

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Cuantificación del transporte de sedimento de fondo uniforme y no uniforme mediante
la modelación en el río La Estrella, Limón

VALERIA MARÍA GÓMEZ MADRIZ

CARTAGO, 2017

Cuantificación del transporte de sedimento de fondo uniforme y no uniforme mediante
la modelación en el río La Estrella, Limón

Valeria María Gómez Madriz

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Isabel Guzmán Arias
Asesor - Lector

Marvin Villalobos Araya
Director Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2017

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico primeramente a Dios y a mi familia por su apoyo incondicional en este proceso.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer primero a Dios por permitirme culminar con esta etapa tan importante en mi vida, a mi mamá María del Pilar Madriz González y a mi papá Rafael Alberto Gómez Cedeño por darme siempre los recursos necesarios en mis estudios, a mi hermano Alexander Alberto Gómez Madriz por apoyarme siempre, a mis abuelitos por su amor incondicional y a todos los profesores por formarme de la mejor manera.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	i
ÍNDICE DE CUADROS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVO GENERAL	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1. Concepto del transporte de sedimento.....	5
3.2. Propiedades del transporte de sedimento.....	9
3.3. Iniciación del transporte de sedimento	9
3.4. Transporte de sedimento uniforme	12
3.5. Ecuación de la carga de fondo	13
3.6. Transporte de sedimento no uniforme	18
3.6.1. Ecuación de Egiazaroff.....	19
3.6.2. Ecuación de Hayashi.....	22
3.6.3. Ecuación de Weiming.....	24
4. METODOLOGÍA	26
4.1. Recolección de información	27
4.2. Análisis de la información.....	28
4.3. Transporte de sedimento uniforme	29
4.4. Transporte de sedimento no uniforme	31

4.5.	Impactos Social, Ambiental y Económico	33
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	34
5.1.	Transporte de sedimento uniforme	37
5.2.	Transporte de sedimento uniforme de distribución para obtener la curva de mejor ajuste.....	46
5.3.	Programa Iber en el transporte de sedimento uniforme.....	54
5.4.	Transporte de sedimento uniforme según las ecuaciones utilizadas	59
5.5.	Transporte de sedimento no uniforme	61
5.6.	Transporte de sedimento no uniforme según las ecuaciones utilizadas	69
5.7.	Transporte de sedimento no uniforme de distribución para obtener la curva de mejor ajuste.....	72
5.8.	Diferencias entre el transporte uniforme y no uniforme de sedimento.	78
6.	IMPACTOS SOCIAL Y AMBIENTAL y económico	82
6.1.	Impacto Social	83
6.2.	Impacto Ambiental	89
6.3.	Impacto Económico.....	94
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
7.1.	Conclusiones.....	100
7.2.	Recomendaciones	101
8.	BIBLIOGRAFÍA	102
9.	ANEXOS	105
	Anexo 1. Demostración en el uso de la ecuación General de Bagnold's para el transporte uniforme.....	106

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tamaño de partículas de sedimento	7
Cuadro 2. Parámetros hidráulicos para diferentes ríos y autores.....	25
Cuadro 3. Ecuación a utilizar según división $(D50)_i$ entre D50, para las ecuaciones (12) y (13) en el sector Vesta.	65
Cuadro 4. Ecuación a utilizar según división $(D50)_i$ entre D50, para las ecuaciones (12) y (13) en el sector Atalanta.....	65
Cuadro 5. Ecuación a utilizar según división $(D50)_i$ entre D50, para las ecuaciones (12) y (13) en el sector Pandora.	65
Cuadro 6. Cuadro comparativo entre ecuaciones con las sumas obtenidas en cada sector	80
Cuadro 7. Coeficiente de correlación entre ecuaciones	81
Cuadro 8. Costo en colones de la remoción de sedimento en el sector Vesta.	97
Cuadro 9. Costo en colones de la remoción de sedimento en el sector Atalanta.....	97
Cuadro 10. Costo en colones de la remoción de sedimento en el sector Pandora.	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Transporte de partículas de en suspensión y de fondo.	7
Figura 2. Fuerzas de la iniciación del transporte de sedimento.	11
Figura 3. Transporte de sedimento según el parámetro de Shields.....	12
Figura 4. Comparación de las ecuaciones de transporte de fondo de Meyer-Peter & Müller y Einstein.	17
Figura 5. Caudal sólido de fondo según el tiempo en distintos afluentes del río La Estrella.	18
Figura 6. Fuerza y distancia entre partículas uniformes.	20
Figura 7. Fuerza y distancia entre partículas no uniformes.	21
Figura 8. Definición de partículas expuestas y ocultas.....	23
Figura 9. Tensión de corte crítico según la fórmula de Hayashi en diferentes ríos.	24
Figura 10. Ubicación de los sectores a analizar.	27
Figura 11. Trampa de sedimento de fondo utilizada.....	28
Figura 12. Perfil transversal de la sección Vesta.	35
Figura 13. Perfil transversal de la sección Atalanta.....	36
Figura 14. Perfil transversal de la sección Pandora	36
Figura 15. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación General de Bagnold´s en el sector Vesta.....	38
Figura 16. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación General de Bagnold´s en el sector Atalanta.	38
Figura 17. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación General de Bagnold´s en el sector Pandora.....	39
Figura 18. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Meyer en el sector Vesta.	39
Figura 19. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Meyer en el sector Atalanta.....	40
Figura 20. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Meyer en el sector Pandora.	40
Figura 21. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Van Rijn en el sector Vesta.	41

Figura 22. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Van Rijn en el sector Atalanta.	41
Figura 23. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Van Rijn en el sector Pandora.	42
Figura 24. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Bagnold en el sector Vesta.	43
Figura 25. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Bagnold en el sector Atalanta.	43
Figura 26. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Bagnold en el sector Pandora.	44
Figura 27. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Yalin en el sector Vesta.	45
Figura 28. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Yalin en el sector Atalanta. Fuente: (elaboración propia)	45
Figura 29. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Yalin en el sector Pandora.	46
Figura 30. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación General de Bagnold´s en el sector Vesta según el diámetro.	47
Figura 31. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación General de Bagnold´s en el sector Atalanta según el diámetro.	47
Figura 32. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación General de Bagnold´s en el sector Pandora según el diámetro.	48
Figura 33. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Meyer en el sector Vesta según el diámetro.	48
Figura 34. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Meyer en el sector Atalanta según el diámetro.	49
Figura 35. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Meyer en el sector Pandora según el diámetro.	49
Figura 36. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Van Rijn en el sector Vesta según el diámetro.	50

Figura 37. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Van Rijn en el sector Atalanta según el diámetro.....	50
Figura 38. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Van Rijn en el sector Pandora según el diámetro.	51
Figura 39. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Bagnold en el sector Vesta según el diámetro.	51
Figura 40. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Bagnold en el sector Atalanta según el diámetro.....	52
Figura 41. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Bagnold en el sector Pandora según el diámetro.	52
Figura 42. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Yalin en el sector Vesta según el diámetro.....	53
Figura 43. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Yalin en el sector Atalanta según el diámetro.	53
Figura 44. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Yalin en el sector Pandora según el diámetro.....	54
Figura 45. Transporte de sedimento mediante Iber (curva azul) y la profundidad de agua (curva rosada).	55
Figura 46. Evolución del calado de agua en el sector Atalanta.	55
Figura 47. Evolución del transporte de sedimento en el sector Atalanta.	56
Figura 48. Transporte de sedimento y calado en el sector Atalanta.	56
Figura 49. Evolución del calado de agua en el sector Pandora.....	57
Figura 50. Evolución del transporte de sedimento en el sector Pandora.	58
Figura 51. Transporte de sedimento y calado en el sector Pandora.	58
Figura 52. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua con las ecuaciones utilizadas para el sector Vesta.....	59
Figura 53 Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua con las ecuaciones utilizadas para el sector Atalanta.	60
Figura 54 Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua con las ecuaciones utilizadas para el sector Pandora.....	60

Figura 55. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la fórmula de Egiazaroff en el sector Vesta.....	61
Figura 56. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la fórmula de Egiazaroff en el sector Atalanta.	62
Figura 57. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la fórmula de Egiazaroff en el sector Pandora.....	62
Figura 58. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la fórmula de Weiming Egiazaroff en el sector Vesta.....	63
Figura 59. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la fórmula de Weiming Egiazaroff en el sector Atalanta.	63
Figura 60. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la fórmula de Weiming Egiazaroff en el sector Pandora.....	64
Figura 61. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Hayashi en el sector Vesta.....	66
Figura 62. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Hayashi en el sector Atalanta.	66
Figura 63. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Hayashi en el sector Pandora.....	67
Figura 64. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Weiming Hayashi en el sector Vesta.....	67
Figura 65. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Weiming Hayashi en el sector Atalanta.....	68
Figura 66. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Weiming Hayashi en el sector Pandora.....	68
Figura 67. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua con las ecuaciones utilizadas para el sector Vesta.....	69
Figura 68. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua con las ecuaciones utilizadas para el sector Atalanta.	70
Figura 69. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua con las ecuaciones utilizadas para el sector Pandora.....	71

Figura 70. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Egiazaroff en el sector Vesta según el diámetro.....	72
Figura 71. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Egiazaroff en el sector Atalanta según el diámetro.	73
Figura 72. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Egiazaroff en el sector Pandora según el diámetro.....	73
Figura 73. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Weiming Egiazaroff en el sector Vesta según el diámetro.	74
Figura 74. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Weiming Egiazaroff en el sector Atalanta según el diámetro.	74
Figura 75. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Weiming Egiazaroff en el sector Pandora según el diámetro.	75
Figura 76. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Hayashi en el sector Vesta según el diámetro.....	75
Figura 77. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Hayashi en el sector Atalanta según el diámetro.	76
Figura 78. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Hayashi en el sector Pandora según el diámetro.....	76
Figura 79. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Weiming Hayashi en el sector Vesta según el diámetro.....	77
Figura 80. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Weiming Hayashi en el sector Atalanta según el diámetro.	77
Figura 81. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Weiming Hayashi en el sector Pandora según el diámetro.....	78
Figura 82. Caudal específico para un periodo de retorno de 25 años	80
Figura 83. Casas de habitación sobre pilotes	83
Figura 84. Distancia de la casa de habitación del río.....	84
Figura 85. Cantidad de personas en el hogar	84
Figura 86. El río ha llegado al hogar.....	85
Figura 87. Hace cuánto tiempo sucedieron las crecidas	85
Figura 88. Tiempo de duración de las crecidas.....	86

Figura 90. Si la familia ha recibido información	87
Figura 91. Quién brindó la información acerca de las inundaciones	87
Figura 92. Daños a causa de las inundaciones	88
Figura 93. Meses del año en que ocurren las inundaciones	88
Figura 94 Volumen del transporte de sedimento según el ancho del río en el sector Vesta	95
Figura 95. Volumen del transporte de sedimento según el ancho del río en el sector Atalanta.....	95
Figura 96 Volumen del transporte de sedimento según el ancho del río en el sector Pandora.....	96

RESUMEN

En este proyecto se analizarán tres sectores pertenecientes al río La Estrella en Talamanca, Limón: Vesta (parte alta), Atalanta (parte media) y Pandora (parte baja). La importancia del proyecto radica en conocer cuál ecuación de cuantificación de transporte de sedimento es la que se adecua mejor a las condiciones del país, en este caso, en el río La Estrella, ya que el tipo de ecuaciones que se han desarrollado hasta el momento, han estado basadas en los diámetros medios en los ríos (D_{50}), es decir, el promedio de todos los tipos de diámetros de sedimentos presentes (sedimento uniforme); por lo que los resultados obtenidos no son lo suficientemente representativos por lo tanto, se consideraría que el río transporta una sola dimensión de diámetro, cuando la realidad es que los ríos arrastran distintos tamaños de diámetro (sedimento no uniforme). El orden descendente con respecto a la cantidad de arrastre de sedimento tanto uniforme como no uniforme es Atalanta, Pandora y Vesta. En condiciones uniformes; el diámetro de mayor tamaño representa menor transporte de sedimento; mientras que en las condiciones no uniformes si es considerable la cantidad de arrastre de sedimento por unidad de ancho con diámetros de mayor tamaño.

Palabras clave: Transporte de sedimento, río La Estrella, diámetros

ABSTRACT

This project will analyze three sectors belonging to the La Estrella river in Limón: Vesta (upper part), Atalanta (middle part) and Pandora (lower part). The importance of the project lies in which equation is the one that is best suited to the conditions of the country. In this case, in the river La Estrella, since the type of formulations that have been developed so far, are taking into account only the average diameters in the rivers (D50), that is, the average of all types of diameters present; so the results obtained are deficient.

Therefore, it would be considered that the river carries a single dimension of diameter, knowing for sure that the rivers carry different type, this the importance of knowing what the actual diameters actually are. The ascending order with respect to the amount of both uniform and non-uniform sediment trawling is Atalanta, Pandora and Vesta. Under uniform conditions; the larger diameter represents less transport while in the non-uniform conditions if the amount per unit of transport width for this type of diameters is considerable.

Key Words: Sediment transport, La Estrella river, diameters

INTRODUCCIÓN

Las acciones realizadas por el hombre y las acciones propias de la naturaleza provocan un desequilibrio en el entorno, la disgregación y transporte de partículas por acción del agua de forma natural o por el uso intensivo de las tierras agrícolas han acelerado la erosión hídrica debido a labores como: la deforestación y la contaminación, cambios biológicos y químicos para la supervivencia en las condiciones actuales, provocan pérdidas en la conservación del suelo importantes, los cuales, estas pérdidas llegan hasta los ríos; consecuentemente la producción, transporte y deposición de los sedimentos constituyen uno de los aspectos más importantes en la evaluación, análisis y control, evitando catástrofes esenciales en el futuro; siendo estos imprescindibles en la planificación, diseño y funcionamiento de una cuenca con métodos modernos para el control de los mismos.

Dentro de los componentes esenciales de un río son las partículas sólidas, de mayor tamaño, arrastradas a lo largo del lecho de la corriente y se designan con el nombre de arrastre de fondo; y en suspensión, los cuales representan la fracción de partículas más finas mantenidas en suspensión y son arrastradas por los remolinos de las corrientes. Estos estudios son importantes para la comprensión de muchos problemas ambientales apremiantes, incluyendo el transporte de contaminantes, la erosión del lecho de sedimentos, la sedimentación y la eliminación de desechos. El sedimento en sí, es importante para la calidad del agua y los procesos de eutrofización debido a su influencia en la densidad, la penetración de luz y la disponibilidad de nutrientes.

Estudios recientes se han desarrollado en países de Norteamérica, comúnmente, tomando en cuenta el transporte de sedimento uniforme, utilizando distintas ecuaciones, según autores que han propuesto de datos experimentales. Los procedimientos obtenidos por las ecuaciones convencionales, son incapaces de ser precisas en la predicción de la descarga de sedimentos de fondo uniformes y no uniformes. En Costa Rica, se han realizado estudios en ríos como La Estrella, obteniendo herramientas de prevención y diseño en la capacidad de preparar a la población involucrada directamente ante posibles inundaciones que afectan su desarrollo cotidiano; y en el río Pacuare, utilizando los resultados para fines hidroeléctricos promoviendo la producción energética sostenida.

Con esto, los resultados arrojados por este tipo de herramientas ayudan a la toma de decisiones futuras para mitigar los problemas provocados por este fenómeno.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Cuantificar el transporte de sedimento de fondo uniforme y no uniforme mediante la modelación en el río La Estrella, Limón

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar el transporte de sedimento uniforme mediante cinco ecuaciones distintas.
- Comparar los resultados obtenidos con las ecuaciones del transporte de sedimentos de fondo uniforme y la utilizada por el modelo IBER.
- Cuantificar el transporte de sedimentos no uniforme mediante distintas ecuaciones.
- Analizar el beneficio social, ambiental y económico de determinar la capacidad de transporte de sedimentos del río.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Concepto del transporte de sedimento

El transporte de sedimento en un río proviene de las partículas que se desprenden de las rocas que se encuentran en él y a los alrededores del mismo, este sedimento consta de diferentes tamaños de partículas y el río es capaz de arrastrarlas en el agua (sedimento en suspensión) o en el fondo (sedimento de fondo).

Según Zhen Gang (2008), “El sedimento consiste en partículas de todos los tamaños que se derivan de rocas o materiales biológicos. Los sedimentos pueden ser suspendidos en una columna de agua o asentarse y acumularse en el fondo de un cuerpo de agua. El transporte de sedimentos es simplemente el proceso de erosionar el sedimento de un lugar, transportarlo en el flujo y depositarlo en otro lugar. La erosión ocurre cuando la tensión de cizallamiento aplicada al lecho de sedimento excede un valor crítico del esfuerzo cortante y a deposición tiene lugar cuando se sobrepasa la capacidad de transporte del flujo”.

El transporte de sedimento, también conocido como arrastre de sedimento se presenta cuando el cauce del río es capaz de conducir el material existente en él a distintas partes alrededor del río, una parte puede estacionarse en la cobertura vegetal, otra puede seguir su curso de manera que se deposite en valles o almacenamientos. Cuando el transporte de suelo se da, el suelo es erosionado, el cual, al acumularse en las partes bajas de los ríos, estos últimos pierden capacidad hidráulica de transporte del fluido, provocando problemas, debido a su disminución del área hidráulica. El principal problema que causa el sedimento cuando es transportado por el agua, es su acción abrasiva en altas velocidades; esto obliga a la eliminación de estructuras hidráulicas, como canales revestidos y plantas hidroeléctricas, por medio de tomas especiales y tanques desarenadores. Universidad Nacional Autónoma de México (2014).

El transporte de sedimento se puede dividir en dos tipos: arrastre de fondo y transporte en suspensión, donde el arrastre de fondo contiene 3 fases:

- Deslizamiento
- Rodamiento
- Saltación

Además Zhen Gang (2008), menciona que los sedimentos se asientan en el fondo de los cuerpos de agua o se suspenden en columnas de agua. Los sedimentos suspendidos son comúnmente transportados por el flujo. Proviene de la erosión del suelo o de la descomposición de plantas y animales. En este sentido, los sedimentos están al final del camino para los materiales naturales y antropogénicos y están en la raíz de los problemas de sedimentos contaminados.

El transporte en suspensión, es aquel durante el cual las partículas de sedimento son difundidas en la totalidad de la columna de agua, teniendo un infrecuente contacto con el lecho. El transporte de fondo, en contraposición, es aquel durante el cual las partículas de sedimento transportadas por el flujo se mantienen en frecuente contacto con el lecho. El movimiento de estas partículas ocurre fundamentalmente en tres fases distintas mencionados anteriormente donde la saltación es el predominante. Novoa (2016).

Se ha demostrado que el movimiento de las partículas de sedimento de fondo no puede describirse por la teoría de la suspensión. La razón es que las partículas allí no son "suspendidas" por el fluido, se acomodan en la base del lecho. Esto no implica, sin embargo, que ya no se muevan; significa que, mientras se mueve, su peso está soportado por el lecho no móvil y no por el fluido. Por consiguiente, se mueven rodando y deslizándose sobre la cama o haciendo saltos cortos más o menos continuamente. El movimiento de carga de la cama se ha estudiado principalmente en los canales de laboratorio bajo condiciones en las que la suspensión puede ser descuidada. Einstein (1950).

En la siguiente Figura se muestran las fases del transporte de sedimento de fondo, así como de suspensión

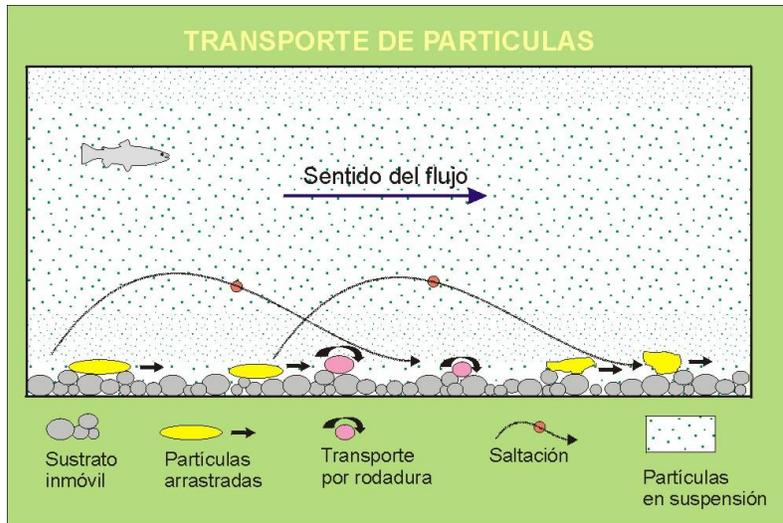


Figura 1. Transporte de partículas de en suspensión y de fondo.
Fuente: Collinson (2006).

A pesar de que los diferentes esquemas de clasificación pueden dar rangos ligeramente diferentes, la siguiente Figura es relativamente consistente con las interpretaciones geológicas y de ingeniería. Como se muestra, el rango de tamaños de sedimentos es grande, cubriendo varias órdenes de magnitud. La grava se conoce generalmente como partículas con un tamaño entre 2,0 y 20,0 mm de diámetro. La arena se denomina partículas con un tamaño entre 0,06 y 2,0 mm. Esta categoría se puede dividir también en muy grueso, grueso, medio, fino, muy fino, y así sucesivamente. En términos prácticos, la arena muy fina es aproximadamente el tamaño de grano más pequeño que todavía se puede ver a simple vista. El limo se clasifica como partículas con un tamaño entre 0,0039 y 0,06 mm. La arcilla se denomina partículas con un tamaño <0,0039 mm; Zhen-Gang (2008).

Cuadro 1. Tamaño de partículas de sedimento

Tipo	Rango de tamaño (mm)
Grava	2,0-20,0
Arena	0,06-2,0
Limo	0,0039-0,06
Arcilla	<0,0039

Fuente: (Zhen-Gang, 2008)

Además, Zhen-Gang (2008), menciona que, los sedimentos también pueden clasificarse como cohesivos o no cohesivos. Un modelo conceptual de los procesos de transporte de sedimentos describe donde se hace una distinción entre sedimentos cohesivos y no cohesivos. "Cohesivo" se refiere al sedimento en el cual el enlace entre partículas es principalmente un resultado de las atracciones físico-químicas entre las partículas. A diferencia de las partículas no cohesivas, las partículas cohesivas están sujetas a las fuerzas de unión entre partículas que son significativas cuando se comparan con la fuerza gravitatoria. Estas fuerzas permiten que el sedimento cohesivo esté sujeto a la floculación. También el mismo autor menciona que: "Las partículas de sedimento cohesivo son pequeñas y se adhieren entre sí como agregados de cientos o miles de partículas, mientras que las partículas de sedimento no cohesivas son generalmente de mayor diámetro y las partículas son fácilmente separables. Se explica además que, debido a la consolidación y compactación del sedimento, la densidad del lecho (especialmente para el sedimento cohesivo) aumenta gradualmente con la profundidad, las arcillas son cohesivas y tienen una alta capacidad de absorción, mientras que las arenas no son cohesivas y no tienen esencialmente capacidad de absorción. Las partículas de arcilla tienen un tamaño $<0,0039$ mm, debido a que son pequeñas, la arcilla tiene una gran superficie comparada con su volumen y es altamente vulnerable a los contaminantes. Por otra parte, el tamaño de la arena está en el intervalo de 0,06 a 2,0 mm; a este tamaño, la fuerza de gravedad que actúa sobre los granos de arena individuales empequeñece las fuerzas de atracción superficial entre esos granos de arena. Los granos de arena (excepto los granos de arena muy finos) no son cohesivos y generalmente no se adhieren entre sí. Las partículas de sedimento son intermedias entre arena y arcilla. Las partículas de sedimento permanecen en suspensión más largo tiempo que los granos de arena y pueden presentar propiedades cohesivas y no cohesivas, dependiendo de su tamaño de partícula y composición. Una mezcla acuosa de arcilla y limo es a menudo llamado barro, que está compuesto por pequeñas cantidades de arena y material orgánico. El barro presenta fuertes propiedades cohesivas debido a las grandes fuerzas de atracción superficial entre las partículas"

3.2. Propiedades del transporte de sedimento

Según Zhen-Gang (2008), los sedimentos son generalmente una matriz de materiales y consisten en cuatro propiedades principales:

- Agua intersticial: El mayor volumen está ocupado por agua intersticial, que llena el espacio entre las partículas de sedimento.
- Sedimentos inorgánicos: La fracción inorgánica (limos, arcillas, etc.) incluye los fragmentos de roca y cáscara y los granos minerales que resultan de la erosión natural de los materiales terrestres.
- Sedimento orgánico: La fracción orgánica (algas, zooplancton, bacterias, detritos, etc.) normalmente ocupa un volumen bajo, pero es un componente importante del sedimento porque puede regular la sorción y la bioavalibilidad de muchos contaminantes.
- Contaminantes: Los contaminantes ligados a sedimentos, tales como nutrientes, bifenilos policlorados (PCB) y metales pesados, son una porción muy pequeña en volumen, pero a menudo son cruciales para los estudios de transporte de contaminantes y calidad del agua

3.3. Iniciación del transporte de sedimento

El movimiento de partículas se producirá cuando la fuerza instantánea sobre una partícula es mayor que la fuerza de resistencia instantánea relacionada con el peso de la partícula sumergida, la fuerza de fricción y las fuerzas cohesivas son importantes cuando el lecho está constituido en cantidades de partículas de limo. Las fuerzas motrices están fuertemente relacionadas con las velocidades locales cercanas al lecho. Van Rijn (1993).

Con respecto a las partículas en suspensión y deposición, Zhen-Gang (2008), menciona textualmente: “Una vez en suspensión, los sedimentos tenderán a sedimentarse a una velocidad determinada por la concentración de sedimento, la velocidad de sedimentación y la intensidad de turbulencia. La deposición de sedimentos es un proceso mediante el cual los sedimentos en suspensión abandonan temporalmente o permanentemente la columna de

agua y forman parte de los sedimentos del fondo. El estrés de cizallamiento crítico para la deposición de sedimentos no cohesivos es sólo ligeramente menor que el de la erosión. Una partícula no cohesiva se instala en el lecho casi tan pronto como el esfuerzo cortante es demasiado pequeño para erosionarlo, mientras que un sedimento cohesivo se deposita de manera muy diferente. El esfuerzo de cizallamiento crítico para la deposición de sedimentos cohesivos puede ser mucho menor que el de la erosión. Un análisis preciso requiere una experimentación in situ para determinar los valores de la tensión de cizallamiento críticos y otros parámetros que controlan el transporte de sedimentos. La probabilidad de deposición depende del esfuerzo de cizallamiento del fondo, del tamaño del sedimento suspendido y de la cohesividad del sedimento. Para ser depositadas, las partículas deben superar las resistencias debidas a la turbulencia en la columna de agua, las resistencias debidas a la capa fina viscosa en la interfase y las resistencias debidas a la actividad química o biológica después de alcanzar el fondo. La tasa de deposición puede estimarse como el producto de la velocidad de sedimentación y la probabilidad de deposición en contacto con el lecho”. En la

Uno de los conceptos más importantes con respecto a la iniciación del transporte de sedimento es el esfuerzo cortante crítico, el cual según Van Rijn (1993), lo define “La fuerza de fricción actúa sobre la superficie de las partículas por medio de un cizallamiento viscoso, la fuerza de presión que consiste en un esfuerzo de fricción de la superficie. Las fuerzas que actúan sobre una superficie de sedimento que descansa sobre una superficie de lecho horizontal se representan en la siguiente figura. El ángulo de reposo se define como el ángulo entre la superficie de la partícula, línea a través del centro de la partícula y el punto de contacto y la línea a través del centro de la partícula normal a la superficie del lecho El movimiento de la partícula ocurrirá cuando los momentos de las fuerzas fluidas instantáneas F_o y F con respecto al punto de contacto son apenas más grandes que el Momento de estabilización del peso de partícula sumergido”.

La siguiente Figura explica la descripción anterior.

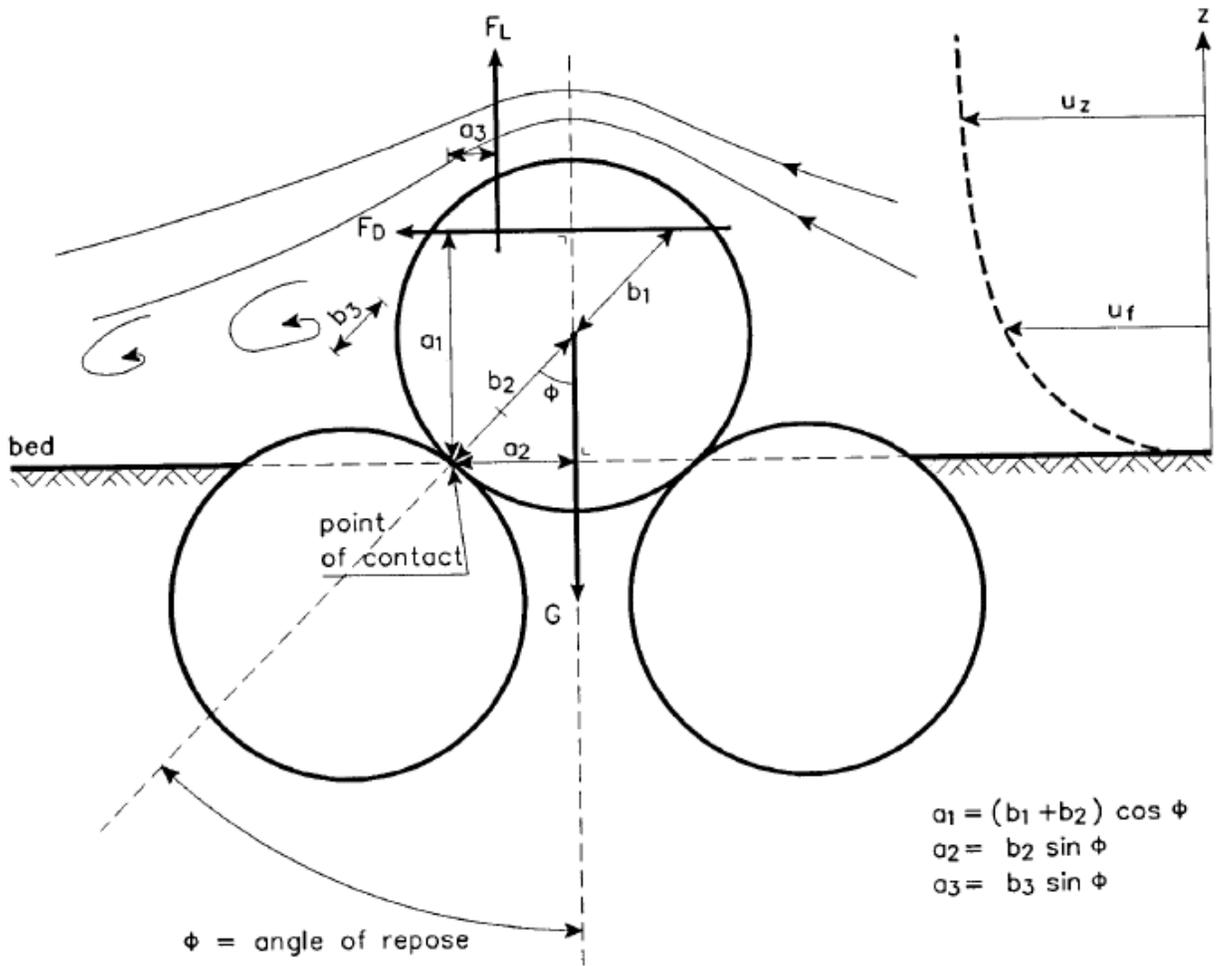


Figura 2. Fuerzas de la iniciación del transporte de sedimento.
 Fuente: (Van Rijn, 1993)

En la Figura 3 se muestra el transporte de sedimento según el parámetro de Shields

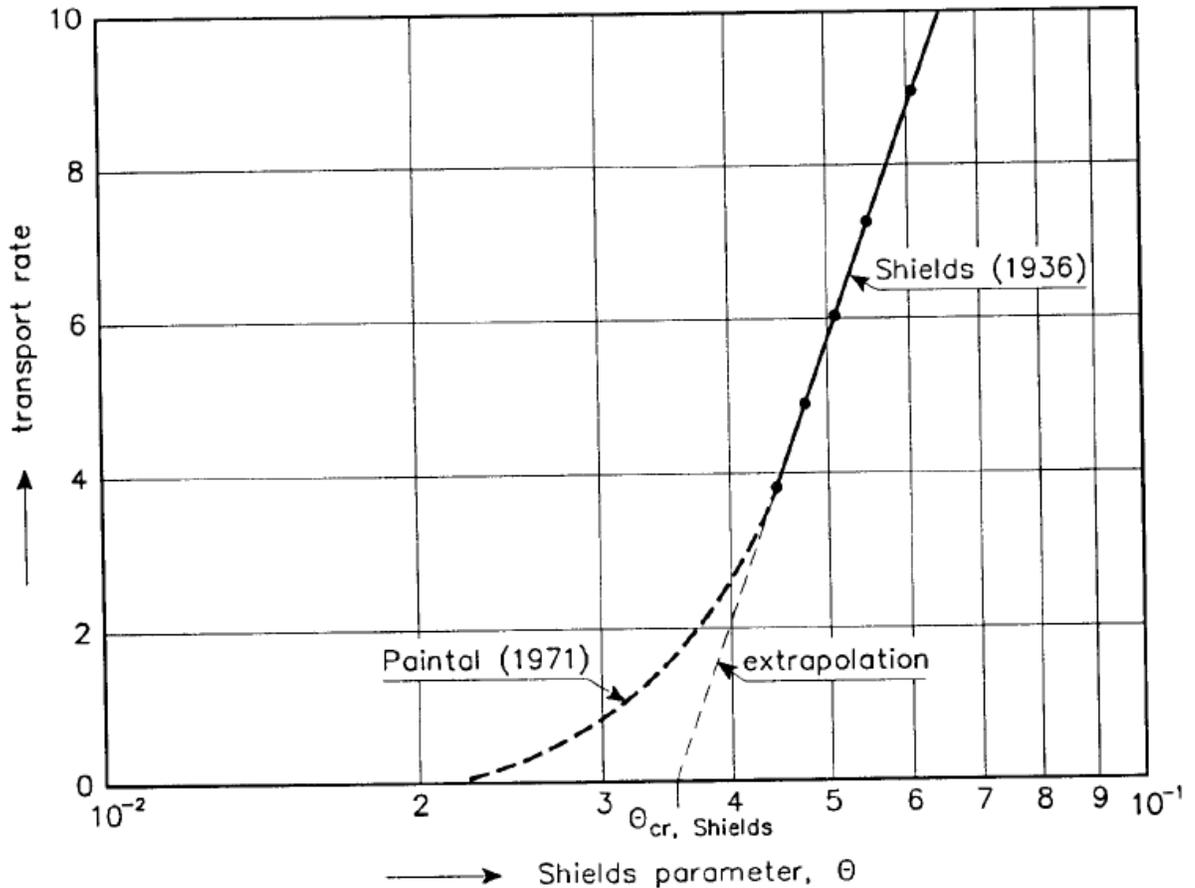


Figura 3. Transporte de sedimento según el parámetro de Shields.

Fuente: (Shields, 1936)

Como se mencionó anteriormente hace falta información experimental acerca de la estimación del transporte de partículas como grava y partículas finas, que permitan conocer la hidrodinámica fluvial de los ríos, sin embargo, a continuación, se hablará sobre las variables que se han utilizado al calcular el transporte de sedimento uniforme, así como nuevos parámetros a la hora de calcular el transporte de sedimento no uniforme.

3.4. Transporte de sedimento uniforme

Existen diferentes autores que muestran sus ecuaciones según procesos experimentales, se explicará detalladamente cuales son esos parámetros.

Según Yalin (1963), existen tres aspectos importantes cuando se habla del transporte de sedimento:

- Uso riguroso del análisis dimensional para simplificar la ecuación matemática.
- Una consideración de la aleatoriedad de la colocación del grano en lugar de la turbulencia, resultando en un umbral definible de movimiento.
- La introducción de un modelo dinámico, físicamente basado, de la saltación del grano en una teoría del transporte de la carga de la cama, es decir, carga de fondo.

Los sedimentos no cohesivos, generalmente arena y otro material granular, son los materiales de interés para muchas camas y bancos de ríos y lagos. Además, estos materiales pueden constituir también el grueso de la masa en el lecho, que es usualmente el componente principal del transporte total de la masa sólida. Las propiedades importantes de los sedimentos no cohesivos incluyen (1) tamaño de partícula, (2) forma y (3) gravedad específica. El tamaño de partícula es la propiedad de sedimento más significativa de los sedimentos no cohesivos. Frecuentemente, el tamaño de partícula solo se utiliza para caracterizar una partícula de sedimento. Los sedimentos no cohesivos típicamente incluyen grava, arena y algo de cieno. Generalmente se encuentran en las costas abiertas, en las entradas de marea y en los tramos superiores del cauce fluvial, donde hay flujo de alta velocidad. Los procesos hidrodinámicos a menudo controlan los comportamientos del sedimento no cohesivo en el agua. Gran parte de la literatura clásica sobre el transporte de sedimentos se ha ocupado de sedimentos no cohesivos. También se han propuesto numerosas fórmulas empíricas para describir cuantitativamente los comportamientos de los sedimentos, especialmente para las estimaciones de la concentración de equilibrio y el transporte de la carga de lecho.

3.5. Ecuación de la carga de fondo

La ecuación de carga de fondo por definición, según Einstein (1950), es la ecuación que relaciona el movimiento del material de lecho por unidad de ancho. Esta ecuación debe expresar el equilibrio de la condición del intercambio de partículas de lecho entre la capa de lecho y la cama. Para cada unidad de tiempo y área de cama el mismo número de un tipo y tamaño de partículas dado, debe ser depositado en el lecho.

Para expresar la velocidad a la que un determinado tamaño de partículas de sedimento es depositado en el área del lecho unitario por unidad de tiempo, sea q_B igual a la tasa en la que la carga del lecho se mueve a través de la anchura unitaria de la sección y i_B sea igual a la fracción de q_B en un determinado tamaño de grano o rango de tamaño. Así $q_B i_B$ es la velocidad a la cual el tamaño dado se mueve a través del ancho de la unidad por unidad de tiempo. Todas las partículas con un diámetro D particular están simplemente realizando una etapa individual de $100 D$ o, más generalmente, de $A_L D$ longitud. Cuando pasan a través de la sección transversal particular donde q_B se mide, sin embargo, no se sabe qué parte de $A_L D$ las partículas individuales ya han viajado. Deben asumirse para ser depositada en cualquier lugar de cero a $A_L D$ aguas abajo de la sección.

