

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA HIDRÁULICA**



**“EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN PARA DIFERENTES CAUDALES EN UN  
DESARENADOR TIPO TANQUE APLICANDO MODELACIÓN NUMÉRICA  
TRIDIMENSIONAL: CASO EL RONQUILLO – CAJAMARCA”**

**TESIS**

**PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO HIDRÁULICO**

**AUTOR:**

Bach. GILBERTH EDUARDO CRUZADO MENDOZA

**ASESOR:**

Dr. Ing. LUIS VÁSQUEZ RAMÍREZ

**CAJAMARCA-PERU**

**2023**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco Primeramente a Dios por darme la vida y gozar de buena salud.

A mis padres por su dedicación, paciencia y comprensión  
para la culminación de esta investigación.

Al Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez, mi asesor por el apoyo permanente que permitió  
el desarrollo de la presente investigación.

A mi jurado evaluador que gracias a sus comentarios y observaciones  
fueron de suma importancia a la culminación del presente trabajo,  
así como también, a mi maestro de primaria Arturo Marcelo Quispe Vásquez  
quien me inculcó el amor por el conocimiento.

## DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada con amor y cariño a  
Mis Padres Doris Mendoza Barrantes y Gilberto Cruzado Vásquez,  
por sus enseñanzas, educación amor y por haberme forjado como persona.

A mi hermano Edson Cruzado Mendoza,  
por el apoyo y amor incondicional  
durante todas las etapas de mi vida hasta ahora.

A mi abuelita Luz Consuelo Barrantes Alfaro que,  
desde la gloria de Dios, pueda estar orgullosa de mí.

A mis maestros,  
que cada uno en las diferentes etapas de mi vida,  
impartieron de la mejor manera sus conocimientos hacia mi persona.

A mis amigos  
los cuales me apoyaron y motivaron durante todos estos años.

A mi Pando por su compañía en toda mi etapa universitaria.

## INDICE

AGRADECIMIENTO .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
INDICE DE TABLAS .....	xvi
RESUMEN .....	xx
ABSTRACT.....	xxi
CAPITULO I .....	20
1.1. Planteamiento del Problema .....	20
1.2. Justificación e Importancia de la Investigación.....	21
1.3. Delimitación de la investigación .....	22
1.4. Limitaciones .....	23
1.5. Objetivos.....	24
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO .....	25
2. Bases Teóricas de la Mecánica de Fluidos .....	25
2.1. Definición de Fluido y La ley de Viscosidad de Newton.....	25
2.2. Propiedades de los Fluidos .....	27
2.3. Condición de no-deslizamiento y teoría de la capa limite.....	30
2.4. Sistema y Volumen de Control.....	31
2.5. Teorías de la Cinemática de Fluidos Lagrangiana y Euleriana .....	32
2.6. Teorema del Transporte de Reynolds.....	33

2.7.	Ecuaciones fundamentales de la Mecánica de Fluidos.....	36
2.8.	Conservación de la Cantidad de Movimiento en los Sistemas de Flujo.....	37
2.9.	Ecuación de Bernoulli .....	38
2.10.	Análisis Diferencial del Flujo en los Fluidos.....	40
3.	Fundamentos de hidráulica .....	47
3.1.	Fundamentos y Aspectos Básicos del Flujo a Superficie Libre .....	47
3.2.	Clasificación de los flujos en Conductos Abiertos .....	48
4.	Principios de los desarenadores y su clasificación .....	49
4.1.	Definición de Desarenador .....	49
4.2.	clasificación de los desarenadores .....	49
4.3.	Elementos de un Desarenador .....	51
4.4.	Hidráulica de los desarenadores .....	52
5.	Fundamentos de la dinámica de fluidos computacional .....	67
5.1.	Generalidades e Introducción a CFD.....	67
5.2.	Proceso de Discretización en CFD .....	67
5.3.	Método de los Volúmenes Finitos (MVF).....	70
5.4.	OpenFOAM.....	71
CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS .....		87
6.	Localización del area de estudio .....	87
6.1.	División Política del Área de Estudio.....	87

6.2.	Accesibilidad al lugar de estudio.....	88
7.	Materiales y Equipos Utilizados en la Investigación.....	88
7.1.	Equipos.....	89
7.2.	Materiales e instrumentos.....	90
7.3.	Software computacional.....	90
8.	Características hidráulicas de la Estructura.....	90
8.1.	Descripción de la Estructura.....	90
8.2.	Caudal de operación.....	94
9.	Características Geologicas.....	95
10.	Métodos.....	95
10.1.	Trabajo de Campo.....	96
10.2.	Trabajo de Gabinete.....	97
11.	Cálculo de la Eficiencia de sedimentación.....	119
11.1.	Cálculo de la velocidad de sedimentación.....	122
11.2.	Determinación de las relaciones del grafico de Camp.....	131
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		133
12.	Resultados.....	133
12.1.	Resultados del modelamiento.....	133
12.2.	Resultados de las velocidades de sedimentación.....	136
12.3.	Resultados de los parámetros para el grafico de Camp.....	137

12.4.	Resultados de la eficiencia para cada caudal y diámetro característico.....	140
12.5.	Gráficos de la eficiencia de sedimentación para cada caudal y diámetro característico	
	147	
13.	Discusión de resultados .....	154
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....		
		156
14.	Conclusiones .....	156
15.	Recomendaciones.....	158
CAPÍTULO VI.....		
		159
Referencias Bibliográficas .....		
		159
ANEXOS .....		
		163
16.	Anexo n°1 Levantamiento Topográfico y Toma de Datos de La Estructura .....	164
17.	Anexo n°2 Gráficos de la toma de datos con el sensor tipo correntómetro PASCO ...	169
17.1.	Toma de datos a la entrada.....	169
17.2.	Toma de datos a la salida .....	171
17.3.	Toma de datos del caudal de funcionamiento.....	174
18.	Anexos n°3 Modelado numérico para diferentes caudales mostrando sus respectivas graficas de velocidad de flujo en cada sección. ....	175
18.1.	Modelamiento para un caudal de operación de 30 l/s.....	175
18.2.	Modelamiento para un caudal de operación de 50 l/s.....	178
18.3.	Modelamiento para un caudal de operación de 80 l/s.....	181

18.4.	Modelamiento para un caudal de operación de 100 l/s.....	184
18.5.	Modelamiento para un caudal de operación de 120 l/s.....	187
19.	Anexos n°3 Modelado numérico para diferentes comparando la velocidad de flujo para cada caudal en cada secciones.....	190

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DEFORMACIÓN DE UN FLUIDO AL APLICAR UNA FUERZA CORTANTE. ....	25
FIGURA 2. DIAGRAMA REOLÓGICO.....	26
FIGURA 3. REPRESENTACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS VELOCIDADES DE UN FLUIDO DEBIDO A LA VISCOSIDAD .....	28
FIGURA 4. PISTÓN REPRESENTANDO UN SISTEMA.....	31
FIGURA 5. SUPERFICIE DE CONTROL MOSTRANDO EL FLUJO DE ENTRADA DE MASA .....	32
FIGURA 6. SISTEMA EN MOVIMIENTO Y UN $V. C$ FIJO EN EL ESPACIO EN LOS INSTANTES $T$ Y $T + \Delta T$ .....	33
FIGURA 7. ILUSTRACIÓN DE UN VOLUMEN DE CONTROL DONDE EXISTEN ENTRADAS Y SALIDAS ....	35
FIGURA 8. ILUSTRACIÓN DE LA CONSERVACIÓN DE LA MASA EN UNA SUPERFICIE DE CONTROL.....	37
FIGURA 9. FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE UNA PARTÍCULA DE FLUIDO EN UNA LÍNEA DE CORRIENTE .....	39
FIGURA 10. VOLUMEN DE CONTROL INFINITESIMAL CENTRADO EN UN PUNTO $P$ .....	41
FIGURA 11. FLUJO DE ENTRADAS Y SALIDAS EN UN VOLUMEN DE CONTROL .....	43
FIGURA 12. COMPONENTES DEL TENSOR DE ESFUERZO EN COORDENADAS CARTESIANAS.....	44
FIGURA 13. FLUJO EN UN CANAL ABIERTO .....	47
FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN DE LAS VELOCIDADES EN UN CANAL RECTANGULAR.....	48
FIGURA 15. PARTES TÍPICAS DE UN DESARENADOR .....	52
FIGURA 16. DECANTACIÓN EN AGUAS DE VELOCIDADES BAJAS “ $v$ ” DE ESCURRIMIENTO.....	53
FIGURA 17. DECANTACIÓN CONSIDERANDO LOS EFECTOS RETARDATORIOS DE LA TURBULENCIA. 54	
FIGURA 18. GRAN TURBULENCIA, CAUSANTE DE LA SUSPENSIÓN DE PARTÍCULAS .....	55
FIGURA 19. DIAGRAMA DE VELOCIDADES Y COMPONENTES DE UNA PARTÍCULA EN EL SEDIMENTADOR.....	56

FIGURA 20. PROCESO DE SEDIMENTACIÓN .....	57
FIGURA 21. GRÁFICO DE LAS EXPERIENCIAS DE SELLERIO .....	60
FIGURA 22 . GRÁFICO DE SUDRY PARA HALLAR LA VELOCIDAD HORIZONTAL DE SEDIMENTACIÓN. .....	60
FIGURA 23. GRÁFICO PARA HALLAR LA VELOCIDAD HORIZONTAL DE SEDIMENTACIÓN .....	62
FIGURA 24. GRÁFICO PARA HALLAR LA VELOCIDAD HORIZONTAL DE SEDIMENTACIÓN SEGÚN INDRY .....	64
FIGURA 25. GRÁFICO DE CAMP PARA LA SEDIMENTACIÓN DEL PORCENTAJE DE MATERIAL QUE SEDIMENTA EN EL DESARENADOR .....	66
FIGURA 26. PROCESO DE DISCRETIZACIÓN NUMÉRICA EN CFD.....	68
FIGURA 27. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA DE OPENFOAM.....	72
FIGURA 28. CONFIGURACIÓN DE CONDICIONES INICIALES EN EL FICHERO DE UN CASO DE OPENFOAM .....	73
FIGURA 29. VISUALIZACIÓN DE UN MODELAMIENTO EN PARA VIEW .....	74
FIGURA 30. ESTRUCTURA DE UN CASO EN OPENFOAM.....	75
FIGURA 31. MALLA ESTRUCTURADA EN UN SISTEMA BIDIMENSIONAL .....	77
FIGURA 32. MALLA NO ESTRUCTURADA EN UN SISTEMA BIDIMENSIONAL.....	77
FIGURA 33. VALOR MEDIO Y OTRO FLUCTUANTE DEBIDO A LA TURBULENCIA .....	78
FIGURA 34. ESTRUCTURA DEL SOLVER WATERCHANNEL .....	82
FIGURA 35. ARCHIVOS DE LA CARPETA 0.....	83
FIGURA 36. ARCHIVOS DE LA CARPETA CONSTANT .....	84
FIGURA 37. ARCHIVOS DE LA CARPETA SYSTEM .....	85
FIGURA 38. VISUALIZACIÓN DEL NÚMERO DE COURANT Y LA CONDICIÓN CFL EN UNA MALLA COMPUTACIONAL .....	86

FIGURA 39. LUGAR DE ESTUDIO EN EL DISTRITO DE CAJAMARCA .....	87
FIGURA 40. VÍA DE ACCESO A LA CAPTACIÓN DESDE CEPUNC.....	88
FIGURA 41 . DISTRIBUCIÓN DE LA CAPTACIÓN RONQUILLO .....	91
FIGURA 42. CANAL DE ENTRADA. ....	92
FIGURA 43. PRESEDIMENTADORES Y DESARENADOR DE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL.....	93
FIGURA 44. CANAL DE LIMPIEZA. ....	93
FIGURA 45. DESARENADORES Y ESTRUCTURA DE LIMPIEZA.....	94
FIGURA 46. FORMACIÓN GEOLÓGICA SEGÚN LA GEOLOGÍA DEL CUADRÁNGULO 15F.....	95
FIGURA 47. PROCESO DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DEL DESARENADOR.....	96
FIGURA 48. MUESTRO DE LAS VELOCIDADES. ....	97
FIGURA 49 . PROCESAMIENTO DE LOS PUNTOS OBTENIDOS DEL DESARENADOR.....	98
FIGURA 50. INSERCIÓN DE PUNTOS Y CURVAS DE LA ESTRUCTURA .....	98
FIGURA 51. CREACIÓN DEL SÓLIDO.....	99
FIGURA 52. MALLADO DEL DESARENADOR.....	99
FIGURA 53. REVISIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA MALLA.....	100
FIGURA 54. EXPORTACIÓN DEL MALLADO .....	101
FIGURA 55. CONDICIONES DE CONTORNO DE LA GEOMETRÍA.....	102
FIGURA 56. SECCIÓN DE ENTRADA DE LA SIMULACIÓN DE CALIBRACIÓN EN OPENFOAM .....	111
FIGURA 57. SECCIÓN DE ENTRADA DE LA SIMULACIÓN DE CALIBRACIÓN EN OPENFOAM .....	111
FIGURA 58. MODELADO DE LA ESTRUCTURA PARA 64 L/S.....	114
FIGURA 59. UBICACIÓN DE LAS LÍNEAS DENTRO DE LAS SECCIONES .....	116
FIGURA 60. DESIGNACIÓN DE CADA SECCIÓN. ....	117
FIGURA 61. COMPARACIÓN DE LAS VELOCIDADES PARA CADA SECCIÓN DE LA ESTRUCTURA .....	118

FIGURA 62. COMPARACIÓN DE LAS VELOCIDADES PARA DIFERENTES CAUDALES EN LA SECCIÓN 1	119
.....	
FIGURA 63. GRÁFICA DE LAS VELOCIDADES EN CADA SECCIÓN PARA 30 L/S.....	133
FIGURA 64. GRÁFICA DE LAS VELOCIDADES EN CADA SECCIÓN PARA 50 L/S.....	134
FIGURA 65. GRÁFICA DE LAS VELOCIDADES EN CADA SECCIÓN PARA 80 L/S.....	134
FIGURA 66. GRÁFICA DE LAS VELOCIDADES EN CADA SECCIÓN PARA 100 L/S.....	135
FIGURA 67. GRÁFICA DE LAS VELOCIDADES EN CADA SECCIÓN PARA 120 L/S.....	135
FIGURA 68. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN EN LA SECCIÓN 1 USANDO LA FÓRMULA DE HAZEN	147
FIGURA 69. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN EN LA SECCIÓN 1 USANDO LA FÓRMULA DE SELLERIO	148
.....	
FIGURA 70. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN EN LA SECCIÓN 1 USANDO LA FÓRMULA DE OWENS	149
FIGURA 71. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN EN LA SECCIÓN 1 USANDO LA FÓRMULA DE SUDRY	150
FIGURA 72. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN EN LA SECCIÓN 1 USANDO LA FÓRMULA DE KREY ..	151
FIGURA 73. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN EN LA SECCIÓN 1 USANDO LA FÓRMULA DE INDRY .	152
FIGURA 74. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN EN LA SECCIÓN 1 USANDO LA FÓRMULA DE CORONADO	153
.....	
FIGURA 75. VISTA PANORÁMICA DE LA ESTRUCTURA. ....	164
FIGURA 76. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA ESTRUCTURA. ....	164
FIGURA 77. TOMA DE DATOS DE LA GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA. ....	165
FIGURA 78. TOMA DE DATOS DE LAS VELOCIDADES A LA ENTRADA DE LA ESTRUCTURA. ....	165
FIGURA 79. TOMA DE DATOS DE LAS VELOCIDADES A LA SALIDA DE LA ESTRUCTURA.....	166
FIGURA 80. TOMA DE DATOS DEL CAUDAL DE ENTRADA PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO....	166
FIGURA 81. MEDICIÓN DE LA DISTANCIA PARA MEDIR LA VELOCIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DEL	
FLOTADOR.....	167

FIGURA 82. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DEL FLOTADOR EN LA SECCIÓN 1	
.....	167
FIGURA 83. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DEL FLOTADOR EN LA SECCIÓN 2	
.....	168
FIGURA 84. AGUA TURBIA EN ÉPOCA DE LLUVIA OBSERVADA EN EL CANAL DE ENTRADA	168
FIGURA 85. GRÁFICO DE LA TOMA DE DATOS A LA ENTRADA - PRUEBA 1	169
FIGURA 86. GRÁFICO DE LA TOMA DE DATOS A LA ENTRADA - PRUEBA 2	169
FIGURA 87. GRÁFICO DE LA TOMA DE DATOS A LA ENTRADA - PRUEBA 3.	170
FIGURA 88. GRÁFICO DE LA TOMA DE DATOS A LA ENTRADA - PRUEBA 4.	170
FIGURA 89. GRÁFICO DE LA TOMA DE DATOS A LA ENTRADA - PRUEBA 5.	171
FIGURA 90. GRÁFICO DE LA TOMA DE DATOS A LA SALIDA - PRUEBA 1.	171
FIGURA 91. GRÁFICO DE LA TOMA DE DATOS A LA SALIDA - PRUEBA 2.	172
FIGURA 92. GRÁFICO DE LA TOMA DE DATOS A LA SALIDA - PRUEBA 3.	172
FIGURA 93. GRÁFICO DE LA TOMA DE DATOS A LA SALIDA - PRUEBA 4.	173
FIGURA 94. GRÁFICO DE LA TOMA DE DATOS A LA SALIDA - PRUEBA 5.	173
FIGURA 95. GRÁFICO DE LA TOMA DE DATOS DEL CANAL DE ENTRADA - PRUEBA 1.	174
FIGURA 96. GRÁFICO DE LA TOMA DE DATOS DEL CANAL DE ENTRADA - PRUEBA 2.	174
FIGURA 97. MODELADO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 30 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE SUPERFICIAL DE LAS SECCIONES	175
FIGURA 98. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 30 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE INTERMEDIA DE LAS SECCIONES.	176
FIGURA 99. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 30 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE INTERMEDIA DE LAS SECCIONES.	177

FIGURA 100. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 50 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE SUPERIOR DE LAS SECCIONES. ....	178
FIGURA 101. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 50 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE INTERMEDIA DE LAS SECCIONES. ....	179
FIGURA 102. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 50 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE INFERIOR DE LAS SECCIONES. ....	180
FIGURA 103. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 80 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE SUPERIOR DE LAS SECCIONES. ....	181
FIGURA 104. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 80 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE INTERMEDIA DE LAS SECCIONES. ....	182
FIGURA 105. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 80 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE INFERIOR DE LAS SECCIONES. ....	183
FIGURA 106. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 100 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE SUPERIOR DE LAS SECCIONES. ....	184
FIGURA 107. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 100 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE INTERMEDIA DE LAS SECCIONES. .	185
FIGURA 108. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 100 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE INFERIOR DE LAS SECCIONES. ....	186
FIGURA 109. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 120 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE SUPERIOR DE LAS SECCIONES. ....	187
FIGURA 110. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 120 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE INTERMEDIA DE LAS SECCIONES. .	188
FIGURA 111. MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 120 L/S GRAFICANDO LAS VELOCIDADES TOMADAS EN LA PARTE INFERIOR DE LAS SECCIONES. ....	189

FIGURA 112. COMPARACIÓN DE LAS VELOCIDADES EN LA SECCIÓN 1.....	190
FIGURA 113. COMPARACIÓN DE LAS VELOCIDADES EN LA SECCIÓN 2.....	191
FIGURA 114. COMPARACIÓN DE LAS VELOCIDADES EN LA SECCIÓN 3.....	192
FIGURA 115. COMPARACIÓN DE LAS VELOCIDADES EN LA SECCIÓN 4.....	193

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1. COMPARACIÓN DE LA CAPACIDAD DE DECANTACIÓN SEGÚN EL DISEÑO DE DESARENADOR.....	50
TABLA 2. RELACIÓN ENTRE DIÁMETRO DE LAS PARTÍCULAS Y VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN....	58
TABLA 3. VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN SEGÚN EL P.E. DEL AGUA.....	61
TABLA 4. VALORES DE K PARA GRANOS DE CUARZO SEGÚN EL DIÁMETRO.....	63
TABLA 5. COEFICIENTES SEGÚN EL DIÁMETRO DEL MATERIAL.....	65
TABLA 6. UNIDADES BASE EN SI Y USCS .....	76
TABLA 7. CARACTERÍSTICAS DE LA MALLA A SIMULAR .....	103
TABLA 8. CONFIGURACIÓN PARA EL ARCHIVO DE FRACCIÓN VOLUMÉTRICA INICIAL “ALPHA.WATER” .....	103
TABLA 9. CONFIGURACIÓN PARA EL ARCHIVO K “ENERGÍA CINÉTICA TURBULENATA” .....	104
TABLA 10. CONFIGURACIÓN PARA EL ARCHIVO “NUT” (VISCOSIDAD CINEMÁTICA TURBULENATA) .....	104
TABLA 11. CONFIGURACIÓN PARA EL ARCHIVO “OMEGA ( $\omega$ )” (TASA ESPECÍFICA DE DISIPACIÓN VISCOSA).....	105
TABLA 12. CONFIGURACIÓN PARA EL ARCHIVO “P_RGH” (PRESIÓN MODIFICADA DE INTERFASE) .....	105
TABLA 13. CONFIGURACIÓN PARA EL ARCHIVO “U” (VELOCIDAD).....	106
TABLA 14. CONFIGURACIÓN PARA EL ARCHIVO “G” (GRAVEDAD) .....	106
TABLA 15. CONFIGURACIÓN PARA EL ARCHIVO TRANSPORTPROPERTIES: VISCOSIDAD CINEMÁTICA, DENSIDAD Y TENSIÓN SUPERFICIAL A TEMPERATURA PROMEDIO DE 17° .....	107

TABLA 16. CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO “TURBULENCE PROPERTIES” (PROPIEDADES DE TUBURLENCIA).....	107
TABLA 17. CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO CONTROLDICT .....	108
TABLA 18. CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO SETFIELDSDICT A CIERTO TIRANTE EN LA GEOMETRÍA, CON LA FINALIDAD DE AHORRAR TIEMPO DE SIMULACIÓN EN LA MISMA.....	108
TABLA 19. MUESTREO DE VELOCIDADES EN LA ENTRADA DE LA ESTRUCTURA.....	109
TABLA 20. MUESTREO DE VELOCIDADES EN LA SALIDA DE LA ESTRUCTURA .....	110
TABLA 21. CÁLCULO DEL CAUDAL DE ENTRADA.....	110
TABLA 22. MEDIDA DE LA VELOCIDAD MEDIANTE FLOTADOR DE LA SECCIÓN 1 DEL DESARENADOR .....	112
TABLA 23. MEDIDA DE LA VELOCIDAD MEDIANTE FLOTADOR DE LA SECCIÓN 2 DEL DESARENADOR .....	112
TABLA 24. MEDIDA DE LA VELOCIDAD MEDIANTE FLOTADOR DE LA SECCIÓN 3 DEL DESARENADOR .....	112
TABLA 25. MEDIDA DE LA VELOCIDAD MEDIANTE FLOTADOR DE LA SECCIÓN 3 DEL DESARENADOR .....	113
TABLA 26. VALOR DE LAS ÁREAS MEDIDAS DE CADA SECCIÓN .....	113
TABLA 27. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE LAS VELOCIDADES USANDO DIFERENTES MÉTODOS .....	115
TABLA 28. TIEMPOS DE SIMULACIÓN PARA DIFERENTES CAUDALES.....	116
TABLA 29. COLORES DE LAS LÍNEAS DE RESULTADO PARA CADA SECCIÓN .....	117
TABLA 30. COLORES DE LAS LÍNEAS DE RESULTADO DE VELOCIDAD PARA CADA CAUDAL .....	118
TABLA 31. VALORES DE LAS VELOCIDADES MÁXIMAS VELOCIDADES OBTENIDAS PARA CADA CAUDAL EN LA SECCIÓN 1. ....	120

TABLA 32. VALORES DE LA CONCENTRACIÓN EN PORCENTAJE DE LA MUESTRA DE SEDIMENTOS TOMADAS EN LA ESTRUCTURA .....	120
TABLA 33. CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUELO .....	120
TABLA 34. VALORES Y ABREVIATURAS DEL DIÁMETRO DE LOS GRANOS PARA EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA. ....	121
TABLA 35. VALORES PARA EL CÁLCULO DE LAS VARIABLES DE CAMP .....	131
TABLA 36. VELOCIDADES MÁXIMAS EN LA SECCIÓN I DE LOS RESULTADOS DEL MODELADO PARA CAUDA CAUDAL .....	136
TABLA 37. CUADRO RESUMEN DE LAS VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN MEDIANTE LOS DIFERENTES MÉTODOS .....	136
TABLA 38. RELACIONES DEL GRAFICO DE CAMP PARA LAS VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA 30 L/s.....	137
TABLA 39. RELACIONES DEL GRÁFICO DE CAMP PARA LAS VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA 50 L/s.....	137
TABLA 40. RELACIONES DEL GRAFICO DE CAMP PARA LAS VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA 80 L/s.....	138
TABLA 41. RELACIONES DEL GRAFICO DE CAMP PARA LAS VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA 100 L/s.....	138
TABLA 42. RELACIONES DEL GRAFICO DE CAMP PARA LAS VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA 120 L/s.....	139
TABLA 43. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN PARA LA FÓRMULA DE HAZEN .....	140
TABLA 44. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN PARA LA FÓRMULA DE SELLERIO .....	141
TABLA 45. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN PARA LA FÓRMULA DE OWENS .....	142
TABLA 46. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN PARA LA FÓRMULA DE SUDRY.....	143

TABLA 47. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN PARA LA FÓRMULA DE KREY.....	144
TABLA 48. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN PARA LA FÓRMULA DE INDRY .....	145
TABLA 49. EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN PARA LA FÓRMULA DE CORONADO .....	146
TABLA 50. RANGOS DE VALORES DE LA EFICIENCIA DEL DESARENADOR .....	157

**Palabras clave:**

*Desarenador*, es una estructura diseñada para retener la arena que traen las aguas servidas o las aguas superficiales.

*Modelamiento*, configurar o conformar algo.

*Eficiencia*, capacidad para realizar o cumplir adecuadamente una función.

**RESUMEN**

La presente investigación tuvo como objetivo principal la determinación de la eficiencia de sedimentación aplicando modelamiento numérico tridimensional con el paquete solucionador de CFD OpenFOAM en el desarenador de la bocatoma “El ronquillo”. Este objetivo se consiguió gracias los resultados de la relación de las velocidades obtenidas del modelamiento de la estructura en OpenFOAM y las velocidades de sedimentación halladas por distintas metodologías.

Para alcanzar lo mencionado anteriormente, se recopilaron datos del funcionamiento de la estructura, se realizó un levantamiento topográfico y se midieron las velocidades del agua para el calibramiento del modelo, con esto, se realizaron configuraciones y creaciones ficheros en OpenFOAM con los que se pudo calibrar y recrear condiciones similares, luego, se generó el modelo definitivo para su ejecución. Se ejecutaron los modelos computacionales para caudales de: 30, 50, 80, 100 y 120 lt/s respectivamente, de los cuales, para cada uno se obtuvieron graficas de la velocidad a lo largo de la estructura.

Se determinaron las velocidades de sedimentación de la estructura empleando diferentes metodologías que usan ábacos y fórmulas empíricas. Finalmente, con dichos datos, se determinó la eficiencia de sedimentación para cada uno. Los resultados mostraron que para todas las metodologías, a mayor caudal de operación, la eficiencia disminuye, pero a menor caudal, esta aumenta.

**Keywords:**

*Sand trap*, is a structure designed to retain the sand brought by sewage or surface water.

*Modeling*, configuring or conforming something.

*Efficiency*, ability to adequately perform or fulfill a function.

**ABSTRACT**

The main objective of this research was to determine the sedimentation efficiency by applying three-dimensional numerical modeling with the CFD OpenFOAM solver package in the sand trap of the "El Ronquillo" intake. This objective was achieved thanks to the results of the relationship between the velocities obtained from the modeling of the structure in OpenFOAM and the sedimentation velocities found by different methodologies.

To achieve the aforementioned, data on the operation of the structure were collected, a topographic survey was carried out and the water speeds were measured for the calibration of the model, with this, configurations and creations of files were made in OpenFOAM with which it could be calibrated. and recreate similar conditions, then the final model for its execution was generated. The computational models were executed for flows of: 30, 50, 80, 100 and 120 lt/s respectively, of which, for each one, velocity graphs along the structure were obtained.

The sedimentation rates of the structure were determined using different methodologies that use abacuses and empirical formulas. Finally, with said data, the sedimentation efficiency for each one was determined. The results showed that for all the methodologies, the higher the operating flow, the efficiency decreases, but the lower the flow, it increases.

## **CAPITULO I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1.1. CONTEXTUALIZACIÓN**

En la actualidad la mayoría de obras de tomas para potabilización, irrigación y de aprovechamientos hidroeléctricos, se realiza una operación que consiste en la separación de las partículas que son transportadas por el agua, dicha operación se lleva a cabo por estructuras llamadas deglavadores o desarenadores. (Coronado, 2004).

Actualmente para el diseño de un desarenador, se deben tener en cuenta un límite de velocidades, así como una geometría adecuada. (Autoridad Nacional del Agua, 2010).

El manejo de sólidos es de suma importancia en el diseño de una bocatoma, ya que esta suele diseñarse de manera que no ingresen sólidos de mayor tamaño, al mismo modo, es inevitable el ingreso de sedimento fino, por esta razón a continuación de la misma se tiene que disponer de un desarenador. (Rocha, 2003)

En la mayoría de las obras hidráulicas, las velocidades de entrada suelen ser lo suficientemente elevadas que terminan acarreado partículas de diferentes tamaños, esto ocurre en tiempo de crecientes por lo que entran a la estructura, grandes cantidades de sedimentos. (Krochin, 1986)

Debido a la alta degradación de las aguas naturales, se toma en cuenta el desarrollo de componentes que ayuden a la separación de sustancias y sólidos que afecten la potabilidad de la misma, es por ello que el humano ha desarrollado diferentes técnicas para cada fase, en el caso del desarenador, son estructuras que permiten captar y eliminar diferentes partículas que acarrea el agua devolviéndolas al cauce de donde se capta la misma. (Albuja et al., 2013)

### **1.1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

El desarenador ubicado luego de la bocatoma “El Ronquillo”, es una estructura hidráulica con cierta antigüedad. que capta agua para abastecimiento al 30% de la ciudad de Cajamarca, a lo largo del tiempo de funcionamiento, ha experimentado problemas de eficiencia para sedimentar en épocas de lluvias, a pesar de que existe un tanque decantador antes de la misma, por lo que los operarios suelen disminuir el caudal de entrada a la estructura y por ese motivo, se ve mermado la dotación para los pobladores debido a que dichos caudales presentan una gran concentración de sedimentos lo cual extiende su tiempo de tratamiento y se utiliza más polímero de lo habitual, es por ello que, la necesidad de comprender el funcionamiento en de una estructura así, en casos donde se tenga elevado caudal, deja abierta la incertidumbre de saber si el desarenador opera o no de manera adecuada en dichas situaciones. El modelado tridimensional nos permite saber el comportamiento hidráulico de una estructura en sus tres dimensiones, que en este caso es un desarenador el cual por su naturaleza presenta velocidades muy bajas de funcionamiento y además una geometría irregular.

### **1.1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

El análisis de la problemática lleva a plantear la siguiente interrogante de la investigación:

¿De qué manera se puede estimar la eficiencia de sedimentación en el desarenador de la captación

El ronquillo aplicando modelación numérica tridimensional?

## **1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1. JUSTIFICACIÓN CIENTÍFICA**

La investigación busca validar y contrastar la dinámica de fluidos computacional que desarrolla el paquete OpenFOAM para la obtención en este caso de velocidades de flujo de un modelo de

desarenador la cual será de suma importancia para el desarrollo de investigaciones futuras de este tipo.

### **1.2.2.JUSTIFICACIÓN TÉCNICA – PRÁCTICA**

El resultado de la investigación ayudará a futuros proyectos hidráulicos donde el modelamiento sea necesario para tener en cuenta el comportamiento hidráulico de la estructura, para así, ahorrar recursos.

### **1.2.3.JUSTIFICACIÓN INSTITUCIONAL Y PERSONAL**

La investigación se justifica institucionalmente porque la Universidad Nacional de Cajamarca participa en el desarrollo económico y social de la región mediante investigaciones que aportan en el conocimiento científico y práctico aplicables a diversas realidades y las cuales permitirán un desarrollo sostenible, y desde el punto de personal, lo hace, porque permitirá obtener el título profesional de Ingeniero Hidráulico.

## **1.3. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La presente investigación y toma de datos de la estructura se llevaron a cabo en el año 2022 y 2023, en el desarenador de la bocatoma “El Ronquillo”, distrito de Cajamarca, provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca, Perú. Con respecto a la estructura, se analizará y modelará el desarenador principal que se encuentra a continuación del tanque de decantación; entre el canal y la cámara de reunión. Además para cálculos de eficiencia, se tomarán los diámetros más desfavorables de arena y limo de la clasificación internacional de la granulometría del suelo.

#### 1.4. LIMITACIONES

Las limitaciones que se presentan en la presente investigación son las siguientes:

- No se realizará el modelado de la topografía de sedimentos y movimiento de sedimentos en la estructura, ya que es variable con el tiempo y el paquete solucionador desarrollado para la investigación se enfoca en el comportamiento hidráulico de la misma.
- La toma de datos de velocidades en campo del desarenador ya que al ser muy bajas, los instrumentos convencionales no tienen la sensibilidad para medirlas, por lo que se optaron por otros métodos.
- No se tomará en cuenta el efecto del presedimentador y al tanque decantador que están antes del desarenador, ya que según la cantidad de sedimentos decantados que hayan en estas estructuras, influirá en el paso de sedimentos al desarenador.
- La geometría de la estructura en la parte de las secciones ya que al ser muy pequeñas (5 cm.) y el resto de la estructura muy grande, el mallado presentaba no ortogonalidad por tanto se realizaron ajustes para un mejor modelado.
- El modelado con la estructura vacía, al contener mucho volumen de agua, el tiempo que tardaría en llenarse (en tiempo real son 4 horas) en el modelado sería excesivo ya que serían semanas para dotar completamente la estructura de agua en el modelado computacional, para mitigar esta limitación, en uno de los ficheros se configuró que se encuentre llena y modelarla a partir de ese funcionamiento.

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1.OBJETIVO GENERAL**

- Estimar la eficiencia de sedimentación utilizando diferentes caudales en el desarenador tipo tanque de la captación El Ronquillo aplicando modelación numérica tridimensional.

### **1.5.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Obtener la geometría detallada de la estructura, recopilar datos de funcionamiento de la estructura
- Realizar un calibramiento del modelo, realizar el mallado y ejecutar el modelo en OpenFoam
- Analizar el comportamiento hidráulico del desarenador mediante la variación de caudales de ingreso
- Obtener los valores de las máximas velocidades alcanzadas en las secciones
- Determinar la eficiencia de sedimentación para diferentes diámetros de granos utilizando diferentes metodologías.

## CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

### 2. BASES TEÓRICAS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS

#### 2.1. DEFINICIÓN DE FLUIDO Y LA LEY DE VISCOSIDAD DE NEWTON

Se denomina fluido al estado líquido y gaseoso en el que se encuentra la materia, una de las características que diferencia al fluido de un sólido es la capacidad que este tiene para deformarse continuamente cuando se le aplica un esfuerzo cortante por más mínimo que este sea, mientras que en el sólido su deformación es proporcional a la fuerza con la que se le aplique, en el caso del fluido, la fuerza es proporcional a la razón de la deformación, es decir que se seguirá deformando mientras actúe en el un esfuerzo cortante. (Cengel & Cimbala, 2006).

Para explicar mejor, se considera un bloque rectangular confinado por dos placas grandes para despreciar las condiciones de borde donde la placa inferior esta estática y la superior es jalada en un sentido con una fuerza  $F$ , la cual provoca un esfuerzo cortante  $F/A$  sobre la superficie del fluido, donde  $A$  es el área de contacto. El fluido en el área delimitada por los puntos  $a b c d$  se mueve a una nueva posición  $a b' c' d$ , debido a ello, se puede notar un movimiento paralelo de las partículas respecto a la placa con una velocidad de valor cero en el punto de la placa fija y  $U$  en la placa móvil. En relación, se tiene que,  $F$  es directamente proporcional a  $U$  y a “ $A$ ” e inversamente proporcional al espesor  $e$  (Streeter et al., 2000):

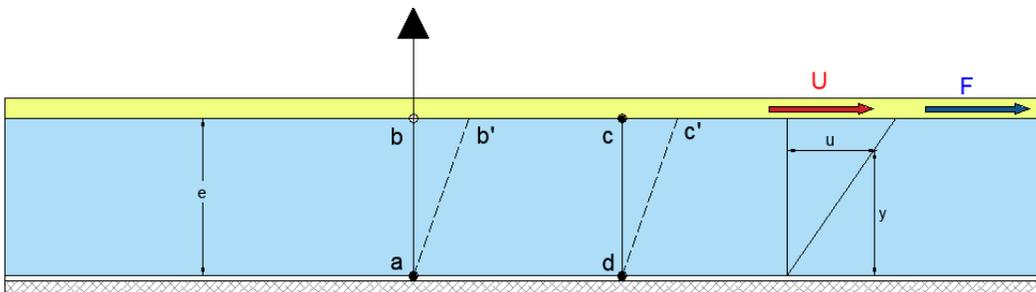


Figura 1. Deformación de un fluido al aplicar una fuerza cortante.

Fuente: Adaptado de Streeter et al. (2000)

$$F = \mu \frac{A \cdot U}{e} \quad (1)$$

Donde  $\mu$  es un factor de proporcionalidad que se conoce como viscosidad del fluido, el cual incide en el tipo de fluido, despejando  $F$  de la ecuación del esfuerzo cortante  $\tau = \frac{F}{A}$ , se tiene:

$$\tau = \mu \frac{U}{e} \quad (2)$$

La relación  $U/e$ , es la velocidad angular de la línea  $ab$  conocida también como la tasa de la deformación angular del fluido  $\alpha$ , en términos diferenciales debido a la variación que puede presentar la velocidad angular y el esfuerzo cortante con respecto a  $e$ , la relación que se expresa es la ley de viscosidad de Newton:

$$\tau = \mu \frac{du}{de} \quad (3)$$

De acuerdo a la relación anterior, los fluidos se clasifican en newtonianos y no newtonianos, los newtonianos presentan una relación lineal entre la medida del esfuerzo cortante y la tasa de deformación resultante, y los no newtonianos, dicha relación es no lineal o presentan un esfuerzo de fluencia inicial.

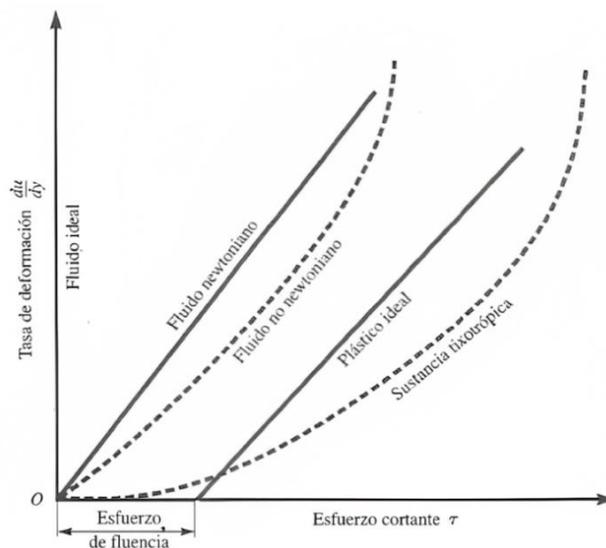


Figura 2. Diagrama reológico  
Fuente: Recopilado de (Streeter et al., 2000)

## 2.2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Las propiedades de los fluidos son consideradas como el estado de un sistema, los cuales dependen de la masa y tamaño del mismo y se clasifican en propiedades intensivas y propiedades extensivas (Cengel & Cimbala, 2006):

- Propiedades intensivas: Las propiedades intensas son aquellas que no dependen de la masa del sistema y son; la temperatura, la densidad y la presión.
- Propiedades extensivas: Las propiedades intensidad son aquellas que dependen del tamaño del sistema y se tienen; el volumen, la masa y la cantidad de movimiento, todas ellas en su totalidad. Las propiedades extensivas por unidad de masa tienen el nombre de Propiedades específicas, un claro ejemplo es el volumen específico y la energía total específica.

Algunas propiedades principales que clasifica, después de realizar una comparación entre líquidos y gases, siendo estos un fluido. (Mataix C.,1993)

- Densidad específica o absoluta: Esta propiedad está en función de la temperatura y la presión, su ecuación y su análisis dimensional:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Donde:

m = masa en Kg, en el SI

V = volumen m<sup>3</sup>, en el SI

$$[\rho] = [M][L]^{-3}$$

- Peso específico: Se relaciona como el peso por unidad de volumen

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (5)$$

Su análisis dimensional:  $[\gamma] = \frac{[W]}{[V]} = [M][L]^{-2}[T]^{-2}$ , cuyas unidades en el SI serían  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^2$

- Densidad relativa: Se refiere a la relación entre la masa del fluido y la masa del agua destilada a  $4^\circ\text{C}$  y a presión atmosférica, despejando se tiene una relación entre el peso específico el fluido y el peso específico del agua bajo esas condiciones.

- Volumen específico: en el sistema internacional se define como la relación inversamente proporcional con la densidad absoluta; el volumen que ocupa en 1 kg. De masa.

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (6)$$

$$[v] = [L]^3 [M]^{-1}$$

- Viscosidad: La viscosidad en los fluidos se clasifican entre viscosidad dinámica y viscosidad cinemática:

i) Viscosidad Dinámica: Se refiere a la fricción interna de las moléculas de fluido que cuando son sometidas a un esfuerzo cortante se comportan como laminas paralelas las cuales van siendo desplazadas, el mayor desplazamiento se da en donde está más próximo el esfuerzo, y en donde esté más alejado, casi ni se moverán.

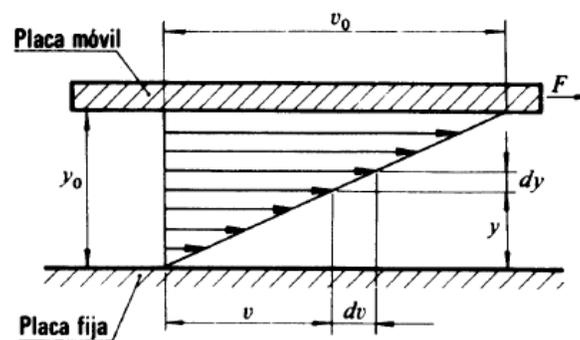


Figura 3. Representación de la distribución de las velocidades de un fluido debido a la viscosidad

Fuente: (Mataix, 1993)

ii) Viscosidad Cinemática: La hidrodinámica también se ve afectada por el efecto de inercia además del de la viscosidad, por lo que la viscosidad cinemática queda definida como la relación entre la viscosidad dinámica entre la densidad del fluido:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (7)$$

- Tensión superficial: se define como la fuerza de cohesión intermolecular del fluido que genera una capa muy delgada en la superficie de este. Si en esta superficie se proyectara una línea, la tensión superficial queda precisado como la fuerza normal a esa línea por unidad de longitud.

$$[\sigma] = [F][L]^{-1}$$

- Tensión de vapor: Se refiere a las moléculas que tienden a escapar de la superficie de un fluido a cierta presión, si se lo considerara en un recipiente cerrado la cantidad de moléculas que escaparían sería cierto valor hasta alcanzar un equilibrio, pero si se le introdujera más presión entonces la cantidad variaría, a dicha cantidad en ciertas condiciones de presión se lo conoce como tensión de vapor.

- Presión: Se refiere a la fuerza  $F$  que es originada por el peso de un fluido dirigida a un área de contacto  $A$

$$P = \frac{F}{A} \quad (8)$$

Se distinguen 5 propiedades de la presión en los fluidos:

- i) El principio de pascal, el cual indica que la presión en un punto de un fluido en reposo es igual en todas direcciones
- ii) Las presiones en diversos puntos ubicados en una línea horizontal de un fluido en reposo son las mismas

- iii) La presión que se genera al interior de un fluido en reposo, puede ser representado como dos partes de las cuales una se encuentra encima de la otra y tienen la característica que la dirección de dicha presión es normal a la línea hipotética de división.
- iv) La presión en un fluido siempre será en dirección interna, la presión absoluta jamás es negativa.
- v) Un fluido en reposo siempre presentara una superficie horizontal

La ecuación dimensional de la presión:

$$[P] = [F][L]^{-2} = [M][L]^{-1}[T]^{-2}$$

Sus unidades en el Sistema Internacional son el N/m<sup>2</sup>.

- Presión dinámica: esta presión proviene de la ecuación de Euler, donde el segundo término es la presión dinámica la cual representa un incremento adicional al de la presión estática sobre la superficie de movimiento.

$$q = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (9)$$

### **2.3. CONDICIÓN DE NO-DESLIZAMIENTO Y TEORÍA DE LA CAPA LIMITE**

Generalmente el fluido se encuentra moviéndose a través de superficies sólidas, por lo que, consideraron estas dos particularidades (Cengel & Cimbala, 2006):

- Condición de no-deslizamiento

La condición de no deslizamiento se da por el efecto de la viscosidad; cuando el fluido choca o pasa cerca de una superficie en reposo, este tiende a disminuir su velocidad hasta hacerla cero, hay un caso excepcional como son las superficies curvas donde el fluido ya no es adherido a la superficie, este fenómeno es conocido como separación de flujo.

- Teoría de Capa límite

Se considera capa límite a la región donde se aprecian los esfuerzos cortantes ocasionados por la viscosidad del fluido, se divide en dos regiones; región de capa límite, donde se denota el cambio de velocidad debido a la viscosidad, y la región de flujo irrotacional, en la cual los efectos de fricción se pueden despreciar de manera que la velocidad es constante en una dirección radial.

## 2.4. SISTEMA Y VOLUMEN DE CONTROL

Streeter et al. (2000), tienen por concepto lo siguiente:

- Sistema: Se llama sistema a un espacio que tiene masa y volumen fijo y que está delimitado por un contorno separándolos de los demás que vendría a ser el medio ambiente, existen sistemas abiertos y cerrados, un claro ejemplo de sistema es un gas encerrado dentro de un pistón el cual puede ser comprimido.

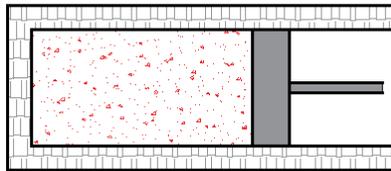


Figura 4. Pistón representando un sistema  
Fuente: Adaptado de (Streeter et al., 2000).

- Volumen de control: El volumen de control viene a ser un sistema abierto, el cual se caracteriza por ser una región fija en el espacio y está delimitado por la superficie de control donde se es capaz de estudiar todos los fenómenos que ocurren en ella, un volumen de control no tiene un tamaño definido, ya que en la mayoría de ocasiones se considera el espacio donde se va a trabajar, ya sea una turbina, una tobera, etc.

-

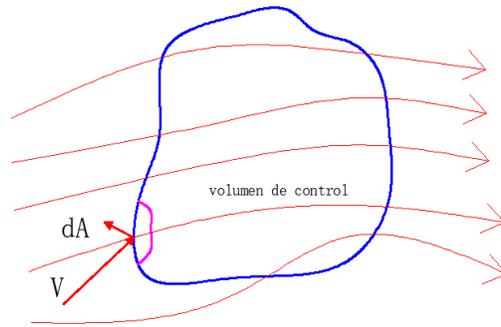


Figura 5. Superficie de control mostrando el flujo de entrada de masa

Fuente: Adaptado de (Streeter et al., 2000)

## 2.5. TEORÍAS DE LA CINEMÁTICA DE FLUIDOS LAGRANGIANA Y EULERIANA

Para los cálculos de los flujos en donde intervienen el movimiento de las partículas fluidas existen dos puntos de vista según (Shames, 1995):

- i. Euleriano: En este enfoque se analizan las partículas de fluido como sistema estático, es decir las partículas de fluido son analizadas en una sección fija en el espacio con coordenadas fijas  $X_1, Y_1, Z_1$ , en donde se estudian las velocidades, presión y aceleración que pasan por esa sección en cualquier instante, una función de la velocidad podría ser expresada como  $V(x_1, y_1, z_1, t)$
- ii. Lagrangiano: El enfoque lagrangiano permite estudiar a las partículas siguiendo su recorrido en el tiempo, por lo que  $X, Y, Z$  en la expresión de la velocidad  $V(x, y, z, t)$  no permanecen fijas en el espacio si no que cambian su posición en cada instante. Se dice que, para cada partícula de agua,  $x(t), y(t), z(t)$  se encuentran en función del tiempo, es así que, para centrarse en una partícula en una función temporal, se puede decir que:

$$V_x = f[x(t), y(t), z(t), t]$$

$$V_y = g[x(t), y(t), z(t), t] \tag{10}$$

$$V_z = h[x(t), y(t), z(t), t]$$

## 2.6. TEOREMA DEL TRANSPORTE DE REYNOLDS

Los principios de la mecánica de fluidos pueden ser considerados de la mecánica de sólidos donde sus leyes se trabajan con las variaciones respecto del tiempo de las propiedades extensivas de los sistemas por otro lado en la mecánica de fluidos es más conveniente trabajar con un volumen de control, es así que el Teorema de Transporte de Reynolds (TTR) proporciona una relación con respecto a las variaciones de tiempo de una propiedad extensiva tanto para un sistema como para un volumen de control.

El análisis del TTR se puede concluir al estimarse un sistema de dimensiones e interacciones cualesquiera, que junto con el volumen de control comparten las mismas medidas y que contienen una propiedad extensiva  $P$  como puede observarse en la figura (6) es así que al coincidir el sistema con el volumen de control en un instante inicial  $t$ , los dos son iguales, después de una variación  $\Delta t$ , el sistema se mueve hacia una dirección de flujo, con velocidades uniformes en  $V_1$  en (I) y con  $V_2$  en (II). Entonces en el instante  $t + \Delta t$ , el sistema es el mismo fluido, pero con diferente posición, mientras el Volumen de control (VC) sigue fijo en el espacio. (Cengel & Cimbala, 2006).

