



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Cuantificación de la capacidad de transporte de
sedimentos en el río Amazonas, Loreto, Perú**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Jonathan Joel VALENZUELA CARPIO

ASESOR

William Wilfredo CHAUCA NOLASCO

Lima, Perú

2019



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Valenzuela, J. (2019). *Cuantificación de la capacidad de transporte de sedimentos en el río Amazonas, Loreto, Perú*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos. Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS

CODIGO ORCID DEL AUTOR: NO TIENE

CODIGO ORCID DEL ASESOR: 0000-0002-3673-1468

DNI: 48238884

GRUPO DE INVESTIGACIÓN: TRABAJO INDIVIDUAL

INSTITUCIÓN QUE FINANCIA PARCIAL O TOTALMENTE LA INVESTIGACIÓN: AUTOFINANCIADO

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DONDE SE DESARROLLÓ LA INVESTIGACIÓN. DEBE INCLUIR LOCALIDADES Y COORDENADAS GEOGRÁFICAS

DISTRITO: SAN PABLO.

PROVINCIA: MARISCAL RAMÓN CASTILLA.

DEPARTAMENTO: LORETO.

PAIS: PERÚ.

LATITUD: 04°01'06.7" S

LONGITUD: 71°06'03.1" W

**AÑO O RANGO DE AÑOS QUE LA INVESTIGACIÓN ABARCÓ:
02/2016-11/2019**



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS MODALIDAD (M-1)

Siendo las 19:30 horas del viernes 22 de noviembre de 2019, en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, bajo la presidencia del MSc. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA y con la asistencia del asesor Ing. WILLIAM WILFREDO CHAUCA NOLASCO, y miembro Ing. MIGUEL ERNESTO ARÁMBULO MANRIQUE de conformidad con la Resolución Rectoral N° 01934-R-02 que aprueba las diferentes modalidades de Titulación Profesional, se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, del Bachiller:

JONATHAN JOEL VALENZUELA CARPIO

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invita al Bachiller JONATHAN JOEL VALENZUELA CARPIO a realizar la Exposición del Trabajo de Tesis titulada: "CUANTIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL RIO AMAZONAS, LORETO PERÚ".

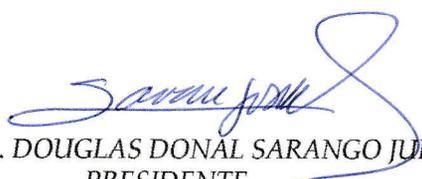
Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del mismo, invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la Sala de Sesión, para dar lectura a la calificación obtenida por el Bachiller, la misma que es:

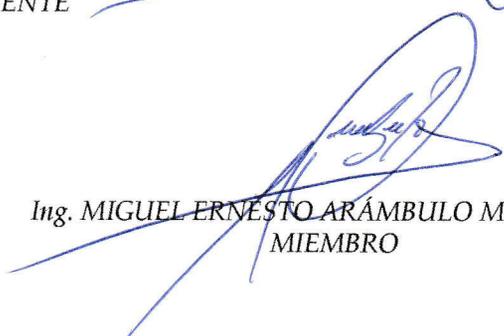
..... DIECISIETE 17

El Presidente del Jurado MSc. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller JONATHAN JOEL VALENZUELA CARPIO, Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 8:45 horas del mismo día, se levanta la sesión.


MSc. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA
PRESIDENTE


Ing. WILLIAM WILFREDO CHAUCA NOLASCO
ASESOR


Ing. MIGUEL ERNESTO ARÁMBULO MANRIQUE
MIEMBRO

Resumen

En esta investigación se busca cuantificar el transporte de sedimentos del río Amazonas en una sección analizada cerca de la ciudad de San Pablo, en el departamento de Loreto, para un evento que podríamos considerar como máximo anual del ciclo hidrológico. Para esto se analizarán distintos métodos de cálculos con la adición del empleo de nuevas tecnologías, tal es el caso del ADCP (Perfilador Acústico de Corrientes Doppler) y la reformulación en muchos de los casos de los métodos empíricos comúnmente empleados. Para determinar el transporte de sedimentos se realizó una campaña de recolección de información en campo, en dónde se extrajeron muestras de sedimentos de fondo y muestras de sedimentos en suspensión en 10 verticales de la sección transversal, así como la ingeniería básica necesaria para la determinación de todas las variables hidráulicas y geométricas que intervienen en dicho transporte. El transporte de sedimentos totales se divide en transporte de sedimentos de fondo y transporte de sedimentos de lavado, para realizar ambos análisis hemos dividido la sección transversal en 10 partes de igual dimensión a fin de poder representar de mejor manera su composición mediante las muestras extraídas. Para la determinación del transporte de sedimentos de fondo utilizaremos los métodos empíricos que nos permitan calcular el transporte por arrastre y el transporte de fondo en suspensión con el solo conocimiento de la composición del lecho fluvial, mientras que para el transporte de lavado utilizaremos también los métodos empíricos modificados en la metodología de cálculo por el autor de esta investigación, adicionando métodos de ajuste reales de perfiles de velocidades y concentraciones y el método de índice acústico. Se realizó la comparación de todos los métodos y se indicó las restricciones para su aplicación. Finalmente se logró estimar el transporte total de sedimentos, separando el que va en el fondo por arrastre, el de suspensión de fondo y el de suspensión de lavado.

Agradecimiento:

Mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que me apoyaron de alguna u otra manera en la realización de esta investigación.

Agradezco a mis padres y hermanos por el apoyo moral y económico que me han brindado y por encaminarme hacia el desarrollo de esta hermosa carrera, la Ingeniería Mecánica de Fluidos.

Agradezco a Yasmín Jamanca Valverde por sus palabras de aliento y perseverancia durante todo este tiempo que me ha tomado desarrollar esta investigación.

Agradezco al Ing. Fernando Lévano Mendoza por haberme permitido desarrollarme profesionalmente y despertar mi interés sobre la ingeniería de ríos.

Agradezco al Ing. William Chauca Nolasco por su apoyo incondicional desde el inicio de esta investigación, así como también, por haberme guiado durante todo el desarrollo.

Agradezco a la empresa H&O Ingenieros por permitirme utilizar la información recopilada en campo para la realización de esta investigación.

Finalmente, agradezco a mis familiares, amigos y profesores que contribuyeron sin duda alguna en mi desarrollo profesional.

Capítulo 1 Introducción e Información General.....	17
1.1 Ubicación Geográfica.....	18
1.2 Justificación.....	18
1.3 Antecedentes	19
1.4 Objetivos	19
1.4.1 Objetivo general.....	19
1.4.2 Objetivo específico	19
1.5 Hipótesis.....	20
1.6 Variables.....	20
1.6.1 Variables independientes	20
1.6.2 Variables dependientes	20
Capítulo 2 Marco Teórico	21
2.1 El Sistema Fluvial	21
2.2 Clasificación de los Ríos en Función del Caudal y la Carga de Sedimentos	22
2.3 Propiedades Individuales de las Partículas.....	24
2.3.1 Tamaño.	24
2.3.2 Forma.	24
2.3.3 Velocidad de caída.....	24
2.4 Propiedades en Conjunto de las Partículas.....	25
2.4.1 Distribución de los tamaños de las partículas.	25
2.4.2 Densidad.	26
2.4.3 Peso específico.....	26
2.4.4 Peso volumétrico.....	26
2.4.5 Peso específico sumergido.....	27
2.4.6 Viscosidad.....	27
2.4.7 Concentración de partículas en suspensión.....	28
2.4.8 Angulo de reposo.	28
2.5 Inicio del Movimiento de las Partículas.....	28
2.6 Ábaco de Shields.....	30
2.7 Formas de Fondo.....	31
2.7.1 Arrugas.....	31
2.7.2 Dunas.	31
2.7.3 Lecho plano.....	32
2.7.4 Antidunas.....	32
2.8 Métodos para Valuar el Transporte Total de Fondo, Separando el Arrastre en la Capa de fondo y el Transporte en de Fondo en Suspensión.	34
2.8.1 Método de Einstein.	35
2.8.2 Método de Bagnold.....	41
2.8.3 Método de Chang, Simons y Richardson.....	43
2.8.4 Método de Toffaleti.	48

2.8.5	Método de Engelund y Fredsoe.	51 ^v
2.8.6	Método de Kikkawa e Ishikawa.	57
2.8.7	Método de Van Rijn.	60
2.9	Métodos para Valorar el Transporte de Sedimentos de Lavado.	65
2.9.1	Método de Lane y Kalinske.	65
2.9.2	Método de Einstein.	66
2.9.3	Método de Brooks.	67
2.9.4	Método de Chang, Simons y Richardson.	69
2.9.5	Método de Einstein y Abdel-All.	72
2.9.6	Método de ajuste mediante información del ADCP.	73
2.9.7	Método del índice acústico mediante el uso de información del ADCP.	75
Capítulo 3 Mediciones en Campo.		78
3.1	Monumentación y Posicionamiento Geodésico.	78
3.1.1	Metodología de trabajo.	80
3.1.2	Monumentación.	81
3.1.3	Posicionamiento.	81
3.1.4	Procesamiento.	82
3.2	Medición de Niveles de Río.	83
3.2.1	Instalación de reglas limnimétricas.	83
3.2.2	Registro.	84
3.2.3	Pendiente hidráulica.	86
3.3	Aforos o Medición de Velocidades y Corrientes.	86
3.3.1	Consideraciones para la medición.	87
3.3.2	Calibración.	87
3.3.3	Ubicación de la sección de aforo.	87
3.3.4	Aforo.	88
3.3.5	Resultados de los aforos.	90
3.3.6	Resumen de los aforos.	94
3.3.7	Análisis aplicado al transporte de sedimentos.	94
3.4	Muestreo de Sedimentos de Fondo y de Suspensión.	96
3.4.1	Sedimentos en suspensión.	98
3.4.2	Sedimentos de fondo.	100
Capítulo 4 Análisis y Cálculos.		104
4.1	Parámetros Necesarios.	105
4.2	Transporte de Sedimentos de Fondo por Arrastre y en Suspensión.	107
4.2.1	Método de Einstein.	107
4.2.2	Método de Bagnold.	124
4.2.3	Método de Tofaletti.	136
4.2.4	Método de Engelund y Fredsoe.	151
4.2.5	Método de Kikkawa e Ishikawa.	165
4.2.6	Método de Van Rijn.	174
4.3	Transporte de Sedimentos de Lavado.	183
4.3.1	Método de Lane y Kalinske.	183
4.3.2	Método de Einstein.	190

4.3.3	Método de Brooks.....	196	vi
4.3.4	Método de Chang, Simons y Richardson.....	204	
4.3.5	Método de ajuste mediante datos del ADCP.	213	
4.3.6	Método del Índice Acústico.....	244	
Capítulo 5 Discusión y Análisis de Resultados.....		251	
5.1	Transporte de Sedimentos de Fondo por Arrastre y en Suspensión.....	251	
5.2	Transporte de Sedimentos de Lavado.	253	
CONCLUSIONES.....		257	
RECOMENDACIONES		260	
Bibliografía		261	
Anexo A.....		263	

Índice de figuras

vii

Figura 1.1. Ubicación geográfica del área de investigación	18
Figura 2.1. Sistema fluvial idealizado.....	22
Figura 2.2. Clasificación de ríos según su caudal y carga de sedimentos	23
Figura 2.3. Curva granulométrica	25
Figura 2.4. Ábaco de Shields	30
Figura 2.5. Flujo hidráulicamente rugoso y liso	31
Figura 2.6. Formas de fondo	32
Figura 2.7. Formas de fondo en el río Marañón	33
Figura 2.8. Formas de fondo en el río Pastaza.....	33
Figura 2.9. Diagrama de formas de fondo en un ábaco de Shields.....	34
Figura 2.10. Factor de corrección x en las fórmulas de velocidad media y distribuciones de velocidades.....	36
Figura 2.11. Factor de corrección Y y ϵ	37
Figura 2.12. Factor de corrección ϕ^* en función de ψ^*	38
Figura 2.13. Valores de I_1 en función de los parámetros A y z	39
Figura 2.14. Valores de I_2 en función de los parámetros A y z	40
Figura 2.15. Valores teóricos de los factores de eficiencia de arrastre de fondo.....	42
Figura 2.16. Valor de $\tan(\alpha)$	42
Figura 2.17. Coeficiente K_T	45
Figura 2.18. Esfuerzo cortante crítico.....	45
Figura 2.19. Valores de la constante de Von Karman	46
Figura 2.20. Valores de I_3 en función de A y z_2	47
Figura 2.21. Valores de I_4 en función de A y z_2	47
Figura 2.22. Coeficiente A y factor de corrección K_T	48
Figura 2.23. Determinación de v_3 en función de v_2 y v_1	49
Figura 2.24. Valores de I_1 en función de los parámetros A y z	56
Figura 2.25. Valores de I_2 en función de los parámetros A y z	57
Figura 2.26. Valores de $f(z, kV/V^*)$	69
Figura 2.27. Valores de la constante k de von Karman	71
Figura 2.28. Valores de la solución de la integral I_3	71
Figura 2.29. Valores de la solución de la integral I_4	72
Figura 2.30. Valores del coeficiente de Von Karman k	73
Figura 2.31. Valores del coeficiente σ_s	77
Figura 3.1. Ubicación de la zona de investigación	79
Figura 3.2. Ubicación de las reglas limnimétricas dentro del área de investigación	84
Figura 3.3. Ubicación de la sección de aforo.....	88
Figura 3.4. Descripción de las estimaciones en una sección medida por un ADCP.....	89
Figura 3.5. Distribución de velocidades en la sección de aforo.....	90
Figura 3.6. Líneas de corriente en la sección de aforo en la sección de aforo.....	90
Figura 3.7. Distribución de velocidades en la sección de aforo.....	91

	viii
Figura 3.8. Líneas de corriente en la sección de aforo en la sección de aforo.....	91
Figura 3.9. Distribución de velocidades en la sección de aforo.....	92
Figura 3.10. Líneas de corriente en la sección de aforo en la sección de aforo.....	92
Figura 3.11. Distribución de velocidades en la sección de aforo.....	93
Figura 3.12. Líneas de corriente en la sección de aforo en la sección de aforo.....	93
Figura 3.13. División de la sección transversal en 10 zonas de ancho igual	95
Figura 3.14. Valores de velocidad celda por celda distribuida en los inicios de la zona 1.....	95
Figura 3.15. Ubicaciones de las muestras de sedimentos extraídas.....	97
Figura 3.16. Ubicaciones de las verticales de muestreo	98
Figura 3.17. Curvas granulométricas de las muestras obtenidas del fondo del río Amazonas...	102
Figura 4.1. Perfil de velocidades zona 1	215
Figura 4.2. Ln(Y) vs Velocidad	215
Figura 4.3. Perfil de velocidades zona 2	218
Figura 4.4. Ln(Y) vs Velocidad	218
Figura 4.5. Perfil de velocidades zona 3	221
Figura 4.6. Ln(Y) vs Velocidad	221
Figura 4.7. Perfil de velocidades zona 4	224
Figura 4.8. Ln(Y) vs Velocidad	224
Figura 4.9. Perfil de velocidades zona 5	227
Figura 4.10. Ln(Y) vs Velocidad	227
Figura 4.11. Perfil de velocidades zona 6	230
Figura 4.12. Ln(Y) vs Velocidad	230
Figura 4.13. Perfil de velocidades zona 7	233
Figura 4.14. Ln(Y) vs Velocidad	233
Figura 4.15. Perfil de velocidades zona 8	236
Figura 4.16. Ln(Y) vs Velocidad	236
Figura 4.17. Perfil de velocidades zona 9	239
Figura 4.18. Ln(Y) vs Velocidad	239
Figura 4.19. Perfil de velocidades zona 10.....	241
Figura 4.20. Ln(Y) vs Velocidad	242
Figura 4.21. Retrodispersión distribuida en toda la sección transversal de estudio	244
Figura 4.22. Valores de la retrodispersión en dB distribuidas en toda la sección celda por celda	244
Figura 4.23. Valores de coeficiente de corrección del campo cercano distribuidas en toda la sección celda por celda	245
Figura 4.24. Valores de la señal de retrodispersión corregida distribuidas en toda la sección celda por celda.....	247
Figura 4.25. Retrodispersión corregida Vs el logaritmo de la concentración de sólidos.....	248
Figura 4.26. Valores de concentraciones en mg/L distribuidos en toda la sección transversal celda por celda.	249
Figura 4.27. Valores de velocidades en m/s distribuidos en toda la sección transversal celda por celda	249
Figura 4.28. Valores del transporte de sedimentos en kgf/s distribuidos en toda la sección transversal celda por celda	250

	ix
Figura A.1. Determinación del factor de corrección x	264
Figura A.2. Determinación del factor de corrección x	265
Figura A.3. Determinación de Y y ε_i	266
Figura A.4. Estimación de \varnothing_{*i}	267
Figura A.5. Estimación la $\tan(\alpha)$	270
Figura A.6. Determinación del factor de eficiencia.....	270
Figura A.7. Determinación de v_3	274
Figura A.8. Determinación del coeficiente A y el factor de corrección K_T	275
Figura A.9. Determinación del factor de corrección x	288
Figura A.10. Determinación de la función f	290
Figura A.11. Determinación de la constante k de von Karman	293
Figura A.12. Determinación de la integral I_3	294
Figura A.13. Determinación de la integral I_4	294

Índice de fotografías

Fotografía 3.1. Hitos geodésicos monumentados en la localidad de San Pablo	81
Fotografía 3.2. Posicionamiento de los hitos geodésicos en la localidad de San Pablo	82
Fotografía 3.3. Instalación de reglas limnimétricas para la medición de niveles de río	83
Fotografía 3.4. Botella Van Dorn	99
Fotografía 3.5. Draga manual de arrastre.....	100

Índice de tablas

X

Tabla 3.1. Datos del punto del punto de control.....	82
Tabla 3.2. Resultados del procesamiento geodésico.....	83
Tabla 3.3. Coordenadas en UTM de las reglas limnimétricas	84
Tabla 3.4. Registro de los niveles de espejo de agua en la regla 1	85
Tabla 3.5. Registro de los niveles de espejo de agua en la regla 2	85
Tabla 3.6. Desnivel entre reglas limnimétricas.....	86
Tabla 3.7. Determinación de la pendiente hidráulica	86
Tabla 3.8. Ubicación de la sección de aforo	88
Tabla 3.9. Resumen de la pasada 1	91
Tabla 3.10. Resumen de la pasada 2	92
Tabla 3.11. Resumen de la pasada 3	93
Tabla 3.12. Resumen de la pasada 4	94
Tabla 3.13. Resumen de los aforos	94
Tabla 3.14. Resumen de los resultados obtenidos para cada zona.....	96
Tabla 3.15. Ubicaciones de las verticales de muestreo.....	98
Tabla 3.16. Resultados de las concentraciones de las muestras extraídas	100
Tabla 3.17. Características de las muestras de fondo	103
Tabla 4.1. Variables hidráulicas y geométricas	105
Tabla 4.2. Propiedades del agua	105
Tabla 4.3. Propiedades de las partículas	106
Tabla 4.4. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	108
Tabla 4.5. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	109
Tabla 4.6. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	109
Tabla 4.7. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	110
Tabla 4.8. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	111
Tabla 4.9. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	111
Tabla 4.10. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	112
Tabla 4.11. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	113
Tabla 4.12. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	113
Tabla 4.13. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	114
Tabla 4.14. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	115
Tabla 4.15. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	115
Tabla 4.16. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	116
Tabla 4.17. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	117
Tabla 4.18. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	117
Tabla 4.19. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	118
Tabla 4.20. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	119
Tabla 4.21. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	119
Tabla 4.22. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	120
Tabla 4.23. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	121

Tabla 4.24. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	121
Tabla 4.25. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	122
Tabla 4.26. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	123
Tabla 4.27. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.....	123
Tabla 4.28. Resumen de los resultados.....	124
Tabla 4.29. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	126
Tabla 4.30. Determinación de la velocidad de caída equivalente.....	126
Tabla 4.31. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	127
Tabla 4.32. Determinación de la velocidad de caída equivalente.....	128
Tabla 4.33. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	128
Tabla 4.34. Determinación de la velocidad de caída equivalente.....	129
Tabla 4.35. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	130
Tabla 4.36. Determinación de la velocidad de caída equivalente.....	130
Tabla 4.37. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	131
Tabla 4.38. Determinación de la velocidad de caída equivalente.....	132
Tabla 4.39. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	132
Tabla 4.40. Determinación de la velocidad de caída equivalente.....	133
Tabla 4.41. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.....	134
Tabla 4.42. Determinación de la velocidad de caída equivalente.....	134
Tabla 4.43. Resumen de los resultados.....	135
Tabla 4.44. Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.....	137
Tabla 4.45. Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui}	138
Tabla 4.46. Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.....	139
Tabla 4.47. Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui}	140
Tabla 4.48. Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.....	141
Tabla 4.49. Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui}	142
Tabla 4.50. Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.....	143
Tabla 4.51. Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui}	143
Tabla 4.52. Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.....	144
Tabla 4.53. Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui}	145
Tabla 4.54. Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.....	146
Tabla 4.55. Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui}	147
Tabla 4.56. Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.....	148
Tabla 4.57. Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui}	148
Tabla 4.58. Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.....	149
Tabla 4.59. Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui}	150
Tabla 4.60. Resumen de los resultados.....	151
Tabla 4.61. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva	152
Tabla 4.62. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva	153
Tabla 4.63. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva	155

Tabla 4.64. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.....	156
Tabla 4.65. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.....	157
Tabla 4.66. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.....	158
Tabla 4.67. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.....	160
Tabla 4.68. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.....	161
Tabla 4.69. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.....	162
Tabla 4.70. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.....	163
Tabla 4.71. Resumen de los resultados.....	165
Tabla 4.72. Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos ...	166
Tabla 4.73. Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re^*	166
Tabla 4.74. Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos ...	167
Tabla 4.75. Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re^*	167
Tabla 4.76. Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos ...	167
Tabla 4.77. Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re^*	168
Tabla 4.78. Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos ...	168
Tabla 4.79. Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re^*	168
Tabla 4.80. Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos ...	169
Tabla 4.81. Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re^*	169
Tabla 4.82. Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos ...	170
Tabla 4.83. Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re^*	170
Tabla 4.84. Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos ...	171
Tabla 4.85. Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re^*	171
Tabla 4.86. Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos ...	171
Tabla 4.87. Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re^*	172
Tabla 4.88. Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos ...	172
Tabla 4.89. Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re^*	172
Tabla 4.90. Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos ...	173
Tabla 4.91. Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re^*	173
Tabla 4.92. Resumen de los resultados.....	174
Tabla 4.93. Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.....	175
Tabla 4.94. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	175
Tabla 4.95. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	175
Tabla 4.96. Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.....	176
Tabla 4.97. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	176
Tabla 4.98. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	176
Tabla 4.99. Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.....	177
Tabla 4.100. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	177

Tabla 4.101. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	177
Tabla 4.102. Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.....	178
Tabla 4.103. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	178
Tabla 4.104. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	178
Tabla 4.105. Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.....	179
Tabla 4.106. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	179
Tabla 4.107. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	179
Tabla 4.108. Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.....	180
Tabla 4.109. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	180
Tabla 4.110. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	180
Tabla 4.111. Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.....	181
Tabla 4.112. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	181
Tabla 4.113. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	181
Tabla 4.114. Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.....	182
Tabla 4.115. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	182
Tabla 4.116. Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.....	182
Tabla 4.117. Resumen de los resultados	183
Tabla 4.118. Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.....	184
Tabla 4.119. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	184
Tabla 4.120. Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.....	184
Tabla 4.121. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	184
Tabla 4.122. Concentración a mitad del tirante obtenida mediante Lane y Kalinske	185
Tabla 4.123. Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.....	185
Tabla 4.124. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	185
Tabla 4.125. Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.....	186
Tabla 4.126. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	186
Tabla 4.127. Concentración a mitad del tirante obtenida mediante Lane y Kalinske	186
Tabla 4.128. Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.....	187
Tabla 4.129. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	187
Tabla 4.130. Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.....	187
Tabla 4.131. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	187
Tabla 4.132. Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.....	188
Tabla 4.133. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	188
Tabla 4.134. Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.....	188
Tabla 4.135. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	188