Agrega Einstein (1950), si q_B es medido en peso seco por unidad de tiempo y ancho y si $A_2 D^3$ es el volumen de una partícula, σ_s su densidad, y g la aceleración de la gravedad; el número de tales partículas depositadas por unidad de tiempo en la unidad. El área del lecho puede expresarse como:

$$\frac{q_B i_B}{A_L D A_2 D^3 \sigma_s g} = \frac{i_B q_B}{A_2 A_L g \sigma_s D^4}$$

Además Parker (2009), menciona que las relaciones entre las ecuaciones, tanto de Einstein (1950) como de Yalin (1963), tienen la ventaja de ser dimensionalmente homogéneos, sin embargo, Yalin utilizó los principios del análisis dimensional a una mayor ventaja que Einstein. En un campo en el que todavía no es posible determinar que rigen las relaciones puramente con consideraciones teóricas dimensionales, proporciona una poderosa guía sobre cómo mezclar más eficazmente la teoría de la mecánica de fluidos y el uso informado de los datos empíricos. Los parámetros pertinentes de las ecuaciones adimensionales son:

$$q^* = f(\tau^*, Re_p, \hat{H}, R)$$

Donde:

$$\hat{H} = \frac{H}{D}$$

Denotado, H la profundidad del agua; Re_p representa el número de Reynolds

Según Parker (2009), dos puntos de referencia imprescindibles en el desarrollo predictivo de los métodos de transporte de carga en ríos son la publicación de la relación de carga de Meyer-Peter & Müller (1948) y la de Einstein (1950). Ambas relaciones permanecen en uso a partir de 2008.

Según Bagnold (1956):

$$\phi = \varphi_2(\tau^* - \tau_c^*)(\sqrt{\tau^*} - \gamma\sqrt{\tau_c^*})$$

Donde γ es constante y φ_2 está en función de $(\tau^* - \tau_c^*)$.

Según Van Rijn (1993) la formulación utilizada se representa:

$$\phi = \frac{0,053}{R_d^{\frac{1}{5}}} \left(\frac{\tau^* - \tau_c^*}{\tau_c^*} \right)^{2,1}$$

Siendo R_d el número de Reynolds.

Las variables más comunes que se utilizan en las dos ecuaciones son: sea D un tamaño de grano característico, ρ_s la densidad material del sedimento, ρ la densidad de agua, q_b el volumen de carga por unidad de ancho, u_* la velocidad de corte del flujo, y g la aceleración gravitacional. Estos parámetros dimensionados puede usarse para definir dos parámetros adimensionales, es decir, el número de Einstein (denotado originalmente como ϕ en Einstein (1950), y también denotado en Yalin (1963).

$$\phi = \frac{q_b}{\sqrt{RgD} * D}$$

Tomando en cuenta que:

$$R = \frac{\rho_s}{\rho} - 1$$

Además, el número de Shields τ^* modificación realizada a partir de Einstein (1950) y Yalin (1963).

$$\tau^* = \frac{u_*^2}{RgD}$$

La ecuación del transporte de sedimento según Meyer-Peter & Müller (1948) es:

$$\phi = 8(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2}$$

Se ha denotado un valor crítico llamado “iniciación del transporte de carga”, sin embargo cabe señalar que Meyer-Peter y Müller no pretendieron un valor de τ_c^* para

representar un verdadero umbral para el movimiento de carga, sino que lo utilizaron como un parámetro constante para delinear su ecuación.

La ecuación de Meyer-Peter & Mülle (1948), representa un avance significativo por las siguientes razones:

- La base de datos para su ecuación, que incluía la comprende una parte sustancial de los datos de mayor calidad disponibles en el tiempo.
- El análisis de los datos que resultó en la ecuación representa un ejemplo de cuidado preciso, estableciendo que muchas veces no se cumple hoy

La ecuación, que resultó a partir de una fusión de datos informados de análisis y teorías tomando consideraciones técnicas basadas en la mecánica, contiene todas las ecuaciones anteriores para ser dimensionalmente homogénea.

En experimentos realizados años anteriores, según Einstein (1950), ha demostrado que el movimiento de las partículas del lecho se rige por leyes estadísticas que son: 1. La probabilidad de que una determinada partícula de sedimento se mueva además el flujo de la superficie del lecho depende del tamaño, forma, el peso y en el patrón de flujo cerca de la cama. 2. La partícula se mueve si la elevación hidrodinámica instantánea, o sea, la fuerza supera el peso de la partícula. 3. Una vez en movimiento, la probabilidad de que la partícula se vuelva a depositar es igual en todos los puntos del lecho donde el flujo local no retire inmediatamente la partícula de nuevo. 4. La distancia media recorrida por cualquier partícula de carga de lecho entre puntos de deposición consecutivos en el lecho es una constante para cualquier partícula y es independiente de la condición de flujo, la velocidad de transporte y la composición del lecho.

La siguiente Figura muestra un gráfico de los datos, que se comparan con las relaciones originales de Meyer-Peter & Müller (1948), Einstein (1950) y otro autor. Donde se puede observar que todas estas relaciones predicen valores de q_b^* altos en comparación con los datos. Las tres relaciones pueden ser llevadas a ser ajustadas, en las cuales, las ecuaciones para el valor predicho de q_b^* se reduce a la mitad en cada caso.

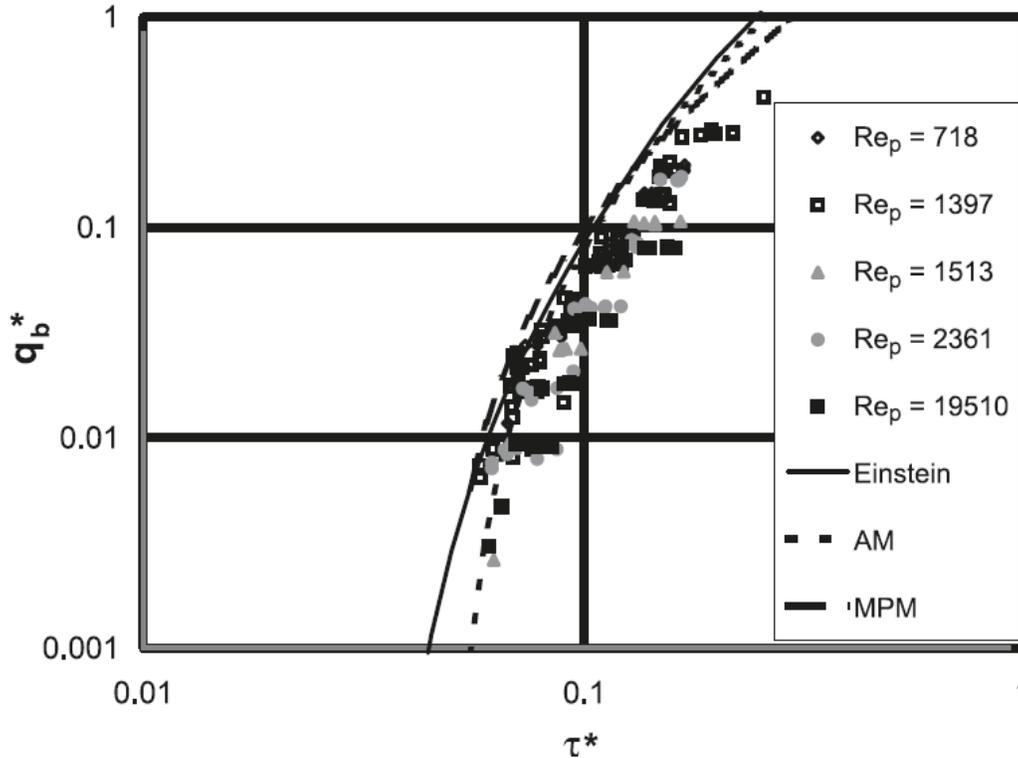


Figura 4. Comparación de las ecuaciones de transporte de fondo de Meyer-Peter & Müller y Einstein.
Fuente: (Parker, 2009)

Según Guzmán, Watson, Villagra y Casasola (2017), en Costa Rica, específicamente en el río La Estrella se ha analizado el transporte de sedimento uniforme, tanto en suspensión como de fondo para un periodo de retorno igual a 25 años, mediante el programa Iber, el cual trabaja con una sola dimensión de diámetro en sus ecuaciones a lo largo del río; como resultado se obtuvo que la capacidad de arrastre disminuye conforme desciende la pendiente, es decir, en Vesta (parte alta) presenta mayor capacidad de transporte, mientras que en Pandora es menor esta capacidad. En la siguiente figura se muestra cómo fue el comportamiento del caudal sólido de fondo en los afluentes: Niñey, Pandora, Atalanta y Vesta.

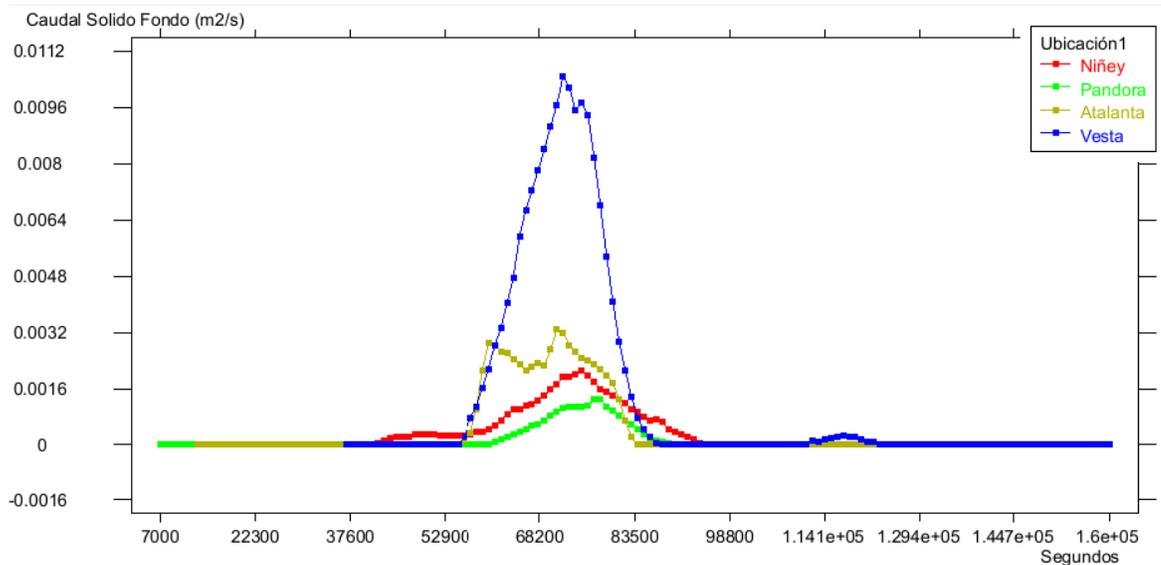


Figura 5. Caudal sólido de fondo según el tiempo en distintos afluentes del río La Estrella.
Fuente: (Guzmán et al., 2017)

Aunado a esto, como resultado de este estudio en el río La Estrella, se permitió identificar 9 puntos en sus alrededores de riesgo de inundación, además de observar los puntos de erosión y deposición del material arrastrado a lo largo del río, lo cual se puede decir que como resultado se intensifica los efectos de las crecidas que han presentado en años anteriores. Guzmán, et al (2017).

3.6. Transporte de sedimento no uniforme

El transporte de sedimento no uniforme contempla la mezcla de distintos tamaños de diámetros en un cauce, característica propia de los ríos en Costa Rica. A continuación, se explicarán las ecuaciones y en qué condiciones se utilizan, según los parámetros que se necesitan. La mayoría de autores muestran este transporte mediante fracciones del material presente en el cauce.

El efecto de la no uniformidad del material del lecho muestra como resultado en los procesos de transporte selectivos estudiando por Einstein (1950), Meyer-Peter y Müller (1948) y otros autores. En general, el enfoque consiste en dividir el material del lecho en un número de fracciones de tamaño y aplicar una fórmula existente para la fracción de tamaño de diámetro con un factor de corrección (E) para dar cuenta de los efectos de la no uniformidad. La corrección es necesaria porque las partículas están más expuestas al flujo de

las partículas más finas, que están protegidas por las partículas más gruesas; esto puede ser efectuado por el incremento de la tensión de cizallamiento crítico de las partículas más finas y disminuir el valor crítico de las partículas gruesas. Van Rijn (1993).

Según Aguirre, Moncada, y Olivero (2002), el material que transporta un río es usualmente más fino que el material madre, proveniente de la capa superficial del lecho, algunas fórmulas de transporte por fracciones aplican las relaciones funcionales para cada D_i , según cual sea su proporción y luego suman cada fracción del transporte, sin embargo, se desconocen estas distribuciones, ya que el fraccionamiento del material transportado, no es conocido, siendo este diferente al material del lecho. Si se considera la unidad de volumen del material de fondo la fracción volumétrica P_i puede convertirse en una fracción de área P_{ai} , según la expresión:

$$P_{ai} = \frac{\frac{P_i}{D_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{D_i}}$$

3.6.1. Ecuación de Egiazaroff

El modelo de Egiazaroff para el arrastre de sedimentos de partículas se examinó utilizando la geometría esférica de grano. Como resultado, las fuerzas de elevación que actúan sobre el grano se asumieron en su modelo de transporte de sedimento. Esta suposición, sin embargo, no ha sido mencionada por otros investigadores. Los valores teóricos del parámetro de Shields de Egiazaroff también muestra que son considerablemente similares a los valores empíricos del parámetro Shields, derivado del análisis utilizando datos de campo para el lecho con materiales gruesos, en la proximidad de tamaño uniforme (es decir, $D_i/D_r < 2,5$ mm, donde D_i es el diámetro de un grano arbitrario en una mezcla no uniforme y D_r es el tamaño determinando la rugosidad del canal) Egiazaroff (1965).

En la Figura 6 se muestra el efecto de la velocidad U_d , aplicando una distancia $y=0,63D$ (donde “y” es la distancia de la pared), y cuando el grano ha perdido el contacto con el lecho y sigue moviéndose transversalmente con la corriente de fluido.

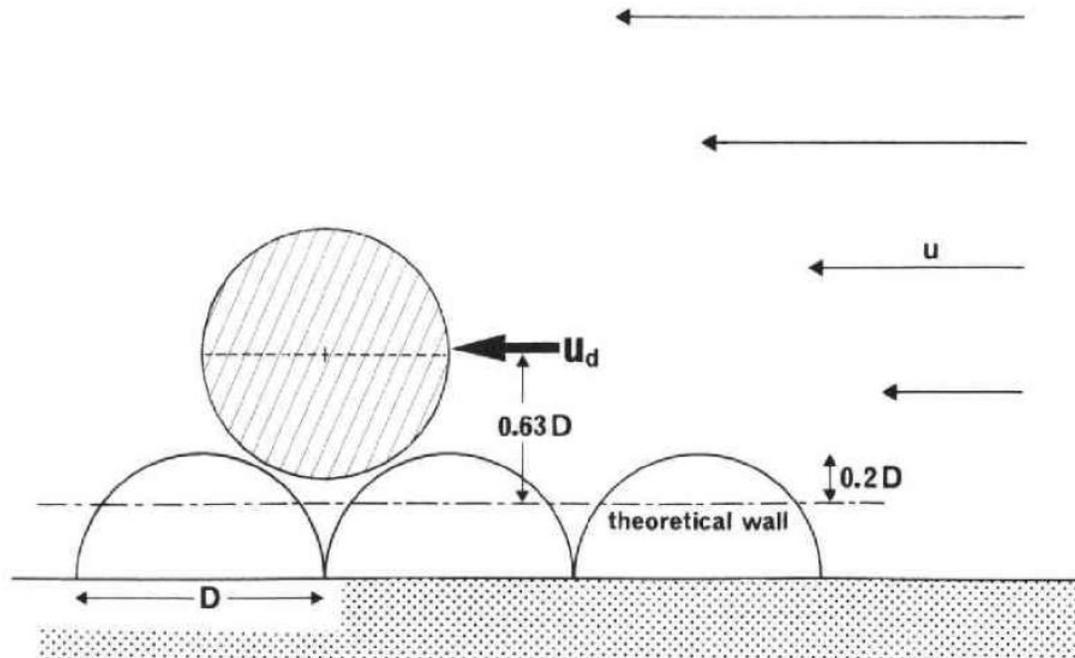


Figura 6. Fuerza y distancia entre partículas uniformes.
Fuente: (Egiazaroff, 1965)

En la Figura 7 se muestra la suposición de umbral de Egiazaroff en su modelo es que $U_d = w$ para el grano de arrastre. Por lo tanto, las fuerzas verticales de elevación que actúan sobre el grano no son incluidas aparentemente en el modelo físico de Egiazaroff. En su modelo, sin embargo, las partículas de sedimento ya han sido suspendidas en el fluido por la fuerza de elevación. El grano ha perdido contacto con el lecho. Finalmente, el significado físico del umbral de Egiazaroff para el arrastre de grano es que las fuerzas superan el peso sumergido del grano, esta última descripción se representa con W' .

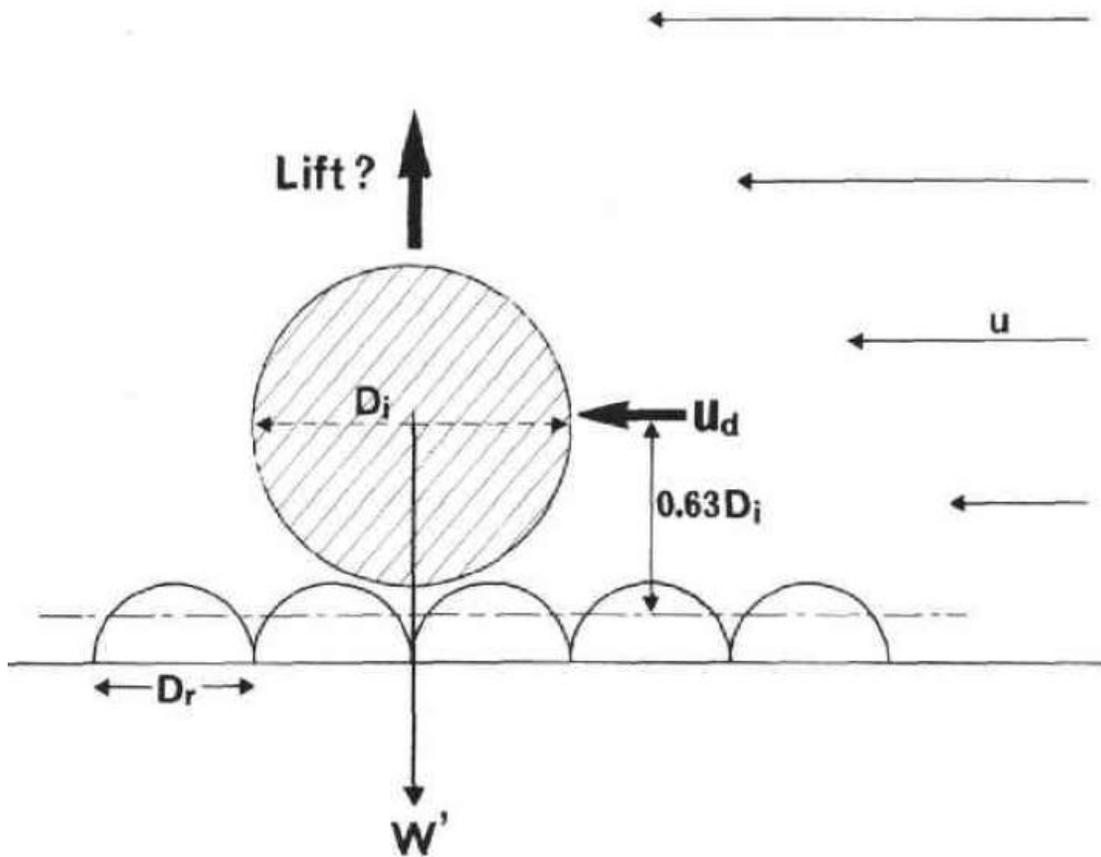


Figura 7. Fuerza y distancia entre partículas no uniformes.

Fuente: (Egiazaroff, 1965)

Según Egiazaroff (1965), la altura de aplicación de las fuerzas hidrodinámicas actuando sobre el grano esférico se acepta que $y = 0,63D$, mayor que la gravedad (Figura 6). Esta altura es una distancia perpendicular factible de la distancia teórica, que se supone que está a una distancia de $0,2K_s$ debajo de un plano tangente a la parte superior de las partículas para un sedimento uniforme, K_s es igual al diámetro de grano D determinado por tamizado Egiazaroff (1950). Debido a que la teoría se supone que la pared está a una distancia de $0,2D$ por debajo de un plano tangente a la Esferas, la distancia perpendicular de la pared teórica al centro de la gravedad de las esferas en la capa superior es $0,5165D$. Debido a que $y = 0,63D$, puede haber un espacio limitado entre la esfera suspendida y las pegadas en la capa inferior (Figura 6).

De acuerdo con Egiazaroff (1965), el cálculo del sedimento no uniforme es:

$$\theta_{0i} = 0,1 / \left(\frac{\log_{10} 19 D_i}{D_r} \right)^2$$

Cuando $D_i = D_r$ en el caso de tamaño uniforme, $\theta_{0i} = 0,06$. Por lo tanto, cuando $D_i > D_r$, $\theta_{0i} < 0,06$, y el grano es más móvil que los granos uniformes. Si $D_i < D_r$, entonces $\theta_{0i} > 0,06$. Y la movilidad de tales granos es menor que la de los granos uniformes, la influencia de la fuerza de empuje está relacionada con la saltación de la partícula en la iniciación de su movimiento transversal, cuando la altura de la saltación depende completamente de la fuerza de elevación. El comienzo del movimiento de partículas en la dirección de la corriente del fluido comienza después de la saltación, cuando el contacto de la partícula con la cama ya está roto, y la fuerza de elevación ha disminuido considerablemente.

El factor de corrección según Van Rijn (1993), es propuesto por:

$$E = \frac{\log(19)^2}{\log\left(19 \frac{d_i}{d_m}\right)}$$

3.6.2. Ecuación de Hayashi

El criterio de Hassan (2012), en función de sedimento uniforme, la tensión de cizallamiento crítica para el sedimento se utiliza como un valor constante, principalmente (y sobre todo) el parámetro Shields (Figura 3), mientras que en un sedimento no uniforme, las partículas más finas están protegidas por partículas más gruesas, y por lo tanto el movimiento incipiente (estrés de cizallamiento crítico) para la clase de tamaño particular es diferente que la de la misma clase de tamaño de sedimento uniforme. Entonces, el movimiento del sedimento graduado para cada clase de tamaño requiere un factor de corrección, según Wu, Wang, & Jia (2010), para mezclas de sedimentos se utiliza la siguiente relación:

$$\frac{\tau_{ck}}{(\gamma_s - \gamma)d_k} = \theta_c \left(\frac{P_{ek}}{P_{bk}} \right)^{-m}$$

Donde τ_{ck} es la tensión de cizallamiento crítico para el grano de clase de tamaño k; $\theta_c = 0,03$ y $m = 0,6$, es el d_k tamaño del grano o partícula de clase k. P_{ek} y P_{bk} son la función de ocultación y exposición.

Según Wu, Wang, & Jia (2010), las fuerzas de arrastre y elevación que actúan sobre una partícula que permanece en la cama dependerá de cómo esté situado y rodeado por otros. Sí no hay ninguna otra partícula a su lado corriente arriba, está expuesta completamente al flujo. De lo contrario, su área de rebobinado y altura de exposición son reducidos. Como se

muestra en la siguiente Figura, suponemos que las partículas de sedimento son esferas con varios diámetros y definen la altura de exposición A , para una partícula de tamaño d , como la diferencia de elevación entre los ápices de esta partícula y su partícula aguas arriba. Si:

$A, > 0$, la partícula d , se considera que está en estado expuesto, y si

$A, < 0$, está en estado oculto.

Debido a que las partículas de sedimento se distribuyen aleatoriamente en la cama; A es una variable aleatoria. Se supone que sigue una distribución de probabilidad uniforme.

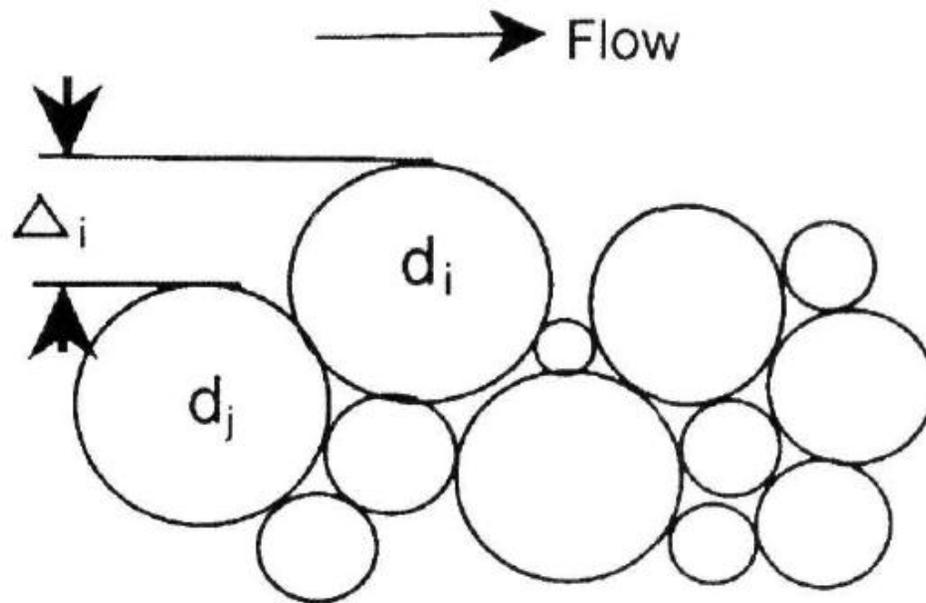


Figura 8. Definición de partículas expuestas y ocultas.

Fuente: (Wu, Wang, & Jia, 2010)

En la siguiente Figura se muestran los resultados al utilizar la ecuación de Hayashi en el cálculo de la tensión de corte crítico en distintos ríos.

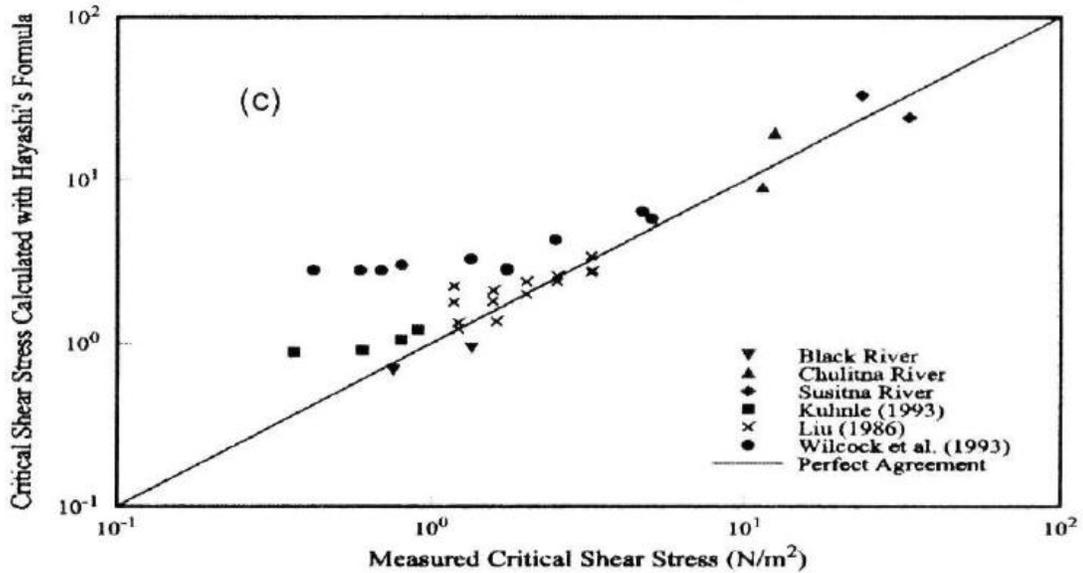


Figura 9. Tensión de corte crítico según la fórmula de Hayashi en diferentes ríos.

Fuente: (Wu, Wang, & Jia, 2010)

3.6.3. Ecuación de Weiming

En esta sección, la ecuación que se utiliza es a partir de Wu, Wang, & Jia (2010): La velocidad de transporte fraccional de la carga de material de lecho no uniforme puede obtenerse sumando las tasas de transporte fraccionarias de carga de lecho y carga suspendida calculada con las fórmulas. Según Wu, Wang, & Jia (2010), para este cálculo se requieren los siguientes pasos:

1. Dividir las mezclas de sedimentos no uniformes en varias fracciones con rangos de tamaños diferentes.
2. Calcular las probabilidades de partículas ocultas y expuestas.
3. Determine la tensión de corte crítica para cada fracción de tamaño
4. Calcular la tensión de corte y la tensión de corte de la velocidad de flujo conocida, la profundidad y la pendiente superficial.
5. Determine el coeficiente de rugosidad de Manning n para el canal (excluyendo la influencia de los bancos) y la n' correspondiente a la tensión de corte del grano τ_c y, por lo tanto, calcular el esfuerzo cortante del grano.

6. Calcular el esfuerzo de cizallamiento excesivo no dimensional y luego la tasa de transporte fraccional para carga de lecho no uniforme con la ecuación.

7. Sumar el transporte de carga de fondo y en suspensión para obtener la tasa de transporte fraccional para los no uniformes

En el Cuadro 2 se muestran los datos tomados de campo de los cuales diferentes autores, incluyendo Wu, Wang, & Jia (2010), tomaron en cuenta para sus cálculos en distintos ríos. En dichos experimentos se obtuvo resultados como carga en suspensión de fondo y total.

Cuadro 2. Parámetros hidráulicos para diferentes ríos y autores.

Data Source	Discharge (m ³ /s)	Velocity (m/s)	Depth (m)	Energy Slope (10 ⁻³)	d_i (mm)	q_b (10 ⁻³ m ² /s)
Samaga (1986a)	0.006-0.015	0.49-0.78	0.06-0.11	4.49-6.93	0.073-2.366	0.04-0.22
Kuhnle (1993)	0.01-0.03	0.28-0.81	0.101-0.107	0.47-2.22	0.2-10	0.0000015-0.064
Wilcock (1993)	0.017-0.057	0.26-1.08	0.088-0.12	0.59-16.2	0.21-64	0.00000087-0.22
Liu (1986)	0.0035-0.023	0.14-0.67	0.03-0.083	1.5-4	0.31-30	0.000049-0.00064
Susitna River	799-2800	1.8-2.1	2.4-4.4	1.4-2.4	0.062-128	0.028-0.11
Chulitna River	261-348	1.5-1.8	1.7-1.9	0.64-0.74	0.062-128	0.11-0.23
Black River	20-256	0.44-1.0	0.55-1.9	0.11-0.29	0.062-16	0.0048-0.016
Toutle River	9.3-248	1.3-2.8	0.39-1.5	1.9-5.5	0.062-32	0.11-0.95
Yampa River	26.3-447	0.59-1.3	0.65-3.9	0.40-0.87	0.062-32	0.003-0.054

Fuente: (Wu, Wang, & Jia, 2010)

Cuatro conjuntos de datos de laboratorio para carga de lecho no uniforme medida por diferentes autores se utilizan para investigar el transporte de la carga de fondo y el movimiento inicial de este.

4. METODOLOGÍA

A continuación, se describe detalladamente la metodología desarrollada en cada etapa del proyecto.

Inicialmente se mostrará la ubicación de los sectores en estudio: Vesta, Atalanta y Pandora.

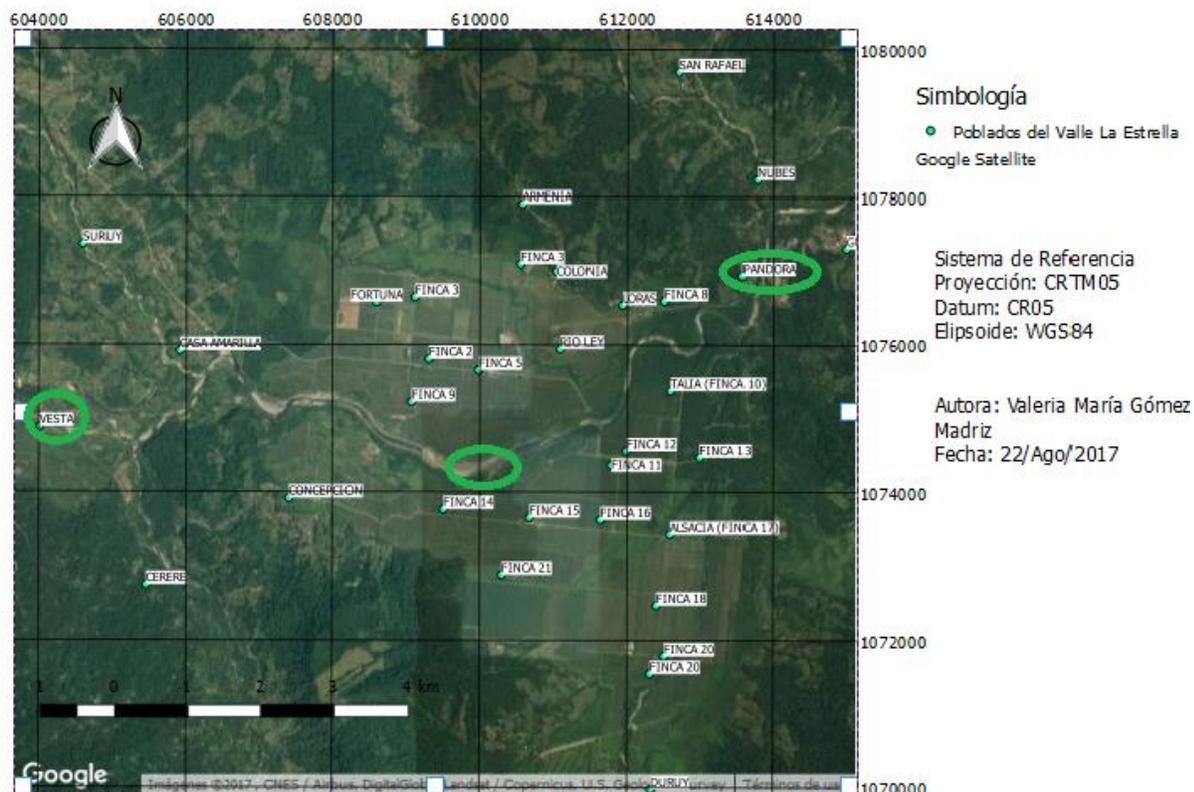


Figura 10. Ubicación de los sectores a analizar.
Fuente: (elaboración propia)

4.1. Recolección de información

Se hizo medición de caudal y de diámetro de sedimentos directamente en el campo, mediante giras programadas, donde se utilizaron varios instrumentos como correntómetro y trampas de sedimentos respectivamente para facilitar los procedimientos, estos datos al ser analizados antes de iniciar el trabajo, no se tomarán como parte de los resultados.

4.1.1. Sedimentos de fondo

4.1.1.1. Se utilizaron las trampas de sedimentos, en este caso la de fondo. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de dicha trampa.



Figura 11. Trampa de sedimento de fondo utilizada.
Fuente: (Villón Béjar, 2004)

4.1.1.2. Para conocer los diámetros de mayor tamaño, se utilizó un método de muestreo por cuadrículas de aproximadamente 50x50 cm en los bancos del río. Para cada cuadrícula se midió el diámetro de partícula de 100 unidades de material contenido en ella

4.1.2. Obtención de caudales

Además, se contó con datos de caudal de estaciones que han sido instaladas con anterioridad en el lugar, realizando distribuciones Gumbel con dichos datos.

4.2. Análisis de la información

4.2.1. Se analizaron los datos obtenidos de caudal y diámetros, realizando la curva granulométrica de cada sector del río La Estrella, los cuales fueron utilizados en el cálculo de la cuantificación del transporte de sedimentos uniforme y no uniforme. Estos datos fueron analizados por estudiantes anteriormente.

4.2.2. Para el cálculo del transporte de sedimento de fondo uniforme y no uniforme, se utilizó distintas ecuaciones mediante la herramienta Excel, así como la herramienta del programa Iber en el transporte uniforme.

4.3. Transporte de sedimento uniforme

Realización del cálculo para el transporte de sedimento uniforme mediante la ecuación general de Bagnold y la fórmula de Yalin. Dichas ecuaciones se muestran a continuación:

- Ecuación de Bagnold

$$q_{sb} = \frac{\beta' \bar{u} (\tau_0 - (\tau_0)_{cr})}{\gamma_s} \quad (1)$$

Los parámetros a utilizar son los siguientes:

$$\frac{\bar{u}}{v_*} = \ln \left(0,386 \frac{h}{k_s} \right) + B_s \quad (2)$$

$$\frac{\beta'}{\beta} = \frac{1 + \frac{1}{2\kappa B_s} \ln \left(\frac{\epsilon}{2D} \right)}{1 + \frac{1}{\kappa B_s} \ln \left(0,368 \frac{h}{2D} \right)} \quad (3)$$

Donde:

q_{sb} = Cantidad de sedimento de fondo transportado (m²/s)

\bar{u} = Promedio de la velocidad (m/s)

κ = Constante de von Karman (=0,4)

v_* = velocidad del esfuerzo cortante $v_* = \sqrt{gSR_h}$ (m/s)

τ_0 = Esfuerzo cortante $\tau_0 = \gamma R_h S = \rho v_*^2$ (N/m²)

$(\tau_0)_{cr}$ = Esfuerzo cortante en el momento de la iniciación del transporte de sedimento

$(\tau_0)_{cr} = \gamma (hS)_{cr} = \rho v_{*cr}^2$ (N/m²)

γ_s = Peso específico del material de fondo del río (16186,5 N/m³)

R_h = Radio Hidráulico (=A/P) (m)

A = Área de la sección transversal del cauce (=Bh) (m²)

P = Perímetro de la sección transversal (=2h+B) (m)

B = Base de la sección transversal (m)

h = Profundidad del agua (m)

k_s =rugosidad del material de la cama del cauce ($2D_{50}=2D$)

$$B_s = (2,5\ln(\text{Re}_*) + 5,5)e^{-0,0705(\ln\text{Re}_*)^{2,55}} + 8,5(1 - e^{-0,0594(\ln\text{Re}_*)^{2,55}})$$

B_s =Función de la rugosidad

Re_* =Número de Reynolds ($= v_*k_s/\nu$)

ν =viscosidad cinemática ($1*10^{-6}$ m²/s)

β = En flujo turbulento ($=0,5$)

$$\epsilon = 2D \frac{Y}{Y_{cr}}$$

Y = Número de movilidad o parámetro de Shield ($= \frac{\rho v_*^2}{\gamma_s D}$)

$$Y_{cr} = 0,13\Xi^{-0,392}e^{-0,015\Xi^2} + 0,045(1 - e^{-0,068\Xi})$$

Y_{cr} = Valor de Y en el momento de la iniciación del transporte de sedimentos

$$\Xi^3 = \frac{\gamma_s D^3}{\rho v^2}$$

ρ =Densidad del agua (1000kg/m³)

- Ecuación de Yalin

$$\phi = 0,635s\sqrt{Y} \left[1 - \frac{1}{as} \ln(1 + as) \right] \quad (4)$$

Donde:

$$s = \frac{Y}{Y_{cr}} - 1$$

$$a = 2,45 \frac{Y_{cr}}{(\rho_s/\rho)^{0,4}} ; \text{ siendo } (\rho_s/\rho) = 2,45(\text{arena})$$

- Utilización de la herramienta Iber para el cálculo del transporte de fondo uniforme mediante la modelación realizada en el proyecto “Modelación Hidrodinámica y Morfológica del Río La Estrella, Limón” para un periodo de retorno de 25 años, donde se tomaron los diferentes valores de profundidad de agua, tomando en cuenta las condiciones más críticas, además se utilizaron distintos escenarios modificando la dimensión del diámetro, esto con el fin de observar el comportamiento del río en estudio en estas situaciones, este programa utilizó las siguiente ecuaciones de Meyer-Peter Müller
- Ecuación de Meyer-Peter Müller

$$\Phi = \frac{\rho^{1/2} * q_{sb}}{\gamma_s^{1/2} * D^{3/2}} \quad (5)$$

- Ecuación de Van Rijn

$$\Phi = 0,053 \Xi^{-0,3} (n_* - 1)^{2,1} \quad (6)$$

Donde:

Φ =“phi” parámetro de Einstein

$$\Phi = \frac{\rho^{1/2} * q_{sb}}{\gamma_s^{1/2} * D^{3/2}} \quad (7)$$

4.3.1. Después se comparará los resultados de las ecuaciones obtenidas mediante el programa Excel y el producto de la modelación Iber.