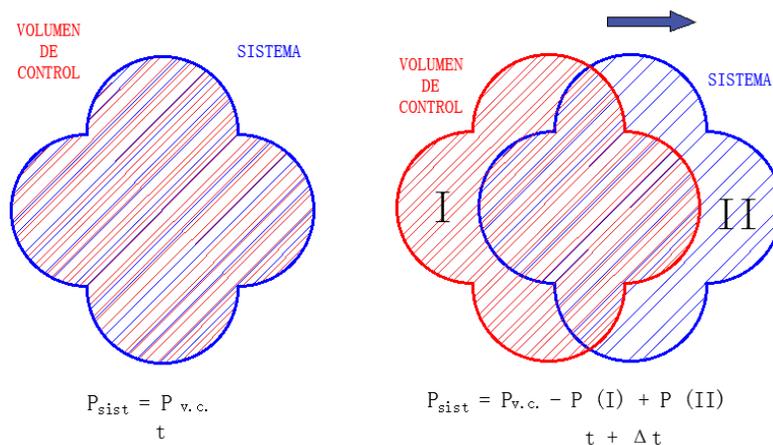


Figura 6. Sistema en movimiento y un V. C fijo en el espacio en los instantes  $t$  y  $t + \Delta t$

Fuente: Adaptado de (Streeter et al., 2000)

La propiedad extensiva  $P$  (masa, energía o cantidad de movimiento), en el instante  $t + \Delta t$ , puede deducirse como:

$$P_{sist,t} = P_{VC,t} \quad (11)$$

$$P_{sist,t+\Delta t} = B_{VC,t+\Delta t} - P_{I,t+\Delta t} + P_{II,t+\Delta t} \quad (12)$$

Restándole a (11) la ecuación (10) y dividiendo entre  $\Delta t$ , se tiene:

$$\frac{P_{sist,t+\Delta t} - P_{sist,t}}{\Delta t} = \frac{P_{VC,t+\Delta t} - P_{VC,t}}{\Delta t} - \frac{P_{I,t+\Delta t}}{\Delta t} + \frac{P_{II,t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (13)$$

Utilizando como el límite cuando  $\Delta t \rightarrow 0$ :

$$\frac{dP_{sist}}{dt} = \frac{dP_{VC}}{dt} - \dot{P}_{ent} + \dot{P}_{sal} \quad (14)$$

De la ecuación (13) se puede deducir que  $\dot{P}_{ent}$  es el flujo de entrada y  $\dot{P}_{sal}$  es el de salida, y las velocidades son normales al sistema, pero también se tiene que considerar que se puede tener varias salidas y entradas y que dichas velocidades no sean normales a la superficie de control (SC).

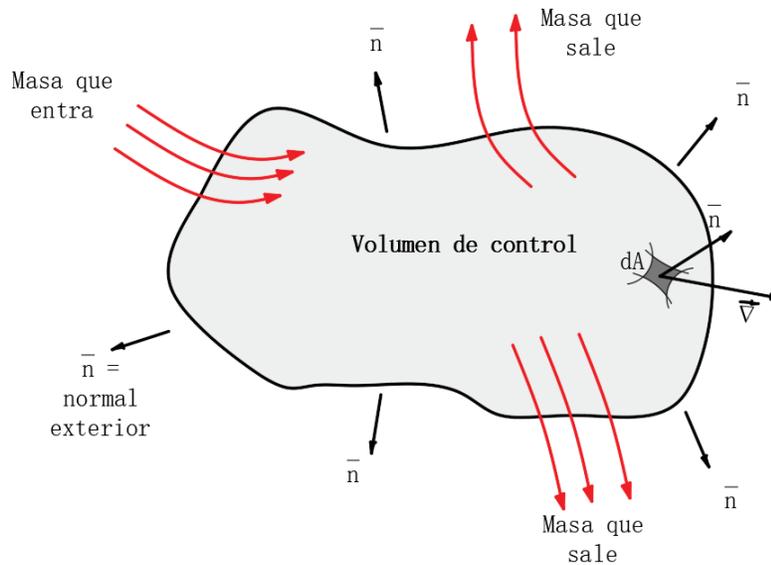


Figura 7. Ilustración de un volumen de control donde existen entradas y salidas

Fuente: Adaptado de (Streeter et al., 2000)

Por ello es para generalizar se considera una superficie diferencial  $dA$ , sobre SC con un vector normal unitario  $\vec{n}$ . El valor del gasto de la propiedad intensiva  $b$  mediante  $dA$  es  $\rho P \vec{V} \cdot \vec{n} dA$  permitiendo esta ecuación hallar la componente de la velocidad, la razón neta de flujo a través de la SC, mediante integración:

$$\dot{P}_{neta} = \dot{P}_{sal} - \dot{P}_{ent} = \int_{SC} b \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (15)$$

En un VC las propiedades cambian con respecto a su posición, por tanto:

$$P_{VC} = \int_{VC} \rho P dV \quad (16)$$

Donde:

- $P$  = una propiedad extensiva cualesquiera.
- $\vec{V}$  = vector velocidad.
- $V$  = volumen de un volumen de control (VC).
- $b$  = propiedad intensiva de  $P$ .

-  $\rho$  = densidad del fluido.

Sustituyendo las ecuaciones (15) y (14) en la (13), se despeja el TTR, el cual se aplica para cualquier propiedad a analizar:

$$\frac{dP_{sist}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho P dV + \int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (17)$$

## 2.7. ECUACIONES FUNDAMENTALES DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS

### 2.7.1. CONSERVACIÓN DE LA MASA.

De la ecuación del transporte de Reynolds se concluye que existe una relación entre las variaciones temporales de los instantes  $t$ , las integrales del volumen y de superficie de volumen de control. Si se eliminan las derivadas de tiempo, se obtiene una ecuación que representa las leyes básicas de la mecánica de fluidos en forma integral, además las variables de la propiedad  $P$  representa la masa, cantidad de movimiento, momento cinético y la energía, en ese orden sucesivo de acuerdo a (White, 2004).

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{sist} = 0 = \frac{d}{dt} \int_{VC} (\rho P V) + \int_{SC} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (18)$$

La cual señala que la masa  $m$  del sistema es constante en todo instante, y si el volumen de control tiene un número determinado de entradas y salidas unidimensionales, la expresión es:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} P V + \int_{SC} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (19)$$

Si el flujo del volumen de control es estacionario, entonces  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ , por tanto, la ecuación anterior quedaría como:

$$\int_{SC} \rho(V \cdot n) dA = 0 \quad (20)$$

Donde se deduce que el flujo que entra y el flujo que sale deben ser lo mismo, si se considera que las entradas y salidas son unidimensionales, en un flujo estacionario se tiene:

$$\sum_i (\rho_i A_i V_i)_{entradas} = \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{salidas} \quad (21)$$

De esta manera la expresión  $\rho AV$  representa al flujo másico  $\dot{m}$  y del cual, si se consideran que las entradas y salidas no son unidimensionales,  $\dot{m}$  se obtiene mediante integración y la ecuación que gobierna es:

$$\dot{m} = \int_{SC} \rho(V \cdot n) dA \quad (22)$$

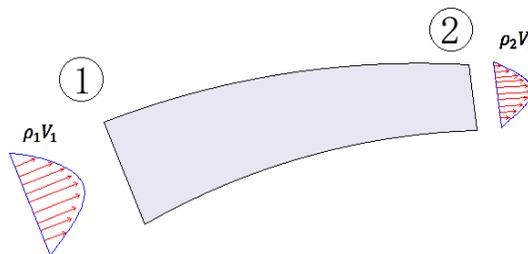


Figura 8. Ilustración de la conservación de la masa en una superficie de control

Fuente. Adaptado de (White, 2004)

## 2.8. CONSERVACIÓN DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO EN LOS SISTEMAS DE FLUJO

De la segunda ley de Newton, la cantidad que se deriva es la cantidad de movimiento de la cual se infiere que, en un sistema cuando las fuerzas que actúan sobre él son cero lo cual implica que la cantidad de movimiento se mantiene constante entonces esta se conserva y es conocida como el

principio de cantidad de movimiento. La variable  $mV = P$  y  $V = dB/dm$ , en la ecuación (16) del TTR para un volumen de control (White, 2004):

$$\frac{d(mV)_{sist}}{dt} = \sum F = \frac{d}{dt} \int_{VC} V \rho dV + \int_{SC} V \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (23)$$

Se consideran 3 puntos importantes de la ecuación:

- $V$  representa la velocidad del fluido en un sistema de coordenadas sin aceleración
- $\sum F$  es la sumatoria de todas las fuerzas que interactúan sobre el volumen de control.
- la ecuación es una relación vectorial debido a  $V$  y que además está orientada a un eje de coordenadas.

Si se desea saber  $\sum F_y$  y  $\sum F_z$  los vectores que interactúan son  $v$  (velocidad en  $y$ ) y  $w$  (peso en  $z$ ), por lo tanto, para un volumen de control fijo, la ecuación anterior, es la forma para la mayor parte de los análisis de cantidad de movimiento.

## 2.9. ECUACIÓN DE BERNOULLI

La ecuación de Bernoulli considera un efecto viscoso casi nulo a comparación de las fuerzas gravitacionales y de presión, por lo que se enfoca mayormente en una zona alejada de la capa limite donde queda claro que los efectos viscosos son los predominantes, entonces se deduce que la ecuación de Bernoulli no es aplicable en todas las partes del fluido (Cengel & Cimbala, 2006).

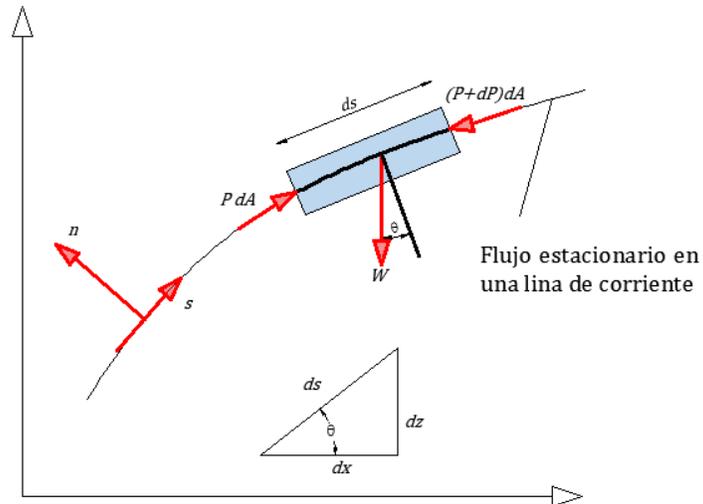


Figura 9. Fuerzas que actúan sobre una partícula de fluido en una línea de corriente  
 Fuente: Adaptado de (Cengel & Cimbala, 2006)

La obtención de su ecuación parte del movimiento de una partícula en una dirección  $s$  en un campo de flujo estacionario y aplicando la 2<sup>da</sup> ley de Newton;

$$\sum F_s = ma_s \quad (24)$$

Las fuerzas que actúan sobre esa partícula serian la presión y la gravedad, por tanto, la ecuación:

$$P dA - (P + dP)dA - W \text{ sen}\theta = m V \frac{dV}{ds} \quad (25)$$

Simplificando y cancelando términos y dividiendo entre la densidad  $\rho$  en ambos términos, la expresión seria:

$$\frac{dP}{\rho} + \frac{1}{2} d(V^2) + g dz = 0 \quad (26)$$

Si se lo integra con respecto una dirección

$$\int \frac{dP}{\rho} + \frac{(v^2)}{2} + g dz = 0 \quad (27)$$

Y además se considera un flujo estacionar e incompresible a lo largo de una línea de corriente, se obtiene la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{(v^2)}{2} + gz = 0 \quad (28)$$

## 2.10. ANÁLISIS DIFERENCIAL DEL FLUJO EN LOS FLUIDOS

### 2.10.1. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

Las ecuaciones diferenciales que gobiernan la ecuación de continuidad en los fluidos pueden ser obtenida mediante la aplicación del teorema de transporte de Reynolds en un volumen de control, debido que la ecuación (17) es válida para flujos estáticos o dinámicos cuando hay entradas y salidas definidas (Cengel & Cimbala, 2006).

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \sum_{ent} \dot{m} - \sum_{sal} \dot{m} \quad (29)$$

Para definir una ecuación diferencial que explique la conservación de la masa es necesario aplicar el Teorema de Gauss el cual facilita transformar la formal integral de volumen de la divergencia de un vector en una integral de área sobre la superficie del volumen, para un vector  $\vec{G}$ , su divergencia;  $\vec{\nabla} \cdot \vec{G}$ , se tiene:

$$\int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{G} dV = \oint_A \vec{G} \cdot \vec{n} dA \quad (30)$$

Sustituyendo la ecuación (29) en la de la conservación de la masa (19), para convertir en una integral de volumen:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{VC} \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) dV = 0 \quad (31)$$

Asociando la integral en una sola y el integrando siendo igual a cero, se encuentra la ecuación de continuidad en su forma diferencial para cualquier volumen de control

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (32)$$

En el caso para un volumen de control infinitesimal se supone una caja con coordenadas cartesianas y con dimensiones de la caja  $dx$ ,  $dy$  y  $dz$ . Donde los vectores velocidad son  $u$ ,  $v$  y  $w$  y la densidad  $\rho$  son de un punto arbitrario  $P$ .

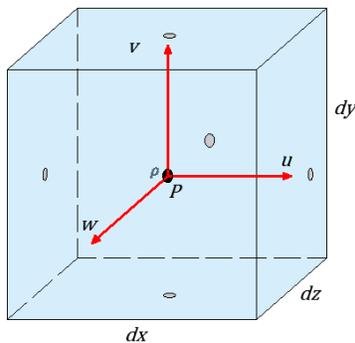


Figura 10. Volumen de control infinitesimal centrado en un punto P

Fuente: Adaptado de (Cengel & Cimbala, 2006)

Para expresar los valores de posiciones alejadas del centro se usa la serie de expansión de Taylor despreciando los términos de segundo y tercer orden de la misma debido a que se encoge el volumen de control hacia un punto, entonces aplicando a la densidad por las componentes de la velocidad a las 6 caras:

- Centro de la cara derecha :  $\rho u \cong \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{dx}{2}$
- Centro de la cara izquierda :  $\rho u \cong \rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{dx}{2}$
- Centro de la cara frontal :  $\rho w \cong \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{dz}{2}$
- Centro de la cara posterior :  $\rho w \cong \rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{dz}{2}$
- Centro de la cara superior :  $\rho v \cong \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{dy}{2}$
- Centro de la cara inferior :  $\rho v \cong \rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{dy}{2}$

Entonces en la ecuación (28) se aplican todas las aproximaciones de manera que se suman todas las razones de flujo de entrada y salida del volumen de control a través de las caras del volumen infinitesimal. La razón de flujo de masa de entrada y salida, sería:

$$\Sigma_{ent} \dot{m} \cong \left( \rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dydz + \left( \rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz + \left( \rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dx dz \quad (33)$$

$$\Sigma_{sal} \dot{m} \cong \left( \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dydz + \left( \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz + \left( \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dx dz \quad (34)$$

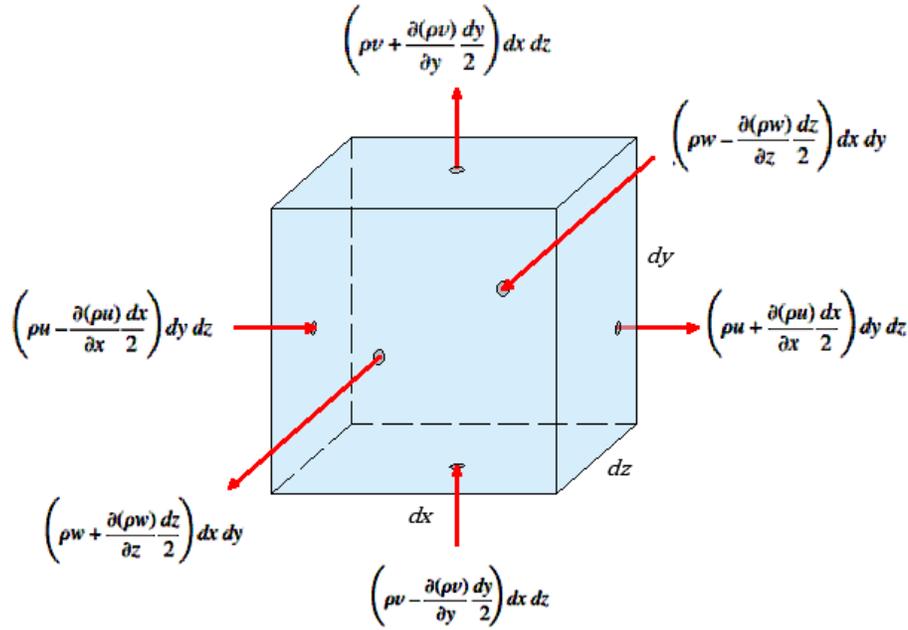


Figura 11. Flujo de entradas y salidas en un volumen de control

Fuente: Adaptado de (Cengel & Cimbala, 2006)

Ecuación diferencial de la Conservación de Cantidad de Movimiento: Ecuación de Cauchy , la ecuación general de la conservación de cantidad de movimiento puede deducirse aplicando el teorema de transporte de Reynolds a un volumen de control fijo o en movimiento, se tiene una variable  $\sigma_{ij}$  la cual se define como el tensor de esfuerzo (Cengel & Cimbala, 2006):

$$\sum \vec{F} = \int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{SC} \sigma_{ij} \vec{n} dA = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{V}) dV + \int_{SC} (\rho \vec{V}) \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (35)$$

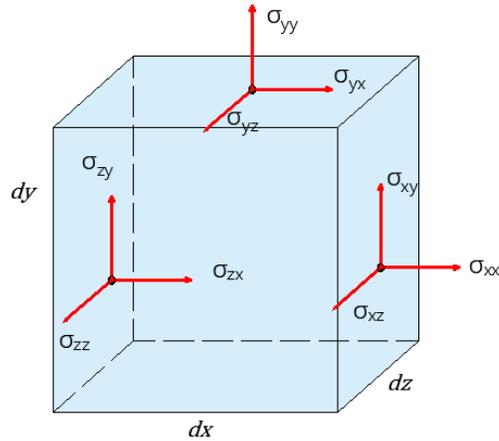


Figura 12. Componentes del tensor de esfuerzo en coordenadas cartesianas

Nota. Adaptado de (Cengel & Cimbala, 2006)

Para su deducción se utiliza el teorema de divergencia el cual define al volumen de control a partir de un área de superficie sustituyendo  $(\rho \vec{V}) \vec{V}$  por  $G_{ij}$  y del resultado, los productos  $\vec{V} \vec{V}$  (producto punto vectorial) se sustituyen por el tensor de esfuerzo  $\sigma_{ij}$ , las ecuaciones resultantes:

$$\int_{SC} (\rho \vec{V}) \vec{V} \cdot \vec{n} dA = \int_{SC} \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) dV \quad (36)$$

$$\int_{SC} \sigma_{ij} \cdot \vec{n} dA = \int_{SC} \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} dV \quad (37)$$

Cuando se aplican las ecuaciones (35) y (36) en la ecuación (34), el resultado debe ser una nueva la cual es expresada para cualquier volumen de control sin importar tamaño y forma y por lo tanto la forma que toma es conocida como la ecuación diferencial general para la conservación de cantidad de movimiento o ecuación de Cauchy:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{g} + \nabla \cdot \sigma_{ij} \quad (38)$$

### 2.10.2. ECUACIONES DE NAVIER-STOKES.

La ecuación de Cauchy no es muy práctica debido a que en los tensores de esfuerzos existen seis componentes que son independientes, es decir 6 incógnitas más aparte de las componentes de la velocidad y de la densidad en coordenadas cartesianas  $\rho, u, v, w, \sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zz}$ , en tanto las ecuaciones que resuelven las incógnitas solo son 4, la ecuación de continuidad (una ecuación) y la ecuación de Cauchy (tres ecuaciones) es por ello que se utilizan las ecuaciones constitutivas las cuales permiten escribir los tensores de esfuerzo en términos de campo de velocidad y de presión. Para fluidos en reposo el único esfuerzo actuando en él es la presión hidrostática, pero si está en movimiento dicho esfuerzo actúa hacia adentro además que se adicionan los esfuerzos viscosos (Cengel & Cimbala, 2006), entonces:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (39)$$

Al sustituir las incógnitas de  $\sigma_{ij}$ , por los tensores  $\tau_{ij}$ , existen ecuaciones constitutivas que expresan los tensores en términos del campo de velocidad y propiedades del fluido como la viscosidad. Para su simplificación se considera un fluido newtoniano con densidad, viscosidad y temperatura constante, por tanto el tensor se reduce a;  $\tau_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij}$ , mediante sustitución, reordenamiento y sustitución de las ecuaciones, el resultado son las componentes de la ecuación de cantidad de movimiento.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \nabla^2 u \quad (40)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \nabla^2 v \quad (41)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \nabla^2 w \quad (42)$$

Si las ecuaciones son combinadas en una ecuación vectorial, lo que se tiene como resultado es la ecuación de Navier-Stokes.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (43)$$

La representación de cada componente de la ecuación es:

- $\rho \frac{D\vec{V}}{Dt}$  = Derivada total la cual representa el cambio de velocidad con respecto a un instante.
- $-\vec{\nabla}P$  = Gradiente de presión; expresa la dirección que siguen los fluidos hacia donde existe el mayor cambio de presión
- $\rho \vec{g}$  = Fuerzas que interactúan en el fluido como la gravedad
- $\mu \nabla^2 \vec{V}$  = Terminio de Difusión; en fluidos newtonianos la viscosidad actúa como una difusión del momento

Es ecuación diferencial de segundo orden, no lineal e inestable, la cual representa la base de la mecánica de fluidos y es muy utilizada en CFD ya que describen el movimiento tridimensional de los fluidos, la ecuación de Navier-Stokes y la ecuación de continuidad para flujo incompresible permiten desarrollar 4 incógnitas (los tres componentes de la velocidad y la presión), y aunque aún no han podido ser resueltas, tienen pocas soluciones analíticas que ayudan a comprender el flujo del fluido a través de ciertas superficies.

### 3. FUNDAMENTOS DE HIDRÁULICA

#### 3.1. FUNDAMENTOS Y ASPECTOS BÁSICOS DEL FLUJO A SUPERFICIE LIBRE

Cuando se habla de flujo a superficie libre se refiere a una corriente que no está completamente cerrada en un contorno y está expuesta a la presión atmosférica. Su movimiento se da gracias a las fuerzas gravitatorias que actúan en él, y comúnmente reciben el nombre de canal abierto, los más comunes en la naturaleza son arroyos y ríos mientras que los que son artificiales, se tienen a los desagües, túneles, etc. Y son utilizados para fines energéticos, de abastecimiento, irrigación, drenaje y otras funciones más (Franzini & Finnemore, 1999).

Un flujo en un canal puede caracterizarse como uniforme cuando la sección del canal y la profundidad del agua no varían en el tiempo ni para una longitud definida, además la componente de gravedad actúa en el mismo sentido de la dirección de flujo, además que las isolíneas de velocidad son diferentes para cada sección transversal del canal como se ilustra a continuación.

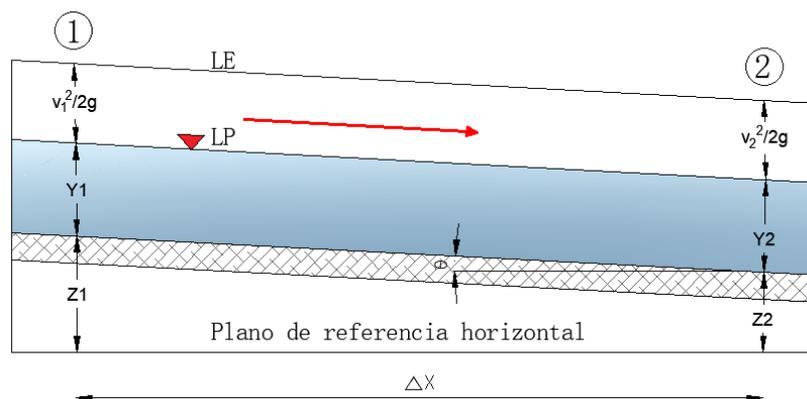


Figura 13. Flujo en un canal abierto

Fuente: Adaptado de Chow V. (1994)

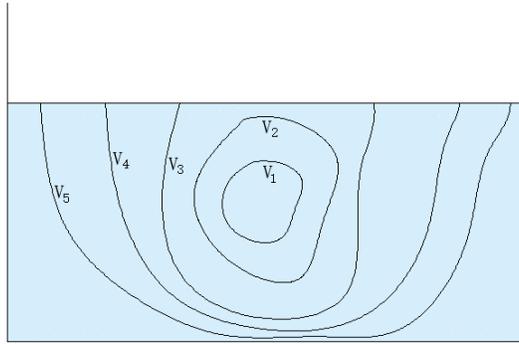


Figura 14. Distribución de las velocidades en un canal rectangular

Fuente: Adaptado de Chow V. (1994)

### 3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS EN CONDUCTOS ABIERTOS

Rara su estudio clasifica a los flujos de acuerdo al cambio de profundidad del mismo respecto al tiempo y al espacio, por tanto, para (Chow, 1994) se tienen:

- Flujo permanente: Es permanente cuando la profundidad del flujo no cambia de un instante a otro, dentro de esta clasificación exigen dos sub clasificaciones:

- a. Flujo uniforme
- b. Flujo variado
  - Flujo gradualmente variado
  - Flujo rápidamente variado

- Flujo no permanente: Si el flujo varío en profundidad de un instante a otro y a la vez pueden ser:

- a. Flujo uniforme no permanente
- b. Flujo variado no permanente
  - Flujo gradualmente variado no permanente
  - Flujo rápidamente variado no permanente

Se clasifica de acuerdo a la velocidad por la que circulan según (Sotelo, 2002):

- Flujo Laminar: El flujo que recibe ese nombre es aquel que posee número de Reynolds menores a 500 y que las fuerzas que actúan mayormente en él son las de viscosidad
  
- Flujo Turbulento: Se dice que un flujo es turbulento cuando el número de Reynolds sobrepasa el valor de 500 y que la distribución de las velocidades depende de la rugosidad de fondo; los canales por donde transita el flujo pueden ser de fondo liso o rugoso

## **4. PRINCIPIOS DE LOS DESARENADORES Y SU CLASIFICACIÓN**

### **4.1. DEFINICIÓN DE DESARENADOR**

Se denomina desarenador a una estructura hidráulica capaz de separar y remover los sólidos que arrastra el agua de un canal, son considerados como partes indispensables de un proyecto en el cual se utilizan los recursos hidráulicos, ya que generalmente en dichos proyectos la velocidad de entrada del agua en la bocatoma es idónea para arrastrar con ella partículas sólidas y que se incrementan en épocas de lluvia (Krochin, 1986).

Para su ubicación dentro de un proyecto se consideran varios aspectos, dentro de los cuales, dos estudios de mucha importancia son; topografía, la cual condiciona si el lugar es lo suficientemente plano para su dimensionamiento además que permita la evacuación de los sedimentos del desarenador y su fácil acceso, la geología y geotecnia proporcionan información para el diseño en profundidad y además de considerar protecciones contra la erosión (Coronado, 2004).

### **4.2. CLASIFICACIÓN DE LOS DESARENADORES**

La clasificación los desarenadores esta dado de la siguiente manera (Autoridad Nacional del Agua, 2010) :

#### **a. En función de su operación**

- Desarenadores de lavado continuo: Se dice que es de lavado continuo cuando pueden sedimentar y evacuar de manera simultanea
- Desarenador de lavado discontinuo: Es discontinuo cuando los sólidos que arrastra el agua son almacenados y luego expulsados en distintos momentos.

Tabla 1. Comparación de la capacidad de decantación según el diseño de desarenador

Nombre	Caudal m <sup>3</sup> /s	Capacidad del decantador por cada m <sup>3</sup> /s de caudal (m <sup>3</sup> )	Tamaño de los granos mm		
			Arena sedimentada	% de la arrastrada	
Borge	10	80	$\frac{1,8 - 0,8}{100}$	$\frac{1,8 - 0,8}{100}$	$\frac{1,8 - 0,8}{100}$
Biaschina	15	95	$\frac{1,8 - 0,8}{100}$	$\frac{1,8 - 0,8}{100}$	$\frac{1,8 - 0,8}{100}$
Klosters	14	75	-	-	-
Karstelenbach	7	73	$\frac{1,8 - 0,8}{100}$	$\frac{1,8 - 0,8}{100}$	$\frac{1,8 - 0,8}{100}$

Fuente: Coronado F. (2004)

#### b. En función de la velocidad de movimiento

- Desarenadores de baja velocidad: cuando en su operación la velocidad es menor que 1m/s y generalmente trabajan entre 0.2 y 0.6 m/s
- Desarenadores de alta velocidad: cuando en su operación la velocidad es mayor que 1m/s y generalmente trabajan entre 1 y 1.5 m/s
- Por su disposición

- En serie: se encuentran formados por dos o más depósitos uno a continuación del otro
- En paralelo: están formados por dos o más depósitos que se encuentran distribuidos paralelamente

### **4.3. ELEMENTOS DE UN DESARENADOR**

Para que un desarenador realice correctamente sus funciones, se compone principalmente de las siguientes partes (Autoridad Nacional del Agua, 2010):

- Transición de entrada: Se refiere a la parte que une al canal de captación con el desarenador
- Cámara de sedimentación: Se conoce así al lugar donde las partículas de los sedimentos llegan a decantar debido a la disminución de la velocidad.

Según Dubuat, las velocidades límites donde las partículas dejan de ser arrastradas por el agua son:

- Arcilla : 0.081 m/s
- Arena fina : 0.16 m/s
- Arena gruesa : 0.216 m/s

El diseño queda definido por esas velocidades por lo que generalmente se diseñan para unas velocidades que oscilan entre 0.1 m/s y 0.4 m/s con una profundidad media 1.5 m y 4 m. y una pendiente transversal entre 1:5 a 1:8

- Compuerta de lavado o fondo: Esta parte sirve para evacuar el materia depositado en el fondo de la cámara, y que tiene una pendiente fuerte de 2% a 6%, la velocidad con la que la compuerta de lavado debe desaloja el material de manera rápida y eficaz debe ser de 3 a 5 m/s
- Canal directo: Su función es conducir el agua por medio del contorno del desarenador para que el servicio no se suspenda mientras se efectúan trabajos de inspección o mantenimiento.

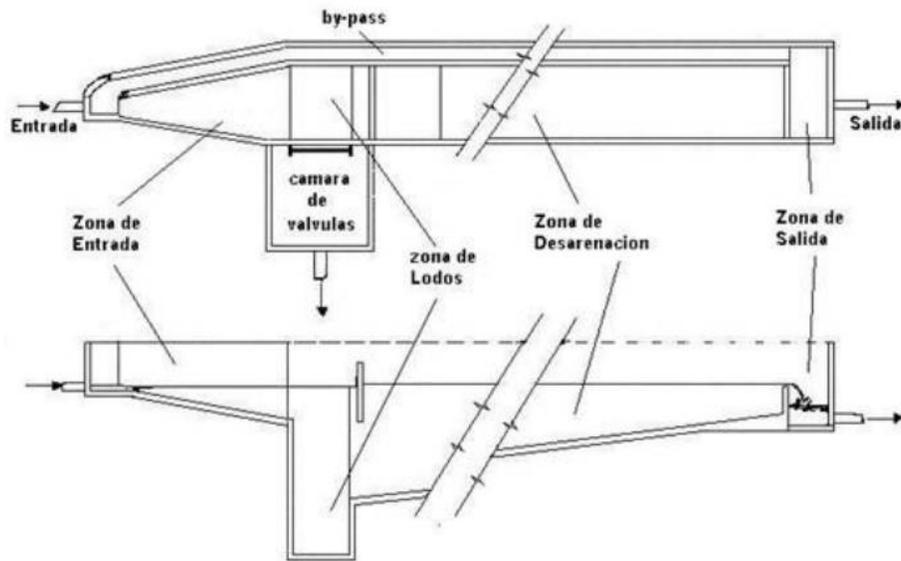


Figura 15. Partes típicas de un desarenador  
 Fuente: (Organización Panamericana de la Salud, 2005)

#### 4.4. HIDRÁULICA DE LOS DESARENADORES

La velocidad de caída de sedimentos en agua sin movimiento se puede deducir a partir de la relación entre la velocidad de flujo del agua y la velocidad de caída del sedimento, así mismo el agua en movimiento transporta sólidos en suspensión que se encuentran en diferente concentración y están afectados por la velocidad de flujo y sus fluctuaciones, además considera un factor de corrección debido a los efectos en la longitud de caída. (Coronado, 2004)

##### 4.4.1. ANÁLISIS CINEMÁTICO.

Este análisis considera la caída de sedimentos como una proporción del movimiento debido a la dirección de flujo del agua y la velocidad de caída de las partículas a través de la longitud del desarenador, por lo cual establece 3 casos:

Primer caso: existe una velocidad de escurrimiento pequeña  $v$ , donde las fluctuaciones de la turbulencia son inferiores a la velocidad de caída del sedimento  $w_0$  como se muestra en la siguiente

figura, la relación que se considera suponiendo una velocidad de flujo  $v$ , y el caudal unitario  $H \cdot v$  para sedimentar las partículas a una velocidad  $W_o$ , es:

$$\frac{L}{H} = \frac{v}{W_o} \quad (44)$$

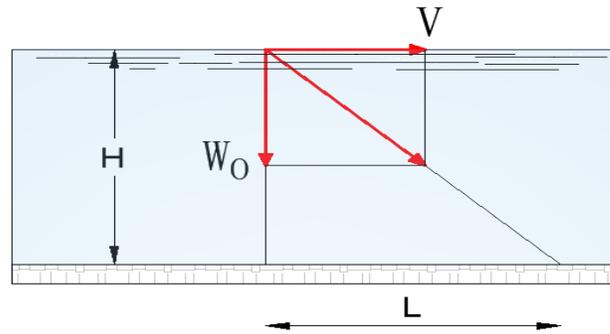


Figura 16. Decantación en aguas de velocidades bajas “v” de escurrimiento

Fuente: Adaptado de (Coronado, 2004).

Donde:

- H : Tirante de agua (m).
- $W_o$  : Velocidad de caída de la partícula (cm/s).
- V : Velocidad del flujo (m/s).
- L : Distancia de decantación (m).

Segundo caso: Este considera que las fluctuaciones de turbulencia ya no son tan pequeñas a comparación de la velocidad de cada de la partícula. Las hipótesis sugieren unos sedimentos de cierto diámetro y un numero de Reynolds suficiente, por tanto, se obtienen las siguientes relaciones:

$$\frac{w}{W_o} = \sqrt{\frac{1-v'^2}{W_o^2}}, \quad v' < w \quad (45)$$

Entonces la ecuación (43) para este caso es:

$$\frac{L}{H} = \frac{V}{W} = \frac{V}{W_0} \cdot \frac{W_0}{W} = K \frac{v}{W} \quad (46)$$

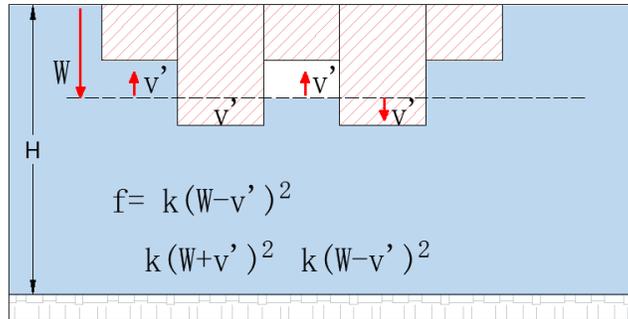


Figura 17. Decantación considerando los efectos retardatorios de la turbulencia

Nota. Adaptado de (Coronado, 2004).

Donde:

$v'$  : Velocidad de escurrimiento. (m/s)

$k$  : Constante de una proyección vertical de la masa en movimiento.

$W$  : Velocidad constante de caída (m/s)

Tercer caso: Se afirma que las fluctuaciones de la velocidad de flujo son mayores que la velocidad de caída de las partículas en suspensión, la partícula oscilará en el agua y no sedimentará por lo que hay dos situaciones de flujo:

- Flujo debido al peso, dirigido hacia abajo:  $W_0.c$  ( $W_0$ , se refiere a la velocidad de caída de la partícula; mientras que  $c$ , es la concentración expresada en g/L.)
- Flujo de la mezcla debido a la turbulencia, dirigido hacia arriba:

$$\varepsilon \frac{dc}{dy} \quad (47)$$

Donde el valor de  $\varepsilon$  es el producto de la velocidad  $v'$  por la longitud de mezcla  $l$ , se pueden presentar casos en que para  $v'$  grande y  $l$  pequeño, y viceversa.

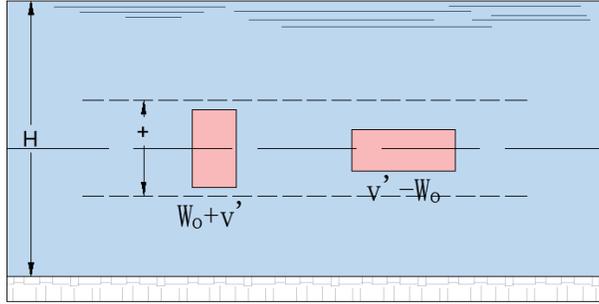


Figura 18. Gran turbulencia, causante de la suspensión de partículas

Fuente: Adaptado de (Coronado, 2004)

#### 4.4.2. ANÁLISIS HIDRODINÁMICO

Las dimensiones que toma el desarenador obedecen al ancho y la profundidad del mismo, con el ancho permite la decantación disminuyendo la velocidad y flujo y con la profundidad asegura más espacio donde albergar lo que se va a sedimentar (Coronado, 2004).

El desarenador puede asemejarse hidráulicamente a un canal en donde se encuentra sedimentos en suspensión  $c(y)$ , distribución de velocidades  $u(y)$  y una velocidad media  $U$ , las partículas se ven afectadas por las fluctuaciones de turbulencia, las cuales contribuyen a la dispersión de la partícula a una distancia  $l_l$ , todo ello satisface a un equilibrio estadístico de que los sedimentos tengan la probabilidad de depositarse a mayores distancias de  $l$  y es igualado a una distribución Poisson.

$$L = \frac{l}{Y_0} \quad (48)$$

$$f(L) = \frac{1}{\beta^k \Gamma(k)} (l')^{k-1} e^{-l'/\beta} \quad (49)$$

Donde

$Y_0$  = Posición inicial de una posición vertical.

$B$  y  $\alpha$  = Parámetros de la distribución gamma.

$K$  = Constante de una proyección vertical de la masa en movimiento

$\Gamma$  = Función de distribución de probabilidad gamma.

La relación de distancias  $l/Y_0$  para la disposición del peso  $G' = G_i / G_t$ ,  $G_t$  se considera como el peso total de los sedimentos que transporta el agua.

#### 4.4.3. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO HIDRÁLICO

Se asevera que para el diseño de un desarenador se tiene que tener en cuenta el tipo de proyecto en el que se usará, entre ellos pueden ser riego, hidroeléctricas o abastecimiento, ya que el tamaño máximo de sedimento permitido varía para cada uno (Autoridad Nacional del Agua, 2010).

Para ello, se señala que una partícula que ingresa al desarenador está afectada por diferentes velocidades, es así que se tiene el vector  $V_p$ , la velocidad de sedimentación  $V_s$  (otros autores la expresan como  $W$ ) la cual tiene que ser mayor que la velocidad ascendente  $V_v$  y además también posee una velocidad horizontal  $V_h$  el propósito del desarenador es reducir la componente ascendente mediante el aumento del largo de la cámara de sedimentación (Mojicar Caballero et al., 2014).

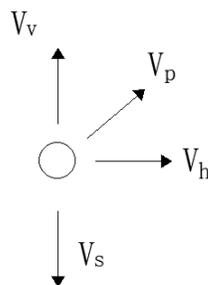


Figura 19. Diagrama de velocidades y componentes de una partícula en el sedimentador

Fuente: Recopilado de (Mojicar et al., 2014)

De la misma manera se menciona que la trayectoria de una partícula en una cámara de sedimentación se puede considerar como un movimiento parabólico que tiene por componentes a

una velocidad horizontal de sedimentación  $V_d$  y una componente vertical  $W$ , el propósito es reducir la velocidad de flujo en el desarenador de manera que sea mínima y uniforme además de lograr que el tiempo de sedimentación de cada partícula sea menor que el tiempo en el que demora el agua en recorrer toda la estructura (Ortiz, 2011).

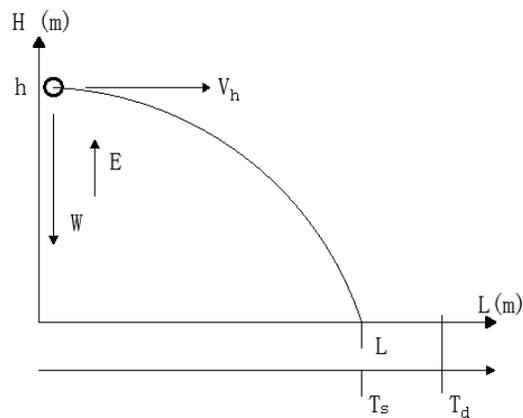


Figura 20. Proceso de sedimentación

Fuente: Adaptado de (Ortiz, 2011)

Los parámetros que intervienen:

- $V_h$  = Velocidad horizontal de sedimentación.
- $E$  = Empuje del agua debido a turbulencias.
- $W$  = Velocidad vertical de sedimentación.
- $T_d$  = Tiempo de desplazamiento.
- $T_s$  = Tiempo de sedimentación.
- $L$  = Longitud alcanzada por la partícula sedimentada.

Donde el tiempo de desplazamiento tiene que ser mayor al tiempo de sedimentación

#### 4.4.4.FÓRMULAS PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD VERTICAL DE SEDIMENTACIÓN

Para la, el efecto de sedimentacion en un desarador para el calculo de la velocidad horizontal varia decuerdo a la clasificacion del sedimento; arena fina, arena gruesa, y grava, de tal manera que para cada caso es aplicable una ley diferente para determinar su velocidad de sedimentacion (Organizacion Panamericana de la Salud, 2005).

Tabla 2. Relación entre diámetro de las partículas y velocidad de sedimentación

Material	Diámetro límite de las partículas (cm)	Número de Reynold s	Vs (cm/s)	Régimen	Ley aplicable
Grava	>1.0	>10000	100	Turbulento	$V_s = 1.82 \sqrt{\frac{dg(\rho_a - \rho)}{\rho}}$ Newton
	0.1	1000	10		
	0.08	600	8.3		
	0.05	180	6.4		
Arena gruesa	0.05	27	5.3	Transicion	$V_s = 0.22 \left( \frac{\rho_a - \rho}{\rho} g \right)^{2/3} \left[ \frac{d}{\left( \frac{\mu}{\rho} \right)^{1/3}} \right]$ Allen
	0.04	17	4.2		
	0.03	10	3.2		
	0.020	4	2.1		
	0.015	2	1.5		

	0.01	0.8	0.8		
	0.008	0.5	0.6		
	0.006	0.24	0.4		
Arena	0.005	1.0	0.3	Laminar	$V_s = \frac{1}{18} g \left( \frac{\rho_a - \rho}{\mu} \right) d^2$
Fina	0.004	1.0	0.2		Stokes
	0.003	1.0	0.13		
	0.002	1.0	0.06		
	0.001	1.0	0.015		

---

Fuente: Adaptacion de Organizacion Panamericana de la Salud (2005)

(Coronado, 2004) presenta diversas metodologias para hallar la velocidad horizontal de sedimentacion, es asi que se tiene:

- Metodo de Hazen, en su estudio, consideró la decantacion de granos similar a la formula de Stokes, pero para diámetros mayores a 0,1 mm.

$$w = \frac{1}{18} * \frac{g}{\mu} * (\rho_s - \rho) \cdot d \quad (50)$$

- Metodo de Sellerio, en su experiencia determino la velocidad de sedimentacion para granos de arena en movimiento aparcandose de la ecuacion de Stokes, pues estaba determinado para granos mayores a 0,1 mm.

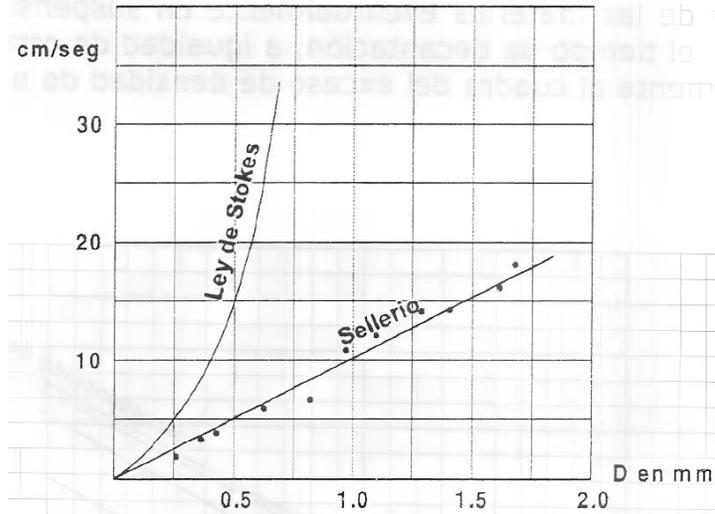


Figura 21. Gráfico de las experiencias de Sellerio

Fuente: Grafico obtenido de (Coronado, 2004)

- El método de Sudry, se necesita la densidad del agua y el diámetro de los granos (mm), se muestra el siguiente gráfico.

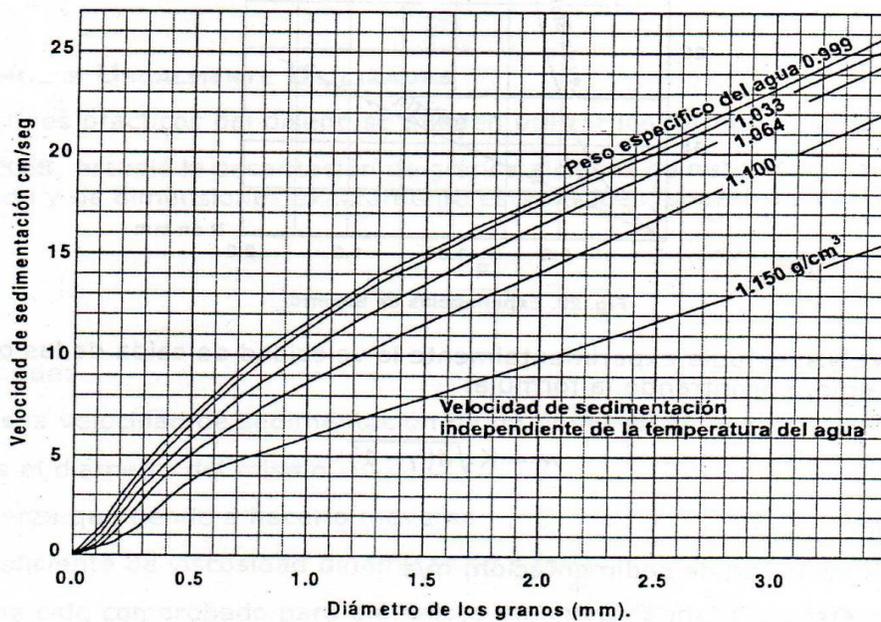


Figura 22 . Gráfico de Sudry para hallar la velocidad horizontal de sedimentación.

Nota. Recopilado de (Coronado, 2004)

➤ Las experiencias realizadas en el laboratorio nacional de hidraulica con arena del Rio Mantaro con pesos específicos oscilantes 2.69 gr/cm<sup>3</sup> y 2.75 gr/cm<sup>3</sup> y diametros de 0.149 mm y 0.59 mm. (Coronado, 2004)

- D = Diametro de particula (mm).