Tabla 4.136. Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.....	189
Tabla 4.137. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	189
Tabla 4.138. Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.....	189
Tabla 4.139. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	189
Tabla 4.140. Resumen de los resultados.....	190
Tabla 4.141. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	191
Tabla 4.142. Concentración a mitad del tirante obtenida mediante Einstein.....	191
Tabla 4.143. Comparación de la velocidad obtenidas por el perfil utilizado por Einstein y obtenidas por el ADCP.....	192
Tabla 4.144. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	192
Tabla 4.145. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	192
Tabla 4.146. Concentración a mitad del tirante obtenida mediante Einstein.....	193
Tabla 4.147. Comparación de la velocidad obtenidas por el perfil utilizado por Einstein y obtenidas por el ADCP.....	193
Tabla 4.148. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	194
Tabla 4.149. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	194
Tabla 4.150. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	194
Tabla 4.151. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	194
Tabla 4.152. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.....	195
Tabla 4.153. Resumen de los resultados.....	196
Tabla 4.154. Determinación de z y $C(d/2)$	196
Tabla 4.155. Determinación del transporte.....	197
Tabla 4.156. Determinación de z y $C(d/2)$	197
Tabla 4.157. Determinación del transporte.....	197
Tabla 4.158. Comparación de la velocidad obtenidas por el perfil utilizado por Einstein y obtenidas por el ADCP.....	198
Tabla 4.159. Determinación de z y $C(d/2)$	198
Tabla 4.160. Determinación del transporte.....	198
Tabla 4.161. Determinación de z y $C(d/2)$	199
Tabla 4.162. Determinación del transporte.....	199
Tabla 4.163. Comparación de la velocidad obtenidas por el perfil utilizado por Einstein y obtenidas por el ADCP.....	200
Tabla 4.164. Determinación de z y $C(d/2)$	200
Tabla 4.165. Determinación del transporte.....	200
Tabla 4.166. Determinación de z y $C(d/2)$	201
Tabla 4.167. Determinación del transporte.....	201
Tabla 4.168. Determinación de z y $C(d/2)$	201
Tabla 4.169. Determinación del transporte.....	201
Tabla 4.170. Determinación de z y $C(d/2)$	202
Tabla 4.171. Determinación del transporte.....	202
Tabla 4.172. Determinación de z y $C(d/2)$	202
Tabla 4.173. Determinación del transporte.....	203

Tabla 4.174. Determinación de z y $C(d/2)$	203 ^{xv}
Tabla 4.175. Determinación del transporte.....	203
Tabla 4.176. Resumen de los resultados.....	204
Tabla 4.177. Determinación del espesor de la capa de fondo ab.....	204
Tabla 4.178. Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.....	205
Tabla 4.179. Determinación del transporte de lavado.....	205
Tabla 4.180. Determinación del espesor de la capa de fondo ab.....	205
Tabla 4.181. Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.....	205
Tabla 4.182. Determinación del transporte de lavado.....	205
Tabla 4.183. Concentración a mitad del tirante obtenida mediante Chang, Simons y Richardson.....	206
Tabla 4.184. Comparación de la velocidad obtenidas por el perfil utilizado por Chang, Simons y Richardson y obtenidas por el ADCP.....	206
Tabla 4.185. Determinación del espesor de la capa de fondo ab.....	207
Tabla 4.186. Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.....	207
Tabla 4.187. Determinación del transporte de lavado.....	207
Tabla 4.188. Determinación del espesor de la capa de fondo ab.....	207
Tabla 4.189. Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.....	207
Tabla 4.190. Determinación del transporte de lavado.....	208
Tabla 4.191. Concentración a mitad del tirante obtenida mediante Chang, Simons y Richardson.....	208
Tabla 4.192. Comparación de la velocidad obtenidas por el perfil utilizado por Chang, Simons y Richardson y obtenidas por el ADCP.....	208
Tabla 4.193. Determinación del espesor de la capa de fondo ab.....	209
Tabla 4.194. Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.....	209
Tabla 4.195. Determinación del transporte de lavado.....	209
Tabla 4.196. Determinación del espesor de la capa de fondo ab.....	209
Tabla 4.197. Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.....	210
Tabla 4.198. Determinación del transporte de lavado.....	210
Tabla 4.199. Determinación del espesor de la capa de fondo ab.....	210
Tabla 4.200. Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.....	210
Tabla 4.201. Determinación del transporte de lavado.....	210
Tabla 4.202. Determinación del espesor de la capa de fondo ab.....	211
Tabla 4.203. Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.....	211
Tabla 4.204. Determinación del transporte de lavado.....	211
Tabla 4.205. Determinación del espesor de la capa de fondo ab.....	211
Tabla 4.206. Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.....	211
Tabla 4.207. Determinación del transporte de lavado.....	212
Tabla 4.208. Determinación del espesor de la capa de fondo ab.....	212
Tabla 4.209. Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.....	212
Tabla 4.210. Determinación del transporte de lavado.....	212
Tabla 4.211. Resumen de los resultados.....	213
Tabla 4.212. Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 1....	214
Tabla 4.213. Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 2....	217

Tabla 4.214. Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 3	220
Tabla 4.215. Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 4....	223
Tabla 4.216. Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 5....	226
Tabla 4.217. Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 6....	229
Tabla 4.218. Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 7....	232
Tabla 4.219. Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 8....	235
Tabla 4.220. Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 9....	238
Tabla 4.221. Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 10..	241
Tabla 4.222. Resumen de resultados por zonas	243
Tabla 4.223. Determinación del valor medio del coeficiente de atenuación por el sedimento ..	246
Tabla 4.224. Correlación entre Log (C) y SCS.....	247
Tabla 4.225. Determinación del error porcentual entre la concentración obtenida en campo y la obtenida por retrodispersión	249
Tabla 5.1. Resumen de los resultados totales	253
Tabla 5.2. Resultados de los métodos analizados para el transporte de lavado en suspensión ..	256
Tabla A.1. Resumen de las estimaciones para las demás fracciones	272
Tabla A.2. Resumen de las estimaciones para las demás fracciones	278
Tabla A.3. Resumen de las estimaciones para las demás fracciones	291

Capítulo 1

Introducción e Información General

La principal problemática que se encuentra al realizar cualquier investigación en los ríos de la amazonia del Perú es la escasa información básica de calidad que nos permita entender de mejor manera el comportamiento hidráulico de los ríos, principalmente del más caudaloso del mundo que en su evento máximo extremo medido en la ciudad de Tabatinga (Brasil) logró transportar $58,915 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente, además de ser el río de mayor extensión desde el nacimiento de su cuenca en el Perú (Quebrada Apacheta), hasta su desembocadura en el océano Atlántico. El río Amazonas, que se forma por la unión de los ríos Ucayali y Marañón cerca de la localidad de Nauta cubre aproximadamente 597 km de longitud dentro del territorio peruano, logrando mantener en constante comunicación nuestras ciudades de la selva peruana.

En la actualidad el conocer sobre el transporte de sedimentos en el río Amazonas es de gran interés debido a que nos permitirá comprender como esto impacta en los procesos morfodinámicos del río, así como en los procesos de sedimentación y socavación que ocurren de forma natural, y además cuando se interviene el río para la implementación de diversas estructuras hidráulicas y para la mejora de la navegación segura. La morfología de este río es muy cambiante en el tiempo debido a la propia composición del cauce, principalmente de arenas, limos y arcillas, materiales finos que cuando el río aumenta de caudal son suspendidos desde el fondo (socavación natural) generando así un aumento de la profundidad mientras que cuando el caudal disminuye, este material es depositado en el fondo del río (sedimentación natural). Así también se puede observar que desde el inicio de su curso el río Amazonas presenta continuamente formaciones meándricas, estos meandros forman parte importante de la variación de la carga de sedimentos en el curso del río debido a que se erosionan sus riberas en las partes cóncavas (aporte de sedimentos hacia el cauce) y se sedimentan antes de llegar a las partes convexas (es ahí donde se forman los albardones).

Es así que la presente tesis busca dar a conocer la capacidad del transporte de sedimentos de fondo y suspensión del río Amazonas a fin de que esta pueda ser tomada como referencia para un análisis antes de realizar cualquier intervención en el río, además de que se puede considerar como una investigación de línea base, ya que en el Perú no existe metodología de cómo realizar correctamente este tipo de investigaciones.

1.1 Ubicación Geográfica.

El área de investigación se encuentra ubicada en el tramo del río Amazonas próximo al distrito de San Pablo, el cual pertenece a la provincia de Mariscal Ramón Castilla, departamento de Loreto. En la figura 1.1 se logra observar al área de investigación encerrada en un círculo rojo.

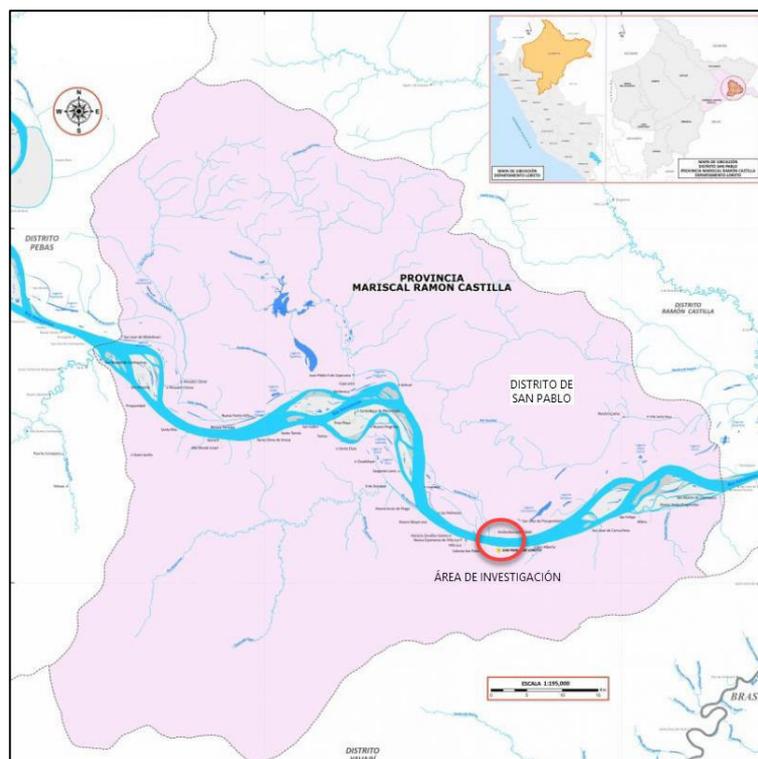


Figura 1.1. Ubicación geográfica del área de investigación.
Fuente: Gobierno Regional de Loreto, 2016.

1.2 Justificación

En la presente investigación se obtendrá información sobre la capacidad del transporte de sedimentos del río Amazonas; con lo cual podremos comprender de mejor manera los procesos

morfodinámicos complejos que se desarrollan en este y cuya importancia en la Amazonia peruana es altísima ya que en los últimos años se vienen desarrollando obras que involucran la intervención de este río.

1.3 Antecedentes

- Estudio de Navegabilidad de los ríos Marañón y Amazonas Tramo: Saramiriza – Santa Rosa, desarrollado por el Consorcio Hidrovía Amazonas para el Ministerio de Transportes y Comunicaciones en el año 2008.

En este estudio se determinó que el transporte de sedimentos en suspensión (se entiende que el de fondo en suspensión y el de lavado) en la localidad de San Pablo fue de 282,862 m³/día para un caudal de 25,163 m³/s mediante la aplicación del método de caudal medio multiplicado por la concentración media, más no se estimó el transporte de fondo por arrastre.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Cuantificar la capacidad de Transporte de Sedimentos en una sección del río Amazonas próxima a la ciudad de San Pablo, Loreto, Perú.

1.4.2 Objetivo específico

- Exponer la necesidad y las bondades de la aplicación de un ADCP para la cuantificación del transporte de sedimentos.
- Modificar la aplicación y reescribir las ecuaciones para el transporte de lavado descritas por Maza y García en el Capítulo 10 del Manual de Ingeniería de Ríos.
- Determinar el perfil de concentraciones teóricos que mejor representa la distribución real de concentraciones en el río Amazonas.
- Determinar la capacidad del transporte de sedimentos de fondo, por arrastre y en suspensión, en una sección del río Amazonas, próxima a la ciudad de San Pablo, Loreto y realizar comparaciones entre los distintos métodos empíricos.

- Determinar la capacidad del transporte de sedimentos de lavado en una sección del río Amazonas, próxima a la ciudad de San Pablo, Loreto, y realizar comparaciones entre los métodos empíricos modificados, método ajuste mediante datos del ADCP descrito por el autor en esta investigación y el método del índice acústico.
- Exponer la importancia de la aplicación del método de índice acústico para el caso de ríos amazónicos.

1.5 Hipótesis

Es posible aplicar las nuevas tecnologías para la mejora de los métodos empíricos comúnmente utilizados para cuantificar el transporte de sedimentos en un río.

1.6 Variables

1.6.1 Variables independientes

- Tipos de sedimentos del lecho fluvial y riberas.
- Propiedades de los sedimentos del lecho fluvial y riberas.
- Caudal.

1.6.2 Variables dependientes

- Transporte de sedimentos.

Capítulo 2

Marco Teórico

En el presente capítulo se pretende definir conceptos básicos necesarios de la mecánica de fluidos y la hidráulica fluvial que permitan comprender como ocurre el transporte de sedimentos en un río.

2.1 El Sistema Fluvial

Es sistema fluvial en términos generales vendría a estar representado por la cuenca hidrográfica, por pequeños riachuelos que empiezan a discurrir desde la divisoria de aguas hasta llegar al río principal o de primer orden, el cual desembocará sus aguas y sedimentos en el mar. Como bien se sabe el sistema fluvial es muy complejo, ya que los componentes hidráulicos, geológicos, atmosféricos y otros, interactuando entre sí, determinan las características de este sistema.

Según Schumm (1997) el sistema fluvial está compuesto por tres zonas:

- Zona 1.- Área de producción de sedimentos, es en esta zona donde se origina la mayor cantidad de agua y sedimentos.
- Zona 2.- Área de transferencia, es donde el cauce del río es más estable y donde su configuración está mejor definida. Los ríos grandes presentan tramos largos en esta zona y puede ser ausente de ríos pequeños.
- Zona 3.- Área de deposición, esta zona está cerca de la boca de salida, donde el río aluvial y está bajo la influencia de las variaciones de las mareas.

A continuación en la figura 2.1 se logra observar lo descrito anteriormente por Schumm.

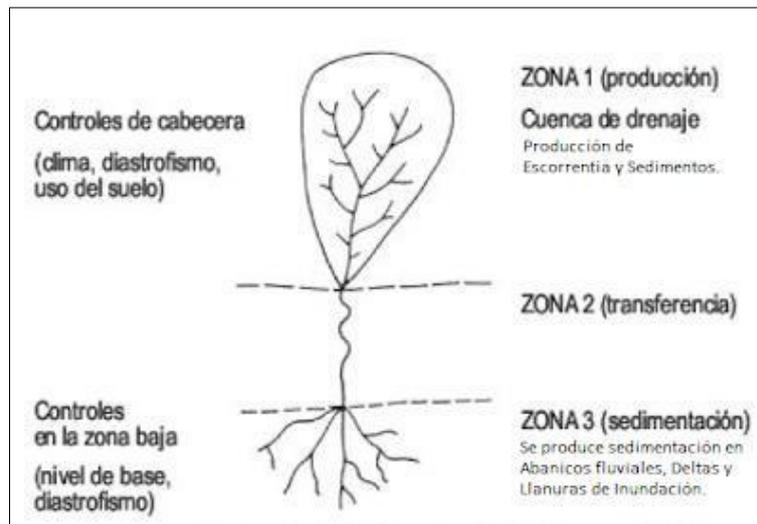


Figura 2.1. Sistema fluvial idealizado.

Fuente: S.A. Schumm, *Patterns of Alluvial Rivers*, 1977.

En el caso particular de nuestra investigación, el río Amazonas, desde su formación por la unión de los ríos Marañón y Ucayali, considerando las descripciones realizadas por Schumm, observar la figura 2.1, se encontraría entre las Zonas 2 y 3 de su propio sistema fluvial. En este caso el río Amazonas cumpliría con las funciones de transporte y deposición de sedimentos.

2.2 Clasificación de los Ríos en Función del Caudal y la Carga de Sedimentos

El caudal y la carga de sedimentos son dos variables muy bien relacionadas, ya que en épocas de avenida, donde el caudal es mayor, un río tiende a transportar mayor cantidad de sedimentos debido a los desprendimientos de partículas que se ocasionan producto de las fuertes precipitaciones, adicional a esto al aumentar el caudal de un río, las partículas finas que se encuentran en el lecho fluvial tienden a suspenderse originando una mayor carga de transporte, caso contrario ocurre en las épocas de vaciante, donde un río tiende a depositar sedimentos debido a las bajas velocidades que se presentan.

Según Apaella (2014, p.19–20) si se considera la carga de sedimento transportada por un río, un exceso de material transportado causa deposición, una deficiencia causa erosión y entre los dos extremos está el cauce estable. Un cauce es estable si no muestra un cambio progresivo en la pendiente, dimensiones y forma. Pueden ocurrir cambios temporales durante las avenidas,

pero el cauce estable es el que en un cierto periodo de años ajusta su pendiente a la descarga y conserva sus características, como la velocidad requerida para transportar la carga de sedimentos aportada por la cuenca.

De acuerdo con relaciones empíricas y la clasificación de los ríos, parece que con el tiempo un río puede tener un cambio completo de morfología si cambia el gasto y la cantidad de sedimento transportado en una magnitud suficiente. La experiencia demuestra que en general, los cambios de régimen hidrológico, relacionados con cambios en el gasto y tipo de carga de sedimento, se manifiestan en muchos ajustes de la morfología (ancho de cauce, tirante, sinuosidad y longitud de onda de meandro). Ver figura 2.2.

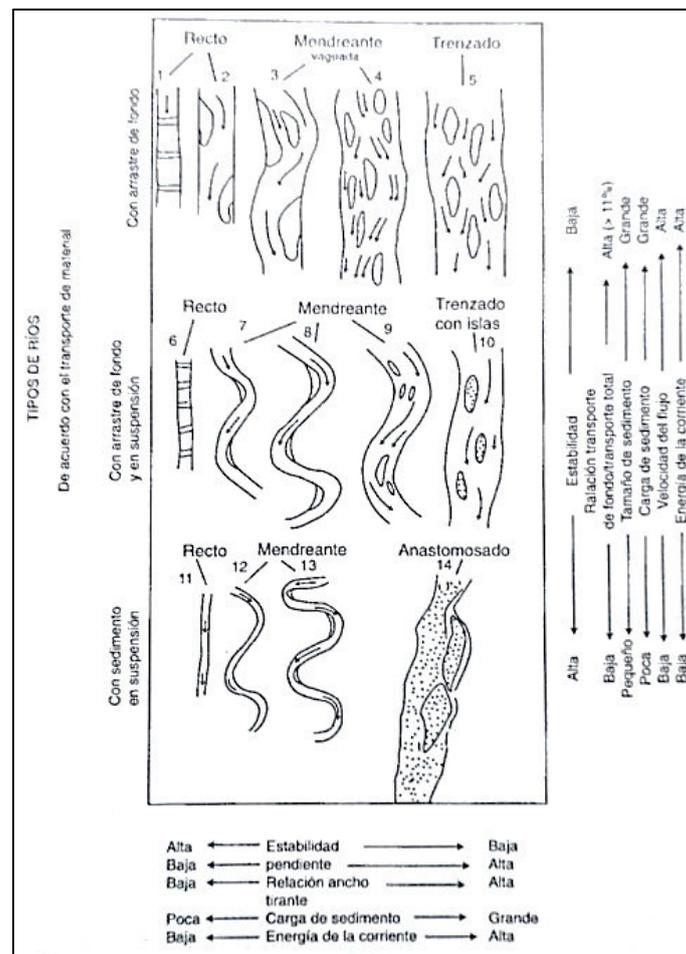


Figura 2.2. Clasificación de ríos según su caudal y carga de sedimentos.

Fuente: S.A. Schumm, *Patterns of Alluvial Rivers*, 1985.

2.3 Propiedades Individuales de las Partículas

La importancia de las propiedades individuales de las partículas radica en que el sedimento transportado por un río no está constituido por partículas con idénticas características, por lo que es necesario analizar parámetros que puedan representar a estas. Dentro de las propiedades más importantes tenemos al tamaño, la forma y la velocidad de caída.

2.3.1 Tamaño.

Es la propiedad de mayor representación para clasificar el material transportado por un río y se define principalmente mediante la utilización de tamices, los cuales son mallas con aperturas de celdas estándar por donde pasa el sedimento a ser medido.

2.3.2 Forma.

La forma del sedimento a transportar por un río influencia de manera directa en su propio transporte, estas formas pueden ser muy variadas y pueden tener tendencias a esferas, discos, láminas y rollos, o ser completamente irregulares.

Según Apaella (2014, p.30) las partículas de formas geométricas muy diferentes, pero con el mismo volumen y densidad, pueden comportarse en forma similar en un fluido, por lo que la forma puede definirse en términos de su comportamiento dinámico.

Para determinar la forma de una partícula es necesario conocer las siguientes propiedades adicionales.

- Esfericidad
- Redondez
- Factor forma.

2.3.3 Velocidad de caída.

Se define como la velocidad máxima que adquiere la partícula al caer dentro de un fluido, la cual se alcanza cuando el peso sumergido de la partícula se equilibra con el empuje.

Según Rijn (1993) los criterios para el cálculo de la velocidad de caída se basan en deducciones hechas para esferas y en correcciones que han sido obtenidas en experimentos, según sea la forma de la partícula. La velocidad de caída de una partícula esférica se determina cuando la fuerza de arrastre se equilibra con el peso sumergido.

2.4 Propiedades en Conjunto de las Partículas.

Las propiedades más importantes en conjunto de las partículas que son transportadas por un río son las siguientes:

2.4.1 Distribución de los tamaños de las partículas.

Según Apacla (2014, p.39) en una muestra grande de suelo cohesivo, es de interés conocer la forma en la que están distribuidos los tamaños de las partículas más que el tamaño correspondiente a una sola. Esto se obtiene mediante la curva granulométrica, ver figura 2.3, que representa la distribución de las partículas en una muestra de sedimento. La curva granulométrica se obtiene midiendo la distribución de tamaño de las partículas en una muestra representativa. Esta medición puede hacerse en arenas y gravas con una separación por tamizado y para la fracción fina por sedimentación.

La curva granulométrica como tal nos permite calcular también los diámetros representativos de una muestra, estos diámetros representativos son diferentes percentiles que cada uno de los autores ha determinado para ser considerados como una variable importante en las ecuaciones de transporte de sedimentos.

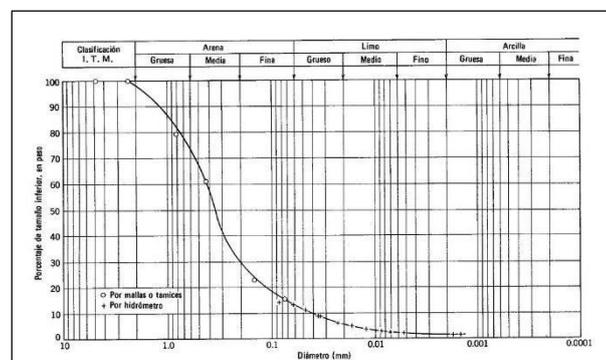


Figura 2.3. Curva granulométrica.

Fuente: S.A. Schumm, *Patterns of Alluvial Rivers*, 1985.