4.4. Transporte de sedimento no uniforme

Mediante la ecuación General de Bagnold, modificando ciertas variables para tomar en cuenta las fracciones de los diferentes tipos de diámetros presentes en el río. Las variables se modificaron mediante ecuaciones de Egiazaroff, Hayashi y Weiming.

Es importante mencionar que para el cálculo del transporte de sedimento de fondo no uniforme se utilizaron 3 ecuaciones, las cuales consisten en modificar ciertos parámetros de la fórmula de General de Bagnold (ecuación 3), explicadas a continuación. Primeramente, se debe mencionar que cuando se habla de transporte no uniforme, quiere decir que se consideran los distintos diámetros que se encuentran presentes en el río en estudio. Para esto se utilizó la siguiente fórmula que calcula un fraccionamiento más selecto, con el fin de obtener un valor más significativo entre diámetros.

$$(D_{50})_i = \frac{d_j + d_{j+1}}{2} \quad (8)$$

Donde:

$(D_{50})_i$ = diámetro cada 10% de los datos obtenidos en el campo

En las dos primeras fórmulas, el parámetro a modificar es el Y_{cr} , luego se siguen los mismos parámetros de la fórmula de Bagnold.

Dichas ecuaciones se muestran en seguida:

- o Ecuación de Egiazaroff

$$(Y_{cr})_i = Y_{cr} \left(\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} \left(\frac{19(D_{50})_i}{D_{50}} \right)} \right)^2 \quad (9)$$

- Ecuación de Hayashi

$$(Y_{cr})_i = Y_{cr} \left(\frac{\log_{10} 8}{\log_{10} \left(\frac{19(D_{50})_i}{D_{50}} \right)} \right)^2 ; \quad \text{si } \frac{(D_{50})_i}{D_{50}} \geq 1 \quad (10)$$

$$(Y_{cr})_i = Y_{cr} \frac{D_{50}}{(D_{50})_i} ; \quad \text{si } \frac{(D_{50})_i}{D_{50}} < 1 \quad (11)$$

Donde:

$(Y_{cr})_i$ = inicio del transporte de sedimento para la fracción del material del lecho

$(D_{50})_i$ = Fracción del diámetro del material del lecho (mm)

- Ecuación de Weiming

Esta ecuación toma en cuenta el parámetro de “Einstein phi”, la cual se despeja el valor del transporte de sedimento ($q_{sb}i$). Esta ecuación tiene la particularidad de que, para obtener los parámetros τ_0 y $(\tau_{0c})_i$; se calculan mediante los resultados obtenidos de las ecuaciones de Egiazaroff y Hayashi, ya que contemplan los mismos tipos de diámetros, así como los mismos parámetros. Teniendo como resultados valores de “Weiming-Egiazaroff” y “Weiming-Hayashi”. Las ecuaciones se muestran a continuación.

$$\Phi_b i = \frac{\rho^{1/2} * q_{sb} i}{\gamma_s^{1/2} * D^{3/2}} \quad (12)$$

$$\Phi_b i = 0,0053 \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{3/2} \frac{\tau_0}{(\tau_{0c})_i} - 1 \right]^{2,2} \quad (13)$$

Por lo tanto:

$$q_{sb} i = \frac{\Phi_b i * \gamma_s^{1/2} * D^{3/2}}{\rho^{1/2}} \quad (14)$$

Donde:

$$\tau_0 = \gamma S R_h$$

$$(\tau_{0c})_i = (Y_{cr})_i * \gamma_s * D_{50} i$$

$$n' = \frac{D_{50}^{1/6}}{20}$$

Donde:

$(\tau_{0c})_i$ = Esfuerzo cortante en el momento de la iniciación del transporte de sedimento, en la fracción de diámetro (N/m^2)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning del canal (adimensional)

n' =Coeficiente de rugosidad de Manning en función de n del tipo de grano

D_{50} =Diámetro promedio del sector en estudio (mm)

4.5. Impactos Social, Ambiental y Económico

Finalmente, se analizaron los impactos social, ambiental y económico mediante actividades como encuestas realizadas a los vecinos alrededor del río La Estrella, se tomaron en cuenta los sectores analizados en este trabajo. Se describieron diez preguntas, las cuales tratan de las situaciones que se han presentado en los últimos años con las fuertes precipitaciones, así como las condiciones físicas de las casas de habitación. En el apartado del impacto ambiental se conoció diferentes leyes a nivel nacional e internacional de los parámetros que se deben considerar para este tipo de análisis. Y para el impacto económico se investigó cuánto es el valor en colones de recoger el material sedimentado en cada sector del río analizado.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Inicialmente se tomaron los datos de profundidad de agua de la modelación obtenida del proyecto “Modelación Hidrodinámica y Morfológica del Río La Estrella, Limón” realizada por la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica para un periodo de retorno de 25 años, los cuales se van a utilizar en el cálculo del transporte de sedimentos uniforme y no uniforme, con el fin de utilizar los mismos parámetros principales (elevación de profundidad de agua y ancho de solera) en los cálculos y obtener la comparación correspondiente.

En las siguientes Figuras se muestran los perfiles transversales obtenidos del programa Iber, de donde se obtuvieron los anchos de solera para cada altura presente en el modelo, otro detalle que se tomó en cuenta es que para los tres sectores, el área y perímetro se realizaron para una sección rectangular con el fin de que sea más significativos los resultados de transporte.

- Vesta

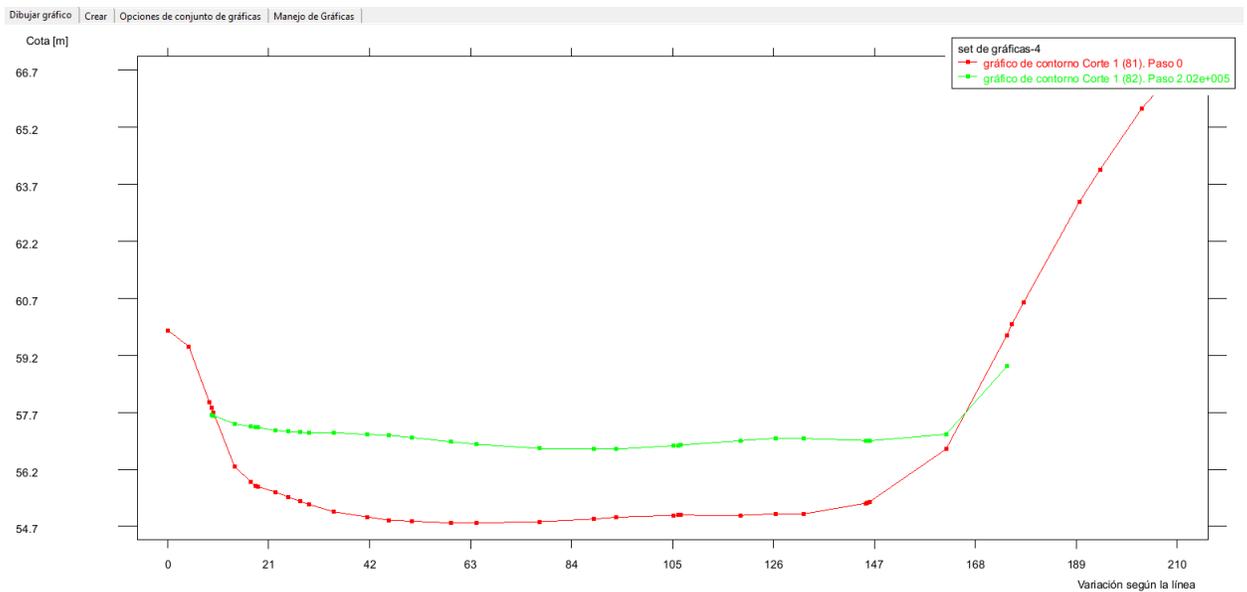


Figura 12. Perfil transversal de la sección Vesta.

Fuente: (elaboración propia)

- Atalanta

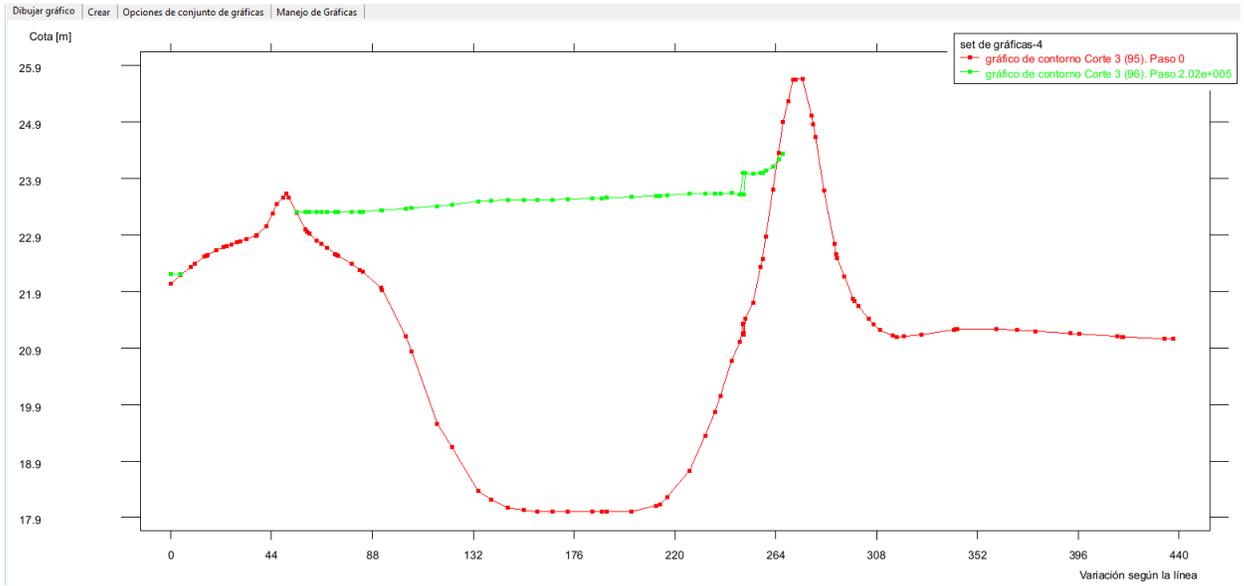


Figura 13. Perfil transversal de la sección Atalanta.

Fuente: (elaboración propia)

- Pandora

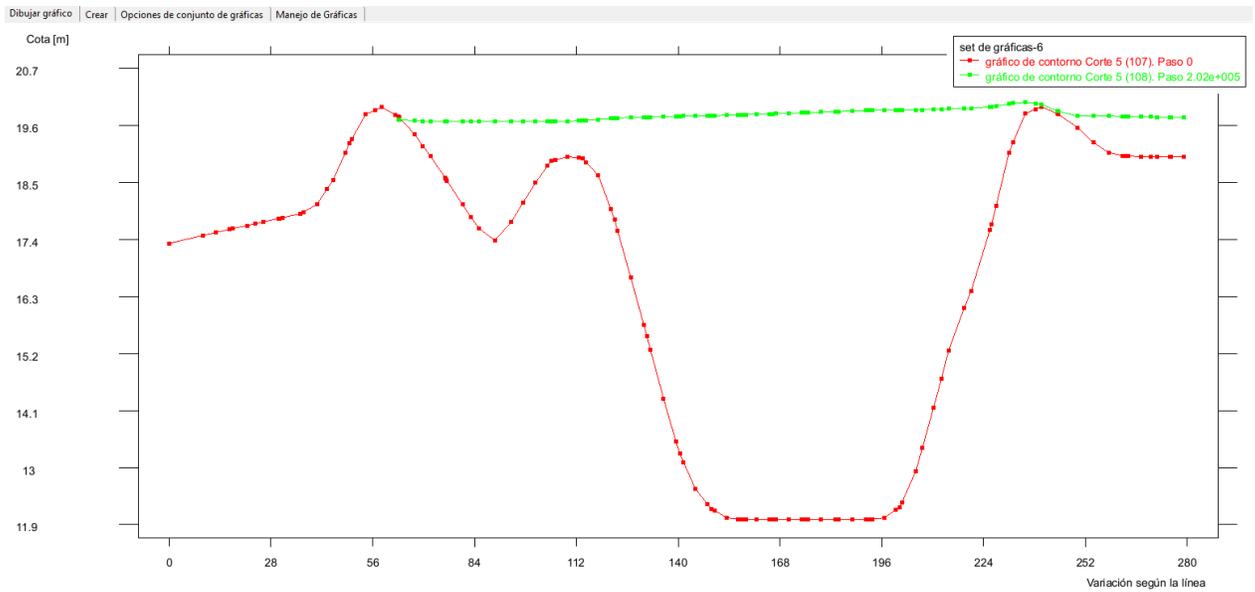


Figura 14. Perfil transversal de la sección Pandora

Fuente: (elaboración propia)

Como se puede observar, las Figuras 12, 13 y 14 muestran los perfiles de cada sección del río y se puede determinar que Vesta es el punto donde la sección transversal contiene el segundo mayor ancho de solera con un total de 151,32 m, sin embargo presenta un tirante máximo de agua de 2,47 m; el sector de Atalanta tiene un ancho de solera de 176 m y un tirante máximo de agua de 4,94 m en este sector es importante recalcar que en algún punto, existe un cambio de pendiente considerable por lo que puede incidir en los resultados, ya que puede ocurrir que en este sector sea el que presente mayor transporte de sedimento por unidad de ancho por esta razón; arrastrando mayor cantidad para diámetros pequeños; y en el sector de Pandora se muestra que presenta un ancho de solera máximo de 121,88 m y una altura de agua máxima de 7,75 m. Con estos resultados se puede deducir que los puntos que pueden presentar mayor transporte según las condiciones físicas son el sector de Atalanta y Pandora, el primero por su ancho de solera mayor y el segundo porque su altura de agua con respecto a las demás es mayor.

Es importante resaltar que para los resultados del transporte de sedimento uniforme y no uniforme se dan por unidad de ancho, es decir en unidades de m^2/s .

Además los diámetros que se han utilizado en el procedimiento son obtenidos en anteriores estudios, y éstos fueron escogidos de manera aleatoria obteniendo dos diámetros considerados pequeños y otros dos considerados grandes, todos ellos medidos en mm.

Otra condición importante para el análisis de resultados, es que cuando los valores de transporte de sedimento son altos según la elevación de agua, así se va a determinar cuánta cantidad de sedimento va a ser arrastrado, esto quiere decir que para un diámetro pequeño, con una altura de agua alta, va a ser más propenso a ser arrastrado que con una altura de agua pequeña. De la misma manera, cuando se tiene un diámetro considerablemente grande, se va a necesitar una altura de agua mayor para que se produzca el transporte, en este caso por unidad de ancho.

5.1. Transporte de sedimento uniforme

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos mediante la programación realizada en la hoja de cálculo para el transporte de sedimentos uniforme mediante las ecuaciones de la (3) a la (9) respectivamente, según el tipo de ecuación en los diferentes sectores. En los anexos se encuentra el ejemplo resuelto obtenido en la hoja de cálculo, los

cuales se utilizaron en todos los sectores, con los diámetros correspondientes. Además, se presentan los resultados obtenidos con el modelo Iber, el cual utiliza la ecuación de Meyer donde se compararán con las ecuaciones teóricas.

- **Ecuación General de Bagnold's**

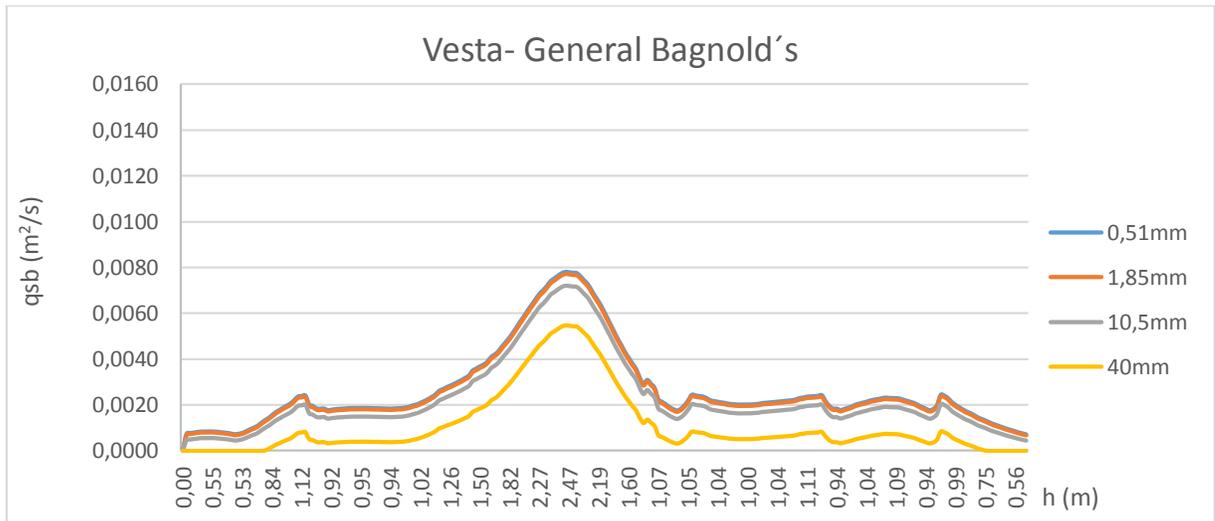


Figura 15. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación General de Bagnold's en el sector Vesta.
Fuente: (elaboración propia)

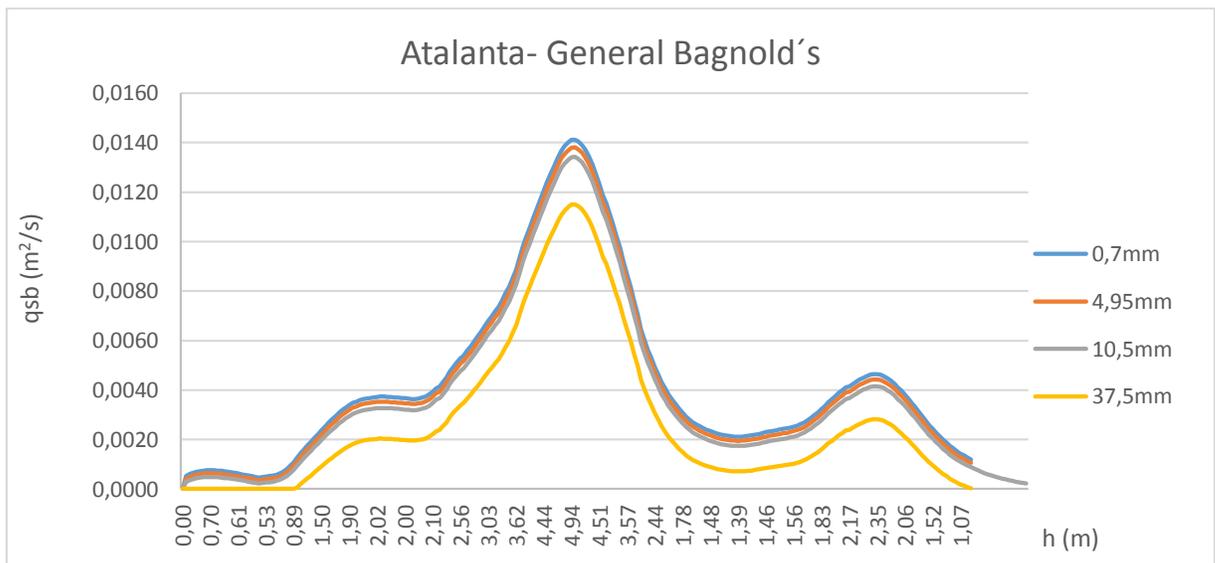


Figura 16. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación General de Bagnold's en el sector Atalanta.
Fuente: (elaboración propia)

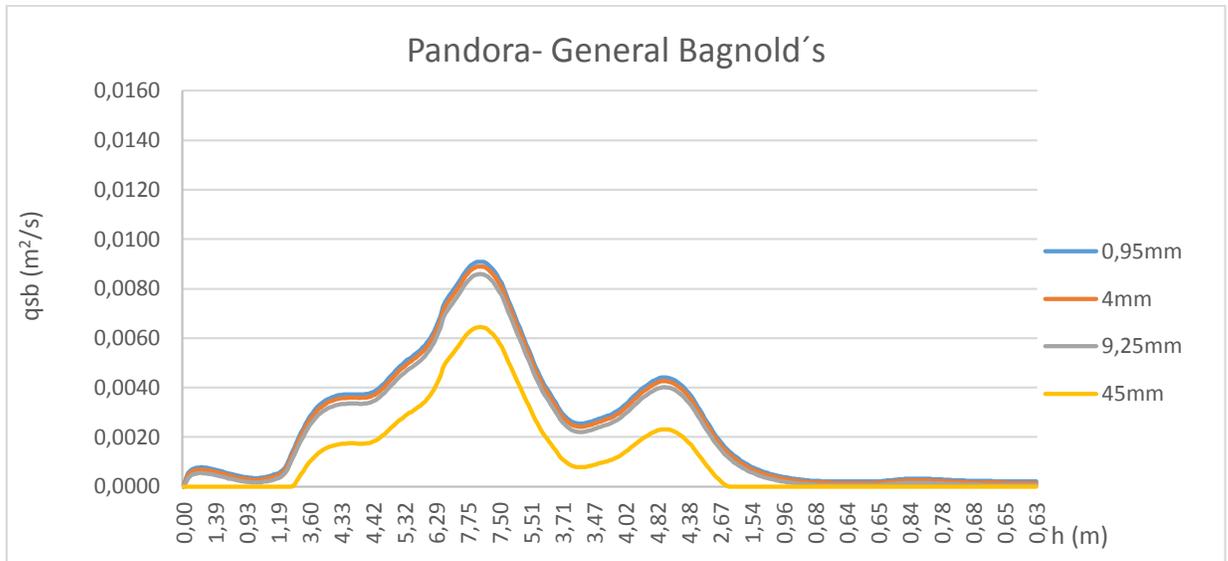


Figura 17. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación General de Bagnold's en el sector Pandora.
Fuente: (elaboración propia)

Como se puede observar el sector que más presenta transporte de sedimento es Atalanta y el comportamiento de las curvas es similar en las tres partes; en Vesta difiere un poco el diámetro de 10,5 mm a los otros dos sectores y el diámetro mayor en los tres (40mm, 37,5mm y 40mm) respectivamente, tienen un comportamiento igual: menor cantidad transporte de sedimento.

- **Ecuación de Meyer**

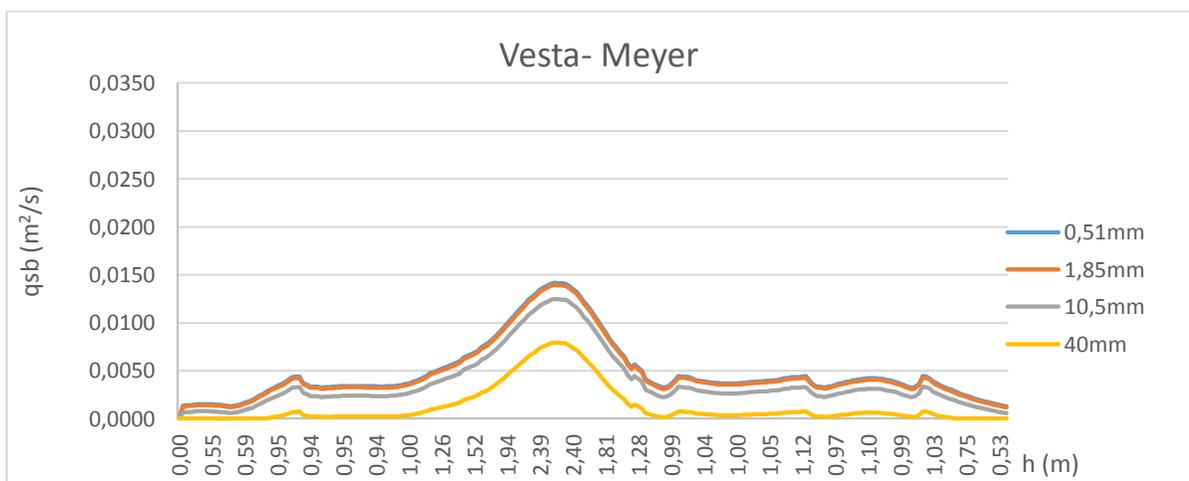


Figura 18. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Meyer en el sector Vesta.
Fuente: (elaboración propia)

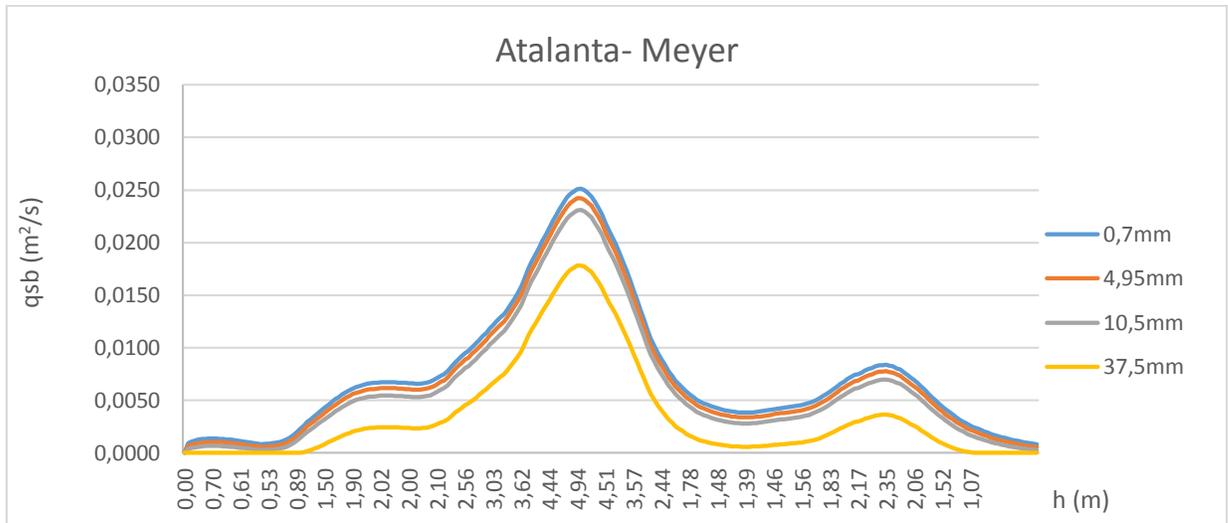


Figura 19. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Meyer en el sector Atalanta.
Fuente: (elaboración propia)

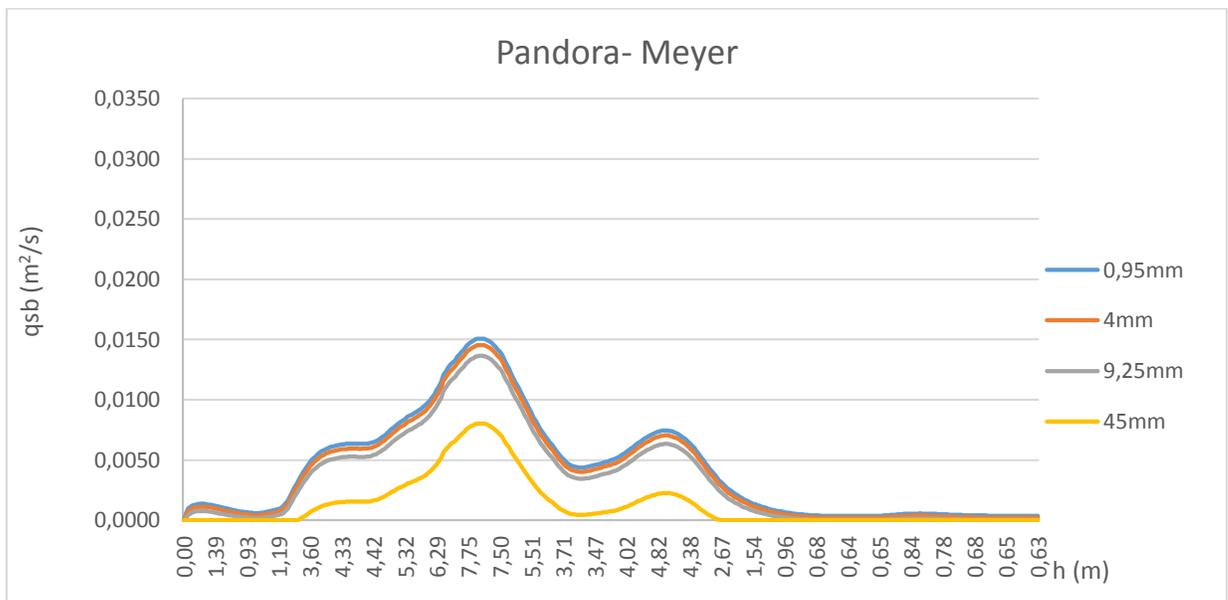


Figura 20. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Meyer en el sector Pandora.
Fuente: (elaboración propia)

Como se puede observar en las tres últimas Figuras, el comportamiento es similar a la ecuación General de Bagnold's con mayor transporte de sedimento en los diámetros menores y menor transporte en los diámetros mayores. Realizando una comparación con la primera ecuación presentada, se puede decir que el transporte de sedimento en la presente ecuación es casi el doble, tal es el caso de Atalanta donde en la primera ecuación el transporte mayor

es de $0,014 \text{ m}^2/\text{s}$ y en la ecuación de Meyer es de $0,025 \text{ m}^2/\text{s}$. Porcentualmente es de un 44% de diferencia entre la ecuación de Meyer y la General de Bagnold's.

- **Ecuación de Van Rijn**

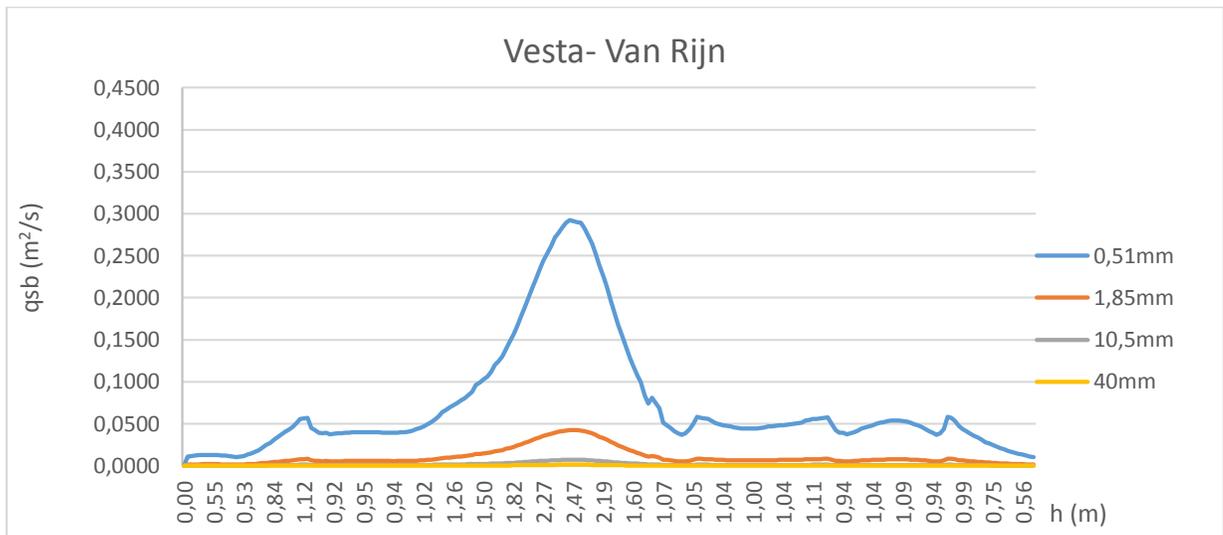


Figura 21. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Van Rijn en el sector Vesta.

Fuente: (elaboración propia)

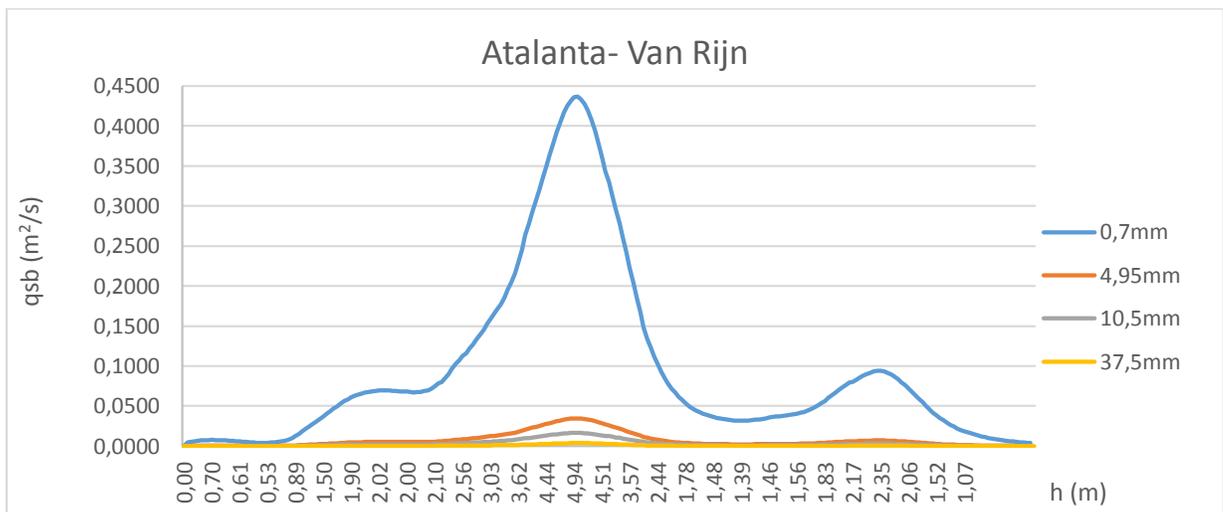


Figura 22. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Van Rijn en el sector Atalanta.

Fuente: (elaboración propia)

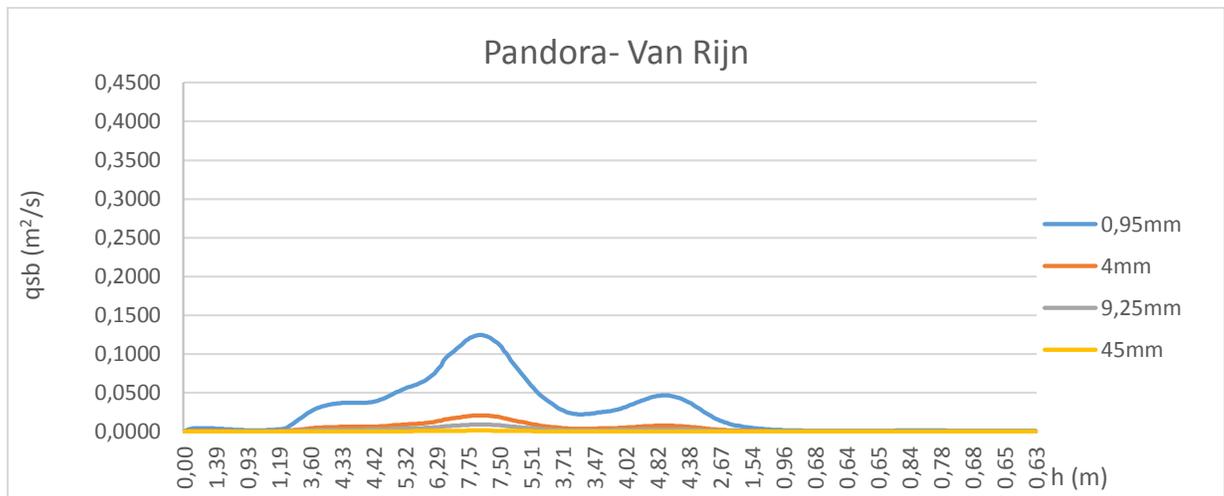


Figura 23. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Van Rijn en el sector Pandora.
Fuente: (elaboración propia)

Con esta ecuación, se puede observar cómo es desigual a las ecuaciones anteriores, para diámetros menores el transporte de sedimento asciende considerablemente con respecto a los demás, en el caso de Atalanta el transporte es muy alto comparado con Vesta y Pandora; además para los diámetros mayores el transporte es nulo completamente. Estos resultados tienen influencia por la sección transversal, ya que es mayor a las otras secciones. Un detalle importante es que en esta ecuación el transporte de sedimento es mucho mayor a las ecuaciones anteriores, por ejemplo, en Vesta, con la presente ecuación de Van Rijn el caudal por unidad de ancho es de $0,300 \text{ m}^2/\text{s}$, en la ecuación de Meyer es de $0,015 \text{ m}^2/\text{s}$ y en la General de Bagnold's da como resultado $0,008 \text{ m}^2/\text{s}$; como se muestra en las figuras correspondientes, este último con una diferencia porcentual del 73%.