Tabla 3. Velocidad de sedimentación según el P.E. del agua

<b>Agua turbia de peso específico (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Fórmula</b>
1.033	$V = 1.25 D^{1.2}$
1.100	$V = 1.08 D^{1.2}$
1.150	$V = 0.98 D^{1.2}$

Fuente: Tabla recopilada del libro de (Coronado, 2004)

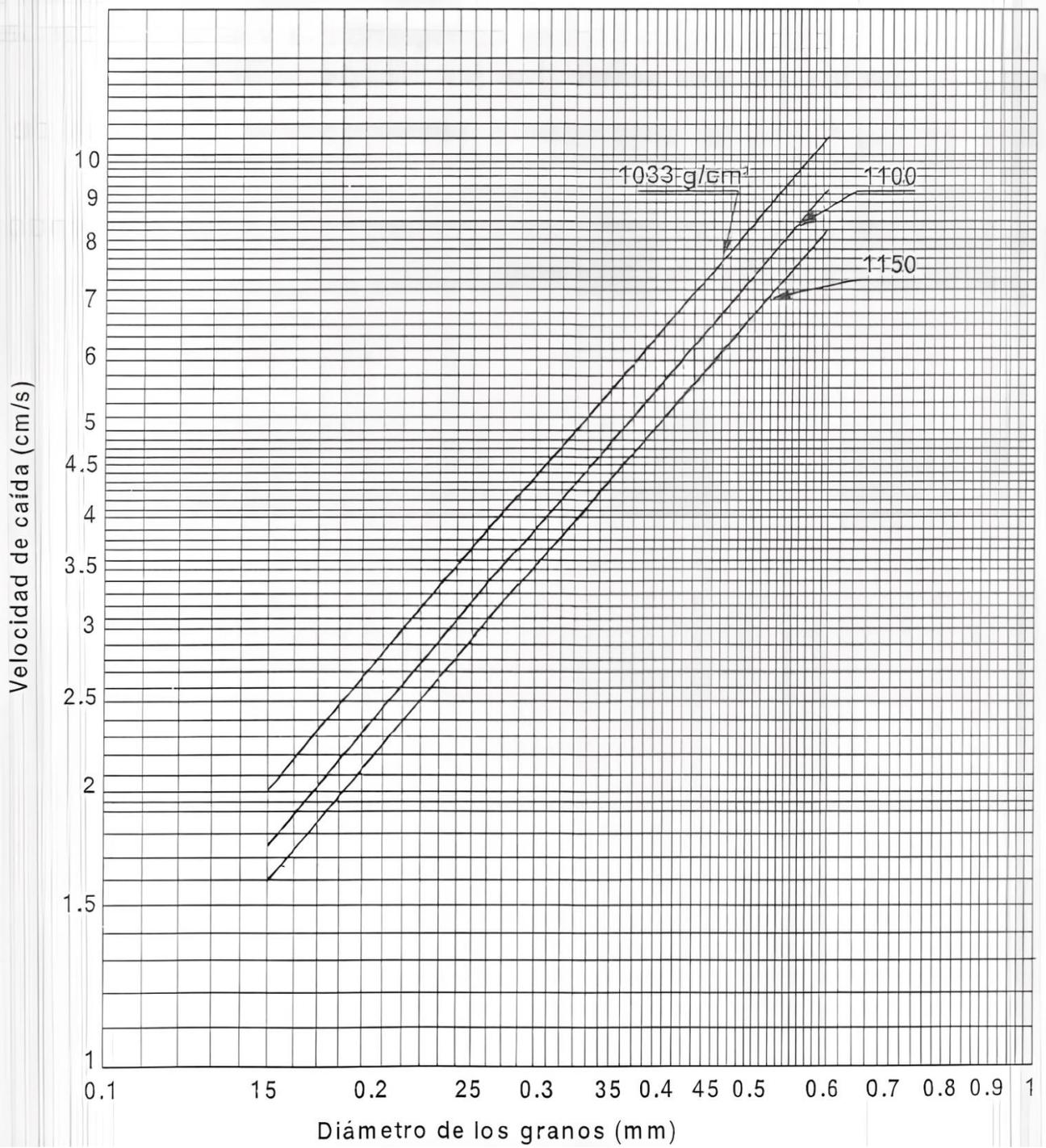


Figura 23. Gráfico para hallar la velocidad horizontal de sedimentación

Nota. Recopilado de (Coronado, 2004)

➤ De acuerdo a Owens, la velocidad de caída de las partículas en agua calma se puede hallar mediante:

$$V_s = k\sqrt{d(\gamma - 1)} \quad (51)$$

Donde:

$V_s$  = velocidad de sedimentación (m/s)

$d$  = diámetro del grano (m)

$\gamma$  = Peso específico del material (gr/cm<sup>3</sup>)

$K$  = Constante que depende del tamaño y tipo de sedimento

Tabla 4. Valores de K para granos de cuarzo según el diámetro

Tamaño de granos de cuarzo	Valor de K
Mayores a 3 mm	6.12
Menores a 0.7 mm	1.28

Fuente: (Coronado, 2004)

➤ Krey, presenta una deducción realizada en agua calma:

$$D(\gamma - 1) = 0.007w^{1.2} \quad (52)$$

$$D(\gamma - 1) = 0.00064w^{1.2} \quad (53)$$

.

La ecuación (52) se cumple para granos menores o iguales a 2 mm . y la (53) para granos mayores a 2 mm .

➤ Indry, presenta un diagrama para la velocidad de sedimentación según las experiencias de Sudry, Guicciardy, entre otros.

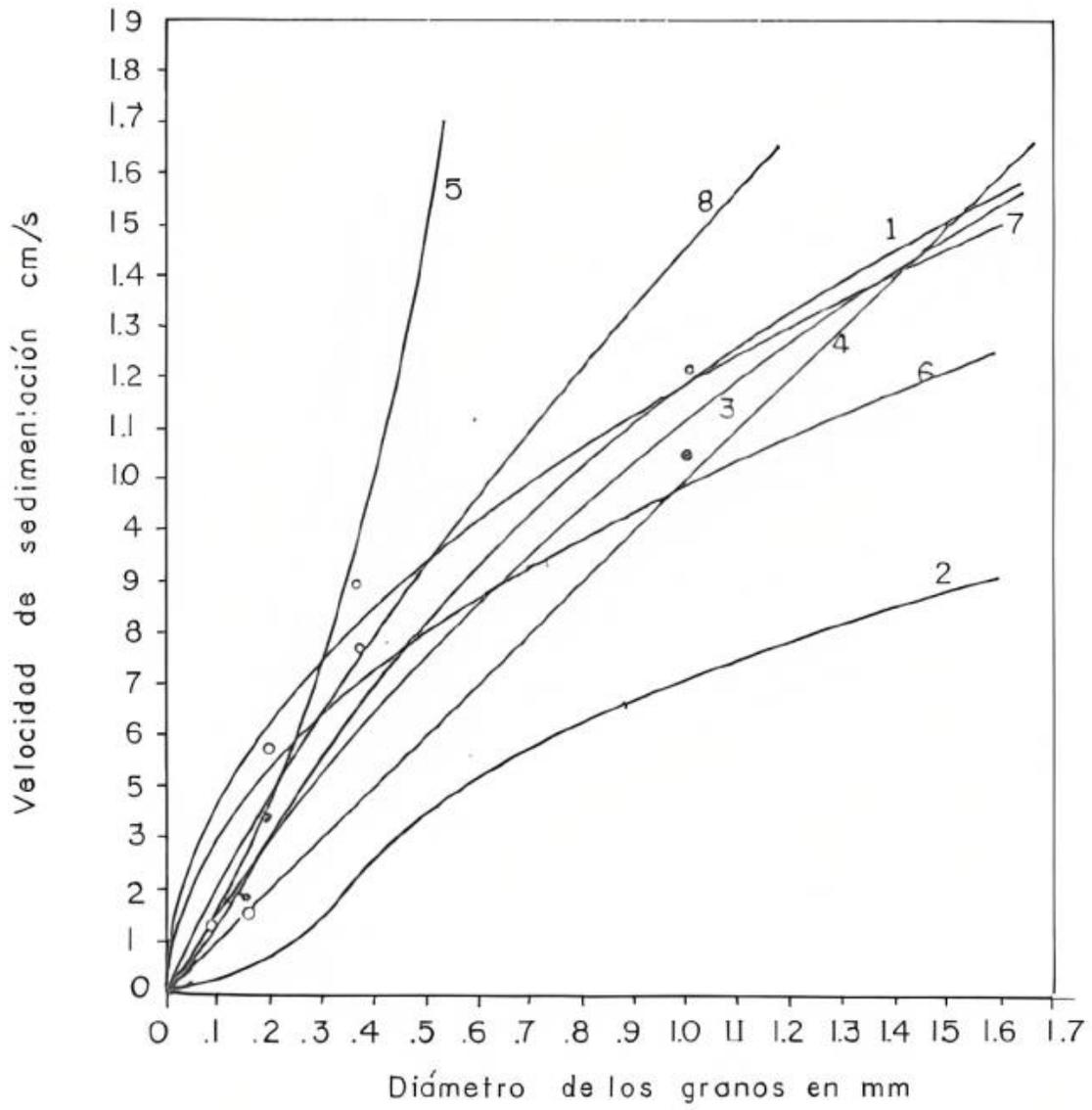


Figura 24. Gráfico para hallar la velocidad horizontal de sedimentación según Indry  
 Nota. Recopilado de Coronado (2004)

a. Fórmulas para determinar la velocidad horizontal de sedimentación

➤ Para Camp, la fórmula para hallar  $V_h$  es:

$$v = a\sqrt{d} \text{ (cm/s)} \quad (54)$$

$V$  = velocidad horizontal de sedimentación (cm/s)

$d$  = diámetro de las partículas (mm)

$a$  = coeficiente obtenido de la tabla

Tabla 5. Coeficientes según el diámetro del material

<b>a</b>	<b>d (mm)</b>
36	<1
44	1 ; 0.2
51	>0.1

Fuente: Recopilado de Coronado F. (2004)

#### 4.4.5. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA SEDIMENTACIÓN

El método lo plantea Camp transformando la solución de Dobbins, por tanto, el método se llama Dobbins-Camp, el cual considera que no hay transporte sólido de fondo y que el gráfico permite estimar el material en porcentaje que se deposita en el desarenador, con dos parámetros adimensionales;  $\frac{wL}{Vh}$  y  $\frac{wC}{0.15V\sqrt{g}}$ , los cuales se van a ubicar en el siguiente gráfico.

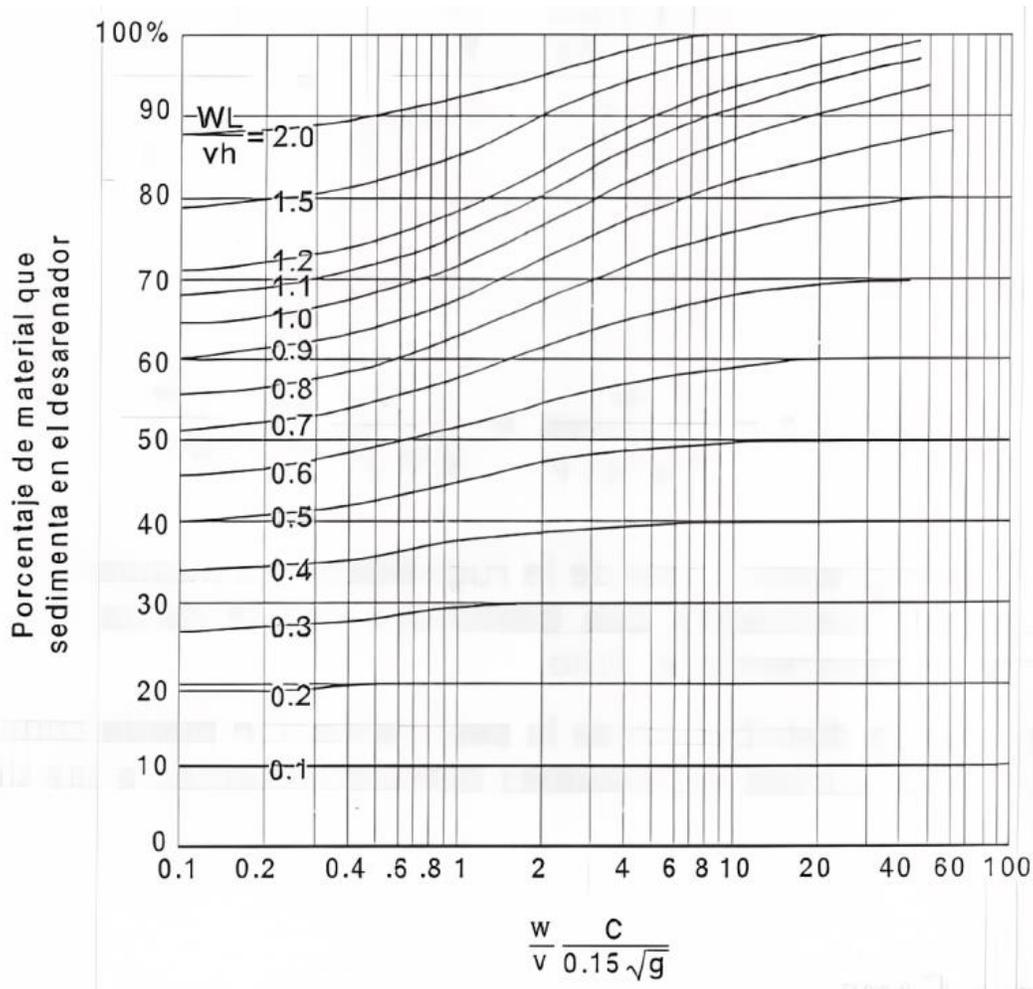


Figura 25. Gráfico de Camp para la sedimentación del porcentaje de material que sedimenta en el desarenador

Fuente: Gráfico recopilado de (Coronado, 2004)

Los datos necesarios son:

- $C$  = Coeficiente de la fórmula de Chezy ( $C = \frac{V}{\sqrt{RS}}$ )
- $g$  = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )
- $w$  = velocidad vertical de sedimentación ( $V_s$ ) (m/s)
- $L$  = Longitud del desarenador (m)
- $V$  = Velocidad horizontal de sedimentación ( $V_h$ ) (m/s)
- $h$  = Profundidad del desarenador (m)

## **5. FUNDAMENTOS DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

### **5.1. GENERALIDADES E INTRODUCCIÓN A CFD**

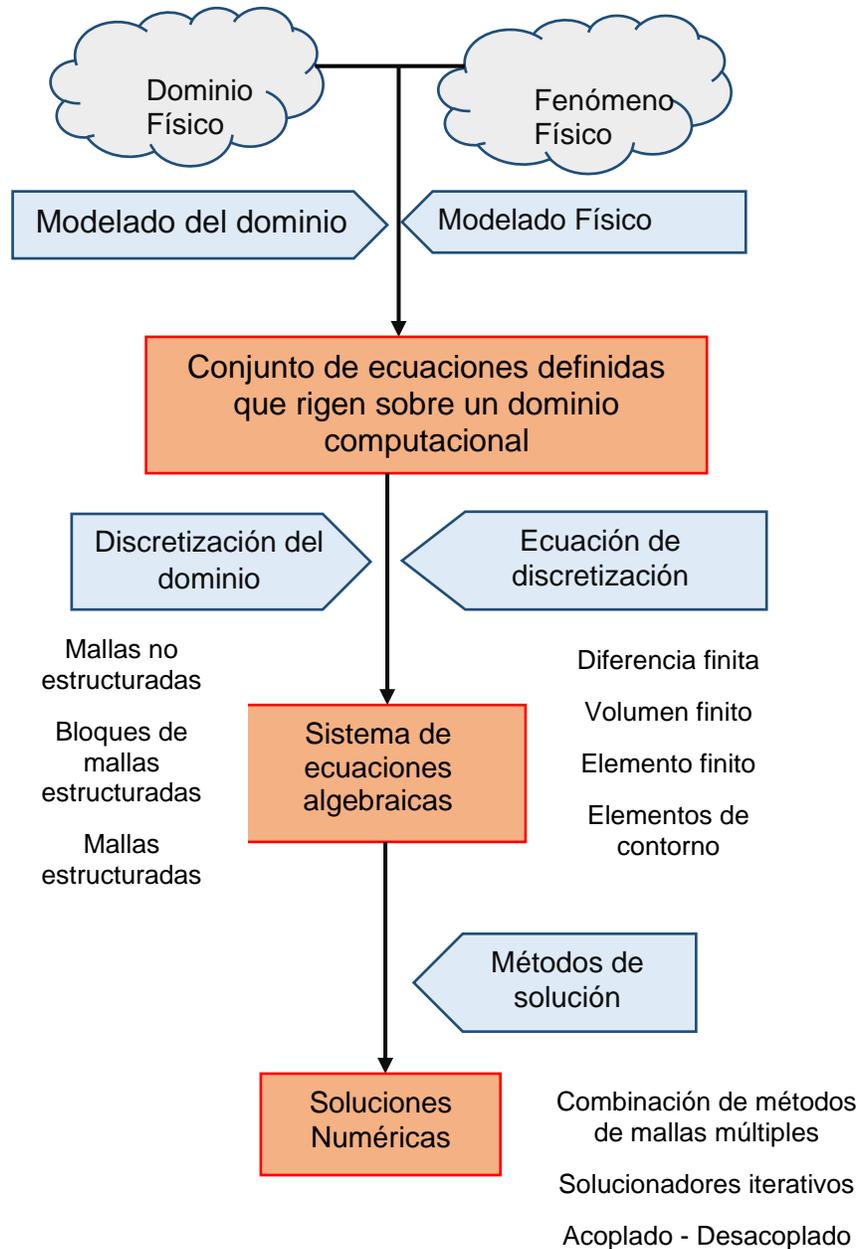
El termino Dinamica de fluidos computacional (CFD), surge a partir de la aplicación de tecnicas numericas haciendo el uso de computadoras como una rama de la mecanica de fluidos, es de utilidad practica ya que permite resolver numericamente ecuaciones de movimiento de los fluidos y aplicarlos a escenarios reales, para ello una de las tecnicas que se aborda es el Metodo de Volumenes Finitos (MVF). Inicio en 1970 con la aparicion de las computadoras, dando como primer paso la creacion del algoritmo PIMPLE para el acople de las ecuaciones de flujo de fluidos, actualmente se sugiere que CFD no solo debe utilizarse en instituciones educativas como universidades o en centros de investigacion si no que tambien debe incorporarse en el mercado industrial.

Una de las principales ventajas que ofrece CFD es que permite observar muchos fenomenos que no se pueden observar mediante metodos tradicionales o modelados 2D y así evitando correcciones costosas en los proyectos, de manera contraria las desventajas del mismo es que se necesita de personas capacitadas con mucha experiencia, mucho consumo de hardware ya que consume mucho recurso computacional. (Xamán & Gijón-Rivera, 2015).

### **5.2. PROCESO DE DISCRETIZACIÓN EN CFD**

Las soluciones numéricas de ecuaciones diferenciales parciales tienen como objetivo encontrar el valor de la variable en cuestión, y para ello en el caso de CFD, se divide la malla en una red de nudos a partir de la geometría original, luego se analiza y calcula la solución exacta de la ecuación diferencial parcial de cada celda y así para la siguiente, ubicando los valores de cálculo en el centro o en los vértices, para así seguir con la siguiente. Todo ese proceso es trabajado

computacionalmente y para ello han aparecido diferentes programas que utilizan diferentes formas de discretización como OpenFOAM.



**Figura 26. Proceso de discretización numérica en CFD**

Fuente: Organizador de flujo del proceso de discretización numérica CFD, Adaptado de (Xamán & Gijón-Rivera, 2015).

## 5.2.1. DISCRETIZACION DE ECUACIONES DIFERENCIALES PARCIALES

### A. Ecuación diferencial parcial

Se llaman así a las ecuaciones matemáticas que abarcan derivadas parciales de una función desconocida con dos o más variables independientes. (Murray, 1993)

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} = 6x + 12y^2 \quad (55)$$

Se tienen las variables independientes “x” y “y” que afectan a la variable dependiente “U”, se integra con respecto a “x”, para hallar una constante de integración que dependa de “y”.

$$\frac{\partial U}{\partial y} = 3x^2 + 12xy^2 + F(y) \quad (56)$$

Se puede utilizar un mismo proceso de solución para problemas de valor inicial y de frontera para las ecuaciones diferenciales parciales como normalmente se realiza para las ecuaciones diferenciales ordinarias, para el caso de discretización, las ecuaciones diferenciales parciales, se introduce un intervalo “ $\Delta t$ ”, se muestra a continuación un proceso de discretización con respecto a ese intervalo en la ecuación (57):

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (57)$$

Se utiliza la definición de la derivada para  $\dot{x}$ :

$$\frac{x_{t+1} - x_t}{\Delta t} = f(x_t, u_t) \quad (58)$$

Despejando, se encuentra la ecuación discretizada:

$$x_{t+1} = \Delta t \cdot f(x_t, u_t) + x_t \quad (59)$$

por tanto, para realizar una discretización de una ecuación diferencial parcial, en el caso de investigación, se resume en analizarla por intervalos de tiempos, donde por cada paso de tiempo se tenga una solución para las variables de interés.

### **5.3. MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS (MVF)**

El método del volumen finito es una técnica numérica que facilita transformar las ecuaciones diferenciales parciales de volúmenes diferenciales en ecuaciones algebraicas discretas en volúmenes finitos de manera que permite calcular los valores de las variables en cada elemento, la metodología en cuestión (Moukalled, Darwish, & Mangani, 2016):

- i. Se discretiza el dominio geométrico en elementos superpuestos o volúmenes finitos.
- ii. Las ecuaciones diferenciales parciales se discretizan de manera que se convierten en ecuaciones algebraicas para luego integrarse en cada elemento dividido.
- iii. El sistema algebraico de ecuaciones que queda luego de ello es resuelto para hallar las variables dependientes de cada elemento.

El MVF es de elección por los investigadores de CFD ya que tiene la característica de que el flujo que ingresa en una celda es idéntico al que sale en la otra, es decir cumple con la ley de la conservación, otra característica a favor es que puede ser dividida como una malla poligonal no estructurada de manera que puede facilitar la construcción de diferentes geometrías, además también puede implementar diferentes condiciones de contorno de manera no invasiva, es decir, se analizan en el centroide de cada elemento y no en las caras adyacentes.

## **5.4. OPENFOAM**

### **5.4.1. DESCRIPCIÓN DEL PAQUETE COMPUTACIONAL**

OpenFOAM es un espacio que permite el desarrollo de aplicaciones ejecutables que utilizan un grupo de archivos funcionales contenidos en una colección de aproximadamente 100 bibliotecas en lenguaje C++, son incorporados 250 modelos prefabricados en su instalaciones, los cuales se dividen en dos categorías; solvers, los cuales contienen lo necesario para resolver un escenario específico en la mecánica de fluidos; utilidades, las cuales sirven para la manipulación de datos. (Greenshields, 2021).

### **5.4.2. ETAPAS DE PROCESAMIENTO EN OPENFOAM**

(Greenshields, 2021), muestra una estructura general del procesamiento de los casos en OpenFoam.

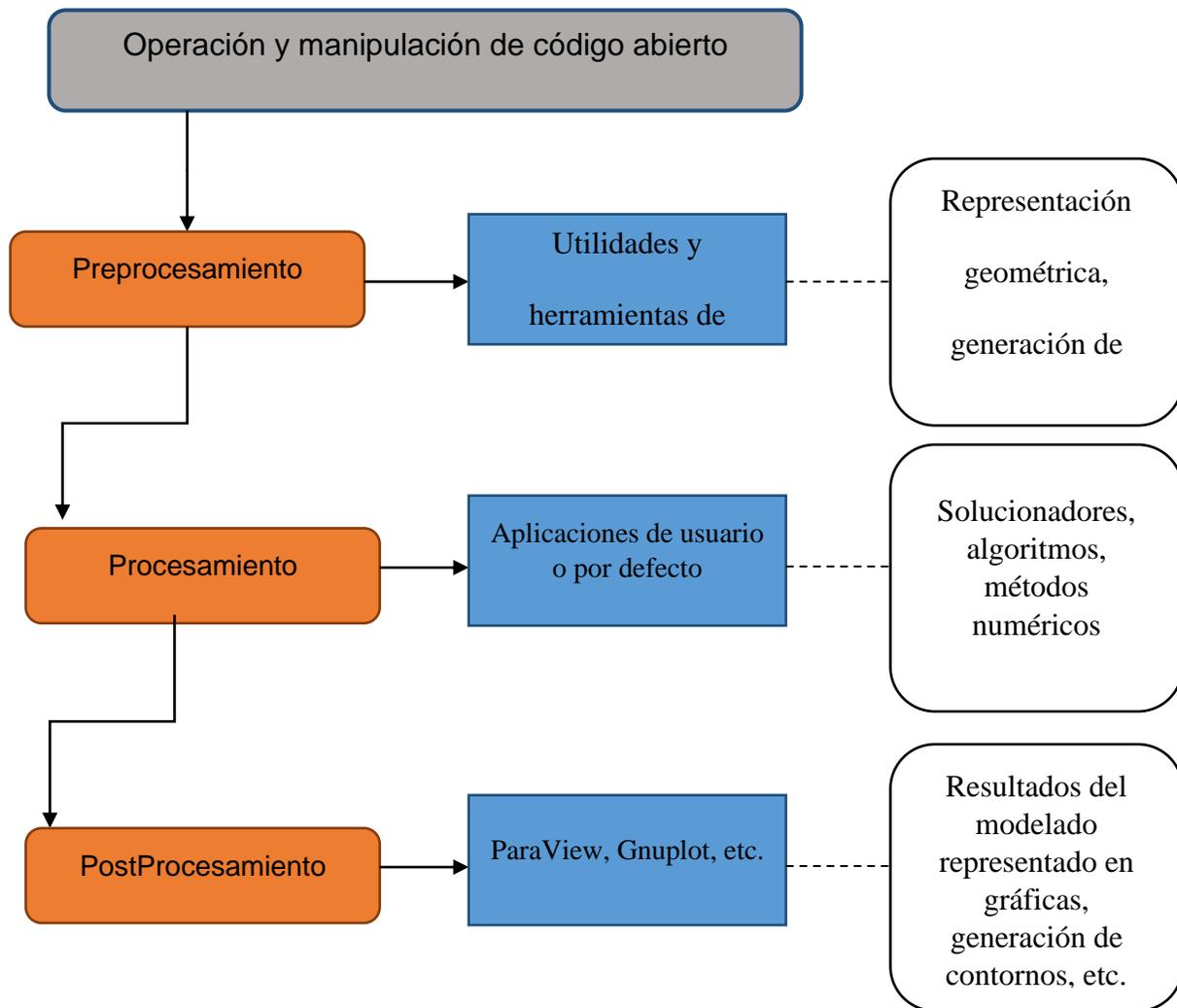


Figura 27. Descripción general de la estructura de OpenFOAM

Fuente: Procesamiento típico de un modelado CFD, adaptado de (Greenshields, 2021)

a. Preprocesamiento

La etapa de preprocesamiento abarca todo lo concerniente a la creación de la geometría, el mallado y las condiciones iniciales del modelo, en algunos casos se pueden editar las geometrías preexistentes en el paquete computacional ubicados en los directorios de los diferentes casos que posee o utilizar programas alternativos para la construcción de la geometría y la generación del mallado para luego ser exportados a OpenFOAM, así mismo las condiciones iniciales pueden ser

asignadas en los ficheros de los directorios dependiente las condiciones de contorno que se van a modelar.

```
1  /*----- C++ -----*/
2  =====
3  \\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  \\ / Operation | Website: https://openfoam.org
5  \\ / A nd | Version: dev
6  \\ / M anipulation |
7  /*-----*/
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format       ascii;
12     class        volVectorField;
13     object       U;
14 }
15 // *****
16
17 dimensions      [0 1 -1 0 0 0];
18
19 internalField   uniform (0.3 0 0);
20
21 boundaryField
22 {
23     inlet
24     {
25         type      flowRateInletVelocity;
26         volumetricFlowRate constant 2;
27     }
28
29     walls
30     {
```

Figura 28. Configuración de condiciones iniciales en el fichero de un caso de OpenFOAM

Fuente: Elaboración propia.

## b. Procesamiento

Es aquí donde los casos a solucionar son desarrollados por un Solver el cual utiliza las ecuaciones anteriormente presentadas siguiendo el MVF (metodo de volúmenes finitos), los Solvers varían dependiendo el caso a modelar, los más conocidos son; el algoritmo PISO (Presión implícita con división de operadores) se utiliza para el desarrollo de las ecuaciones de Navier Stokes en problemas inestables, SIMPLE (Método semi-implícito para ecuaciones vinculadas por presión) que es utilizado para resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes relacionadas a la presión, y PIMPLE, la cual es una combinación de los dos anteriores el cual es usado para estados estacionarios.

### c. PostProcesamiento

Esta etapa muestra los resultados del modelamiento mediante utilidades como paraView el cual permite observar la geometría modelada, realizar cortes, obtener líneas de flujo, etc. Y dentro de ella la velocidad, presión y tirante, además también existe Gnuplot, éste permite a través de gráficos obtener los resultados de paraView que generalmente son dibujados con respecto al tiempo de modelación.

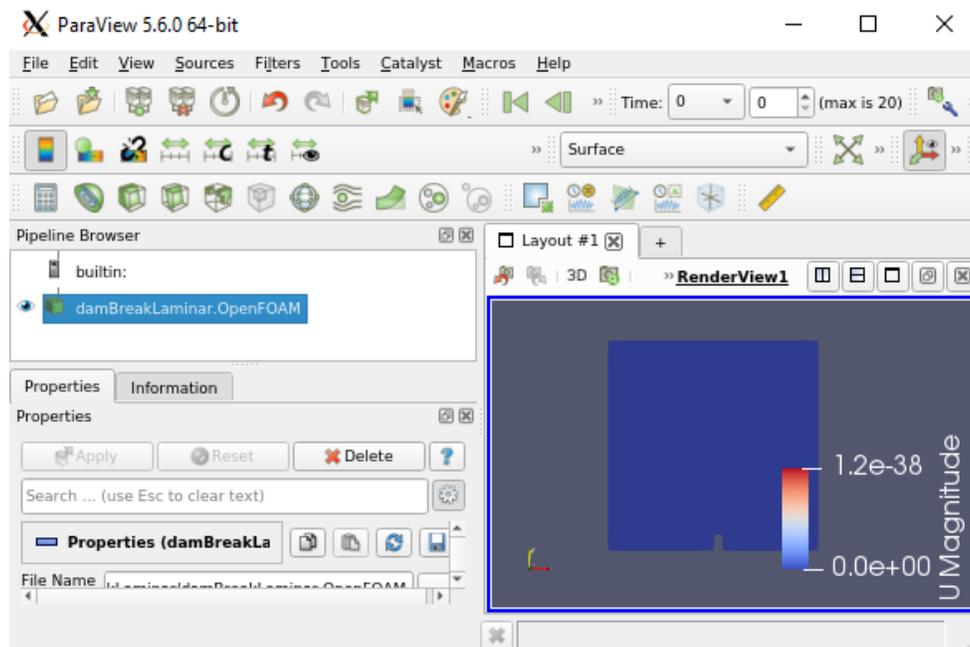


Figura 29. Visualización de un modelamiento en ParaView

Fuente: Elaboración Propia

### 5.4.3. ESTRUCTURA DE LOS CASOS EN OPENFOAM

La estructura básica de un caso en OpenFOAM debe tener un mínimo de archivos requeridos para poder ejecutarlo. (Greenshields, 2021)

- ✓ **Directorio Constant:** Contiene una descripción de la malla en un subdirectorio llamado polymesh y que además contienen los archivos que especifican las propiedades físicas de transporte y las propiedades de turbulencia.

- ✓ **Directorio System:** Alberga los parámetros asociados con el procedimiento de solución como: *controlDict*, el cual posee los ajustes de control de tiempo; *fvSchemes*, los esquemas de discretización usados en la solución; *fvSolution*, es aquí donde se establece los solucionadores de las ecuaciones, tolerancias y otros algoritmos que permitan la corrida del modelo.
- ✓ **Directorio de Tiempo:** Suelen contener archivos de algún campo en particular como la velocidad o la presión, además dichos archivos pueden ser los valores iniciales y las condiciones de contorno que el usuario deseara definir.

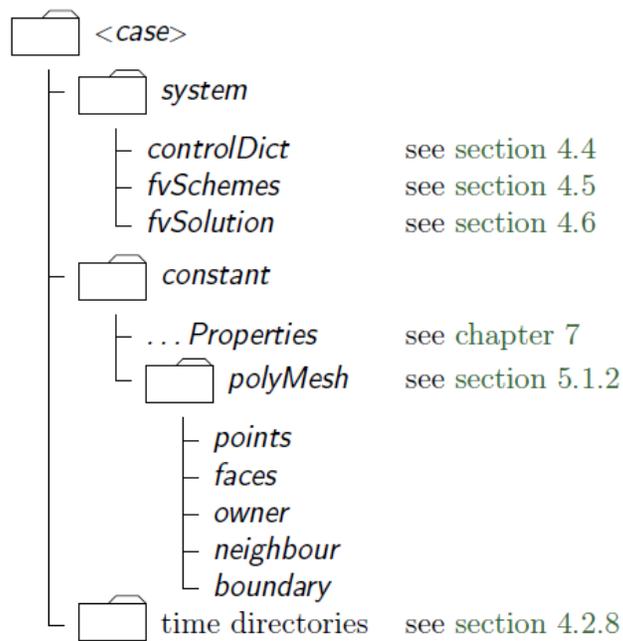


Figura 30. Estructura de un caso en OpenFOAM

Fuente: Recopilado del manual de usuario, Greenshields (2021)

#### 5.4.4. UNIDADES DIMENSIONALES DE TRABAJO.

Se establece que OpenFoam implementa la dimensiones a los datos de campo y también a las propiedades físicas en el sistema internacional (SI), no obstante, es capaz de cambiar a USCS de unidades especificándolo en los archivos de programación (Greenshields, 2021).

Tabla 6. Unidades base en SI y USCS

	<b>Propiedad</b>	<b>Unidades SI</b>	<b>Unidades USCS</b>
1	Masa	Kilogramo (Kg)	Libra-masa (lbm)
2	Longitud	Metros (m)	Pie (ft)
3	Tiempo	Segundos (s)	Segundo (s)
4	Temperatura	Kelvin (K)	Grados Rankine (°R)
5	Cantidad	Moles (mol)	Moles (mol)
6	Corriente	Amperios (A)	Amperios (A)
7	Intensidad Luminosa	Candela (cd)	Candela (cd)

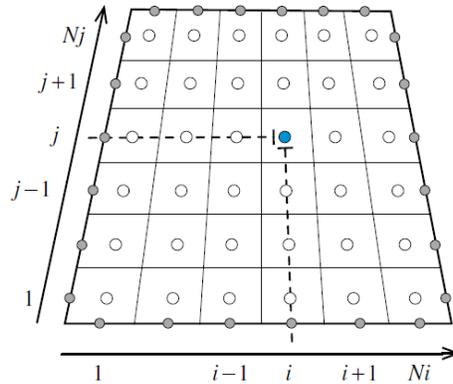
Fuente: adaptada de (Greenshields, 2021)

#### **5.4.5. DISCRETIZACIÓN GEOMÉTRICA.**

La discretización del dominio físico es una malla computacional la cual posteriormente será resuelta mediante las ecuaciones y métodos que gobiernan el fenómeno a estudiar. (Versteeg & Malalasekera, 2007)

##### ✓ **Malla estructurada**

Una malla se dice que es estructurada cuando cada celda interior está conectada al mismo número de celdas contiguas, dichas celdas se pueden configurar en un sistema de coordenadas  $i, j$  y  $(k)$  en la dirección de las coordenadas  $x, y, z$  respectivamente, la ubicación de estas celdas permite un menor uso en la memoria y una mayor eficiencia en la codificación de información, en espacios tridimensionales, los elementos suelen ser prismas con 6 caras y 8 vértices, los cuales tienen a su vez 6 caras vecinas conectadas.

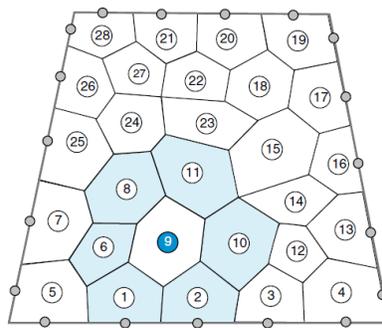


**Figura 31. Malla estructurada en un sistema bidimensional**

Fuente: Recopilado de (Versteeg & Malalasekera, 2007)

✓ **Malla no estructurada**

Las mallas no estructuradas se utilizan en dominios donde se necesita flexibilidad tanto en tipos de elementos que se pueden utilizar así como en la concentración de los mismos en una zona, no obstante, esta concentración de elementos tiene como costo una complejidad en el cálculo y por tanto un mayor recurso computacional. En una malla no estructurada se encuentran elementos hexagonales y triangulares en algunos casos, además, los elementos se numeran secuencialmente al igual que las caras y vértices, esto implica que la conectividad entre elemento y elemento se puede definir mediante la determinación de cantidades geométricas para un elemento en particular.



**Figura 32. Malla no estructurada en un sistema bidimensional**

Fuente: Obtenido de (Versteeg & Malalasekera, 2007)

#### 5.4.6. TURBULENCIA EN EL MODELADO.

La turbulencia es un proceso particularmente aleatorio y que no hay posibilidad de llegar a una solución analítica del mismo, es por ello que se opta por la utilización de un modelo de turbulencia cuya solución tenga una aproximación a la solución real.

Hay tres familias generales de modelos de turbulencia que se utilizan para la resolución numérica del flujo, pero para el caso de estudio se utilizó “RANS” (Castillo, 2016).

##### A. Modelos promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier Stokes – Reynolds Average Navier Stokes (RANS)

Este modelo fue propuesto por Reynolds en 1895, su aplicación se basa en la descomposición de las variables de interés como velocidad y presión, estos se encuentran en un valor medio y otro fluctuante. Es así que las ecuaciones de Navier Stokes sufren una reformulación hacia un valor promedio y por tanto se obtiene un nuevo grupo de ecuaciones que vienen a ser las ecuaciones promediadas de Reynolds, las cuales son promedio temporal y promedio espacial. Este modelo tiene la característica de ser el menos demandante computacionalmente ya que no resuelve directamente las ecuaciones de Navier Stokes.

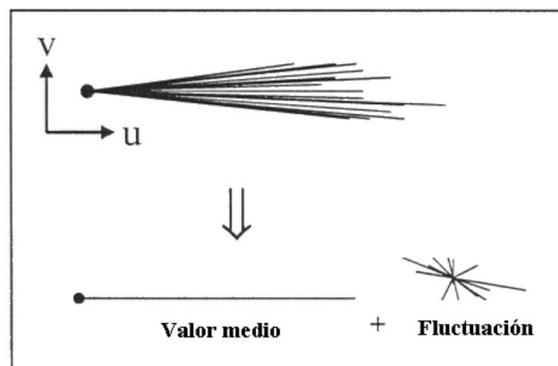


Figura 33. Valor medio y otro fluctuante debido a la turbulencia  
Fuente: (Sánchez, 2004)

### a. Promedio temporal (T)

Valor medio

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (60)$$

Descomposición de Reynolds

$$u(t) = \bar{u} + u' \quad (61)$$

### b. Promedio espacial ( $\Omega$ )

Valor medio

$$\bar{u} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} u(\Omega) d\Omega \quad (62)$$

Descomposición de Reynolds

$$u(\Omega) = \bar{u} + u' \quad (63)$$

### ✓ SST k-omega

El modelo de turbulencia SST k- $\omega$  es un modelo de viscosidad de remolino de dos ecuaciones que combina con la formulación de transporte de esfuerzo cortante SST, esta formulación que se realiza en las zonas internas de la capa límite permite que el modelo se pueda aplicar directamente hasta la zona de frontera mediante la subcapa viscosa. Los creadores que aplican el modelo SST k- $\omega$  afirman que posee un buen comportamiento en gradientes de presión adversos y flujo separado. (CFD Online, 2011)

Las ecuaciones que gobiernan este modelo de turbulencia son las siguientes:

## Energía cinética de turbulencia

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \left( \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_{k1} v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (64)$$

## Tasa de disipación específica

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta_1 \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_{\omega 1} v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (65)$$

## Viscosidad de remolino cinemático

$$v_T = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (66)$$

## Coefficientes de cierre y relaciones auxiliares

$$F_1 = \tan h \left[ \left[ \min \left\{ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{5000v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{kw} y^2} \right\} \right]^4 \right] \text{ (Función de fusión)}$$

$$F_2 = \tanh \left[ \left\{ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{5000v}{y^2 \omega} \right) \right\}^2 \right] \text{ (Función de mezcla)}$$

$$P_k = \min \left( \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, 10 \beta^* k \omega \right) \text{ (Limitador de producción)}$$

$$C D_{K\omega} = \max \left( 2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$$

$$S_j = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)$$

$$\alpha_1 = \frac{5}{9}, \alpha_2 = 0.44$$

$$\beta_1 = \frac{3}{40}, \beta_2 = 0.0828$$

$$\beta^* = \frac{9}{100}$$

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{k2} = 1$$

$$\sigma_{\omega1} = 0.5, \sigma_{\omega2} = 0.856$$

$$k = 0.41$$

Donde:

$\rho$  = Densidad (kg/m<sup>3</sup>).

$\nu$  = Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s).

$y$  = Tirante de agua (m).

$U$  = Velocidad (m<sup>2</sup>/s).

$P$  = Presión absoluta (kg/m<sup>2</sup>).

$\omega$  = incógnita de la turbulencia.

$\sigma_{k1}, \sigma_{\omega1}, \beta_1$  = Valores de constantes para k -  $\omega$ .

$\sigma_{k2}, \sigma_{\omega2}, \beta_2$  = Valores de constantes para k -  $\epsilon$ .

$\beta^*, \alpha_1$  = Valores de constantes del modelo SST.

#### 5.4.7. ESTRUCTURA DEL SOLVER: SOLVER INTERFOAM.

El solver interFoam, es un solucionador de dos fluidos inmiscibles isotérmicos e incompresibles utilizando VOF (volumen de fluido) basada en la interface de captura de una fracción de fase, con movimiento de malla opcional y malla cambios de topología, incluido el remallado adaptativo (Greenshields, 2021).

Para ingresar al solver se presenta la siguiente estructura consecutiva de archivos y directorios:



El solucionador o solver “waterChannel” se encuentra dentro de RAS y el cual se utilizó de base para desarrollar y adaptar al modelado del desarenador, y tiene la siguiente estructura:

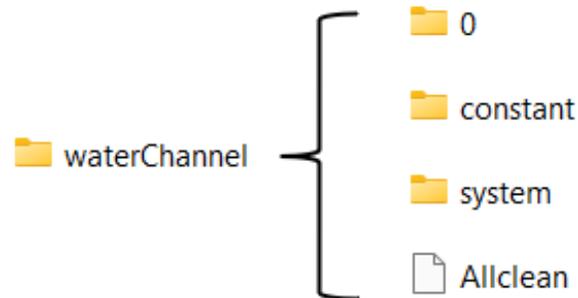


Figura 34. Estructura del Solver waterChannel

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia la carpeta base waterChannel contiene 3 subcarpetas donde se encuentran archivos de texto con lenguaje de programación C++ para el desarrollo del mismo:

- **Directorio 0:**

Esta carpeta contiene los ficheros de texto de las condiciones iniciales para iniciar la simulación tales como *alpha.water*, *k*, *nut*, *omega*, *p\_rgh*, *U*, los cuales serán descritos a continuación:

- alpha.water*: Adimensional, representa el tirante de agua inicial en el modelo
- k* : Representa la energía cinética turbulenta ( $m^2/s^2$ ).
- nut* : Indica el valor de la rugosidad absoluta en milímetros ( $m^2/s$ ).
- omega* : Representa la tasa específica de disipación viscosa ( $s^{-1}$ ).

v.  $p\_rgh$  : Es la presión modificada de interfase P- $\rho gh$  ( $kg/m.s^2$ ).

vi.  $U$  : Es el archivo que representa la velocidad inicial el cual tiene tres componentes  $U_x$ ,  $U_y$  y  $U_z$ . ( $m/s$ )

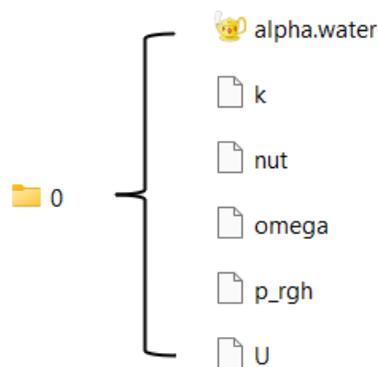


Figura 35. Archivos de la carpeta 0

Fuente: Elaboración propia.

- **Directorio Constant:**

Esta carpeta tiene contiene tres archivos iniciales:  $g$ ,  $transportProperties$  y  $turbulenceProperties$ , y cuando se ejecuta el mallado a modelar, aparece una nueva carpeta con el nombre  $polymesh$ .

i.  $g$  : Contiene el valor de la gravedad en el sentido en el que se le asigne ( $m/s^2$ )

ii.  $TransportProperties$  : Posee el modelo de transporte del fluido que en el caso de la presente investigación posee fases de agua y aire, donde se le asigna las unidades de viscosidad ( $m^2/s$ ) y densidad ( $k/m^3$ ) respectivamente y además del valor de la tensión superficial ( $kg/s^2$ ) .

iii. `turbulenceProperties` : Contiene el tipo de turbulencia RAS (simulación promediada de Reynolds), en este caso el método de cálculo se tienen flujos turbulentos e incompresibles a través del modelo de turbulencia k-omega SST.

iv. `polyMesh` : Abarca la descripción completa de la malla en el cual dentro de ellos se almacenan archivos con la definición fundamental de los patches para posteriormente asignar su comportamiento: *atmosphere, walls, inlet, outlet*.

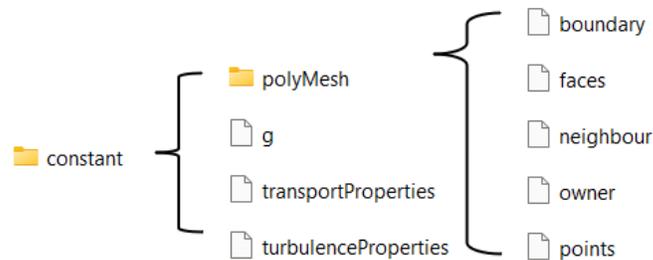


Figura 36. Archivos de la carpeta constant

Fuente: Elaboración propia

- **Directorio System**

i. `controlDict` : Contiene el control de tiempo, asignación de `courant` máximo, tiempo de inicio y finalización de la simulación, escritura de solución, paso de tiempo y numero de iteraciones.

ii. `fvSchemes` : Posee los esquemas de discretización de las ecuaciones diferenciales

iii. `fvSolution` : Contiene solucionadores y métodos de solución de las ecuaciones diferenciales

iv. `setFieldsDict` : Contiene la extensión de fracción inicial de agua al iniciar el modelo

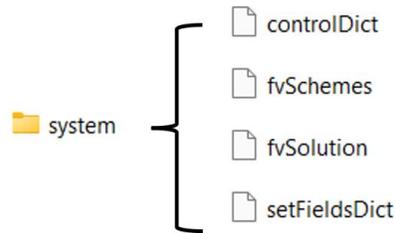


Figura 37. Archivos de la carpeta system

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.8. NÚMERO DE COURANT

El número de Courant (llamado así por el matemático Richard Courant), se define como un número adimensional que suele ser utilizado en el modelamiento o simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD), con el propósito de controlar los requisitos de paso de tiempo de una simulación para un tamaño de malla y una velocidad de paso de flujo además esta enlazado con la condición de estabilidad de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) de los esquemas numéricos (IdealSimulations, 2020).

Su fórmula se define:

$$Co = \frac{U * \Delta t}{\Delta h} \quad (55)$$

Donde:

U : Velocidad del flujo.

$\Delta t$  : Paso de tiempo.

$\Delta h$  : Tamaño de celda de la malla.

Para una situación multidimensional, la condición se puede evaluar como la sumatoria de las direcciones:

$$Co = \sum_i \frac{U_i \Delta t}{\Delta h_i} \quad (56)$$

Como restricción en las simulaciones se tiene que, si el número de Courant es mayor que uno, implica que la información viaja mediante de más de una celda por lo que las soluciones que se obtengan de ello serán imprecisas.

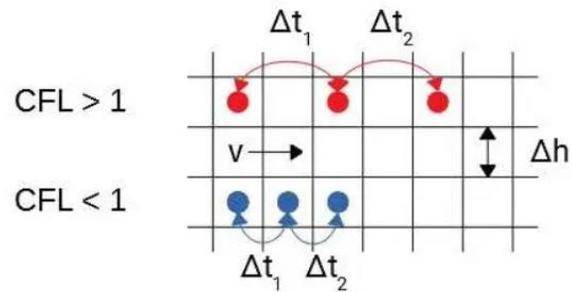


Figura 38. Visualización del número de Courant y la condición CFL en una malla computacional  
Fuente: Imagen tomada de la página de simulación (IdealSimulations,2020)

## CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6. LOCALIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

#### 6.1. DIVISIÓN POLÍTICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

##### ✓ Ubicación geográfica de la Captación El Ronquillo en el distrito de Cajamarca

El Desarenador de la captación El Ronquillo se encuentra en la parte oeste de la ciudad de Cajamarca, provincia de Cajamarca, distrito de Cajamarca.

Está ubicada en las siguientes coordenadas UTM WGS 84. Norte; 9208201.71, Este; 772080.94<sup>a</sup> una altura de 2837 m.s.n.m.

Hidrológicamente pertenece a la microcuenca Tres Ríos.

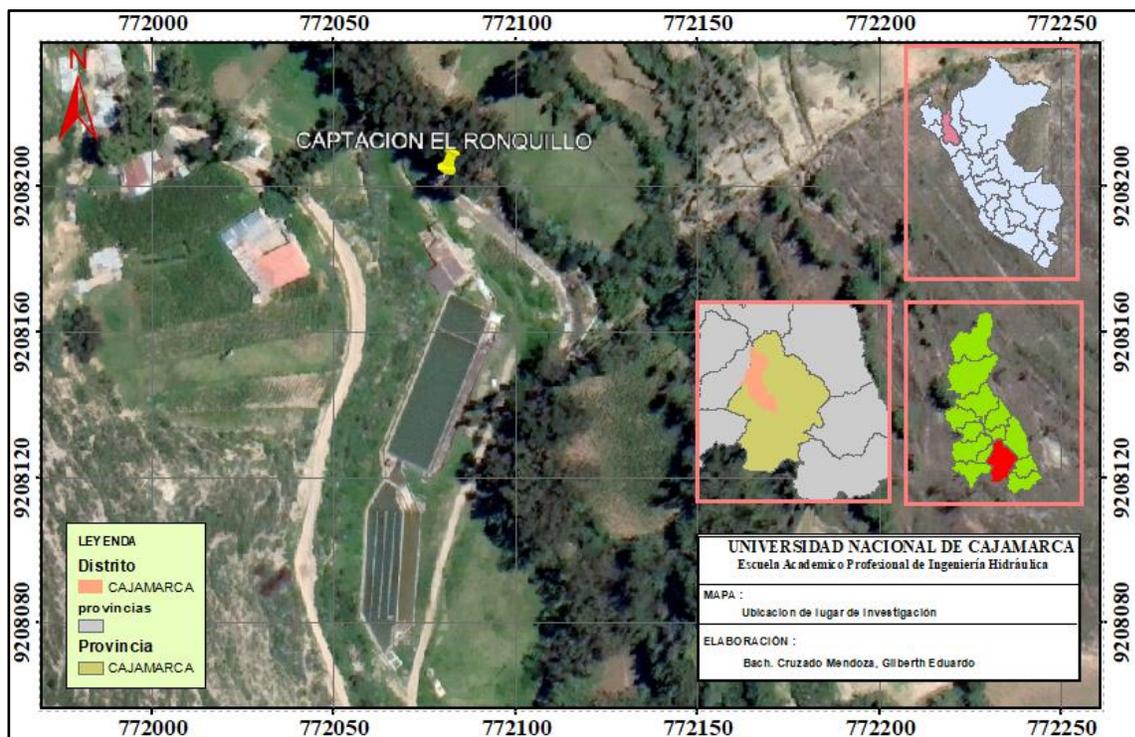


Figura 39. Lugar de estudio en el distrito de Cajamarca

Fuente: Elaboración propia.