2.4.2 Densidad.

La densidad está definida como la masa por unidad de volumen, es decir:

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad [\text{Ec. 2.1}]$$

Donde:

m : Masa (kg)

V : Volumen (m^3).

2.4.3 Peso específico.

Se define como el peso por unidad de volumen, es decir:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad [\text{Ec. 2.2}]$$

Donde:

γ : Peso específico (kgf/m^3)

W : Peso (kgf).

V : Volumen (m^3).

Además, el peso específico y la densidad se relacionan por la segunda ley de Newton:

$$\gamma = \rho g \quad [\text{Ec. 2.3}]$$

ρ : Densidad (kgf/m^3).

g : Gravedad (m/s^2).

2.4.4 Peso volumétrico.

El peso volumétrico de un conjunto de partículas es la relación entre el peso de la materia y el volumen total que ocupa el conjunto, conteniendo dentro de él, los espacios o vacíos presentes.

Según Apacla (2014, p. 46) en el peso volumétrico de una muestra de sedimento habrá que distinguir el peso volumétrico seco que se tiene cuando todos los vacíos están ocupados por aire, el parcialmente saturado y el sumergido cuando la totalidad de los vacíos están ocupado por agua.

$$\gamma_V = \frac{\text{Peso de sólidos}}{\text{Volumen total}} = \frac{W_S}{V_T} \quad [\text{Ec. 2.4}]$$

2.4.5 Peso específico sumergido.

Cuando las partículas sedimentarias están dentro del agua, el empuje hidrostático influye en el peso específico.

$$\gamma'_S = \gamma_S - \gamma \quad [\text{Ec. 2.5}]$$

Donde:

γ_S : Peso específico de sólidos (kgf/m³)

γ : Peso específico del agua (kgf/m³).

En hidráulica fluvial es común utilizar el peso específico relativo de los sólidos sumergidos (Δ), el cual se expresa como:

$$\Delta = S' = S - 1 = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad [\text{Ec. 2.6}]$$

2.4.6 Viscosidad.

Es la propiedad de los fluidos de resistencia a un movimiento interno o a su deformación angular. Newton obtuvo que en un fluido en movimiento la fuerza interna de frotamiento por unidad de área o esfuerzo tangencial τ es proporcional al gradiente transversal de velocidades du/dy .

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad [\text{Ec. 2.7}]$$

Donde:

μ = es el coeficiente de proporcionalidad, que se denomina viscosidad dinámica o absoluta, y es característico de un fluido.

Además, es común en la práctica utilizar la viscosidad cinemática ν , que es la relación de la viscosidad dinámica y la densidad.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{Ec. 2.8}]$$

2.4.7 Concentración de partículas en suspensión.

La concentración de sedimentos se expresa principalmente, en volumen (C_V), en peso (C_W) y en partes por millón (ppm).

La concentración de sedimentos en volumen se define como el volumen de sólidos (V_S) entre el volumen total (V_T).

$$C_V = \frac{V_S}{V_T} \quad [\text{Ec. 2.9}]$$

Esto también puede ser escrito en función de la porosidad (n), ya que se entiende que si son sedimentos en suspensión, estos están completamente sumergidos en agua.

$$C_V = \frac{V_S}{V_S - V_W} \quad [\text{Ec. 2.10}]$$

$$n = \frac{V_W}{V_T} \quad [\text{Ec. 2.11}]$$

$$C_V = 1 - n \quad [\text{Ec. 2.12}]$$

La concentración en peso se expresa como:

$$C_W = \frac{C_V S}{1 + \Delta C_V} \quad [\text{Ec. 2.13}]$$

2.4.8 Angulo de reposo.

Es el que forman los materiales bajo una condición crítica de equilibrio o de deslizamiento inminente.

2.5 Inicio del Movimiento de las Partículas.

En un cauce de composición granular, el cual soporta una circulación de corriente de agua constante, verá en algún momento el desplazamiento de sus partículas producto de la fuerza de arrastre del agua.

Según Vide (2001) saber en qué condiciones ocurre el problema del umbral, principio, o condición crítica de arrastre o movimiento de partículas de fondo es aún un problema intensamente investigado en la hidráulica fluvial, sin embargo, existe un consenso en torno a un resultado conocido como el ábaco de Shields.

La acción del agua sobre el fondo puede caracterizarse por una tensión cortante de fondo τ . La resistencia de la partícula a ser movida puede relacionarse con su peso sumergido, y del tamaño D que caracteriza el volumen. Con estas tres variables puede formarse la tensión cortante adimensional o llamada también parámetro de Shields o de movilidad, que compara como cociente la fuerza promotora del movimiento (acción de arrastre proporcional a τD^2) con la fuerza estabilizadora (peso, proporcional a $(\gamma_s - \gamma)D^3$).

La acción del agua sobre el fondo puede también representarse por la velocidad característica llamada velocidad de corte v_* . Esta velocidad se define convencionalmente a partir de la tensión τ como $\tau = \rho V_*^2$. También puede definirse a partir del perfil de velocidades y entonces, como primera aproximación, puede usarse:

$$\frac{V}{v_*} = 8.0 \left(\frac{y}{D}\right)^{1/6} \quad [\text{Ec. 2.14}]$$

Donde V es la velocidad media.

Además, el parámetro adimensional $\bar{\tau}$ puede expresarse también en términos de velocidad de corte.

$$\bar{\tau} = \frac{V_*^2}{g \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) D} \quad [\text{Ec. 2.15}]$$

De todos modos lo más interesante de V_* es que, como velocidad significativa para el fondo es la más indicada para constituir el número de Reynolds llamado granular, definido como:

$$Re_* = \frac{v_* D}{\nu} \quad [\text{Ec. 2.16}]$$

Donde ν es viscosidad cinemática.

2.6 Ábaco de Shields

En el ábaco de Shields, que se muestra en la figura 2.4, se propone una curva de principio del movimiento mediante la relación de dos factores, la tensión adimensional y el número de Reynolds granular, en donde por debajo de la curva no hay movimiento.

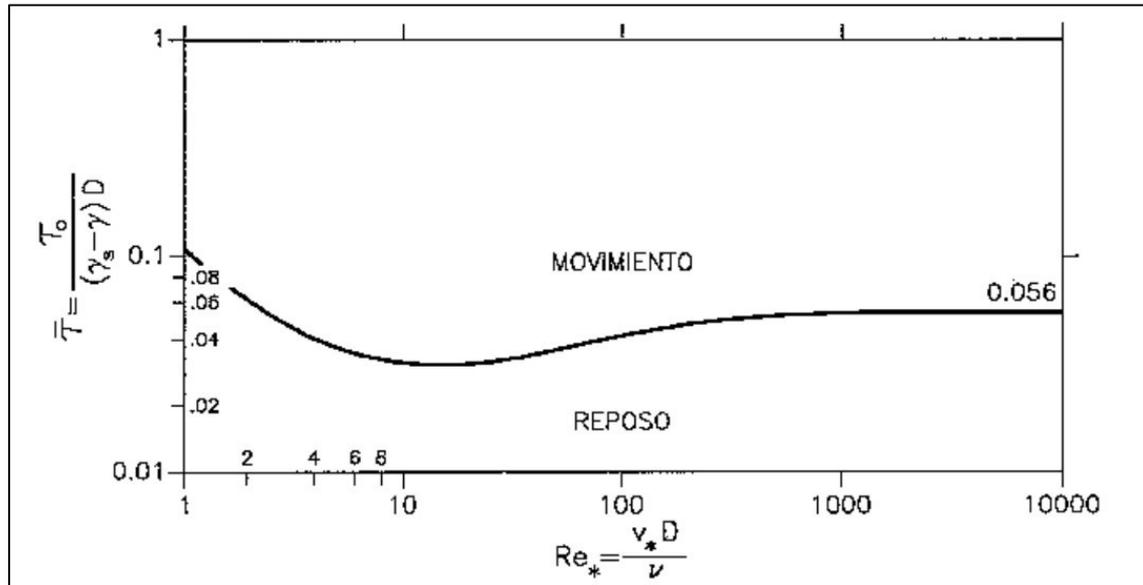


Figura 2.4. Ábaco de Shields.

Fuente: Maza y García, *Manual de Ingeniería de Ríos*, 1996.

La tensión adimensional debe de alcanzar el valor de la ordenada, para cada abscisa, para empezar el movimiento. Como D participa en el denominador de τ , la tensión habrá que ser lógicamente mayor, cuanto mayor sea el tamaño de la partícula cuesta más mover una partícula gruesa que una fina. Pero obsérvese que en este razonamiento también cambia la abscisa. El número de Reynolds granular refleja como cociente el valor relativo de las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en el entorno de un grano, es decir, el grado de turbulencia. A mayor Reynolds el movimiento es más turbulento alrededor de la partícula y la curva tiende a ser más horizontal. De hecho cuando $Re_* > 400$ el movimiento se llama turbulento rugoso, ya que la altura D del grano es mayor que la subcapa límite laminar δ . En movimiento turbulento rugoso, la tensión necesaria para iniciar el movimiento o tensión crítica no depende ya del número de Reynolds, ya que su valor en el ábaco es de 0.056. Este es el caso más frecuente en ríos, por lo

que este último valor puede sustituir al ábaco. Cuando $Re_* < 5$ el movimiento es turbulento liso ya que la subcapa límite laminar cubre la altura del grano. Entre los valores de 5 y 400 el movimiento es turbulento intermedio. Ver figura 2.5.

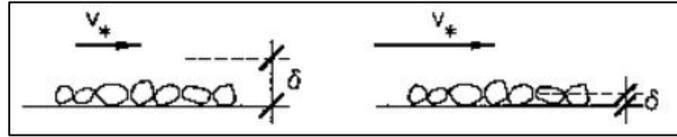


Figura 2.5. Flujo hidráulicamente rugoso y liso. Tomado de Vide.
Fuente: Martín Vide, Ingeniería de Ríos, 2001.

2.7 Formas de Fondo.

Según Vide (2001) en su libro Ingeniería de Ríos, las formas de fondo son las configuraciones onduladas que se pueden presentar principalmente en un río de arena, después de haber superado el umbral del movimiento, el cual depende principalmente de tres variables; el esfuerzo cortante de fondo generado por el fluido, el peso de la partícula sumergida y el tamaño de esta. Estas formas de fondo son de gran importancia debido a que participan en el transporte de sedimentos y también por que ofrecen resistencia al flujo, modificando de esta manera las características hidráulicas de un río.

Las formas de fondo dependen principalmente de la velocidad del fluido, según la magnitud de la velocidad se ordenan de la siguiente manera, iniciando por las que se forman en velocidades bajas:

2.7.1 Arrugas.

Las arrugas, rizos o ripples son pequeñas ondulaciones con altura de pocos centímetros y longitud de onda de decímetros, estas solo aparecen en arenas finas ($< 0.6\text{mm}$).

2.7.2 Dunas.

Las dunas son ondulaciones también triangulares, pero con características muy marcadas en los taludes, el de aguas abajo presenta una pendiente muy marcada, mientras que el de aguas arriba presenta una pendiente suave, estas son de un orden de magnitud mayor al de las arrugas.

2.7.3 Lecho plano.

Con el aumento de la velocidad estas dunas se alargan hasta ser barridas formando así un lecho plano.

2.7.4 Antidunas.

Con un aumento mayor todavía de la velocidad el lecho se ondula de forma simétrica, generando así las antidunas.

A continuación, se muestra la figura 2.6, en donde se logran apreciar las estructuras de estas formas de fondo.

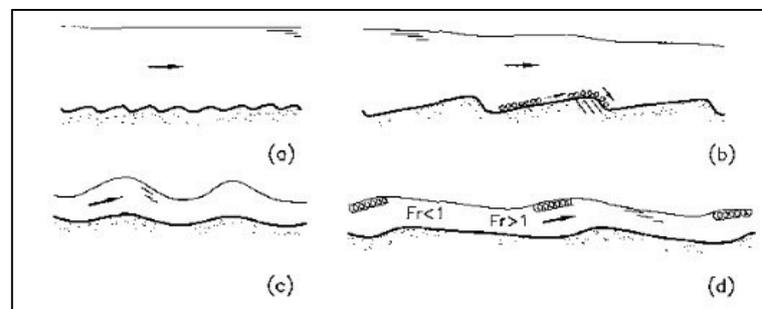


Figura 2.6. Formas de fondo: arrugas (a), dunas (b), antidunas (c) y rápidos y pozos (d).

Fuente: Martín Vide, Ingeniería de Ríos, 2001.

Cada una de estas formas de fondo añade una resistencia al flujo distinta, como es obvio esta resistencia al flujo es mayor en donde hay presencia de dunas, a diferencia de las arrugas y el lecho plano.

En las distintas experiencias que he tenido realizando estudios en ríos amazónicos, he podido identificar distintas formas de fondo mediante la utilización de Sonar de Barrido Lateral. A continuación, presento esta información a modo de ejemplo. Ver figuras 2.7 y 2.8.

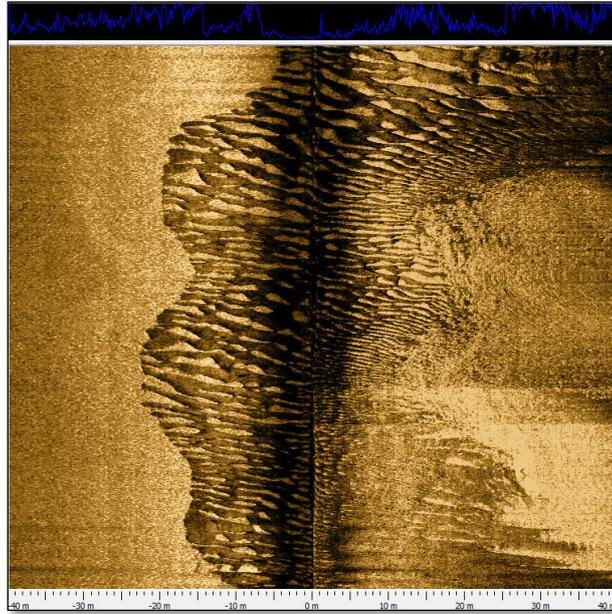


Figura 2.7. Formas de fondo en el río Marañón.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

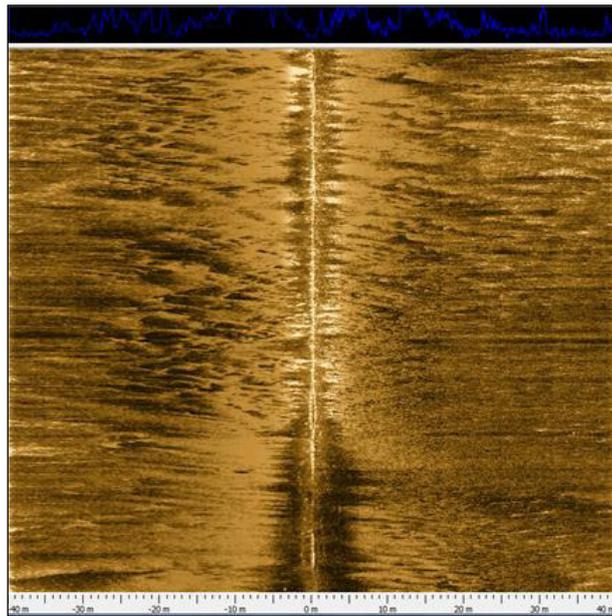


Figura 2.8. Formas de fondo en el río Pastaza.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Lo que se puede concluir de los sonogramas mostrados anteriormente es que las formas de fondo no están presentes de la misma manera en todo el cauce del río, incluso se pueden presentar distintas formas de fondo en una misma sección transversal.

Por otro lado, uno puede realizar una caracterización de las formas de fondo a grandes rasgos sin la necesidad de utilizar un Sonar de Barrido Lateral, y esto es posible mediante la utilización del Diagrama de Formas de Fondo en un ábaco de Shields que a continuación se presenta en la figura 2.9.

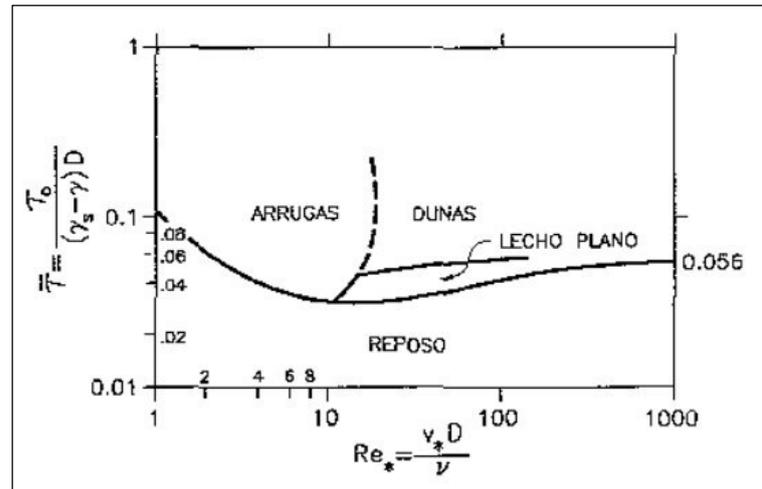


Figura 2.9. Diagrama de formas de fondo en un ábaco de Shields.
Fuente: Martín Vide, Ingeniería de Ríos, 2001.

Entonces en función a la Tensión Cortante Adimensional y el Número de Reynolds Crítico uno podría determinar las formas de fondo representativas en un cauce.

2.8 Métodos para Valuar el Transporte Total de Fondo, Separando el Arrastre en la Capa de fondo y el Transporte en de Fondo en Suspensión.

A continuación, se va a describir cada uno de los métodos a utilizar para la determinación del transporte de sedimentos de fondo, separando el que va por arrastre del que va en suspensión con el solo conocimiento de la conformación del lecho fluvial, es decir de una muestra de sedimentos de fondo, de donde se determinó la curva granulométrica y la gravedad específica. Es preciso indicar que un mejor método para determinar el transporte de fondo en suspensión es mediante la extracción de muestras de sedimentos suspendidos próximos al fondo, en donde se pueda identificar la concentración de las arenas, y de esta manera poder determinar una curva de concentraciones y un perfil de velocidades aplicando los métodos descritos en el ítem 2.9, que también son válidos para el transporte de fondo en suspensión. Sin

embargo, para la realización de esta investigación no contamos con dicha información, por lo que solo se determinará mediante el conocimiento de la composición del fondo y la determinación de concentraciones teóricas:

2.8.1 Método de Einstein.

Para la elaboración de este método Einstein consideró que la capa de fondo tiene un espesor igual a dos veces el diámetro de la partícula y que la distancia promedio recorrida es igual a 100 diámetros, también logró estimar la concentración de sólidos teórica en el borde superior de la capa de fondo con el conocimiento de las partículas del lecho.

2.8.1.1 Arrastre de la capa de fondo.

$$g_B = \sum_i g_{Bi} \quad [\text{Ec. 2.17}]$$

$$g_{Bi} = \phi_{*i} p_i \gamma_s (g \Delta D_i^3)^{1/2} \quad [\text{Ec. 2.18}]$$

g_B : Gasto sólido unitario de fondo (Kg/s.m)

p_i : Porcentaje del peso de cada fracción, si se divide la curva granulométrica en 10 partes, el p_i para cada fracción será 0.1.

Calculo de R' :

$$R = R' + R'' \quad [\text{Ec. 2.19}]$$

R : Radio hidráulico (m).

R' : Radio hidráulico asociado a las partículas (m).

R'' : Radio hidráulico asociado a las formas de fondo (m).

Se asume un R' inicial menor que R .

$$V_*' = \sqrt{g R' S} \quad [\text{Ec. 2.20}]$$

V_*' : Velocidad cortante asociada a las partículas (m/s).

g : Gravedad (m/s^2)

S : Pendiente Hidráulica (m/m)

$$\delta_o' = \frac{11.64\nu}{V_*'} \quad [\text{Ec. 2.21}]$$

δ_o' : Espeso de la subcapa viscosa asociada a V_*' (m).

ν : Viscosidad (m^2/s)

Se calcula x en función de $\frac{D_{65}}{\delta_o'}$ con la figura 2.10:

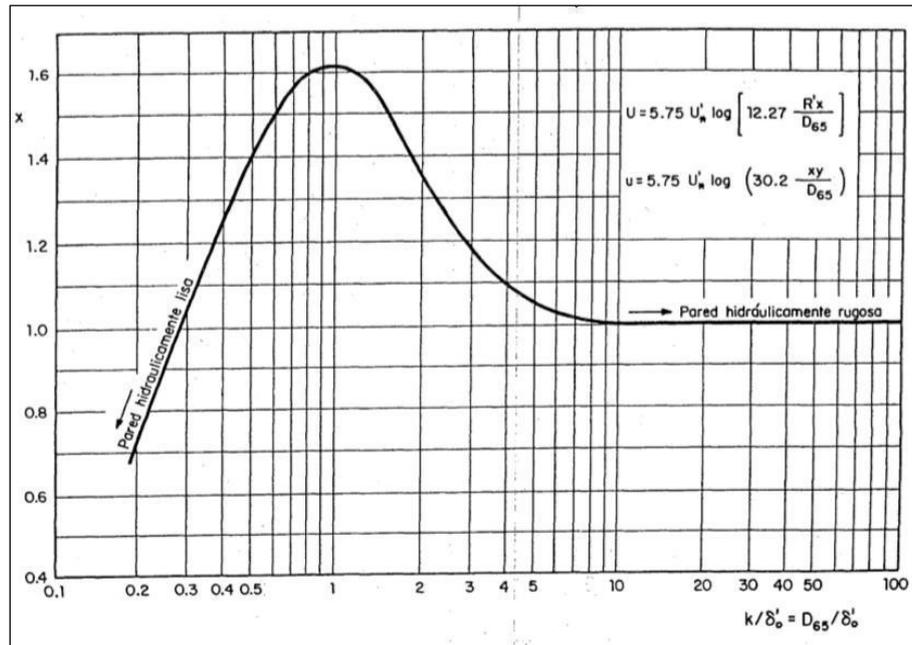


Figura 2.10. Factor de corrección x en las fórmulas de velocidad media y distribución de velocidades.

Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

$$V = 5.75V_*' \log \left(12.27 \frac{R'x}{D_{65}} \right) \quad [\text{Ec. 2.22}]$$

V : Velocidad media del flujo (m/s)

Si la velocidad media del flujo calculada con la ecuación anterior es igual a la velocidad media medida en campo entonces R' asumida es correcta, caso contrario se asume otro R' y se realizan los cálculos nuevamente.

$$\text{Si } \frac{D_{65}}{x\delta_o'} > 1.80$$

$$X = 0.77 \frac{D_{65}}{x} \quad [\text{Ec. 2.23}]$$

Caso contrario

$$X = 1.39\delta_0' \quad [\text{Ec. 2.24}]$$

Ahora Y se calcula en función de $\frac{D_{65}}{\delta_0'}$, además se calcula ε_i en función de $\frac{D_i}{X}$ mediante la

utilización de la figura 2.11:

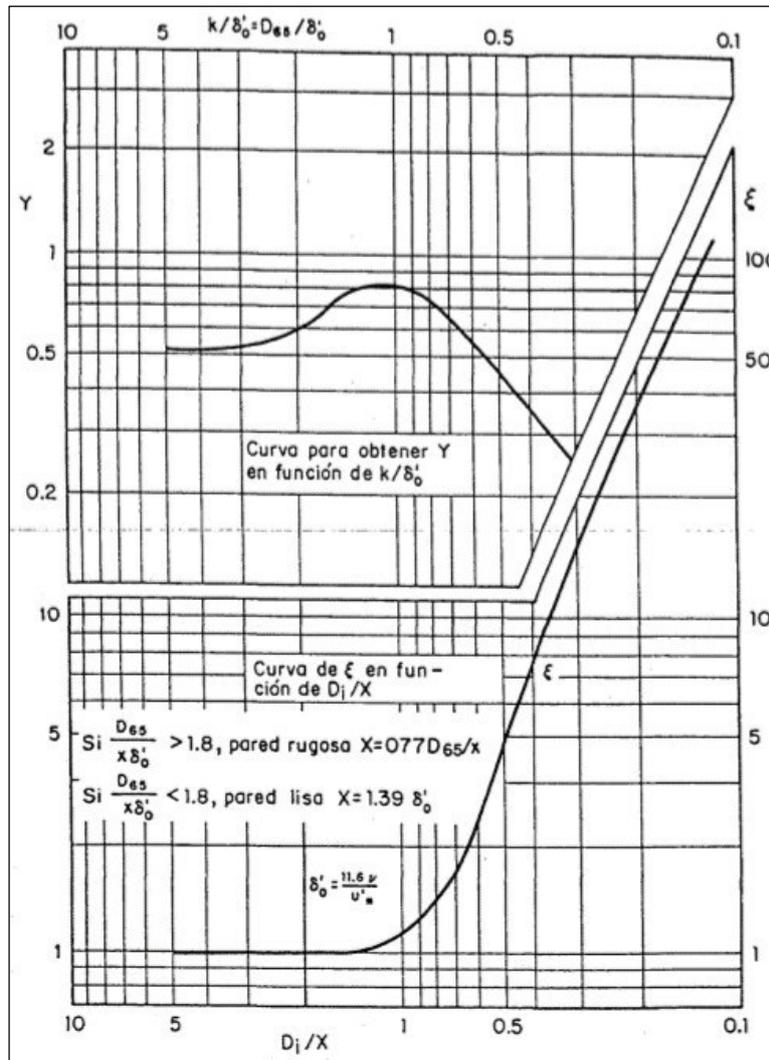


Figura 2.11. Factor de corrección Y y ε .

Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

D_i : Diámetro medio de cada fracción de la curva granulométrica, generalmente se divide en 10 partes.

$$\psi_{*i} = Y\varepsilon_i \left[\frac{\log 10.6}{\log\left(10.6\frac{xX}{D_{65}}\right)} \right]^2 \frac{(\gamma_s - \gamma)D_i}{\gamma R' S} \quad [\text{Ec. 2.25}]$$

Ahora ϕ_{*i} se calcula en función de ψ_{*i} mediante la utilización de la figura 2.12:

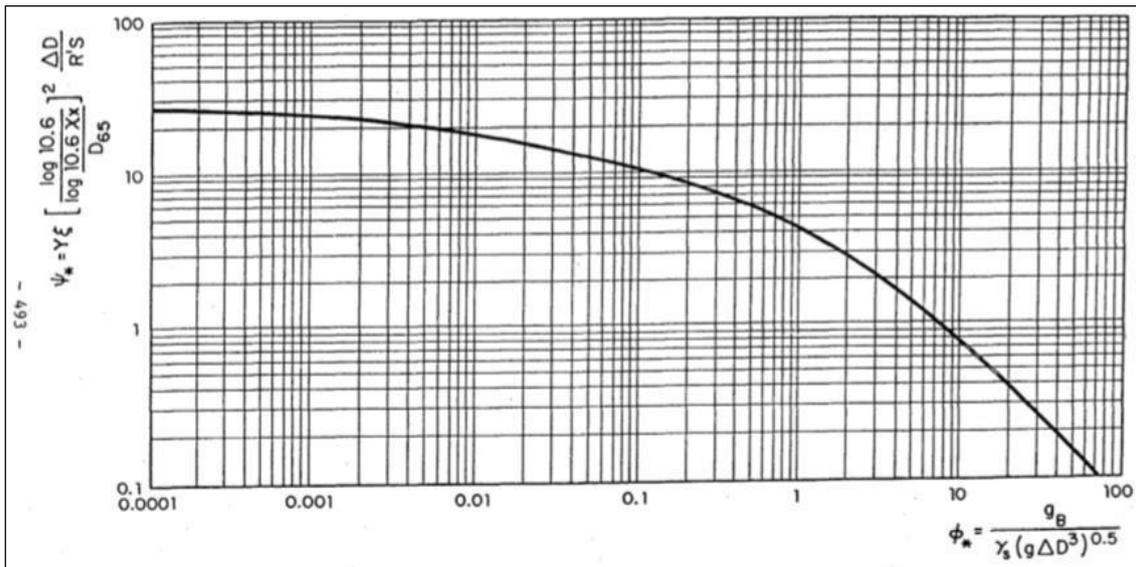


Figura 2.12. Factor de corrección ψ_* en función de ϕ_* .
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996

2.8.1.2 Transporte de fondo en suspensión.

$$g_{BS} = \sum_i g_{BSi} \quad [\text{Ec. 2.26}]$$

g_{BS} : Gasto sólido unitario de fondo en suspensión (Kg/s.m).

g_{BSi} : Gasto sólido unitario de fondo en suspensión de cada fracción (Kg/s.m).

$$g_{BSi} = g_{Bi} \left(\left(2.303 \log \left(\frac{30.2xd}{D_{65}} \right) \right) I_{1i} + I_{2i} \right) \quad [\text{Ec. 2.27}]$$

g_B : Gasto sólido unitario de fondo (Kg/s.m).

x : Factor de corrección.

d : Tirante medio (m).

D_{65} : Diámetro correspondiente al percentil 65 (m).

$$I_1 = 0.216 \frac{A^{z-1}}{(1-A)^z} \int_A^1 \left(\frac{1-E}{E} \right)^z dE \quad [\text{Ec. 2.28}]$$

$$I_2 = 0.216 \frac{A^{z-1}}{(1-A)^z} \int_A^1 \left(\frac{1-E}{E} \right)^z \ln E dE \quad [\text{Ec. 2.29}]$$

Según Einstein las variables I_1 e I_2 se pueden obtener de las figuras 2.13 y 2.14, de este modo evitamos el desarrollo de la integral de manera directa.

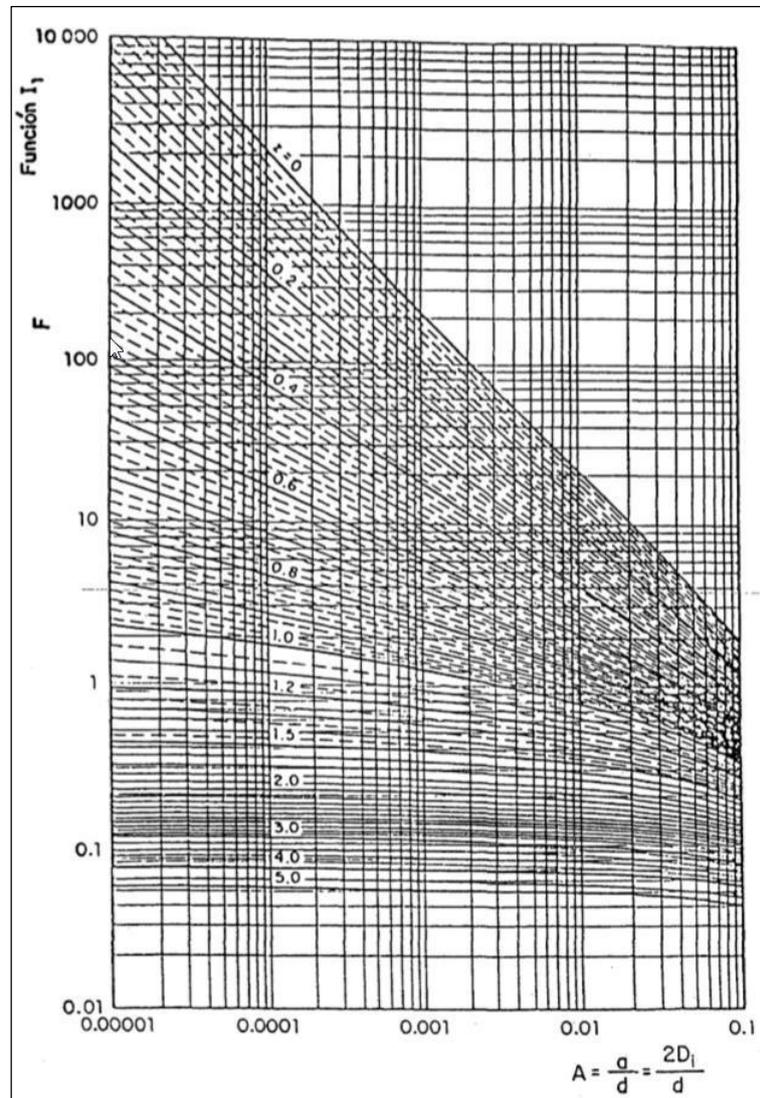


Figura 2.13. Valores de I_1 en función de los parámetros A y z .
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

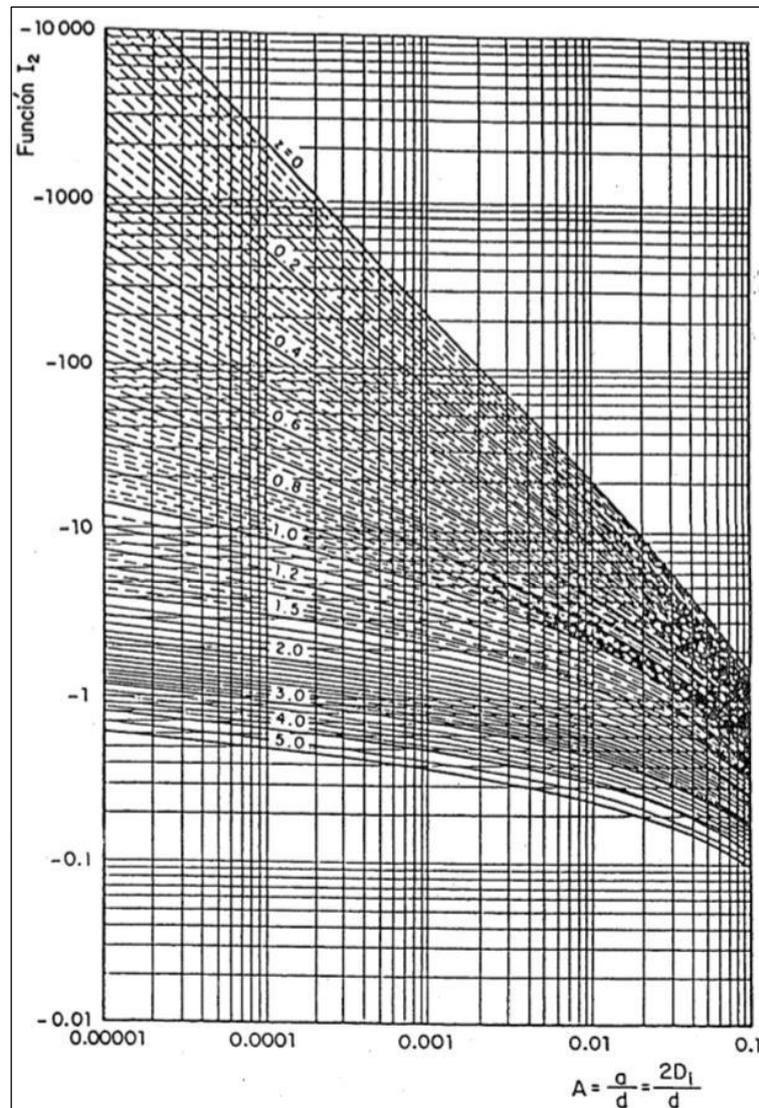


Figura 2.14. Valores de I_2 en función de los parámetros A y z.
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

2.8.1.3 Restricciones de aplicación.

Se ha demostrado que este método subestima para diámetros representativos menores a 0.4 mm y sobrestima para diámetros mayores a 1.71 mm.

La relación entre la rugosidad de fondo y el espesor de la subcapa viscosa $\frac{D_{65}}{\delta_0^7}$ tiene que ser mayor de 0.2 para la aplicación de la figura 2.11 que permiten determinar el valor de Y.

2.8.2 Método de Bagnold.

Para la obtención de sus fórmulas Bagnold estableció un balance de energía y relacionó el transporte de sedimentos con el trabajo realizado por el flujo, donde dicho trabajo es igual al producto del esfuerzo cortante por la velocidad media.

2.8.2.1 Arrastre en la capa de fondo.

$$g_B = \left(\frac{\gamma_S}{\gamma_S - \gamma} \right) \frac{e_b}{(\tan \alpha - \tan \beta)} \tau_o V \quad [\text{Ec. 2.30}]$$

γ_S : Peso específico del material de fondo (kg/m^3)

γ : Peso específico del agua (kg/m^3)

τ_o : Esfuerzo contante que el flujo produce en el fondo (kgf/m^2).

$$\tau_o = \gamma RS \quad [\text{Ec. 2.31}]$$

α : Ángulo promedio de choque entre partículas.

Se determina mediante la figura 2.16 en función del diámetro de la partícula y el parámetro de Shields.

e_b : Factor de eficiencia de arrastre de fondo.

Se determina mediante la figura 2.15 en función del Diámetro de la partícula y la velocidad media del flujo.

β : Ángulo que forma el perfil del fondo con la horizontal.

V : Velocidad media (m/s).

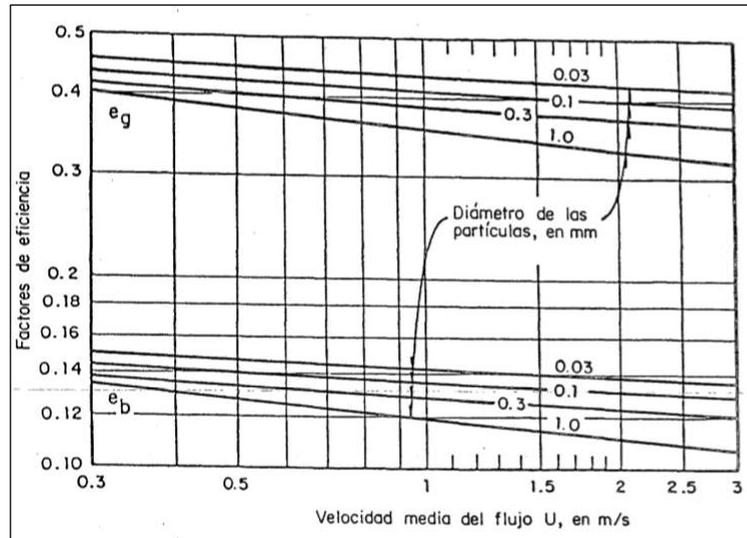


Figura 2.15. Valores teóricos de los factores de eficiencia de arrastre de fondo, en función de la velocidad media del flujo.
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

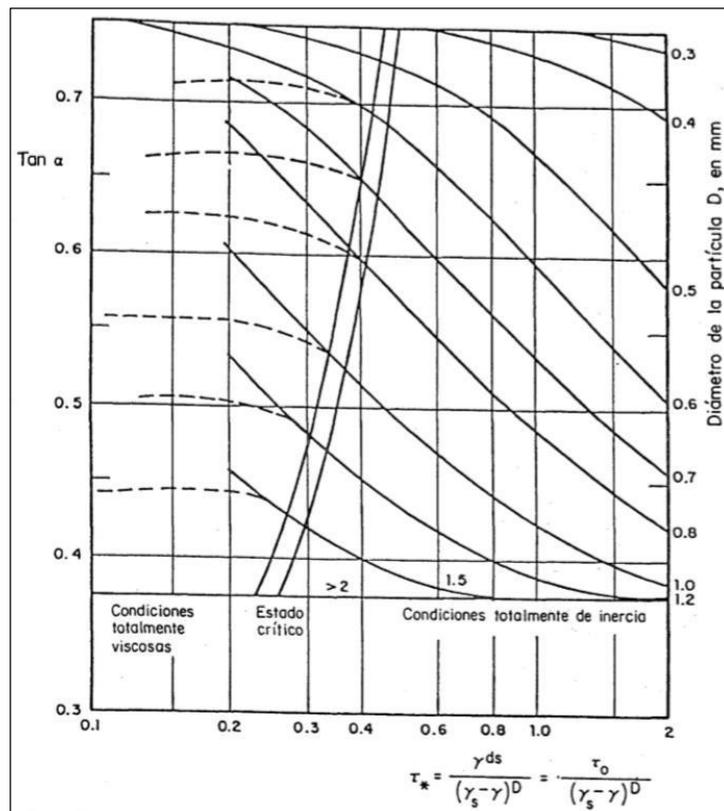


Figura 2.16. Valor de \$\tan(\alpha)\$.
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

2.8.2.2 Transporte de fondo en suspensión.

$$g_{BS} = \left(\frac{\gamma_S}{\gamma_S - \gamma} \right) \frac{0.01}{\left(\frac{w_e}{V} - \tan \beta \right)} \tau_o V \quad [\text{Ec. 2.32}]$$

γ_S : Peso específico del material de fondo (kg/m³)

γ : Peso específico del agua (kg/m³)

τ_o : Esfuerzo contante que el flujo produce en el fondo (kgf/m²).

$$\tau_o = \gamma RS \quad [\text{Ec. 2.33}]$$

V : Velocidad media (m/s).

w_e : Velocidad de caída de la partícula (m/s).

$$w_e = \sum_i p_i w_i \quad [\text{Ec. 2.34}]$$

$$w_i = F(g\Delta D_i)^{0.5} \quad [\text{Ec. 2.35}]$$

$$F = \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g\Delta D_i^3} \right)} - \sqrt{\frac{36v^2}{g\Delta D_i^3}} \quad [\text{Ec. 2.36}]$$

v : Viscosidad cinemática (m²/s)

g : Gravedad (m)

Δ : Peso específico relativo de los sólidos sumergidos

2.8.2.3 Restricciones de aplicación.

El método no es recomendable para diámetros menores a 0.015 mm, así como para pendientes hidráulicas menores a 0.000055 ni mayores a 0.0246, velocidades menores a 0.3 m/s ni mayores a 3m/s, diámetros de partículas mayores a 1 mm.

2.8.3 Método de Chang, Simons y Richardson.

Para obtener el arrastre de sedimentos en la capa de fondo se basaron en las formulaciones realizadas por DuBoys y utilizaron la relación de energía y trabajo propuesta por Bagnold.

Así también para obtener el transporte de sedimentos de fondo en suspensión determinación un perfil de velocidades basándose en la ecuación de Reynolds y Prandtl, mientras que para el perfil de concentraciones se basaron en O'Brien.

2.8.3.1 Arrastre en la capa de fondo

$$g_B = K_T U (\tau_0 - \tau_c) \quad [\text{Ec. 2.37}]$$

Donde:

K_T : Coeficiente experimental.

Se obtiene mediante el uso de la figura 2.17, el cual es una función del parámetro adimensional $\left(\frac{V}{V_*} \tau_* S\right)$ y el diámetro del sedimento.

V_* : Velocidad de corte de fondo (m/s)

$$V_* = \sqrt{gRS} \quad [\text{Ec. 2.38}]$$

τ_0 : Esfuerzo contante que el flujo produce en el fondo (kgf/m²).

$$\tau_0 = \gamma RS \quad [\text{Ec. 2.39}]$$

τ_* : Parámetro adimensional de Shields.

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) D_e} \quad [\text{Ec. 2.40}]$$

τ_c : Esfuerzo contante crítico (kgf/m²).

Se obtiene de la Figura 2.18, la cual está en función del diámetro de la partícula.

D_e : Diámetro representativo de la muestra (m), se obtiene de la división de una muestra en partes igualitarias en porcentaje, a fin de poder generar una representatividad.

$$D_e = \left[\frac{\sum_i^N D_i^3 w_i}{N w_e} \right]^{1/3} \quad [\text{Ec. 2.41}]$$

N : Numero de partes a la cual ha sido dividida la muestra.

D_i : Diámetro de cada una de la parte i (m).

w_i : Velocidad de caída correspondiente a las partículas cuyo diámetro es D_i (m/s).

w_e : Velocidad de caída representativa (m/s).

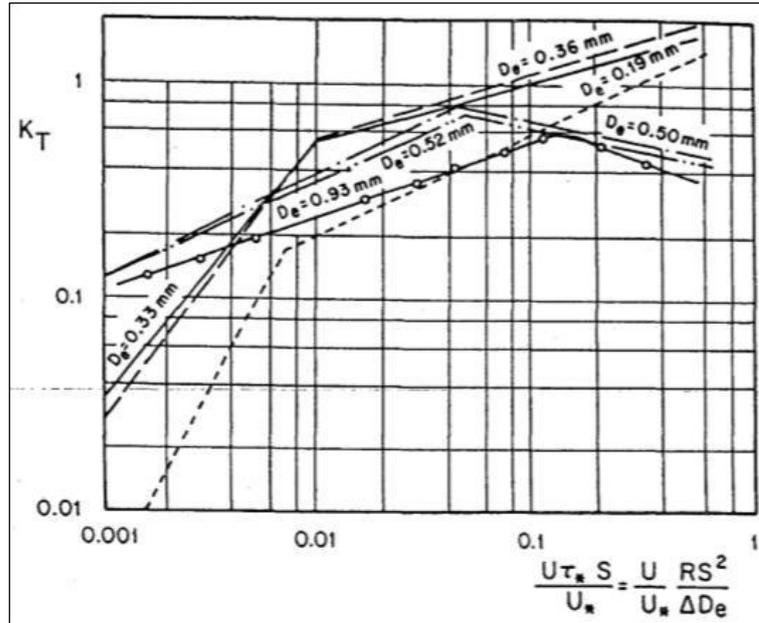


Figura 2.17. Coeficiente K_T en función de $\frac{V}{V_*} \tau_* S$ y el diámetro equivalente.

Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

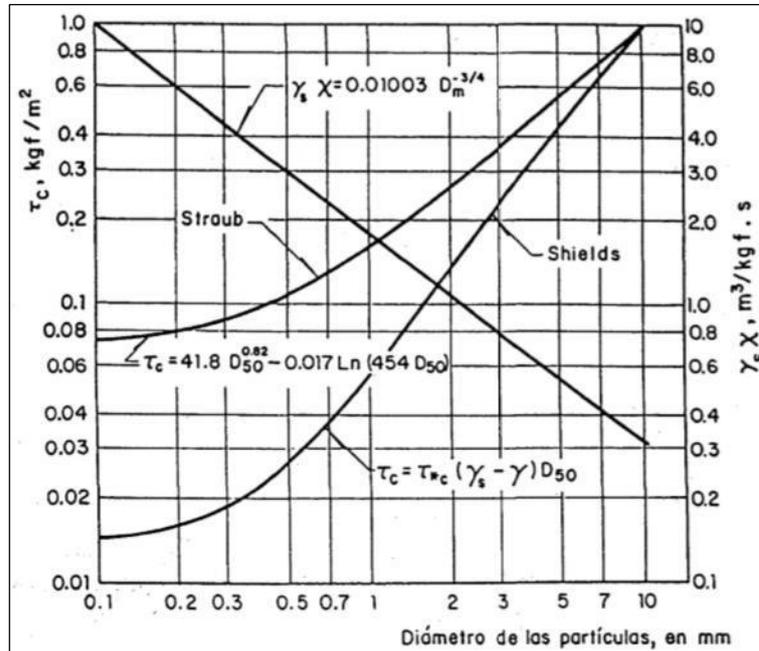


Figura 2.18. Esfuerzo cortante crítico.

Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

2.8.3.2 Transporte de fondo en suspensión.

$$g_{BS} = g_B \frac{d}{0.8a_b V} \left[V I_3 - \frac{2V_*}{k} I_4 \right] \tag{Ec. 2.42}$$

Donde:

d : Tirante de corriente (m).

a_b : Espesor de la capa de fondo (m).

$$a_b = \frac{10D_e(\tau_0 - \tau_c)}{\tau_c} \quad [\text{Ec. 2.43}]$$

V_* : Velocidad de corte de fondo (m/s)

$$V_* = \sqrt{gRS} \quad [\text{Ec. 2.44}]$$

V : Velocidad media (m/s)

k : Coeficiente de Von Karman, se determina mediante la figura 2.19.