- **Ecuación de Bagnold**

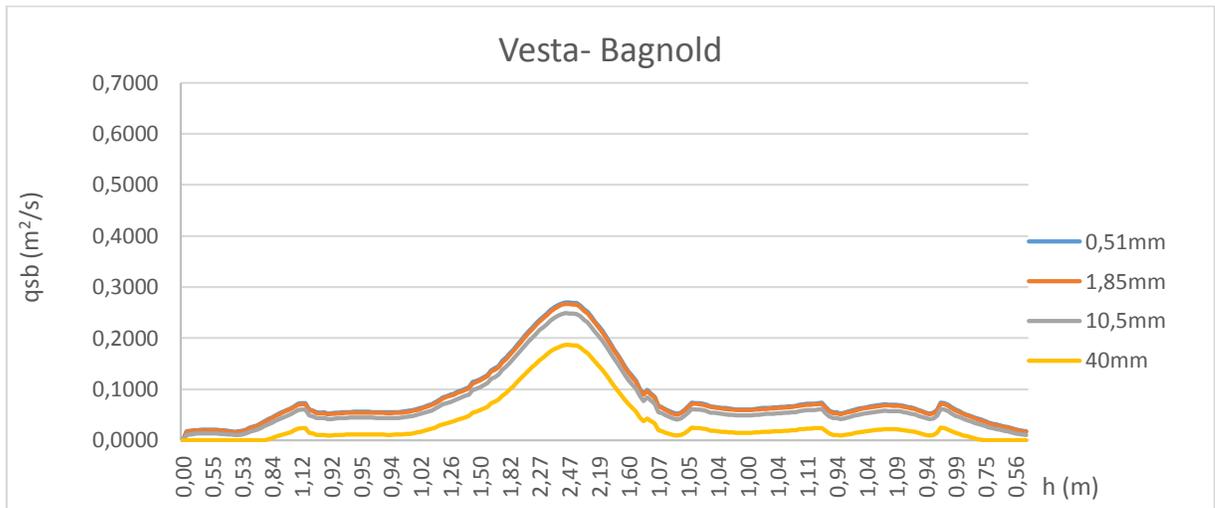


Figura 24. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Bagnold en el sector Vesta.
Fuente: (elaboración propia)

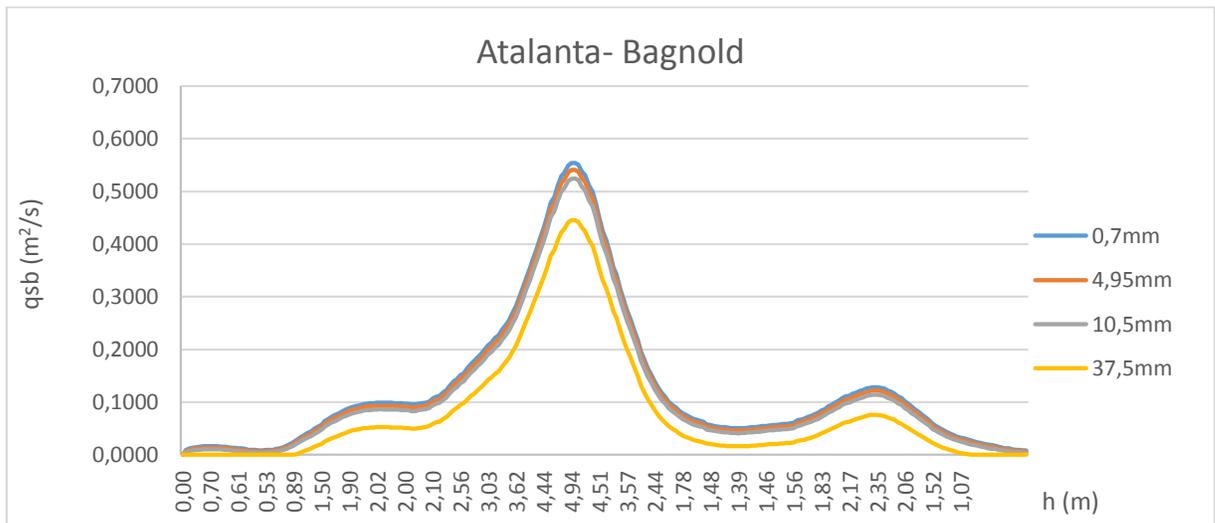


Figura 25. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Bagnold en el sector Atalanta.
Fuente: (elaboración propia)

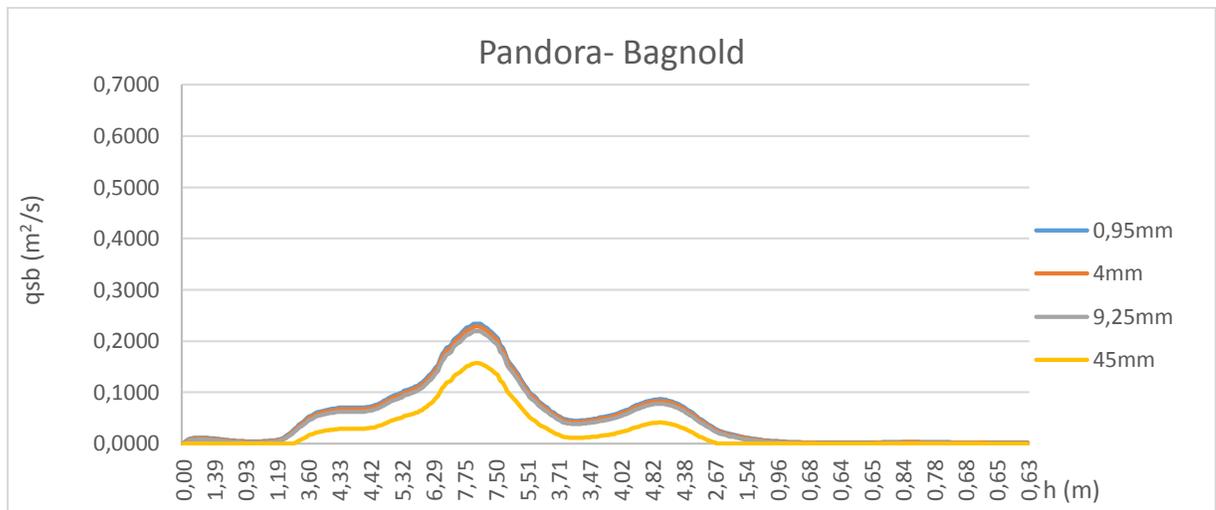


Figura 26. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Bagnold en el sector Pandora.
Fuente: (elaboración propia)

Al igual que la ecuación de Van Rijn, la ecuación de Bagnold presenta valores altos de transporte de sedimento como se muestra en las Figuras anteriores, por lo tanto, si se tomaran en cuenta solamente estas fórmulas para el cálculo, los resultados serían considerables y ahí es donde se muestra la importancia de tomar medidas para evitar desbordamientos en los ríos en este caso el río La Estrella. Con respecto a la ecuación de Van Rijn el porcentaje de diferencia es de 21% para el sector de Atalanta. Como la ecuación de Bagnold presenta el mayor resultado de arrastre, con respecto a la ecuación General de Bagnold's el porcentaje es de 97%.

- **Ecuación de Yalin**

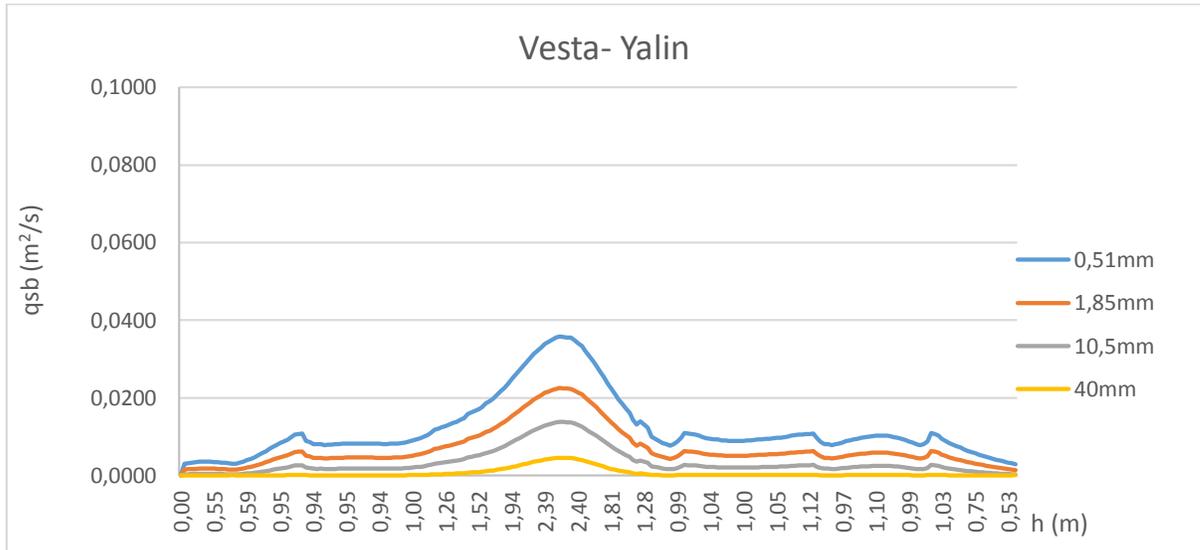


Figura 27. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Yalin en el sector Vesta.
Fuente: (elaboración propia)

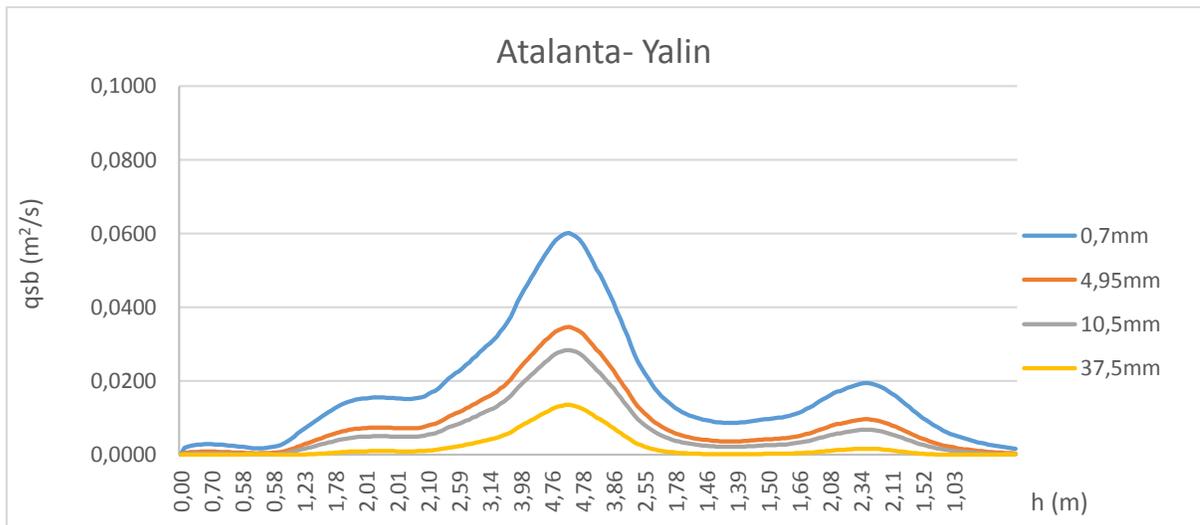


Figura 28. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Yalin en el sector Atalanta. Fuente: (elaboración propia)

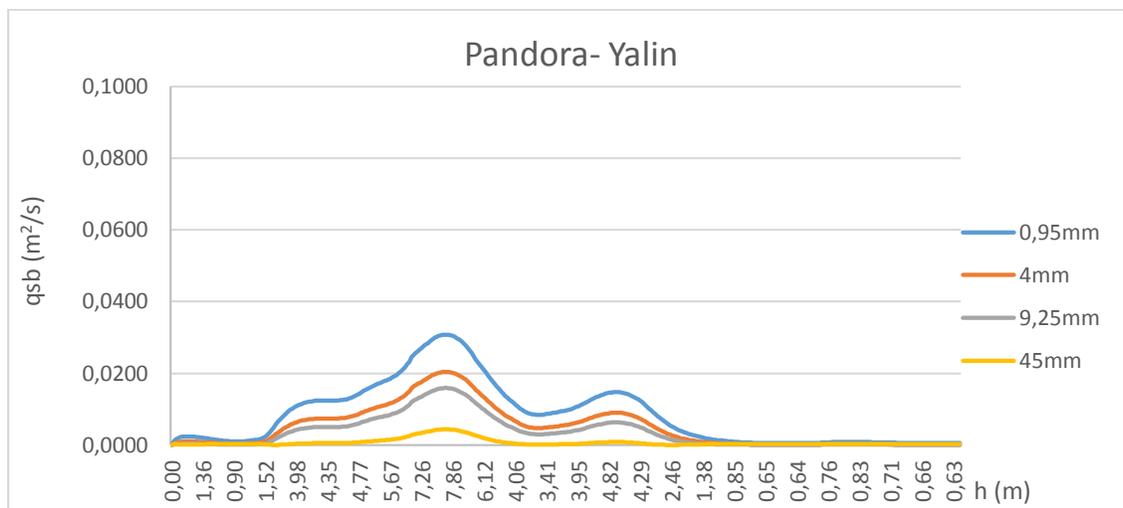


Figura 29. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Yalin en el sector Pandora.

Fuente: (elaboración propia)

Al igual que las primeras dos fórmulas presentadas de Meyer y el General de Bagnold's; el comportamiento de la ecuación de Yalin es semejante, sin embargo, la fórmula tiene como resultado mayor cantidad de transporte de sedimento por unidad de ancho de cada sector, siguiendo el mismo patrón: mayor transporte a un menor diámetro, siendo el sector de Atalanta con mayor cantidad. En porcentaje, comparado con la ecuación General de Bagnold's es de 29%.

5.2. Transporte de sedimento uniforme de distribución para obtener la curva de mejor ajuste

Este apartado tiene como objetivo obtener las ecuaciones de mejor ajuste según el diámetro utilizado en cada sector, con el fin de facilitar el cálculo con sólo introducir la altura de profundidad de agua en dicha ecuación, siendo x = la altura de agua y y = el transporte de sedimento para el momento instantáneo para cada tipo de diámetro presentado. La curva de regresión utilizada es la polinómica, ya que es la que mejor se ajusta al tipo de datos que se obtienen, así como al conseguir un coeficiente de determinación cercano a uno.

Ecuaciones según los métodos utilizados para el cálculo del transporte de sedimento uniforme.

- **Ecuación General de Bagnold's**

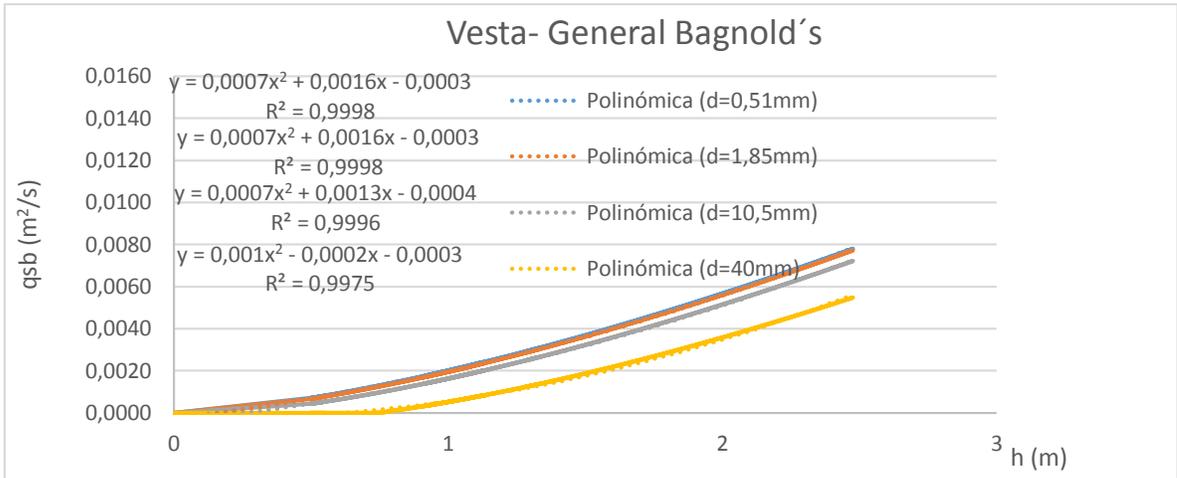


Figura 30. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación General de Bagnold's en el sector Vesta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

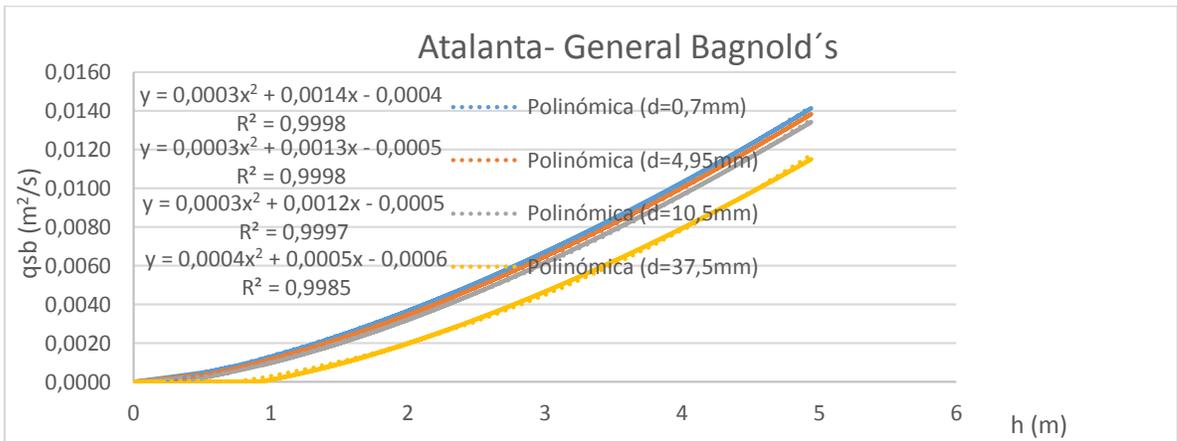


Figura 31. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación General de Bagnold's en el sector Atalanta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

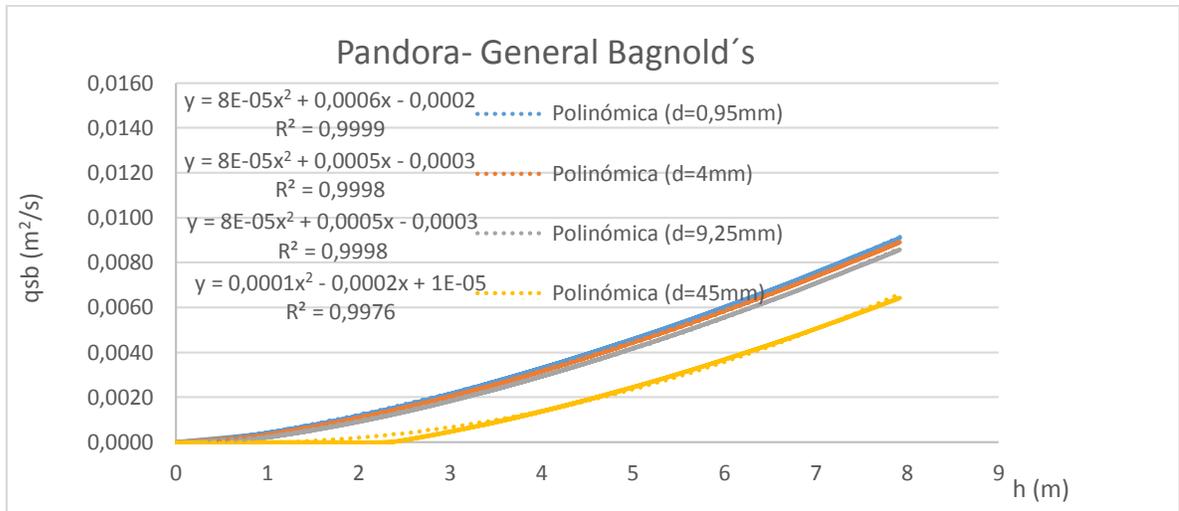


Figura 32. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación General de Bagnold's en el sector Pandora según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

- **Ecuación de Meyer**

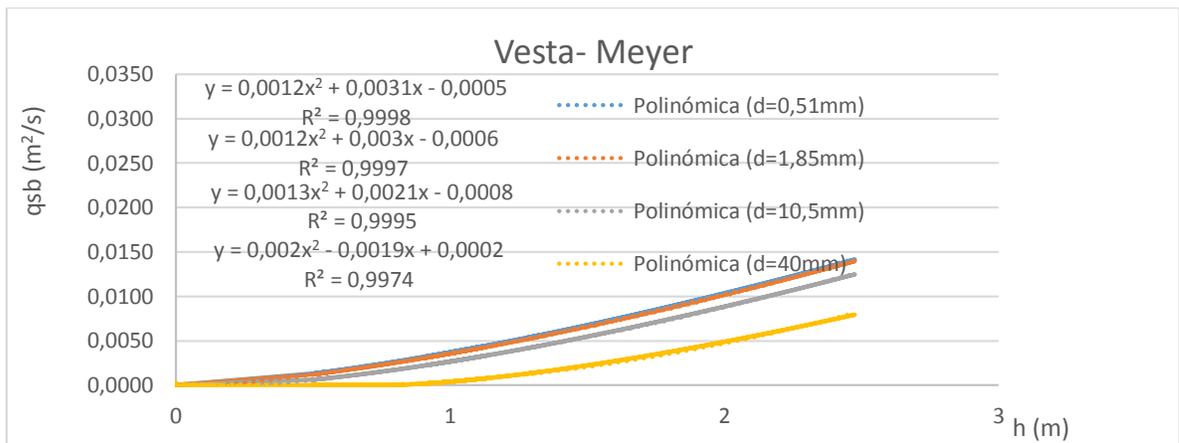


Figura 33. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Meyer en el sector Vesta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

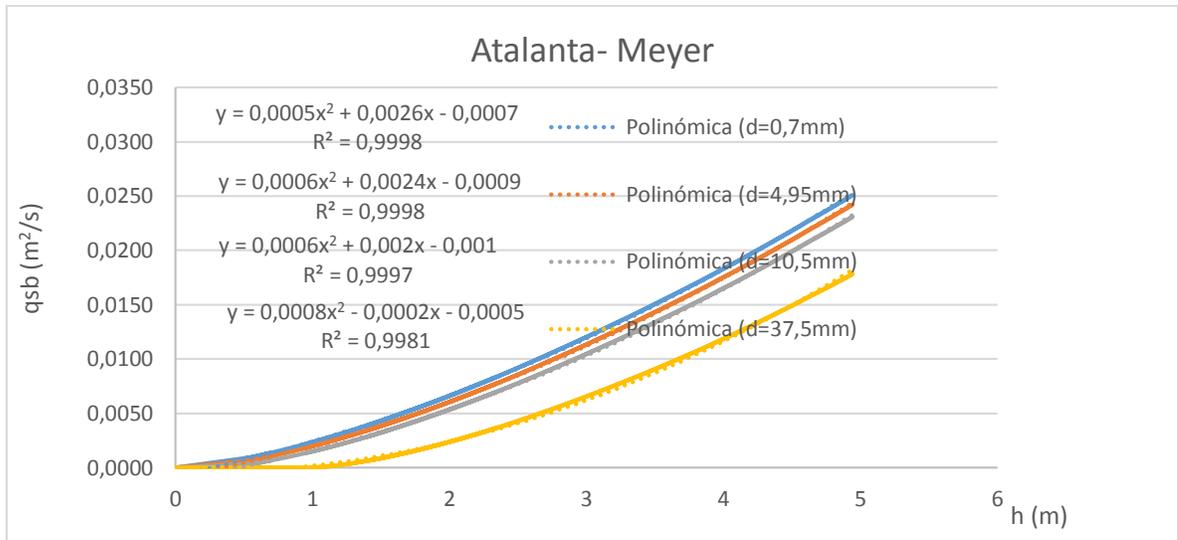


Figura 34. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Meyer en el sector Atalanta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

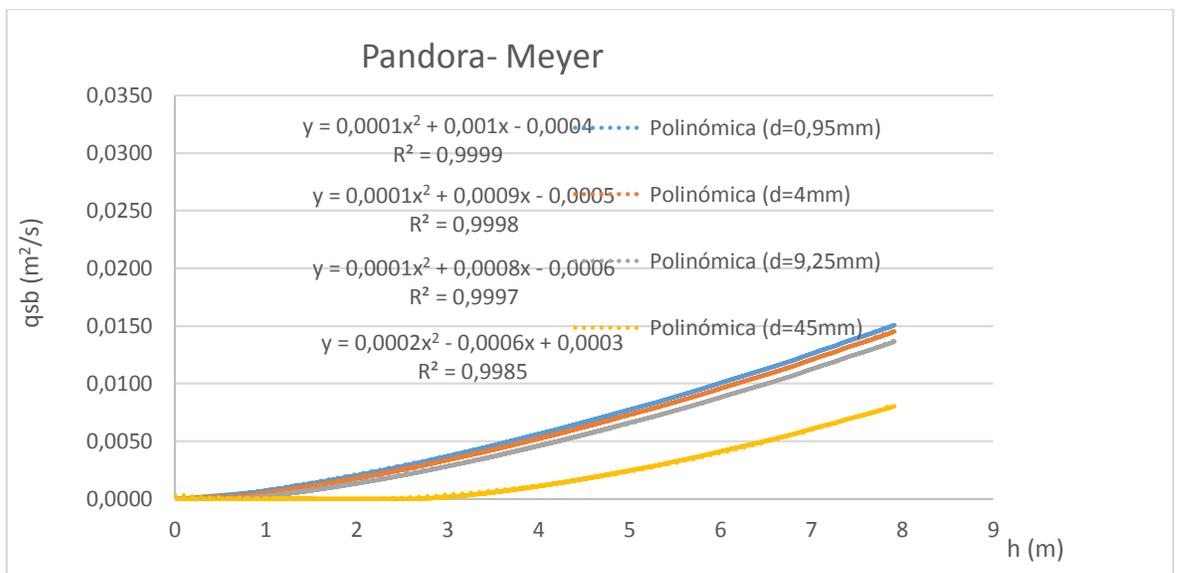


Figura 35. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Meyer en el sector Pandora según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

- **Ecuación de Van Rijn**

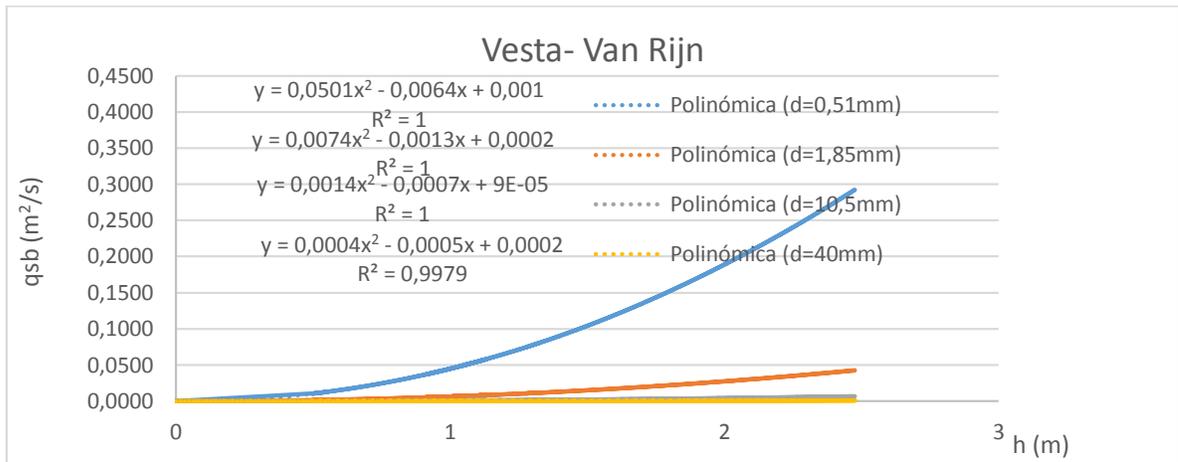


Figura 36. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Van Rijn en el sector Vesta según el diámetro.

Fuente: (elaboración propia)

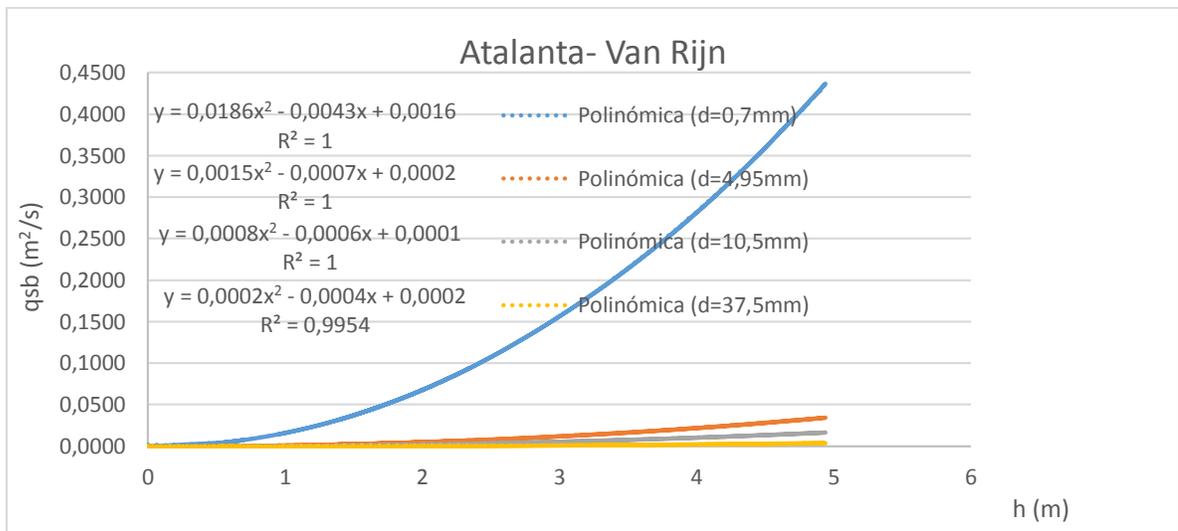


Figura 37. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Van Rijn en el sector Atalanta según el diámetro.

Fuente: (elaboración propia)

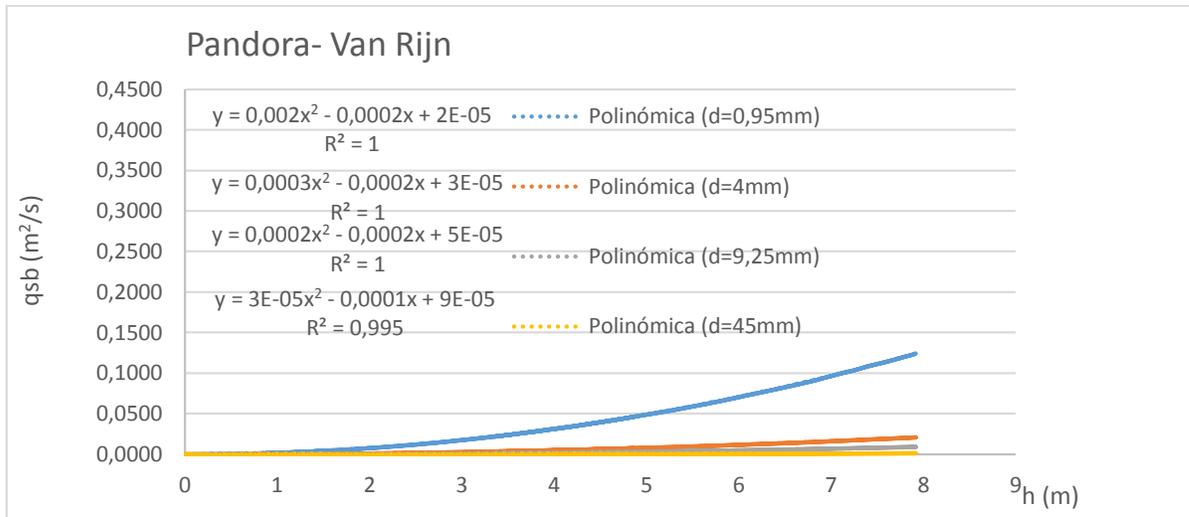


Figura 38. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Van Rijn en el sector Pandora según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

- **Ecuación de Bagnold**

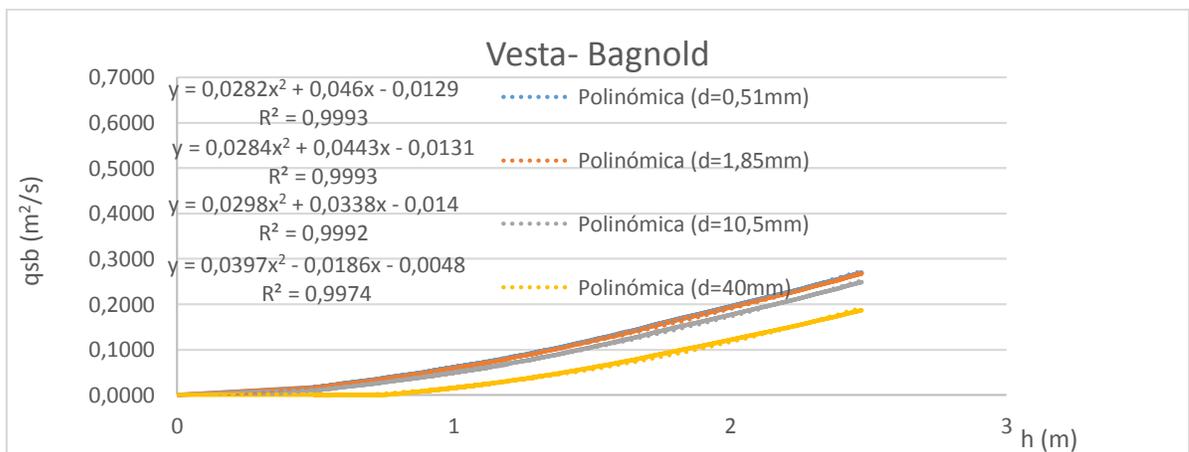


Figura 39. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Bagnold en el sector Vesta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

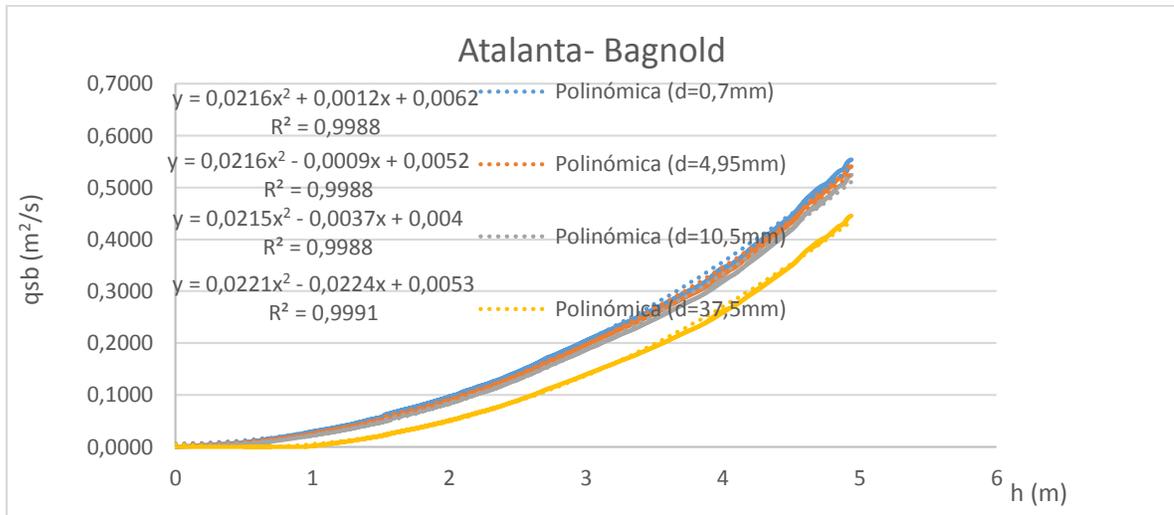


Figura 40. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Bagnold en el sector Atalanta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

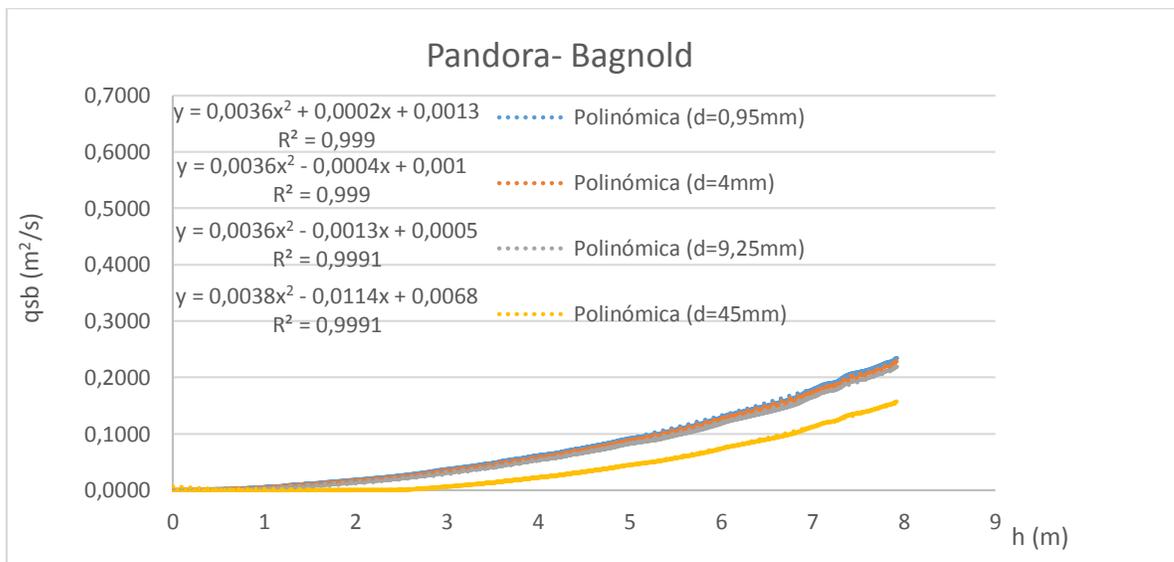


Figura 41. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Bagnold en el sector Pandora según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

- **Ecuación de Yalin**

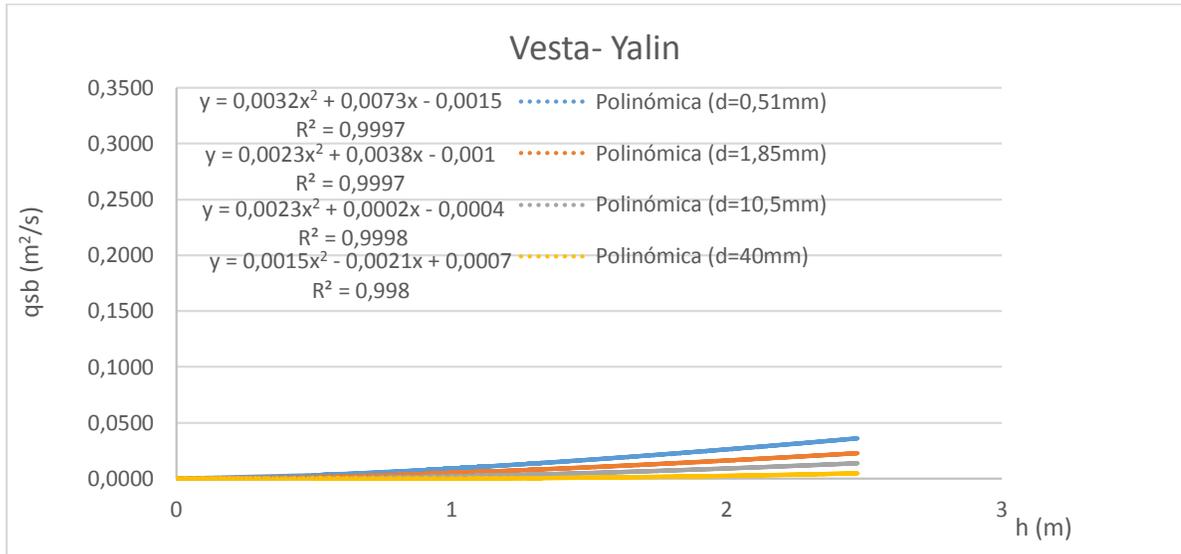


Figura 42. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Yalin en el sector Vesta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

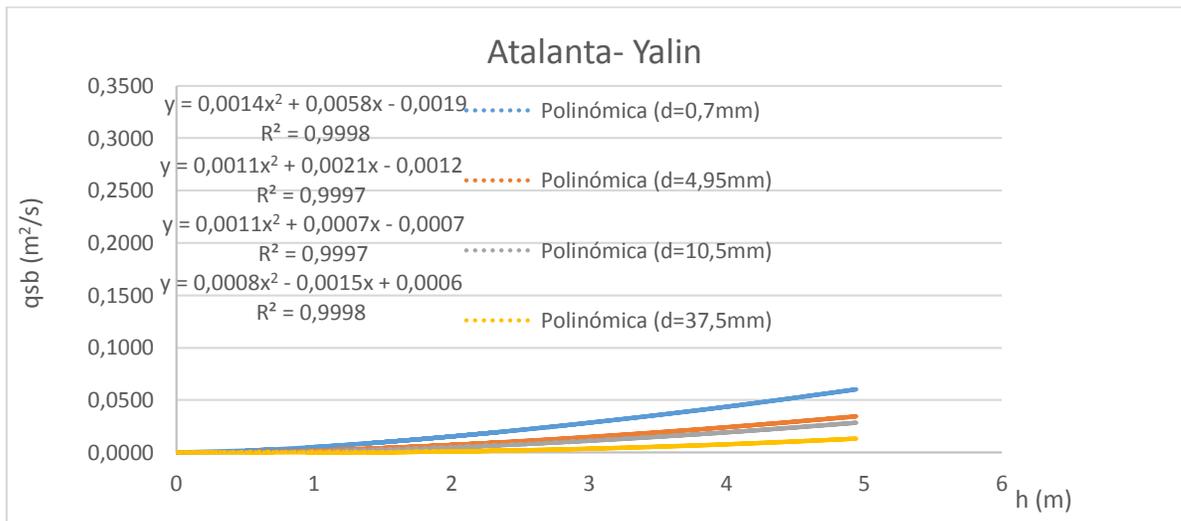


Figura 43. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Yalin en el sector Atalanta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

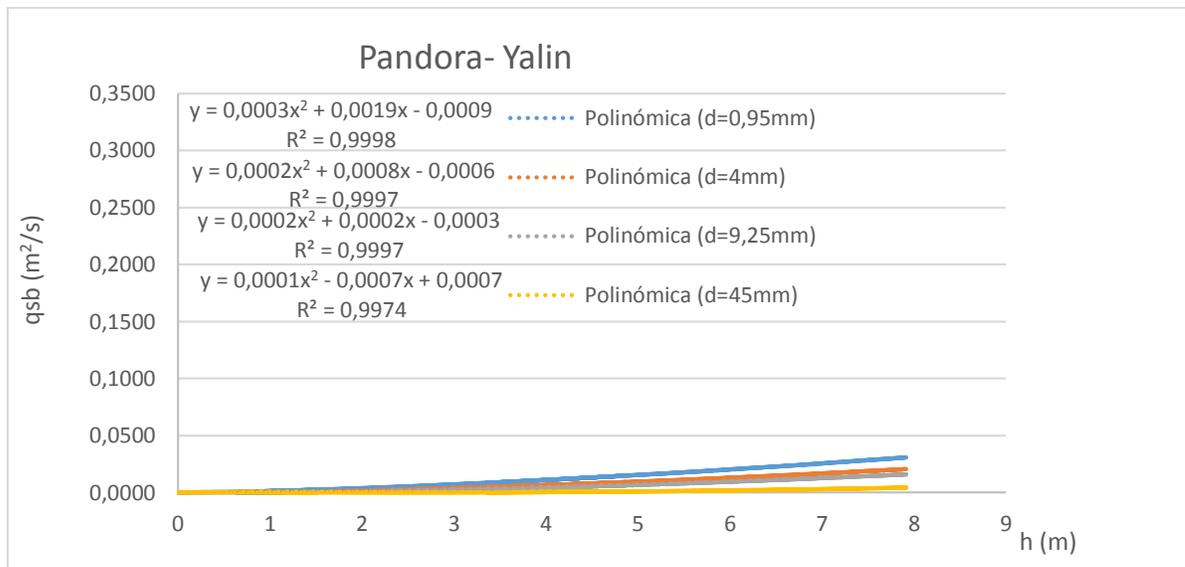


Figura 44. Ecuaciones de mejor ajuste para el transporte uniforme utilizando la ecuación de Yalin en el sector Pandora según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

5.3. Programa Iber en el transporte de sedimento uniforme

El programa de modelación numérica Iber permitió calcular el transporte uniforme con la ecuación de Meyer en los tres sectores: Vesta con un diámetro de 0,51mm, Atalanta utilizando un diámetro de 0,7mm y Pandora con un diámetro de 0,95mm. La razón del porqué se utilizaron estos diámetros es porque naturalmente se obtiene mayor arrastre de sedimento para diámetros pequeños, por lo tanto, se determinará para las condiciones más críticas. En la siguiente figura se muestra los resultados del arrastre según el programa Iber del transporte de sedimento vrs tiempo. En este caso, sólo se tomó en cuenta un solo diámetro, ya que el programa contempla un solo diámetro en todos los sectores, pero las figuras que se muestran van a ser en los sectores con sus respectivos diámetros.