## 6.2. ACCESIBILIDAD AL LUGAR DE ESTUDIO

Cuenta con una hora de recorrido (a pie) desde el CEPUNC hasta la captación. Para poder acceder al área de estudio se toma la calle José Gálvez, Hasta la avenida Perú, en un tiempo de 15 minutos en la línea de combis (dependiendo del lugar en el que se encuentre), luego se recorre en dirección al puente de la quebrada San Vicente, para luego Dirigirse hacia el cerro El Ronquillo El área de investigación cuenta con una trocha carrozable hasta la zona de interés.

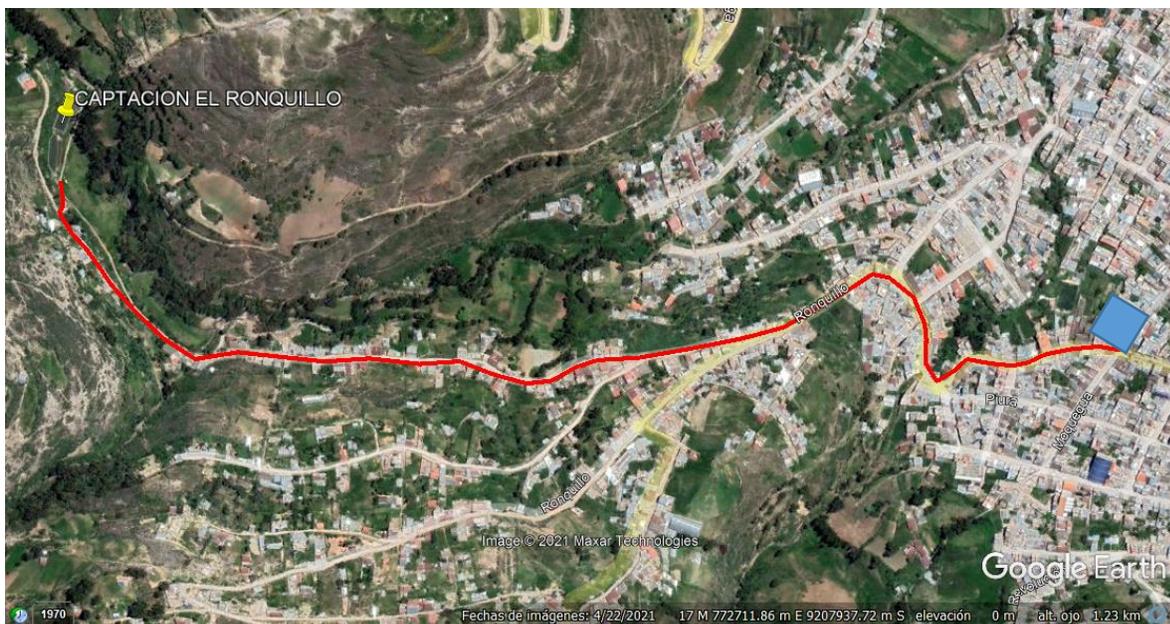


Figura 40. Vía de acceso a la captación desde CEPUNC

Fuente: Imagen satelital tomada en el programa GOOGLE EARTH (2021)

## 7. MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN

Los resultados que se obtengan en el modelo numérico tienen que tener la cualidad de ser lo más precisos posibles, por lo que fue fundamental contar con equipos tecnológicos adecuados y calibrados en la medida de lo que se requirió, es así que se obtuvo una buena data en la topografía la cual

permitió la construcción de la estructura en 3D, sin lo mencionado anteriormente no hubiera sido capaz de lograr la calibración y la validación que se necesitaba.

## **7.1. EQUIPOS**

### **a. Equipos de Topografía**

- 01 estación total Leica FLEXTIME TSO
- 01 trípode
- 01 Jalón
- 01 prisma
- 01 cargador de batería
- 01 GPS Garmin – Montana 680
- 01 wincha de 5 m.
- Cronómetro.
- 01 Sensor tipo Correntómetro PASCO
- 01 adaptador analógico marca PASCO

### **b. Recursos computacionales**

- 01 laptop marca TOSHIBA con procesador Intel Core i5 64 bits
- 1 laptop marca DELL con procesador Ryzen 7 64 bits.
- CPU marca THERMATA Core i7 7th generación 64 bits

### **c. Adicionales**

- Cámara fotográfica.
- USB

## **7.2. MATERIALES E INSTRUMENTOS**

Libros físicos y electrónicos, fotográficas, libreta de campo, prisma, wincha, frascos de muestreo, flotador casero, material de escritorio (lapicero, folder, papel bond).

## **7.3. SOFTWARE COMPUTACIONAL**

Microsoft Word, Excel version 2016, AutoCAD civil 3D 2020, OpenFoam para-Ubuntu y version Windows, Salome Meca, ArcGIS, Google Earth, Internet.

## **8. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LA ESTRUCTURA.**

### **8.1. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA**

- **Recopilación de la información**

Los planos en planta de la estructura fueron facilitados por la EPS SEDACAJ, no obstante, se tuvo que hacer el levantamiento para verificar y además obtener las profundidades de la estructura ya que el proyecto de actualización y georreferenciación que había ejecutado dicha institución, solo contaba con esa información.

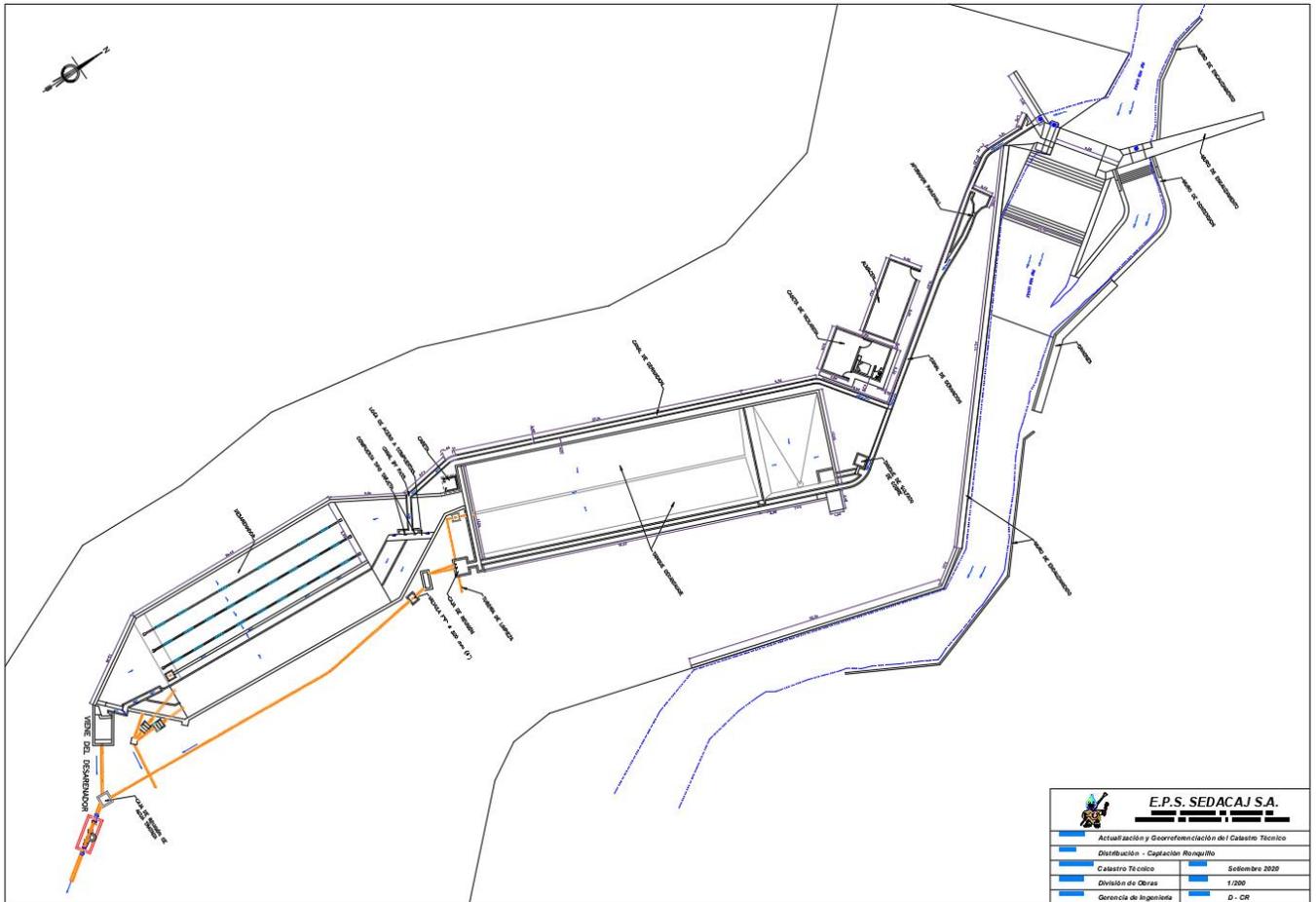


Figura 41 . Distribución de la captación Ronquillo  
 Fuente: Plano proporcionado por la EPS SEDACAJ

- **Medidas obtenidas de la estructura de estudio.**

Las coordenadas obtenidas en el levantamiento abarcan desde el canal de ingreso hasta la cámara de recolección, no obstante, para el modelado de la estructura solo se considera el desarenador, el cual posee; una apertura de entrada de 0.45 m. de ancho con que conecta con el desarenador pasando a través de 3 secciones debajo del canal de limpieza, para luego ir a la sección del desarenador la cual mide de ancho 9.77m y de profundidad de entrada de; 1.24 m. , dentro de la sección; 1.55 m. , cuenta con 3 pantallas de concreto con un largo de 28.95 y profundidad de 1.46

m. cuyo propósito es reducir la velocidad del agua y apaciguar los efectos del viento, para finalmente pasar por rebose a la cámara de reunión a través de un canal de 1.04 m. x 0.4 m.

- **Funcionamiento Normal**

Para el funcionamiento normal, la estructura cuenta con un canal de conducción desde la bocatoma, que pasa por un parshall y luego va a un tanque sedimentador de forma rectangular y este transporta el agua por rebose a otro rectangular y este a su vez pasa a un canal de recolección el cual por rebose nuevamente pasa al desarenador de lavado discontinuo cuya característica es que cuenta con 4 secciones separadas por paredes de concreto para luego pasar a una cámara de reunión.



Figura 42. Canal de entrada.

Fuente: Elaboración propia.

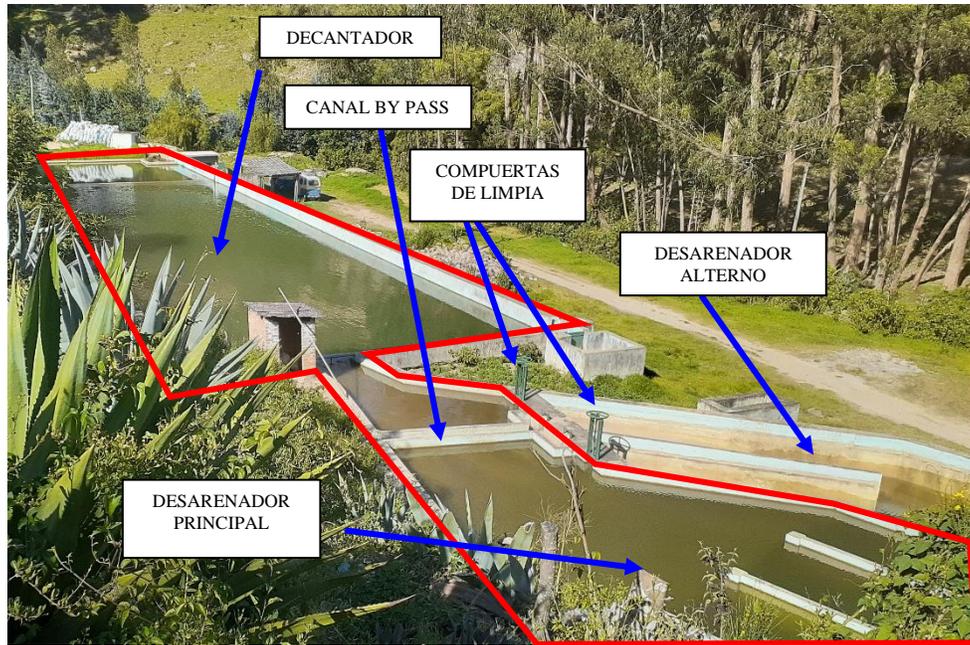


Figura 43. Presedimentadores y desarenador de la estructura principal.

Fuente: Elaboración propia.

- **Funcionamiento por limpieza.**

Cuando se limpia la estructura principal, el canal es desviado a un canal de limpieza el cual pasa directamente a un desarenador de lavado continuo el cual va directamente a la cámara de reunión.



Figura 44. Canal de Limpieza.

Fuente: Elaboración propia.

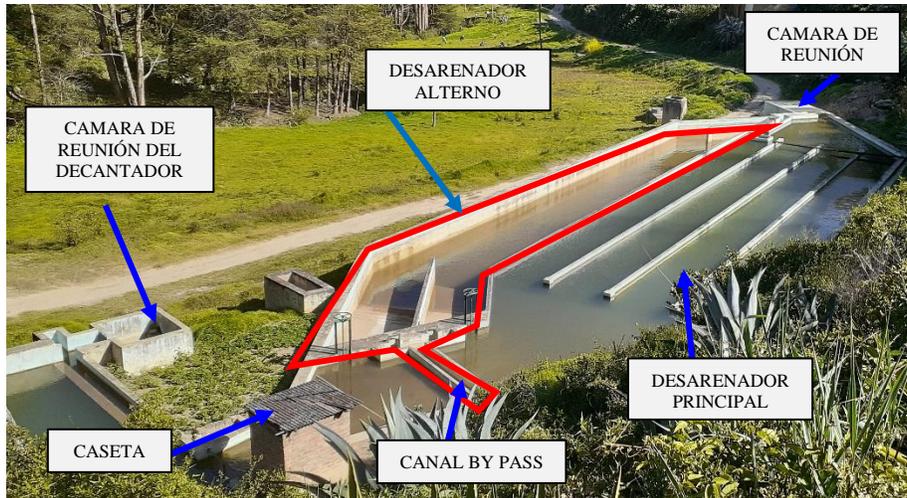


Figura 45. Desarenadores y estructura de limpieza.

Fuente: Elaboración propia.

## 8.2. CAUDAL DE OPERACIÓN

El caudal máximo con el que fue diseñado la estructura es 100 l/s, no obstante, los caudales con los que opera la estructura están relacionados con la turbiedad que presenta el agua al momento de una precipitación intensa en la cuenca, ya que según los operarios y encargados al enviar un caudal mayor a la planta de tratamiento se tiene problemas con el sedimentador en dicha planta, por lo que los valores que ellos operan son:

- Con agua clara : 80 – 100 l/s.
  
- Con agua turbia : < 70 l/s.

## 9. CARACTERÍSTICAS GEOLOGICAS

El relieve de la microcuenca Tres Ríos está compuesta por elevaciones naturales de altura considerable, estrecho con laderas y con una estratigrafía que posee depósitos fluviales del periodo cuaternario conformado por cantos rodados de caliza tamaño de grava, gravilla, también arena, limo, arcilla (Reyes, 1980).

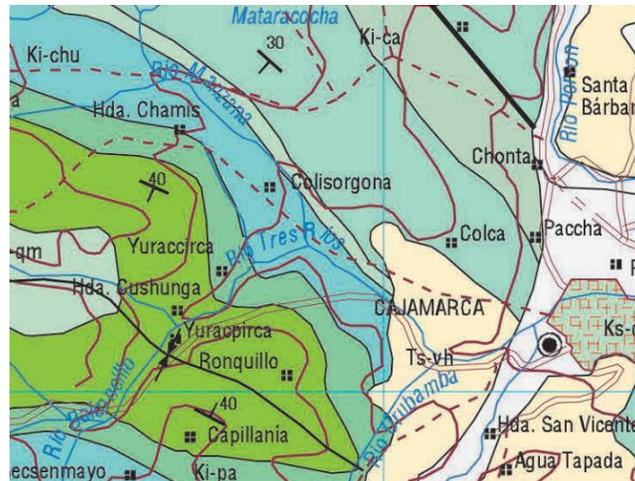


Figura 46. Formación geológica según la geología del cuadrángulo 15f

Fuente: Recopilado de las notas de (Reyes Rivera, 1980).

El distrito de Cajamarca, pertenece a la Región Quechua, ubicado a 2750 m.s.n.m., no obstante, la zona de estudio se encuentra a más altura, Según ,posee un clima templado semiseco, templado y frio con ausencia de lluvias en las estaciones de otoño, invierno y primavera (Sánchez & Vásquez, 2010).

## 10. MÉTODOS

La metodología adoptada para la recopilación de información fue seguida de las investigaciones similares a nivel nacional e internacional para caracterizar el flujo en el desarenador y calibrarlo en el modelo computacional.

Como primer objetivo, fue primero hacer un reconocimiento de la zona de investigación, no sin antes solicitar los permisos correspondientes, para luego hacer las visitas correspondientes en las cuales se obtuvo la información directa de los encargados, es así que se puede delimitar la estructura a modelar teniendo como referencia la canaleta de recolección que se encuentra justo después del tanque decantador. Luego se procedió a realizar el levantamiento topográfico en agosto del año 2021 de la estructura, seguidamente se obtuvieron muestras de agua en épocas de máximas avenidas que es cuando se presenta la mayor concentración de sedimentos.

La información obtenida fue procesada posteriormente para ser utilizada en el modelo numérico.

### **10.1. TRABAJO DE CAMPO**

El trabajo de campo consistió en el levantamiento topográfico para la obtención de las profundidades y pendientes de la estructura y la toma de muestras de agua y los aforos correspondientes para la calibración del modelo numérico

a) **Levantamiento topográfico**, se realizó una toma de datos de profundidades utilizando una estación total, de manera que se tenga la mayor precisión posible.



Figura 47. Proceso del levantamiento topográfico del desarenador.  
Fuente: Elaboración propia.

b) **Toma de datos de velocidades de la estructura**, se toman varias muestras de velocidades en la entada y la salida de la estructura, ya que es donde se presentan las mayores velocidades, capaces de ser registradas por el sensor.



Figura 48. Muestro de las velocidades.  
Fuente: Elaboración propia.

## 10.2. TRABAJO DE GABINETE

### 10.2.1. DIBUJO DE LA GEOMETRÍA.

Luego de la obtención de los puntos realizado en el levantamiento topográfico, se procedió a exportarlos a AutoCAD Civil 3D con el fin de comenzar a dibujar la estructura

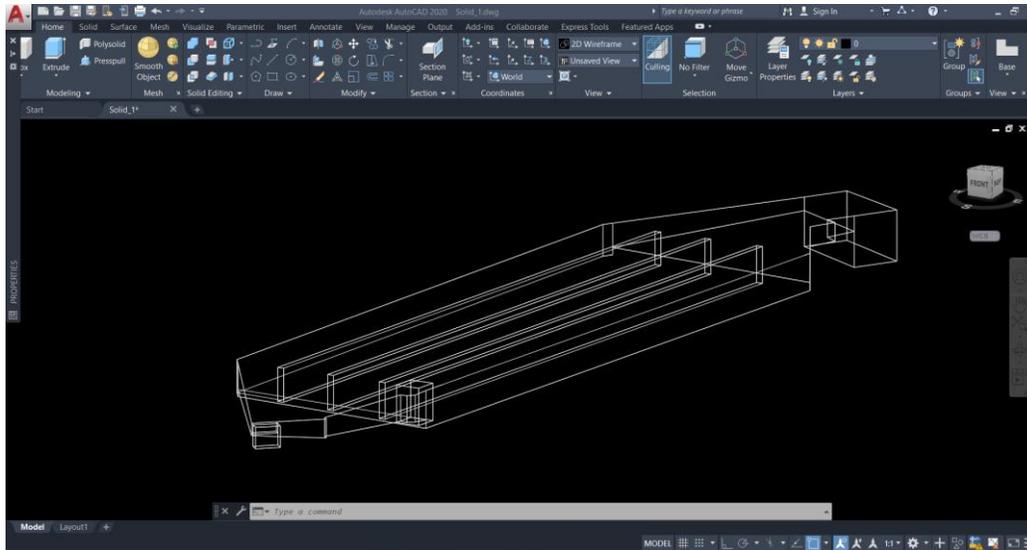


Figura 49 . Procesamiento de los puntos obtenidos del desarenador

Fuente: Elaboración propia.

Luego de dibujados, corroborados, y ajustados los puntos obtenidos, se utiliza el programa Salome-Meca versión 9.7.0 con el fin de definir y adaptar la estructura de manera que se pueda modelar correctamente, se construyen curvas, caras del modelo, el sólido, y finalmente realizar el mallado del modelo.

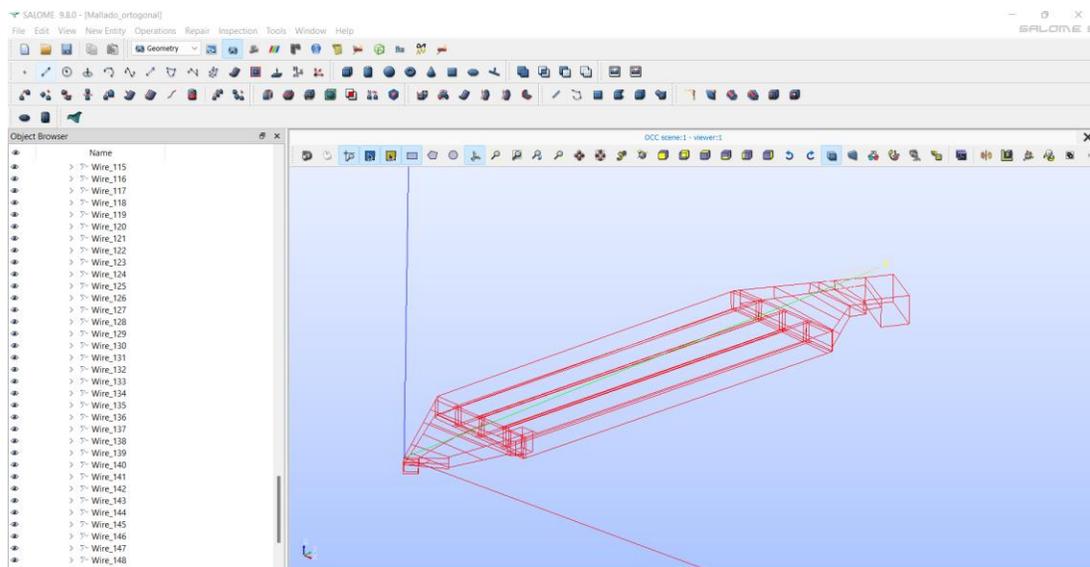


Figura 50. Inserción de puntos y curvas de la estructura

Fuente: Elaboración propia.

## 10.2.2. CREACIÓN DE LA MALLA.

Luego de las curvas y puntos, se seleccionan las caras, y se construye el sólido haciendo mención en los grupos que éste tendrá, como son la entrada, salida, paredes y atmosfera.

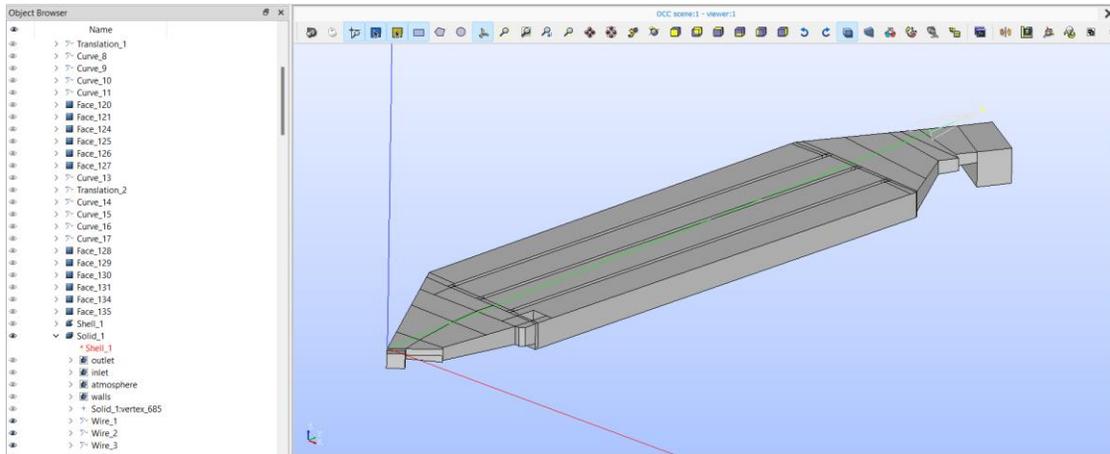


Figura 51. Creación del sólido  
Fuente: Elaboración propia.

Como siguiente paso se tiene la creación de una malla no estructurada debido a la naturaleza del modelo, definiendo un tamaño mínimo 0.20 m de y máximo de 0.25 m, el mallado arrojó 317388 tetraedros.

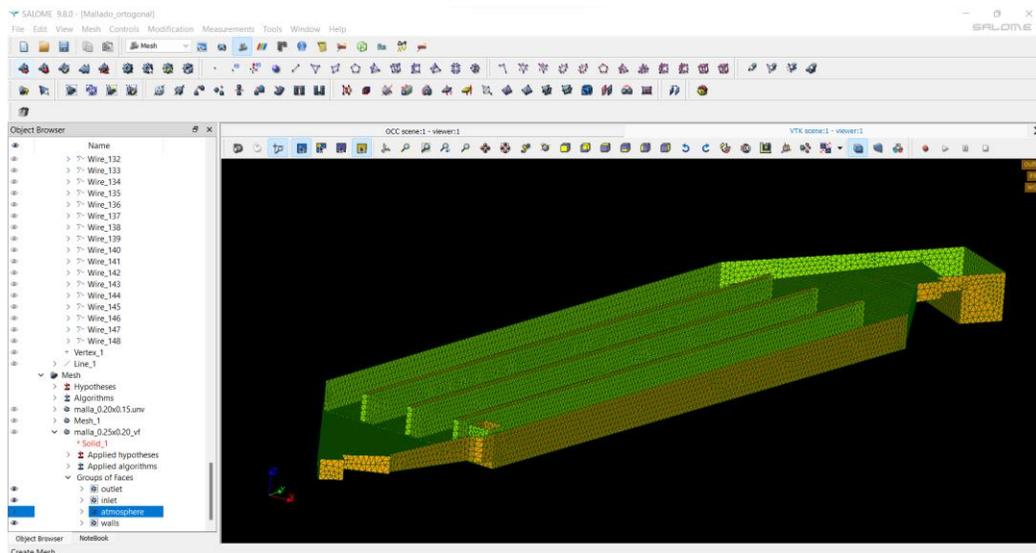


Figura 52. Mallado del desarenador  
Fuente: Elaboración propia.

### 10.2.3. EXPORTACIÓN DE LA MALLA.

Consecuentemente se procede a exportar la malla creada con extensión. Unv, luego se ubica el archivo en la carpeta a modelar, y se la exporta mediante el comando *ideasUnvToFoam.exe*, seguidamente con el comando *checkMesh.exe* se realiza una revisión de la ortogonalidad con fines de convergencia.

```
Time = 0
Mesh stats
points:          65770
faces:          657592
internal faces: 611960
cells:          317388
faces per cell: 4
boundary patches: 4
point zones:    0
face zones:     0
cell zones:     0

Overall number of cells of each type:
hexahedra:      0
prisms:         0
wedges:         0
pyramids:       0
tet wedges:     0
tetrahedra:     317388
tetrahedra:     317388
polyhedra:      0

Checking topology...
Boundary definition OK.
Cell to face addressing OK.
Point usage OK.
Upper triangular ordering OK.
Face vertices OK.
Number of regions: 1 (OK).
inlet           282      166      ok (non-closed singly connected)
atmosphere     14641    7954     ok (non-closed singly connected)
walls          30691    16008    ok (non-closed singly connected)

Checking geometry...
Overall domain bounding box (-5.92015 -0.6 -2.1607) (5.40497 48.4498 0.0289811)
Mesh has 3 geometric (non-empty/wedge) directions (1 1 1)
Mesh has 3 solution (non-empty) directions (1 1 1)
Boundary openness (-3.82811e-16 -6.64955e-18 -9.70108e-17) OK.
Max cell openness = 2.57108e-16 OK.
Max aspect ratio = 5.18615 OK.
Minimum face area = 0.00346662. Maximum face area = 0.0955003. Face area magnitudes OK.
Min volume = 0.000187824. Max volume = 0.00828344. Total volume = 477.129. Cell volumes OK.

Mesh non-orthogonality Max: 58.5159 average: 15.6259
Non-orthogonality check OK.
Face pyramids OK.
Max skewness = 0.655624 OK.
Coupled point location match (average 0) OK.

Mesh OK.

End
```

Figura 53. Revisión de las características de la malla

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente se utiliza la aplicación ParaView para revisar el mallado

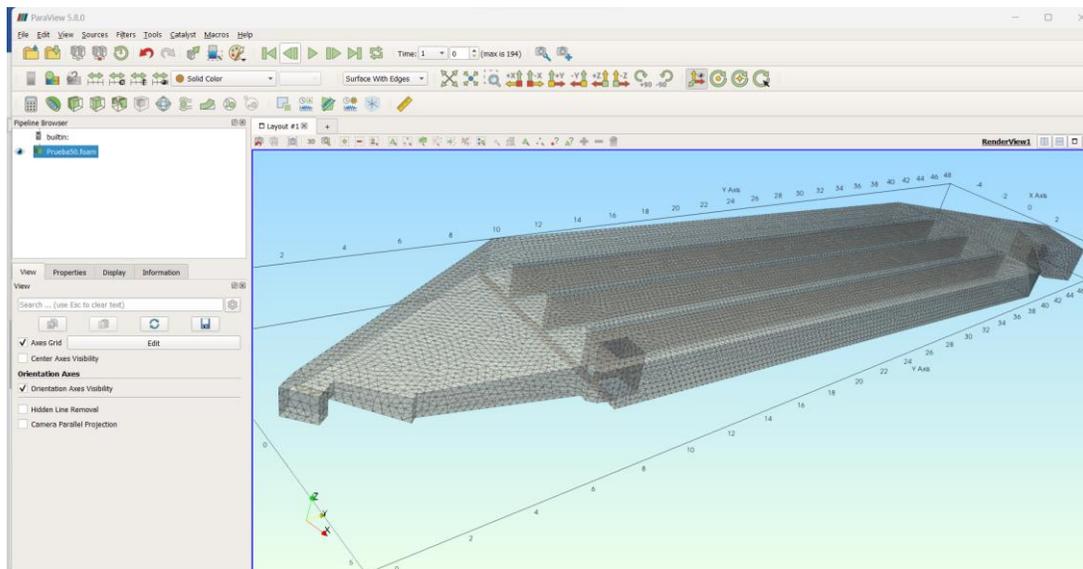


Figura 54. Exportación del mallado

Fuente: Elaboración propia.

#### 10.2.4. CONDICIONES DE CONTORNO.

Para realizar la modelación de la presente investigación, se tomó en cuenta los parámetros que afectan a la misma y por tanto se seleccionó como referencia el caso “waterChannel”, el cual cumple con las configuraciones y condiciones similares a las que se presentaría en un desarenador.

##### 10.2.4.1. BOUNDARY.

El archivo Boundary es el dominio de la geometría en estudio el cual se encuentra en lenguaje C++, el cual contiene las condiciones iniciales y de frontera del mallado, donde se tienen dos condiciones:

- Patch : Patch genérico
- walls : Patch utilizado para las paredes

```
foamFile
{
  version      2.0;
  format       binary;
  class        polyBoundaryMesh;
  location     "constant/polyMesh";
  object       boundary;
}

// *****

outlet
{
  type         patch;
  nFaces       18;
  startFace    611960;
}
inlet
{
  type         patch;
  nFaces       282;
  startFace    611978;
}
atmosphere
{
  type         patch;
  nFaces       14641;
  startFace    612260;
}
walls
{
  type         walls;
  nFaces       30691;
  startFace    626901;
}

// *****
```

Figura 55. Condiciones de contorno de la geometría

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Características de la malla a simular

Tipo de Malla	Malla no estructurada
Elementos	Tetraedros
Número de Elementos	317388
Ortogonalidad máxima	58.51
Modelo de turbulencia seleccionado	k-OmegaSST
Convergencia	SI
Tiempo de simulación	250 (s.)

#### 10.2.4.2. FICHEROS DE LA CARPETA “0”

Los archivos que se encuentran en esta carpeta son las condiciones iniciales del modelo para en paso de tiempo = 0, estos representan los valores iniciales para ese tiempo de simulación, cada archivo de texto cuenta con sus respectivas parámetros dimensiones en el sistema internacional.

A continuación, se presentan tablas acerca de la descripción de cada archivo:

Tabla 8. Configuración para el archivo de fracción volumétrica inicial “alpha.water”

<b>alpha. Water</b>		<b>Unidades SI [0 0 0 0 0 0]</b>
<b>Contorno</b>	<b>Tipo</b>	<b>Valor</b>
inlet	fixedValue	1
outlet	zeroGradient	0
atmosphere	inletOutlet	0
walls	walls	-

Tabla 9. Configuración para el archivo k “energía cinética turbulenta”

<b>k (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)</b>		<b>Unidades SI [0 2 -2 0 0 0 0]</b>	
<b>Contorno</b>	<b>Tipo</b>	<b>Valor</b>	<b>internalField</b>
inlet	fixedValue	\$internalField	0.00015
outlet			
atmosphere	inletOutlet	0.00015	-
walls	kqRwallFunction	0.00015	-

Tabla 10. Configuración para el archivo “nut” (viscosidad cinemática turbulenta)

<b>nut</b>		<b>Unidades SI [0 2 -1 0 0 0]</b>	
<b>Contorno</b>	<b>Tipo</b>	<b>Valor</b>	
inlet	-	-	
outlet	-	-	
atmosphere	zeroGradient	0	
walls	nutkRoughWallFunction	3.6e <sup>-4</sup> (m)	

La tabla No. 9, expresa el valor de la rugosidad absoluta k (mm) 0.36 el cual corresponde a concreto simple que es el material del cual esta recubierto la estructura.

Tabla 11. Configuración para el archivo “omega ( $\omega$ )” (Tasa específica de disipación viscosa)

<b>omega</b>		<b>Unidades SI [0 0 -1 0 0 0]</b>	
<b>Contorno</b>	<b>Tipo</b>	<b>Valor</b>	<b>internalField</b>
inlet	fixedValue	\$internalField	0.003
outlet	-	-	-
atmosphere	-	-	-
walls	kqRwallFunction	0.00015	-

Tabla 12. Configuración para el archivo “p\_rgh” (Presión modificada de interfase)

<b>p_rgh</b>		<b>Unidades SI [1 -1 -2 0 0 0]</b>	
<b>Contorno</b>	<b>Tipo</b>	<b>Valor</b>	
inlet	-	-	
outlet	-	-	
atmosphere	totalPressure	0	
walls	-	-	
“.*”	fixedFluxPressure	0	

La tabla 11 describe a la presión modificada de interfase, que es la interacción de dos fluidos (agua-aire) los cuales presentan diferentes densidades.

Tabla 13. Configuración para el archivo “U” (velocidad)

<b>U</b>		<b>Unidades SI [0 1 -1 0 0 0]</b>
<b>Contorno</b>	<b>Tipo</b>	<b>Valor</b>
inlet	flowRateInletVelocity	Q (m <sup>3</sup> /s)
outlet	inletOutlet	(0 0 0)
atmosphere	pressureInletOutletVelocity	(0 0 0)
walls	fixedValue	(0 0 0)

La función descrita como “flowRateInletVelocity” representa al caudal volumétrico de ingreso en m<sup>3</sup>/s.

#### 10.2.4.3. FICHEROS DE LA CARPETA “CONSTANT”

La carpeta constant contienen los archivos que definen las condiciones físicas del modelo, tales como: gravedad (g), propiedades de transporte (transportProperties) y las propiedades de turbulencia (turbulenceProperties). Además, luego de realizar la exportación y corrido de la malla a modelar, se genera la subcarpeta llamada “polyMesh”, la cual contiene todos los datos acerca de la malla.

Tabla 14. Configuración para el archivo “g” (gravedad)

<b>g</b>	<b>SI [0 1 -2 0 0 0]</b>
Valor	(0 0 -9.81)

Tabla 15. Configuración para el archivo transportProperties: viscosidad cinemática, densidad y tensión superficial a temperatura promedio de 17°

<b>transportProperties</b>				
<b>Multifase: Agua y aire</b>				
<b>Fluido</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Valor</b>
<b>Agua</b>	un	m <sup>2</sup> /s	[0 2 -1 0 0 0 0]	1.13e <sup>-6</sup>
	rho	kg/m <sup>3</sup>	[1 -3 0 0 0 0 0]	998.8
<b>Aire</b>	un	m <sup>2</sup> /s	[0 2 -1 0 0 0 0]	1.48e <sup>-5</sup>
	rho	kg/m <sup>3</sup>	[1 -3 0 0 0 0 0]	1.21
<b>Interacción agua- aire</b>	sigma	kg/s <sup>2</sup>	[1 0 -2 0 0 0 0]	0.07

Tabla 16. Configuración del archivo “turbulence Properties” (Propiedades de turbulencia)

<b>turbulenceProperties</b>	
Tipo	RAS (Reynolds Avarage Simulation)
RASmodel	kOmegaSST
turbulence	on
printCoeffs	on

#### 10.2.4.4. FICHEROS DE LA CARPETA “SYSTEM”

La carpeta system contiene los archivos de control de tiempo, esquemas de discretización, solucionador de las ecuaciones diferenciales y en algunos casos la configuración de un tirante inicial de agua.

Tabla 17. Configuración del archivo controlDict

<b>controlDict</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Descripción</b>
startTime	0	Tiempo de inicio de la simulación (segundos)
endTime	250	Tiempo de finalización de la simulación (segundos)
deltaT	0.1	Incremento entre tiempo de simulación (segundos)
writeInterval	1	Escritura y creación de carpetas de datos para cada incremento de tiempo de simulación (segundos)
writePrecision	6	Cantidad de decimales en la escritura de resultados.
timePrecision	6	Cantidad de decimales en los directorios.
maxCo	1	Número máximo de Courant
maxAlphaCo	1	Número máximo de Courant para asegurar la simulación
maxDeltaT	1	Número máximo para asegurar convergencia

Tabla 18. Configuración del archivo setFieldsDict a cierto tirante en la geometría, con la finalidad de ahorrar tiempo de simulación en la misma.

<b>setFieldsDict</b>	
Region	boxToCell
boxToCell	(-100 -100 -100) (6.876 44.657 -0.6007)
volScalarFieldValue alpha.water	1.4 (m.)

### 10.2.5. CALIBRACIÓN DEL MODELO.

Para la calibración se utilizaron tres métodos:

- Método del correntómetro.
- Método del flotador.
- Método de ecuación de continuidad.

#### a. Método del Correntómetro

La calibración se realizó mediante las medidas tomadas por el sensor tipo Correntómetro, se tomaron 5 mediciones de velocidades tanto en la entrada como en la salida de la estructura, como se muestra a continuación:

#### ➤ Velocidades tomadas en la entrada y salida de la estructura para la calibración

Tabla 19. Muestreo de velocidades en la entrada de la estructura

<b>ENTRADA</b>	<b>Promedio de velocidades tomadas por el sensor a la entrada (m/s)</b>
Prueba 1	0.3
Prueba 2	0.3
Prueba 3	0.3
Prueba 4	0.3
Prueba 5	0.4
<b>Promedio</b>	<b>0.32</b>

Tabla 20. Muestreo de velocidades en la salida de la estructura

<b>SALIDA</b>	<b>Promedio de velocidades tomadas por el sensor a la salida (m/s)</b>
Prueba 1	0.4
Prueba 2	0.5
Prueba 3	0.5
Prueba 4	0.5
Prueba 5	0.4
<b>Promedio</b>	<b>0.46</b>

➤ **Velocidades tomadas para el aforo**

Luego de tomar los datos a la entrada y a la salida, se procedió medir el caudal rectangular de ingreso a la estructura por lo que también se usó el sensor y se tomaron las medidas de tirante y geometría del canal tal como se muestra:

Tabla 21. Cálculo del caudal de entrada

<b>Ancho (m)</b>	<b>Tirante (m)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Velocidad Prom. (m/s)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>
0.45	0.25	0.1125	0.6	0.0675

Seguidamente se configuraron los datos anteriormente obtenidos para hacer una simulación en OpenFOAM para 250 segundos, se obtuvo lo siguiente:

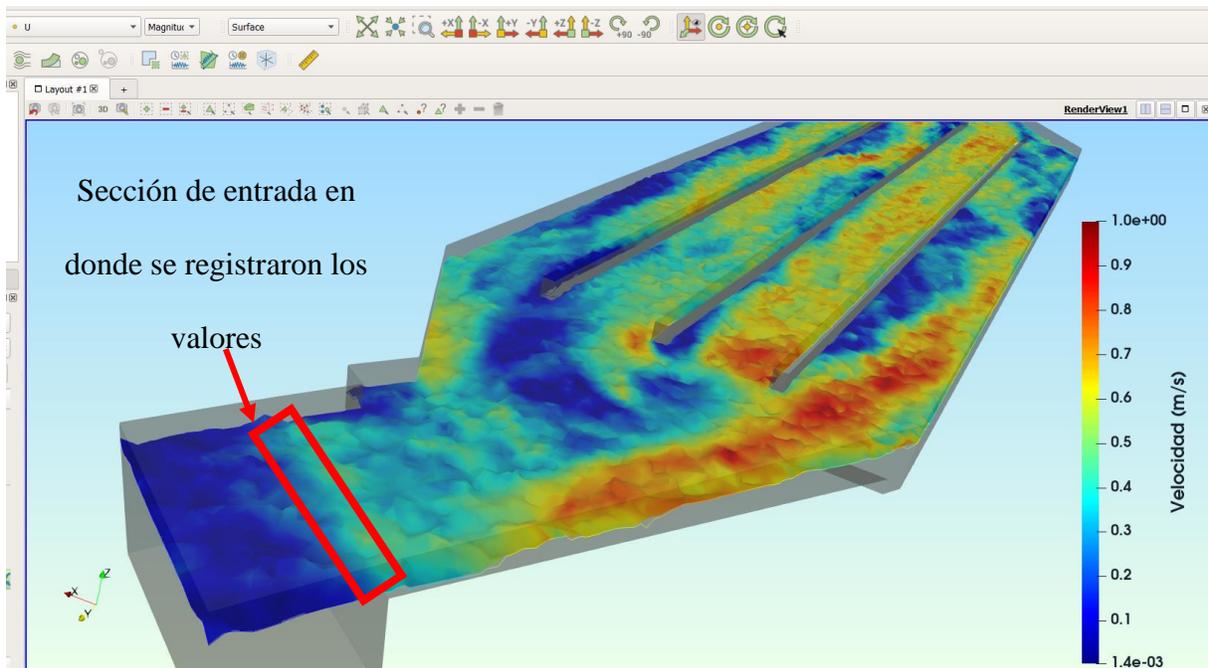


Figura 56. Sección de entrada de la Simulación de Calibración en OpenFOAM  
Fuente: Elaboración propia.

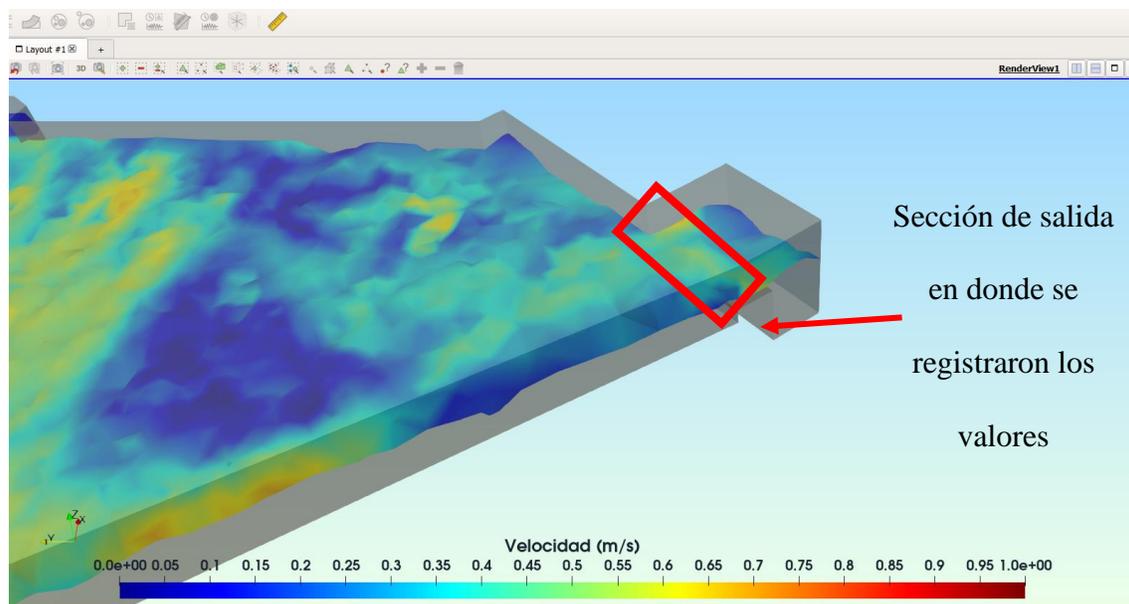


Figura 57. Sección de salida de la Simulación de Calibración en OpenFOAM  
Fuente: Elaboración propia.

### b. Método del flotador

Se utiliza el método del flotador debido a que las velocidades que se presentan son muy bajas y no son medidas por el sensor del correntómetro por lo que se utilizó una botella en la cual se introdujo cierto peso de modo que el viento no afecte de sobremanera las mediciones de velocidad, seguidamente se tomaron 20 metros de distancia en cada sección y se realizaron 5 mediciones en cada una teniendo los siguientes resultados:

#### - Sección 1:

Tabla 22. Medida de la velocidad mediante flotador de la sección 1 del desarenador

Distancia (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
20	141.50	0.1413
20	120.50	0.1660
20	123.00	0.1626
20	129.00	0.1550
20	127.00	0.1575
	<b>V. Prom.</b>	<b>0.156</b>

#### - Sección 2:

Tabla 23. Medida de la velocidad mediante flotador de la sección 2 del desarenador

Distancia (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
20	132	0.15151515
20	140	0.14285714
20	132	0.15151515
20	136	0.14705882
20	135	0.14814815
	<b>V. Prom.</b>	<b>0.148</b>

#### - Sección 3:

Tabla 24. Medida de la velocidad mediante flotador de la sección 3 del desarenador

Distancia (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
20	144	0.13888889
20	160	0.125
20	142	0.14084507
20	152	0.13157895

20	150	0.13333333
	<b>V. Prom.</b>	<b>0.134</b>

- **Sección 4:**

Tabla 25. Medida de la velocidad mediante flotador de la sección 3 del desarenador

Distancia (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
20	225	0.08888889
20	235	0.08510638
20	234	0.08547009
20	226	0.08849558
20	225	0.08888889
	<b>V. Prom.</b>	<b>0.087</b>

Por tanto las mediciones realizadas dieron como resultado diferentes velocidades promedio para cada sección, las cuales van decreciendo hacia la sección 4 que es la que más tirante de agua presenta.