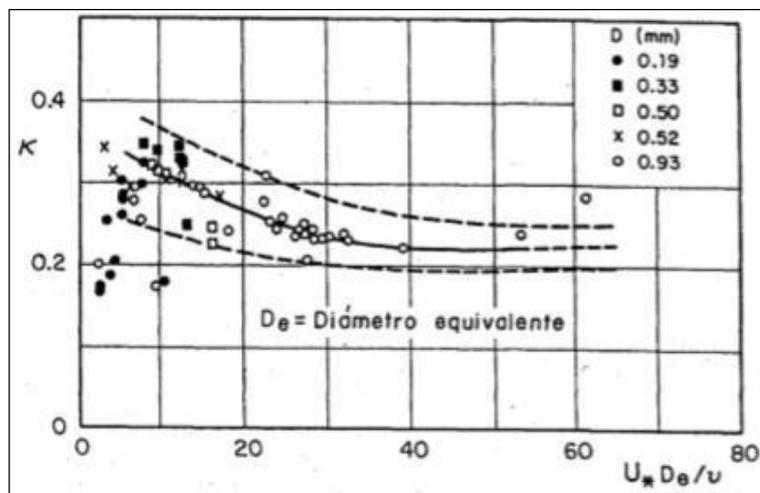


Figura 2.19. Valores de la constante de Von Karman.
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

I_3, I_4 : Función resultante de la integración.

Se obtienen de las figuras 2.20 y 2.21 las cuales se encuentran en función de A y z_2 .

$$A = \frac{a_b}{d} \quad [\text{Ec. 2.45}]$$

$$z_2 = \frac{w_e}{0.75kV_*} \quad [\text{Ec. 2.46}]$$

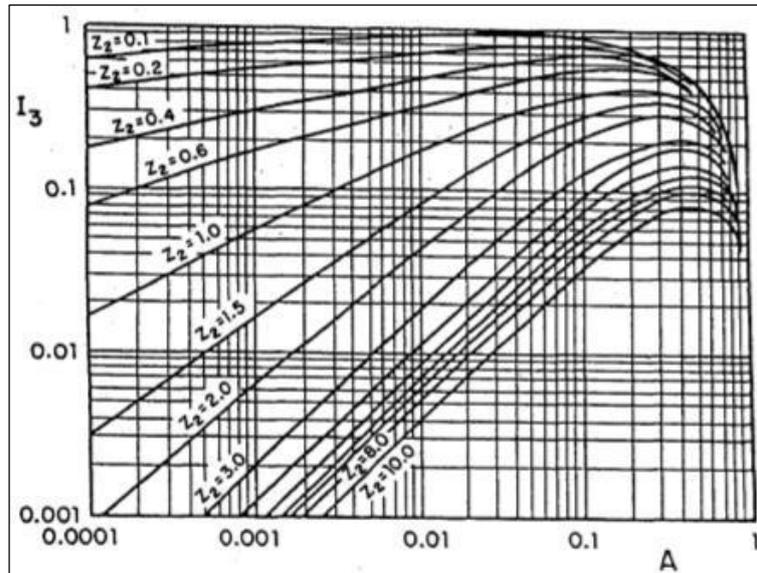


Figura 2.20. Valores de I_3 en función de A y z_2 .
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

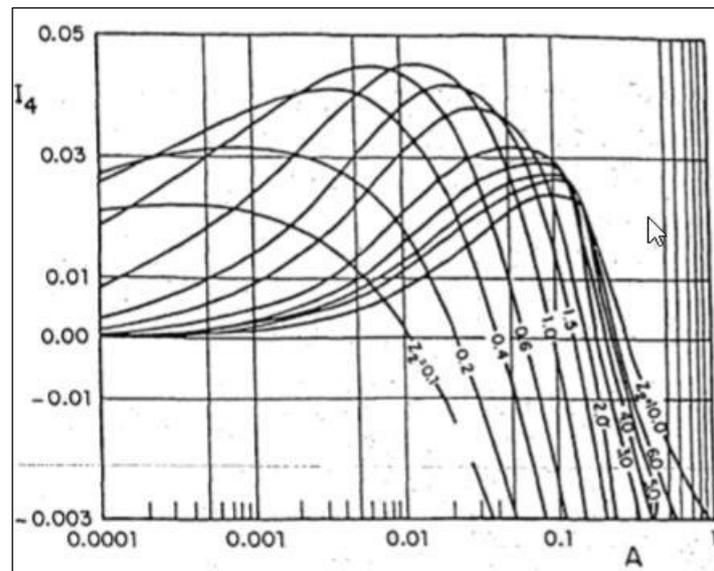


Figura 2.21. Valores de I_4 en función de A y z_2 .
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

2.8.3.3 Restricciones de aplicación.

La aplicación del método se restringe para diámetros representativos mayores a 0.00019 m y menores a 0.00093 m, sin embargo, la principal fuente de error para la aplicación de este método es la compleja determinación de K_T .

2.8.4 Método de Toffaletti.

Toffaletti para la determinación de sus ecuaciones dividió el radio hidráulico de la corriente en cuatro zonas, la zona de fondo, la zona baja, la zona intermedia y la zona superior, donde los transportes de sedimentos asociados llevan los subíndices B , b , c y u respectivamente.

2.8.4.1 Arrastre en la capa de fondo.

$$g_B = \sum_{i=1}^{10} g_{Bi} \quad [\text{Ec. 2.47}]$$

$$g_{Bi} = M_i (6.5616 D_i)^{e_{3i}} \quad [\text{Ec. 2.48}]$$

$$M_i = \frac{g_{bi} e_{3i}}{(y_e)^{e_{3i}} - (y_{Bi})^{e_{3i}}} \quad [\text{Ec. 2.49}]$$

$$g_{bi} = \frac{(0.01362V)^{10/3} p_i}{[(AK_T)T_T D_i]^{5/3}} \quad [\text{Ec. 2.50}]$$

K_T : Se obtiene con ayuda de la figura 2.22 en función de e_o .

$$e_o = \frac{1024870 v^{1/3} S D_{65}}{V_*'} \quad [\text{Ec. 2.51}]$$

A : Se obtiene con la ayuda de la figura 2.22 en función de e_1 .

$$e_1 = \frac{1.459 (gv)^{1/3}}{V_*'} \quad [\text{Ec. 2.52}]$$

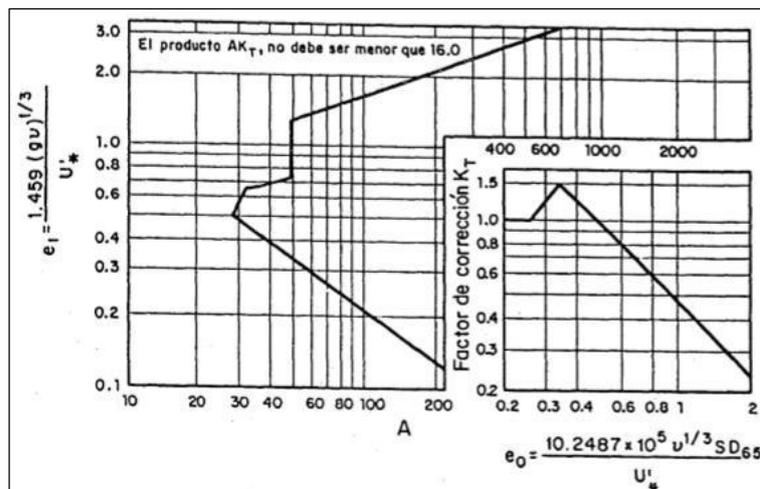


Figura 2.22. Coeficiente A y factor de corrección K_T .
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

$$V_*' = \frac{V}{v_3} \quad [\text{Ec. 2.53}]$$

v_3 : Se obtiene con ayuda de la figura 2.23 la cual se encuentra en función de v_2 y v_1 .

$$v_1 = \frac{V}{\sqrt{gD_{65}S}} \quad [\text{Ec. 2.54}]$$

$$v_2 = \frac{V^3}{g\nu S} \quad [\text{Ec. 2.55}]$$

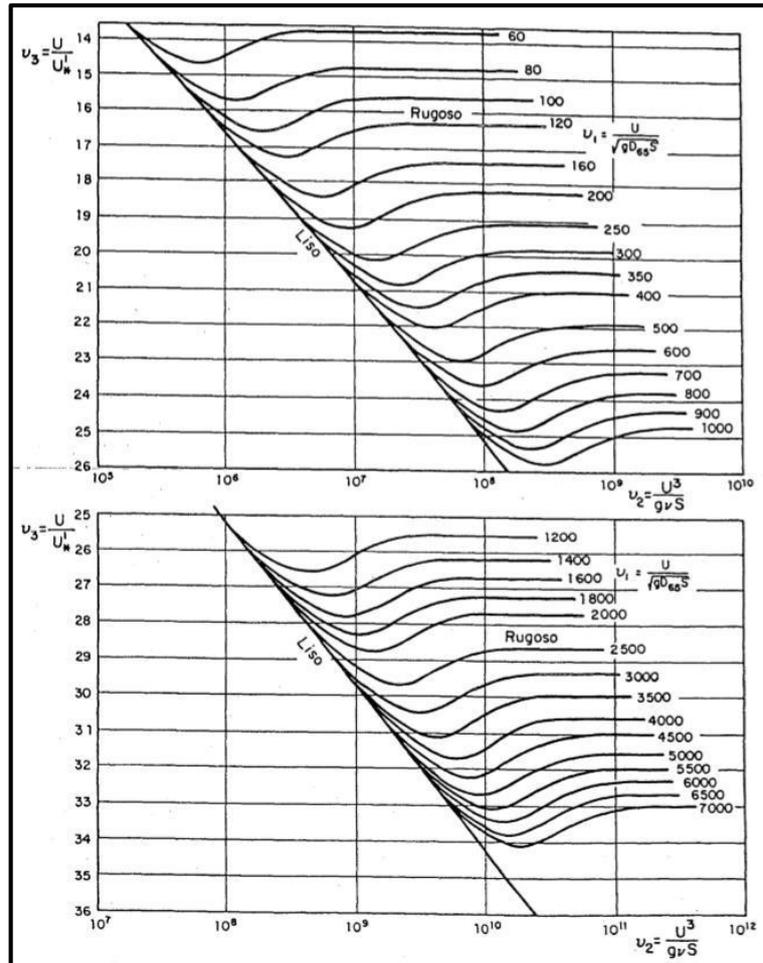


Figura 2.23. Determinación de v_3 en función de v_2 y v_1 .
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

T_T : Factor de corrección por temperatura dado por la relación empírica.

$$T_T = 0.059268 + 0.0001782t \quad [\text{Ec. 2.56}]$$

t : Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Los exponentes se obtienen de la siguiente relación:

$$e_{1i} = 1 + n_v - 1.5z_i \quad [\text{Ec. 2.57}]$$

$$e_{2i} = 1 + n_v - z_i \quad [\text{Ec. 2.58}]$$

$$e_{3i} = 1 + n_v - 0.756z_i \quad [\text{Ec. 2.59}]$$

$$n_v = 0.13516 + 0.000864t \quad [\text{Ec. 2.60}]$$

$$z_i = \frac{3.2808w_iV}{T_ZRS} \quad [\text{Ec. 2.61}]$$

T_Z : Factor de corrección expresado por:

$$T_Z = 239.326 - 1.2006t \quad [\text{Ec. 2.62}]$$

$$w_i = F_1(g\Delta D)^{0.5} \quad [\text{Ec. 2.63}]$$

$$F_1 = \left(\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g\Delta D^3}\right)^{0.5} - \left(\frac{36v^2}{g\Delta D^3}\right)^{0.5} \quad [\text{Ec. 2.64}]$$

v : Viscosidad cinemática (m^2/s).

g : Gravedad (m/s^2).

Δ : Peso específico relativo de los sólidos sumergidos.

$$y_{B_i} = 2D_i \quad [\text{Ec. 2.65}]$$

$$y_e = \frac{R}{11.24} \quad [\text{Ec. 2.66}]$$

$$y_m = 0.4R \quad [\text{Ec. 2.67}]$$

2.8.4.2 Transporte de fondo en suspensión.

$$g_{BS} = \sum g_{BS_i} = g_b + g_u + g_c \quad [\text{Ec. 2.68}]$$

$$g_{b_i} = \frac{(0.01362U)^{10/3}p_i}{[(AK_T)T_T D_i]^{5/3}} \quad [\text{Ec. 2.69}]$$

$$g_{c_i} = \frac{M_i(y_e)^{0.244z_i}}{e_{2i}} [(y_m)^{e_{2i}} - (y_e)^{e_{2i}}] \quad [\text{Ec. 2.70}]$$

$$g_{u_i} = \frac{M_i(y_e)^{0.244z_i}(y_m)^{0.5z_i}}{e_{1i}} [(R)^{e_{1i}} - (y_m)^{e_{1i}}] \quad [\text{Ec. 2.71}]$$

$$M_i = \frac{g_{b_i} e_{3_i}}{(y_e)^{e_{3_i}} - (y_{B_i})^{e_{3_i}}} \quad [\text{Ec. 2.72}]$$

2.8.4.3 Verificación de resultados.

Con el objeto de comprobar que no se ha obtenido un resultado absurdo, se calcula la concentración C_{B_i} , en la frontera superior de la capa de fondo $y_{B_i} = 2D_i$, en función de la concentración media en la zona baja C_{b_i} , utilizando la siguiente expresión.

$$C_{B_i} = C_{b_i} \left[\frac{2D_i}{d} \right]^{-0.736z_i} \quad [\text{Ec. 2.73}]$$

$$C_{b_i} = \frac{M_i}{(1+nv)Vd^{0.758z_i-nv}} \quad [\text{Ec. 2.74}]$$

Tendríamos que obtener un valor de $C_{B_i} < 1600 \text{ Kg/m}^3$.

2.8.4.4 Restricciones de aplicación.

Se recomienda la aplicación de este método cuando el diámetro representativo sea mayor a 0.0003 m y menor a 0.00093 m, así como el valor de v_1 deberá de ser mayor de 60 y menor de 7000, el valor de v_2 deberá de ser mayor de 10^7 y menor de 10^{12} , el valor de e_o deberá de ser mayor de 0.2 y menor de 2 y el valor de A deberá de ser mayor de 10 y menor de 200.

2.8.5 Método de Engelund y Fredsoe.

Está basado en formulaciones propuestas por Engelund, Einstein y Bagnold principalmente.

2.8.5.1 Arrastre en la capa de fondo.

$$g_B = 5p\gamma_s(g\Delta D_e^3)^{0.5}(\tau_*'^{0.5} - 0.7\tau_{*c}^{0.5}) \quad [\text{Ec. 2.75}]$$

p : Probabilidad de que en una capa sea arrastrada una partícula del material del fondo.

$$p = \left(1 + \frac{\pi \tan \alpha}{6(\tau_*' - \tau_{*c})} \right)^{-0.25} \quad [\text{Ec. 2.76}]$$

$\tan(\alpha)$: Coeficiente de fricción dinámica. Para arenas $\tan(\alpha) = 0.5095$.

τ_*' : Número adimensional de Shields.

$$\tau_*' = \frac{d'S}{\Delta D_e} \quad [\text{Ec. 2.77}]$$

d' : Tirante asociado a las partículas sumergidas (m).

$$V = 2.5\sqrt{gd'S} \ln \frac{11.1d'}{2D_e} \quad [\text{Ec. 2.78}]$$

g : Gravedad (m/s^2)

S : Pendiente Hidráulica (m/m)

Δ : Peso específico relativo de los sólidos sumergidos

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad [\text{Ec. 2.79}]$$

D_e : Diámetro representativo de la muestra (m), se obtiene de la división de una muestra en partes igualitarias en porcentaje, a fin de poder generar una representatividad.

$$D_e = \left[\frac{\sum_i^N D_i^3 w_i}{N w_e} \right]^{1/3} \quad [\text{Ec. 2.80}]$$

N : Numero de partes a la cual ha sido dividida la muestra.

D_i : Diámetro de cada una de la parte i (m).

w_i : Velocidad de caída correspondiente a las partículas cuyo diámetro es D_i (m/s).

w_i : Velocidad de caída representativa (m/s).

D_* : Número o parámetro adimensional de la partícula o número de Yalin.

$$D_* = D_e \left(\frac{g\Delta}{v^2} \right)^{1/3} \quad [\text{Ec. 2.81}]$$

v : Viscosidad cinemática (m^2/s).

$$t_{*c} = \frac{0.2196}{D_*} + 0.077 \exp \left[- \left(\frac{30.35}{D_*} \right)^{0.563} \right] \quad [\text{Ec. 2.82}]$$

Válida cuando $2.15 < D_* < 333$

Si $D_* > 333$

$$t_{*c} = 0.06 \quad [\text{Ec. 2.83}]$$

2.8.5.2 Transporte de fondo en suspensión.

$$g_{BS} = 23.2\gamma_s (g\Delta D_e^3)^{0.5} \tau_*'^{0.5} C_a \left[I_1 \ln \left(\frac{30d}{2.5D_e} \right) + I_2 \right] \quad [\text{Ec. 2.84}]$$

Donde:

γ_s : Peso específico de los sólidos(kgf/m³).

g : Gravedad (m/s²)

Δ : Peso específico relativo de los sólidos sumergidos

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad [\text{Ec. 2.85}]$$

D_e : Diámetro representativo de la muestra (m), se obtiene de la división de una muestra en partes igualitarias en porcentaje, a fin de poder generar una representatividad.

$$D_e = \left[\frac{\sum_i^N D_i^3 w_i}{N w_e} \right]^{1/3} \quad [\text{Ec. 2.86}]$$

N : Numero de partes a la cual ha sido dividida la muestra.

D_i : Diámetro de cada una de la parte i (m).

w_i : Velocidad de caída correspondiente a las partículas cuyo diámetro es D_i (m/s).

w_i : Velocidad de caída representativa (m/s).

τ'_* : Número adimensional de Shields.

$$\tau'_* = \frac{d' S}{\Delta D_e} \quad [\text{Ec. 2.87}]$$

d' : Tirante asociado a las partículas sumergidas (m).

$$V = 2.5 \sqrt{g d' S} \ln \frac{11.1 d'}{2 D_{65}} \quad [\text{Ec. 2.88}]$$

C_a : Concentración de referencia (kgf/m³).

$$C_a = \frac{0.65}{\left(1 + \frac{1}{\lambda_b}\right)^3} \quad [\text{Ec. 2.89}]$$

λ_b : Concentración lineal de fondo.

$$\lambda_b = \left[\frac{\gamma}{0.027\gamma_s\tau_*'} \left(\tau_*' - \tau_{*c} - \frac{\pi p \tan \alpha}{6} \right) \right]^{0.5} \quad [\text{Ec. 2.90}]$$

$$t_{*c} = \frac{0.2196}{D_*} + 0.077 \exp \left[- \left(\frac{30.35}{D_*} \right)^{0.563} \right] \quad [\text{Ec. 2.91}]$$

Válida cuando $2.15 < D_* < 333$

Si $D_* > 333$

$$t_{*c} = 0.06 \quad [\text{Ec. 2.92}]$$

D_* : Número o parámetro adimensional de la partícula o número de Yalin.

$$D_* = De \left(\frac{g\Delta}{v^2} \right)^{1/3} \quad [\text{Ec. 2.93}]$$

p : Probabilidad de que en una capa sea arrastrada una partícula del material del fondo.

$$p = \left(1 + \frac{\pi \tan \alpha}{6(\tau_*' - \tau_{*c})} \right)^{-0.25} \quad [\text{Ec. 2.94}]$$

$\tan(\alpha)$: Coeficiente de fricción dinámica. Para arenas $\tan(\alpha) = 0.5095$.

I_1 e I_2 : Variable de integración de Einstein.

$$I_1 = 0.216 \frac{A^{z-1}}{(1-A)^z} \int_A^1 \left(\frac{1-E}{E} \right)^z dE \quad [\text{Ec. 2.95}]$$

$$I_2 = 0.216 \frac{A^{z-1}}{(1-A)^z} \int_A^1 \left(\frac{1-E}{E} \right)^z \ln E dE \quad [\text{Ec. 2.96}]$$

Según Einstein las variables I_1 e I_2 se pueden obtener de las figuras 2.24 y 2.25 en función de z y A , de este modo evitamos el desarrollo de la integral de manera directa.

$$z = \frac{w_e}{0.4(gd'S)^{0.5}} \quad [\text{Ec. 2.97}]$$

$$w_e = \sum_{i=1}^N p_i w_i \quad [\text{Ec. 2.98}]$$

$$A = \frac{2D_e}{d} \quad [\text{Ec. 2.99}]$$

D_e : Diámetro representativo de la muestra (m), se obtiene de la división de una muestra en partes igualitarias en porcentaje, a fin de poder generar una representatividad.

$$D_e = \left[\frac{\sum_i^N D_i^3 w_i}{N w_e} \right]^{1/3} \quad [\text{Ec. 2.100}]$$

N : Numero de partes a la cual ha sido dividida la muestra.

D_i : Diámetro de cada una de la parte i (m).

w_i : Velocidad de caída correspondiente a las partículas cuyo diámetro es D_i (m/s).

w_e : Velocidad de caída representativa (m/s).

d : Tirante de agua (m).