- Vesta

En la siguiente Figura expresa tanto el transporte de sedimento mediante la ecuación de Meyer como el calado de altura de agua, es importante resaltar que la curva no está completa ya que sucedió un problema con la modelación de este tipo, sin embargo, se logra observar el máximo valor de profundidad de agua. Realizando la comparación de esta ecuación con las demás, el comportamiento es muy similar a las ecuaciones: General de Bagnold's y de Yalin, obteniendo valores de transporte uniforme relativamente bajos.

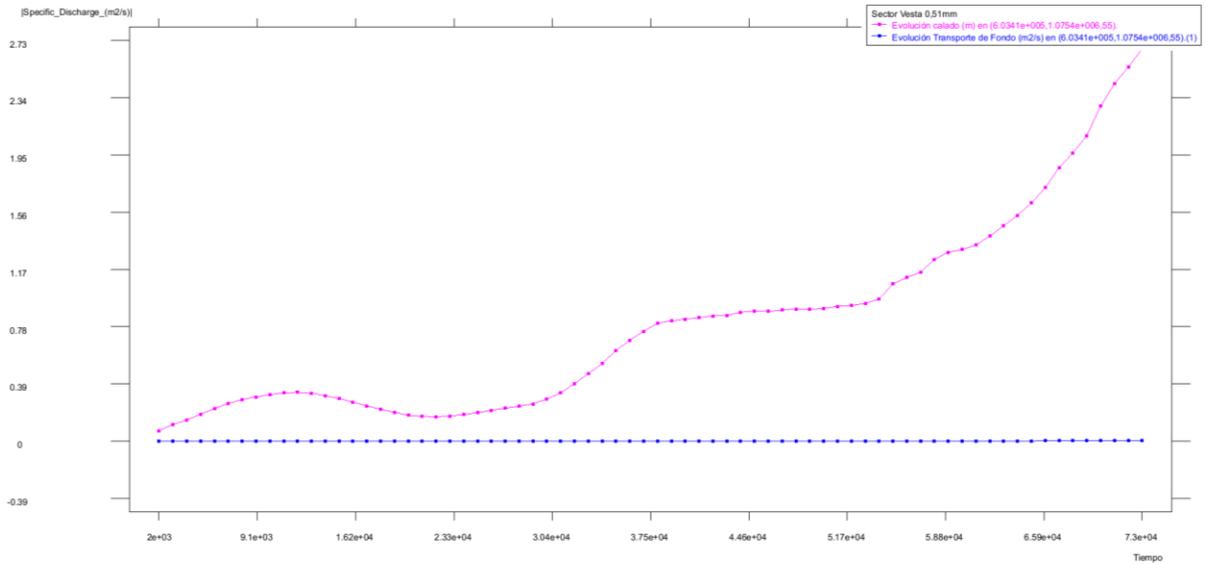


Figura 45. Transporte de sedimento mediante Iber (curva azul) y la profundidad de agua (curva rosada).
Fuente: (elaboración propia)

- Atalanta

A continuación, se muestran las Figuras de los resultados del programa Iber del calado de agua y transporte de sedimento según la evolución del tiempo, así como las dos curvas juntas, respectivamente para el sector de Atalanta

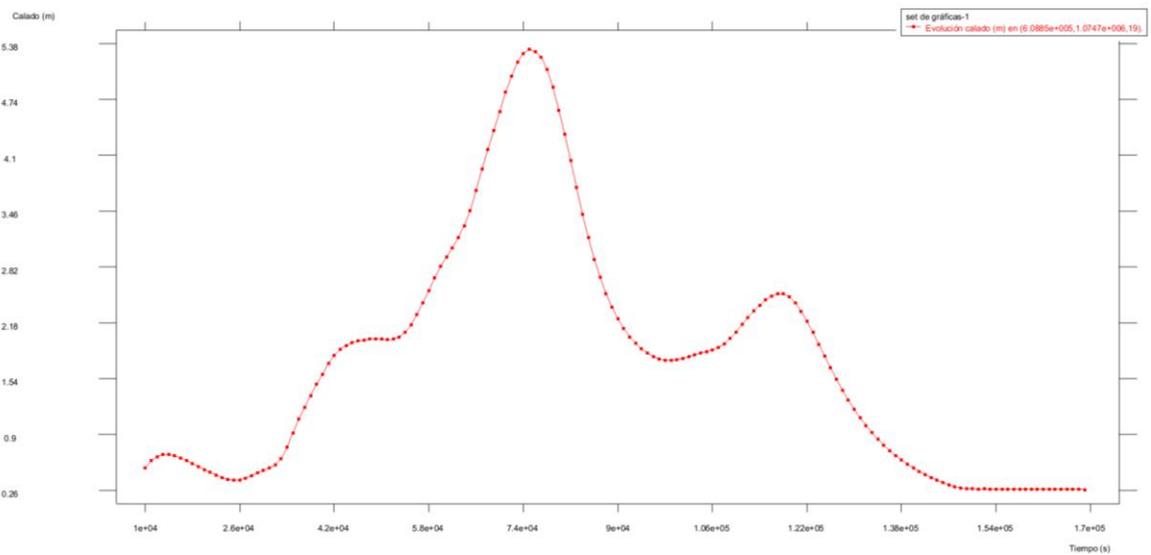


Figura 46. Evolución del calado de agua en el sector Atalanta.

Fuente: (elaboración propia)

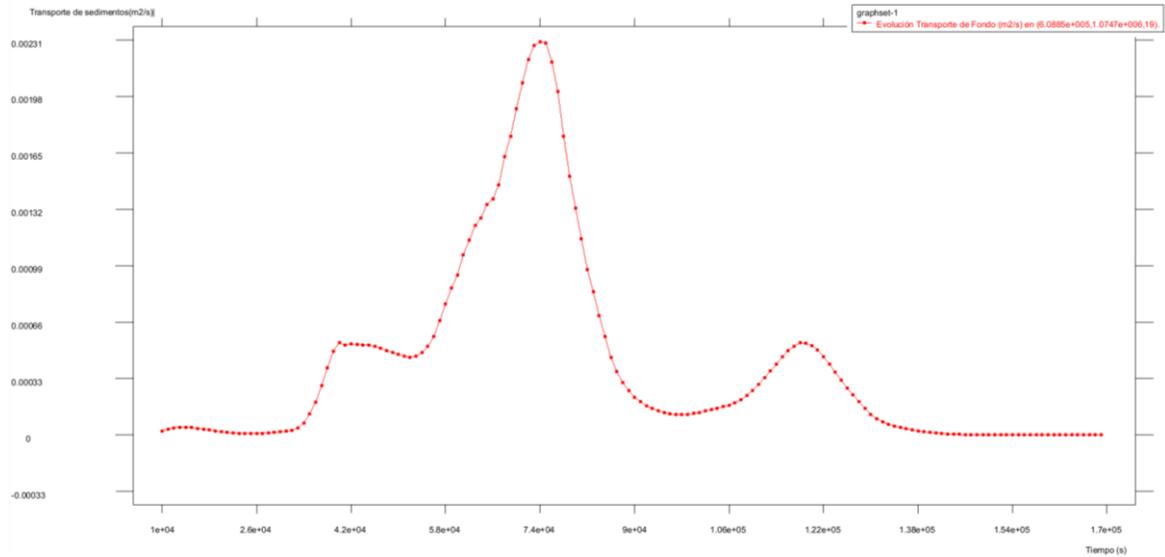


Figura 47. Evolución del transporte de sedimento en el sector Atalanta.

Fuente: (elaboración propia)

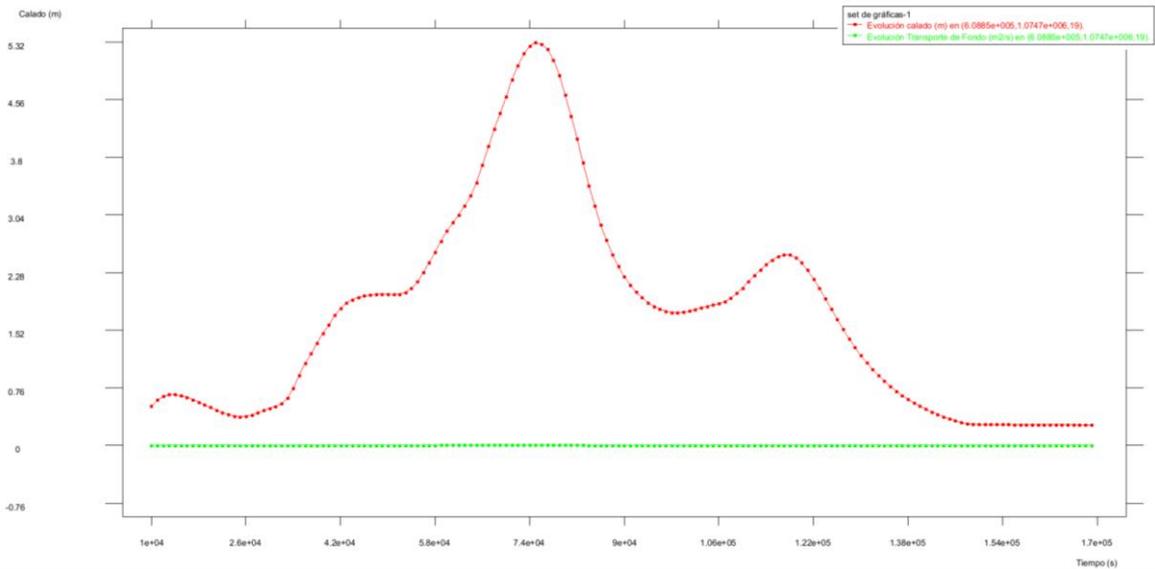


Figura 48. Transporte de sedimento y calado en el sector Atalanta.

Fuente: (elaboración propia)

Como se puede observar la curva de transporte de sedimento es similar al comportamiento de la curva de Vesta, con respecto a los valores en m^2/s , esto debido a que se utiliza la misma ecuación de Meyer tanto en Vesta como en Atalanta. Se puede

observar que en los tres sectores se obtienen resultados de transporte de sedimento relativamente bajos comparados con las ecuaciones de Bagnold y Van Rijn, teniendo como referencia datos parecidos a la General de Bagnold's y Yalin.

- Pandora

A continuación, se muestran las Figuras de los resultados del programa Iber del calado de agua y transporte de sedimento, así como las dos curvas juntas, respectivamente.

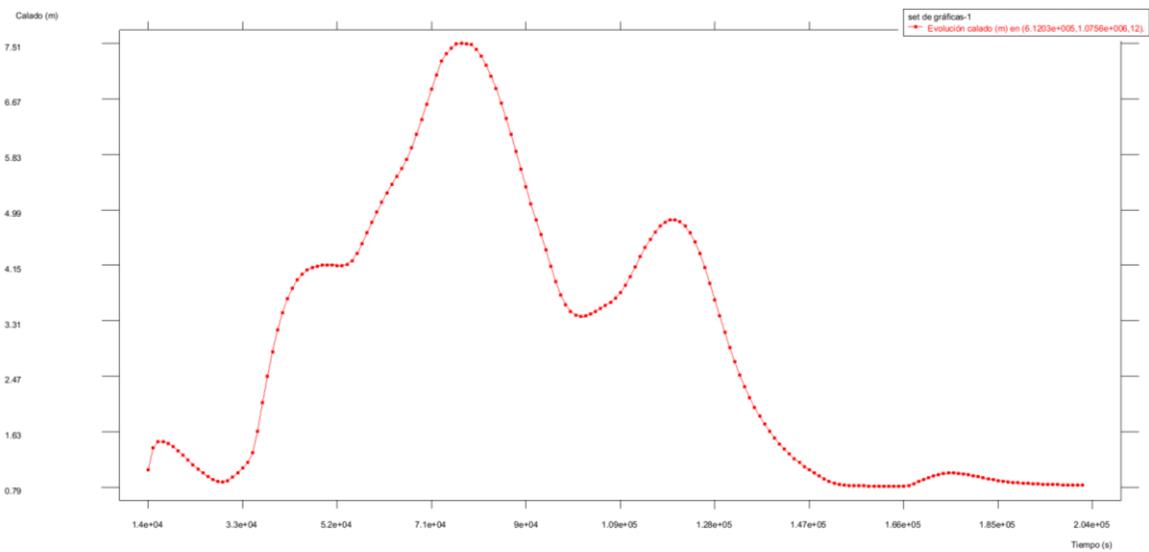


Figura 49. Evolución del calado de agua en el sector Pandora.

Fuente: (elaboración propia)

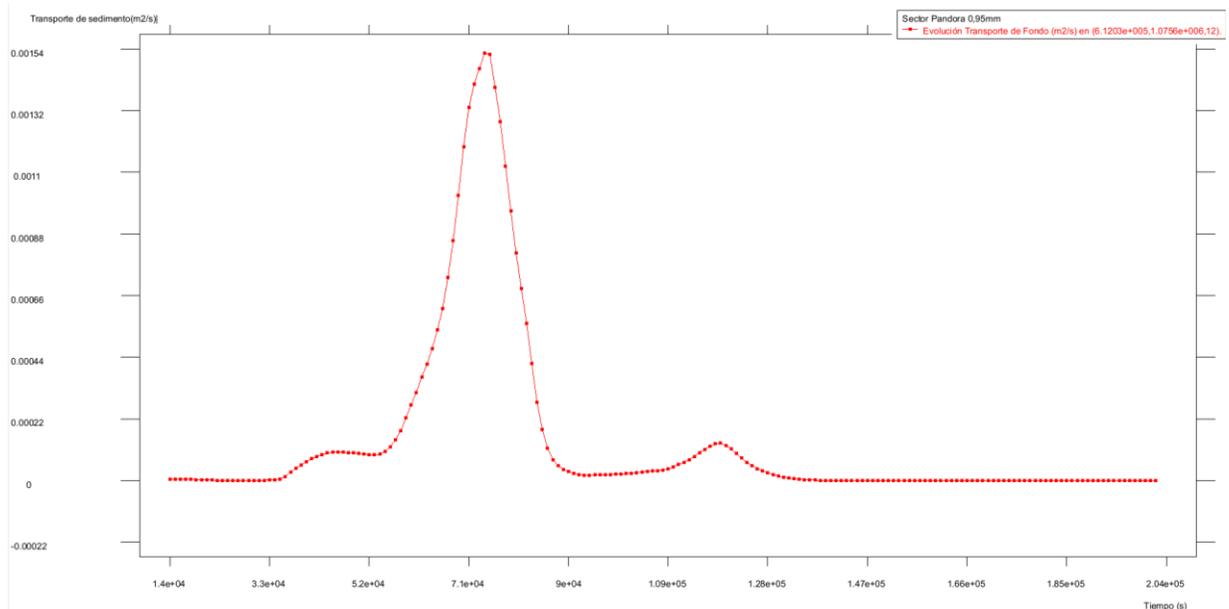


Figura 50. Evolución del transporte de sedimento en el sector Pandora.

Fuente: (elaboración propia)

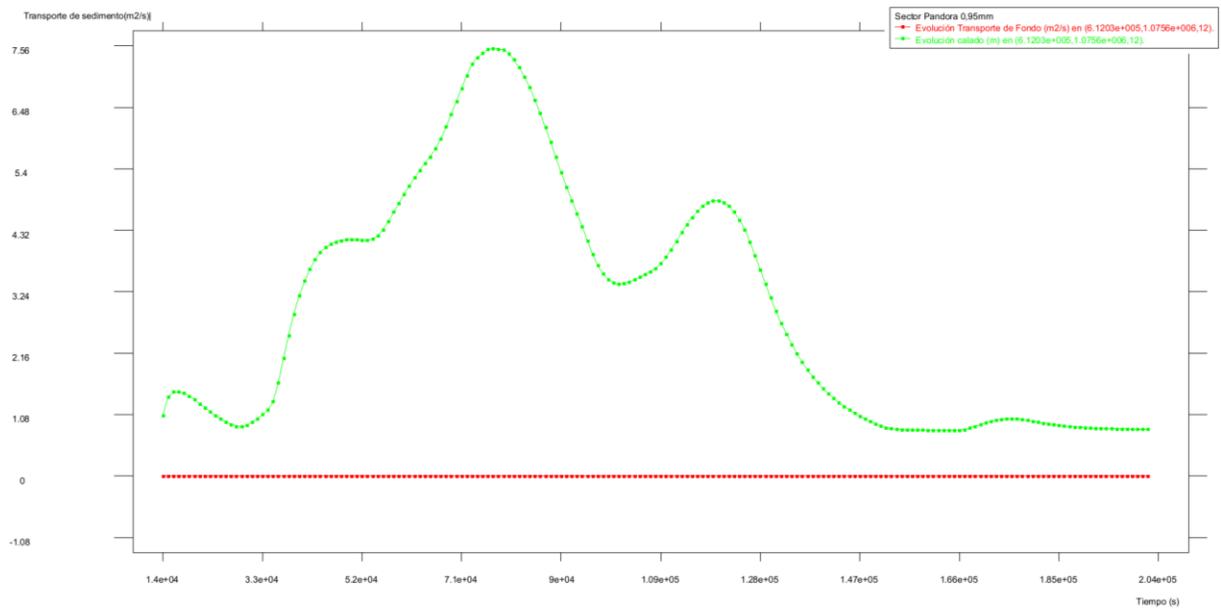


Figura 51. Transporte de sedimento y calado en el sector Pandora.

Fuente: (elaboración propia)

Como se puede observar la curva de transporte de sedimento es similar al comportamiento de la curva de Vesta, con respecto a los valores en m^2/s , esto debido a que se utiliza la misma

ecuación de Meyer tanto en Vesta como en Atalanta. Se puede observar que en los tres sectores se obtienen resultados de transporte de sedimento relativamente bajos comparados con las ecuaciones de Bagnold y Van Rijn, teniendo como referencia datos parecidos a la General de Bagnold's y Yalin.

5.4. Transporte de sedimento uniforme según las ecuaciones utilizadas

Al graficar las ecuaciones utilizadas con la sumatoria del transporte de sedimento tomando en cuenta todos los diámetros en cada sector, así como los resultados obtenidos del programa Iber

- Vesta

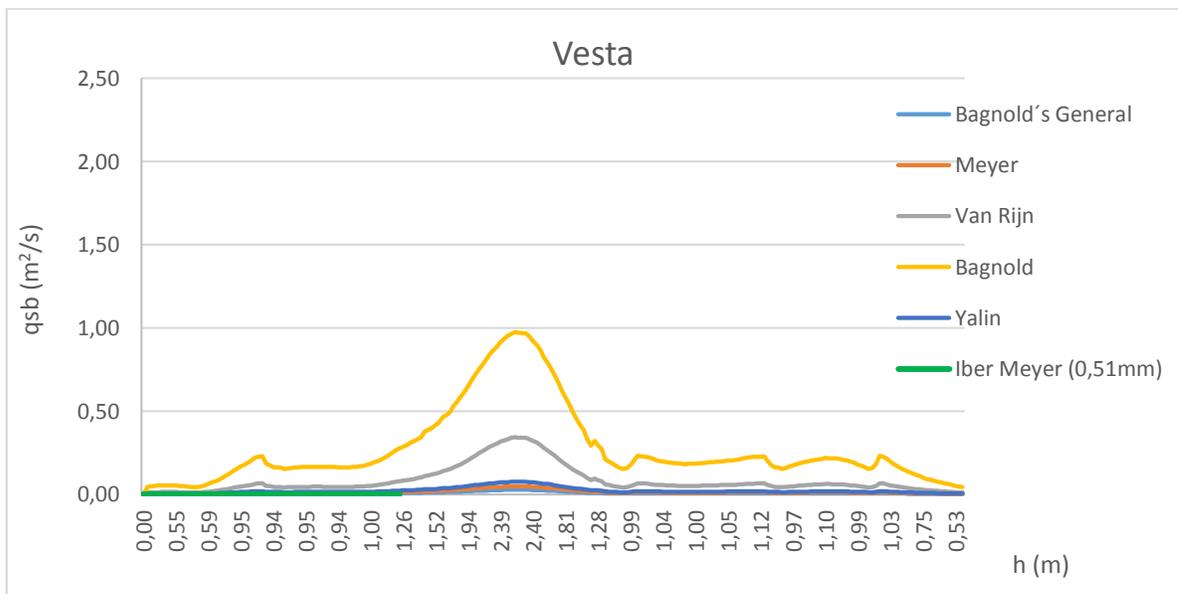


Figura 52. Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua con las ecuaciones utilizadas para el sector Vesta.

Fuente: (elaboración propia)

Para el sector Vesta se puede observar que en la ecuación de Bagnold (línea amarilla) es la que presenta mayor transporte de sedimento, seguido por la de Van Rijn, después por la de Yalin, Meyer y por último la ecuación General de Bagnold. Además, se incluye el resultado del programa Iber, obteniendo un efecto igual que las ecuaciones que presentan poco arrastre.

- Atalanta

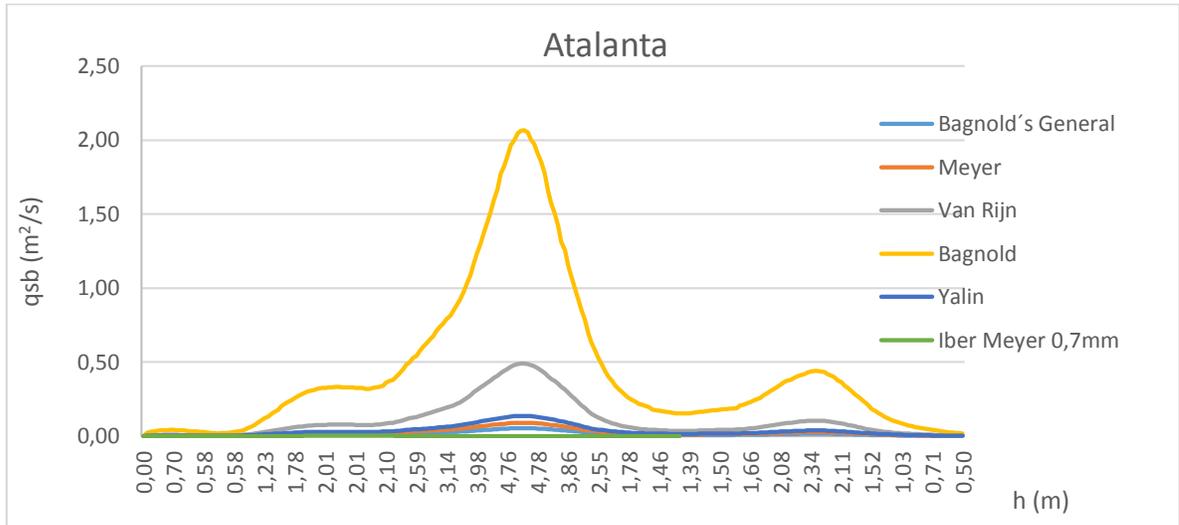


Figura 53 Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua con las ecuaciones utilizadas para el sector Atalanta.

Fuente: (elaboración propia)

En Atalanta permanece el mismo patrón que en Vesta, por lo que su comportamiento es igual; además, con esta Figura se termina de confirmar que en Atalanta se produce el mayor transporte por unidad de ancho de los sectores.

- Pandora

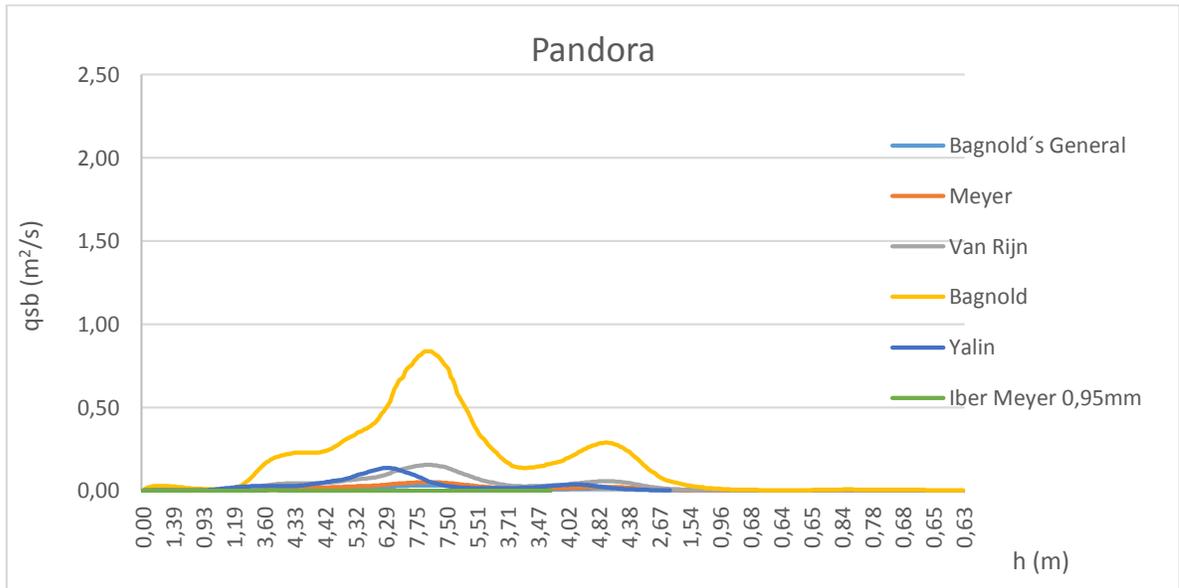


Figura 54 Transporte de sedimento uniforme según la profundidad de agua con las ecuaciones utilizadas para el sector Pandora.

Fuente: (elaboración propia)

Finalmente, el sector de Pandora, el cual procede de la misma manera que los anteriores sectores, teniendo el segundo puesto con respecto a al sector Atalanta en cantidad de transporte de sedimento; incluyendo los resultados del programa Iber, donde puede apreciar que las deducciones son muy parecidos a los resultados obtenidos en la hoja de cálculo Excel con la ecuación Meyer, por lo que se considera que los resultados son correctos.

5.5. Transporte de sedimento no uniforme

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del transporte de sedimento no uniforme utilizando las ecuaciones de la (10) a la (16). Es importante destacar que el programa Iber no contiene ecuaciones para el transporte de sedimento no uniforme, el cual, como se mencionó en el apartado de Revisión de Literatura, este tipo de análisis consta de fraccionamiento de los diámetros que se muestran en cada sector del río en análisis; después, las ecuaciones que se utilizan difieren entre sí, con respecto a las del transporte uniforme.

Seguidamente se muestran los resultados obtenidos para este tipo de transporte, según cada ecuación y sector utilizados.

- **Ecuación de Egiazaroff**

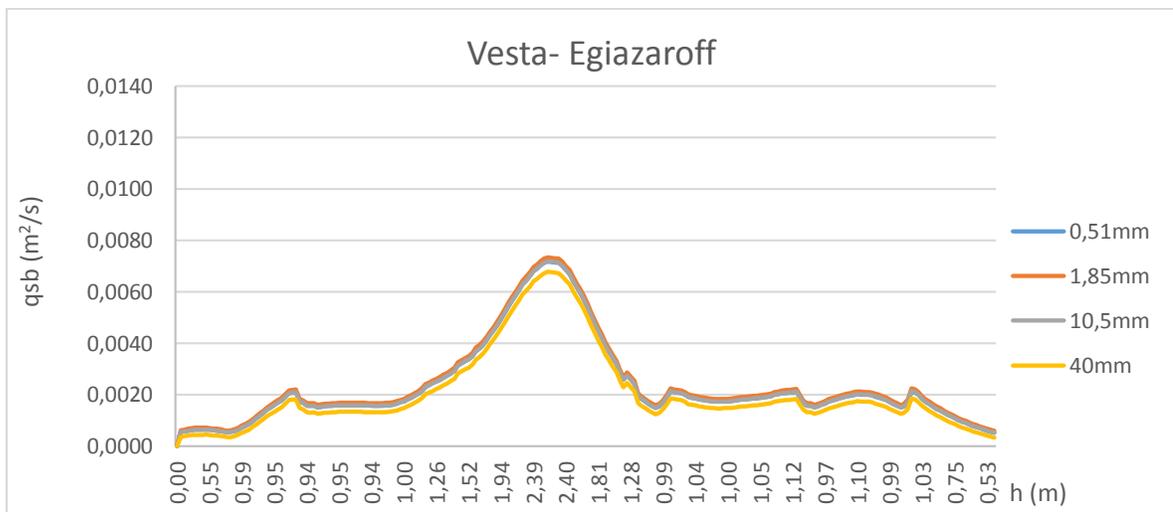


Figura 55. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la fórmula de Egiazaroff en el sector Vesta.
Fuente: (elaboración propia)

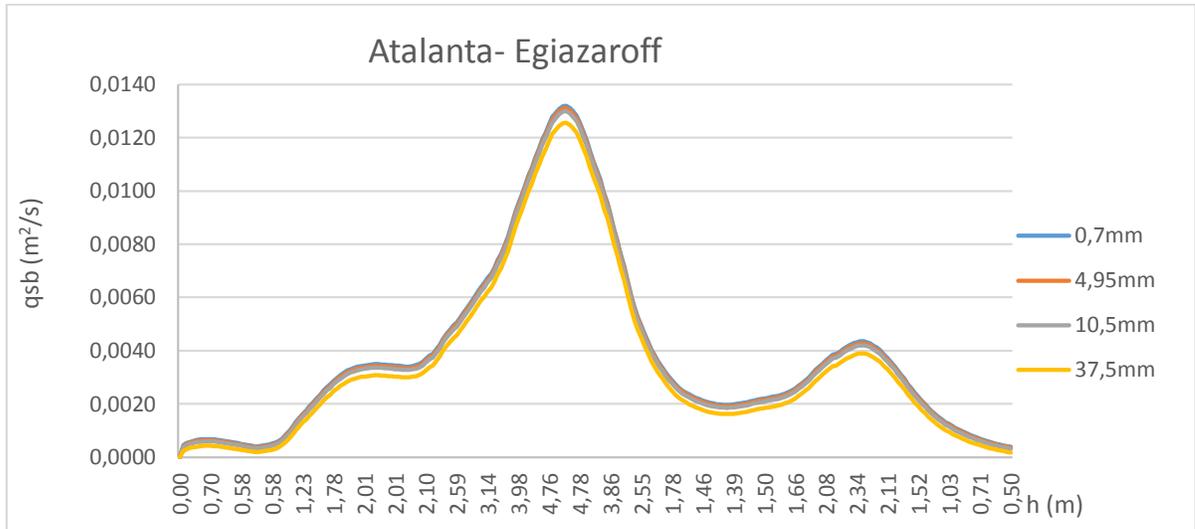


Figura 56. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la fórmula de Egiazaroff en el sector Atalanta.
Fuente: (elaboración propia)

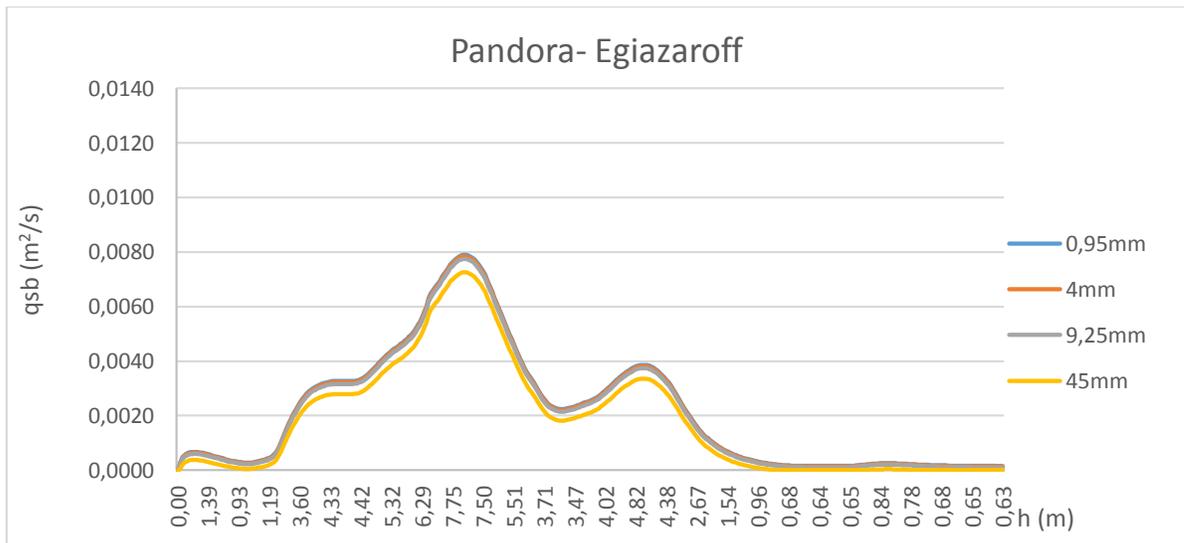


Figura 57. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la fórmula de Egiazaroff en el sector Pandora.
Fuente: (elaboración propia)

Según la ecuación de Egiazaroff, en los tres sectores, el comportamiento es el mismo, siendo el de mayor diámetro el que obtenga menor cantidad de transporte por unidad de ancho. Con un orden descendiente de Atalanta, Pandora y Vesta con respecto a sus valores máximos.