**c. Método de ecuación de continuidad**

Para este método, se toma la geometría de la estructura, el tirante de agua en cada sección y además el caudal que está pasando a través de la estructura el cual fue medido por la E.P.S. SEDACAJ en su planta de tratamiento Santa Apolonia el cual marcaba un valor de 64 l/s, el valor del área fue obtenida por medición del tirante de agua y la geometría trabajada en la presente investigación, dando como valores los siguientes:

Tabla 26. Valor de las áreas medidas de cada sección

<b>Área sección 1</b>	1.06	M <sup>2</sup>
<b>Área sección 2</b>	1.1	M <sup>2</sup>
<b>Área sección 3</b>	1.11	M <sup>2</sup>
<b>Área sección 4</b>	1.14	M <sup>2</sup>
<b>Área Total</b>	4.41	M <sup>2</sup>

Por tanto, utilizando la ecuación de continuidad, resulta:

$$\text{Velocidad} : \quad \text{Caudal} / \text{Área total}$$

$$\text{Velocidad} : \quad 0.064 \text{ m}^3/\text{s} / 4.41 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad} : \quad 0.014 \text{ m/s}$$

#### d. Modelado del desarenador para 64 l/s

Seguidamente se configuraron los datos para un caudal de 64 l/s para hacer una simulación en OpenFOAM para 250 segundos, por lo que se obtuvo lo siguiente:

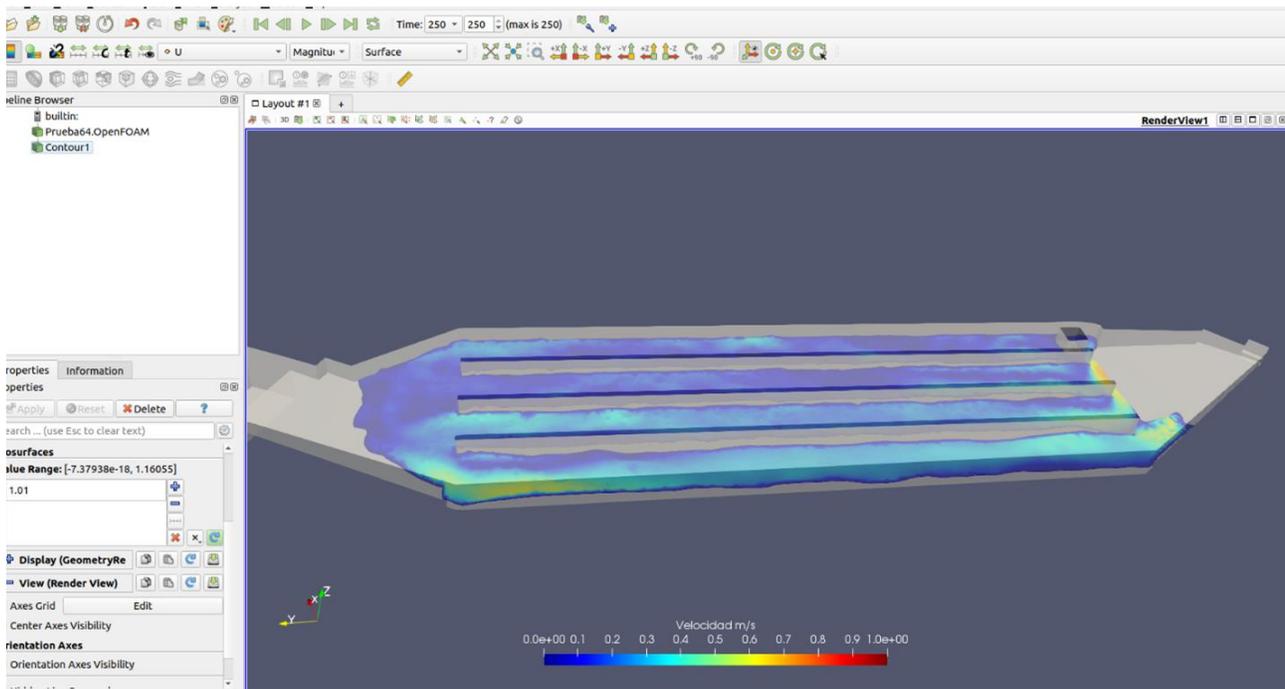


Figura 58. Modelado de la estructura para 64 l/s

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al modelado para 250 segundos, los resultados que se muestran son para valores de 1.01 metros de tirante de agua por lo que en la imagen se exponen las secciones del desarenador las cuales llegan a dicha altura, se puede apreciar que de la sección 1 a la sección 4, la velocidad

va decreciendo similar a los resultados utilizando el método del flotador, además la barra de colores permite observar las velocidades que son alcanzadas en cada sección las cuales varían en el espacio, es decir no son uniformes en todo el trayecto, pero se pueden identificar:

Sección 1 : 0.25 m/s

Sección 2 : 0.15 m/s

Sección 3 : 0.10 m/s

Sección 4 : > 0.10 m/s

De acuerdo con los resultados anteriormente descritos se tiene la siguiente tabla de resultados:

Tabla 27. Resultados de la medición de las velocidades usando diferentes métodos

Secciones del desarenador	Método del flotador	Velocidades m/s	
		Modelado en OpenFOAM	Ecuación de continuidad
Sección 1	0.156	0.25	0.0168
Sección 2	0.148	0.15	0.0168
Sección 3	0.134	0.1	0.0168
Sección 4	0.090	> 0.10	0.0168

#### 10.2.6. ENSAYOS Y PRUEBAS DEL MODELO.

Al momento de ejecutar el modelado, se tuvo que verificar el mallado, seleccionando así el que presentaba convergencia y de menor ortogonalidad posible de modo que se obtengan resultados favorables y precisos de la simulación.

Luego de la selección de la malla, se preparó diferentes pruebas para diferentes caudales, para determinar la eficiencia de cada uno a medida que se le aumenta o disminuye:

Tabla 28. Tiempos de simulación para diferentes caudales

Simulación	Q (m <sup>3</sup> /s)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de simulación real (horas)
Prueba 1	30	250	144
Prueba 2	50	250	144
Prueba 3	80	250	144
Prueba 4	100	250	144
Prueba 5	120	250	144

### 10.2.7. RESULTADOS DEL MODELADO.

Una vez ejecutados los modelos para cada caudal, se pasa a obtener los resultados del mismo, para ello se consideró tomar resultados de las velocidades máximas alcanzadas por el agua a diferentes alturas por debajo del nivel de agua, el primero a 0.20 m., el segundo a 0.5 m. y el tercero a 1.1 m., tal como se muestra en la siguiente ilustración.

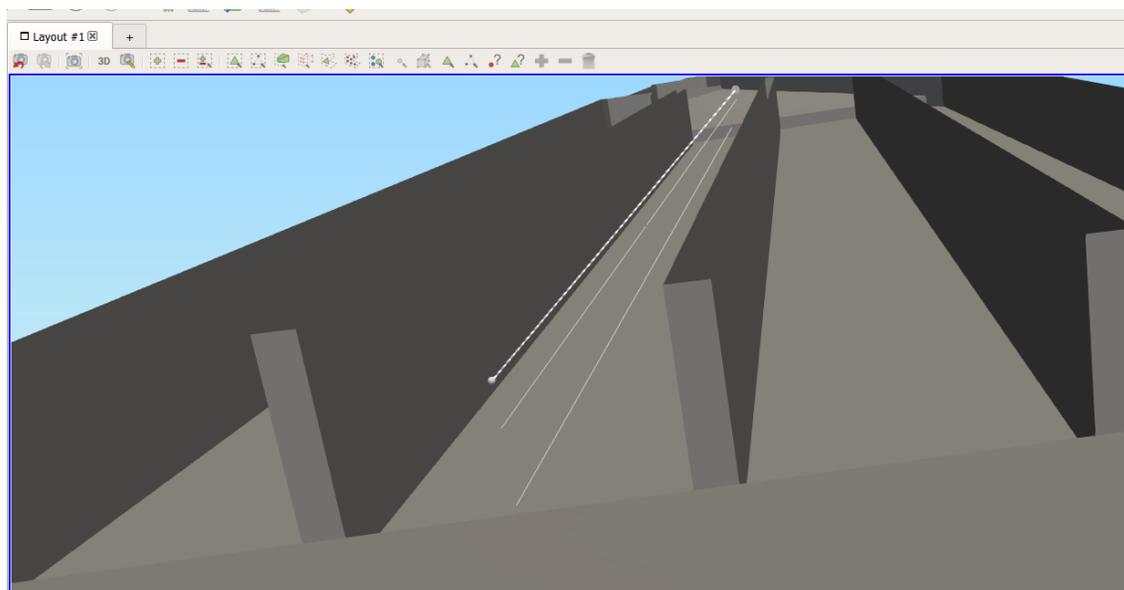


Figura 59. Ubicación de las líneas dentro de las secciones

Fuente: Elaboración propia.

Luego en cada sección, se consideró como criterio para una mejor visualización en la comparación de resultados, el de uso colores en las líneas de resultado y una numeración de secciones de derecha a izquierda:

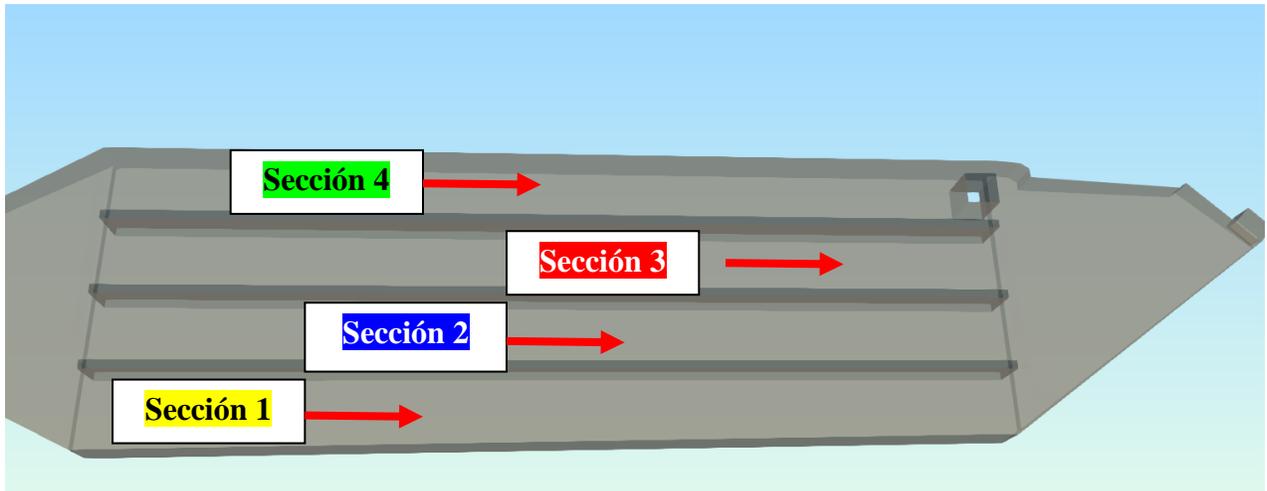


Figura 60. Designación de cada sección.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Colores de las líneas de resultado para cada sección

<b>Numero de Sección</b>	<b>Color</b>
1	Amarillo
2	Azul
3	Rojo
4	Verde

Tal como se aprecia en la siguiente figura:

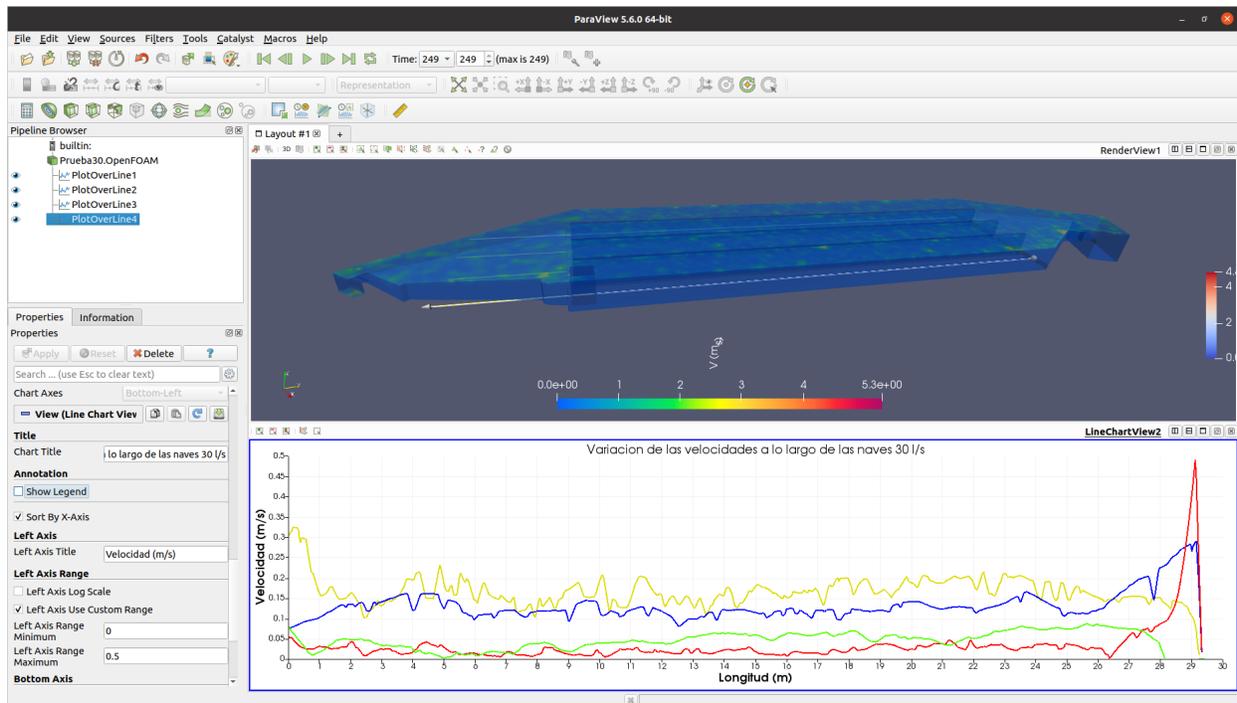


Figura 61. Comparación de las velocidades para cada sección de la estructura

Fuente: Elaboración propia.

De esta comparación se obtuvieron 15 gráficas indicando la variación de la velocidad en cada sección para un caudal asignado las cuales se muestran en los anexos.

Luego, se comparó los valores entre cada sección para cada caudal, es decir, para la sección uno, utilizando los caudales de 30, 50, 80, 100 y 120 l/s, para ello también se optó por el uso de líneas de diferente color para cada caudal con el propósito una mejor visualización y comprensión de los resultados:

Tabla 30. Colores de las líneas de resultado de velocidad para cada caudal

Caudal l/s	Color
30	Negro
50	Amarillo
80	Rojo
100	Morado
120	Verde

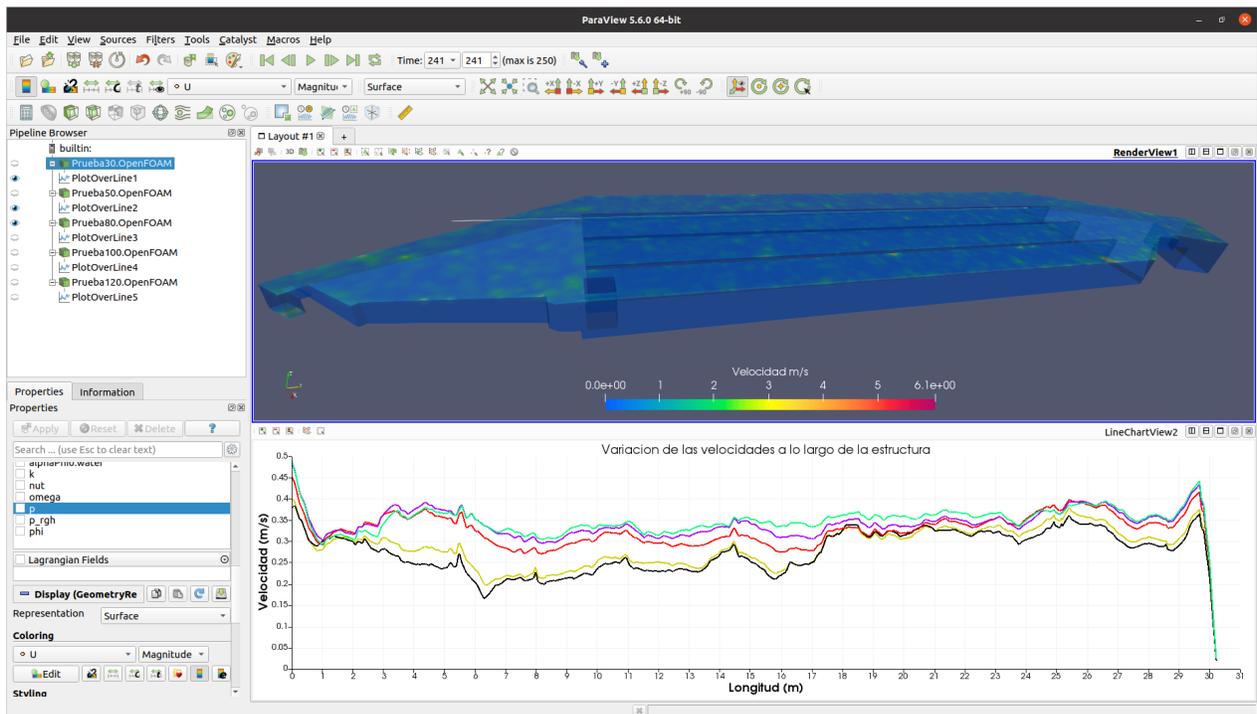


Figura 62. Comparación de las velocidades para diferentes caudales en la sección 1

Fuente: Elaboración propia

## 11. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN

Una vez ejecutado el modelado para cada caudal, se procede a recabar la información acerca de las velocidades máximas obtenidas en cada simulación, es así, que, para cuestiones de cálculo de la eficiencia de sedimentación, se toma la máxima velocidad alcanzada en la sección 1, ya que es aquí donde se presentaron los máximos valores.

Tabla 31. Valores de las velocidades máximas velocidades obtenidas para cada caudal en la sección 1.

<b>Caudal (l/s)</b>	<b>Velocidades Máximas (m/s)</b>
30	0.38
50	0.40
80	0.47
100	0.47
120	0.49

Consecuentemente, se consideró el tamaño de sedimento a evaluar, según los resultados del sedimento analizado por INIA, en el cual arrojó una clase textural areno franca, cómo se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 32. Valores de la concentración en porcentaje de la muestra de sedimentos tomadas en la estructura

<b>Porcentaje de composición de la granulometría de sedimento</b>		
<b>Arena</b>	<b>Limo</b>	<b>Arcilla</b>
82	14	4

Se tomaron los valores del tamaño de sedimento de la clasificación granulométrica internacional de los suelos, además se consideraron los valores de  $\rho_s = 2.6 \text{ gr/cm}^3$  y  $\rho = 1.03 \text{ gr/cm}^3$  que son los valores característicos para granos de cuarzo.

Tabla 33. Clasificación internacional de la granulometría del suelo

<b>Tamaño en milímetros</b>				
2.0 – 0.2	0.2 – 0.02	0.02 – 0.002	0.002 – 0.0002	< 0.0002
Arena gruesa	Arena fina	Limo	Arcilla	Ultra – Arcilla (Coloides)

Fuente: (Sacasa, 2019)

Se consideraron los siguientes valores y abreviaturas

Tabla 34. Valores y abreviaturas del diámetro de los granos para el cálculo de la eficiencia.

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Diámetro de suelos (mm)</b>
	Ag (Arena gruesa)	2
Arena	Am (Arena media)	0.05
	Af (Arena fina)	0.03
Limo	Lg (Limo grueso)	0.02

Luego, se realiza el cálculo de la velocidad de sedimentación utilizando las diferentes metodologías presentadas en el capítulo III, para cada diámetro presentado en la tabla anterior.

## 11.1. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

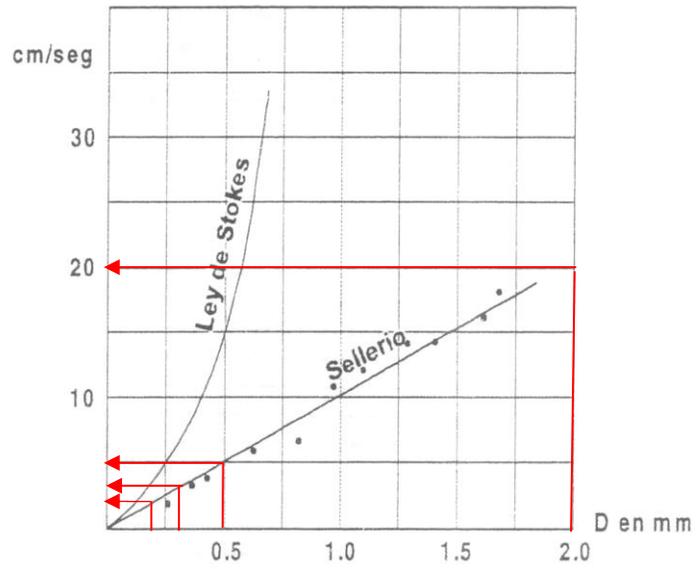
### - Hazen

Para el cálculo se utiliza la ecuación (50) y se obtienen los siguientes resultados.

$g =$	9.8	m/s
$\mu =$	4.00E-06	kg/s.m <sup>2</sup>
$\rho_s =$	2.6	gr/cm <sup>3</sup>
$\rho =$	1.03	gr/cm <sup>3</sup>
$V_{s-Ag} =$	42.74	cm/s
$V_{s-Am} =$	1.07	cm/s
$V_{s-Af} =$	0.64	cm/s
$V_{s-Lg} =$	0.43	cm/s

- **Sellerio**

Los valores son determinados por la figura (21)



$$V_{s-Ag} = 20 \quad \text{cm/s}$$

$$V_{s-Am} = 5 \quad \text{cm/s}$$

$$V_{s-Af} = 3 \quad \text{cm/s}$$

$$V_{s-Lg} = 2 \quad \text{cm/s}$$

- **Owens**

Se determina mediante la ecuación (51)

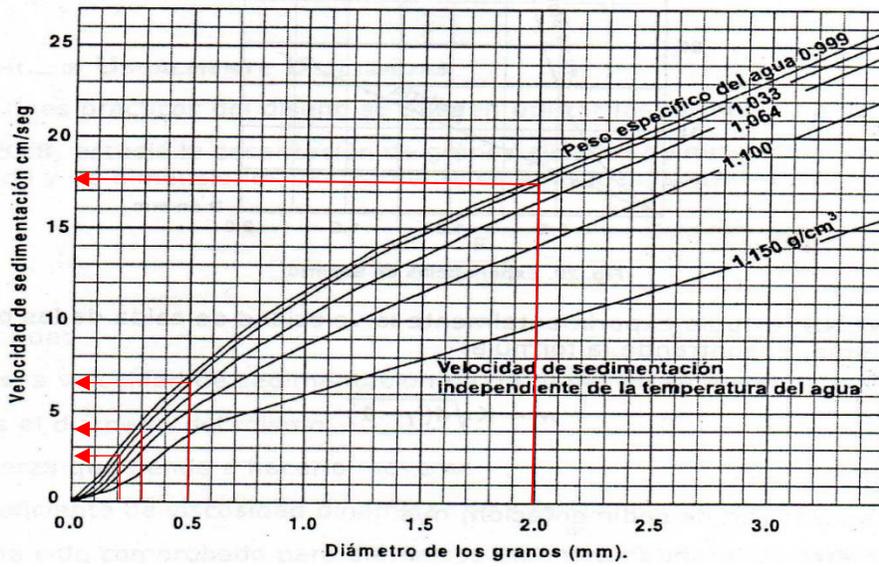
K=	1.28	Granos de cuarzo < 3mm
d=	variable	m
$\gamma$ =	2.60	gr/cm <sup>3</sup>
Vs-Ag =	7.241	cm/s
Vs-Am =	1.145	cm/s
Vs-Af =	0.887	cm/s
Vs-Lg =	0.724	cm/s

- **Sudry**

Los resultados son determinados mediante el grafico de la figura (22)

$$\rho = 1.03 \quad \text{gr/cm}^3$$

$$d = \text{variable} \quad \text{mm}$$



$$V_{s-Ag} = 17.500 \quad \text{cm/s}$$

$$V_{s-Am} = 6.500 \quad \text{cm/s}$$

$$V_{s-Af} = 4.000 \quad \text{cm/s}$$

$$V_{s-Lg} = 2.500 \quad \text{cm/s}$$

- **Krey**

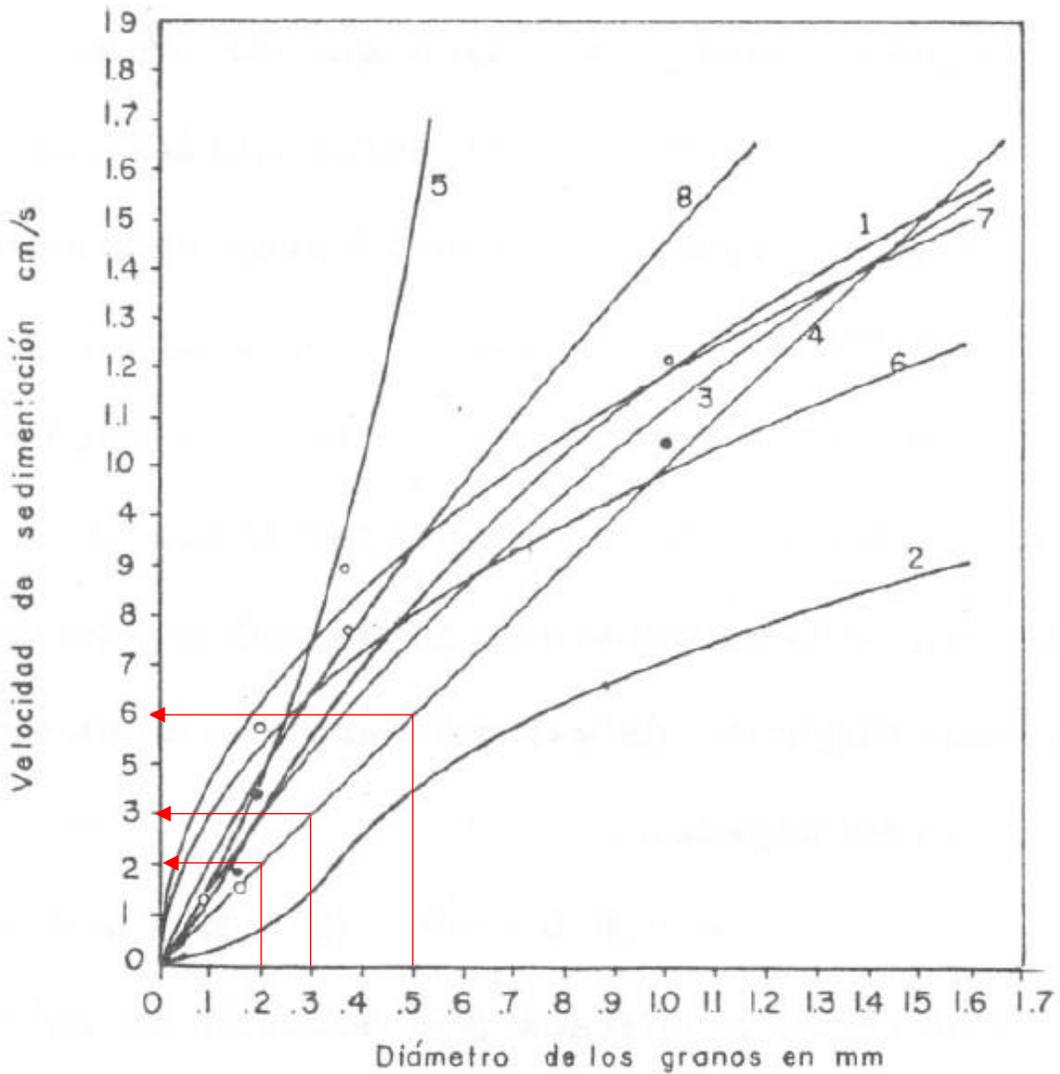
Se utiliza la ecuación (52), para obtener los siguientes resultados.

$d =$	Variable	mm
$\gamma =$	2.6	gr/cm <sup>3</sup>
$V_{s-Ag} =$	38.095	cm/s
$V_{s-Am} =$	0.952	cm/s
$V_{s-Af} =$	0.571	cm/s
$V_{s-Lg} =$	0.381	cm/s

- **Indry**

Para el cálculo de los valores, se utiliza el grafico de la figura (24)

d =            variable            mm



- |               |        |             |      |
|---------------|--------|-------------|------|
| 1) Sudry      | = 1000 | 5) Stokes   |      |
| 2)            | = 1500 | 6) Bosterli | K=10 |
| 3) Guicciardi |        | 7)          | K=12 |
| 4) Sellerio   |        | 8) Krey     |      |

Vs-Ag =            mayor a 19            cm/s

Vs-Am =            6.000            cm/s

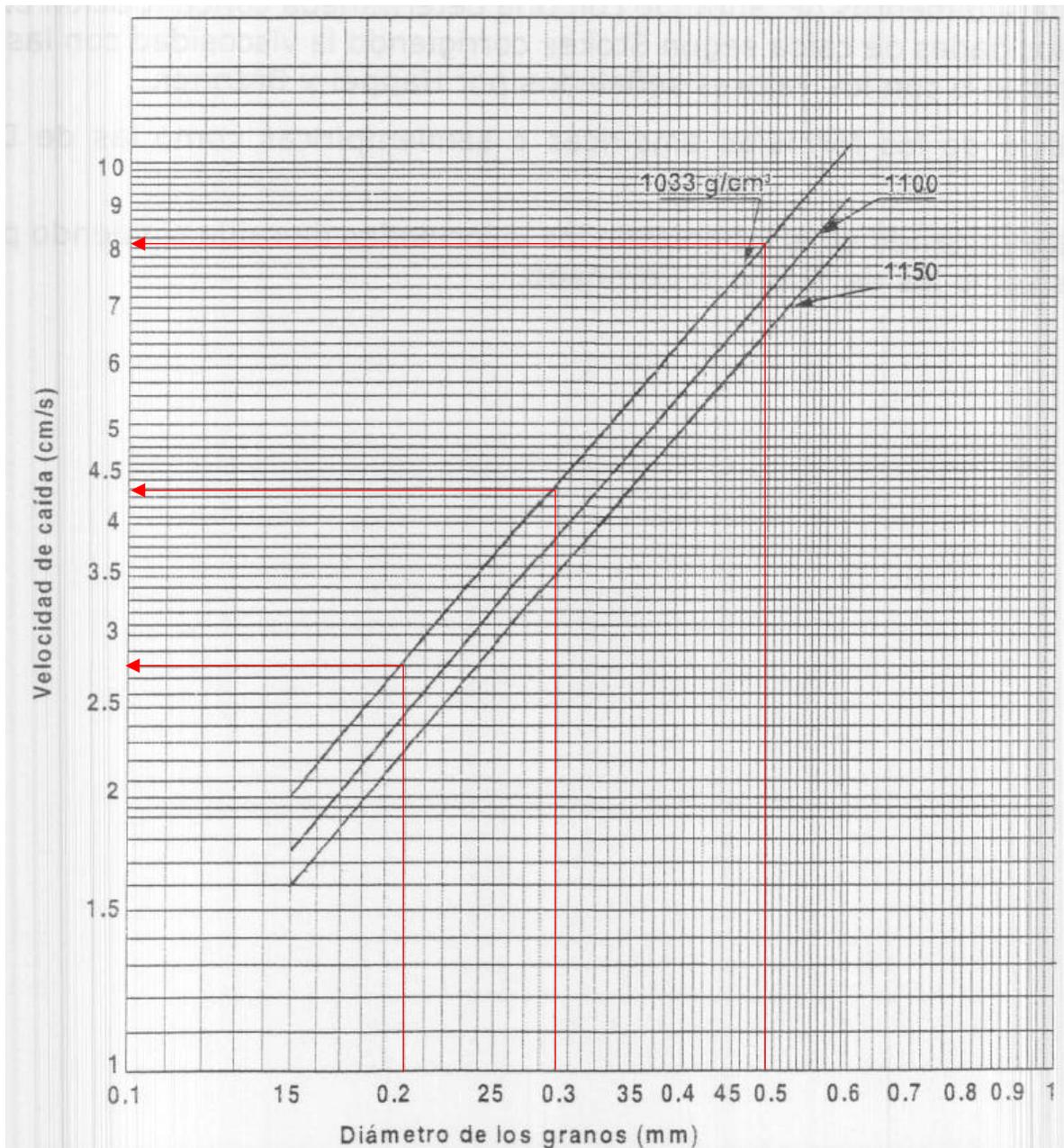
$V_{s-Af} = 3.000 \text{ cm/s}$

$V_{s-Lg} = 2.000 \text{ cm/s}$

- **Coronado**

El cálculo de los valores es dado por el ábaco de la figura (23)

d =            variable            mm



Vs-Ag =            mayor a 10            cm/s

$$V_{s-Am} = 8.200 \text{ cm/s}$$

$$V_{s-Af} = 4.450 \text{ cm/s}$$

$$V_{s-Lg} = 2.585 \text{ cm/s}$$

## 11.2. DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES DEL GRAFICO DE CAMP

### - Valores necesarios

L = Longitud de la sección

h = Tirante de agua

b = ancho de la sección

V = Velocidad del flujo

$V_s$  = Velocidad de sedimentación

Tabla 35. Valores para el cálculo de las variables de Camp

Parámetros	Valor	Unidades
L =	27.450	m
h =	1.120	m
b =	2.010	m
V =	0.380	m/s
$V_s$ =	0.641	cm/s
g =	9.810	m/s

### - Determinación de C

Para hallar el valor del coeficiente de la fórmula de Chezy “C”, se utiliza:

A = Área

P = Perímetro mojado

R = Radio hidráulico

n = Coeficiente de rugosidad de Manning.

Se obtienen los siguientes resultados

$$A = 2.251 \text{ m}^2$$

$$P = 4.250 \text{ m}$$

$$R = 0.530$$

$$n = 0.015$$

$$C = 59.967$$

- **Valores de las relaciones del grafico de Camp**

Los valores de las relaciones son determinados para cada velocidad de sedimentación utilizando las siguientes ecuaciones que serán nombradas A y B:

$$A = \frac{w*L}{V*h}$$

$$B = \frac{w}{V} * \frac{C}{0.15*\sqrt{g}}$$

Los resultados para cada velocidad de sedimentación son presentados en el siguiente capitulo.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 12. RESULTADOS

#### 12.1. RESULTADOS DEL MODELAMIENTO

Se muestran los resultados de las velocidades máximas de cada modelamiento con una comparación, mostrando las respectivas graficas para cada sección, dichas velocidades se obtuvieron a lo largo de 27,45 m. que es la longitud de las secciones analizadas

##### 12.1.1. MODELAMIENTO PARA 30 L/S

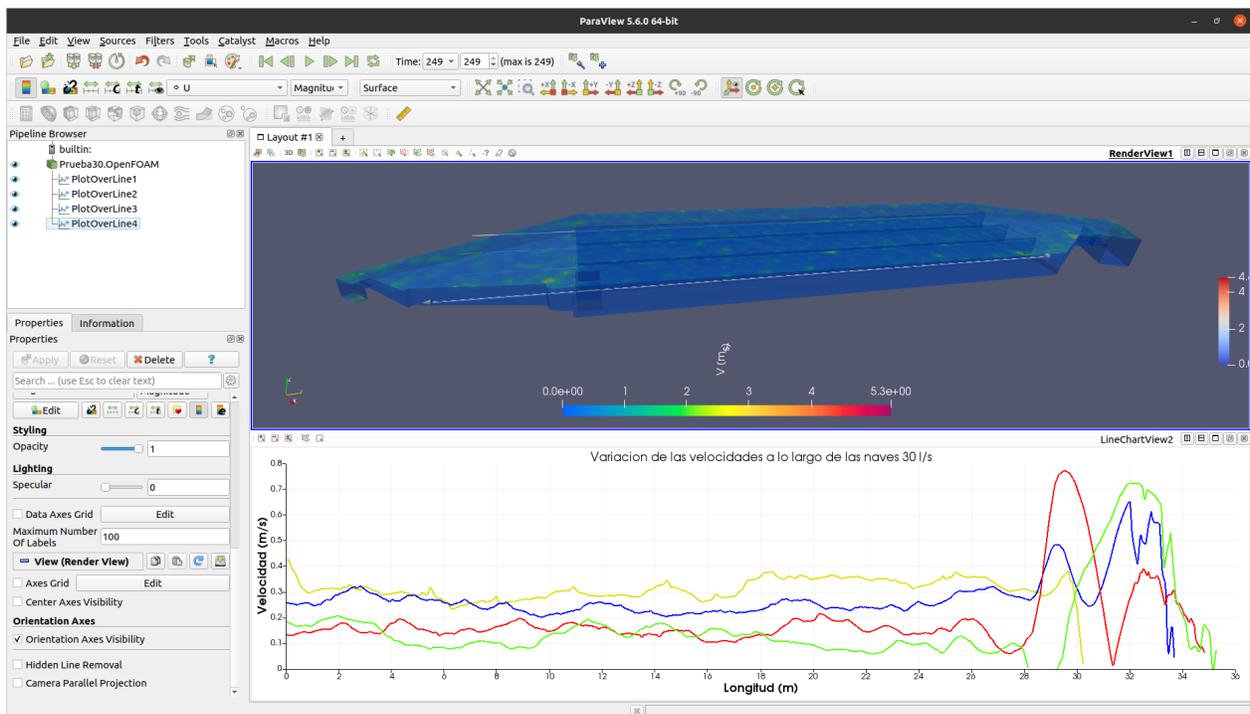


Figura 63. Gráfica de las velocidades en cada sección para 30 l/s

### 12.1.2. MODELAMIENTO PARA 50 L/S

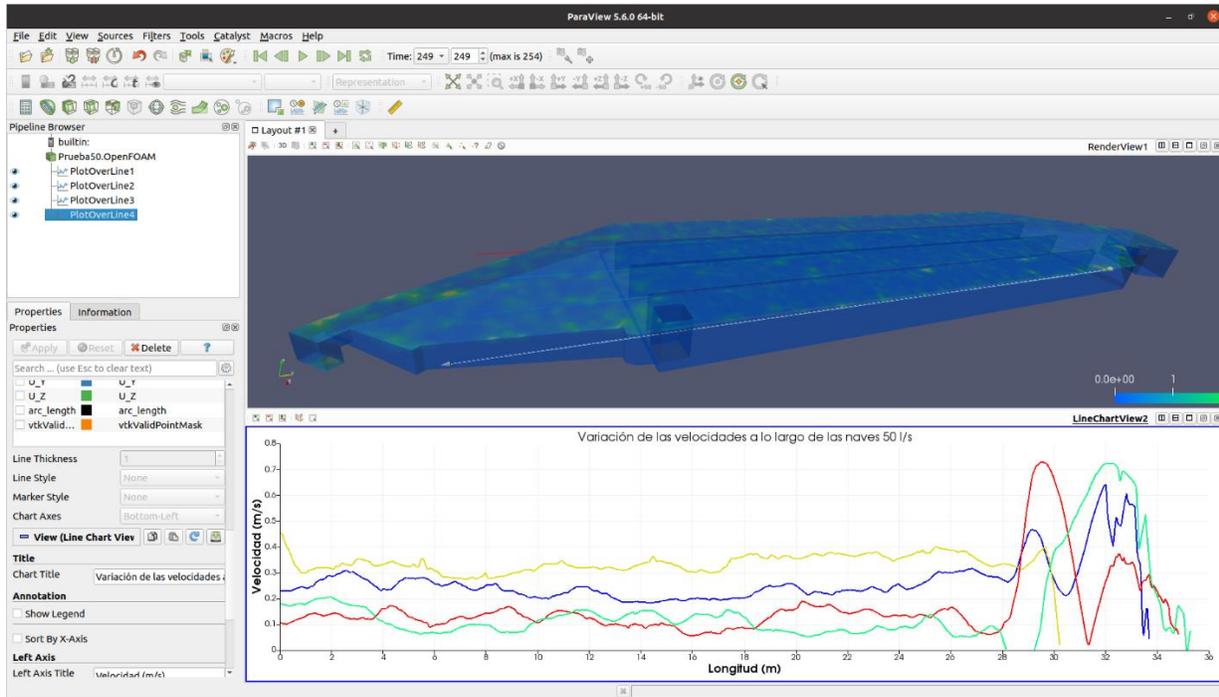


Figura 64. Gráfica de las velocidades en cada sección para 50 l/s

### 12.1.3. MODELAMIENTO PARA 80 L/S

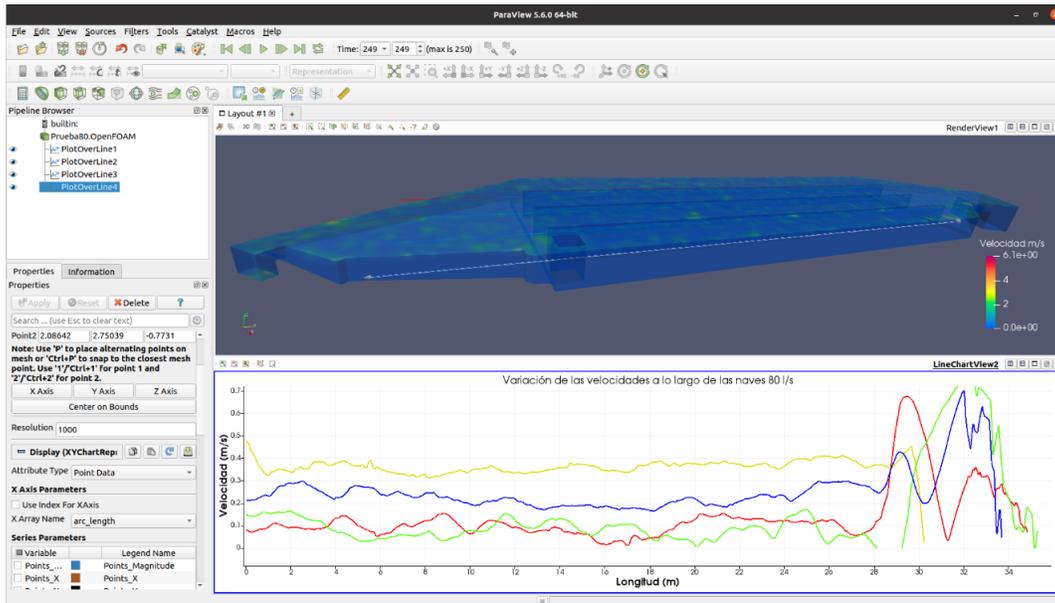


Figura 65. Gráfica de las velocidades en cada sección para 80 l/s

### 12.1.4. MODELAMIENTO PARA 100 L/S

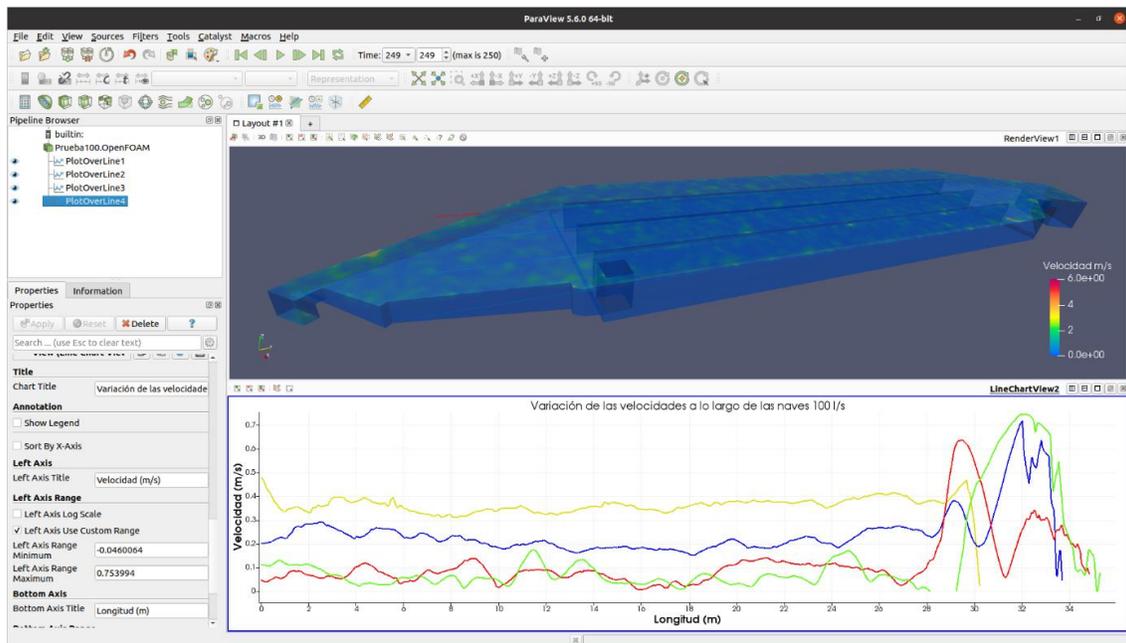


Figura 66. Gráfica de las velocidades en cada sección para 100 l/s

### 12.1.5. MODELAMIENTO PARA 120 L/S

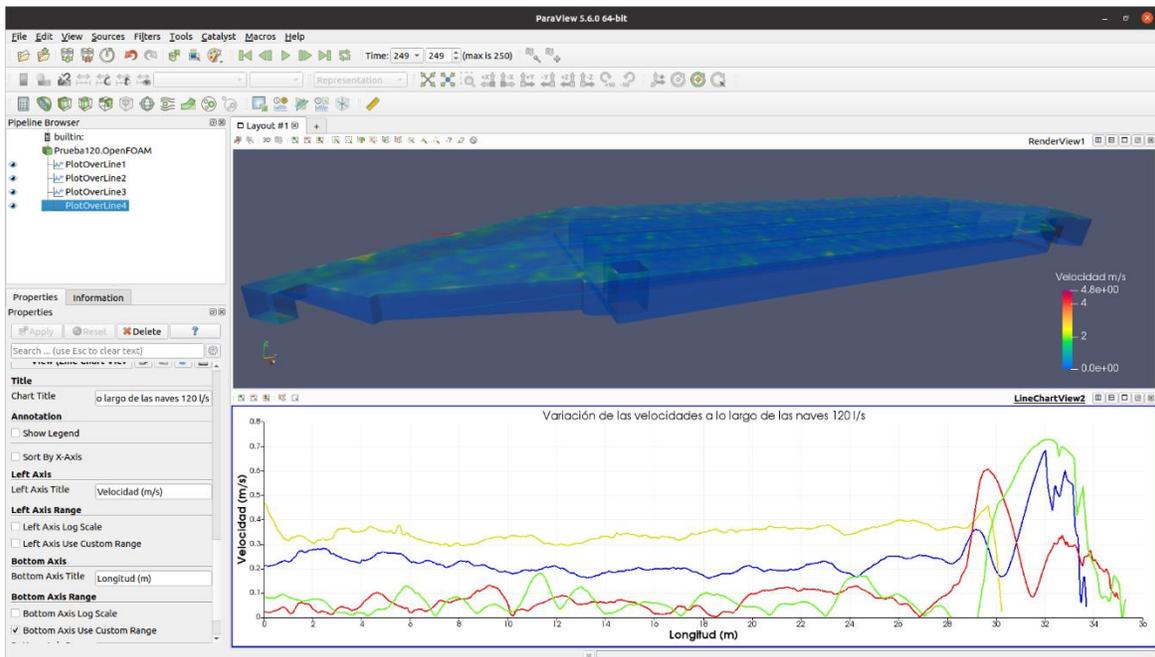


Figura 67. Gráfica de las velocidades en cada sección para 120 l/s

Una vez obtenidas las gráficas, mediante un muestreo visual se toman las máximas velocidades obtenidas, tal como se muestra:

Tabla 36. Velocidades máximas en la sección 1 de los resultados del modelado para cauda caudal

<b>Caudal modelado (l/s)</b>	<b>Velocidades Máximas en la sección 1 (m/s)</b>
30	0.38
50	0.4
80	47
100	0.47
120	0.49

## 12.2. RESULTADOS DE LAS VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN

Consecuentemente se obtienen los resultados de la velocidad de sedimentación obtenidos en el capítulo anterior, por tanto, se muestra:

Tabla 37. Cuadro resumen de las velocidades de sedimentación mediante los diferentes métodos

	<b>Velocidades de sedimentación para diferentes metodologías (cm/s)</b>						
	<b>Hazen</b>	<b>Sellerio</b>	<b>Owens</b>	<b>Sudry</b>	<b>Krey</b>	<b>Indry</b>	<b>Coronado</b>
<b>Vs-Ag</b>	42.74	20	7.241	17.500	38.095	mayor a 19	mayor a 10
<b>Vs-Am</b>	1.07	5	1.145	6.500	0.952	6.000	8.200
<b>Vs-Af</b>	0.64	3	0.887	4.000	0.571	3.000	4.450
<b>Vs-Lg</b>	0.43	2	0.724	2.500	0.381	2.000	2.585

### 12.3. RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS PARA EL GRAFICO DE CAMP

Se determinan los valores de los parámetros A y B para utilizar el grafico de Camp (figura 26) para cada velocidad máxima de flujo y sedimentación respectivamente para cada caudal modelado:

Tabla 38. Relaciones del grafico de Camp para las velocidades de sedimentación para 30 l/s

	<b>Hazen</b>	<b>Sellerio</b>	<b>Owens</b>	<b>Sudry</b>	<b>Krey</b>	<b>Indry</b>	<b>Coronado</b>
<b>A-Am</b>	0.69	3.22	0.74	4.19	0.61	3.87	5.29
<b>B-Am</b>	3.59	16.79	3.85	21.83	3.20	20.15	27.54
<b>A-Af</b>	0.41	1.93	0.57	2.58	0.37	1.93	2.87
<b>B-Af</b>	2.15	10.08	2.98	13.44	1.92	10.08	14.95
<b>A-Lg</b>	0.28	1.29	0.47	1.61	0.25	1.29	1.67
<b>B-Lg</b>	1.44	6.72	2.43	8.40	1.28	6.72	8.68

Tabla 39. Relaciones del gráfico de Camp para las velocidades de sedimentación para 50 l/s

	<b>Hazen</b>	<b>Sellerio</b>	<b>Owens</b>	<b>Sudry</b>	<b>Krey</b>	<b>Indry</b>	<b>Coronado</b>
<b>A-Am</b>	0.65	3.06	0.70	3.98	0.58	3.68	5.02
<b>B-Am</b>	3.41	15.96	3.65	20.74	3.04	19.15	26.17
<b>A-Af</b>	0.39	1.84	0.54	2.45	0.35	1.84	2.73
<b>B-Af</b>	2.05	9.57	2.83	12.76	1.82	9.57	14.20
<b>A-Lg</b>	0.26	1.23	0.44	1.53	0.23	1.23	1.58
<b>B-Lg</b>	1.36	6.38	2.31	7.98	1.22	6.38	8.25

Tabla 40. Relaciones del grafico de Camp para las velocidades de sedimentación para 80 l/s

	<b>Hazen</b>	<b>Sellerio</b>	<b>Owens</b>	<b>Sudry</b>	<b>Krey</b>	<b>Indry</b>	<b>Coronado</b>
<b>A-Am</b>	0.58	2.72	0.62	3.54	0.52	3.27	4.47
<b>B-Am</b>	3.03	14.18	3.25	18.44	2.70	17.02	23.26
<b>A-Af</b>	0.35	1.63	0.48	2.18	0.31	1.63	2.42
<b>B-Af</b>	1.82	8.51	2.52	11.35	1.62	8.51	12.62
<b>A-Lg</b>	0.23	1.09	0.39	1.36	0.21	1.09	1.41
<b>B-Lg</b>	1.21	5.67	2.05	7.09	1.08	5.67	7.33