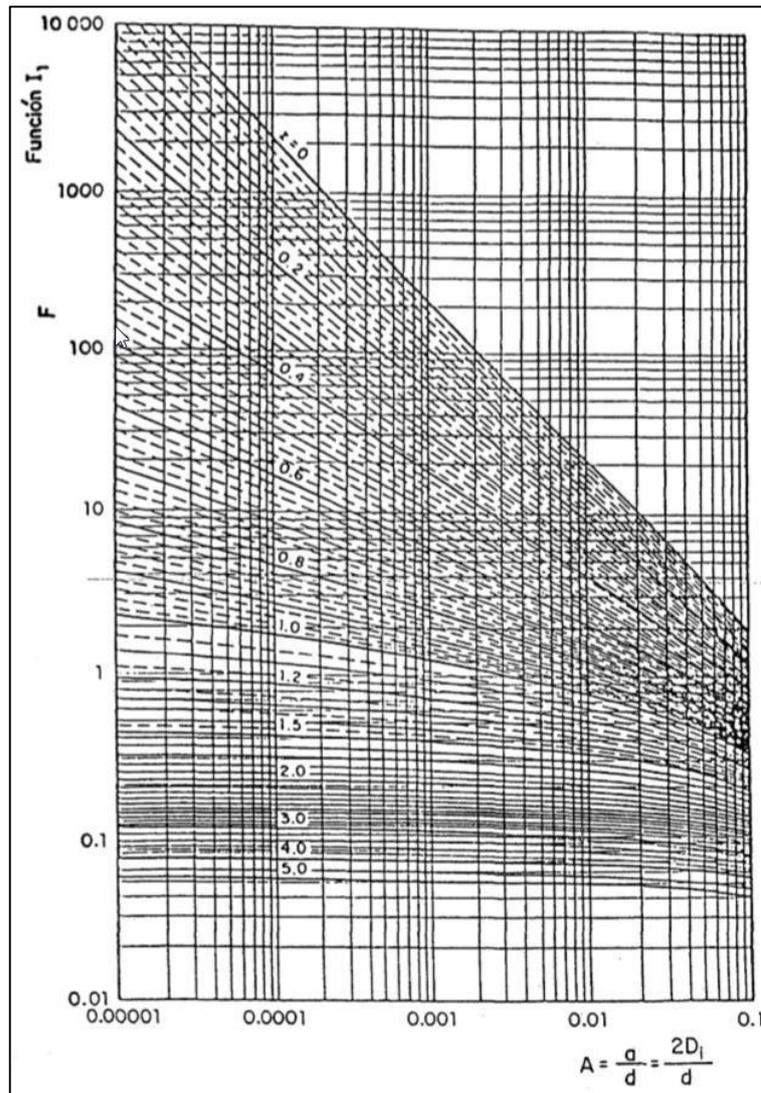


Figura 2.24. Valores de I_1 en función de los parámetros A y z.
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

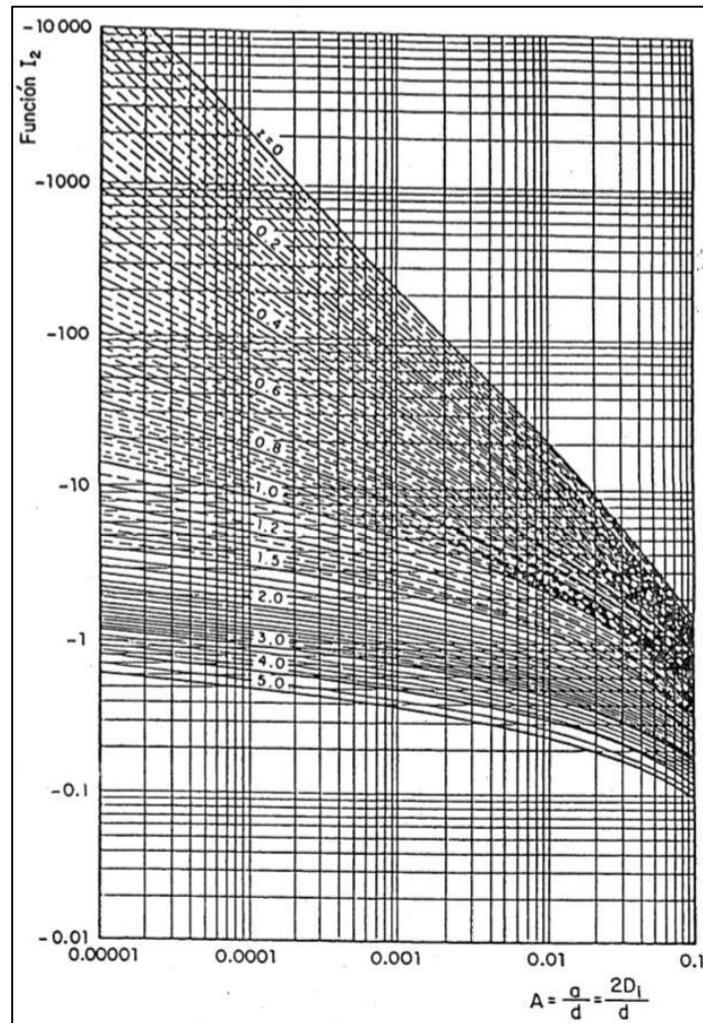


Figura 2.25. Valores de I_2 en función de los parámetros A y z.
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

2.8.5.3 Restricciones de aplicación.

Se recomienda la aplicación de método para diámetros representativos mayores a 0.25 mm y menores a 0.93 mm, así como también para valores de A mayores a 0.00001 y menores a 0.1.

2.8.6 Método de Kikkawa e Ishikawa.

Los autores consideraron que para los cálculos se divide la curva granulométrica en tres partes iguales, considerando como diámetros representativos a los D_{16} , D_{50} y D_{84} , por lo que las formulas serán escritas considerando el subíndice i.

2.8.6.1 Arrastre en la capa de fondo.

$$g_{Bi} = \gamma_S c V \sum_i p_i D_i [f_2(\tau_{*i})] \quad [\text{Ec. 2.101}]$$

Donde:

γ_S : Peso específico de los sólidos (kgf/m³).

c : Coeficiente del autor.

$$c = 1 - 5 \frac{V_*}{V} \quad [\text{Ec. 2.102}]$$

V_* : Velocidad de corte de fondo (m/s)

$$V_* = \sqrt{gRS} \quad [\text{Ec. 2.103}]$$

$$R \cong d \quad [\text{Ec. 2.104}]$$

V : Velocidad media (m/s)

p_i : porcentaje de cada parte en función del total.

$$p_i = 0.333 \quad [\text{Ec. 2.105}]$$

D_i : Diámetro representativo de partículas, en este caso vendría a ser D_{16} , D_{50} y D_{84} (m).

$f_2(\tau_{*i})$: Función dependiente del parámetro adimensional de Shields.

$$f_2(\tau_{*i}) = 0.88 \tau_{*i} \left\{ \phi(x_i) + 0.199 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1.52}{\tau_{*i}} - 2 \right)^2 \right] \right\} \quad [\text{Ec. 2.106}]$$

$$\phi(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_i}^{\infty} -\exp \left(\frac{t^2}{2} \right) dt \quad [\text{Ec. 2.107}]$$

$$x_i = \frac{1.52}{\tau_{*i}} - 2 \quad [\text{Ec. 2.108}]$$

$$\tau_{*i} = \frac{RS}{\Delta D_i} \quad [\text{Ec. 2.109}]$$

2.8.6.2 Transporte de fondo en suspensión.

$$g_{BSi} = \gamma_S V \sum_i p_i D_i [f_2(\tau_{*i})] \left\{ a \alpha_i \left[\frac{\beta_i - 1}{\beta_i^3} + \frac{-\beta_i^2 + \beta_i + 1}{2\beta_i^3} e^{-\beta_i} \right] + \frac{\alpha_i c}{\beta_i} [1 - e^{-\beta_i}] \right\} \quad [\text{Ec. 2.110}]$$

γ_S : Peso específico de los sólidos (kgf/m³).

V : Velocidad media (m/s)

p_i : porcentaje de cada parte en función del total.

$$p_i = 0.333 \quad [\text{Ec. 2.111}]$$

D_i : Diámetro representativo de partículas, en este caso vendría a ser D_{16} , D_{50} y D_{84} (m).

$f_2(\tau_{*i})$: Función dependiente del parámetro adimensional de Shields.

$$f_2(\tau_{*i}) = 0.88\tau_{*i} \left\{ \phi(x_i) + 0.199 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1.52}{\tau_{*i}} - 2 \right)^2 \right] \right\} \quad [\text{Ec. 2.112}]$$

τ_* : Parámetro adimensional de Shields.

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) D_e} \quad [\text{Ec. 2.113}]$$

$$\phi(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_i}^{\infty} -\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad [\text{Ec. 2.114}]$$

$$x_i = \frac{1.52}{\tau_{*i}} - 2 \quad [\text{Ec. 2.115}]$$

$$\tau_{*i} = \frac{RS}{\Delta D_i} \quad [\text{Ec. 2.116}]$$

a : Coeficiente.

$$a = \frac{15V_*}{V} \quad [\text{Ec. 2.117}]$$

c : Coeficiente.

$$c = 1 - 5 \frac{V_*}{V} \quad [\text{Ec. 2.118}]$$

α_i : Coeficiente.

$$\alpha_i = 7.075W_i \quad [\text{Ec. 2.119}]$$

β_i : Coeficiente.

$$\beta_i = 7.075(1 - W_i) \quad [\text{Ec. 2.120}]$$

W_i :

$$W_i(2 - W_i) = \exp \left[\frac{-1.77(1 - W_i)w_i}{V_*} \right] \quad [\text{Ec. 2.121}]$$

$$w_i = F_{1i}(g\Delta D_i)^{0.5} \quad [\text{Ec. 2.122}]$$

$$F_{1i} = \left(\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g\Delta D_i^3} \right)^{0.5} - \left(\frac{36v^2}{g\Delta D_i^3} \right)^{0.5} \quad [\text{Ec. 2.123}]$$

2.8.6.3 Restricciones de aplicación.

Se recomienda aplicar el método cuando el τ_* sea mayor que 0.3 y el Re_* sea mayor que 7.5.

2.8.7 Método de Van Rijn.

Método desarrollado basado en las ideas de Bagnold sobre el movimiento de las partículas de fondo, el cual está dominado tanto por fuerzas gravitacionales como por fuerzas hidrodinámicas del fluido, mientras que los efectos de turbulencia sobre la trayectoria de las partículas son menos importantes.

2.8.7.1 Arrastre en la capa de fondo.

Van Rijn definió dos ecuaciones en función del parámetro de condición de transporte: T .

T : Parámetro de condición de transporte.

$$T = \frac{\tau_0' - \tau_c}{\tau_c} \quad [\text{Ec. 2.124}]$$

Si $T < 3$

$$g_B = 0.053\gamma_s [g\Delta D_{50}^3]^{0.4} \left[\frac{\tau_0' - \tau_c}{\tau_c} \right]^{2.1} v^{0.2} \quad [\text{Ec. 2.125}]$$

Si $T \geq 3$

$$g_B = 0.1\gamma_s (g\Delta D_{50}^3)^{0.4} v^{0.2} \left(\frac{\tau_0' - \tau_c}{\tau_c} \right)^{1.5} \quad [\text{Ec. 2.126}]$$

γ_s : Peso específico de los sólidos (kgf/m^3).

g : Gravedad (m/s^2)

Δ : Peso específico relativo de los sólidos sumergidos

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad [\text{Ec. 2.127}]$$

D_{50} : Diámetro de partícula 50 (m).

τ_o' : Esfuerzo cortante que el flujo ejerce en el fondo asociado a las partículas (kgf/m²).

$$\tau_o' = \gamma \left(\frac{V}{C'} \right)^2 \quad [\text{Ec. 2.128}]$$

γ : Peso específico del agua (kgf/m³).

V : Velocidad media (m/s).

$$C' = 18 \log \frac{12d}{3D_{90}} \quad [\text{Ec. 2.129}]$$

d : Tirante (m).

D_{90} : Diámetro de partícula 90 (m).

$$\tau_c = (\gamma_s - \gamma) D_{50} \left[\frac{0.2916}{D_*} + 0.0777 \exp \left\{ - \left(\frac{30.35}{D_*} \right)^{0.563} \right\} \right] \quad [\text{Ec. 2.130}]$$

D_* : Parámetro de la partícula de Yalin

$$D_* = D_{50} \left(\frac{g\Delta}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad [\text{Ec. 2.131}]$$

2.8.7.2 Transporte de fondo en suspensión.

$$g_{BS} = \frac{V_* C_a d}{k} \left(\frac{1}{A-1} \right)^{z'} \left[\int_A^{0.5} \left(\frac{1-E}{E} \right)^{z'} \text{Ln} \left(\frac{Ed}{y_0} \right) dE + \int_{0.5}^1 e^{-4z'(E-0.5)} \text{Ln} \left(\frac{Ed}{y_0} \right) dE \right] \quad [\text{Ec. 2.132}]$$

V_* : Velocidad de corte (m/s).

$$V_* = \sqrt{gdS} \quad [\text{Ec. 2.133}]$$

g : Gravedad (m/s²).

d : Tirante (m).

S : Pendiente (m/m).

C_a : Concentración en el nivel de referencia y se evalúan en función al tipo de fondo (kgf/m³).

Para fondo plano:

$$C_a = 0.117\gamma_S \frac{T}{D_*} \quad [\text{Ec. 2.134}]$$

γ_S : Peso específico de los sólidos (kgf/m³).

T : Parámetro de condición de transporte.

$$T = \frac{\tau_0' - \tau_c}{\tau_c} \quad [\text{Ec. 2.135}]$$

D_* : Parámetro de la partícula de Yalin

$$D_* = D_{50} \left(\frac{g\Delta}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad [\text{Ec. 2.136}]$$

Para fondo con ondulaciones:

$$C_a = 0.015\gamma_S \frac{D_{50} T^{1.5}}{a D_*^{0.3}} \quad [\text{Ec. 2.137}]$$

a : Espesor de la capa de fondo (m).

$$a = k_S \quad [\text{Ec. 2.138}]$$

k_S : Altura de la rugosidad del fondo (m).

$$k_S = \frac{12d}{\exp\left(\frac{\nu}{2.5V_*}\right)} \quad [\text{Ec. 2.139}]$$

k : Constante de von-Karman.

$$k = 0.4 \quad [\text{Ec. 2.140}]$$

z' : Factor modificado del parámetro de suspensión.

$$z' = z + \psi \quad [\text{Ec. 2.141}]$$

z : Parámetro de suspensión introducido por Rouse.

$$z = \frac{w_s}{\beta k V_*} \quad [\text{Ec. 2.142}]$$

w_s : Velocidad de caída del diámetro representativo de la mezcla en función del diámetro representativo (m/s).

$D_S \leq 0.0001$ m. Según Stokes

$$w_s = \frac{\Delta g D_S^2}{18\nu} \quad [\text{Ec. 2.143}]$$

$0.0001 \leq D_S \leq 0.001$ m. Según Zanke.

$$w_s = 10 \frac{\nu}{D_S} \left[\left(1 + \frac{0.01 \Delta g D_S^3}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \quad [\text{Ec. 2.144}]$$

$D_S \geq 0.001$ m.

$$w_s = 1.1 (\Delta g D_S)^{0.5} \quad [\text{Ec. 2.145}]$$

D_S : Diámetro representativo de las partículas en suspensión que depende del valor de T (m).

$T < 25$

$$D_S = D_{50} [1 + 0.011(\sigma_g - 1)] \quad [\text{Ec. 2.146}]$$

$T \geq 25$

$$D_S = D_{50} \quad [\text{Ec. 2.47}]$$

σ_g : Desviación estándar geométrica de la mezcla.

$$\sigma_g = 0.5 \left(\frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right) \quad [\text{Ec. 2.148}]$$

ψ : Factor global de corrección.

$$\psi = 2.5 \left(\frac{w_s}{V_*} \right)^{0.8} \left(\frac{C_a}{C_0} \right)^{0.4} \quad [\text{Ec. 2.150}]$$

C_0 : Máxima concentración al nivel de referencia (kgf/m³).

$$C_0 = 0.65\gamma_s \quad [\text{Ec. 2.151}]$$

β : Factor que toma en cuenta la diferencia entre la difusión de una partícula del fluido y la de las partículas de sedimentos.

$$0.1 < \frac{w_s}{V_*} < 0.707$$

$$\beta = 1 + 2 \left(\frac{w_s}{V_*} \right)^2 \quad [\text{Ec. 2.152}]$$

$$\frac{w_s}{V_*} \geq 0.707$$

$$\beta = 2 \quad [\text{Ec. 2.153}]$$

y_0 = Distancia sobre el fondo a la cual la velocidad es nula (m).

$$y_0 = 0.033k_s \quad [\text{Ec. 2.154}]$$

A : Variable en la integral.

$$A = \frac{a}{d} \quad [\text{Ec. 2.155}]$$

E : Variable de integración.

$$E = \frac{y}{d} \quad [\text{Ec. 2.156}]$$

2.8.7.3 Restricciones de aplicación.

Se recomienda la aplicación del método cuando el diámetro representativo de las partículas es mayor de 0.0002 m y menor de 0.002 m, z' mayor a 0.3 y menor a 3 y $\frac{a}{d}$ mayor a 0.01 y menor a 0.1.

2.9 Métodos para Valuar el Transporte de Sedimentos de Lavado

En el Manual de Ingeniería de Ríos de Maza y García (1996) se describen los métodos para cuantificar el transporte de sedimentos de fondo en suspensión mediante el conocimiento de un valor de concentración en la vertical y el diámetro característico de las partículas, esto es posible determinar ya que las partículas son básicamente arenas, sin embargo, cuando queremos aplicar estos mismos métodos para determinar el transporte de lavado, nos es muy complicado ya que el transporte de lavado está compuesto básicamente por limos y arcillas, y es difícil determinar un diámetro característico, por lo que para su aplicación el autor de esta investigación ha tenido que modificar las ecuaciones de tal manera que ya no se necesite el diámetro representativo, sino más bien habría que conocer dos concentraciones a diferentes profundidades como mínimo en una misma vertical.

A continuación, presentamos los métodos modificados de los descritos en el libro de Maza y García, estos también pueden ser aplicados para el transporte de fondo en suspensión en el caso de que se tenga la información necesaria.

2.9.1 Método de Lane y Kalinske.

$$g_L = VdC_{2Dm}e^{\frac{15wA}{V_*}}P_1 \quad [\text{Ec. 2.157}]$$

V : Velocidad media (m/s).

d : Tirante medio (m).

w : Velocidad de caída de las partículas (m/s).

$$w = -\frac{V_*}{15} \left(\frac{d}{a_2 - a_1} \right) \ln \left(\frac{C_{a2}}{C_{a1}} \right) \quad [\text{Ec. 2.158}]$$

C_{2Dm} : Concentración de sedimentos ubicado justo encima de la capa de fondo (kg^f/m^3).

$$C_{2Dm} = C_{a1}e^{\frac{-15w(2D_m - a_1)}{V_*d}} \quad [\text{Ec. 2.159}]$$

D_m : Diámetro medio de las partículas de fondo (m).

V_* : Velocidad de corte (m/s),

$$V_* = \sqrt{gRS} \quad [\text{Ec. 2.160}]$$

g : Gravedad (m/s^2).

R : Radio Hidráulico (m).

S : Pendiente (m/m).

C_{a2} : Concentración de sedimentos ubicada a_2 metros sobre el fondo (kgf/m^3).

a_2 : Distancia desde el fondo hasta la ubicación de la concentración C_{a2} (m).

C_{a1} : Concentración de sedimentos ubicada a_1 metros sobre el fondo (kgf/m^3).

a_1 : Distancia desde el fondo hasta la ubicación de la concentración C_{a1} (m).

A : Parámetro de cambio.

$$A = \frac{2Dm}{d} \quad [\text{Ec. 2.161}]$$

P_1 : Valor de la integral.

$$P_1 = 1.7\sqrt{g} \frac{n}{d^6} \quad [\text{Ec. 2.162}]$$

n : Coeficiente de Manning.

$$n = \frac{d^{2/3} S^{1/2}}{v} \quad [\text{Ec. 2.163}]$$

2.9.2 Método de Einstein.

$$g_L = 5.75V_*' C_{2D65} d \left(\frac{A}{1-A} \right)^z \left(J_1 \log \left(30.2 \frac{xd}{k_s} \right) + 0.43429 J_2 \right) \quad [\text{Ec. 2.164}]$$

V_*' : Velocidad cortante asociada a las partículas de fondo, se obtuvo del cálculo de transporte de fondo por arrastre (m/s).

$$V_*' = \sqrt{gR'S} \quad [\text{Ec. 2.165}]$$

z : Variable relacionada a la velocidad de caída.

$$z = \frac{\log \left(\frac{C_{a1}}{C_{a2}} \right)}{\log \left(\frac{d-a_1}{a_1} \frac{a_2}{d-a_2} \right)} \quad [\text{Ec. 2.166}]$$

C_{a2} : Concentración de sedimentos ubicada a_2 metros sobre el fondo (kgf/m^3).

a_2 : Distancia desde el fondo hasta la ubicación de la concentración C_{a2} (m).

C_{a_1} : Concentración de sedimentos ubicada a_1 metros sobre el fondo (kgf/m^3).

a_1 : Distancia desde el fondo hasta la ubicación de la concentración C_{a_1} (m).

$C_{2D_{65}}$: Concentración de sedimentos ubicada en el límite superior de la capa de fondo (kgf/m^3).

$$C_{2D_{65}} = C_{a_1} \left(\frac{d-2D_{65}}{2D_{65}} \frac{a_1}{d-a_1} \right)^z \quad [\text{Ec. 2.167}]$$

d : Tirante medio (m).

$2D_{65}$: Espesor de la capa de fondo (m).

A : Parámetro de cambio.

$$A = \frac{2D_{65}}{d} \quad [\text{Ec. 2.168}]$$

J_1 : Integral, se obtuvo del cálculo de transporte de fondo en suspensión.

x : Factor de corrección x , se obtuvo del cálculo de fondo por arrastre

k_s : Altura de la rugosidad de fondo (m).

$$k_s = D_{65} \quad [\text{Ec. 2.169}]$$

J_2 : Integral, se obtuvo del cálculo de transporte de fondo en suspensión.

2.9.3 Método de Brooks.

$$g_L = q C_{d/2} f \left(z, \frac{kV}{V_*} \right) \quad [\text{Ec. 2.170}]$$

q : Caudal unitario (m^2/s).

$$q = \frac{Q}{B} \quad [\text{Ec. 2.171}]$$

Q : Caudal (m^3/s).

B : Ancho medio (m).

z : Variable relacionada a la velocidad de caída.

$$z = \frac{\log\left(\frac{C_{a_1}}{C_{a_2}}\right)}{\log\left(\frac{d-a_1}{a_1} \frac{a_2}{d-a_2}\right)} \quad [\text{Ec. 2.172}]$$

C_{a2} : Concentración de sedimentos ubicada a_2 metros sobre el fondo (kgf/m^3).

a_2 : Distancia desde el fondo hasta la ubicación de la concentración C_{a2} (m).

C_{a1} : Concentración de sedimentos ubicada a_1 metros sobre el fondo (kgf/m^3).

a_1 : Distancia desde el fondo hasta la ubicación de la concentración C_{a1} (m).

$C_{d/2}$: Concentración de sedimentos ubicada en la mitad del tirante (kgf/m^3).

$$C_{d/2} = C_{a1} \left(\frac{a_1}{d-a_1} \right)^z \quad [\text{Ec. 2.173}]$$

d : Tirante medio (m).

k : Coeficiente de Von Karman

V : Velocidad media (m/s).

V_* : Velocidad de corte (m/s)

$$V_* = \sqrt{gRS} \quad [\text{Ec. 2.174}]$$

g : Gravedad (m/s^2).

R : Radio Hidráulico (m).

S : Pendiente (m/m).

$f\left(z, \frac{kV}{V_*}\right)$: Función que depende de z y $\frac{kV}{V_*}$, se obtiene de la figura 2.26:

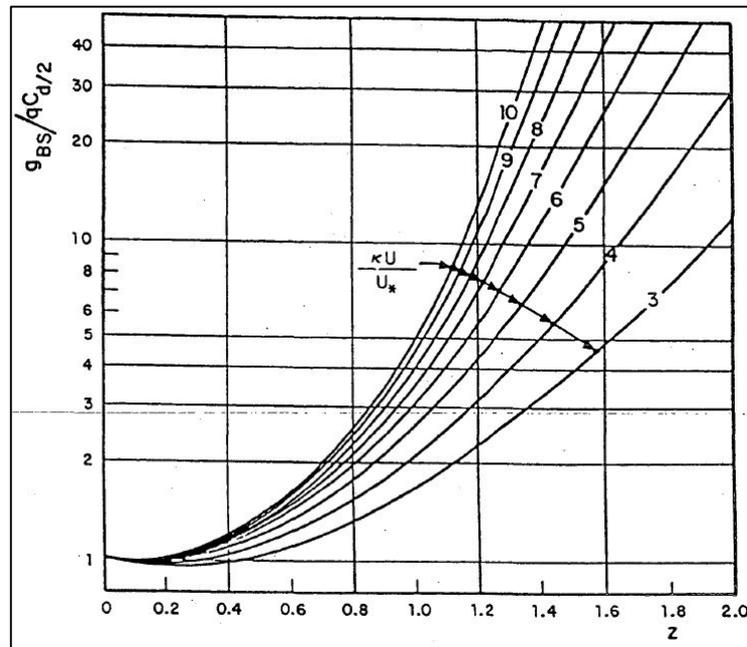


Figura 2.26. Valores de $f\left(z, \frac{kV}{V_*}\right)$ en función de los parámetros z y $\frac{kV}{V_*}$.

Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

2.9.4 Método de Chang, Simons y Richardson.

$$g_L = dC_{ab} \left(VI_3 - \frac{2V_*}{k} I_4 \right) \quad [\text{Ec. 2.175}]$$

d : Tirante medio (m).

z_2 : Variable relacionada a la velocidad de caída.

$$z_2 = \frac{\log\left(\frac{C_{a1}}{C_{a2}}\right)}{\log\left(\frac{\sqrt{d}-\sqrt{d-a_2}}{\sqrt{a_2}} \frac{\sqrt{a_1}}{\sqrt{d}-\sqrt{d-a_1}}\right)} \quad [\text{Ec. 2.176}]$$

C_{a2} : Concentración de sedimentos ubicada a_2 metros sobre el fondo (kgf/m^3).

a_2 : Distancia desde el fondo hasta la ubicación de la concentración C_{a2} (m).