- **Ecuación de Weiming Egiazaroff**

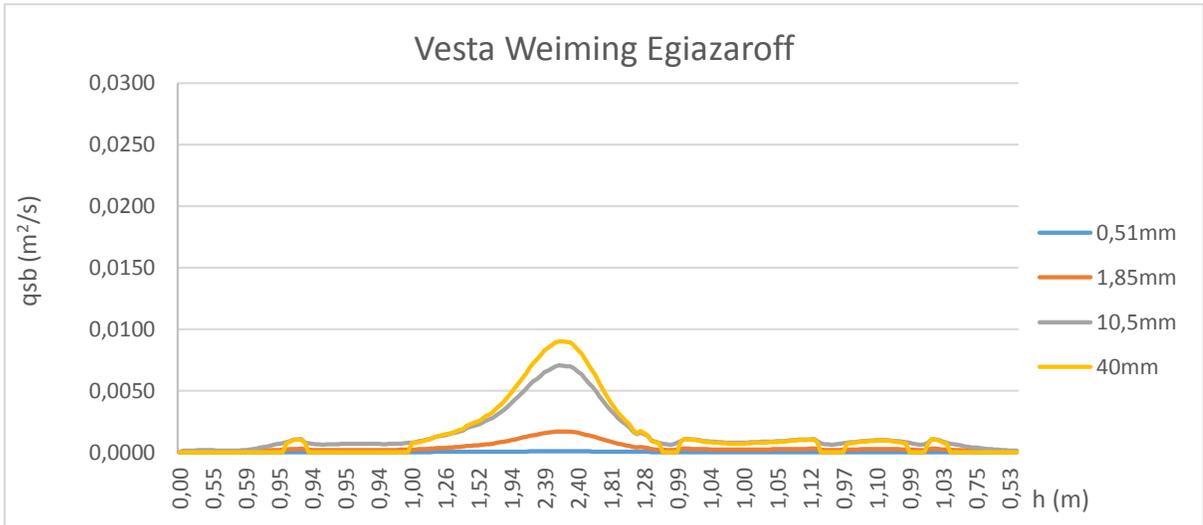


Figura 58. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la fórmula de Weiming Egiazaroff en el sector Vesta.

Fuente: (elaboración propia)

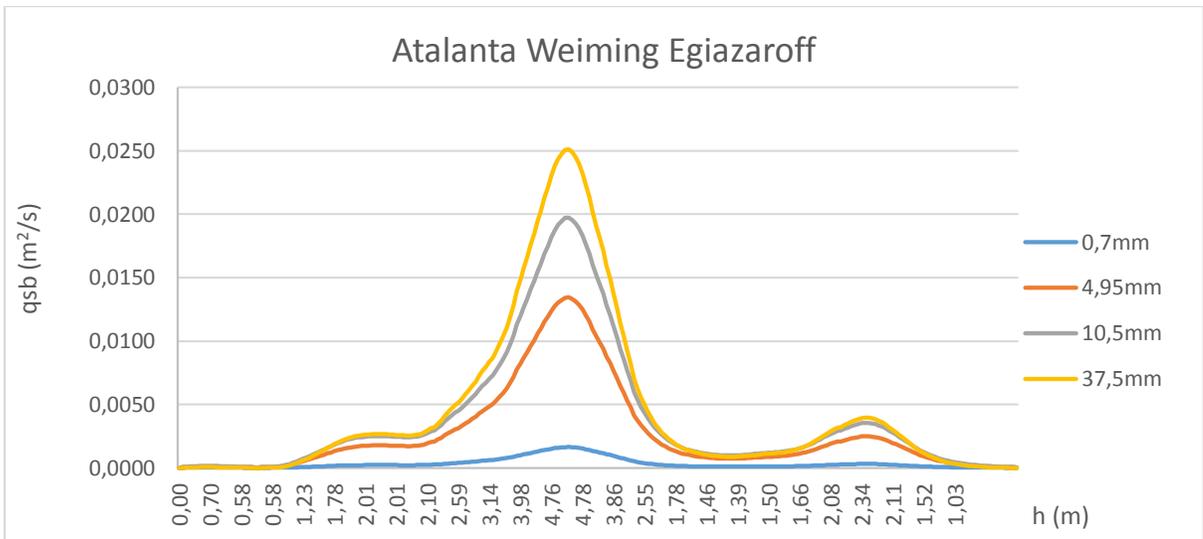


Figura 59. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la fórmula de Weiming Egiazaroff en el sector Atalanta.

Fuente: (elaboración propia)

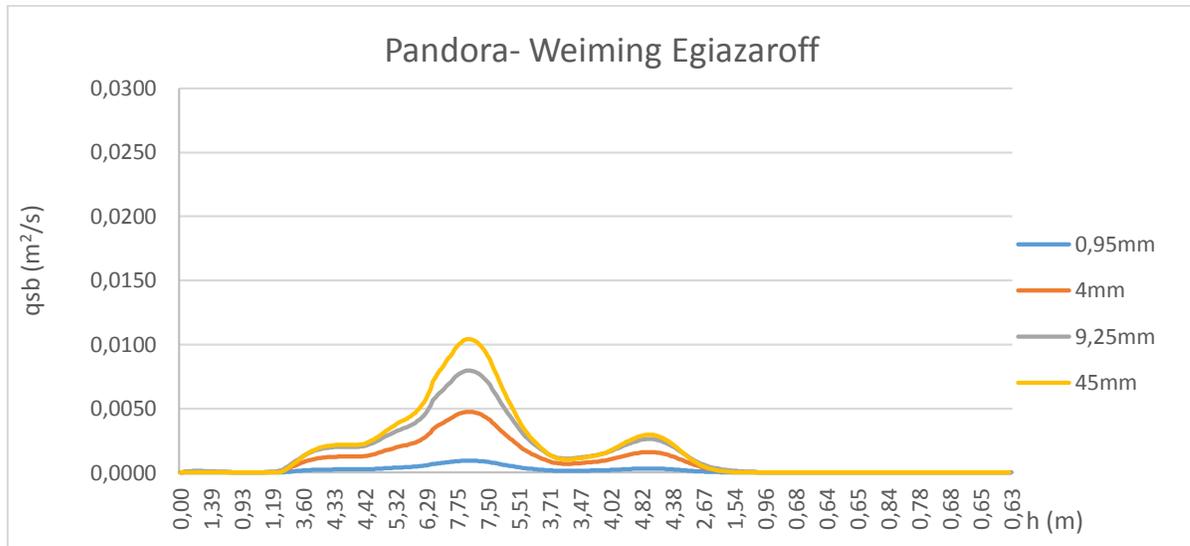


Figura 60. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la fórmula de Weiming Egiazaroff en el sector Pandora.

Fuente: (elaboración propia)

Utilizando la ecuación de Weiming pero con los parámetros de Egiazaroff, se puede observar que hay una diferencia entre valores respecto a la ecuación de 11, tales diferencias pueden deberse a:

- Los diámetros pequeños y medianos se comportan considerablemente desigual al utilizar esta ecuación, por lo que se puede deducir que hay que ser muy específico con la escogencia de diámetros a utilizar dependiendo de los que existan en el río y lo que se quiera encontrar en él en próximas decisiones.
- Los diámetros mayores (40mm, 37,5mm y 40mm) respectivamente, obtienen mayor transporte de sedimento, esto quiere decir que, para obtener arrastre de sedimento, no se necesitan elevaciones de agua altas según la ecuación, para que se produzca el transporte, de ahí la importancia de conocer las profundidades de agua para la obtención de dicho transporte.
- La diferencia en porcentaje con respecto a la ecuación de Egiazaroff es de 47% para el sector de Atalanta.

- **Ecuación de Hayashi**

Es importante mencionar que, en este caso, para recurrir a las ecuaciones (12) y (13) se debe realizar la división correspondiente para conocer a partir de cuál diámetro se debe utilizar la ecuación correcta. En los siguientes cuadros se muestran los resultados correspondientes

Cuadro 3. Ecuación a utilizar según división $(D50)_i$ entre D50, para las ecuaciones (12) y (13) en el sector Vesta.

Vesta Hayashi

$(D50)_i$ (mm)	D50 (mm)	$\langle \rangle 1$	Ecuación a utilizar
0,51	5	0,102	13
1,85		0,37	13
10,5		2,1	12
40		8	12

Fuente: (elaboración propia)

Cuadro 4. Ecuación a utilizar según división $(D50)_i$ entre D50, para las ecuaciones (12) y (13) en el sector Atalanta.

Atalanta Hayashi

$(D50)_i$ (mm)	D50 (mm)	$\langle \rangle 1$	Ecuación a utilizar
0,7	4	0,175	13
4,95		1,2375	12
10,5		2,625	12
37,5		9,375	12

Fuente: (elaboración propia)

Cuadro 5. Ecuación a utilizar según división $(D50)_i$ entre D50, para las ecuaciones (12) y (13) en el sector Pandora.

Pandora Hayashi

$(D50)_i$ (mm)	D50 (mm)	$\langle \rangle 1$	Ecuación a utilizar
0,95	4	0,2375	13
4		1	13
9,25		2,3125	12
40		10	12

Fuente: (elaboración propia)

En las siguientes Figuras se muestran los resultados obtenidos al utilizar la ecuación de Hayashi.

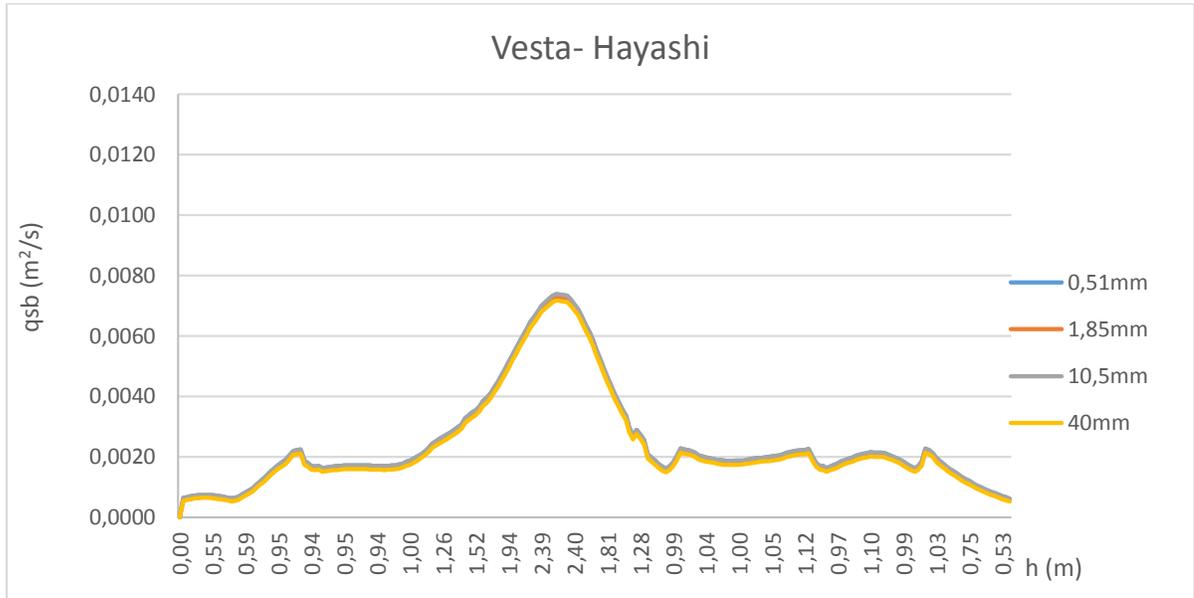


Figura 61. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Hayashi en el sector Vesta.
Fuente: (elaboración propia)

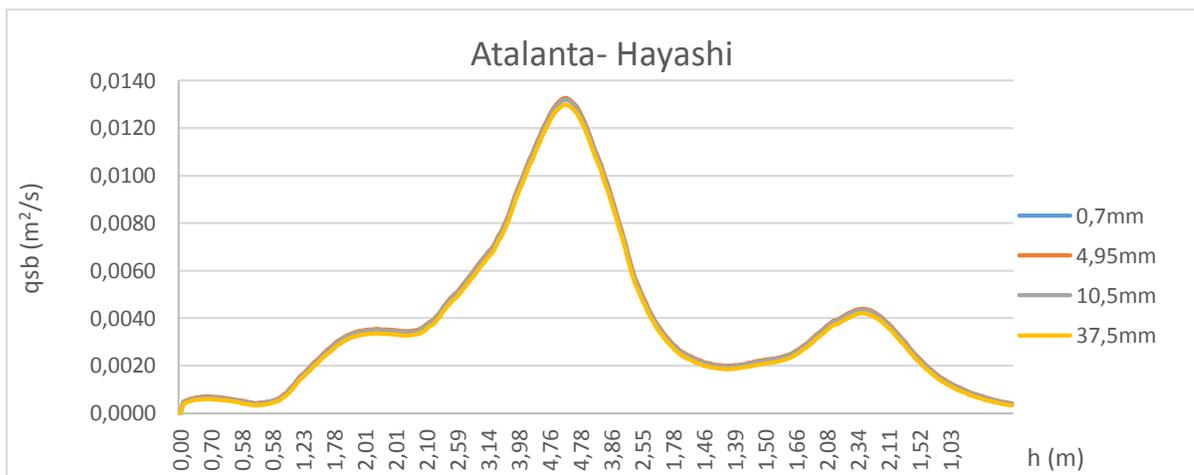


Figura 62. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Hayashi en el sector Atalanta.
Fuente: (elaboración propia)

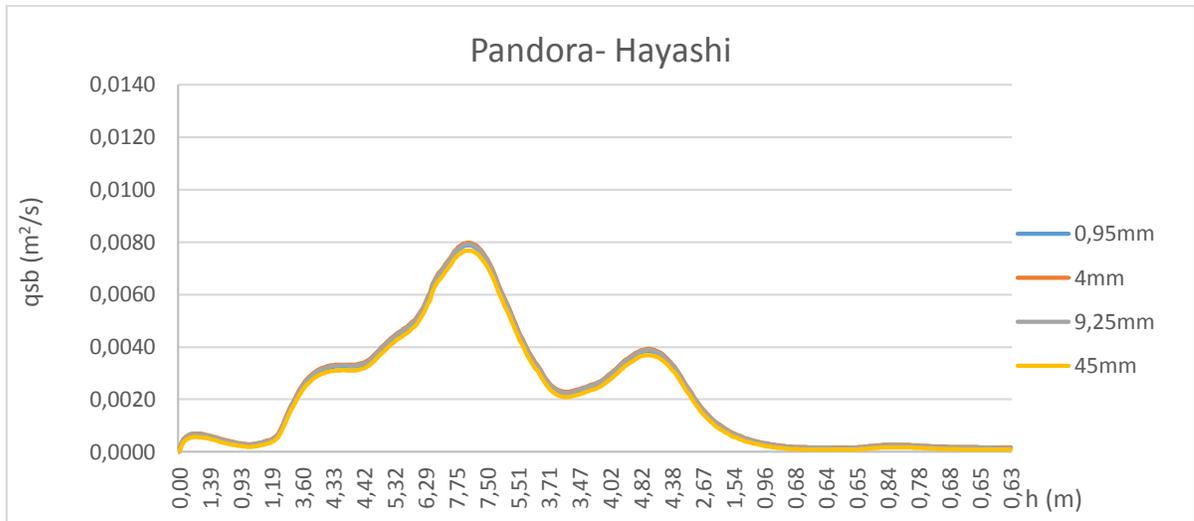


Figura 63. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Hayashi en el sector Pandora.

Fuente: (elaboración propia)

Como se muestra, en los tres sectores, los resultados son similares para todos los diámetros, existe una leve diferencia entre los diámetros mayores, pero esta circunstancia se considera normal ya que los diámetros mayores son grandes.

- **Ecuación de Weiming Hayashi**

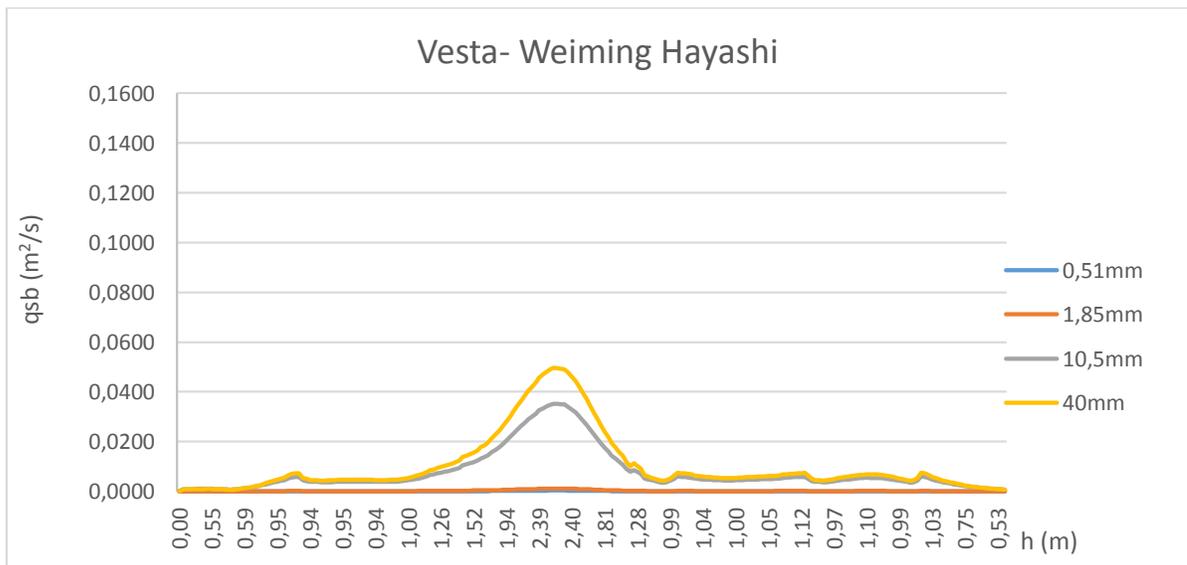


Figura 64. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Weiming Hayashi en el sector Vesta.

Fuente: (elaboración propia)

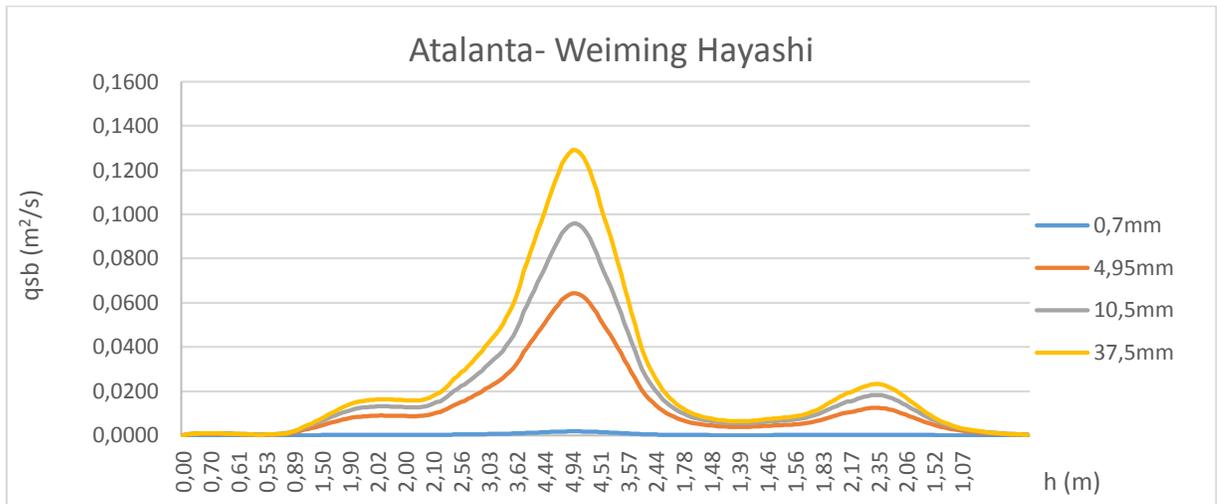


Figura 65. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Weiming Hayashi en el sector Atalanta.
Fuente: (elaboración propia)

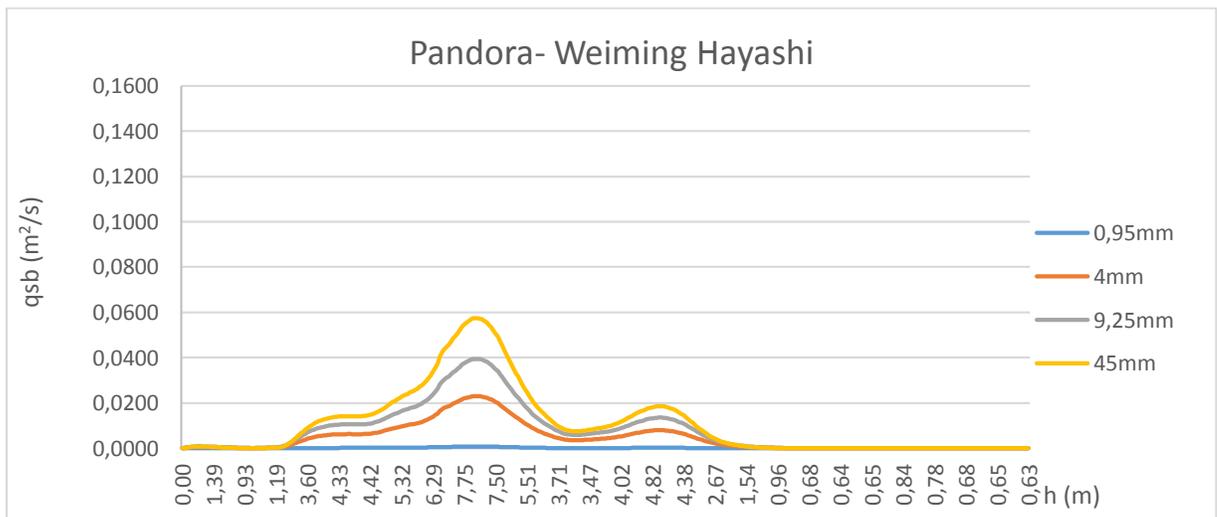


Figura 66. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua utilizando la ecuación de Weiming Hayashi en el sector Pandora.
Fuente: (elaboración propia)

En la utilización de la ecuación de Weiming con los parámetros de Hayashi, se puede observar que tiene un comportamiento similar al de Weiming Egiazaroff: donde difiere el transporte con cada diámetro.

Además, con esta ecuación la magnitud del arrastre es mayor que en todas las ecuaciones anteriores, siguiendo el mismo patrón descendiente: Atalanta, Pandora y Vesta; llegando a tener en el sector de Atalanta un máximo casi de $0,14 \text{ m}^2/\text{s}$. Entonces, se puede mencionar que si se quiere obtener resultados para condiciones críticas, esta sería la ecuación idónea para la toma de decisiones.

El porcentaje de diferencia con respecto a Hayashi es de 90% para el sector de Atalanta. Como este método es el que presenta mayor arrastre de sedimento se comparará con el que presenta menor transporte, en este caso Egiazaroff, obteniendo un porcentaje de diferencia de 90%, de igual manera para el sector de Atalanta.

5.6. Transporte de sedimento no uniforme según las ecuaciones utilizadas

En las siguientes Figuras se mostrarán el arrastre de sedimento según la altura, con los métodos utilizados en el transporte no uniforme. Se tomará en comparación los resultados obtenidos con el D50 en cada sector para conocer cuánto varía, los D50 para cada sector son: En Vesta $2,2\text{mm}$; en Atalanta 4mm y en Pandora $4,5\text{mm}$

- Vesta

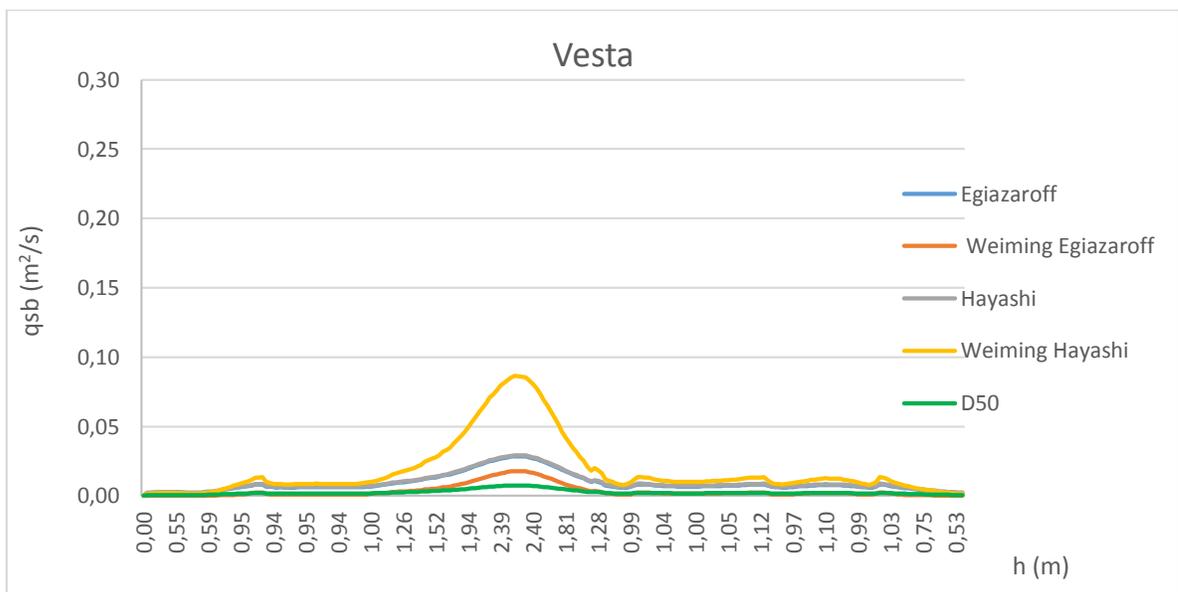


Figura 67. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua con las ecuaciones utilizadas para el sector Vesta.

Fuente: (elaboración propia)

Además se obtuvo un 70,06% de diferencia con respecto al D50 con la fórmula Egiazaroff, un 68,12% para la ecuación de Weiming Egiazaroff, un 90,07% en la ecuación de Hayashi, un 70,11% para la ecuación de Weiming Hayashi. Como se puede observar en todos los casos el porcentaje es mayor al 50% por lo que se demuestra la importancia de conocer el fraccionamiento de los diámetros existentes.

- Atalanta

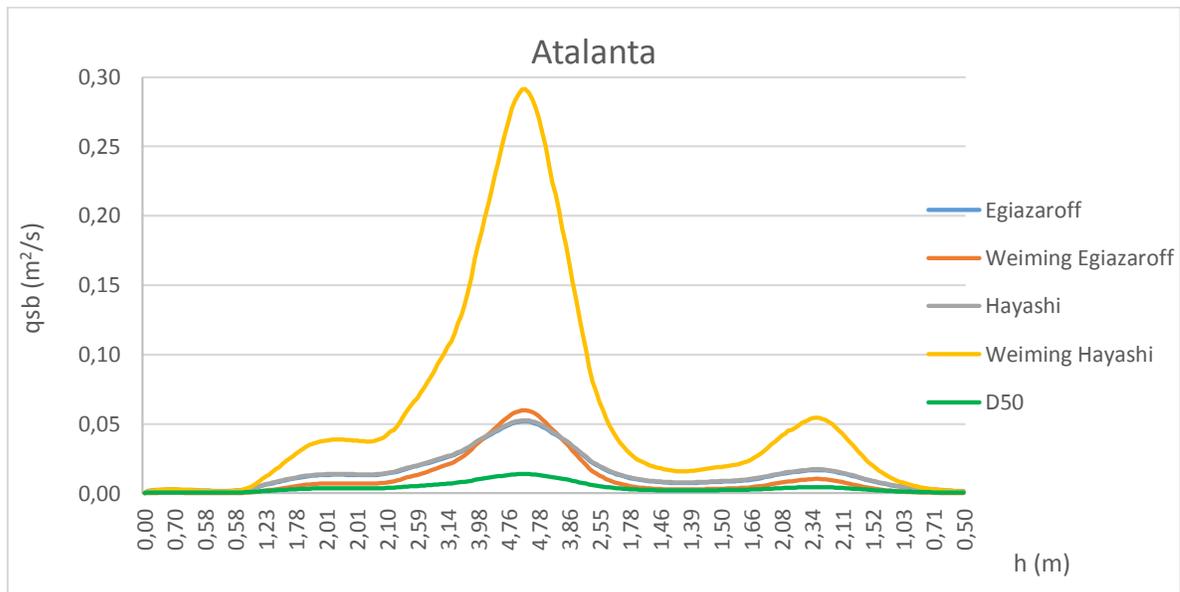


Figura 68. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua con las ecuaciones utilizadas para el sector Atalanta.

Fuente: (elaboración propia)

Los porcentajes de diferencia entre los diámetros utilizados y el diámetro medio son los siguientes. Un 72,25% con la ecuación Egiazaroff, un 70,91% para la ecuación de Weiming Egiazaroff, un 91,55% en la ecuación de Hayashi, un 72,39% para la ecuación de Weiming Hayashi. Al igual que Vesta se determina que es de suma importancia conocer el fraccionamiento de diámetros presentes en cada sector del río para obtener resultados más confiables.

- Pandora

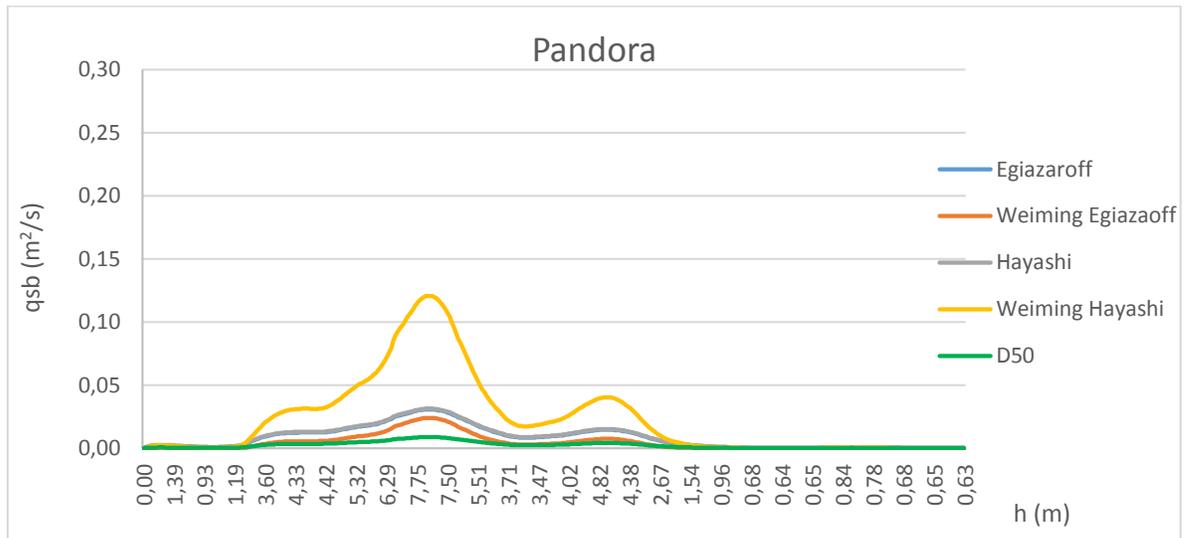


Figura 69. Transporte de sedimento no uniforme según la profundidad de agua con las ecuaciones utilizadas para el sector Pandora.
Fuente: (elaboración propia)

Como se mostró, en los gráficos existe una curva más, la cual se llama D50 en todos los sectores, esta curva de color verde es para diferenciar cómo se comporta el transporte de sedimento cuando se utiliza sólo el diámetro medio presente en un río y cuando se utiliza el fraccionamiento explicado con anterioridad, al tomar en cuenta las condiciones no uniformes. En este caso sólo se tomó en cuenta la ecuación General de Bagnold's.

Se reveló que cuando se utiliza sólo el D50, es decir, el diámetro medio, la cantidad de transporte de sedimento por unidad de ancho es menor considerablemente, que si se utilizara las fracciones de los diámetros, de ahí la importancia de conocer los diferentes diámetros presentes en los ríos a analizar con el fin de conocer la estimación del arrastre de sedimento de una manera más confiable y correcta.

Con respecto al D50 para el sector Pandora se obtienen los siguientes resultados, un 71,59% con la ecuación Egiazaroff, un 72,72% para la ecuación de Weiming Egiazaroff, un 88,46% en la ecuación de Hayashi, un 71,47% para la ecuación de Weiming Hayashi.

5.7. Transporte de sedimento no uniforme de distribución para obtener la curva de mejor ajuste

En las siguientes Figuras, al igual que en las condiciones uniformes se determinarán las curvas de distribución de mejor ajuste para conocer cuál es el resultado del arrastre, según el diámetro y la altura a considerar; de igual manera se utilizó la línea de tendencia polinómica obteniendo un coeficiente de determinación cercano uno.

- **Ecuación de Egiazaroff**

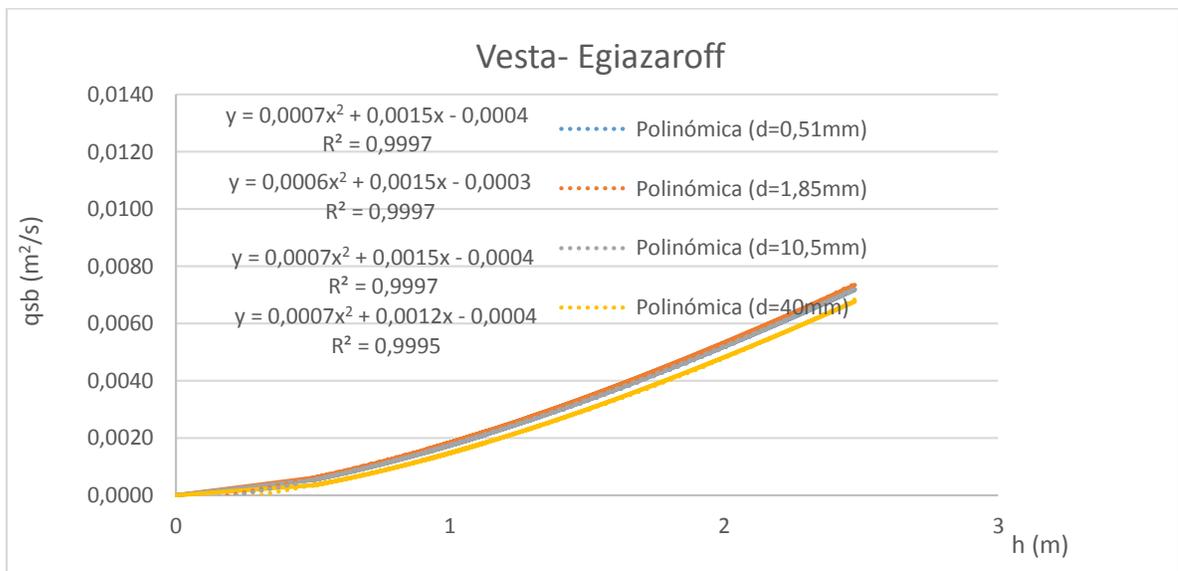


Figura 70. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Egiazaroff en el sector Vesta según el diámetro.