Tabla 41. Relaciones del grafico de Camp para las velocidades de sedimentación para 100 l/s

	<b>Hazen</b>	<b>Sellerio</b>	<b>Owens</b>	<b>Sudry</b>	<b>Krey</b>	<b>Indry</b>	<b>Coronado</b>
<b>A-Am</b>	0.56	2.61	0.60	3.39	0.50	3.13	4.28
<b>B-Am</b>	2.90	13.58	3.11	17.65	2.59	16.29	22.27
<b>A-Af</b>	0.33	1.56	0.46	2.09	0.30	1.56	2.32
<b>B-Af</b>	1.74	8.15	2.41	10.86	1.55	8.15	12.09
<b>A-Lg</b>	0.22	1.04	0.38	1.30	0.20	1.04	1.35
<b>B-Lg</b>	1.16	5.43	1.97	6.79	1.03	5.43	7.02

Tabla 42. Relaciones del grafico de Camp para las velocidades de sedimentación para 120 l/s

	<b>Hazen</b>	<b>Sellerio</b>	<b>Owens</b>	<b>Sudry</b>	<b>Krey</b>	<b>Indry</b>	<b>Coronado</b>
<b>A-Am</b>	0.53	2.50	0.57	3.25	0.48	3.00	4.10
<b>B-Am</b>	2.78	13.02	2.98	16.93	2.48	15.63	21.36
<b>A-Af</b>	0.32	1.50	0.44	2.00	0.29	1.50	2.23
<b>B-Af</b>	1.67	7.81	2.31	10.42	1.49	7.81	11.59
<b>A-Lg</b>	0.21	1.00	0.36	1.25	0.19	1.00	1.29
<b>B-Lg</b>	1.11	5.21	1.89	6.51	0.99	5.21	6.73

## 12.4. RESULTADOS DE LA EFICIENCIA PARA CADA CAUDAL Y DIÁMETRO CARACTERÍSTICO

Usando el gráfico de la figura (26) se determina la eficiencia para cada caudal de cada metodología utilizada, tal como se presenta en tablas y gráficos a continuación:

Tabla 43. Eficiencia de sedimentación para la fórmula de Hazen

<b>Diámetro</b>		
<b>Caudal</b>	<b>Característico</b>	<b>Eficiencia</b>
	Am	65%
30 l/s	Af	38%
	Lg	30%
	Am	60%
50 l/s	Af	37%
	Lg	26%
	Am	54%
80 l/s	Af	35%
	Lg	23%
	Am	52%
100 l/s	Af	32%
	Lg	22%
	Am	50%
120 l/s	Af	31%
	Lg	21%

Tabla 44. Eficiencia de sedimentación para la fórmula de Sellerio

<b>Diámetro</b>		
<b>Caudal</b>	<b>Característico</b>	<b>Eficiencia</b>
	Am	100%
30 l/s	Af	99%
	Lg	95%
	Am	100%
50 l/s	Af	98%
	Lg	93%
	Am	100%
80 l/s	Af	98%
	Lg	89%
	Am	100%
100 l/s	Af	97%
	Lg	88%
	Am	100%
120 l/s	Af	97%
	Lg	84%

Tabla 45. Eficiencia de sedimentación para la fórmula de Owens

<b>Diámetro</b>		
<b>Caudal</b>	<b>Característico</b>	<b>Eficiencia</b>
	Am	67%
30 l/s	Af	57%
	Lg	49%
	Am	66%
50 l/s	Af	52%
	Lg	43%
	Am	58%
80 l/s	Af	46%
	Lg	38%
	Am	57%
100 l/s	Af	45%
	Lg	37%
	Am	57%
120 l/s	Af	43%
	Lg	36%

Tabla 46. Eficiencia de sedimentación para la fórmula de Sudry

<b>Diámetro</b>		
<b>Caudal</b>	<b>Característico</b>	<b>Eficiencia</b>
	Am	100%
30 l/s	Af	100%
	Lg	98%
	Am	100%
50 l/s	Af	100%
	Lg	97%
	Am	100%
80 l/s	Af	100%
	Lg	94%
	Am	100%
100 l/s	Af	100%
	Lg	92%
	Am	100%
120 l/s	Af	100%
	Lg	91%

Tabla 47. Eficiencia de sedimentación para la fórmula de Krey

<b>Diámetro</b>		
<b>Caudal</b>	<b>Característico</b>	<b>Eficiencia</b>
	Am	56%
30 l/s	Af	38%
	Lg	25%
	Am	50%
50 l/s	Af	35%
	Lg	23%
	Am	48%
80 l/s	Af	31%
	Lg	21%
	Am	47%
100 l/s	Af	30%
	Lg	20%
	Am	45%
120 l/s	Af	29%
	Lg	19%

Tabla 48. Eficiencia de sedimentación para la fórmula de Indry

<b>Diámetro</b>		
<b>Caudal</b>	<b>Característico</b>	<b>Eficiencia</b>
	Am	100%
30 l/s	Af	100%
	Lg	94%
50 l/s	Am	100%
	Af	98%
	Lg	93%
80 l/s	Am	100%
	Af	98%
	Lg	88%
100 l/s	Am	100%
	Af	97%
	Lg	84%
120 l/s	Am	100%
	Af	97%
	Lg	83%

Tabla 49. Eficiencia de sedimentación para la fórmula de Coronado

<b>Diámetro</b>		
<b>Caudal</b>	<b>Característico</b>	<b>Eficiencia</b>
	Am	100%
30 l/s	Af	100%
	Lg	100%
50 l/s	Am	100%
	Af	100%
	Lg	98%
80 l/s	Am	100%
	Af	100%
	Lg	96%
100 l/s	Am	100%
	Af	100%
	Lg	94%
120 l/s	Am	100%
	Af	100%
	Lg	92%

## 12.5. GRÁFICOS DE LA EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN PARA CADA CAUDAL Y DIÁMETRO CARACTERÍSTICO

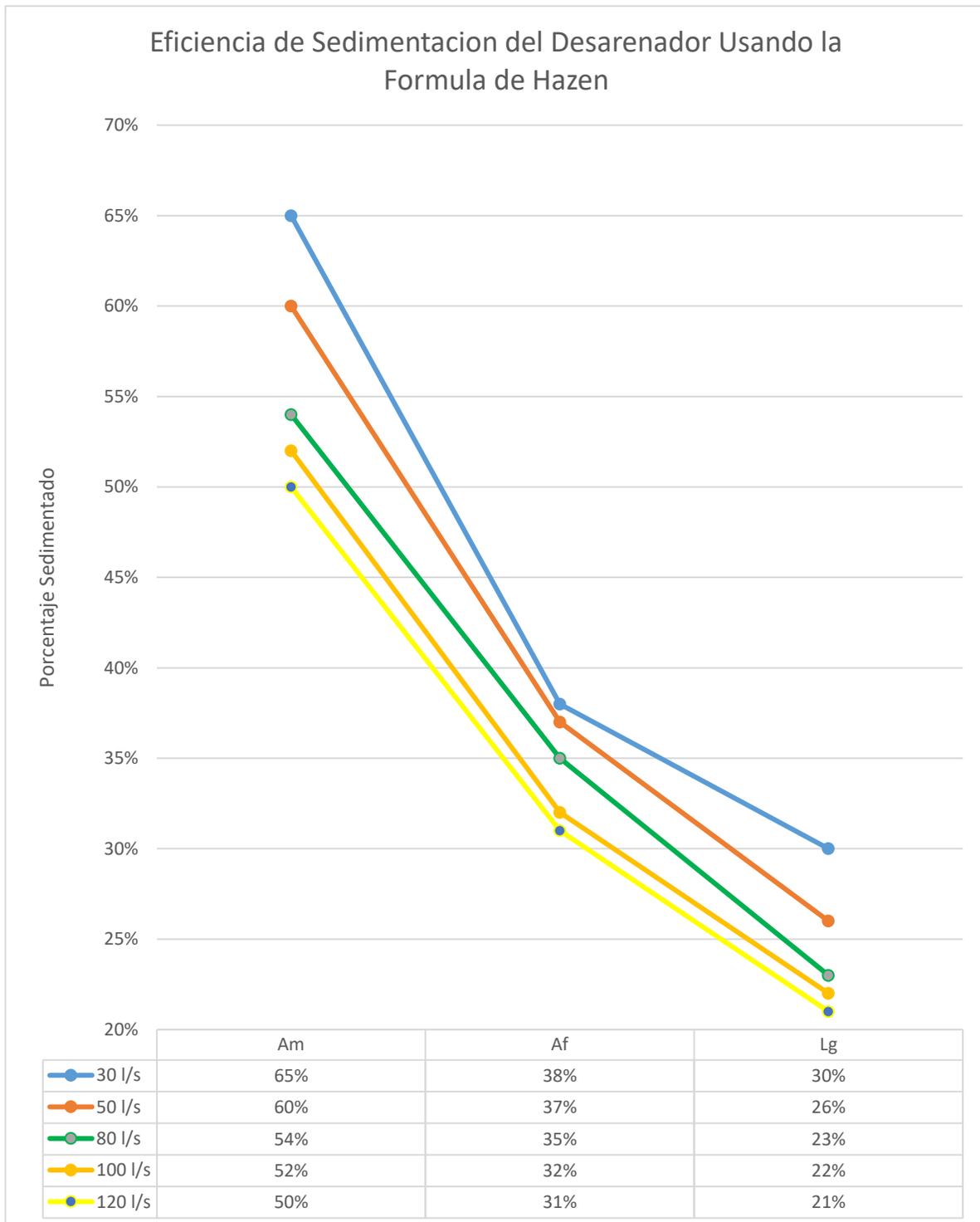


Figura 68. Eficiencia de sedimentación en la sección 1 usando la fórmula de Hazen

Fuente: Elaboración propia.

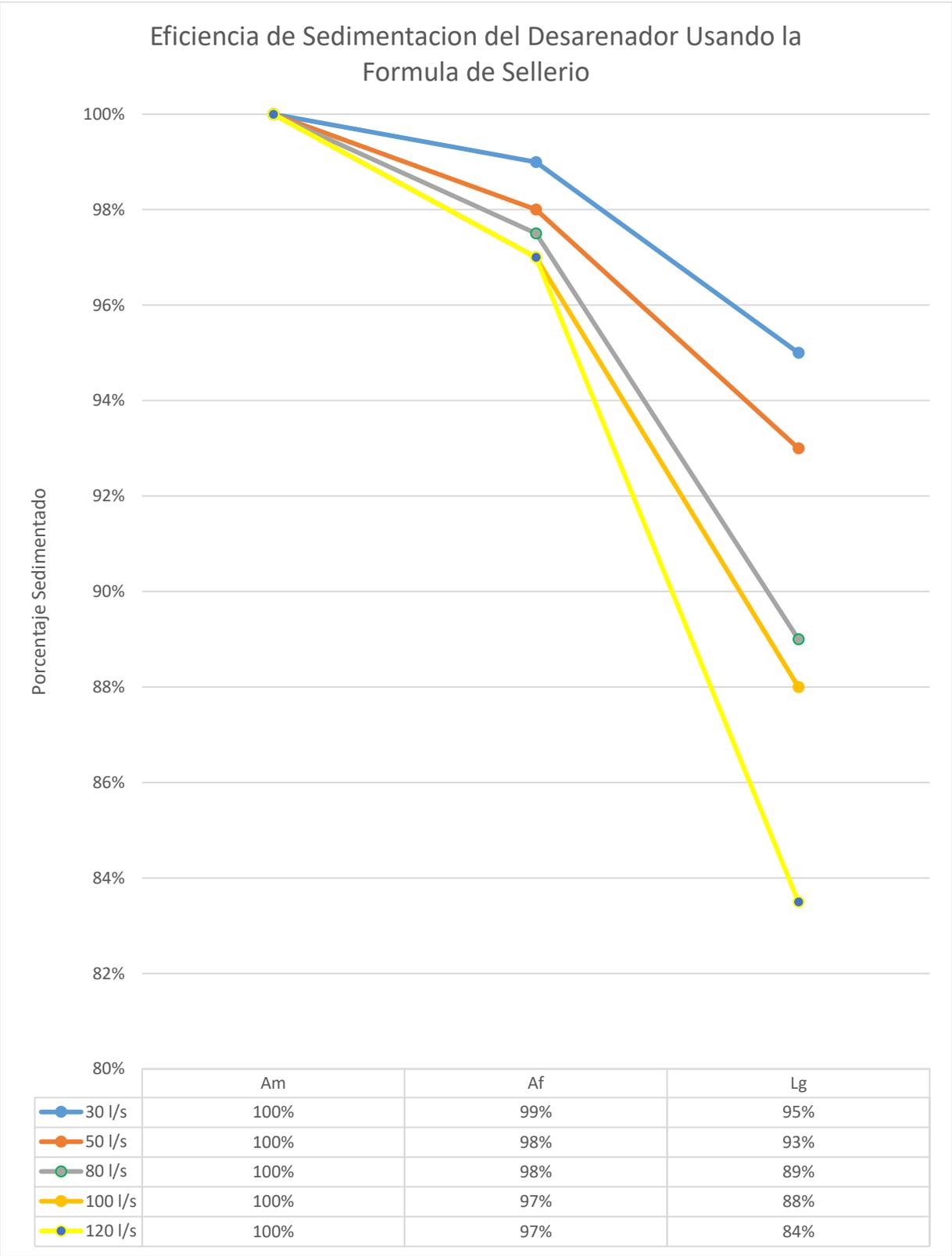


Figura 69. Eficiencia de sedimentación en la sección 1 usando la fórmula de Sellerio

Fuente: Elaboración propia

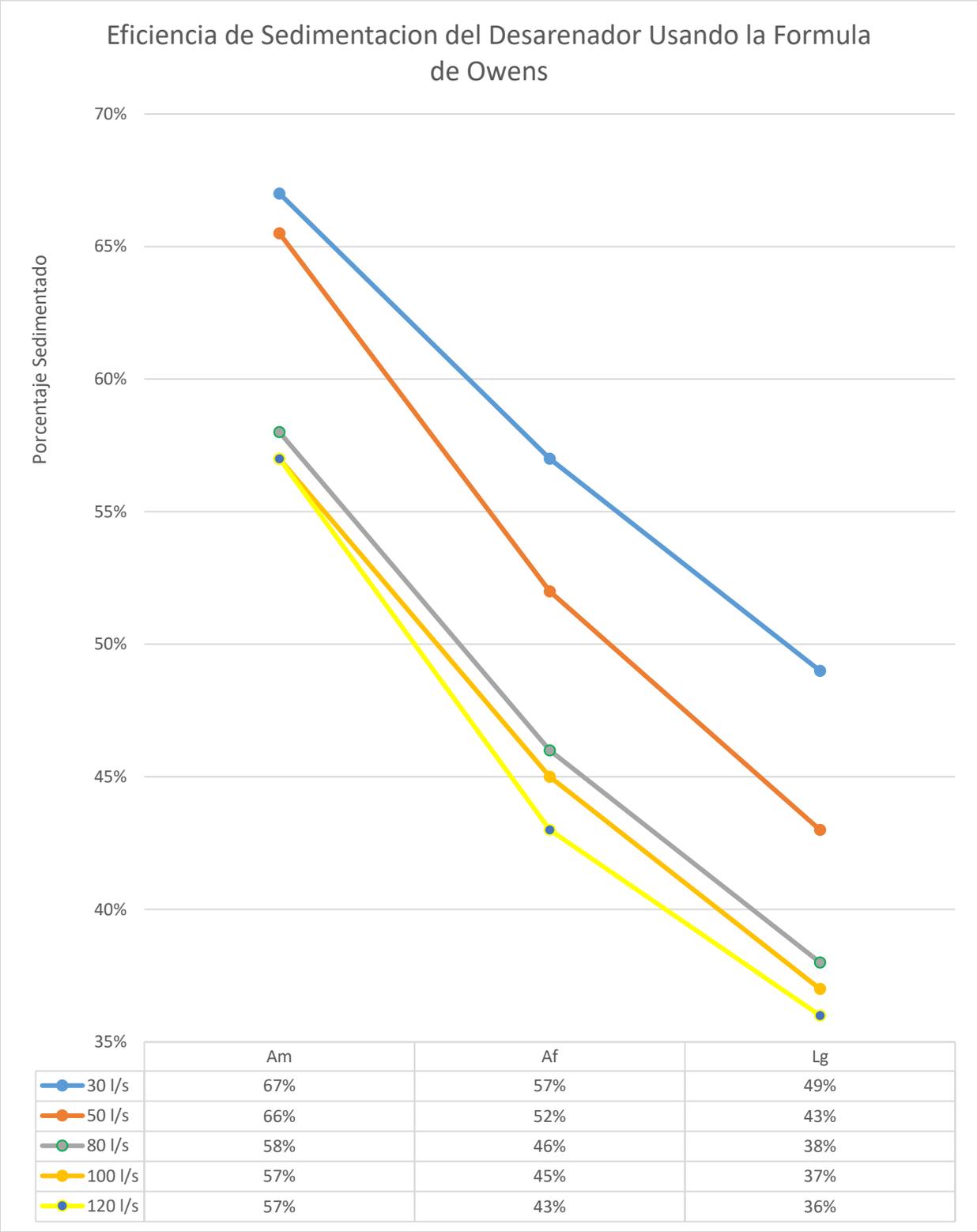


Figura 70. Eficiencia de sedimentación en la sección1 usando la fórmula de Owens

Fuente: Elaboración propia

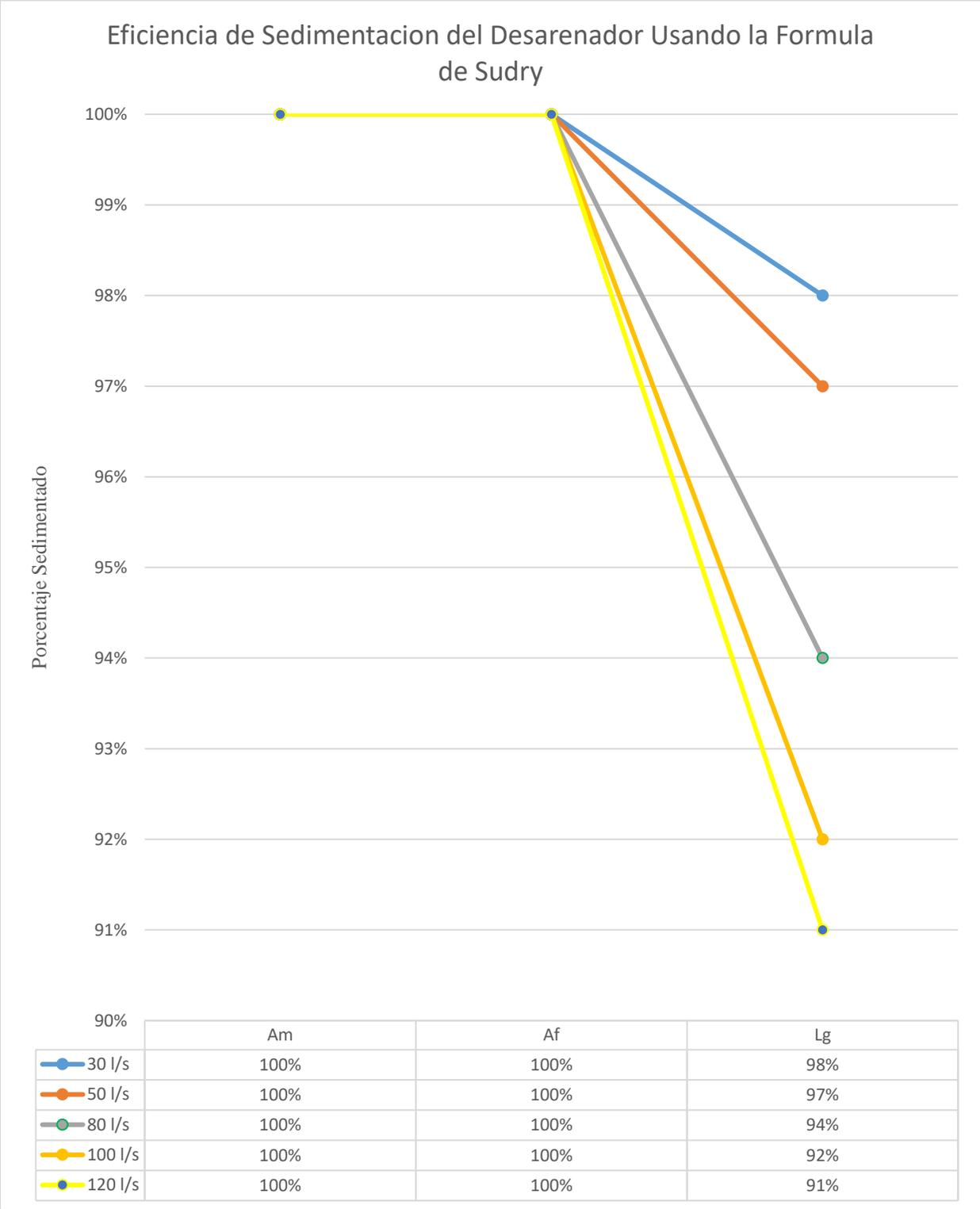


Figura 71. Eficiencia de sedimentación en la sección 1 usando la fórmula de Sudry

Fuente: Elaboración propia.

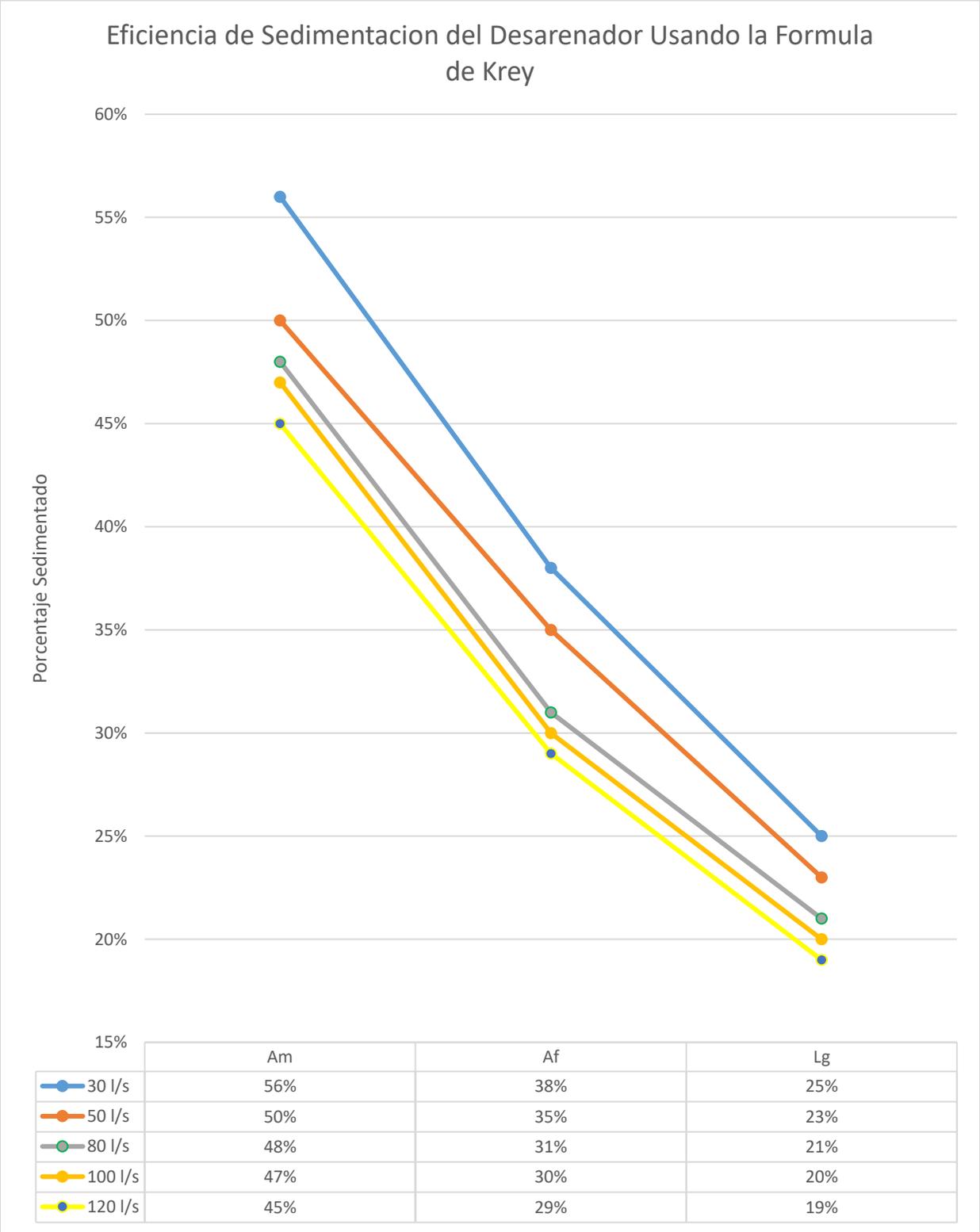


Figura 72. Eficiencia de sedimentación en la sección 1 usando la fórmula de Krey

Fuente: Elaboración propia

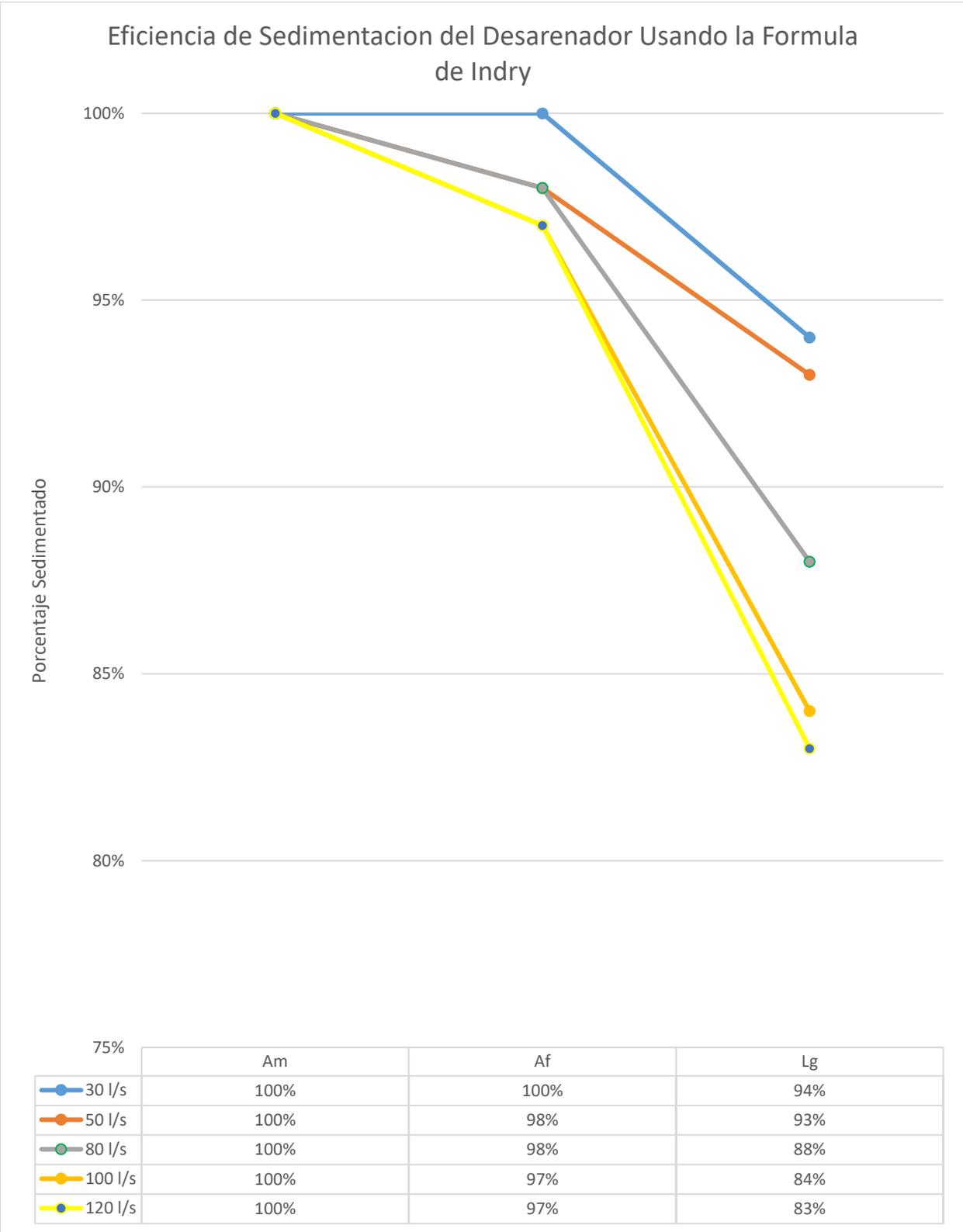


Figura 73. Eficiencia de sedimentación en la sección 1 usando la fórmula de Indry

Fuente: Elaboración propia.

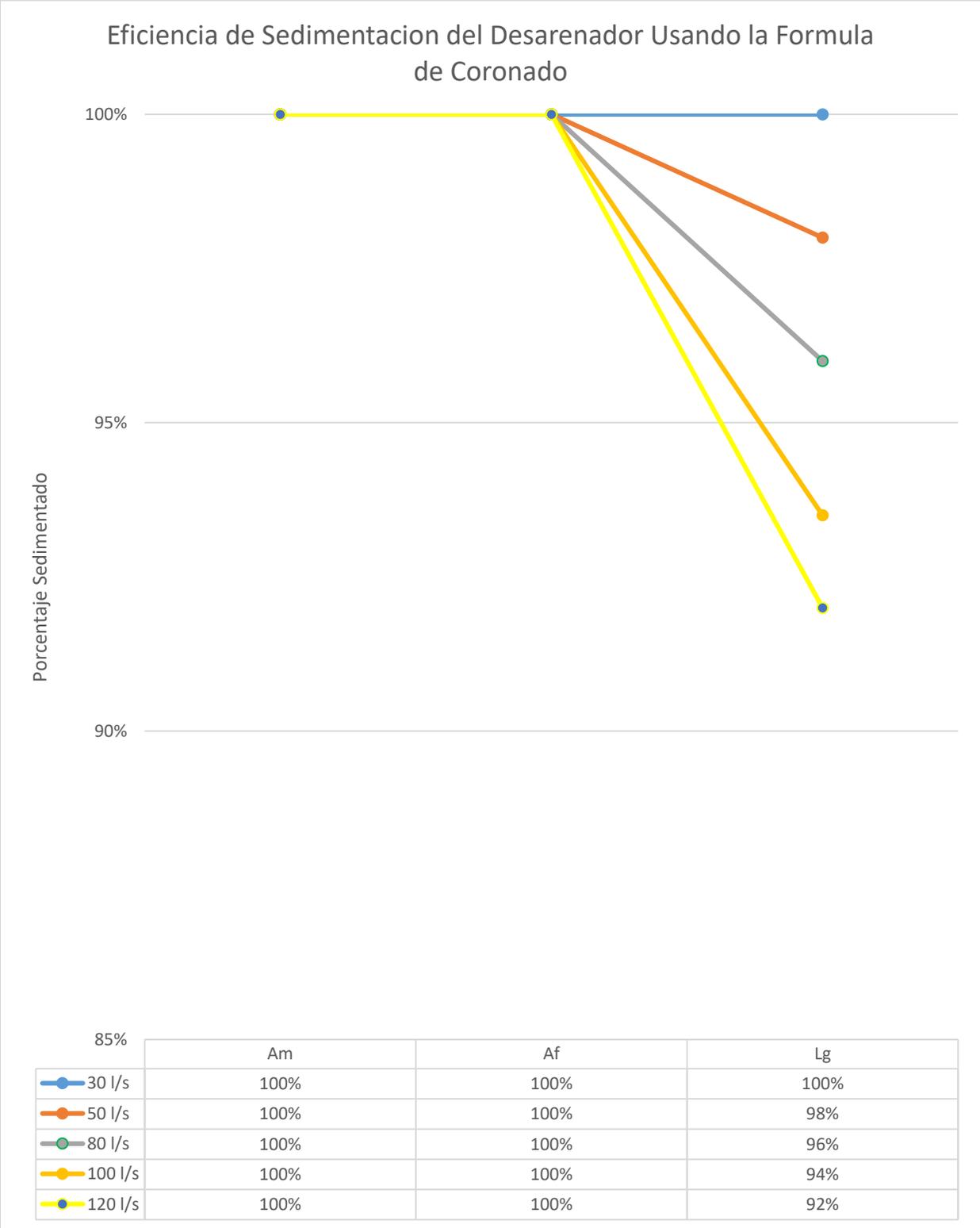


Figura 74. Eficiencia de sedimentación en la sección 1 usando la fórmula de Coronado

Fuente: Elaboración propia.

### **13. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

El objetivo principal de la presente investigación fue la de determinar la eficiencia de sedimentación utilizando el modelamiento numérico tridimensional para diferentes caudales en el desarenador de la captación El ronquillo, por tanto en la presente investigación se identificó mediante los resultados y comparación de los modelamientos, que el comportamiento hidráulico del desarenador está en base a la sección número 1, que es aquí donde se presentan las mayores velocidades, diferente a las demás secciones que es lo contrario, a mayor caudal, las velocidades tienden a disminuir, ello se debe a la forma geométrica con la que fue diseñado, la cual trata acerca de proporcionar una pendiente negativa de la sección 1 hacia la sección 4, con propósitos de limpieza y mantenimiento. Esto afecta directamente al desarenador ya que la sección 1 es la que garantiza un correcto y eficiente funcionamiento con respecto a la desarenación del agua garantizando que la mayor cantidad de arenas se queden sedimentadas ahí y no avancen hacia el canal de recolección.

Las velocidades máximas obtenidas de la sección 1 para los diferentes caudales modelados, fueron utilizadas para la determinación de la eficiencia de la estructura en la cual se usó diferentes metodologías de velocidad de sedimentación: Hazen; Sellerio; Owens; Sudry; Krey; Indry y Coronado. De los resultados que se obtuvieron, las metodologías de Coronado y Sudry presentan una mayor eficiencia de sedimentación que hasta limos gruesos alcanzan el 92% y 91% respectivamente, mientras que las metodologías de Hazen y Krey, mostraron una eficiencia del 21% y 19% para el mismo tamaño de sedimento. Los porcentajes mencionados son resultados del modelamiento utilizando un caudal de 120 l/s, sin embargo, para el modelamiento de un caudal de 30 l/s, los valores en la mayoría de metodologías llegaron a 100% o cercanos a este valor, en arena media, arena fina y limo grueso, los mínimos valores que se pudieron obtener fueron para Hazen y Krey con valores de 30% y 25%, que son para limos gruesos, es decir que para estas

metodologías, un gran porcentaje este diámetro de este tipo de granos no se sedimentarán y pasaran al canal de recolección e irán hacia la planta de tratamiento.

Los resultados que se apreciaron nos indican que, a mayor caudal de operación, la eficiencia de sedimentación disminuye y por tanto la estructura al operar con caudales excesivos, no cumpliría con un correcto desempeño.

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y REFERENCIAS**

### **BIBLIOGRAFICAS**

#### **14. CONCLUSIONES**

- Se logro obtener la geometría de la estructura mediante levantamiento topográfico y mediante los planos en planta proporcionados por la EPS SEDACAJ, no obstante se modificó mínimamente al momento de realizar el modelado.
- Se recopilaron los datos del funcionamiento de la estructura mediante visitas de campo y entrevistas con los operadores.
- Se realizo un calibramiento del modelo numérico utilizando diferentes metodologías, los valores de la velocidad fueron medidas por un sensor de caudal (correntómetro), mediante flotador y por la ecuación de continuidad, seguidamente, dichos valores fueron comparados con los resultados del modelamiento numérico, arrojando así como resultado: los valores obtenidos utilizando el correntómetro y el flotador presentaban similitud con los del modelamiento numérico mientras que, el que se calculó utilizando la ecuación de continuidad presentó un desfase considerable.
- Se realizo el mallado de la estructura con los datos obtenidos de la geometría, para luego ejecutar el modelado para diferentes caudales de operación.
- Se analizaron los resultados obtenidos de los modelamientos variando los caudales de ingreso, concluyendo que el comportamiento hidráulico para el correcto funcionamiento de la estructura está en base a la sección 1 que es donde se encuentran las mayores velocidades.

- Se determino la eficiencia de sedimentación para diferentes granos según los resultados del análisis de sedimentos muestreados, usando diferentes metodologías, las cuales dieron el mismo resultado: a mayor caudal de operación, mayor velocidad de flujo y menor eficiencia de sedimentación como se resume:

Tabla 50. Rangos de valores de la eficiencia del desarenador

<b>Metodología</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Q = 30 l/s</b>	<b>Q = 120 l/s</b>
<b>Hazen</b>	Max	65%	50%
	Min	30%	21%
<b>Sellerio</b>	Max	100%	95%
	Min	100%	84%
<b>Owens</b>	Max	67%	49%
	Min	57%	36%
<b>Sudry</b>	Max	100%	98%
	Min	100%	91%
<b>Krey</b>	Max	56%	25%
	Min	45%	19%
<b>Indry</b>	Max	100%	94%
	Min	100%	83%
<b>Coronado</b>	Max	100%	100%
	Min	100%	92%

## 15. RECOMENDACIONES

- El comportamiento real de un fluido aún resulta complicado de realizar con exactitud mediante modelamiento número, por lo que es importante entender con anterioridad el fenómeno a modelar.
- Si la simulación no converge, se recomienda revisar tanto la calidad de la malla, como el número de courant que se utilizara en el modelado.
- Para la calibración de los modelos numéricos, se es necesario una data exacta tomada con una instrumentación de calidad y debidamente calibrada ya que se necesitará una geometría bien definida y una malla de calidad.
- Si se desea realizar una simulación utilizando la metodología CFD en este caso el paquete computacional OpenFOAM, se debe conocer con anterioridad la estructura y secuencia del caso, ya que, si faltara algún archivo o hubiera una mención incorrecta, la simulación no se ejecutará.
- Se recomienda la realización de una simulación previa tanto numérica como física de futuras estructuras hidráulicas ya que es ahí donde se podrá apreciar los fenómenos y errores que puedan darse y poder corregirlos a tiempo.
- Se recomienda un inventariado sobre la geometría de estructuras antiguas que aun funcionen y que no cuenten con la información de las medidas de la misma ya que en caso de algún tipo de fallo, accidente o estudio, se podrán tomar medidas necesarias con mucha más agilidad.

## CAPÍTULO VI.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

#### A. BIBLIOGRAFÍA

1. Autoridad Nacional del Agua. (2010). *Criterios de diseños de obras hidraulicas para la formulacion de proyectos hidraulicos multisectoriales y de afianzamiento hidraulico*. Lima, Peru.
2. Cengel, Y., y Cimbala, J. (2006). *Mecanica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. Mexico: McGRAW-HILL.
3. Chow, V. T. (1994). *Hidraulica de canales abiertos*. Colombia: McGRAW-HILL.
4. Coronado, F. (2004). *El desarenador, una guia para su diseño hidraulico*. Lima, Peru: Proyecto Mundo 2000.
5. Franzini, J., y Finnemore, J. (1999). *Mecanica de fluidos con aplicaciones en ingenieria*. Madrid: McGRAW-HILL.
6. Krochin, S. (1986). *Diseño Hidraulico*. Quito, Ecuador: Escuela Politecnica Nacional.
7. Mataix, C. (1993). *Mecanica de fluidos y maquinas hidraulicas*. Madrid: Ediciones del Castillo S. A.
8. Moukalled, F., Darwish, M., y Mangani, L. (2016). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. New York; United States: Springer International Publishing.

9. Organizacion Panamericana de la Salud. (2005). Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores. 34.
10. Shames, I. (1995). *Mecanica de fluidos*. Colombia: McGRAW-HILL.
11. Sotelo, G. (2002). *Hidraulica de Canales*. Mexico: UNAM.
12. Streeter, V., Wylie, B., y Bedford, K. (2000). *Mecanica de fluidos*. Colombia: McGRAW-HILL.
13. Versteeg, H., y Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Fnnite Volume Method*. Harlow, England: Pearson Education.
14. White, F. (2004). *Mecanica de fluidos*. Madrid: McGRAW-HILL.
15. Xamán, J., y Gijón-Rivera, M. (2015). *Dinamica De Fluidos Computacional Para Ingenieros*. Bloomington, Estados Unidos: Palibrio.

## **B. LINKOGRAFÍA**

1. *CFD Online*. (28 de Febrero de 2011). [https://www.cfd-online.com/Wiki/SST\\_k-omega\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model)
2. IdealSimulations. (2020). *idealsimulations*.  
<https://www.idealsimulations.com/resources/courant-number-cfd/#>

3. Greenshields, C. (28 de junio de 2021). *OpenFOAM - User Guide*. openfoam.com:  
<https://www.openfoam.com/documentation/overview>
4. Mojicar Caballero, S., Alfaro Rodriguez, C., Tamajon Reyes, C., y Castro García, C. (2014). *Fundamentos Teóricos Para El Diseño De Plantas Para Reutilización Del Agua Residual Del Fregado De Los Automóviles*. *Ciencia en su PC*, 14.  
<https://www.redalyc.org/pdf/1813/181335576007.pdf>
5. Sánchez Rojas, A., y Vásquez Peralta, C. (2010). *Gobierno Regional de Cajamarca*.  
Gobierno Regional de Cajamarca:  
<https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/MapaClimatico.pdf>
6. Sánchez Vásquez, J. (2004). Universidad de Sevilla - Biblioteca.  
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+2.pdf>

### **C. ARTICULOS**

1. Albuja, C., Pinos, C., y Samaniego, J. (Junio de 2013). *Uso de desarenadores en abastecimiento de agua potable*. Repositorio Insitucional UCUENCA:  
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30010>
2. Murray, S. (1993). *Ecuaciones Diferenciales Aplicadas* (Tercera Edición ed.). (H. Rivera García, Trad.) Mexico: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICA S.A. <https://doi.org/10.13-234997-3>

3. Ortiz Flores, R. (2011). *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Bogotá, Colombia: Ediciones U. Reyes Rivera, L. (febrero de 1980) INGEMET, recopilado de: <https://repositorio.ingemet.gob.pe/20.500.12544/150>
4. Rocha Felices, A. (2003). *La Bocatoma, estructura clave en un proyecto de aprovechamiento hidráulico*. Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Civil, pág. 27. [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/ROCHA/La\\_bocatoma.PDF](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/ROCHA/La_bocatoma.PDF)
5. Sacasas León, C. (1 de enero de 2019). *Estudios Ingeniero Geológicos E Hidrogeológicos Para Geofísicos*. ResearchGate: [https://www.researchgate.net/publication/338700994\\_ESTUDIOS\\_INGENIERO\\_GEOLOGICOS\\_E\\_HIDROGEOLOGICOS\\_PARA\\_GEOFISICOS?enrichId=rgreq-3c4d429175e2707881e9533b7af3b4b5-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMzODcwMDk5NDtBUzo4NDk0NzIzMTc4MzMzMzMyMTZAMTU3OTU0MTM5MTI0Mw%3D%3](https://www.researchgate.net/publication/338700994_ESTUDIOS_INGENIERO_GEOLOGICOS_E_HIDROGEOLOGICOS_PARA_GEOFISICOS?enrichId=rgreq-3c4d429175e2707881e9533b7af3b4b5-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMzODcwMDk5NDtBUzo4NDk0NzIzMTc4MzMzMzMyMTZAMTU3OTU0MTM5MTI0Mw%3D%3)

#### **D. TESIS**

1. Castillo Falcón, P. (2016). *Estudio experimental y modelización numérica de flujo en canal horizontal sobre vertedero Creager*. [Trabajo de Fin de Master, Universidad de Sevilla]: Deposito de investigacion Universidad de Sevilla; <https://idus.us.es/handle/11441/53731>.

## **ANEXOS**

## 16. ANEXO N°1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO Y TOMA DE DATOS DE LA ESTRUCTURA



Figura 75. Vista panorámica de la estructura.



Figura 76. Levantamiento topográfico de la estructura.



Figura 77. Toma de datos de la geometría de la estructura.



Figura 78. Toma de datos de las velocidades a la entrada de la estructura.



Figura 79. Toma de datos de las velocidades a la salida de la estructura.



Figura 80. Toma de datos del caudal de entrada para la calibración del modelo.



Figura 81. Medición de la distancia para medir la velocidad mediante el método del flotador



Figura 82. Medición de la velocidad mediante el método del flotador en la sección 1



Figura 83. Medición de la velocidad mediante el método del flotador en la sección 2



Figura 84. Agua turbia en época de lluvia observada en el canal de entrada

# 17. ANEXO N°2 GRÁFICOS DE LA TOMA DE DATOS CON EL SENSOR TIPO CORRENTÓMETRO PASCO

## 17.1. TOMA DE DATOS A LA ENTRADA

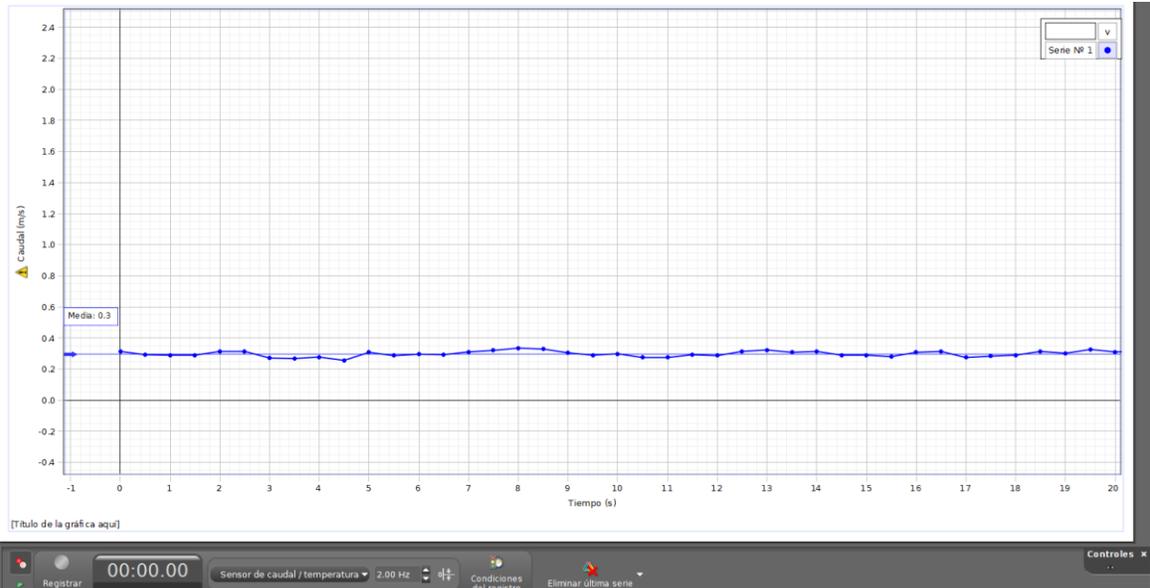


Figura 85. Gráfico de la toma de datos a la entrada - prueba 1

Fuente: Elaboración propia

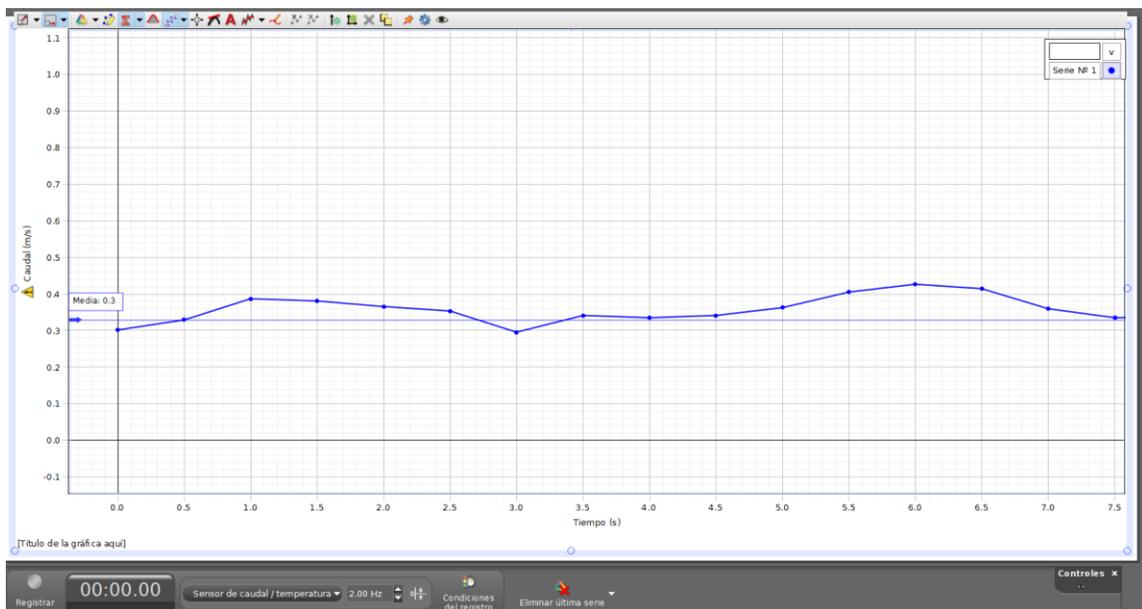


Figura 86. Gráfico de la toma de datos a la entrada - prueba 2

Fuente: Elaboración propia

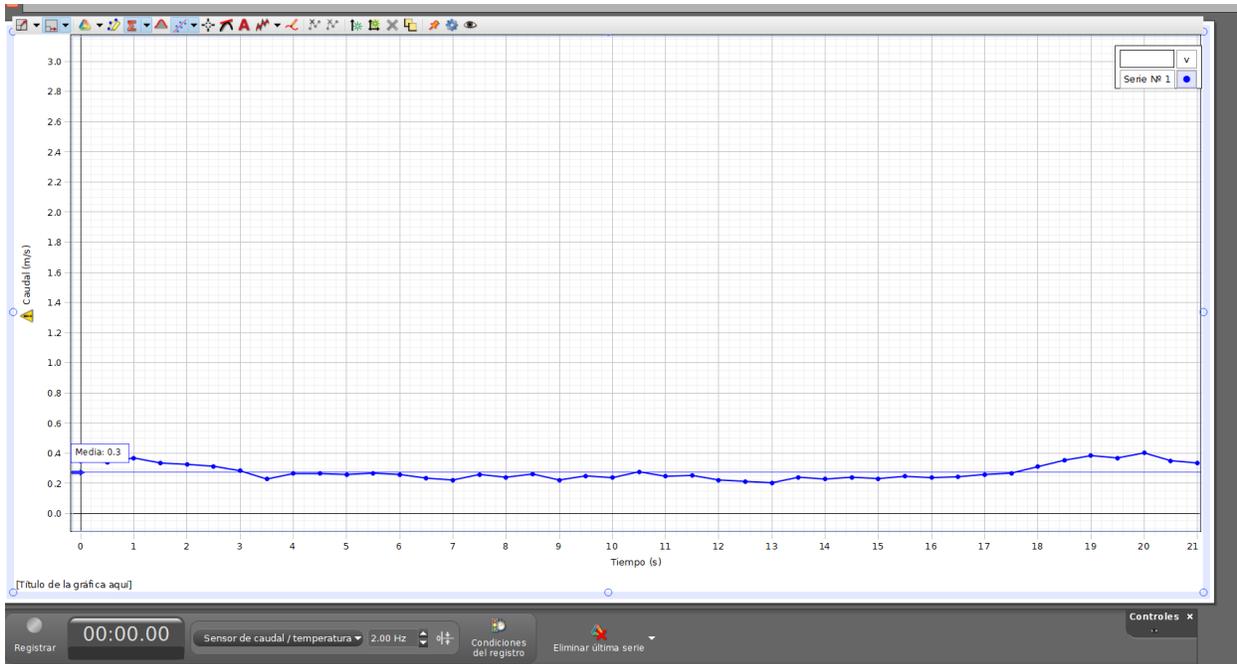


Figura 87. Gráfico de la toma de datos a la entrada - prueba 3.