C_{a1} : Concentración de sedimentos ubicada a_1 metros sobre el fondo (kgf/m^3).

a_1 : Distancia desde el fondo hasta la ubicación de la concentración C_{a1} (m).

C_{ab} : Concentración en el borde superior de la capa de fondo (kgf/m^3).

$$C_{ab} = C_{a1} \left(\frac{\sqrt{d}-\sqrt{d-a_1}}{\sqrt{a_1}} \frac{\sqrt{a_b}}{\sqrt{d}-\sqrt{d-a_b}} \right)^{z_2} \quad [\text{Ec. 2.177}]$$

a_b : espesor de la capa de fondo (m).

$$a_b = \frac{10D_e(\tau_0 - \tau_c)}{\tau_c} \quad [\text{Ec. 2.78}]$$

D_e : Diámetro representativo de la muestra (m), se obtiene de la división de una muestra en partes igualitarias en porcentaje, a fin de poder generar una representatividad.

$$D_e = \left[\frac{\sum_i^N D_i^3 w_i}{N w_e} \right]^{1/3} \quad [\text{Ec. 2.179}]$$

N : Numero de partes a la cual ha sido dividida la muestra.

D_i : Diámetro de cada una de la parte i (m).

w_i : Velocidad de caída correspondiente a las partículas cuyo diámetro es D_i (m/s).

w_e : Velocidad de caída representativa (m/s).

τ_0 : Esfuerzo contante que el flujo produce en el fondo (kgf/m^2).

$$\tau_0 = \gamma R S \quad [\text{Ec. 2.180}]$$

τ_c : Esfuerzo cortante crítico (kgf/m^2).

$$\tau_c = 41.8 D_e^{0.82} - 0.017 \ln(454 D_e) \quad [\text{Ec. 2.181}]$$

V : Velocidad media (m/s).

V_* : Velocidad de corte (m/s)

$$V_* = \sqrt{g R S} \quad [\text{Ec. 2.182}]$$

g : Gravedad (m/s^2).

R : Radio Hidráulico (m).

S : Pendiente (m/m).

k : Coeficiente de Von Karman y se obtiene de la figura 2.27.

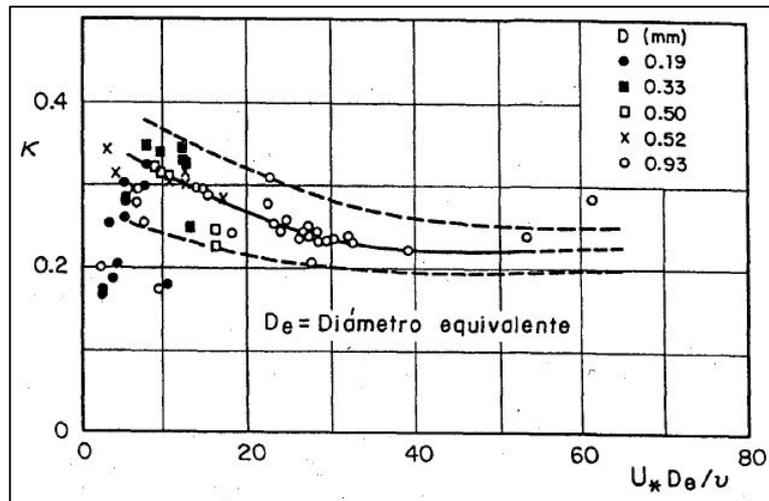


Figura 2.27. Valores de la constante k de von Karman.
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

I_3 : Solución de la integral, se utiliza la figura 2.28 en función de A y z_2 .

A : Variable de cambio.

$$A = \frac{a_b}{a}$$

[Ec. 2.183]

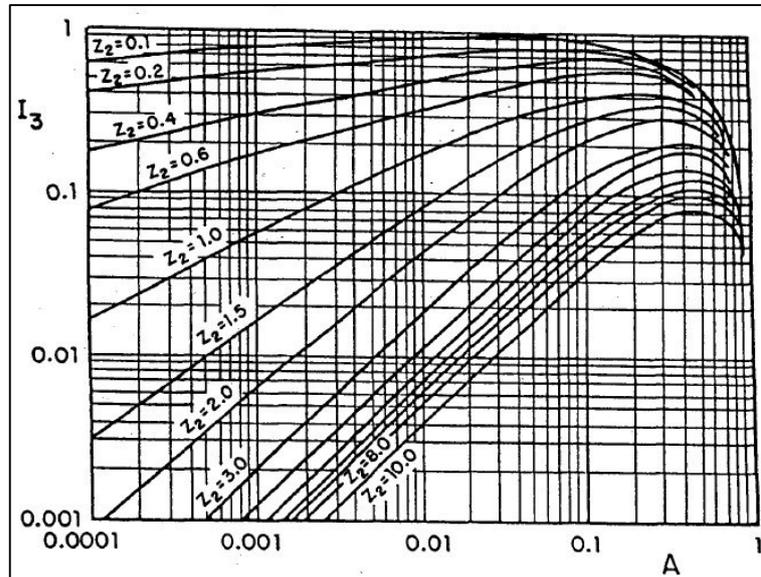


Figura 2.28. Valores de la solución de la integral I_3 .
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

I_4 : Solución de la integral, se utiliza la figura 2.29 en función de A y z_2 .

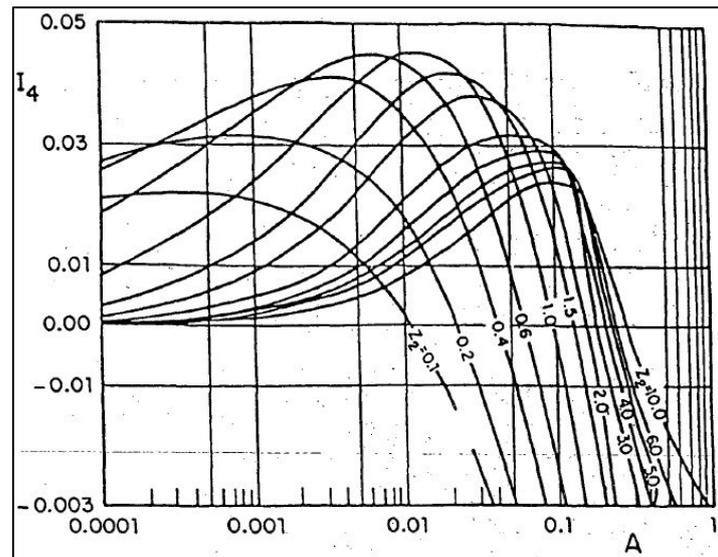


Figura 2.29. Valores de la solución de la integral I_4 .
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

2.9.5 Método de Einstein y Abdel-All.

Aquí se demostró que el coeficiente de von Karman no asumía un valor constante, por lo que se hicieron investigaciones y se modificó la ecuación inicial presentada por Einstein.

$$g_L = \frac{0.4}{k} 5.75 V_*' C_{2D65} d \left(\frac{A}{1-A} \right)^z \left(J_1 \log \left(30.2 \frac{xd}{k_s} \right) + 0.43429 J_2 \right) \quad [\text{Ec. 2.184}]$$

Todas las variables han sido explicadas en el método de Einstein, excepto el cálculo del coeficiente de von Karman.

k : Coeficiente de von Karman, el cual se calcula con la figura 2.30 y depende del parámetro

$$\frac{w_{35} D_{65}}{\sqrt{q S v}}$$

w_{35} : Velocidad de caída de la partícula asociada al D_{35} (m/s).

$$w_{35} = F_1 (g \Delta D_{35})^{0.5} \quad [\text{Ec. 2.185}]$$

$$F_1 = \left(\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g \Delta D_{35}^3} \right)^{0.5} - \left(\frac{36v^2}{g \Delta D_{35}^3} \right)^{0.5} \quad [\text{Ec. 2.186}]$$

D_{65} : Diámetro correspondiente al percentil 65 (m).

q : Caudal unitario (m^2/s)

S : Pendiente hidráulica (m/m).

ν : Viscosidad cinemática (m²/s).

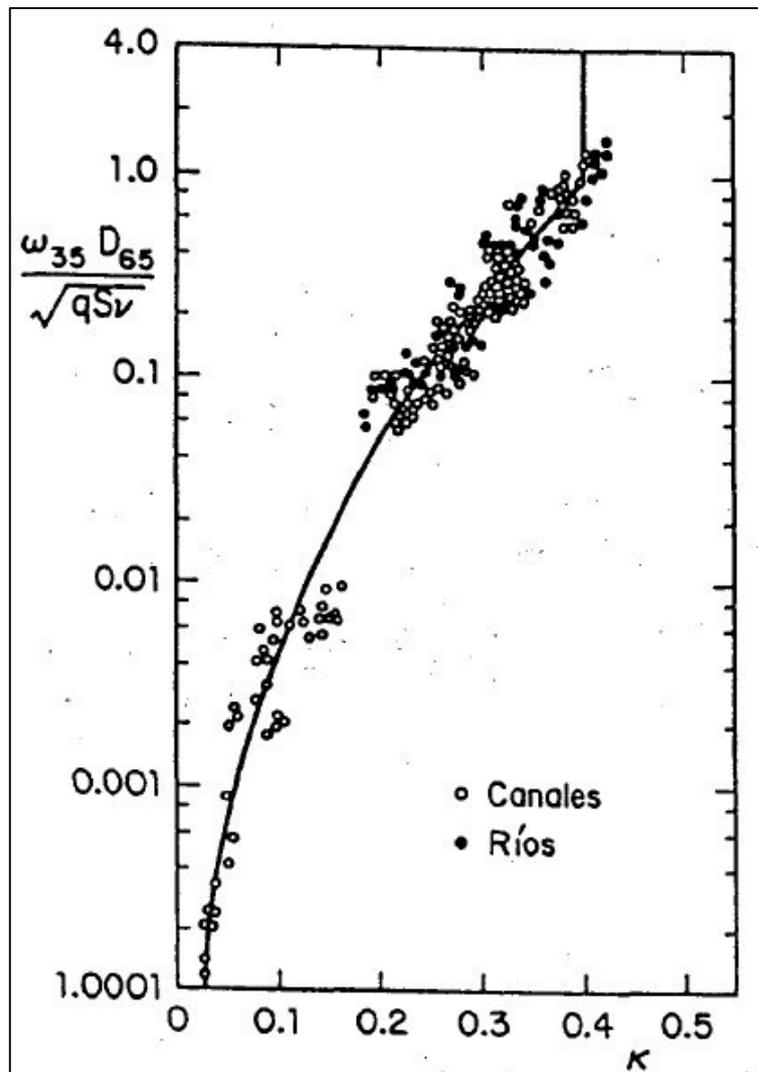


Figura 2.30. Valores del coeficiente de Von Karman k .
Fuente: Maza y García, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996.

2.9.6 Método de ajuste mediante información del ADCP.

En este método buscamos combinar un perfil de velocidades ajustándolo mediante el uso de los datos de velocidades medidos por el ADCP y el perfil de concentraciones que más se ajustó según la aplicación y análisis de los métodos anteriores, el cual vendría a ser Lane y Kalinske.

Para esta formulación utilizaremos la ecuación de transporte de lavado por unidad de ancho para flujo bidimensional en superficie libre por encima de la capa de fondo.

$$gL = \int_a^d V_y C_y dy \quad [\text{Ec. 2.187}]$$

Donde a vendría a representar el espesor de la capa de fondo, el cual según Einstein está definido por $2D_{65}$, sin embargo en este análisis hemos notado que para ese espesor se estaría considerando velocidades negativas según el perfil de velocidad definido, por lo que para estos cálculos se estará considerando como espesor de la capa de fondo a la altura y en la cual la velocidad V_y sea igual a 0.

Para definir una distribución de velocidades utilizaremos la ecuación de Prandtl – von – Karman, la cuál será ajustada mediante regresión lineal utilizando los datos medidos por el ADCP a fin de determinar los coeficientes de la ecuación que se muestran a continuación:

$$V_y = \frac{V_*}{k} \ln y - \frac{V_*}{k} y_0 \quad [\text{Ec. 2.188}]$$

Siendo V_* , k y y_0 constantes para un mismo perfil, entonces la ecuación se puede reescribir como:

$$V_y = A \ln y + B \quad [\text{Ec. 2.189}]$$

Dónde:

V_y : Velocidad a la distancia y sobre el fondo (m/s).

V_* : Velocidad de corte (m/s).

k : Coeficiente de Von Karman.

y : distancia sobre el fondo a la cual se desea calcular la velocidad (m).

y_0 : Altura de rugosidad (m).

A : Coeficiente a determinar de manera experimental.

B : Coeficiente a determinar de manera experimental.

Para definir un perfil de distribución de concentraciones utilizaremos la distribución que mejor representación obtuvo en los métodos anteriores descritos, en este caso fue el de Lane y

Kalinske, el cual para para la aplicación de este método en específico se escribirá de la siguiente manera, tomando en consideración las muestras recogidas en campo.

$$C_y = C_{a_1} e^{C\left(\frac{y-a_1}{d}\right)} \quad [\text{Ec. 2.190}]$$

Donde:

C_y : Concentración a una altura y metros sobre el fondo (kgf/m^3).

y : Ubicación sobre el fondo a la cual se encuentra la concentración C_y (m).

C_{a_1} : Concentración de sedimentos ubicada a_1 metros sobre el fondo (kgf/m^3).

a_1 : Distancia desde el fondo hasta la ubicación de la concentración C_{a_1} (m).

d : Tirante medio (m).

C : Coeficiente a determinar de manera experimental.

$$C = \frac{\ln\left(\frac{C_{a_2}}{C_{a_1}}\right)d}{a_2 - a_1} \quad [\text{Ec. 2.191}]$$

C_{a_2} : Concentración de sedimentos ubicada a_2 metros sobre el fondo (kgf/m^3).

a_2 : Distancia desde el fondo hasta la ubicación de la concentración C_{a_2} (m).

2.9.7 Método del índice acústico mediante el uso de información del ADCP.

En la actualidad se han desarrollado métodos para correlacionar las intensidades de las señales obtenidas como retorno del impacto en los sedimentos que transporta el río con los grados de concentración de sedimentos en el espacio, estas señales conocidas como retrodispersión son corregidas mediante las pérdidas de energía generadas por emisión, atenuación producida por el agua y atenuación producida por los sedimentos, tal como lo indica Latosinski (2011) en su investigación realizada en el río Paraná, a continuación se presenta la ecuación que correlaciona lo indicado anteriormente:

$$\text{Log}(CSS) = A(RL + 2TL) + Kt \quad [\text{Ec. 2.192}]$$

Donde:

CSS : Concentración de sólidos en suspensión expresada en mg/l .

$$SCS = RL + 2TL \quad [\text{Ec. 2.193}]$$

A : Constante de correlación.

RL : Señal cruda del ADCP, expresada en dB.

$2TL$: Corrección por pérdidas de transmisión.

$$2TL = 20\text{Log}(\varphi r) + 2\sigma_f r + 2\sigma_s r \quad [\text{Ec. 2.194}]$$

φ : Coeficiente de corrección de campo cercano.

$$\varphi = 1 + \frac{1}{\left(\frac{1.35r}{r_n}\right) + \left(\frac{2.5r}{r_n}\right)^{3.2}} \quad [\text{Ec. 2.195}]$$

r : Distancia inclinada desde el ADCP hasta el centro de la celda de medición (m).

$$r = \frac{d_{\text{celda}}}{\cos(\theta)} \quad [\text{Ec. 2.196}]$$

d_{celda} : Profundidad del centro de la celda (m).

θ : Ángulo de inclinación del transductor con respecto a la vertical.

r_n : División entre el campo cercano y lejano.

$$r_n = \frac{A_e}{c/f} \quad [\text{Ec. 2.197}]$$

A_e : Área efectiva del transductor (m²).

c : Velocidad del sonido en el agua dulce (m/s).

$$c = 1.402385(10^3) + 5.038813T - 5.799136(10^{-2})T^2 + 3.287156(10^{-4})T^3 - \\ 1.398845(10^{-6})T^4 + 2.787860(10^{-9})T^5 \quad [\text{Ec. 2.198}]$$

T : Temperatura (°C)

f : Frecuencia de emisión acústica (Hz)

σ_f : Coeficiente de absorción del agua (dB/m).

$$\sigma_f = \frac{8.69B_w f^2}{f_T} \quad [\text{Ec. 2.199}]$$

B_w : Constante por viscosidad en agua pura.

$$B_w = 3.38(10^{-6}) \quad [\text{Ec. 2.200}]$$

f_T : Frecuencia de relajación.

$$f_T = 21.9 \left(10^{6 - \frac{1520}{T+273}} \right) \quad [\text{Ec. 2.201}]$$

σ_s : Coeficiente de atenuación del sedimento.

Según las investigaciones realizadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (s.f.) este coeficiente puede ser determinado mediante una relación con la concentración de los sedimentos, tal como se muestra en la figura 2.31.

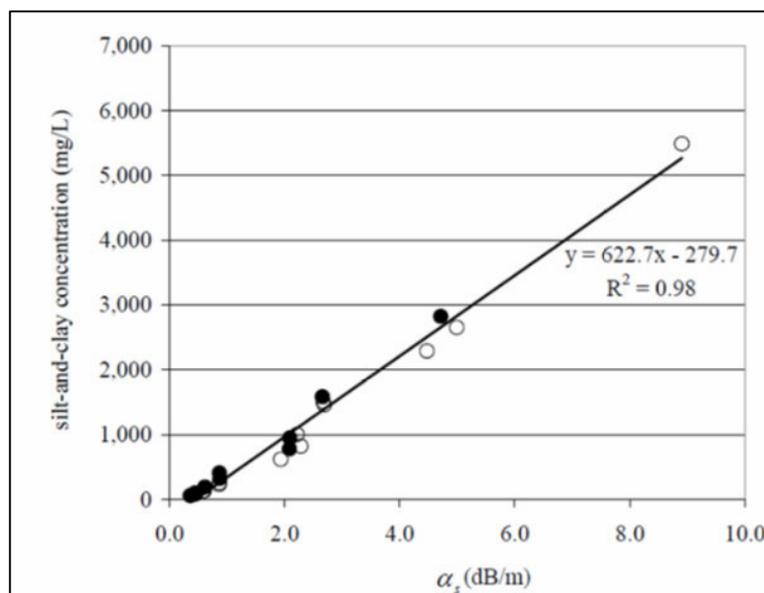


Figura 2.31. Valores del coeficiente σ_s .

Fuente: USGS, 2018.

Kt : Constante de parámetros característicos del ADCP.

Es necesario indicar que, en una medición de sección de un río con un ADCP se recolecta información en miles de celdas distribuidas y ordenadas en toda la sección, cada celda almacena la información de retrodispersión, así como de velocidad del flujo, por lo que con la aplicación correcta de este método es posible determinar las distribuciones de concentraciones en toda el área de la sección transversal con lo que se estaría obteniendo mucha mayor información que con muestreos puntuales y que con los métodos anteriormente mostrados.

Capítulo 3

Mediciones en Campo

En este capítulo se busca definir los criterios básicos necesarios para la realización de las mediciones de las variables hidráulicas y geométricas correctamente en campo, así como la elaboración de los estudios básicos necesarios para la determinación de estas variables.

En primer lugar hay que destacar que toda medición que se realiza en el ámbito de la ingeniería tiene que estar referenciada a un sistema de posición global conocido, en este caso vendría a ser el WGS 84, y a un sistema vertical de referencia conocido también, para esta investigación vendría a ser el geoide 08, y más aún en este tipo de investigaciones en donde la imprecisión genera errores importantes en las estimaciones finales del transporte, en el caso por ejemplo de la medición de velocidades, que es una variable que influye directamente en el cálculo del transporte de sedimentos, esta tiene que estar relacionada necesariamente a un nivel del espejo de agua y a un instante determinado, de tal manera que es posible generar un registro que luego guardará relación temporal con el momento de la toma de muestras de sedimentos. Otro ejemplo muy claro y en el cual se requiere suma precisión, por lo menos en ríos del llano amazónico, es la medición de la pendiente hidráulica, para esto es necesario instalar reglas limnimétricas separadas una de otra varios kilómetros, y referenciarlas ambas a un mismo sistema vertical, para esto tenemos varias opciones, realizamos una nivelación geométrica o trigonométrica por los varios kilómetros de selva, lo cual es bastante complicado, o realizamos posicionamiento estático relativo simultaneo entre hitos geodésicos que hayamos colocado como puntos de control en cercanías de las reglas limnimétricas.

3.1 Monumentación y Posicionamiento Geodésico.

Éste es quizás el estudio previo de ingeniería más importante que hay que realizar, ya que será nuestra base de referenciación de todas las mediciones que realicemos.

Inicialmente el estudio parte por investigar la zona a posicionar y el Orden del posicionamiento en función a la necesidad del grado de precisión, según el Instituto Geográfico Nacional (IGN) existen hitos geodésicos de Orden 0, Orden A, Orden B y Orden C, cada uno de ellos con distintos tiempos de grabación mínimos y distintas precisiones. Cabe indicar que para este tipo de investigaciones es más que suficiente instalar hitos geodésicos de Orden C, los cuales tendrán precisiones de 10 mm y 15 mm en la horizontal y vertical respectivamente como máximo. Además de esto es necesario investigar los puntos de referencia o puntos de control, los cuales podrán ser Estaciones de Rastreo Permanente, hitos geodésicos de Orden A o de Orden B y analizar la distancia aproximada entre los puntos de control y los hitos geodésicos a instalar.

Para esta investigación, la zona de análisis vendría a estar ubicada en la localidad de San Pablo, emplazada en la ribera derecha del río Amazonas, tal y como se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1. Ubicación de la zona de investigación.
Fuente: Elaboración propia. Software Google Earth, 2019.

Se realizó la Monumentación y el posicionamiento de 02 hitos geodésicos distribuidos a lo largo de la ribera, lo cuales han sido enlazados a la red de el IGN mediante la utilización de un hito geodésico de Orden 0 de nombre “Caba” certificado por el IGN, ubicado en la ciudad de Caballococha a 66.3 Km aproximadamente de la zona de investigación.

3.1.1 Metodología de trabajo.

Los criterios de tiempo de recolección de data y ubicación de los hitos geodésicos están en base a las Especificaciones Técnicas de los Puntos Geodésicos de Orden “C”, para el posicionamiento geodésico estático relativo con receptores del Sistema de Navegación Global Satelital (GNSS por sus siglas en inglés) del Instituto Geográfico Nacional.

La actividad inicia con la identificación y selección de las áreas en donde se monumentarán, las áreas deben de ser despejadas, sin presencia de obstáculos que interfieran con la recolección de información por parte del receptor GNSS. Luego se procede a la monumentación, en donde se construye el hito de concreto y finalmente se realiza el posicionamiento geodésico, en donde se recolecta la información de los satélites, para esto se instala el receptor GNSS sobre el punto donde se requiere posicionar, los tiempos de grabación serán dependientes de la longitud de la línea base, número de satélites y de las características del equipo empleado, la ocupación del punto deber ser lo suficientemente amplia en tiempo, de forma que garantice la determinación de la ambigüedad en la solución de la línea base, por esta razón se ha considerado un tiempo de grabación aproximado de 3 horas para cada hito geodésico, con una elevación de la máscara no mayor a 10° sobre el horizonte y con rastreo continuo contando con al menos 4 satélites.

Una vez instalados los receptores GNSS se procede a grabar la información recibida de los satélites en la memoria interna de cada receptor.