Fuente: (elaboración propia)

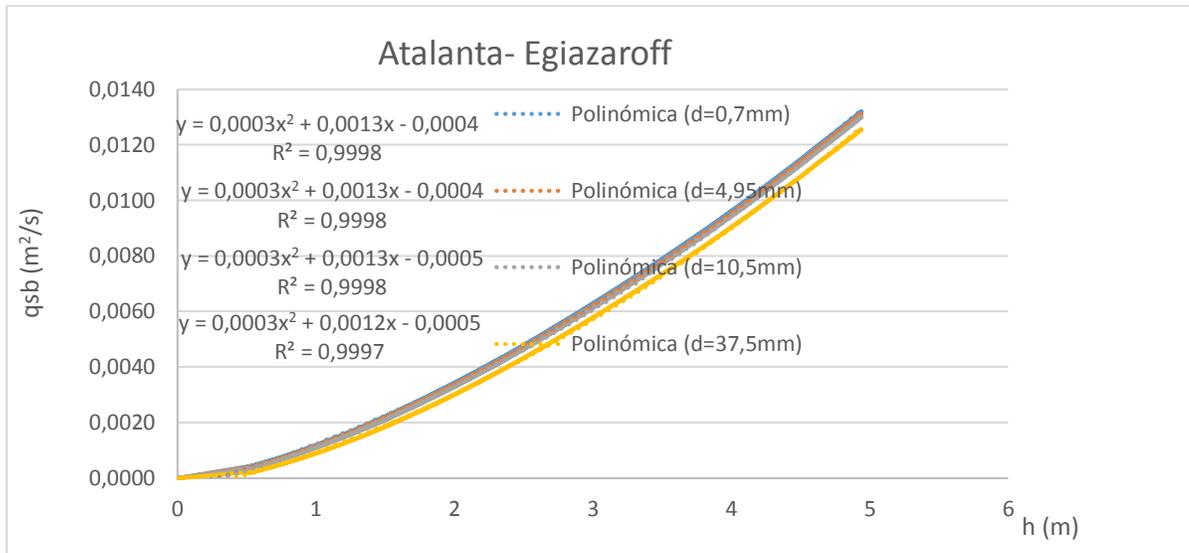


Figura 71. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Egiazaroff en el sector Atalanta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

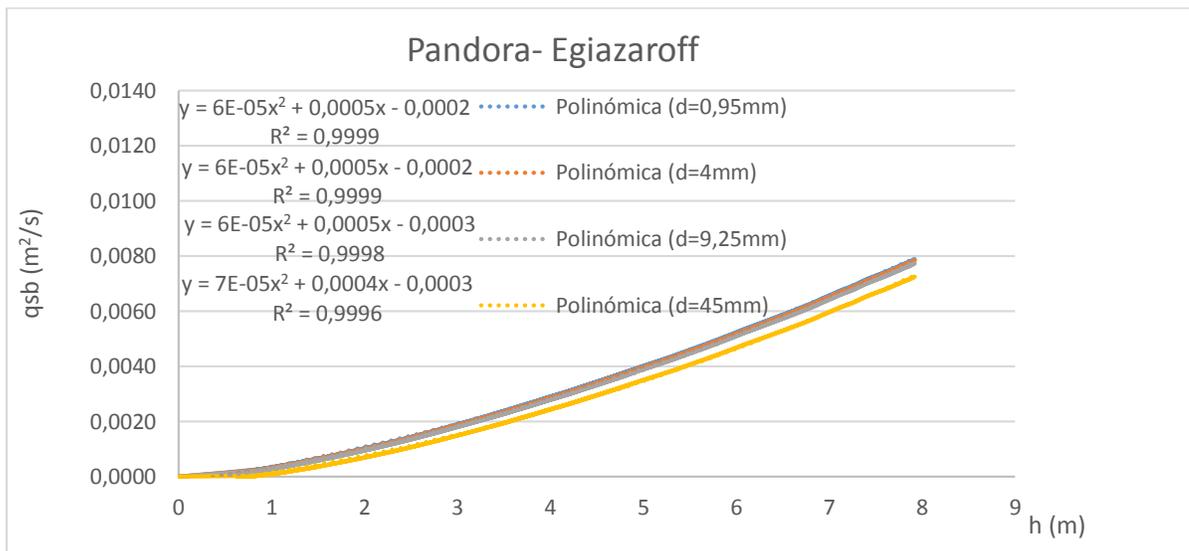


Figura 72. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Egiazaroff en el sector Pandora según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

- **Ecuación de Weiming Egiazaroff**

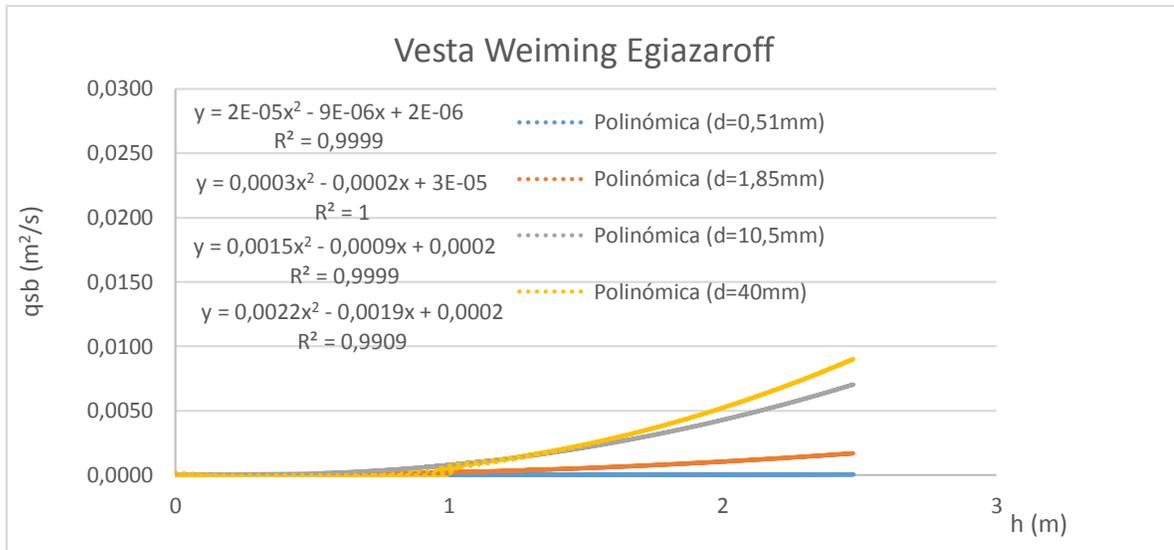


Figura 73. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Weiming Egiazaroff en el sector Vesta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

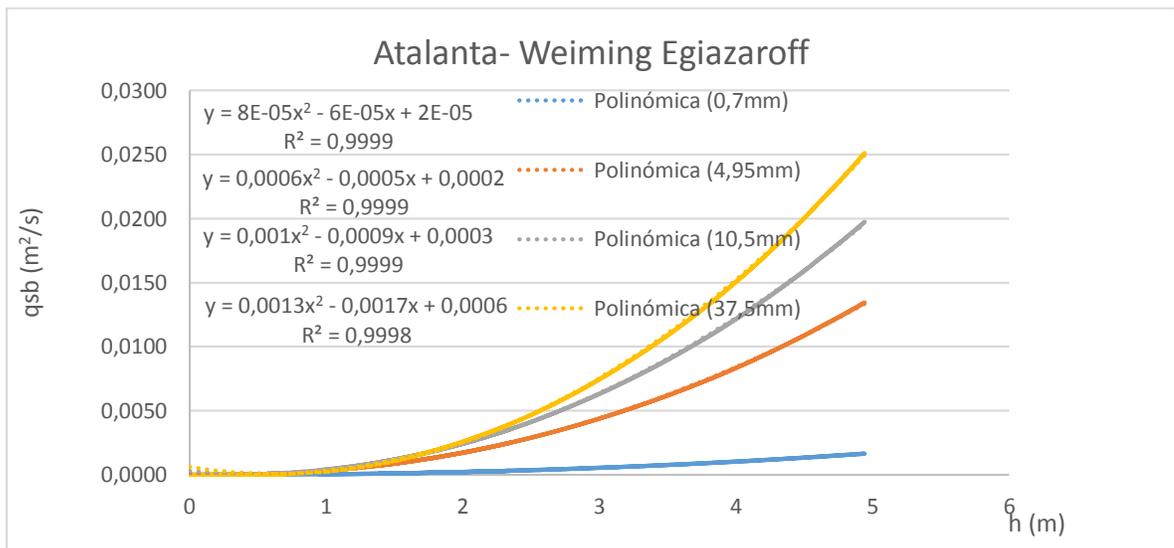


Figura 74. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Weiming Egiazaroff en el sector Atalanta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

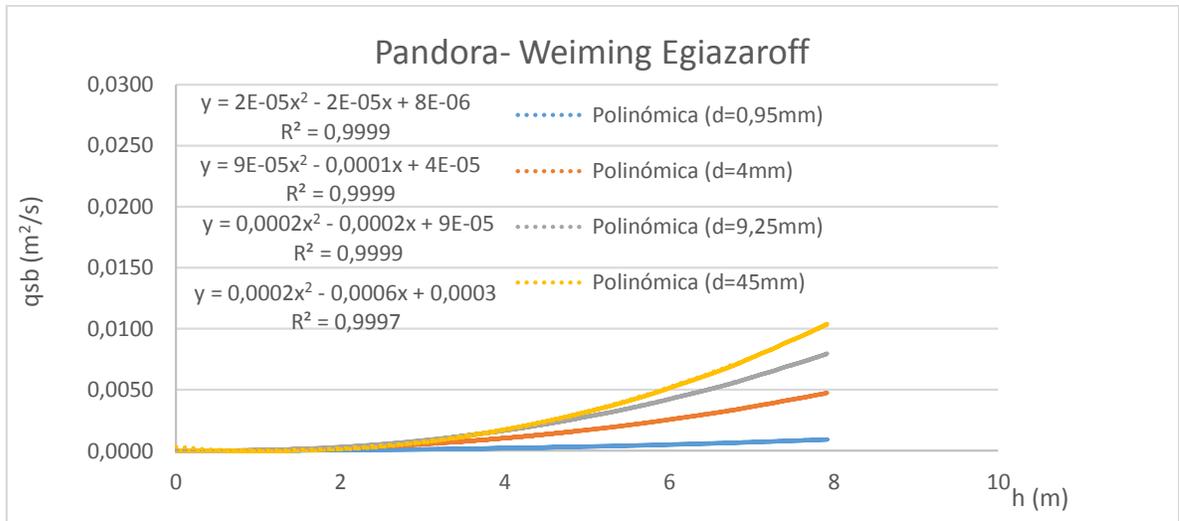


Figura 75. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Weiming Egiazaroff en el sector Pandora según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

- **Ecuación de Hayashi**

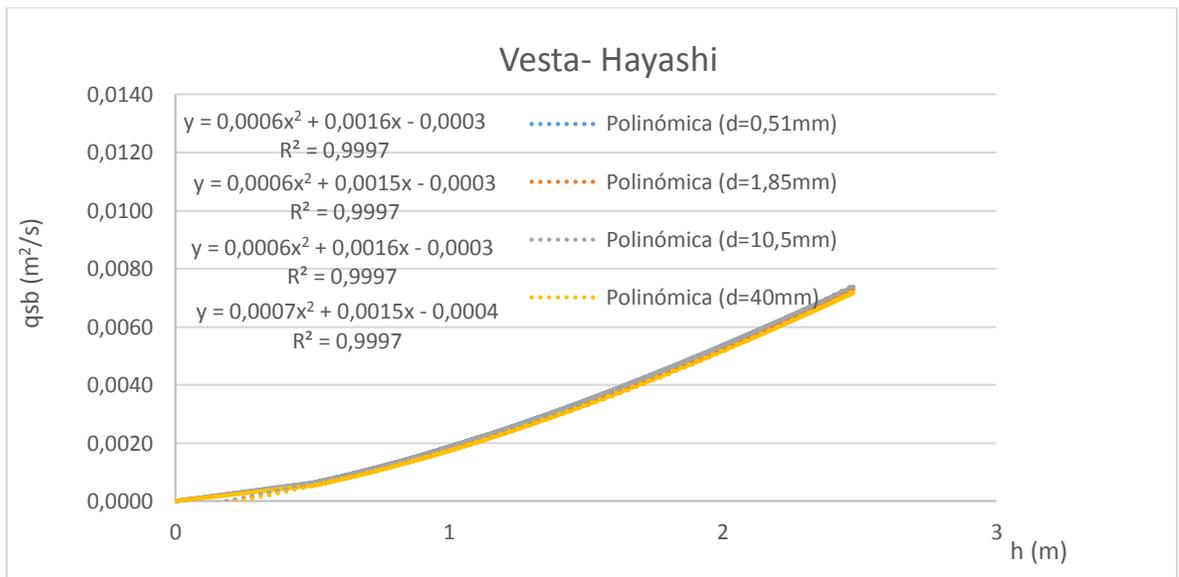


Figura 76. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Hayashi en el sector Vesta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

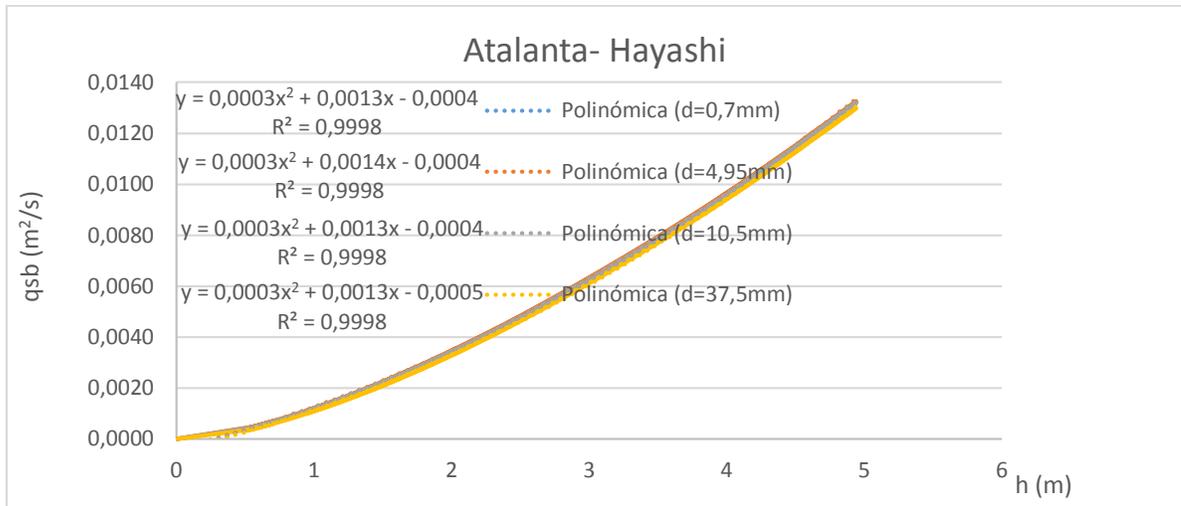


Figura 77. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Hayashi en el sector Atalanta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

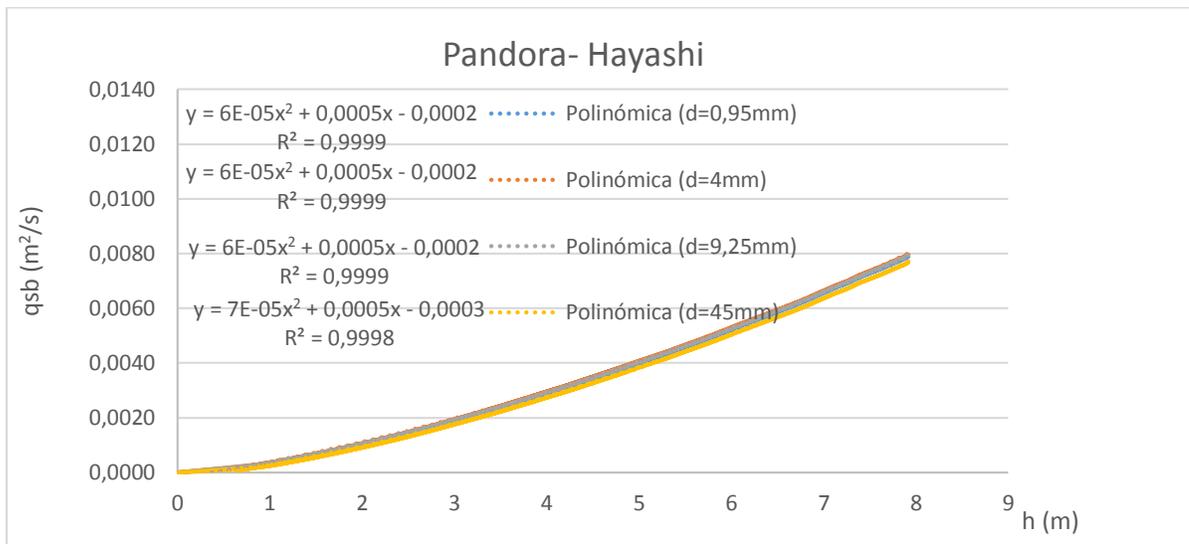


Figura 78. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Hayashi en el sector Pandora según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

- **Ecuación Weiming Hayashi**

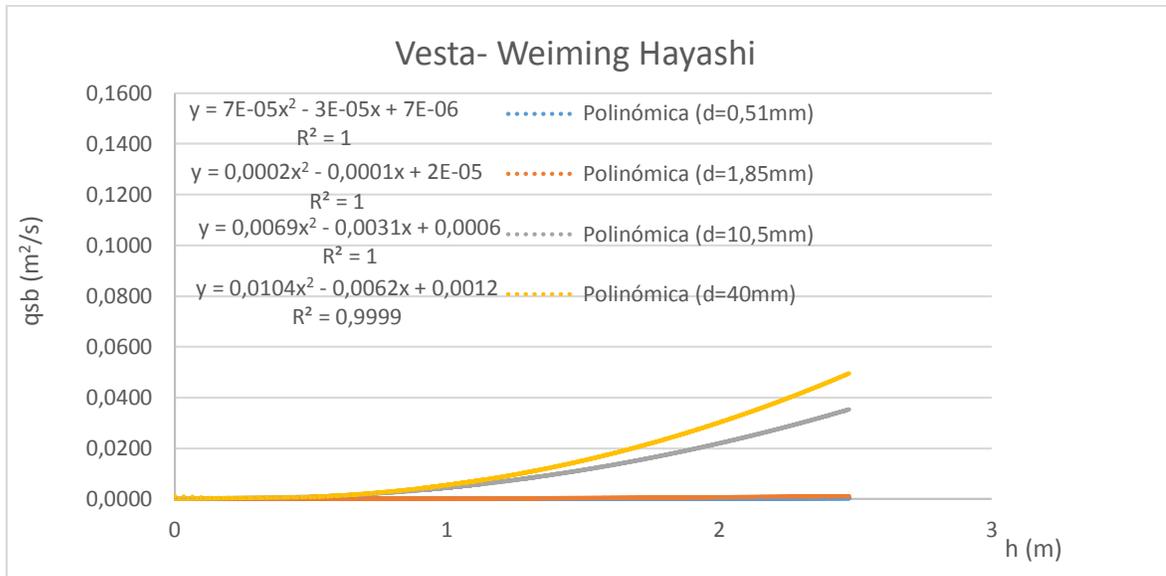


Figura 79. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Weiming Hayashi en el sector Vesta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

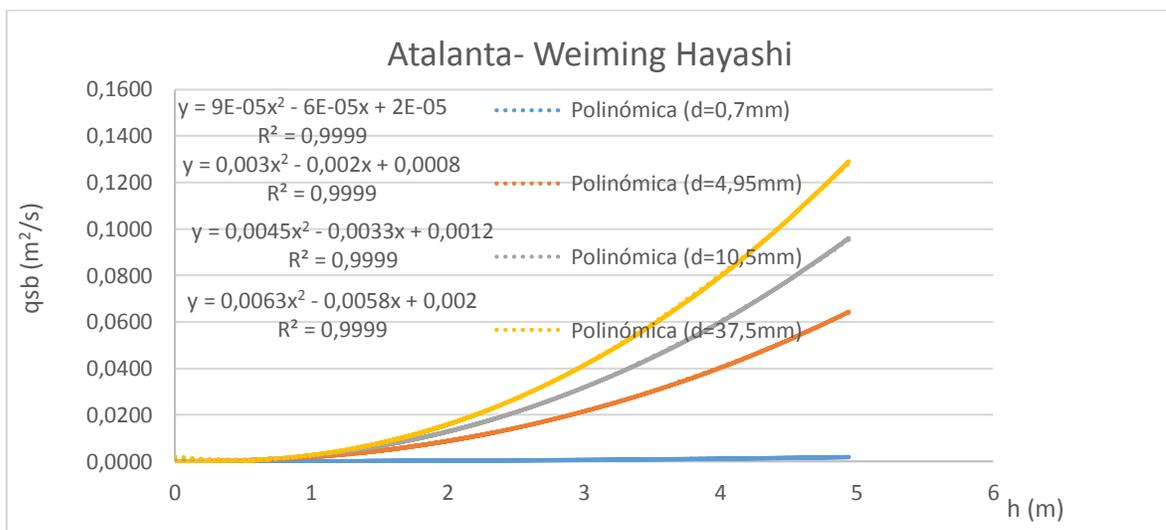


Figura 80. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Weiming Hayashi en el sector Atalanta según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

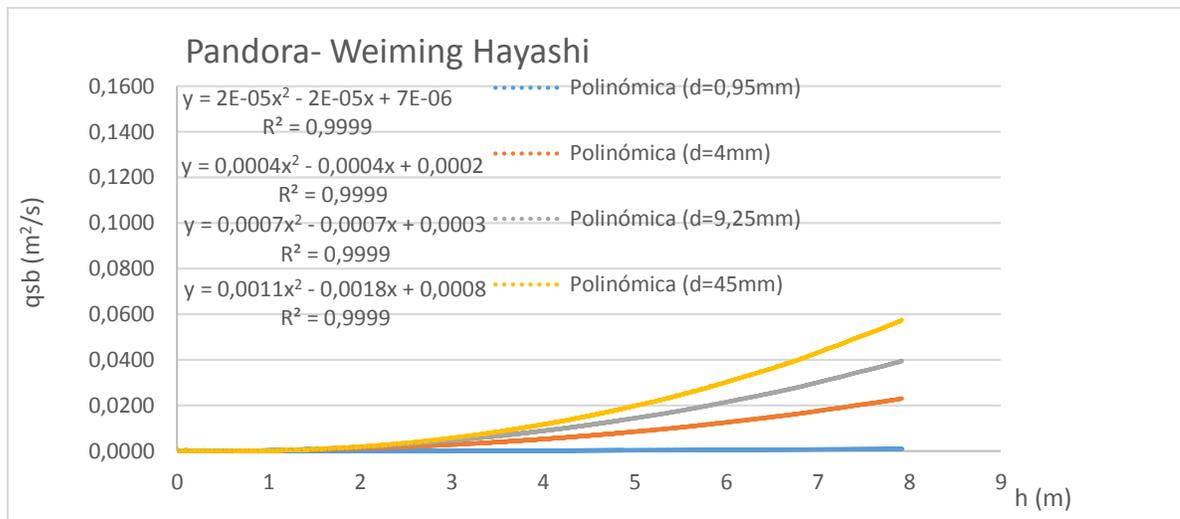


Figura 81. Ecuaciones de mejor ajuste en el transporte no uniforme utilizando la ecuación de Weiming Hayashi en el sector Pandora según el diámetro.
Fuente: (elaboración propia)

5.8. Diferencias entre el transporte uniforme y no uniforme de sedimento.

Como se ha desarrollado en los apartados anteriores, el transporte de sedimento en los ríos es de suma importancia conocerlo, sobre todo cuando hay presencia de altas precipitaciones, comúnmente el arrastre se ha tomado en cuenta con diámetros medios presentes en éstos, es decir, las ecuaciones y programas que especifican el arrastre de sedimento, son para condiciones uniformes, tal es el caso del programa Iber, donde contempla dos ecuaciones para este cálculo: Meyer-Peter Müller y Van Rijn. Es importante conocer qué tipos de diámetros y materiales están presentes en el cauce a analizar, y con ello, realizar el fraccionamiento necesario para obtener datos más detallados, así como resultados confiables.

En el transporte uniforme, casi no toma en cuenta los diámetros mayores ya que el nivel de sesgo es lejos del diámetro medio, por lo que los resultados obtenidos muestran cantidades mayores en los diámetros más pequeños, ya que normalmente el D50 es similar a los diámetros pequeños. Es importante conocer la técnica de recolección de datos, es decir, se sabe bien que cuando existen grandes tamaños de diámetros, alrededor de ellos existen diámetros más finos por lo que son mayormente arrastrados y es cuando se obtienen mayor cuantificación de sedimento para los diámetros pequeños.

Por otro lado, el transporte no uniforme toma en cuenta el fraccionamiento entre diámetros presentes en el río, con esto se obtiene los efectos del arrastre para diámetros mayores, además de que las ecuaciones contienen divisiones para diámetros mayores y menores, tal es el caso de la ecuación de Hayashi, el cual hay una ecuación para diámetros mayores que 1, así como menores que 1.

La condición en común de los dos métodos es que dependen de la altura de profundidad de agua, como se tomó en cuenta el máximo de los tres sectores, entonces las elevaciones de profundidad de agua son las mismas para condiciones uniformes y no uniformes, lo que varía es el método a utilizar, así como las ecuaciones.

Es importante destacar el por qué se obtiene mayor transporte de sedimento en el sector Atalanta, seguido por Pandora y último Vesta, en la siguiente Figura se muestran los caudales específicos en cada uno de los sectores para un periodo de 25 años, de los cuales hay dos razones principales de este comportamiento: la pendiente y el ancho de la sección del río.

- La pendiente en el sector Vesta es mayor que en los otros dos sectores y el ancho de la sección también es mayor sin embargo presenta menor profundidad de agua, lo que demuestra que arrastra menor sedimento.
- Para el sector Atalanta, presenta mayor pendiente y mayor ancho de sección que Pandora, además Atalanta recoge todo los afluentes de sus alrededores y tomando en cuenta los diámetros, se utilizaron diámetros menores en Atalanta que en Pandora, y en el sector de Pandora la pendiente es relativamente plana por lo que el transporte es menor.

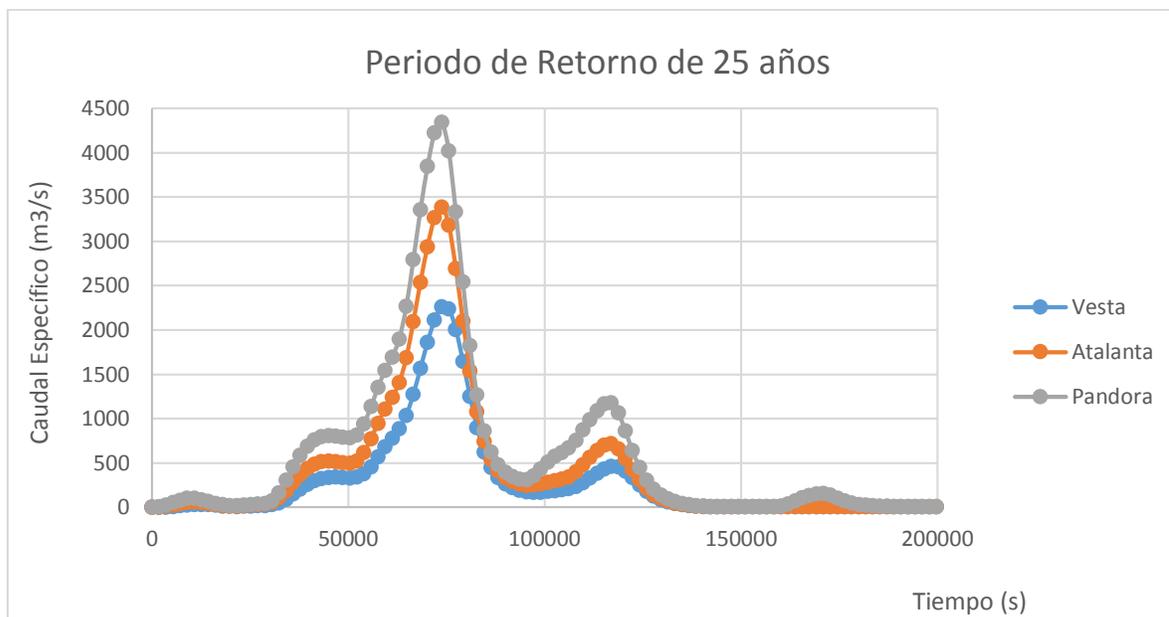


Figura 82. Caudal específico para un periodo de retorno de 25 años

Fuente: (elaboración propia)

En el siguiente Cuadro comparativo se muestran los resultados brutos de cada ecuación contemplando los diámetros utilizados.

Cuadro 6. Cuadro comparativo entre ecuaciones con las sumas obtenidas en cada sector

Fórmula	Transporte Uniforme			Transporte No Uniforme			
	Vesta (m ² /s)	Atalanta (m ² /s)	Pandora (m ² /s)	Fórmula	Vesta (m ² /s)	Atalanta (m ² /s)	Pandora (m ² /s)
General de Bagnold's Meyer	1,96	3,52	3,19	Egiazaroff	2,09	3,64	3,13
Van Rijn	19,15	25,78	12,47	Weiming Egiazaroff	0,76	2,75	1,68
Bagnold	62,49	107,93	64,73	Hayashi	2,21	3,76	3,29
Yalin	5,2	8,49	6,64	Weiming Hayashi	4,22	14,04	8,94

Fuente: (elaboración propia)

Del Cuadro anterior se puede observar que las condiciones para el transporte no uniforme tiene un comportamiento similar en sus ecuaciones, mientras que en las ecuaciones para transporte uniforme varían considerablemente entre ellas, por lo que se

recomienda utilizar el fraccionamiento de diámetros (transporte no uniforme) para obtener resultados constantes.

En el siguiente Cuadro se mostrará los coeficientes de correlación entre las ecuaciones utilizadas en ambos casos.

Cuadro 7. Coeficiente de correlación entre ecuaciones

Fórmulas	Egiazaroff	Weiming Egiazaroff	Hayashi	Weiming Hayashi
General de Bagnold's	0,992	0,934	0,995	0,941
Meyer	0,989	0,926	0,992	0,933
Van Rijn	0,319	0,536	0,295	0,518
Bagnold	0,780	0,906	0,764	0,897
Yalin	0,964	1,000	0,957	0,999

Fuente: (elaboración propia)

Del Cuadro anterior se puede observar que las ecuaciones que se correlacionan de una mejor manera entre ellas son las General de Bagnold's, Yalin y Meyer, esto quiere decir que si las ecuaciones se multiplican por un factor pueden llegar a comportarse de igual forma, sin embargo no necesariamente tienen que obtener los mismos resultados. Las ecuaciones que no se correlacionan entre si son Van Rijn y Bagnold, las cuales, si nos devolvemos a la sección de Resultados y Análisis de Resultados en el transporte uniforme, estas dos ecuaciones son las que presentaron menor y mayor cantidad de sedimento respectivamente.

Además, es importante rescatar la cantidad de parámetros que se toman en cuenta en cada ecuación, la ecuación General de Bagnold's presenta más parámetros que las demás, refiriéndose al transporte uniforme y en el transporte no uniforme, como se mencionó anteriormente se utiliza la ecuación General de Bagnold's pero modificando ciertos parámetros de dicha ecuación, tal es el caso de la ecuación de Hayashi la cual presenta dos ecuaciones más dividiendo los diámetros mayores y menores que uno.

6. IMPACTOS SOCIAL, AMBIENTAL Y ECONÓMICO

6.1. Impacto Social

El análisis social es el componente más importante de este estudio de dinámica fluvial y transporte de sedimentos debido a que, los aspectos de riesgo detectados se manifiestan sobre la población cercana al río. Así lo demuestra el instrumento aplicado a una muestra de las familias que habitan espacios muy cercanos a la trayectoria del cauce.

Entre los aspectos de riesgo que fueron valorados, se consultó sobre el tipo de construcción de las viviendas y la ubicación respecto del río. Según las Figuras 83 y 84, el 67 % de las viviendas no cuenta con estructura sobre pilotes y un 67% están ubicadas a menos de 150 m del río, lo que evidencia pocas medidas de precaución ante un posible evento de crecida del río.

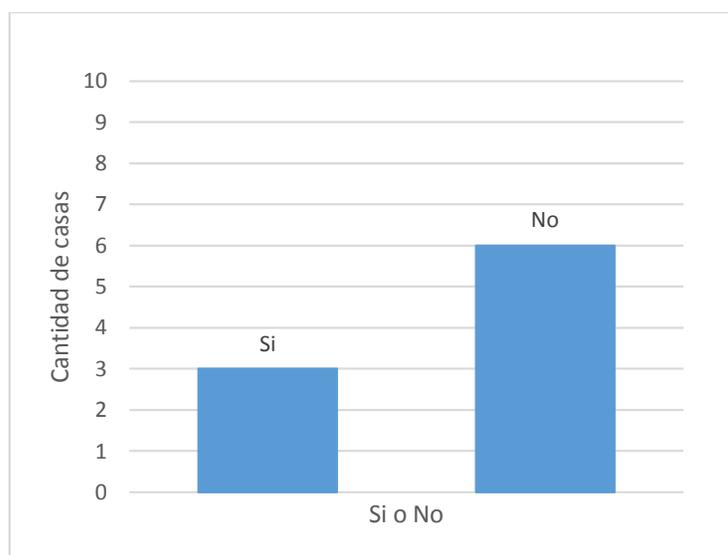


Figura 83. Casas de habitación sobre pilotes

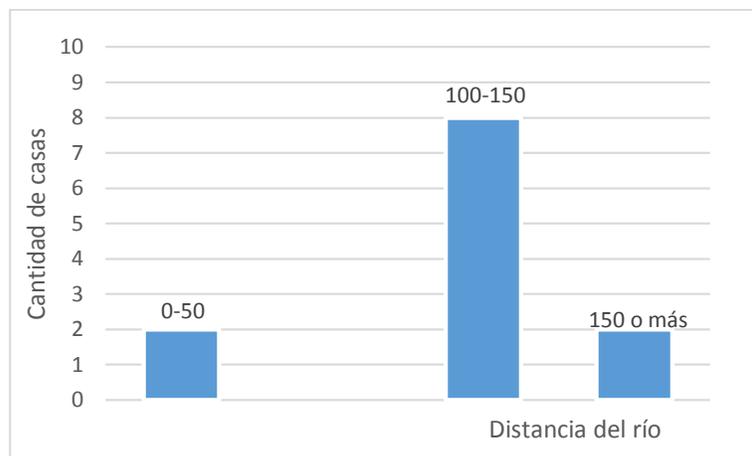


Figura 84. Distancia de la casa de habitación del río

En la Figura 85 se muestra la cantidad de personas que viven en las viviendas, teniendo como resultado que hay mayor balance entre 1 a 3 personas en cada casa encuestada. Sin embargo, en Figura 86 para un 69% de los hogares consultados, no ha llegado el agua a sus casas esto puede ser debido a que muchas familias han migrado hacia lugares un poco más seguros pero de igual manera están a pocos metros del río o que sean familias con poco tiempo de vivir ahí y por lo tanto, no están enteradas de las crecidas que ha presentado el río.

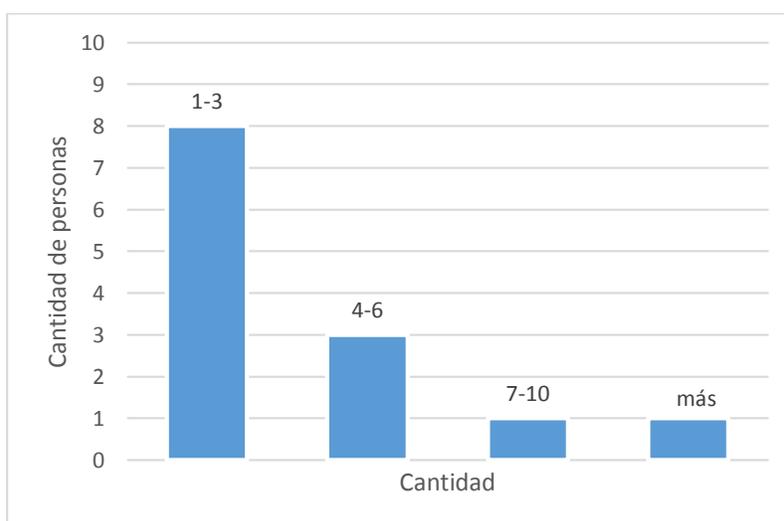


Figura 85. Cantidad de personas en el hogar

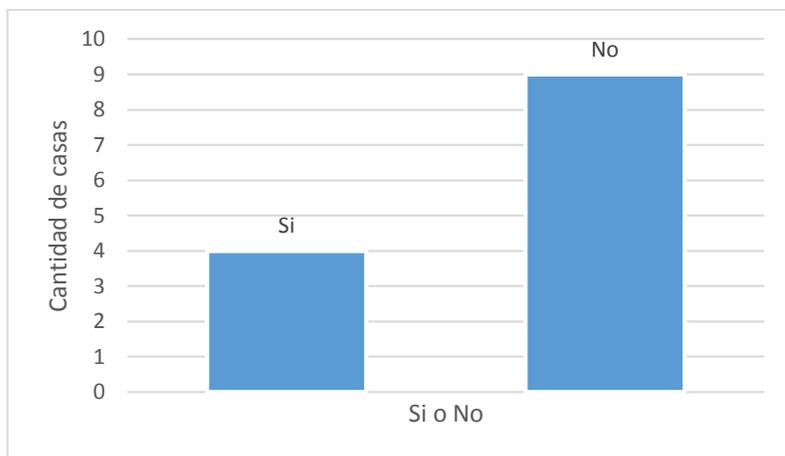


Figura 86. El río ha llegado al hogar

En el último año, según la encuesta, en un 70% presenciaron una inundación en el último año, así como un 60% compartió que la inundación duró más de una hora. Estos resultados pueden ser a causa de la poca pendiente que existe en las partes bajas de la zona (cerca de la costa), así como la magnitud de dichas crecidas, mal drenaje, entre otras condiciones. En las Figuras 87 y 88 se muestran estos resultados.

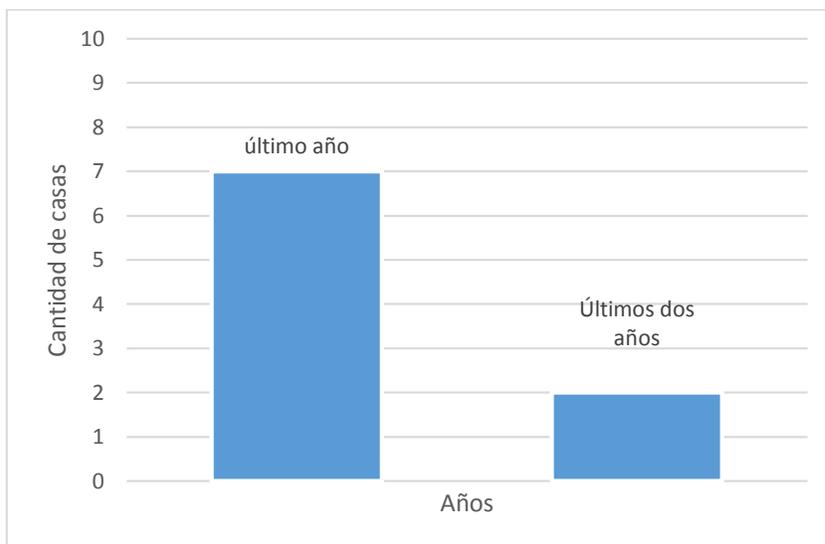


Figura 87. Hace cuánto tiempo sucedieron las crecidas

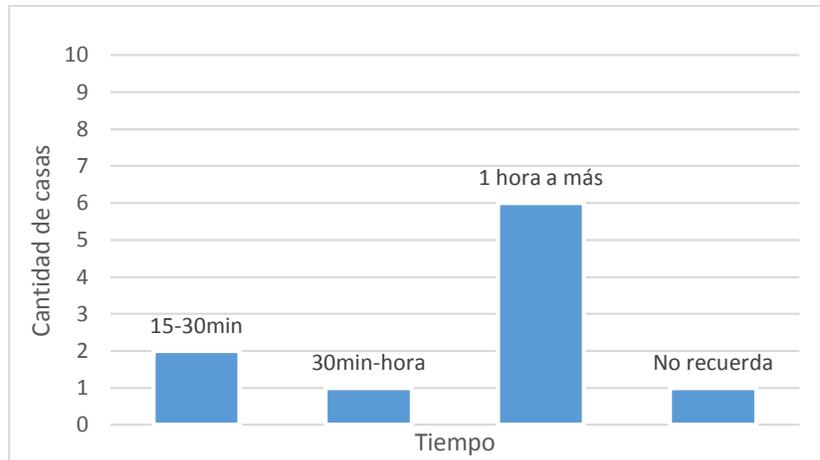


Figura 88. Tiempo de duración de las crecidas

En la siguiente Figura se muestran los resultados de la altura a la que ha llegado el agua de las inundaciones, los cuales varía según las personas encuestadas.

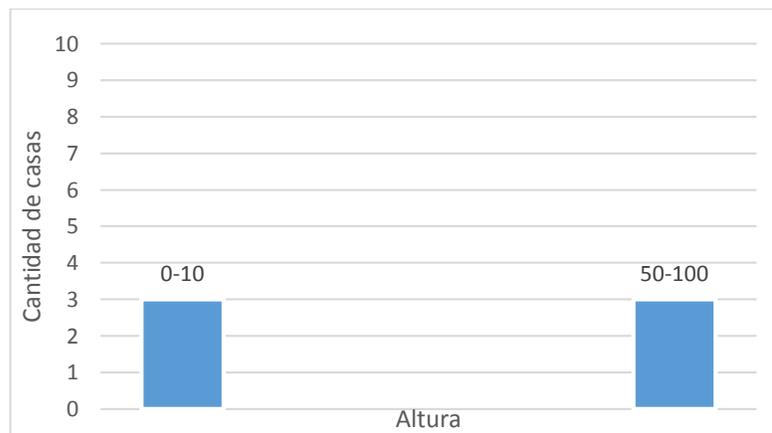


Figura 89. Altura de agua a la que ha llegado el agua

Un 69 % de las personas encuestadas no han recibido información sobre las inundaciones, lo que evidencia un problema de comunicación importante por parte de las autoridades. Finalmente, se preguntó por los meses del año más frecuentes con respecto a las crecidas, siendo los meses de noviembre a diciembre, mismos que registran históricamente un aumento en las precipitaciones. .

Una de las preguntas más importantes es, si las personas han recibido algún tipo de información acerca de las inundaciones y por parte de quién la han acogido.