Fuente: Elaboración propia

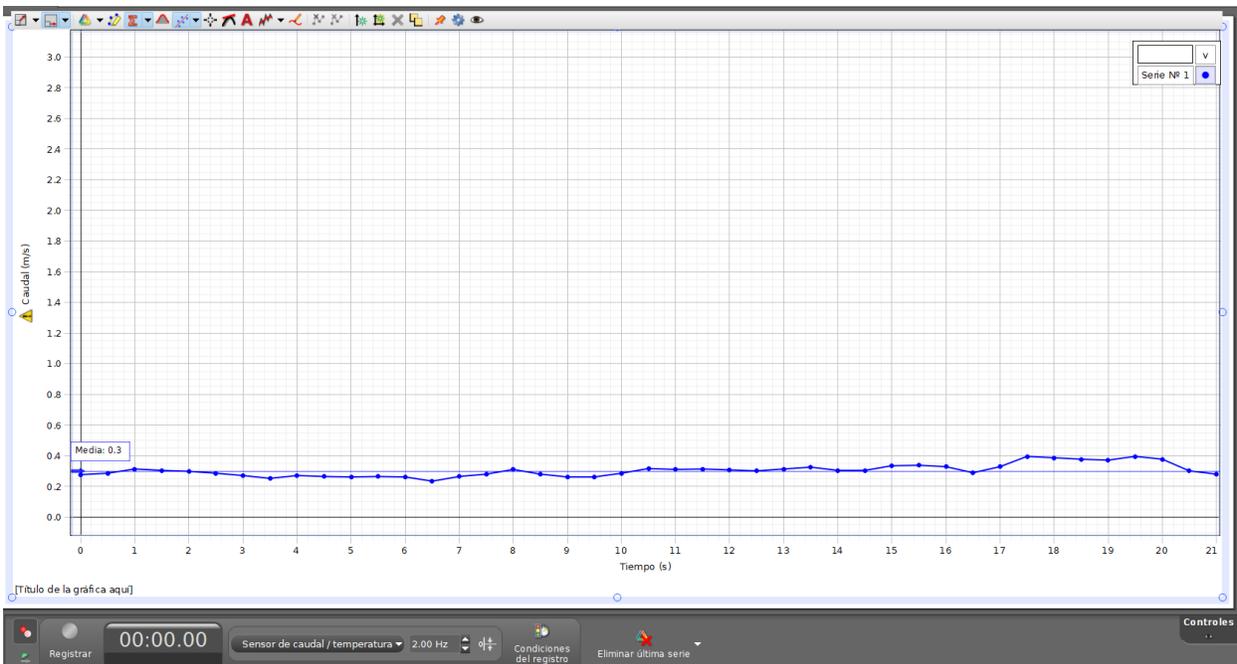


Figura 88. Gráfico de la toma de datos a la entrada - prueba 4.

Fuente: Elaboración propia.

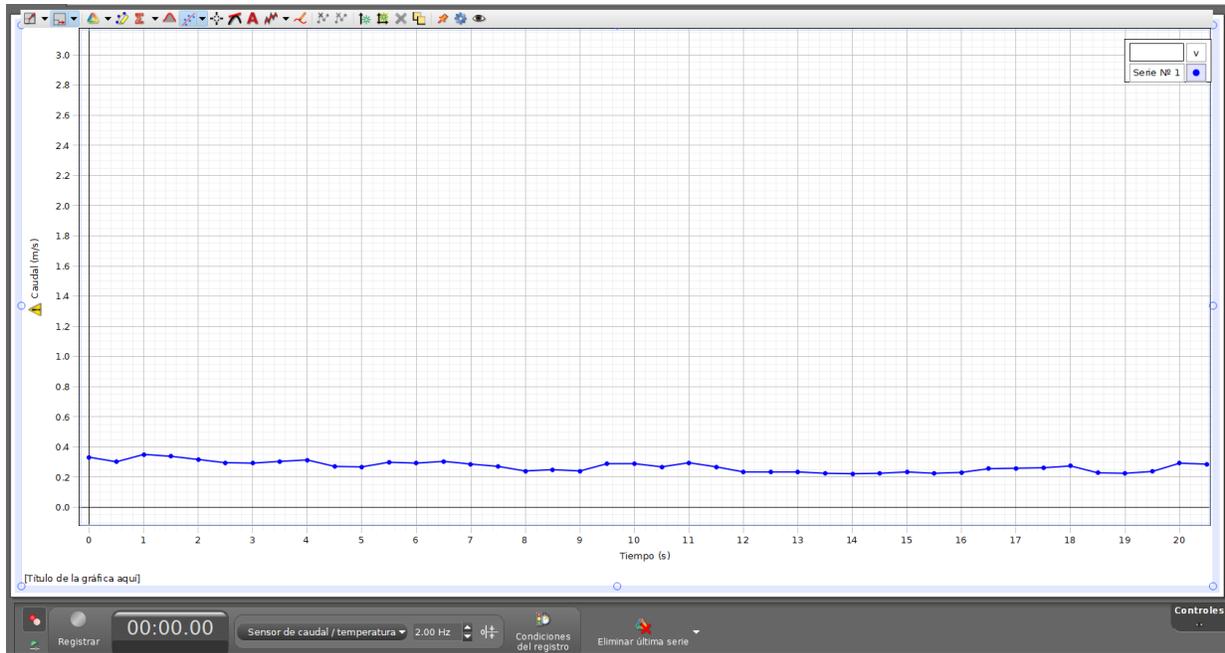


Figura 89. Gráfico de la toma de datos a la entrada - prueba 5.

Fuente: Elaboración propia.

## 17.2. TOMA DE DATOS A LA SALIDA

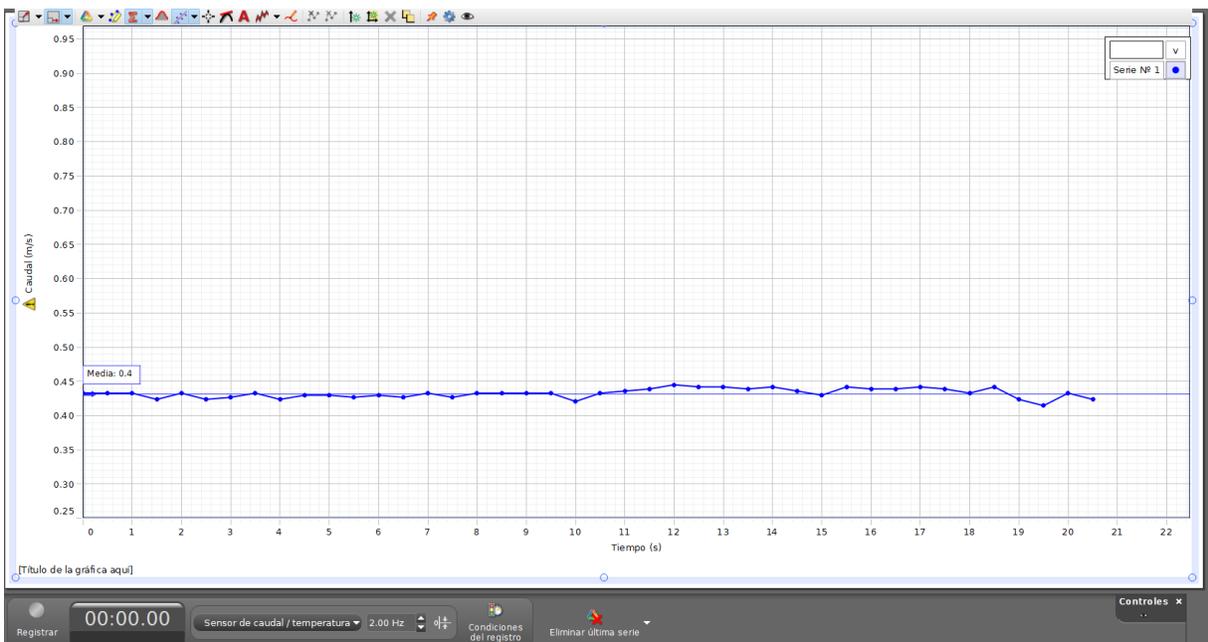


Figura 90. Gráfico de la toma de datos a la salida - prueba 1.

Fuente: Elaboración propia

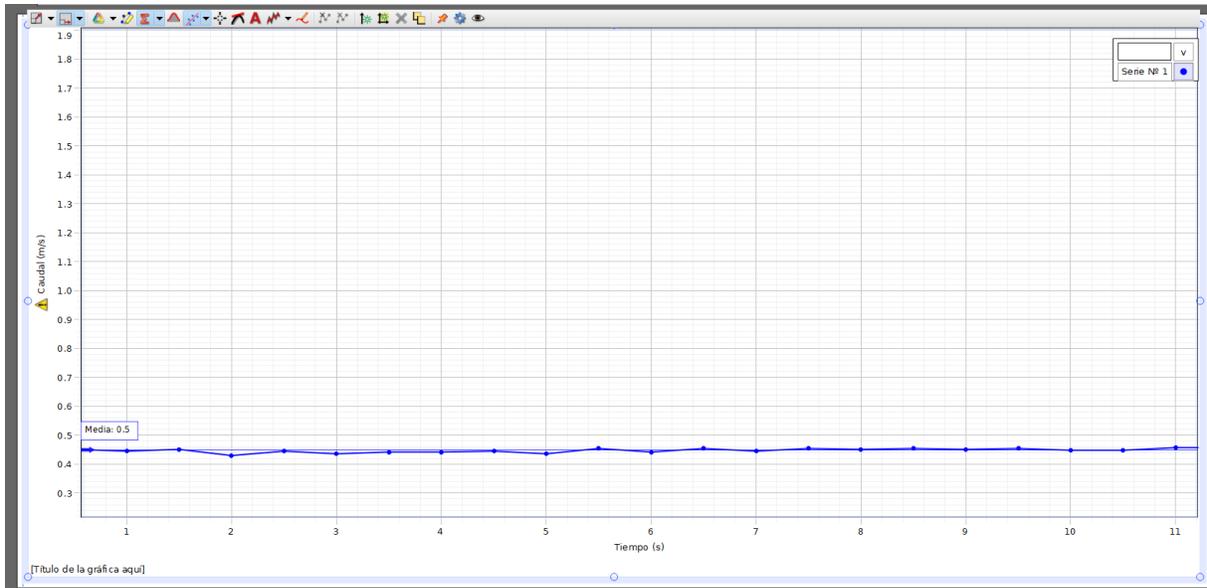


Figura 91. Gráfico de la toma de datos a la salida - prueba 2.

Fuente: Elaboración propia

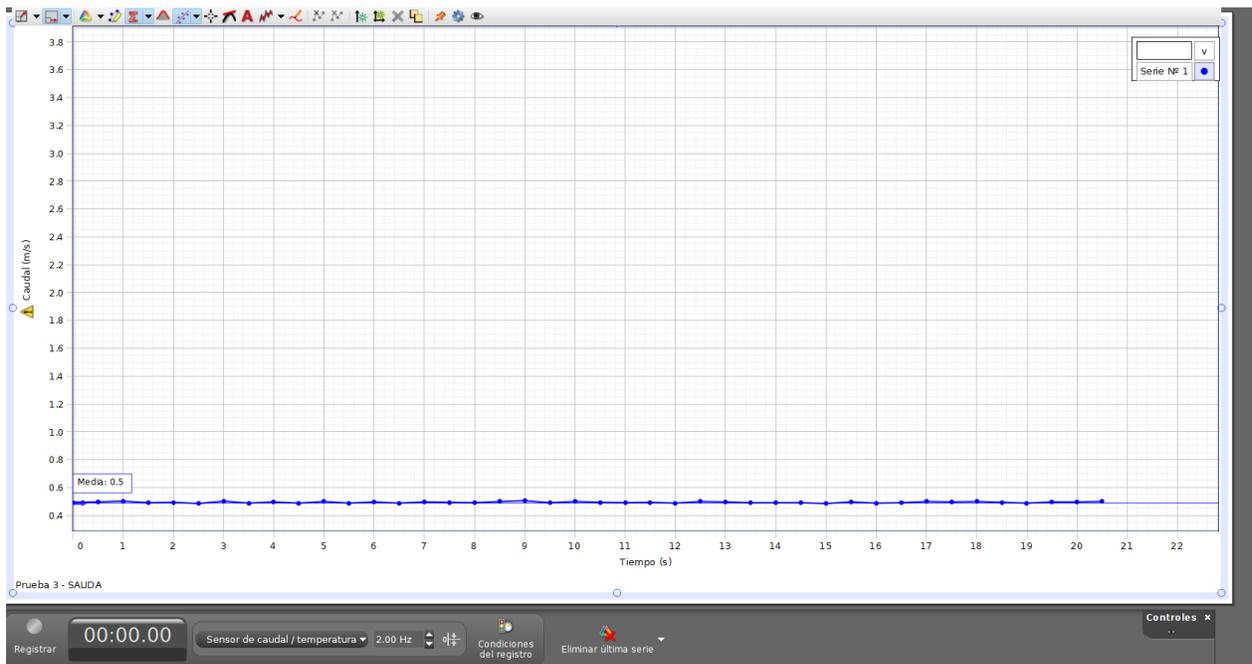


Figura 92. Gráfico de la toma de datos a la salida - prueba 3.

Fuente: Elaboración propia.

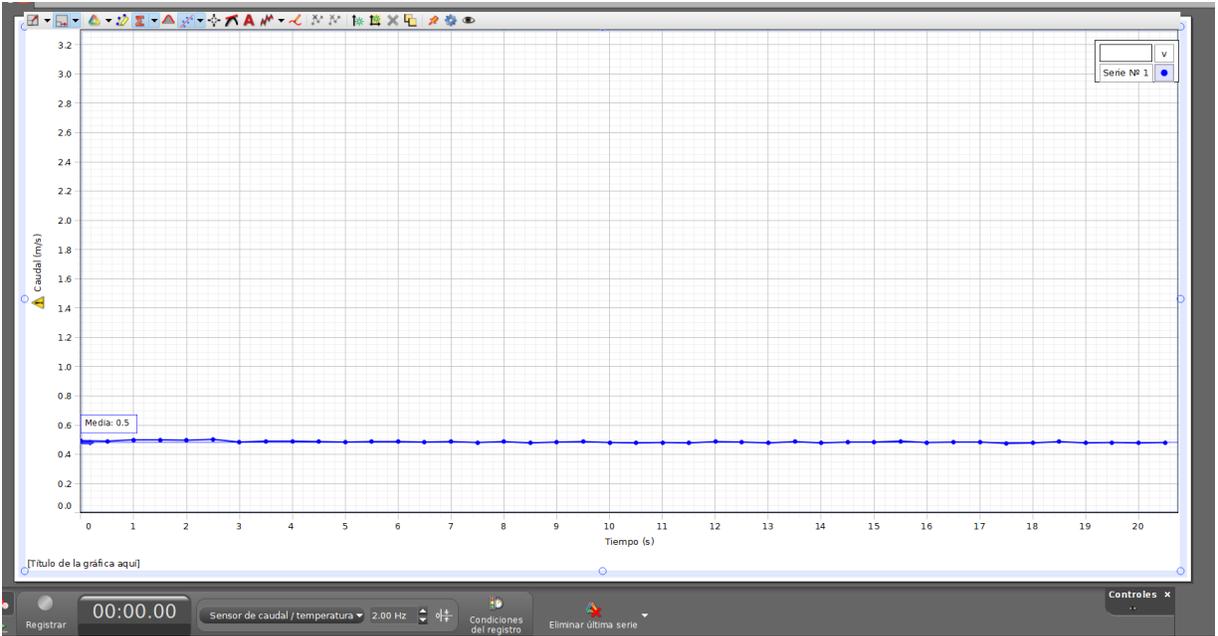


Figura 93. Gráfico de la toma de datos a la salida - prueba 4  
Fuente: Elaboración propia.

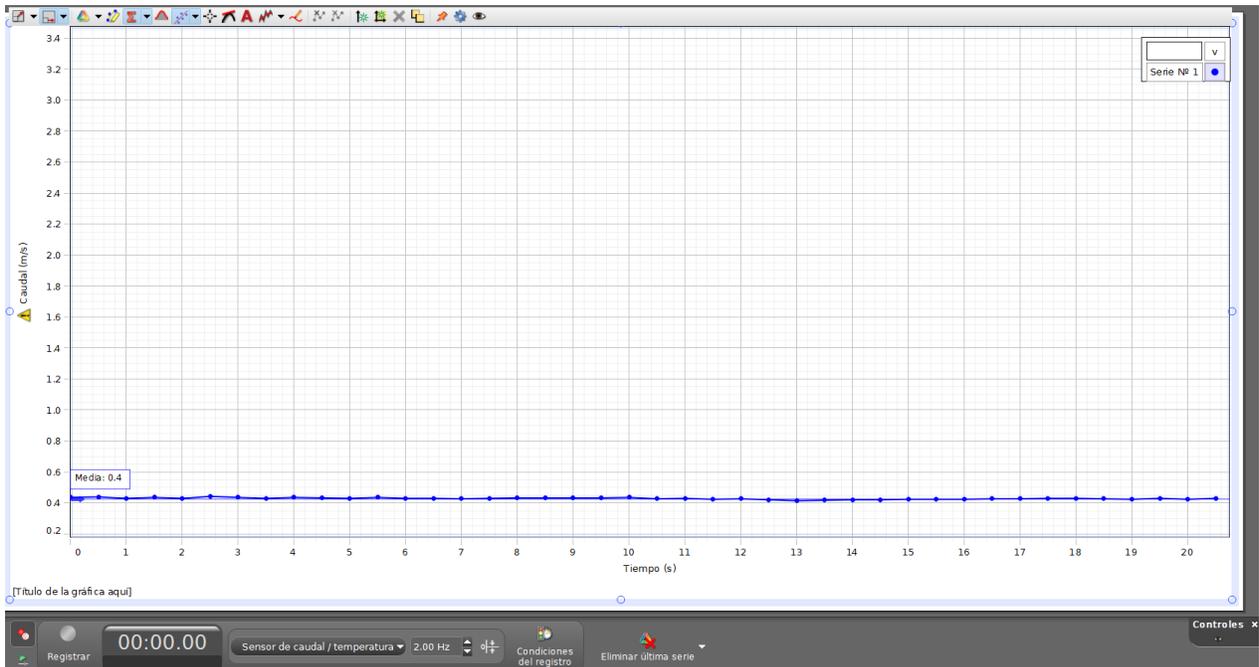


Figura 94. Gráfico de la toma de datos a la salida - prueba 5  
Fuente: Elaboración propia.

### 17.3. TOMA DE DATOS DEL CAUDAL DE FUNCIONAMIENTO

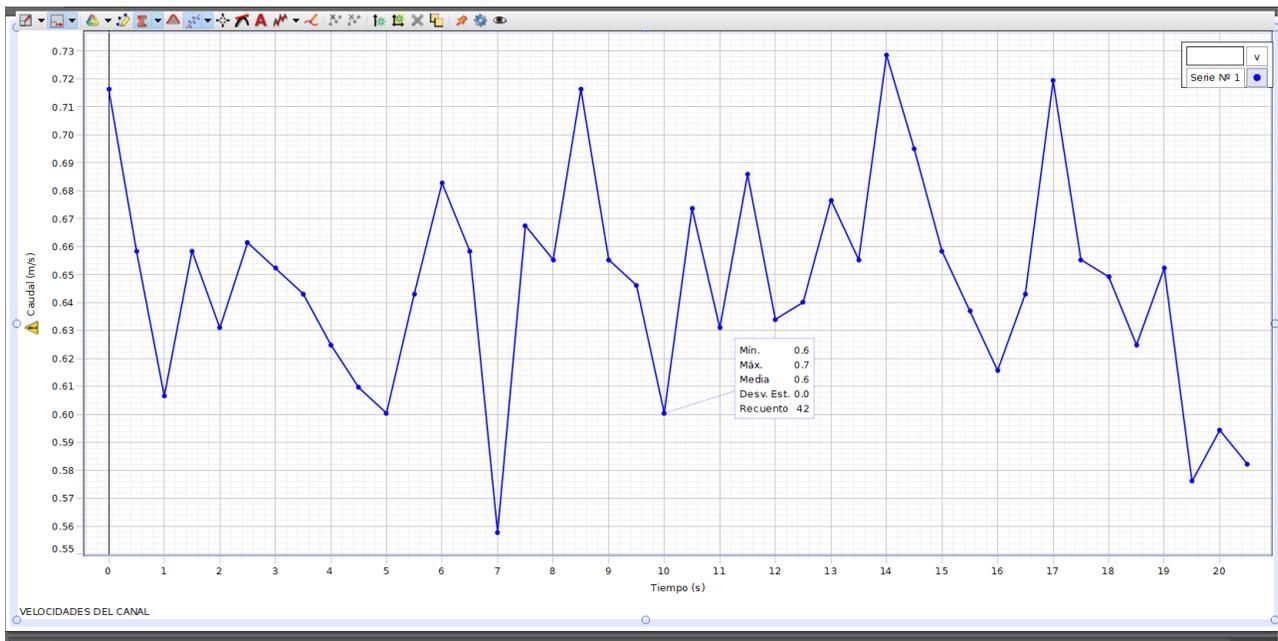


Figura 95. Gráfico de la toma de datos del canal de entrada - prueba 1.

Fuente: Elaboración propia

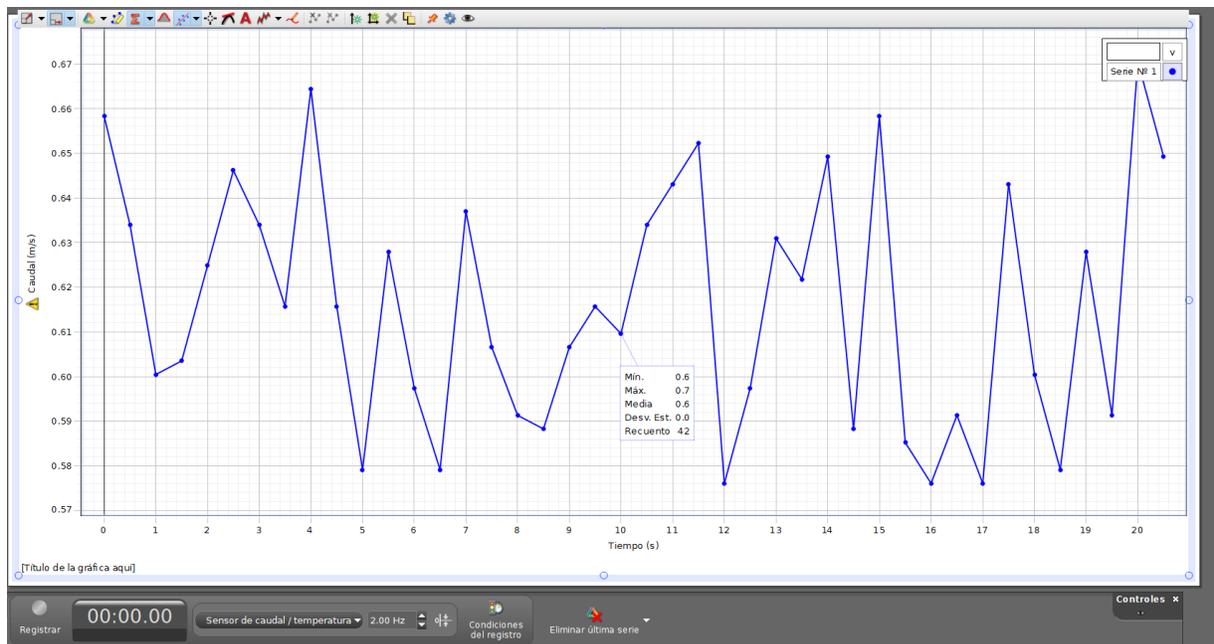


Figura 96. Gráfico de la toma de datos del canal de entrada - prueba 2.

Fuente: Elaboración propia

## 18. ANEXOS N°3 MODELADO NUMÉRICO PARA DIFERENTES CAUDALES MOSTRANDO SUS RESPECTIVAS GRAFICAS DE VELOCIDAD DE FLUJO EN CADA SECCIÓN.

### 18.1. MODELAMIENTO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 30 L/S

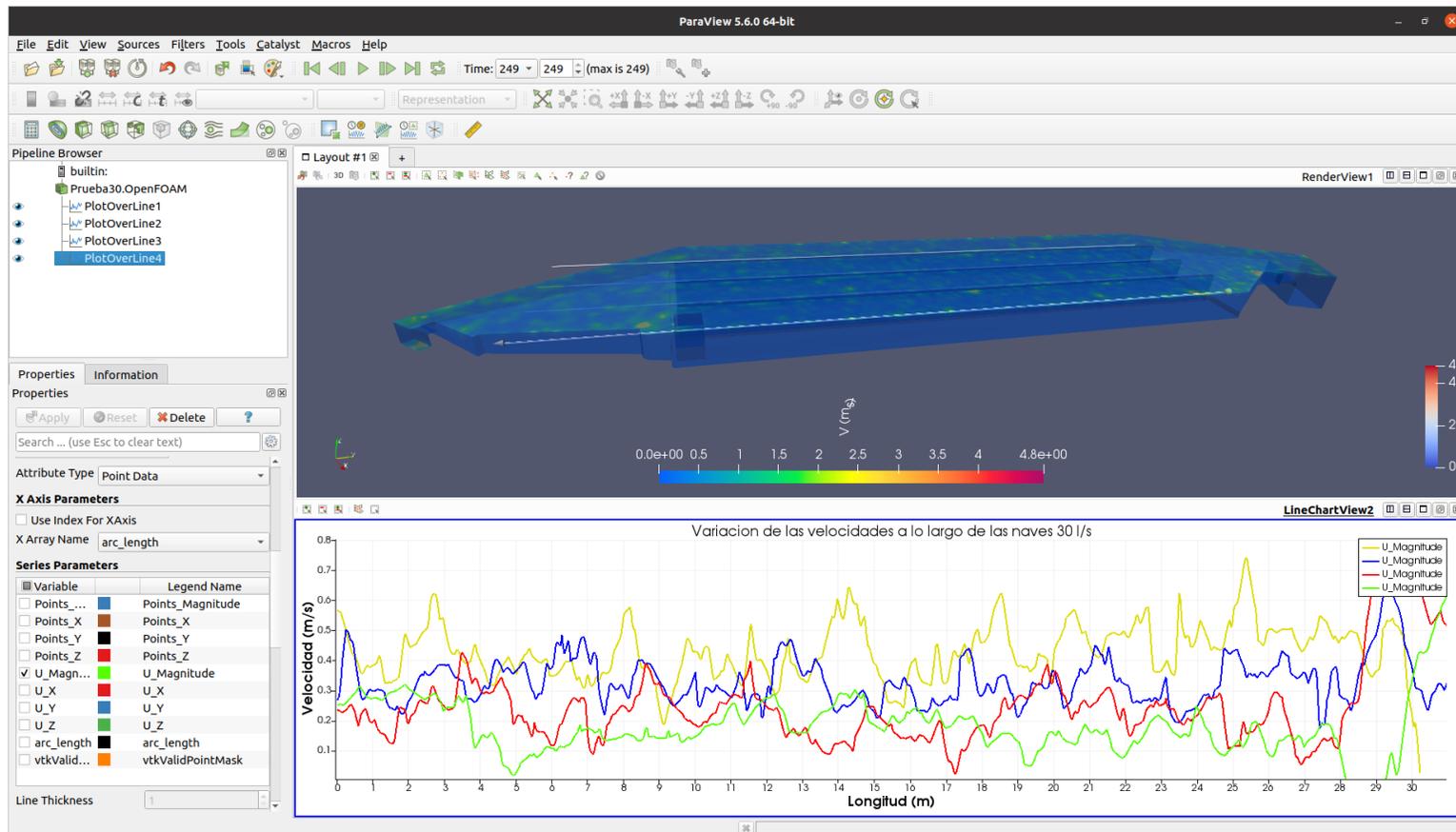


Figura 97. Modelado numérico para un caudal de operación de 30 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte superficial de las secciones

Fuente: Elaboración propia

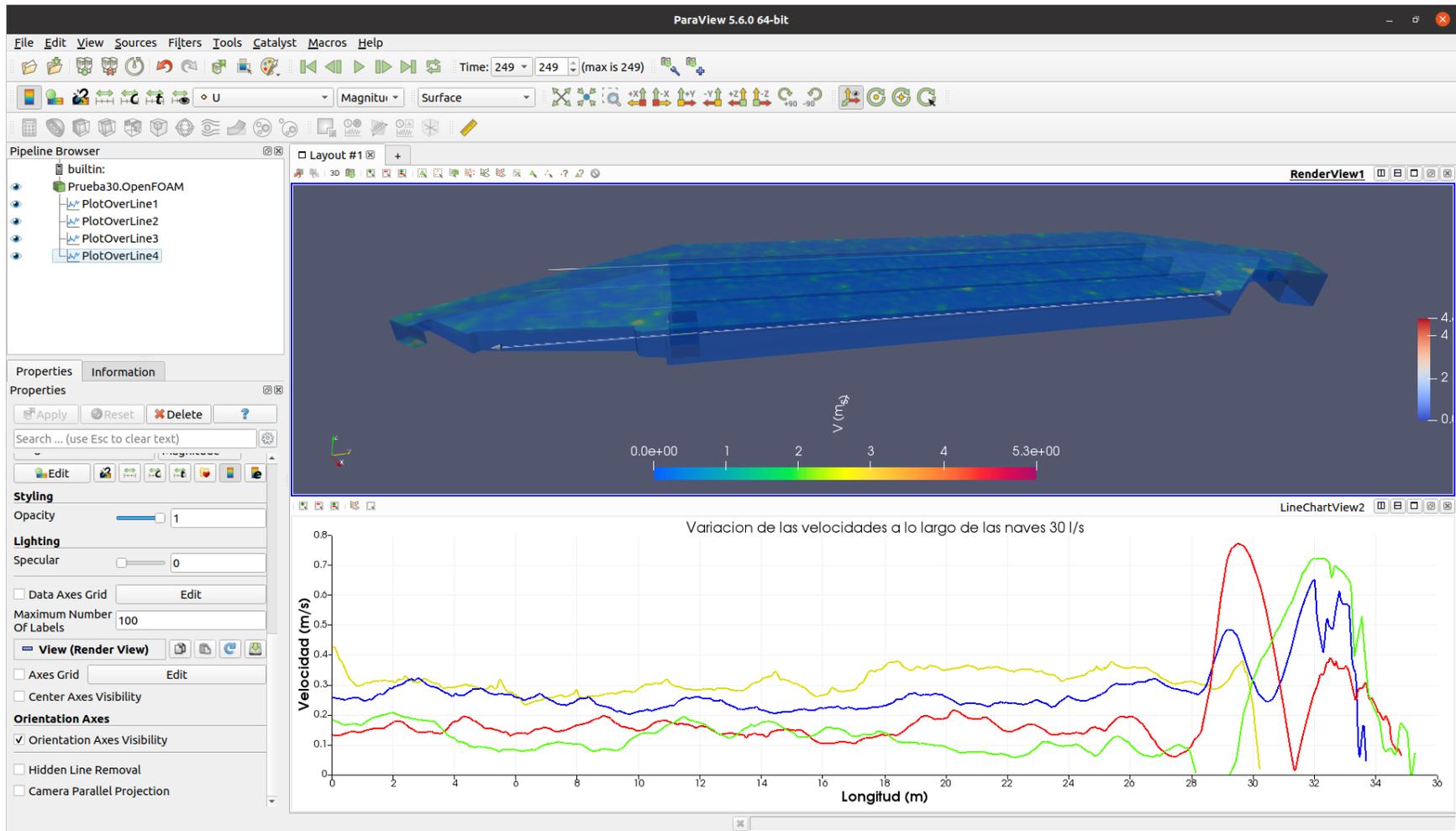


Figura 98. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 30 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte intermedia de las secciones.

Fuente: Elaboración propia

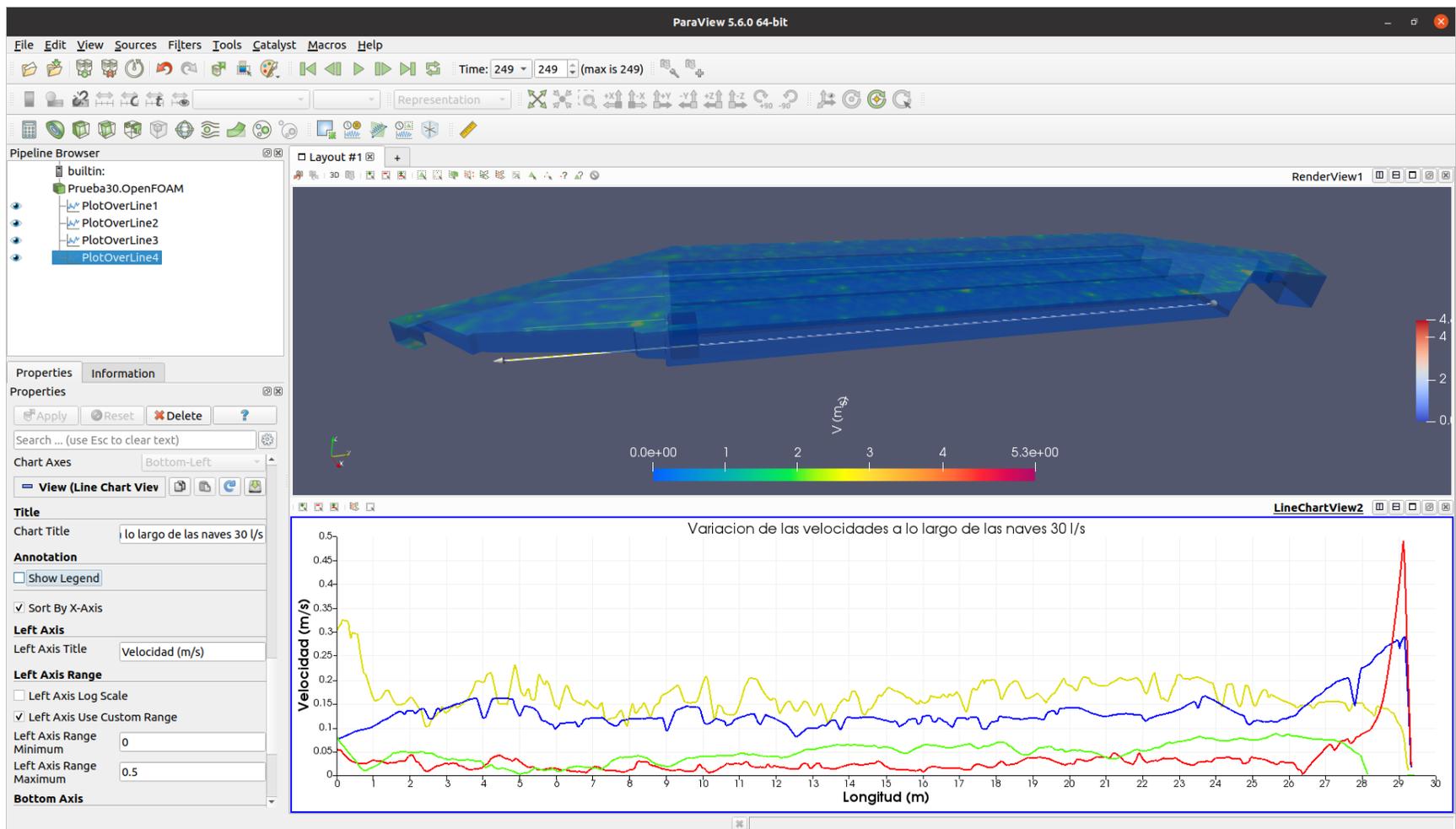


Figura 99. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 30 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte intermedia de las secciones.

Fuente: Elaboración propia.

## 18.2. MODELAMIENTO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 50 L/S

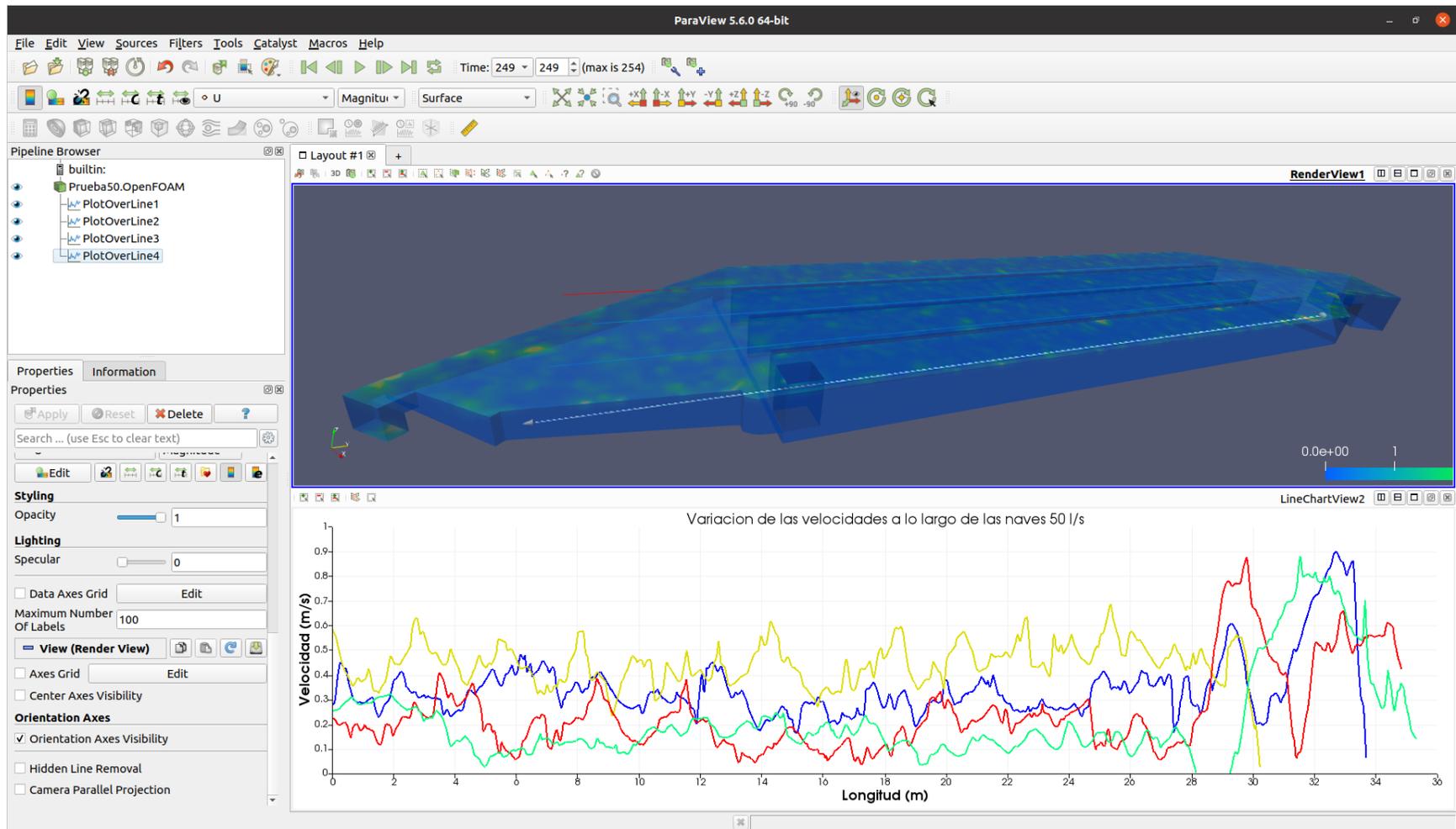


Figura 100. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 50 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte superior de las secciones.

Fuente: Elaboración propia.

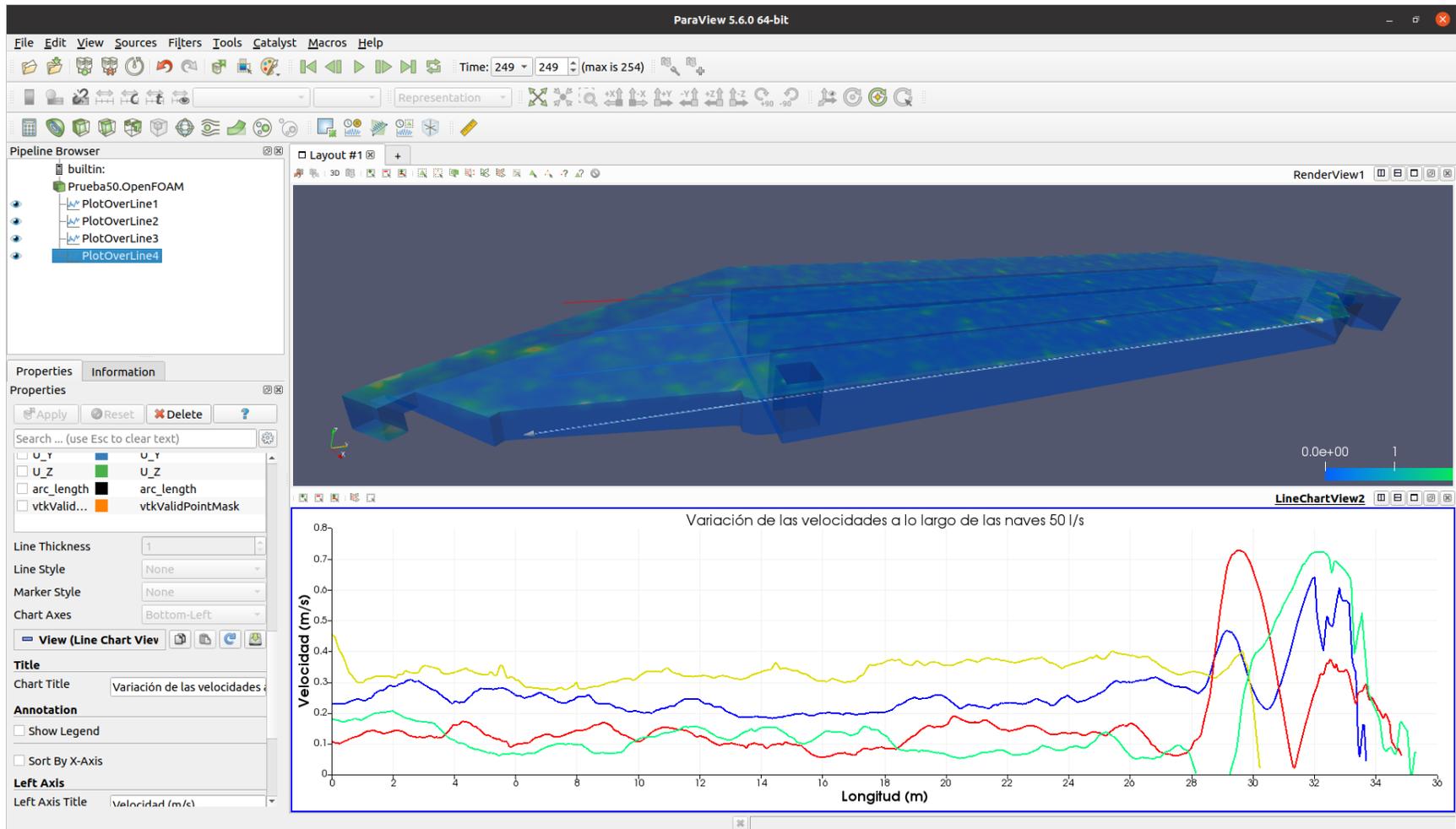


Figura 101. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 50 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte intermedia de las secciones.

Fuente: Elaboración propia.

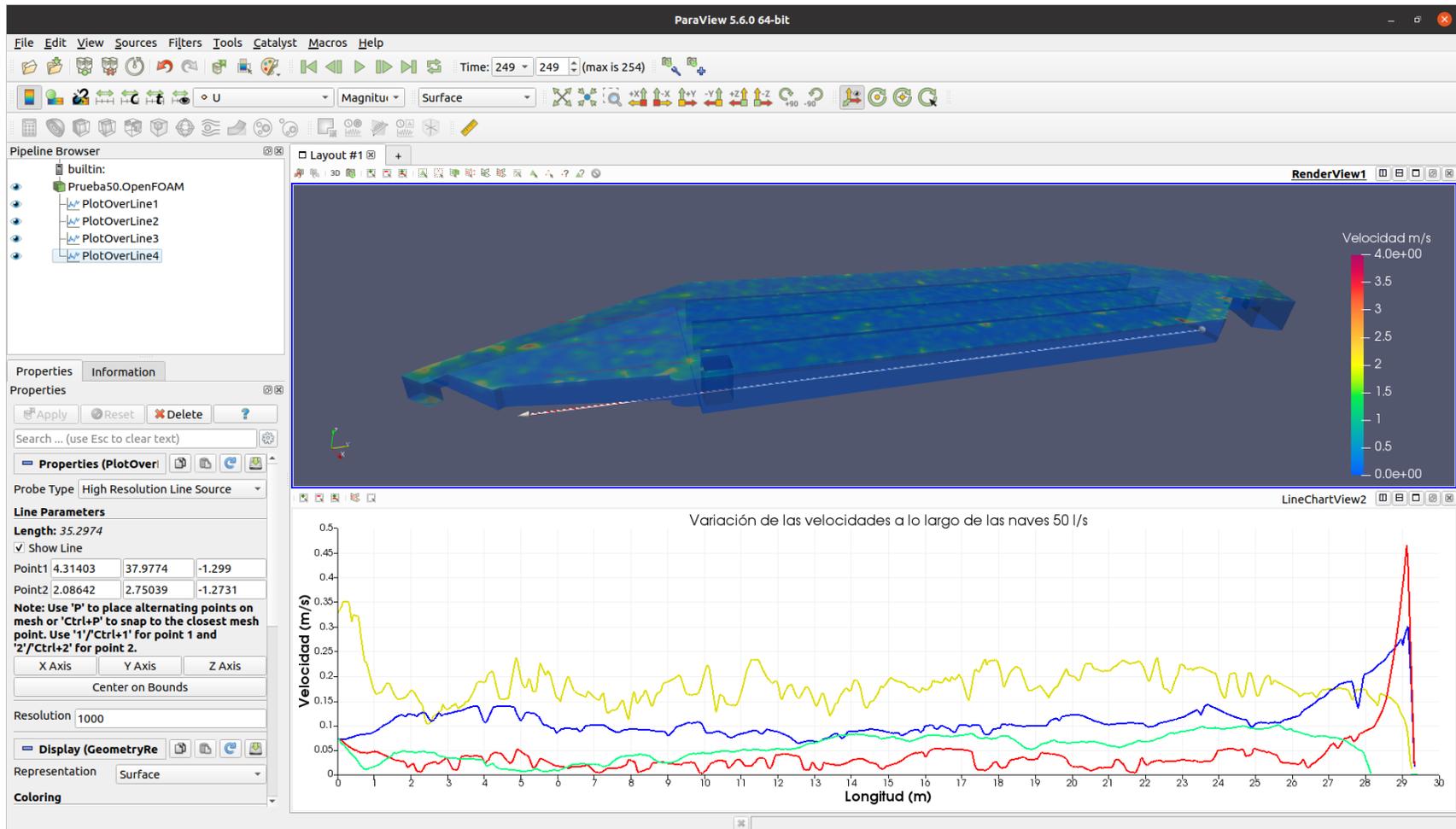


Figura 102. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 50 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte inferior de las secciones.

Fuente: Elaboración propia.

### 18.3. MODELAMIENTO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 80 L/S

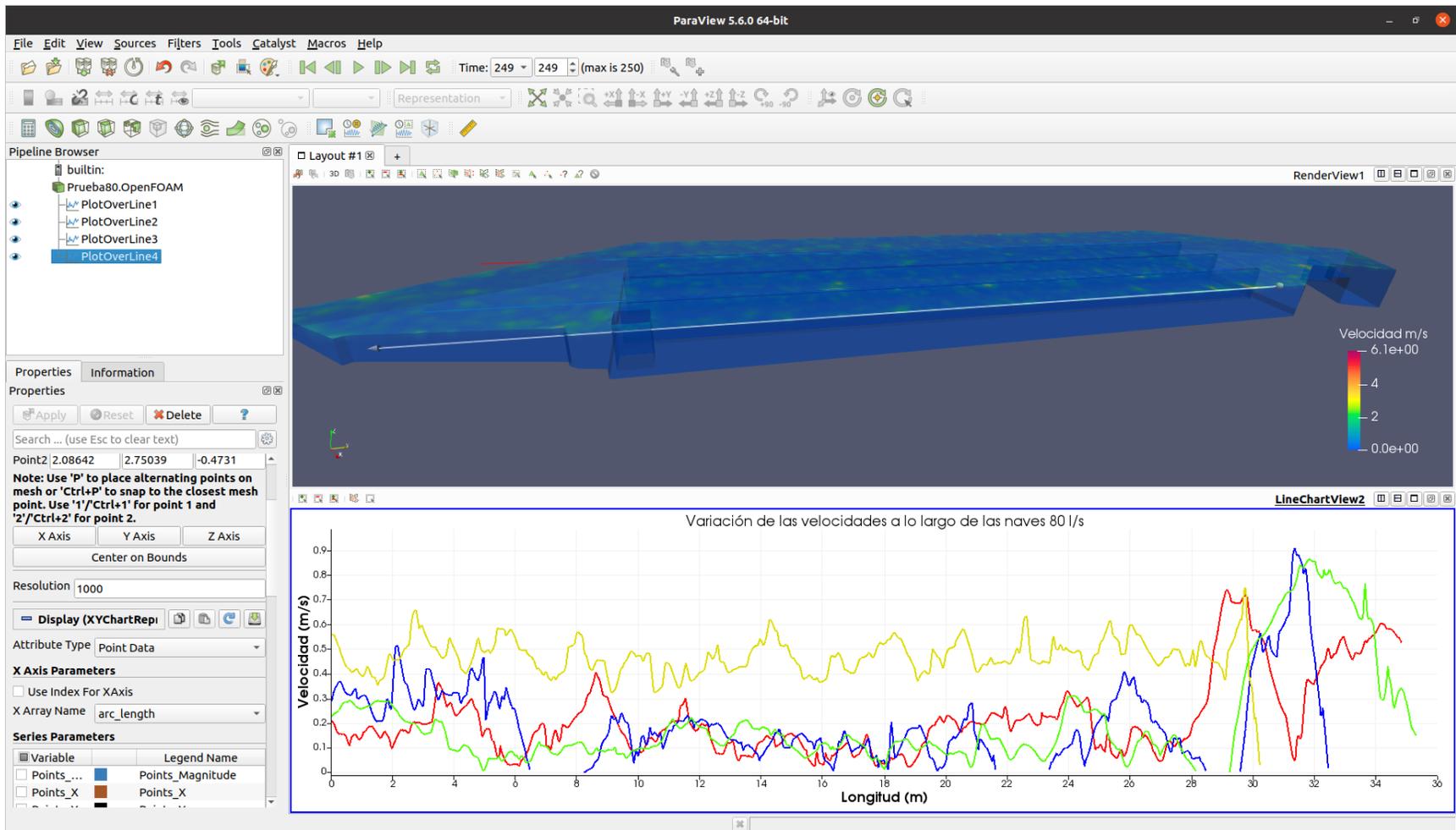


Figura 103. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 80 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte superior de las secciones.

Fuente: Elaboración propia.

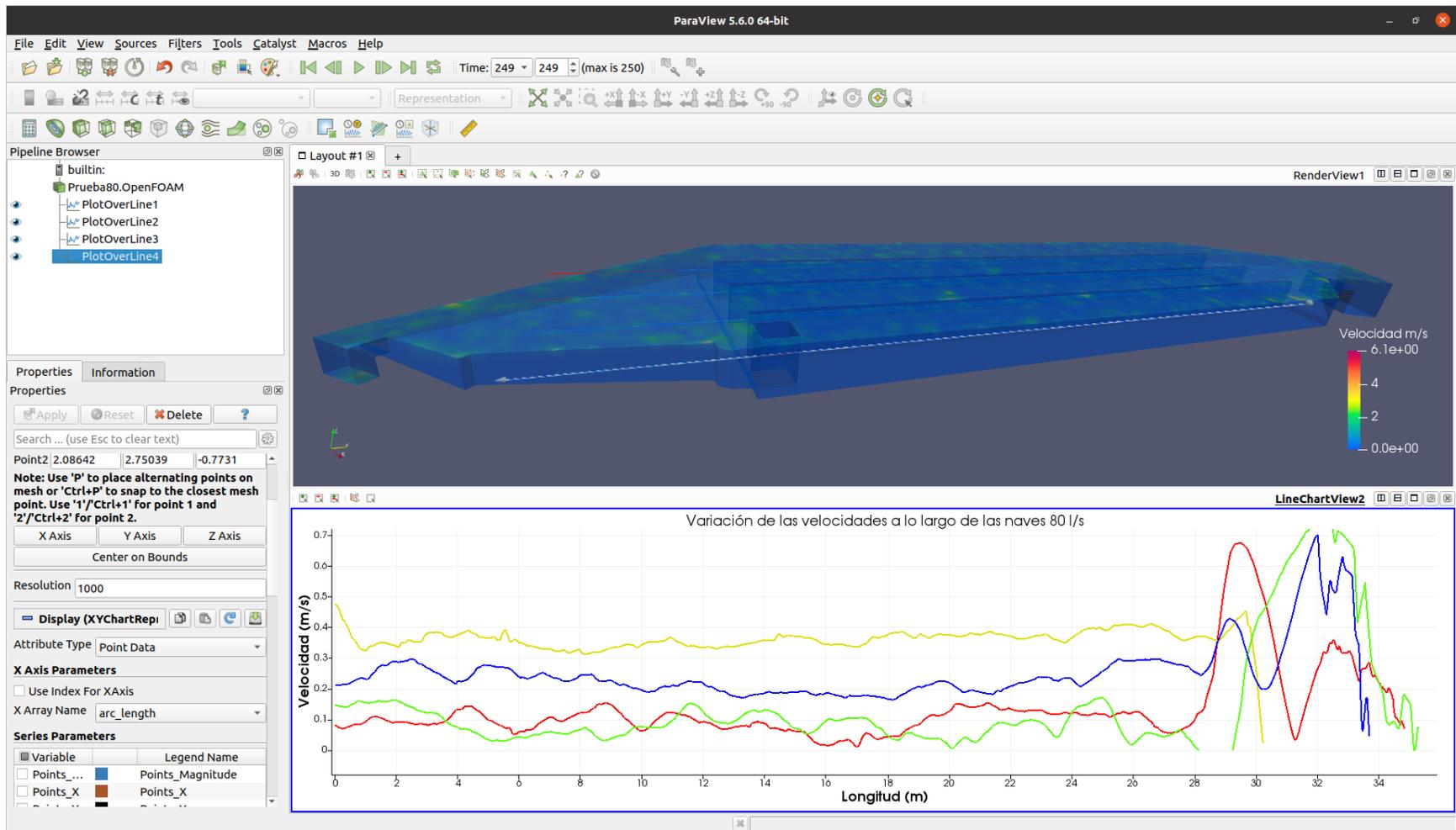


Figura 104. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 80 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte intermedia de las secciones.

Fuente: Elaboración propia.

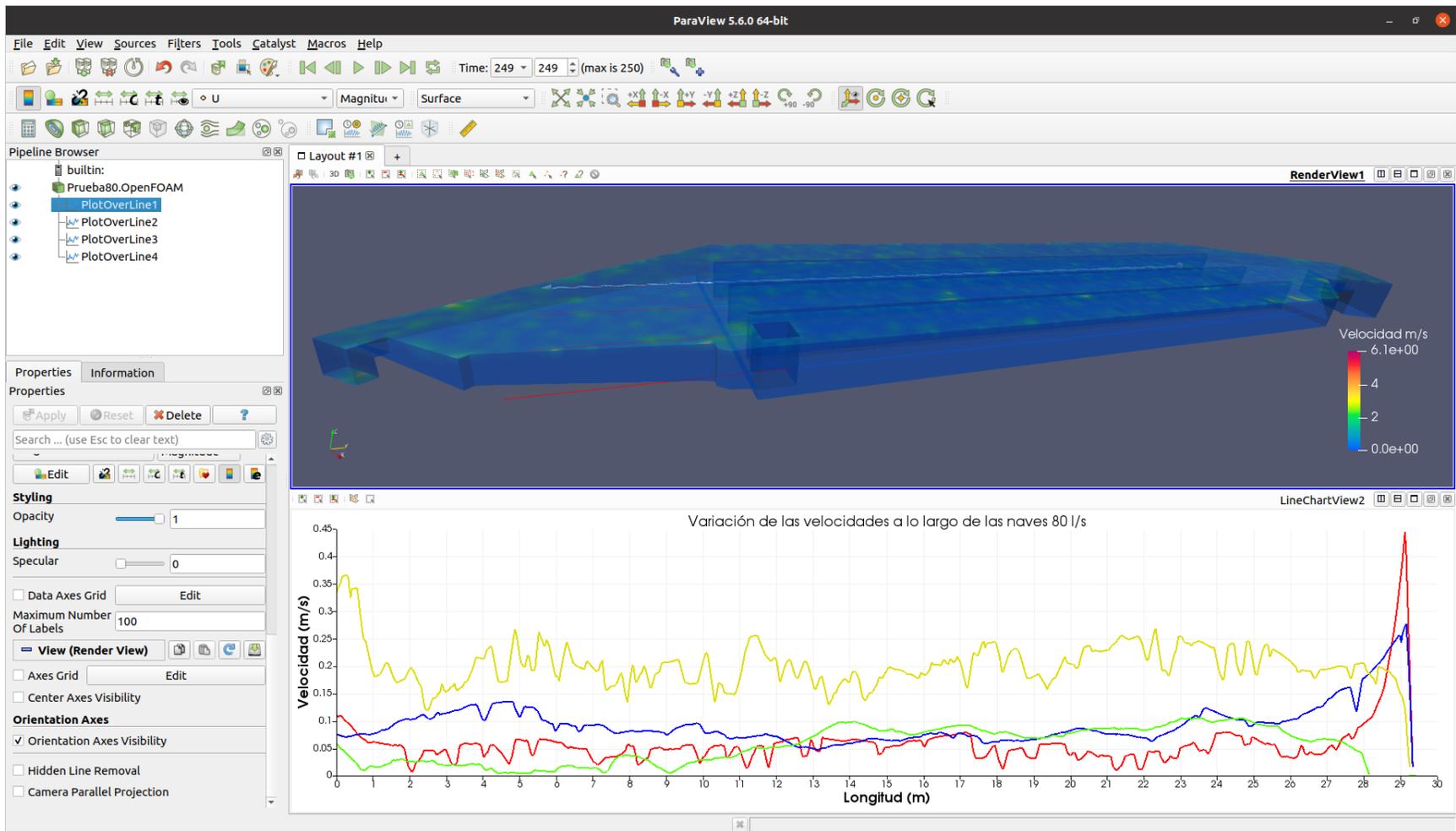


Figura 105. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 80 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte inferior de las secciones.

Fuente: Elaboración propia.

## 18.4. MODELAMIENTO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 100 L/S

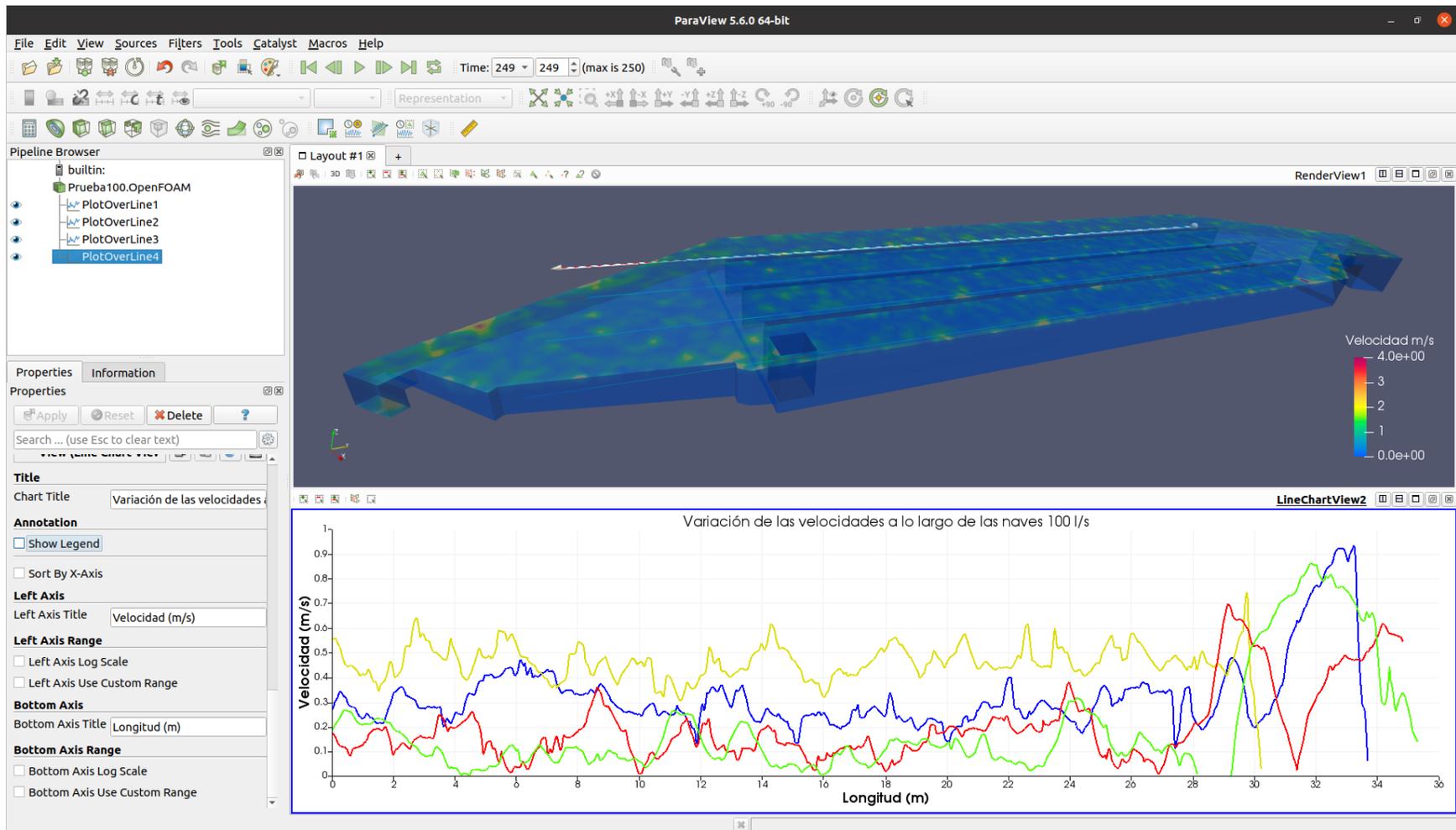


Figura 106. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 100 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte superior de las secciones.

Fuente: Elaboración propia.

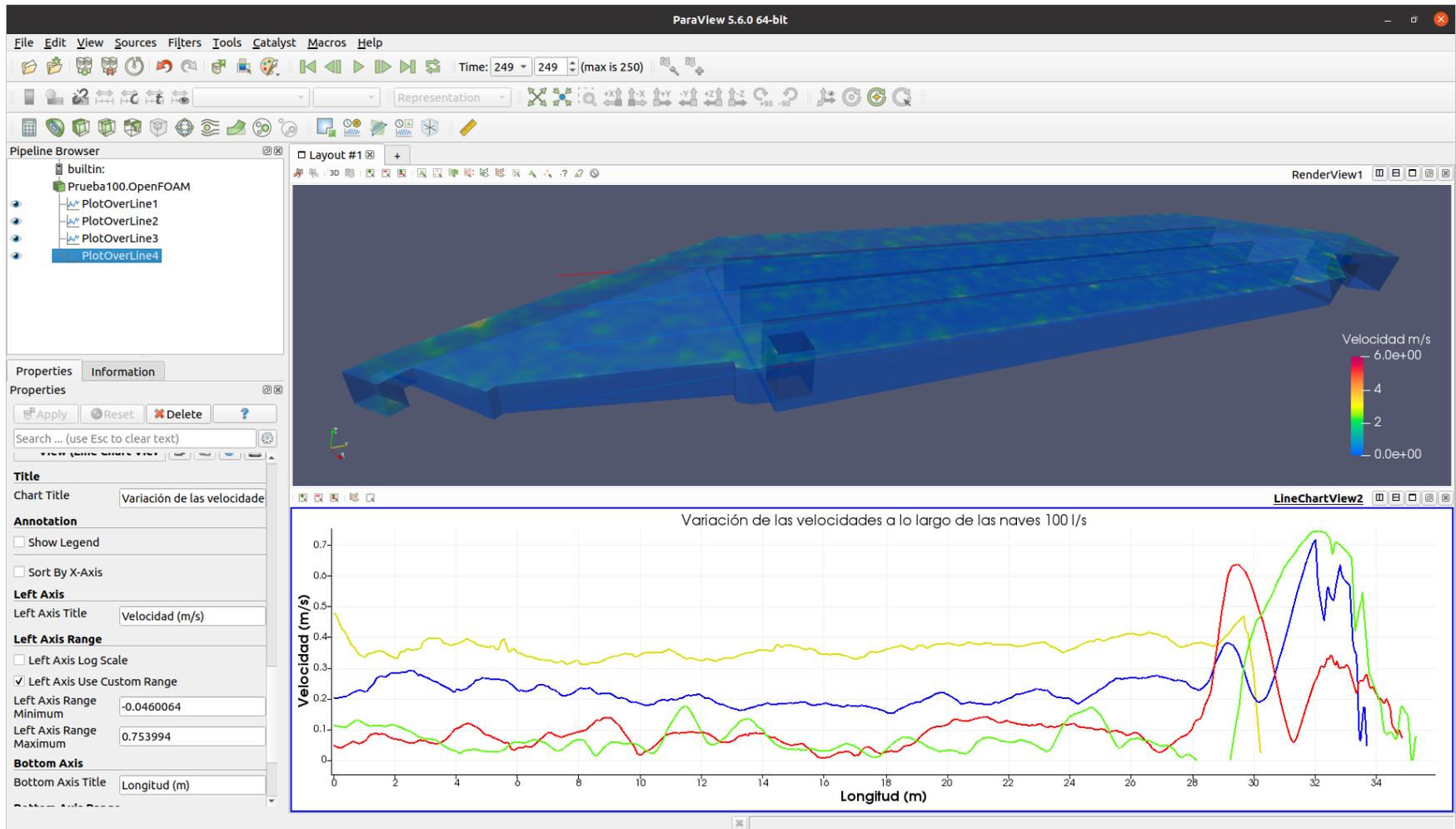


Figura 107. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 100 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte intermedia de las secciones.

Fuente: Elaboración propia.

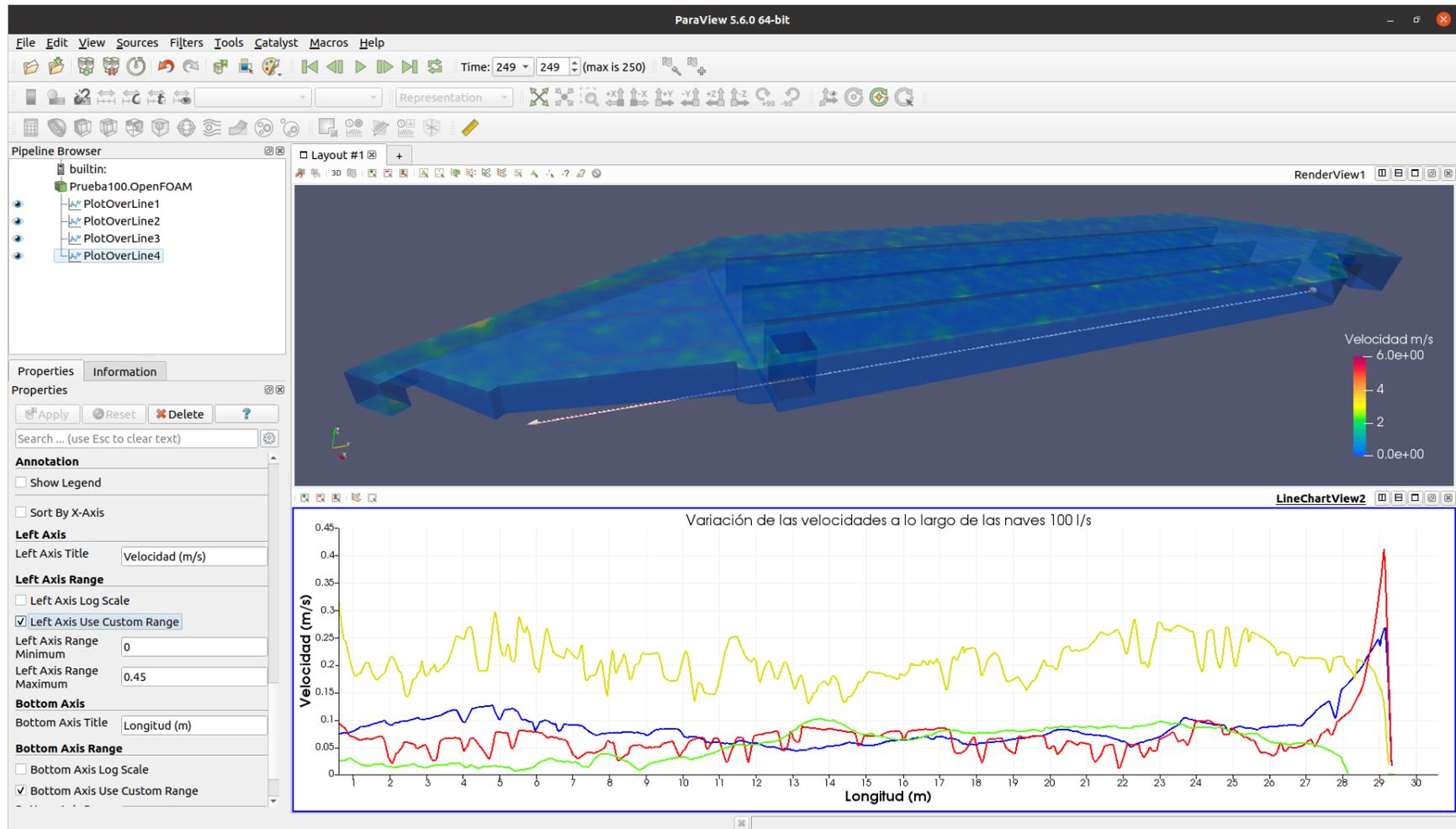


Figura 108. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 100 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte inferior de las secciones.

Fuente: Elaboración propia.

## 18.5. MODELAMIENTO PARA UN CAUDAL DE OPERACIÓN DE 120 L/S

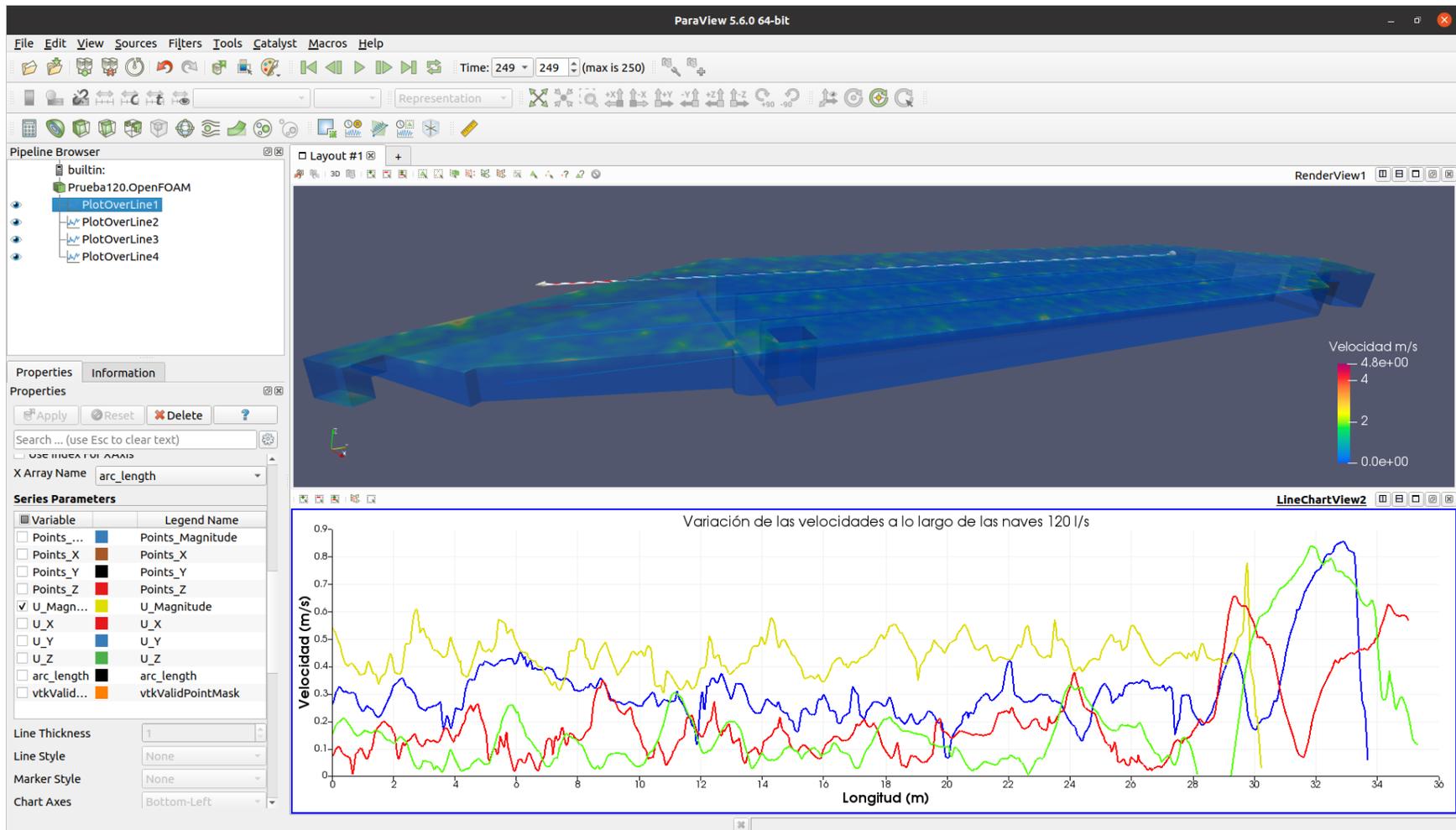


Figura 109. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 120 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte superior de las secciones.

Fuente: Elaboración propia.

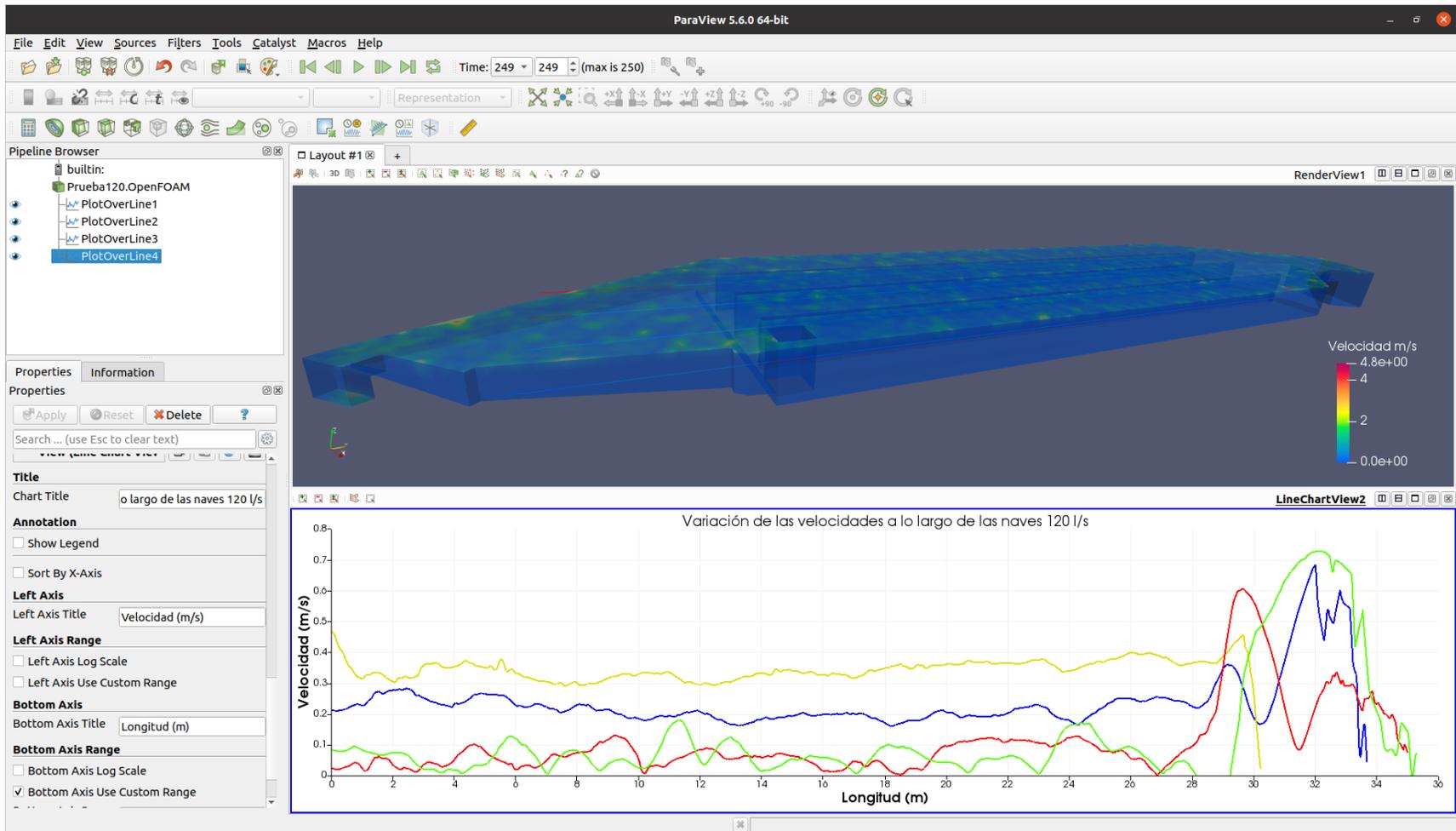


Figura 110. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 120 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte intermedia de las secciones.

Fuente: Elaboración propia.

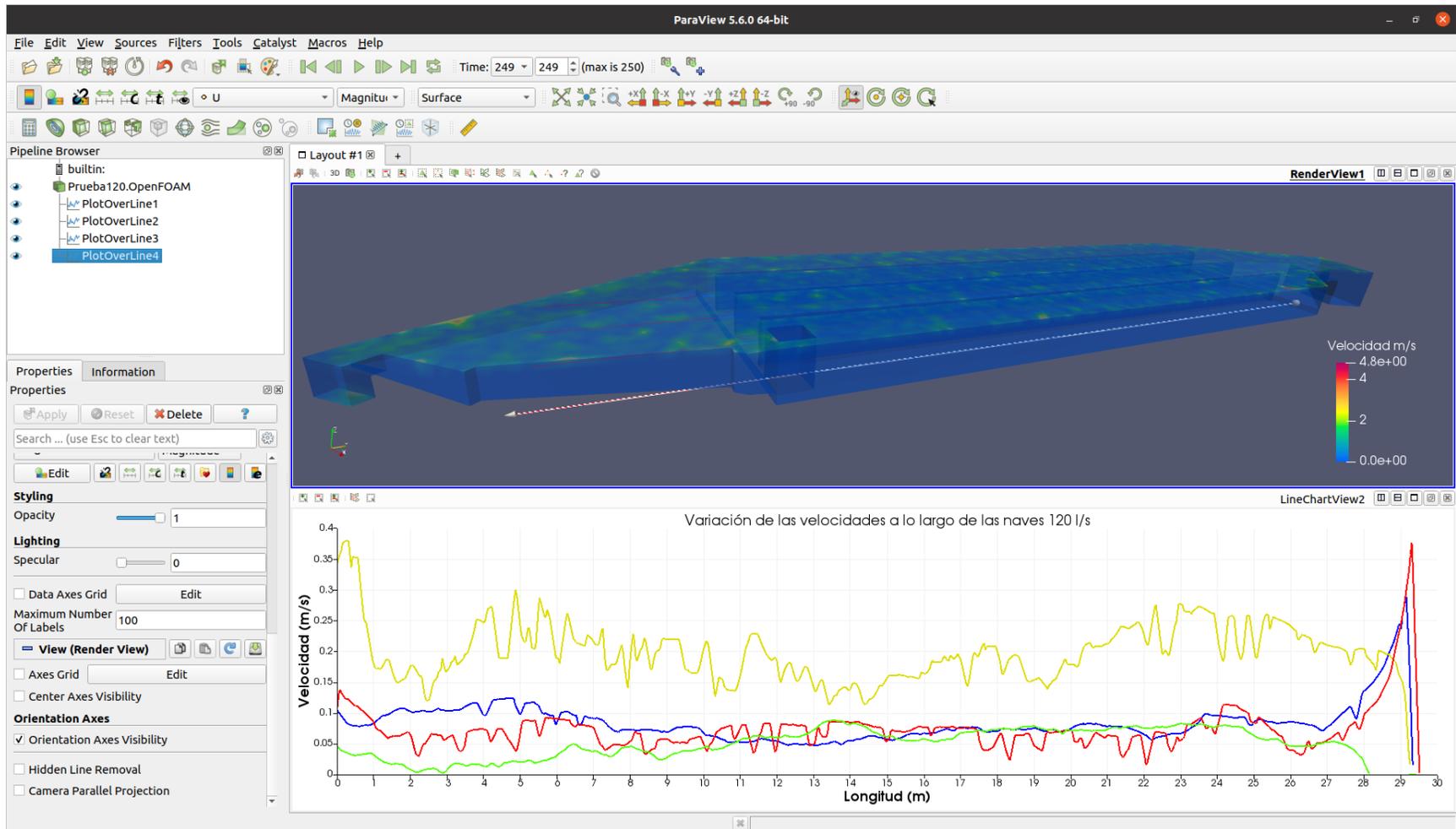


Figura 111. Modelamiento numérico para un caudal de operación de 120 l/s graficando las velocidades tomadas en la parte inferior de las secciones.

Fuente: Elaboración propia.

## 19. ANEXOS N°3 MODELADO NUMÉRICO PARA DIFERENTES COMPARANDO LA VELOCIDAD DE FLUJO PARA CADA CAUDAL EN CADA SECCIONES.

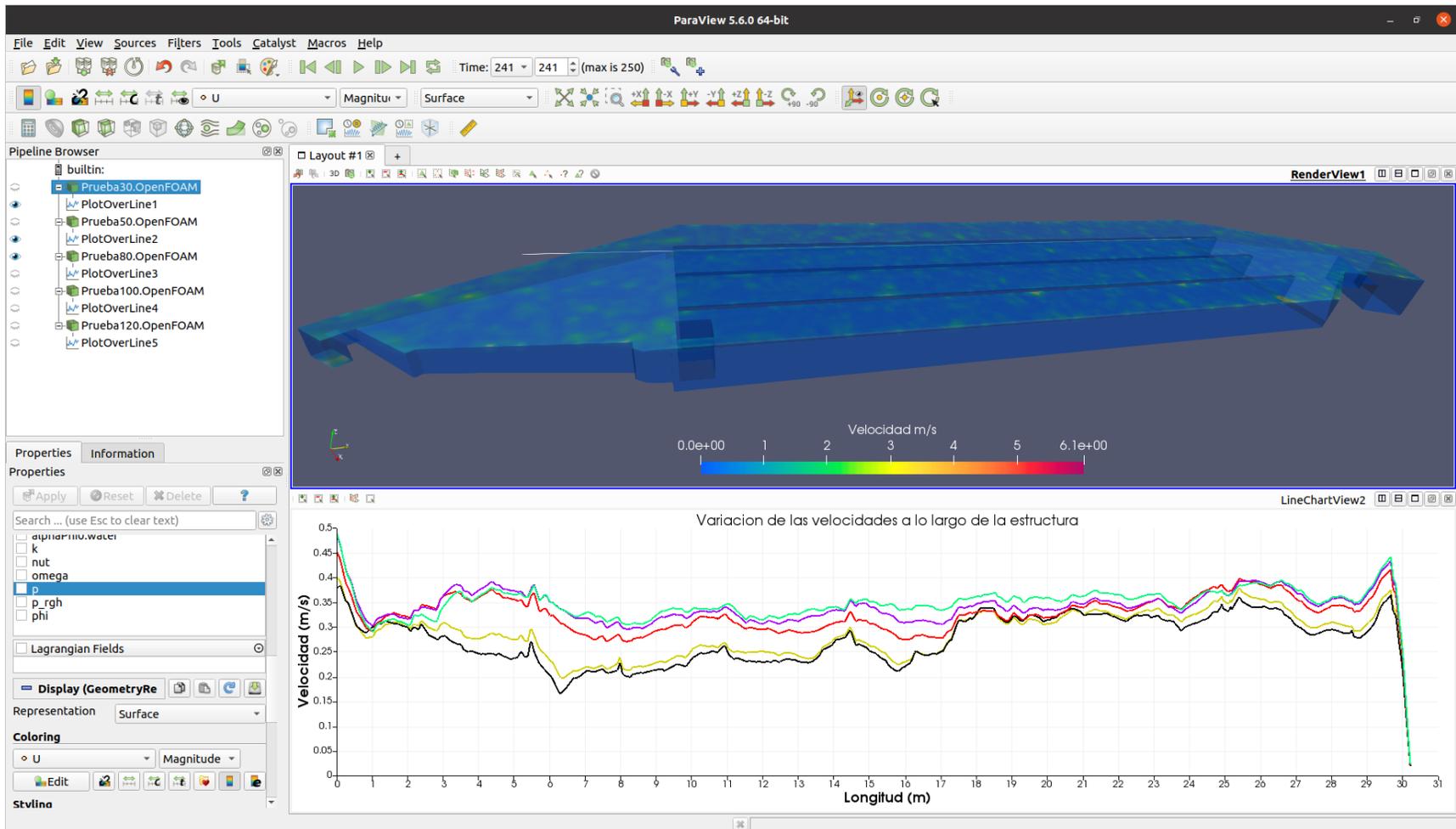


Figura 112. Comparación de las velocidades en la sección 1.

Fuente: Elaboración propia.

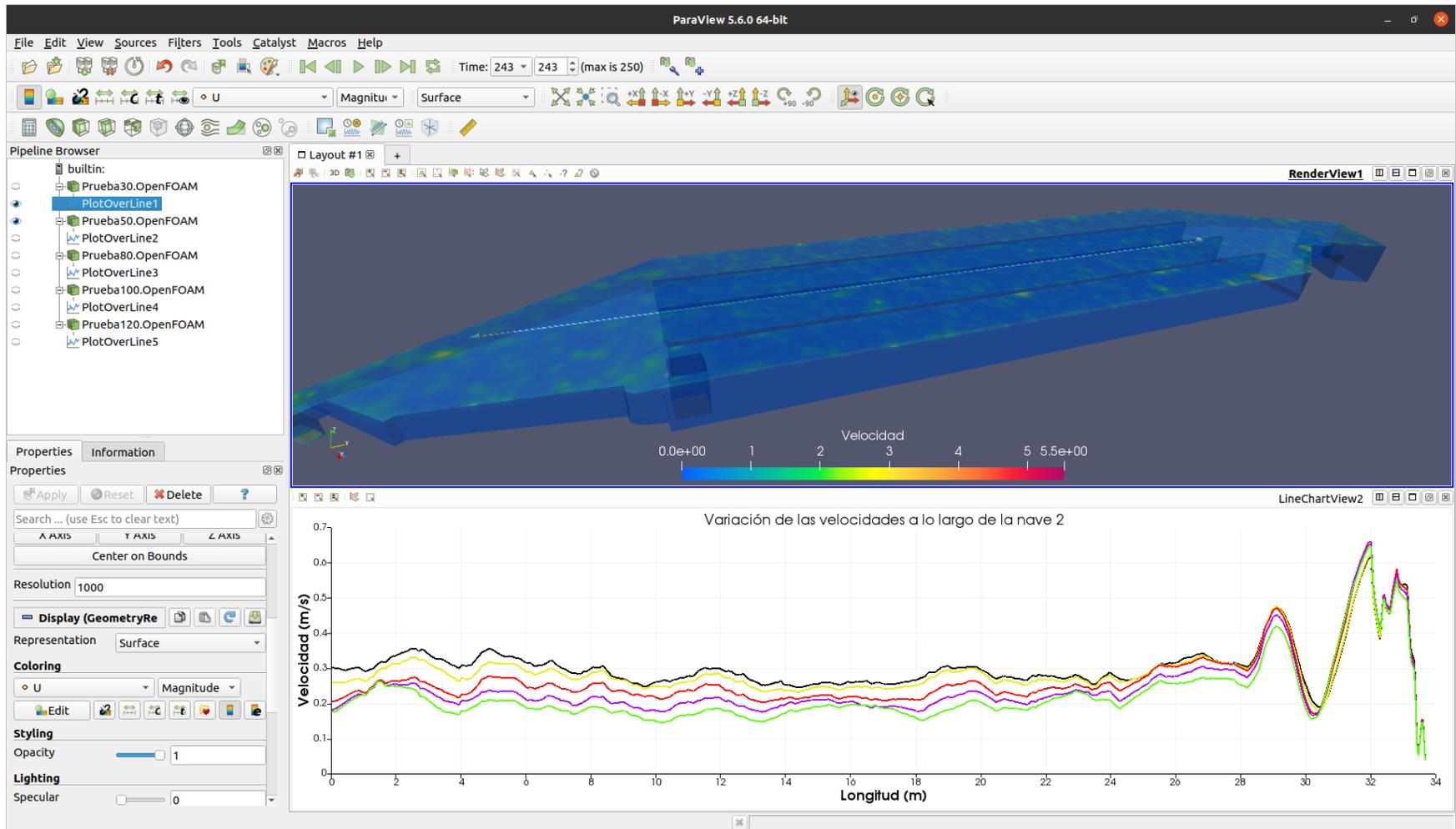


Figura 113. Comparación de las velocidades en la sección 2.

Fuente: Elaboración propia.

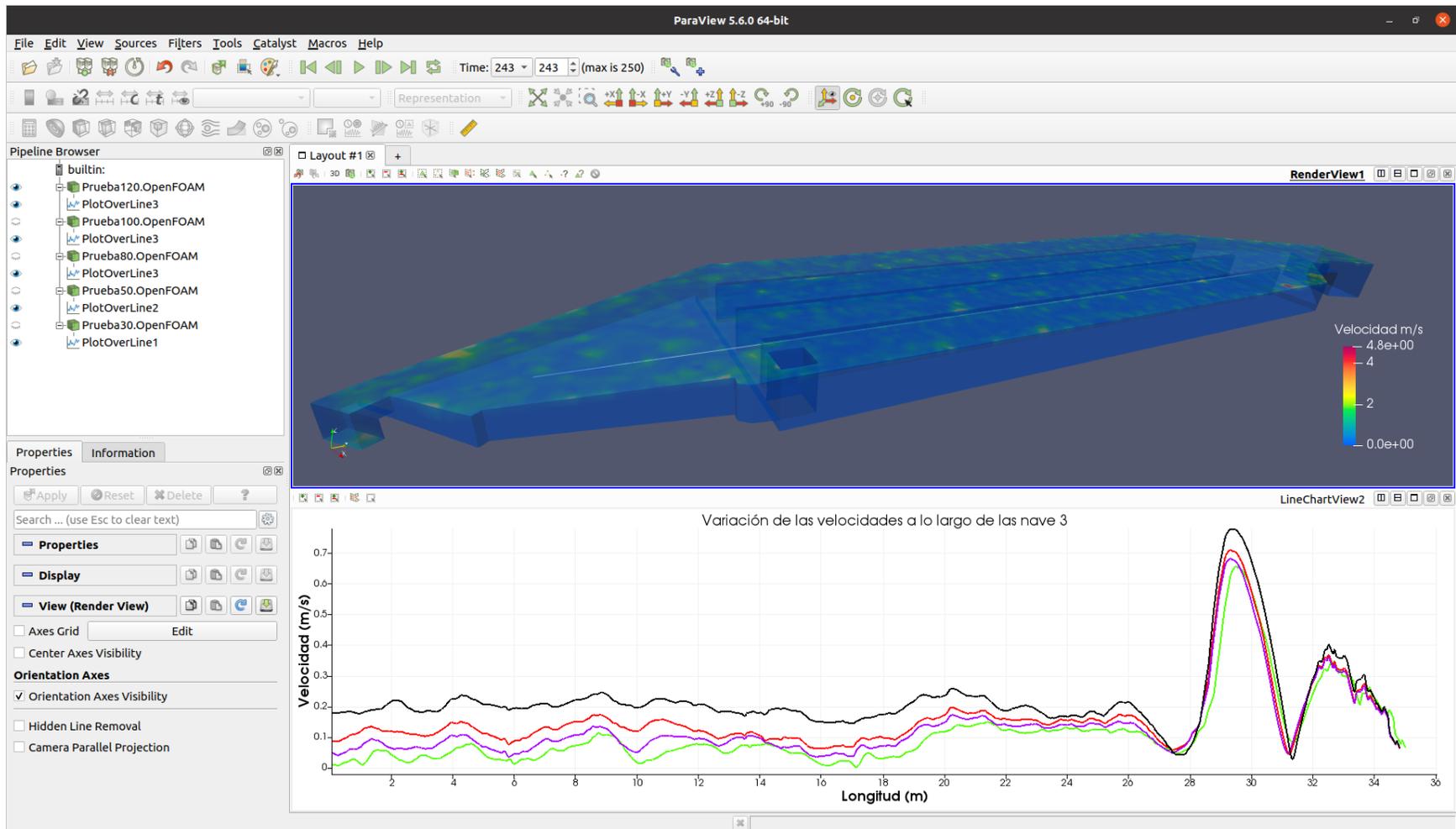


Figura 114. Comparación de las velocidades en la sección 3

Fuente: Elaboración propia.

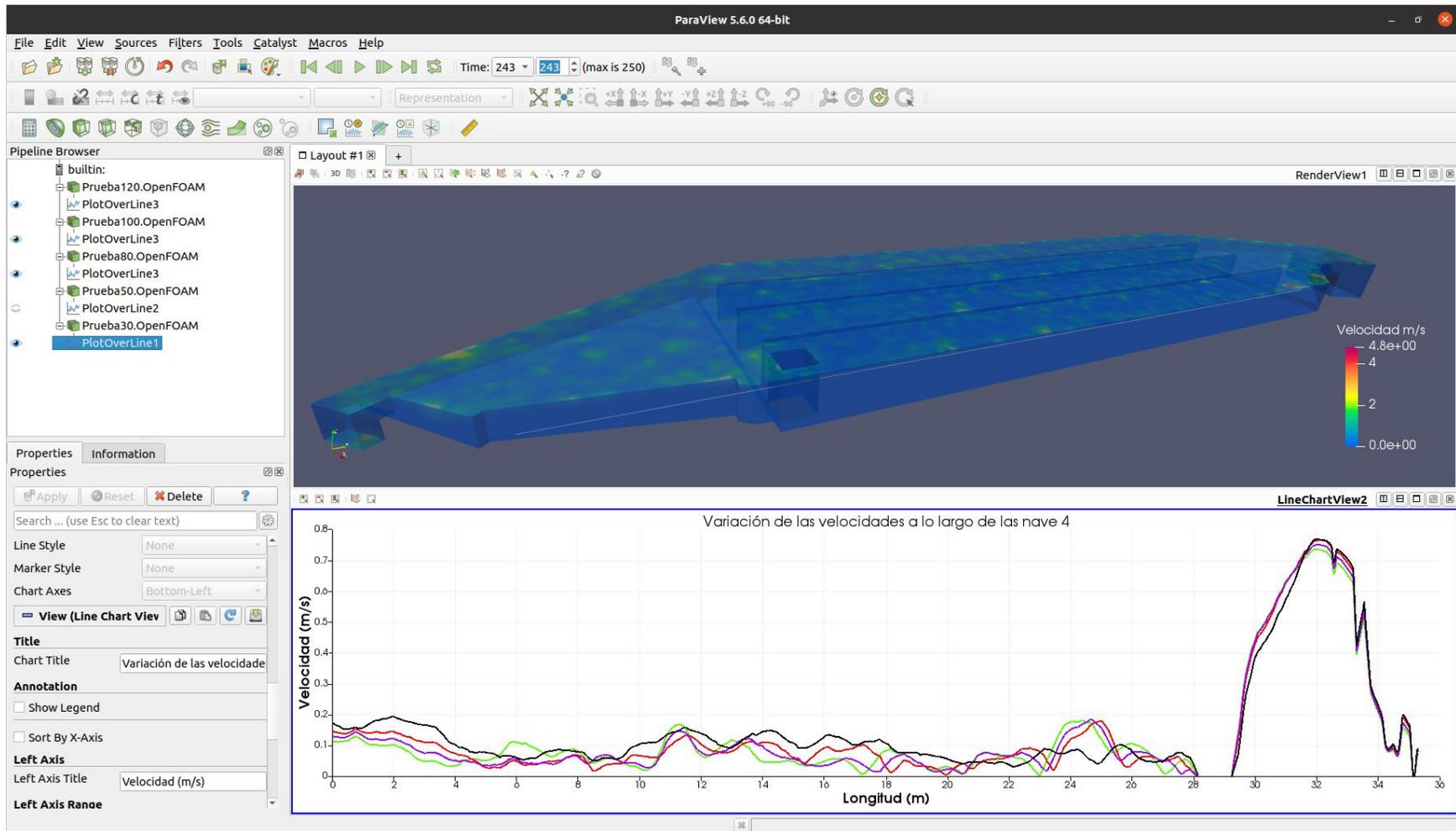


Figura 115. Comparación de las velocidades en la sección 4.

Fuente: Elaboración propia.