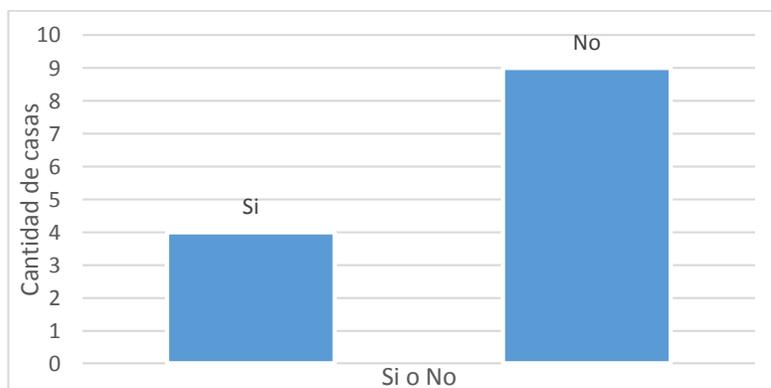


Figura 90. Si la familia ha recibido información

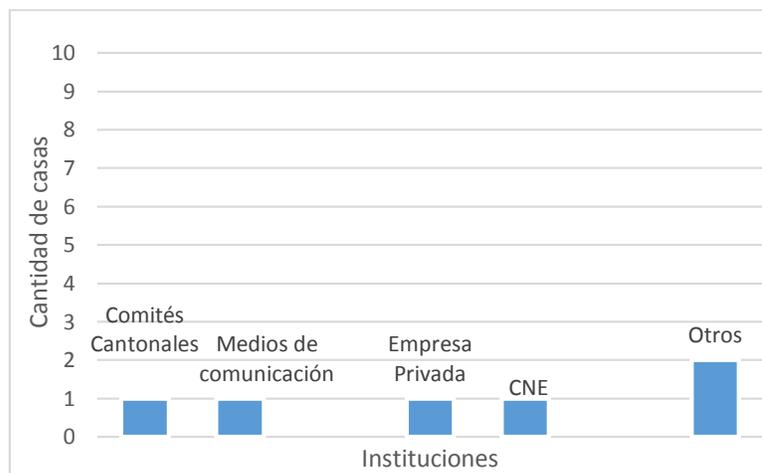


Figura 91. Quién brindó la información acerca de las inundaciones

En la Figura siguiente se muestra que las pérdidas por cosecha son importantes, seguido por las pérdidas en el ganado, afecta considerablemente, ya que estas dos prácticas son las más desarrolladas en estos sectores. La causa principal es el tiempo de duración de las crecidas

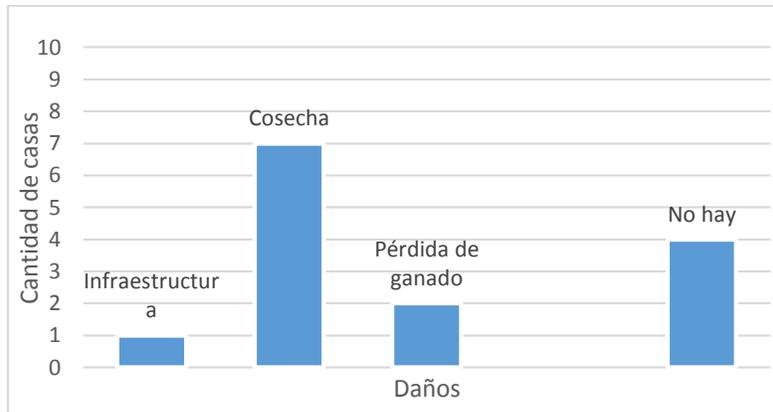


Figura 92. Daños a causa de las inundaciones

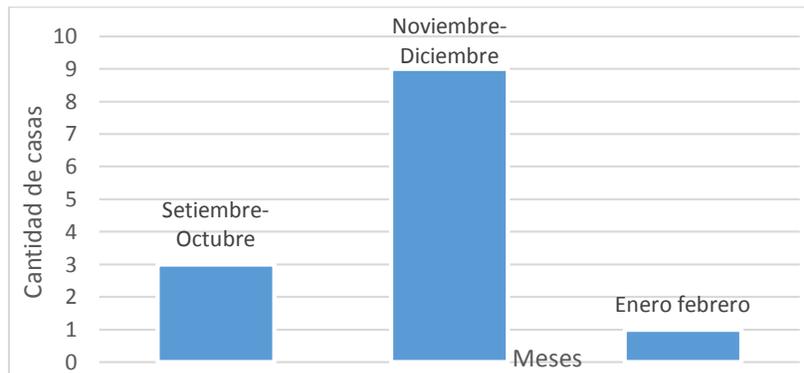


Figura 93. Meses del año en que ocurren las inundaciones

Con estos resultados, se puede identificar las fechas o ciclos del año donde las entidades deben mantener mayor cuidado monitoreando las zonas de mayor peligro.

Con estos resultados, se puede analizar la importancia de conocer las condiciones en que se encuentra el río actualmente y las casas de habitación cercanas a estos. Es importante programar un plan de emergencia en estos sectores así como darle la importancia necesaria a las entidades encargadas de comunicar los peligros que se pueden presentar en las próximas crecidas de esta manera se evitan pérdidas de cosechas, ganado y hasta pérdidas humanas. Con el análisis del arrastre de sedimento en el río se determina las circunstancias presentes y en la toma de decisiones a futuro. Como parte de las estructuras que se estarían realizando contempla una serie de impactos sociales entre ellos el desplazamiento de la población más cercana con las consiguientes expropiaciones de

tierras, viviendas y otras que suponen un impacto económico, pues escasas veces se produce una compensación a precio de mercado en otras condiciones; la relocalización de población en otros lugares desplazados, otros son localizados en pueblos.

Pueden darse situaciones de desarraigo y de segregación, así como problemas de sociabilidad entre los pobladores nuevos y los anteriores. El desplazamiento de población puede tener también efectos en términos estrictamente demográficos. Así, si la población desplazada tiene un alto grado de envejecimiento es bien diferente de si es población activa que vivía de sus tierras, y que pudieran emigrar a la ciudad ante la falta de expectativas de otro trabajo en la zona.

Una obra hidráulica que se considera como una de las más importantes es la canalización del río el primer impacto positivo es por supuesto la propia consecución del objetivo del proyecto, en este caso el control de inundaciones. Aun así es preciso un análisis amplio, holístico, de las interrelaciones del sistema hidráulico, ya que hemos conocido casos de aumento de las inundaciones, en otras zonas diferentes a las intervenidas, precisamente por la intervención en el río en forma de canalizaciones u otras. Una de la intervenciones sin duda positivas es la limpieza de “puntos negros” insalubres y de focos de suciedad generadores de peligros para la salud pública, así como la necesidad que crea de ordenación de las infraestructuras de aguas pluviales, alcantarillados, vertidos industriales, urbanos, y similares.

6.2. Impacto Ambiental

Para este impacto se tomó como referencia diferentes citas ya que como se ha mencionado anteriormente, sobre el tema de transporte de sedimento se están empezando los estudios en Costa Rica. Los principales efectos beneficiosos y adversos deben ser cuantificados y desarrollados al máximo grado posible para que puedan utilizarlos los encargados de tomar decisiones sobre planificación y desarrollo de cuencas hidrográficas. Según (Secretaría General Organización de los Estados Americanos Washington, 2000) menciona que para obtener resultados donde se espera que el plan sirva y los impactos que normalmente son descontados, sean apreciables; se debería dar seguimiento a largo plazo, los cuales pueden ser extendidos más allá del periodo de prueba o de análisis. Además, menciona:

“Los planes de cuencas hidrográficas podrían incluir medidas específicas para acrecentar y mejorar los recursos ictícolas y de vida silvestre y oportunidades asociadas para su aprovechamiento como productos comerciales para recreación. Podrían aumentarse los beneficios de la pesca comercial, la caza y la cacería por medio de trampas, y este incremento podría determinarse mediante los valores de comparación de la futura producción con el plan y sin él.”

Como parte de los beneficios que se pueden obtener del análisis del arrastre de sedimento, acciones tales como: prevención de enfermedades, manejo de las planicies de inundación en sus alrededores, drenajes, acumular el sedimento y ser transportado en lugares de aprovechamiento, prevención de sedimentación en lugares del río donde fue provocar socavación, estabilización de tierras y control de erosión; son objetivos primordiales para el desarrollo de prevención e incremento de la productividad de la tierra del lugar, reducción del costo de su uso y atracción de recursos. Según El Congreso Constitucional de la República de Costa Rica en la ley 276, en el capítulo sétimo: Modificaciones de los aprovechamientos y reglamentación de corrientes; en el artículo 137,138 y139 menciona:

Artículo 137.- El Ministerio del Ambiente y Energía, de oficio o a instancia de parte, está facultado para modificar, sin exponerse a pago de daños y perjuicios por ningún motivo, los derechos al uso de las aguas públicas, cualquiera que sea el título que ampare el aprovechamiento, riego, usos industriales y fuerza motriz, en los siguientes casos: a) Si se necesitan las aguas para cañerías, para abastecimiento de poblaciones, abrevaderos, baños u otros servicios públicos o abastecimientos de sistema de transporte. Los solicitantes tendrán que comprobar ante el Ministerio del Ambiente y Energía que no cuentan con otra fuente de abastecimiento económicamente utilizable para el efecto; b) Cuando lo exija el cumplimiento de leyes especiales dictadas en favor de poblaciones o de la agricultura; c) Al hacer la reglamentación de las aguas de una corriente, depósito o de un aprovechamiento colectivo; y d) Al emprender obras de utilidad pública que tengan por consecuencia el cambio de régimen de la corriente, el gobierno de las aguas, o su más racional aprovechamiento. (Así reformado por el Transitorio V de la Ley No.7593, del 9 de agosto de 1996)

Artículo 138.- Recibida por el Ministerio del Ambiente y Energía la solicitud sobre modificación de derechos concedidos a terceras personas, conforme al artículo anterior, se

publicará un edicto, por tres veces consecutivas, en el Diario Oficial y se notificará personalmente a los concesionarios, a fin de que en los treinta días siguientes presenten sus reparos y ofrezcan las pruebas pertinentes. Pasado ese término, el Ministerio del Ambiente y Energía ordenará que se reciban las pruebas y, evacuadas estas, resolverá, debiendo publicarse tal resolución en el Diario Oficial. Contra lo resuelto, no cabe recurso alguno, fuera del que le queda al interesado de recurrir a la vía ordinaria para la discusión de su derecho. (Así reformado por el Transitorio V de la Ley No. 7593, del 9 de agosto de 1996)

Artículo 139.- El Ministerio del Ambiente y Energía, a requerimiento del Poder Ejecutivo, puede autorizar la realización de proyectos que tiendan a lograr un aprovechamiento de las aguas mejor y más racional que el que se está efectuando, en el concepto de que para la ejecución de las obras se observará este orden de prelación: a las actuales concesiones; al iniciador del proyecto o a un tercero interesado en la construcción, debiendo en todo caso garantizarse satisfactoriamente el beneficio que se derive de los aprovechamientos existentes al iniciarse las obras, tomándose en consideración los recursos hidráulicos de las corrientes o depósitos y las necesidades de los concesionarios. (Así reformado por el Transitorio V de la Ley No. 7593, del 9 de agosto de 1996)

El capítulo octavo: Reservas nacionales de energía hidráulica, menciona:

Artículo 143.- El Poder Ejecutivo podrá constituir reservas hidráulicas para generación de energía. Mediante la declaración de que se constituye una reserva, las aguas de propiedad nacional comprendidas en las zonas reservadas ya no estarán a disposición de quien las solicite. Exceptúense las solicitudes de concesiones para cañerías de poblaciones y usos domésticos que conservan la preferencia que les da la ley.

Artículo 144.- La declaración de que una zona se constituye en reserva nacional de energía hidráulica, así como que deja de serlo, se hará por decreto del Poder Ejecutivo.

Así como el capítulo noveno: Medidas referentes a la conservación de árboles para evitar la disminución de las aguas, menciona

Artículo 145.- Para evitar la disminución de las aguas producida por la tala de bosques, todas las autoridades de la República procurarán, por los medios que tengan a su alcance, el estricto cumplimiento de las disposiciones legales referentes a la conservación de los árboles, especialmente los de las orillas de los ríos y los que se encuentren en los nacimientos de aguas.

Artículo 146.- Es prohibido destruir en los bosques nacionales los árboles que estén situados en las pendientes, orillas de las carreteras y demás vías de comunicación, lo mismo que los árboles que puedan explotarse sin necesidad de cortarlos, como el hulero, el chicle, el liquidámbar, el bálsamo y otros similares.

Artículo 147.- Las autorizaciones que confiere el Poder Ejecutivo para explotar bosques nacionales en la forma prevista en el artículo 549 del Código Fiscal deberán contener, expresamente, la prohibición de cortar los árboles a que aluden el artículo anterior y siguiente.

Artículo 148.- Los propietarios de terrenos atravesados por ríos, arroyos, o aquellos en los cuales existan manantiales, en cuyas vegas o contornos hayan sido destruidos los bosques que les servían de abrigo, están obligados a sembrar árboles en las márgenes de los mismos ríos, arroyos o manantiales, a una distancia no mayor de cinco metros de las expresadas aguas, en todo el trayecto y su curso, comprendido en la respectiva propiedad.

Artículo 149.- Se prohíbe destruir, tanto en los bosques nacionales como en los de particulares, los arboles situados a menos de sesenta metros de los manantiales que nazcan en los cerros, o a menos de cincuenta metros de los que nazcan en terrenos planos.

Artículo 150.- Se prohíbe destruir, tanto en los bosques nacionales como en los terrenos particulares, los arboles situados a menos de cinco metros de los ríos o arroyos que discurran por sus predios.

Según la legislación nacional pertinente en el apartado 4,6 elementos de planeación y 4,6,1,1 prevención en cuencas hidrográficas se menciona:

Algunas acciones que deben implementarse en una cuenca hidrográfica degradada con el fin de evitar la erosión, la inestabilidad de suelos y la generación de inundaciones pueden ser:

- Sistema de irrigación y canalización de aguas para evitar sequías.
- Presas reguladoras, canales y diques para controlar inundaciones.
- Terraceos y control de escorrentía en áreas de deslizamiento
- Obras de disipación de energía para el amortiguamiento y control de avalanchas e inundaciones en cuencas de alta pendiente.

En la actualidad existen muchas comunidades que están expuestas a frecuentes desbordamientos de ríos y quebradas y como medida se han efectuado diques que en otros

términos son la acumulación de materiales de baja resistencia a la erosión, estableciendo un seguro o protección a la población. En estos casos se genera una falsa expectativa de seguridad y la población cree que ya efectuado la obra no ocurrirá nada a futuro y como se indica más adelante este tipo de obra requiere de estudios exhaustivos para minimizar realmente los posibles efectos a futuro

Las medidas no-estructurales indican las normas reguladoras de conducta y pueden ser:

- Legales o de control (obligatorias): zonificación del uso del suelo, declaración de zonas de inhabilitación, permisos de construcción.
- Incentivación o normativas: diversificación económica productiva (agrícola en particular).
- Información: contar con sistemas de información lo más completos posible sobre vulnerabilidad, riesgo, amenaza.
- Previsión y planificación de la distribución de servicios sociales: sistemas de comunicación rápida y alerta temprana, almacenamiento de medicamentos y comida, adecuada distribución territorial de puestos de salud y hospitales.
- Educación popular: educación continua sobre el entorno ambiental y sobre formas adecuadas de reacción durante emergencias.
- Organización: organización gubernamental, no gubernamental, comunitaria e individual o familiar para enfrentar emergencias a nivel regional y local, incluyendo Planes de contingencia y emergencia.
- Desarrollo: acciones en el área del empleo, ingresos, niveles de hacinamiento y movilidad de la población en zonas de riesgo.

Entre los impactos negativos cabrían destacar los siguientes: consecuencias negativas severas para las especies acuáticas. Las actividades antropogénicas que conllevan una disminución del nivel del lecho causan inestabilidades que resultan en la producción de sedimentos en zonas vecinas. Los sedimentos inestables simplifican, y luego degradan, los hábitats del cauce para muchas especies. Eliminación excesiva de meandros y peligro de desbordamiento violento por la velocidad de las aguas en una crecida; impacto visual y estético propio de un río domesticado; malos olores y problemas de higiene y salud pública; transformación del sistema territorial de riego, si se quiere aprovechar como canal de riego;

posible desaparición de zonas de ocio y de pesca; según proyectos, déficits de infraestructuras colaterales o complementarias, caso del necesario sistema de recogida y/o evacuación de aguas pluviales, y en particular del propio sistema de las ciudades; pérdidas de referentes socioculturales históricos

6.3. Impacto Económico

Los factores que aumentan o disminuyen la oferta de sedimentos usualmente desestabilizan el cauce y los bancos, resultando en reajustes dramáticos en la morfología del cauce. Por ejemplo, las actividades humanas que aceleran la erosión de los bancos, tales como el talado de bosques de galería o la extracción de arenas en los cauces, facilitan que los bancos se conviertan en fuente de sedimentos. Una de las principales causas del sedimento presente en los ríos es el mala utilización del recurso suelo en la producción agrícola; la lucha contra el sedimento en los ríos es un factor importante para mejorar la calidad del agua y reducir los daños ecológicos correspondientes, la aplicación de medidas de control sólo será eficaz si el agricultor llega a convencerse de que, por su propio interés económico, le conviene adoptar esas medidas, tomando en cuenta las comunidades cercanas a los ríos. Por ello, hay que demostrar claramente cuáles son las ventajas económicas, como el mantenimiento de la fertilidad del suelo, el menor consumo de energía en situaciones de labranza mínima, etc., en relación con los costos económicos de una utilización excesiva de fertilizantes y la merma de productividad por "pérdida" del capital del suelo. Ello significa que los organismos agrícolas deben utilizar un enfoque integrado al considerar los aspectos económicos de las prácticas agrícolas.

Por otra parte, si se analizan los costos que deben afrontar las sociedades por el problema de la erosión y de los sedimentos acarreados aguas abajo y que son producto de las alteraciones antrópicas ocurridas en los ecosistemas, éstos son variados, pero desgraciadamente no existen en los distintos países cuantificaciones de los mismos, en términos directos e indirectos. Si esos costos pudieran ser parte de la normal contabilidad de los estados, seguramente se encontrarían cifras tan altas que no habría dudas en que es necesario abordar estas problemáticas de una forma distinta y en la cual se deberían privilegiar las medidas de prevención, por sobre las de mitigación o de reparación del daño.

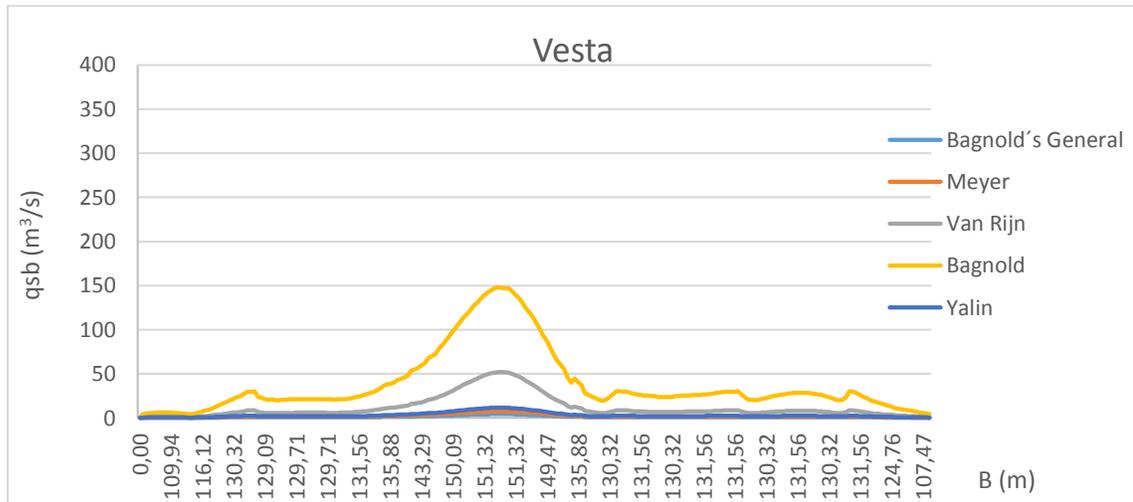


Figura 94 Volumen del transporte de sedimento según el ancho del río en el sector Vesta

Fuente: (elaboración propia)

- Atalanta

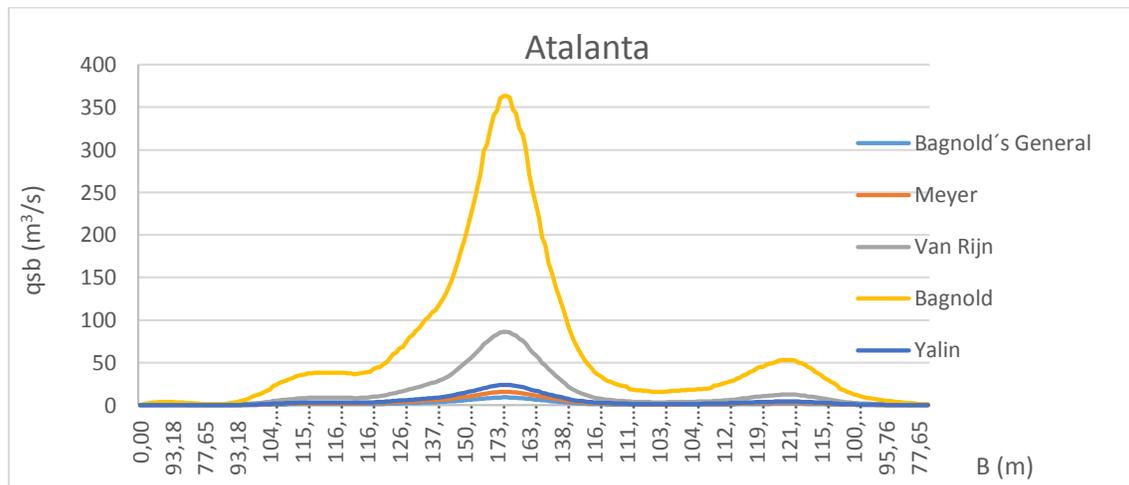


Figura 95. Volumen del transporte de sedimento según el ancho del río en el sector Atalanta

Fuente: (elaboración propia)

- Pandora

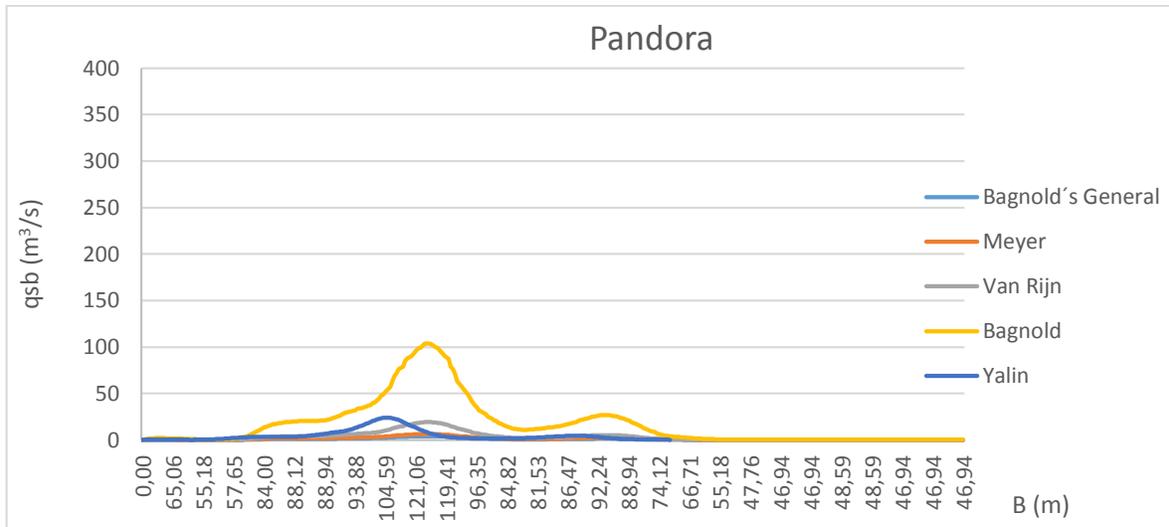


Figura 96 Volumen del transporte de sedimento según el ancho del río en el sector Pandora

Fuente: (elaboración propia)

Como se puede observar, en los gráficos anteriores se muestra la cantidad de transporte de sedimento según el ancho de cada sector, es importante recalcar que en el análisis de resultados se obtienen resultados en unidades (m^2/s), es decir, por unidad de ancho. En el análisis económico, se desarrollan en unidades de (m^3/s), por lo que se obtiene un volumen total, el cual es el sedimento que se obtiene en cada sector según las fórmulas utilizadas, listo para ser removido con el fin de evitar pérdida de área hidráulica como se ha mencionado anteriormente.

Los resultados conseguidos en las Figuras anteriores en orden descendiente son Atalanta, Pandora y Vesta. Los resultados coinciden con los resultados obtenidos en el apartado de Análisis de Resultados, la razón es por la ubicación geográfica del sector de Atalanta, ya que se encuentra en la parte media a lo largo del río La Estrella, por lo que recoge mayor cantidad de sedimento o erosión por parte de las fincas aledañas. Además se puede notar que la ecuación que mayor presentó volumen transportado es la fórmula de Bagnold; por lo tanto se tomarán como referencia estos valores para tomar en cuenta las condiciones más críticas.

Se consultó cual es la medida de la maquinaria para remover dicho sedimento por lo que cada cinco minutos la excavadora recoge un metro cúbico y cobra cuarenta y cinco mil colones por hora trabajada, en los siguientes Cuadros se demuestra cuánto dinero se necesita para

recoger el sedimento según las ecuaciones para el transporte de sedimento uniforme, en cada sector.

Cuadro 8. Costo en colones de la remoción de sedimento en el sector Vesta.

Fuente: (elaboración propia)

Sector Vesta						
Ecuación	m³/s	m³/5min	m³	Horas (h)	Costo (colones)	
General de Bagnold's	272,49	16349,35	1362,45	113,54	₡	5.109.170,89
Meyer	462,72	27763,27	2313,61	192,80	₡	8.676.020,97
Van Rijn	2697,53	161851,54	13487,63	1123,97	₡	50.578.606,00
Bagnold	8748,93	524935,87	43744,66	3645,39	₡	164.042.459,66
Yalin	724,77	43486,37	3623,86	301,99	₡	13.589.490,43

Cuadro 9. Costo en colones de la remoción de sedimento en el sector Atalanta.

Fuente: (elaboración propia)

Sector Atalanta						
Ecuación	m³/s	m³/5min	m³	Horas (h)	Costo (colones)	
General de Bagnold's	482,07	28923,94	2410,33	200,86	₡	9.038.732,19
Meyer	810,37	48622,29	4051,86	337,65	₡	15.194.464,39
Van Rijn	3649,14	218948,50	18245,71	1520,48	₡	68.421.406,78
Bagnold	15222,53	913351,62	76112,64	6342,72	₡	285.422.381,97
Yalin	1172,97	70378,23	5864,85	488,74	₡	21.993.197,32

Cuadro 10. Costo en colones de la remoción de sedimento en el sector Pandora.

Fuente: (elaboración propia)

Sector Pandora						
Ecuación	m³/s	m³/5min	m³	Horas (h)	Costo (colones)	
General de Bagnold's	310,64	18638,59	1553,22	129,43	₡	5.824.558,02
Meyer	479,65	28778,84	2398,24	199,85	₡	8.993.387,92
Van Rijn	1247,74	74864,69	6238,72	519,89	₡	23.395.214,92
Bagnold	6486,98	389218,99	32434,92	2702,91	₡	121.630.935,83
Yalin	649,27	38956,07	3246,34	270,53	₡	12.173.770,47

Como se puede observar, en los Cuadros anteriores se determinó el costo en colones de la remoción del sedimento en cada sector, según las ecuaciones utilizadas. Es importante mencionar que el sedimento va a ser transportado hasta el final del cauce, sin embargo, se obtuvo el costo por sector, por lo tanto se observa que el sector que presenta mayores costos es Atalanta con la ecuación de Bagnold con un valor mayor a las demás ecuaciones; los sectores Vesta y Pandora presentaron valores similares por lo que se considera irrelevante realizar las comparaciones.

La importancia de realizar estos cálculos radica en determinar cuánto es el sedimento en los sectores en estudio para poder cuantificar los costos de remoción, pero además tomar en consideración el lugar donde van a arrojar dicho sedimento, se puede reutilizar el material para construcción de diques, o estructuras que sirvan de pared para evitar futuras inundaciones.

Sin embargo, no es necesario ser un especialista para saber que estos problemas pueden ser abordados desde ya con medidas de bioingeniería, (forestación en zonas altas de cuencas, uso de plantas retenedoras de suelos; colchones de protección) o con medidas de ingeniería clásica (diques; zanjas de infiltración en laderas; canales de desviación de aguas lluvias; etc.) o con acciones de prevención y educación a la población (mapas de riesgo de movimientos en masa; orientación para un manejo eficiente de la vegetación y los suelos; concienciación a la población sobre los riesgos existentes), entre otras medidas.

Cuando se decide realizar obras hidráulicas en la zona por inundación por no ser económicamente viable lo que queda, de las actividades agrarias tradicionales de la zona inundada y colindantes, que en algunos casos, podrían ser las mejores tierras de cultivo del valle. Sin embargo, los regantes aguas abajo (caso que ese fuera uno de los objetivos de algún embalsamiento) van a percibir de forma muy favorable esta obra, aún en el caso de que tuvieran que pagar un canon por el riego. Sin embargo, en muchos proyectos encontramos una ausencia de evaluación concreta del beneficio previsible: ¿cuánta agua van a poder consumir con regularidad?, ¿qué abono debe emplearse?, ¿qué cultivos son los apropiados para la nueva reestructuración del mercado agrícola en el marco comunitario?, en caso de salinidad de las aguas, ¿en qué medida va a ser rentable el riego?, y otras cuestiones.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Se logró obtener los resultados para los tres sectores en estudio para el transporte uniforme, el orden ascendente con respecto a las ecuaciones es: General de Bagnold's, Meyer, Yalin, Van Rijn y Bagnold. Tomando en cuenta los porcentajes obtenidos, la diferencia entre la ecuación de Bagnold (mayor arrastre) con respecto a la ecuación General de Bagnold's (menor arrastre), es del 97%, con este resultado es importante contemplar y analizar cuál es el método ideal para el río La Estrella, ya que, al ser la diferencia considerable, ni la ecuación General de Bagnold's ni la de Bagnold deben ser utilizadas para el método uniforme. Las ecuaciones de Meyer y Yalin, presentan un comportamiento similar, por lo que se considera utilizar estas dos ecuaciones para las condiciones del río La Estrella, si se desea realizar los cálculos con las condiciones uniformes, es decir, utilizar el diámetro medio en los sectores, sin embargo, se debe tomar en cuenta que no es lo idóneo, lo correcto es realizar el fraccionamiento adecuado y realizar los cálculos en condiciones no uniformes.

De los sectores en estudio, el que mayor presenta arrastre de sedimento es Atalanta, seguido por Pandora y por último Vesta. Este comportamiento es debido al perfil transversal, profundidad de agua y pendiente de cada sector; el ancho de solera de Vesta es mayor que en los demás, sin embargo, presenta menos transporte, provocado por la altura de agua de éste, en este caso, Vesta se encuentra en la parte montañosa de la cuenca provocando bajos niveles de agua, sin embargo presenta mayor pendiente; por otro lado Atalanta presenta mayor elevación de profundidad de agua, ubicado en la zona media y su perfil transversal no es grande comparado con Vesta y Pandora además de que la pendiente va disminuyendo, también hay que considerar que este sector recibe las aguas de las comunidades cercanas. Finalmente el sector de Pandora es el que presenta menos pendiente y la profundidad de agua es alta, este sector es el segundo en presentar arrastre de sedimento.

Mediante el modelo Iber, se representaron los resultados utilizando la ecuación de Meyer para los diámetros pequeños de cada sector, lo que provocó el efecto igual a las

ecuaciones presentadas, lo cual permite concluir que son correctos para condiciones uniformes.

Se cuantificó el transporte de sedimentos en condiciones no uniformes, el resultado ascendente con respecto a las ecuaciones utilizadas es el siguiente: Hayashi, Egiazaroff, Weiming-Egiazaroff y Weiming-Hayashi. El porcentaje de la ecuación de Weiming-Egiazaroff con respecto a la de Egiazaroff es de 47%. El porcentaje de la ecuación de Weiming-Hayashi con respecto a la de Hayashi es de 90% en el sector de Atalanta. Es importante resaltar que el método de Hayashi contempla dos tipos de ecuaciones, y que la ecuación de Weiming toma en cuenta el coeficiente de Einstein. Como se observó, la ecuación de Weiming-Hayashi es la que presenta mayor arrastre de sedimento con respecto a los demás métodos, si se quiere conocer los resultados en condiciones críticas, la ecuación de Weiming-Hayashi es la ideal. Pero si quiere analizar un promedio del comportamiento del río se utilizarían las ecuaciones de Egiazaroff y Hayashi, ya que la de Weiming-Egiazaroff presenta muy poco transporte de sedimento.

7.2. Recomendaciones

Como parte de las recomendaciones, es importante destacar que las visitas de campo para toma de muestras de sedimentos de arrastre y en suspensión, deben ser realizadas en tiempo de lluvias, para que se produzcan las llamadas “llenas” y se pueda obtener mediante las trampas de sedimento, los diferentes tipos de diámetros que se presentan en esas condiciones.

Con respecto a las trampas de sedimento, el tipo de trampa utilizado atrapa solamente rocas de cierto tamaño, por lo que en la realidad existen piedras pequeñas que se clasifican como sedimento de fondo y por medio de dichas trampas no son considerados.

Además, se recomienda realizar las actualizaciones pertinentes en el programa Iber, tanto de agregar más ecuaciones como tener la opción de considerar el fraccionamiento necesario para que los resultados obtenidos sean más finos y confiables.

Es importante reconocer que este tema es de suma importancia, ya que los ríos de nuestro país transportan cierta cantidad de sedimento que debe ser considerado a la hora de tomar decisiones como obras estructurales para evitar desbordamientos.

8. BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- Aguirre Pe, J., Moncada, A., y Olivero, M. (Enero de 2002). *Efecto de la granulometría en el transporte de sedimentos*. *Revista Ciencia e Ingeniería*.23(1), 2002. Obtenido de <http://ezproxy.itcr.ac.cr:2078/lib/itcrsp/reader.action?docID=10646647&ppg=3>
- Bagnold, R. (18 de Diciembre de 1956). *The flow of cohesionless grains in fluids*. Obtenido de <http://d29qn7q9z0j1p6.cloudfront.net/content/249/964/235.e-letters>
- Collinson, J. D. (2006). *National Library Australia* . Obtenido de Sedimentary structures: http://trove.nla.gov.au/work/17242141?q&sort=holdings+desc&_id=1492623657759&versionId=45134143
- Egiazaroff, I. (1965). *Calculation of nonuniform sediment concentrations*. Obtenido de https://tohoku.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri...
- Einstein, H. A. (Setiembre de 1950). *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*. Obtenido de www.vliz.be/imisdocs/publications/75/247675.pdf
- Guzmán Arias , I., Watson Hernández, F., Villagra Mendoza, K., & Casasola Ramírez, R. (2017). *Modelación Hidrodinámica y Morfológica del Río La Estrella, Limón*. Cartago.
- Hassan, K. (2012). Full Technical Report on: Collaboration Research Visit. *Jim Gatheral Scholarship*, 2-6.
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (Enero de 1948). *Formulas for bed-load transport*. Obtenido de https://www.researchgate.net/researcher/2019845283_E_Meyer-peter
- Novoa, W. F. (16 de Marzo de 2016). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FINOS EN UN CANAL CON LECHO DE GRAVA*. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/138909>
- Parker, G. (Octubre de 2009). *M.S. Yalin's contribution to bedload transport in*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Gary_Parker6
- Schildts, A. (1936). *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenz Forschung auf die Geschiebebewegung Mitt*. Obtenido de <http://documents.mx/download/link/van-rijn-1993-principles-of-sediment-transport-in-rivers-estuaries-and-coastal-seas>
- Secretaria General Organización de los Estados Americanos Washington, D. (26 de Abril de 2000). *Calidad Ambiental y Desarrollo de Cuencas Hidrográficas: un Modelo para Planificación y Análisis Integrado*. Obtenido de <http://oas.org/dsd/publications/Unit/oea69s/oea69s.pdf>

- Silva, M. Y. (2001). *Fluvial Processes*. Queen's University, Kingston, Canadá: Interacional Association of Hydraulic Engineering and Reserch.
- Universidad Nacional Autónoma de Mexico. (2014). Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/354/A7.pdf?sequence=7>
- Van Rijn, L. C. (1993). *PRINCIPLES OF SEDIMENT TRANSPORT IN RIVERS, ESTUARIES AND COASTAL SEAS*. Obtenido de <http://documents.mx/documents/van-rijn-1993-principles-of-sediment-transport-in-rivers-estuaries-and-coastal-seas.html>
- Villón Béjar, M. (2004). *Hidrología*. Cartago: Tecnológica de Costa Rica.
- Wu, W., Wang, S. S., & Jia, Y. (2010). Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 428-431.
- Yalin, M. S. (1963). *An expression for bed-load transportation*. Estados Unidos: Universidad de California.
- Zhen-Gang, J. (2008). *Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries*. New Yersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

9. ANEXOS

Anexos

Anexo 1. Demostración en el uso de la ecuación General de Bagnold's para el transporte uniforme

Se utilizará el sector Vesta con el diámetro de 0,51mm y una altura de agua de 0,51m

$$q_{sb} = \frac{\beta' \bar{u}(\tau_0 - (\tau_0)_{cr})}{\gamma_s}$$

Parámetros

$$\frac{\bar{u}}{v_*} = \ln\left(0,386 \frac{h}{k_s}\right) + B_s$$

$$\frac{\beta'}{\beta} = \frac{1 + \frac{1}{2\kappa B_s} \ln\left(\frac{\epsilon}{2D}\right)}{1 + \frac{1}{\kappa B_s} \ln\left(0,368 \frac{h}{2D}\right)}$$

Donde:

$$\kappa = 0,4$$

$$v_* = \sqrt{gSR_h} = 0,14$$

$$\tau_0 = \gamma R_h S = \rho v_*^2 = 19,93$$

$$(\tau_0)_{cr} = \gamma (hS)_{cr} = \rho v_{*cr}^2 = 0,249$$

$$\gamma_s = 16186,5$$

$$B = 103,77$$

$$A = Bh = 52,70$$

$$P = 2h + B = 104,78$$

$$h = 0,51$$

$$k_s = 2D = 0,001$$

$$Re_* = v_* k_s / \nu = 143,29$$

$$B_s = (2,5 \ln(Re_*) + 5,5) e^{-0,0705(\ln Re_*)^{2,55}} + 8,5(1 - e^{-0,0594(\ln Re_*)^{2,55}}) = 8,522$$

$$\epsilon = 2D \frac{Y}{Y_{cr}} = 0,0081$$

$$Y = \frac{\rho v_*^2}{\gamma_s D} = 2,391$$

$$E^3 = \left(\frac{\gamma_s D^3}{\rho \nu^2}\right)^{\frac{1}{3}} = 12,901$$

$$Y_{cr} = 0,13 E^{-0,392} e^{-0,015 E^2} + 0,045(1 - e^{-0,068 E}) = 0,03$$

Sustituyendo en la fórmula general se obtiene un resultado de transporte de sedimento de $7,28e^{-04}m^2/s$

Nota: Es importante recalcar que este mismo procedimiento se llevó a cabo con cada uno de los sectores: Atalanta y Pandora para las diferentes profundidades de gua y los diámetros escogidos, es decir en cada sector se llevaron a cabo los cálculos con 4 diámetros diferentes, tanto para arrastre uniforme como no uniforme.