Una vez finalizada la etapa de recolección de data, el procesamiento de la data para la obtención de las coordenadas se realizará mediante el software geodésico Topcon Tools, utilizando efemérides del servicio GNSS internacional.

3.1.2 Monumentación.

Se monumentaron 02 hitos geodésicos de tubo de PVC de 3" de diámetro con 0.5m de longitud como mínimo, relleno de concreto, en cuyo centro se colocó una varilla de acero de 3/8" de diámetro y de longitud 0.5 m, la cual sobresale 0.01 m de la superficie de concreto, como se muestra en la fotografía 3.1.



Fotografía 3.1. Hitos geodésicos monumentados en la localidad de San Pablo.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

3.1.3 Posicionamiento.

Se realizó el posicionamiento geodésico mediante la utilización de equipos Topcon GR3 de doble frecuencia, con líneas de rastreo independiente, con precisión de H: 3.0 mm + 0.5 ppm y V: 5.0 mm + 0.5 ppm para método estático. Se realizó la grabación de información de cada hito por un periodo no menor a 3 horas, con máscara de elevación de 10 grados y 5 segundos de sincronización de registros con la estación base.

Se realizó las grabaciones de los hitos geodésicos el día 22 de febrero del 2016, tal y como se muestra en la fotografía 3.2.



Fotografía 3.2. Posicionamiento de los hitos geodésicos en la localidad de San Pablo.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

3.1.4 Procesamiento.

Para el procesamiento de la información se utilizó el software Topcon Tools v. 8.2.3 mediante la elaboración de líneas base entre el punto de control “CABA” y los 02 hitos geodésicos grabados.

Tabla 3.1. Datos del punto del punto de control. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Punto de control	Latitud	Longitud	Elevación elipsoidal
CABA	03°54'31.29269''	70°31'00.43976''	104.9231

Se analizó la información recolectada para cada estación, así como el filtrado de la información satelital ruidosa, las cuales generan errores en el procesamiento.

Se obtuvieron los siguientes resultados en coordenadas y elevación para los hitos geodésicos:

Tabla 3.2. Resultados del procesamiento geodésico. Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Punto	Latitud	Longitud	Norte	Este	Elevación geoidal	Zona
SP - 1	04°01'04.34141''S	71°06'05.45819''W	9'555,597.128	266,672.613	75.836	19
SP - 2	04°01'04.36529''S	71°06'00.15205''W	9'555,596.815	266,836.335	80.089	19

3.2 Medición de Niveles de Río.

El objetivo de la instalación de las reglas limnimétricas es el de registrar los niveles del espejo de agua el día en el cuál se ha realizado los trabajos de campo, estos registros serán utilizados para la correlación de las mediciones de velocidades y la determinación de la pendiente hidráulica. Para esto se instalaron dos reglas limnimétricas mediante la utilización de un nivel de ingeniero, partiendo desde los hitos monumentados anteriormente, ver la fotografía 3.3.



Fotografía 3.3. Instalación de reglas limnimétricas para la medición de niveles de río.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

3.2.1 Instalación de reglas limnimétricas.

Las reglas limnimétricas se ubicaron dentro del área de estudio, en zonas donde se logró identificar que el flujo era bastante calmado, para poder realizar las mediciones con precisión.

A continuación, se muestran la tabla 3.3 y la figura 3.2 en donde se logra observar las ubicaciones exactas de las reglas limnimétricas.

Tabla 3.3. Coordenadas en UTM de las reglas limnimétricas. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Regla limnimétrica	Coordenadas UTM	
	Norte	Sur
Regla 1	9'555,619.00	266,701.00
Regla 2	9'555,624.00	267,253.00

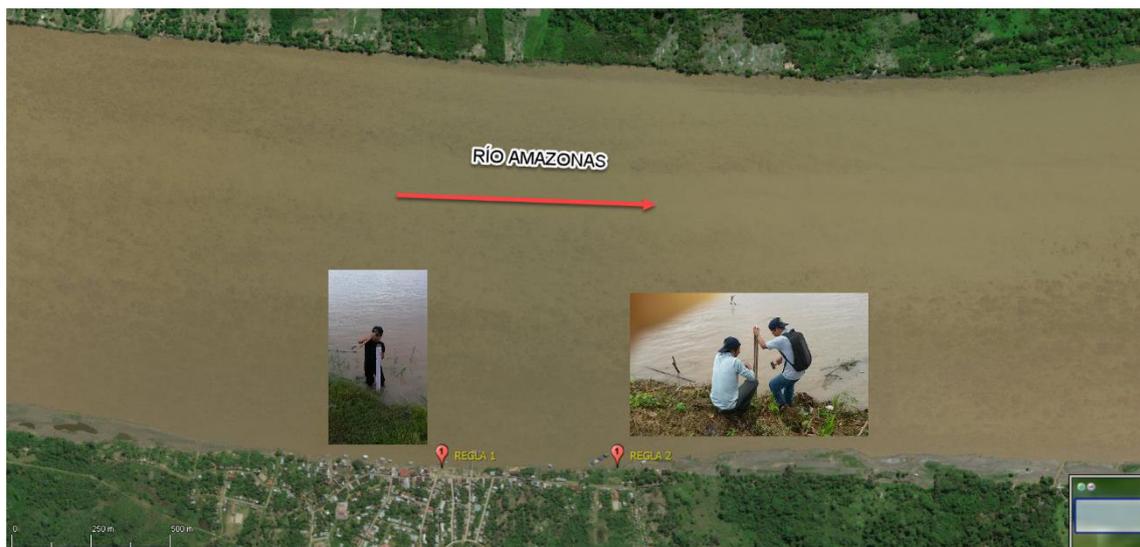


Figura 3.2. Ubicación de las reglas limnimétricas dentro del área de investigación.
Fuente: Elaboración propia, 2019.

3.2.2 Registro.

A continuación, se muestran los registros de la regla limnimétrica instalada.

Tabla 3.4. Registro de los niveles de espejo de agua en la regla 1. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Coordenadas de la regla		E	266,701.00	Cota cero	72.343
		N	9'555,619.00		
Día	Hora	Nivel (m)	Cota de espejo de agua	Cota de espejo de agua promedio en el día	
	08:00	0.50	72.843		
25/02/2016	12:00	0.53	72.873		
	16:00	0.54	72.883	72.866	
	08:00	0.58	72.923		
26/02/2016	12:00	0.595	72.938	72.938	
	16:00	0.61	72.953		
	08:00	0.63	72.973		
27/02/2016	12:00	0.64	72.983	72.978	
	16:00	-	-		

Tabla 3.5. Registro de los niveles de espejo de agua en la regla 2. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Coordenadas de las reglas		E	267,253.00	Cota cero	72.619
		N	9'555,624.00		
Día	Hora	Nivel (m)	Cota de espejo de agua	Cota de espejo de agua promedio en el día	
	08:00	0.205	72.824		
25/02/2016	12:00	0.230	72.849		
	16:00	0.235	72.854	72.842	
	08:00	0.285	72.904		
26/02/2016	12:00	0.300	72.919	72.915	
	16:00	0.305	72.924		
	08:00	0.345	72.964		
27/02/2016	12:00	0.350	72.969	72.966	
	16:00				

3.2.3 Pendiente hidráulica.

Con la información recolectada en las reglas limnimétricas se logró calcular la pendiente hidráulica promedio del río Amazonas en este tramo de investigación para los instantes de medición, cabe resaltar que la pendiente hidráulica al igual que todas las varias hidráulicas varían temporalmente de acuerdo al ciclo hidrológico. Ver tabla 3.7 y 3.8.

Tabla 3.6. *Desnivel entre reglas limnimétricas.* Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Día	Hora	Cota de espejo de agua en la regla 1	Cota de espejo de agua en la regla 2	Desnivel
	08:00	72.843	72.824	0.019
25/02/2016	12:00	72.873	72.849	0.024
	16:00	72.883	72.854	0.029
	08:00	72.923	72.904	0.019
26/02/2016	12:00	72.938	72.919	0.019
	16:00	72.953	72.924	0.029
	08:00	72.973	72.964	0.009
27/02/2016	12:00	72.983	72.969	0.014
	16:00			0
			Promedio	0.018

Tabla 3.7. *Determinación de la pendiente hidráulica.* Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Desnivel entre reglas (m)	Distancia entre reglas por el talweg (Km)	Pendiente hidráulica (m/m)
0.018	0.552	0.0000326

3.3 Aforos o Medición de Velocidades y Corrientes

Para el análisis del transporte de sedimentos la determinación de las velocidades en la sección a investigar es primordial, para eso utilizaremos un ADCP (Perfilador de Corrientes Acústico Doppler), el cual nos brinda la información de las velocidades, corrientes y

retrodispersión en toda la sección transversal, dividiendo la sección en celdas de 0.5 m x 0.5 m. Anteriormente, antes de la utilización de este tipo de tecnología la medición de velocidades y corrientes se realizaban con molinetes y flotadores, con los cuales solo se podía determinar velocidades puntuales.

Para la realización de los aforos se utilizó un ADCP WorkHorse 600 kHz de Teledyne, con el cual se obtuvo información de velocidades, corrientes y retrodispersión acústica.

3.3.1 Consideraciones para la medición.

Para la ejecución de los aforos se tiene que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las mediciones se tienen que realizar en un tramo recto del río, además la sección de aforo tiene que ser perpendicular a ambas riberas.
- Se tendrán que realizar como mínimo tres pasadas en la misma sección para certificar que la medición sea correcta.
- Se tendrá que obtener una desviación estándar menor al 5 % entre las mediciones realizadas.
- La velocidad del bote tiene que permanecer en el rango de 2 a 5 nudos.

3.3.2 Calibración.

La calibración de la brújula es indispensable para que la medición sea más exacta y se realiza antes iniciar cualquier medición en un cuerpo hídrico. Esta calibración se utiliza para compensar los campos magnéticos específicos de la zona de medición y es importante completar la calibración en la embarcación y cerca de la posición de la sección de medición.

3.3.3 Ubicación de la sección de aforo.

La sección de aforo se encuentra ubicada frente a la comunidad San Pablo, en un tramo recto del río, tal y como se muestra en la figura 3.3.



Figura 3.3. Ubicación de la sección de aforo.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

A continuación, se detallan las coordenadas de la sección de aforo.

Tabla 3.8. Ubicación de la sección de aforo. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Punto P1		Punto P2	
Este	Norte	Este	Norte
266,792.00	9°556,956.00	266,695.00	9°555,630.00

3.3.4 Aforo.

Una vez determinada la sección a aforar, se procede a configurar el proyecto en el software WinRiver (es el que se usa para este tipo de ADCP), en donde se introduce una variable muy importante para la referenciación y correcta medición: la declinación magnética.

La declinación magnética es la diferencia angular que existe entre el norte magnético y norte geográfico, y por convención este valor adopta una magnitud negativa en el Perú, debido a que el norte magnético se encuentra al oeste de norte geográfico. Esta declinación magnética es variable en función a la ubicación y momento del lugar de medición, para el caso de la zona de investigación la declinación magnética adopto el valor de $-7^{\circ} 88'$.

El aforo se divide en tres partes claves, estimación del margen inicial, estimación del transecto y estimación del margen final.

Como bien se sabe es imposible realizar la medición de la sección transversal desde la propia intersección del espejo de agua y la ribera debido a la baja profundidad que se encuentran en estas zonas y que no permite el ingreso de las embarcaciones, además el ADCP necesita como mínimo 30 cm de profundidad para poder iniciar mediciones. Para la estimación del margen inicial nos colocamos lo más cerca que podamos a la intersección del espejo de agua y la ribera, del margen de inicio de medición (supongamos que la medición inicial se está realizando desde el margen derecho hacia el margen izquierdo) y calculamos aproximadamente la distancia desde la ubicación en donde nos encontramos hacia la intersección del espejo de agua y la ribera, esta distancia la introducimos en el software de medición y empezamos a realizar pingüeos (pulsos de sonido), aproximadamente unos 20 pingüeos para poder estimar correctamente este margen.

La estimación del transecto se realiza siguiendo una línea planificada desde una ribera hacia la otra, recolectando información en todo el recorrido.

La estimación del margen final se realiza de forma similar al del margen inicial, se calcula la distancia aproximada desde la posición final hasta la intersección del espejo de agua y la ribera del margen de termino (ribera izquierda para el ejemplo), este cálculo se introduce al software y se realizan pingüeos consecutivos, 20 aproximadamente para una buena estimación.

La metodología descrita se logra resumir en la figura 3.4.

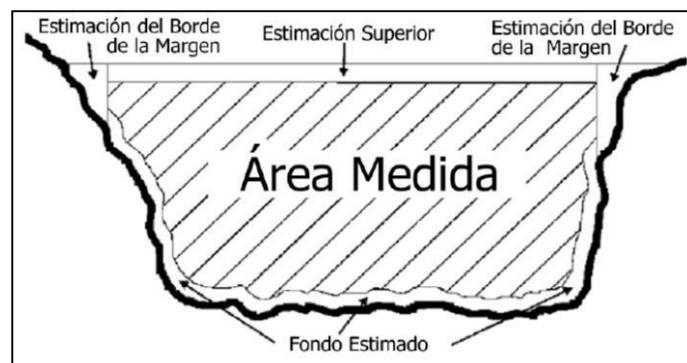


Figura 3.4. Descripción de las estimaciones en una sección medida por un ADCP.

Fuente: Sontek, Manual de Operación de M9, 2016.

Siguiendo la metodología antes indicada se procede a repetir la medición entre 3 a 4 veces, de tal manera que la desviación entre las medidas sea menor al 5 %.

Debido a que los resultados de cada medición se muestran al instante, el proceso o post proceso de la información consta principalmente de la verificación de los parámetros introducidos en campo, en caso de que se haya generado algún error, se procede a su corrección manual si es que es posible.

3.3.5 Resultados de los aforos.

3.3.5.1 Pasada 1.

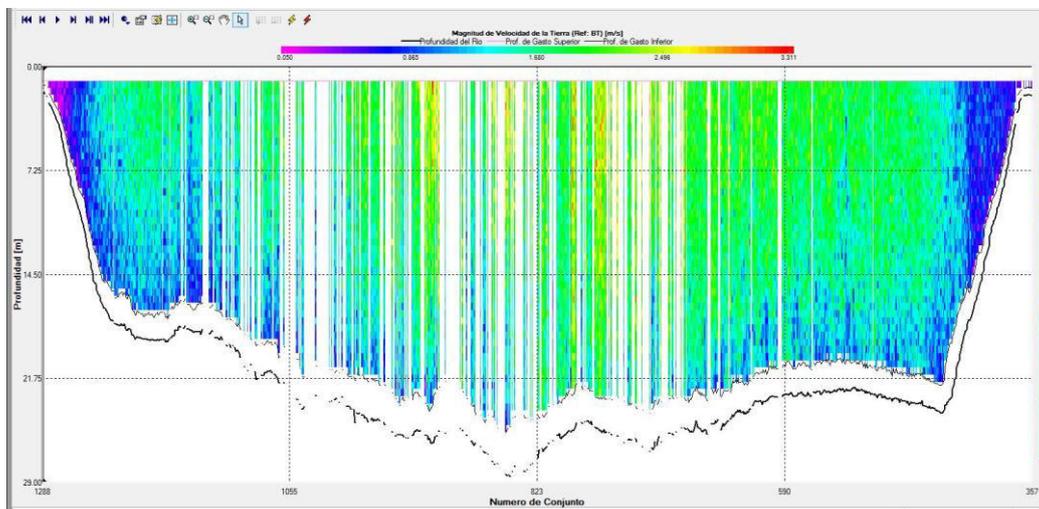


Figura 3.5. Distribución de velocidades en la sección de aforo.

Fuente: Elaboración propia. Software WinRiver II, 2019.

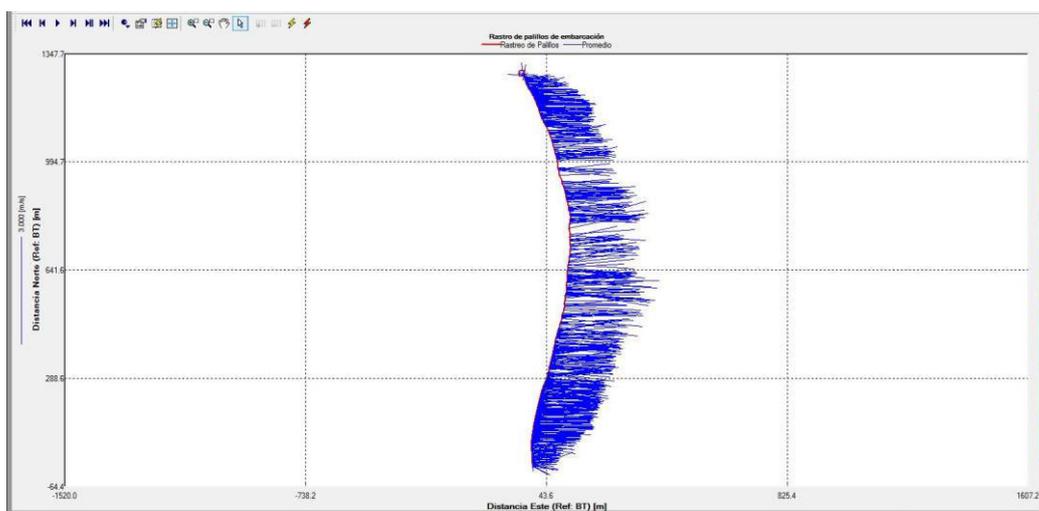


Figura 3.6. Líneas de corriente en la sección de aforo en la sección de aforo.

Fuente: Elaboración propia. Software WinRiver II, 2019.

Tabla 3.9. *Resumen de la pasada 1.* Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Duración	632,52	[s]
Q Total	44,959,31	[m ³ /s]
Ancho	1,293,70	[m]
Área Total	28,786,48	[m ²]
Q/Área	1,562	[m/s]

3.3.5.2 Pasada 2.

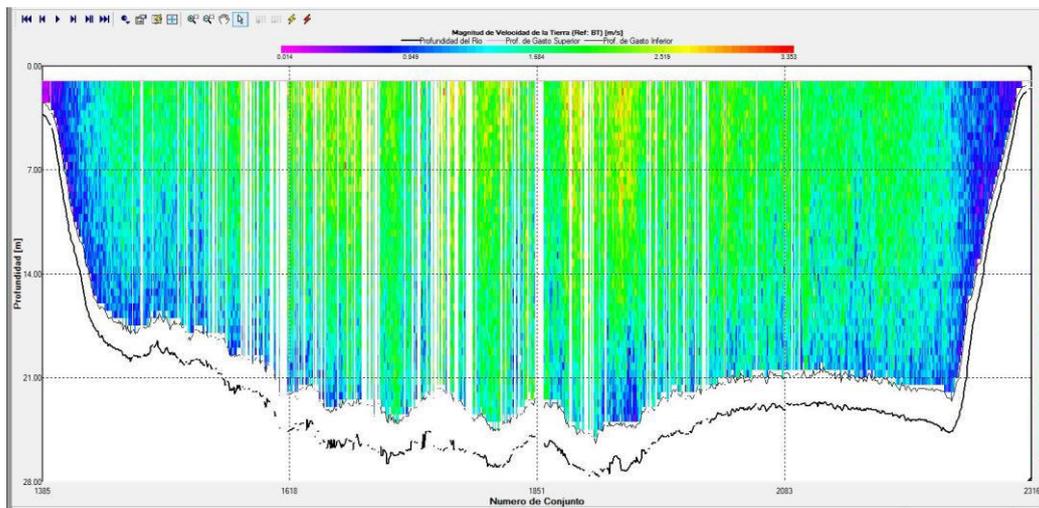


Figura 3.7. Distribución de velocidades en la sección de aforo.

Fuente: *Elaboración propia. Software WinRiver II, 2019.*

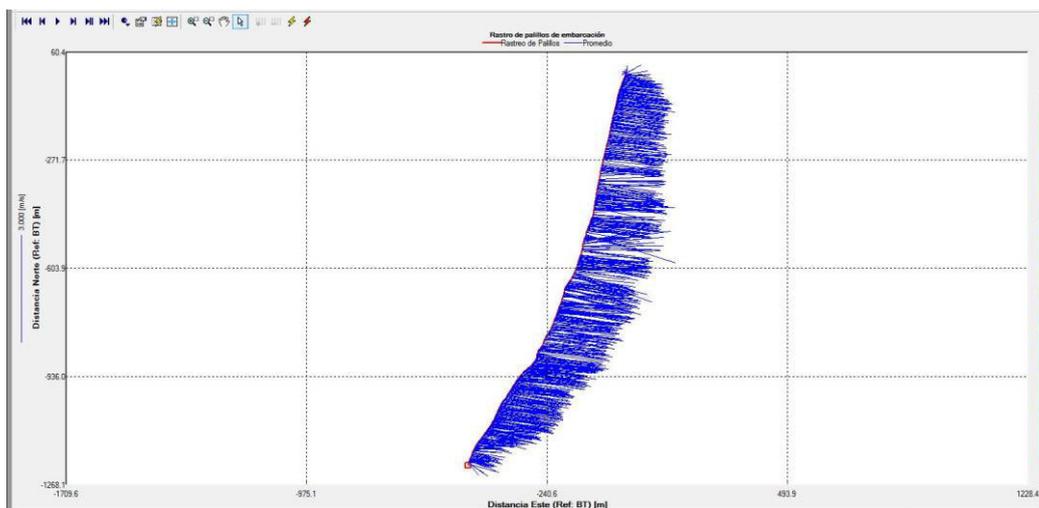


Figura 3.8. Líneas de corriente en la sección de aforo en la sección de aforo. Fuente: *Elaboración propia. Software WinRiver II, 2019.*

Tabla 3.10. Resumen de la pasada 2. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Duración	632,13	[s]
Q Total	44,982,77	[m ³ /s]
Ancho	1,307,45	[m]
Área Total	29,316,60	[m ²]
Q/Área	1,534	[m/s]

3.3.5.3 Pasada 3

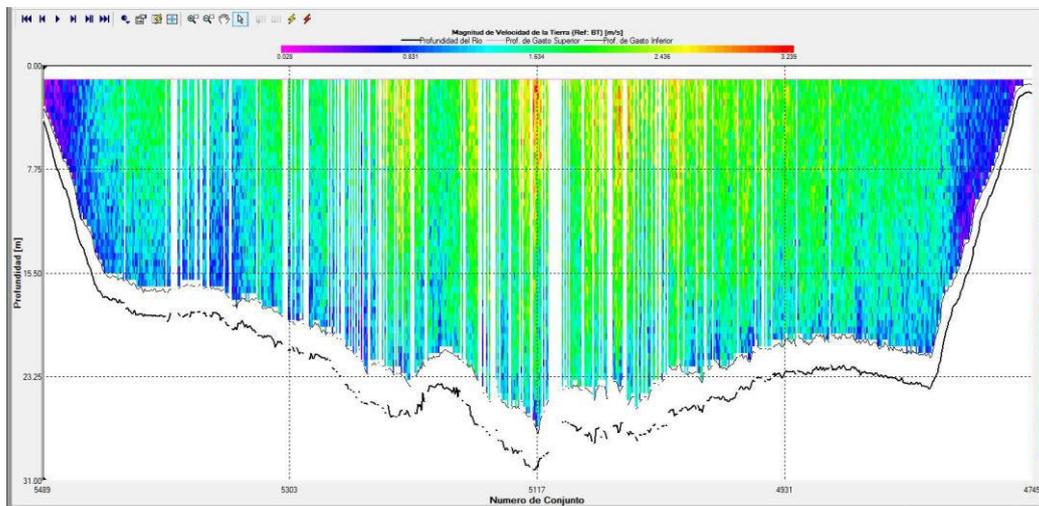


Figura 3.9. Distribución de velocidades en la sección de aforo.
Fuente: Elaboración propia. Software WinRiver II, 2019.

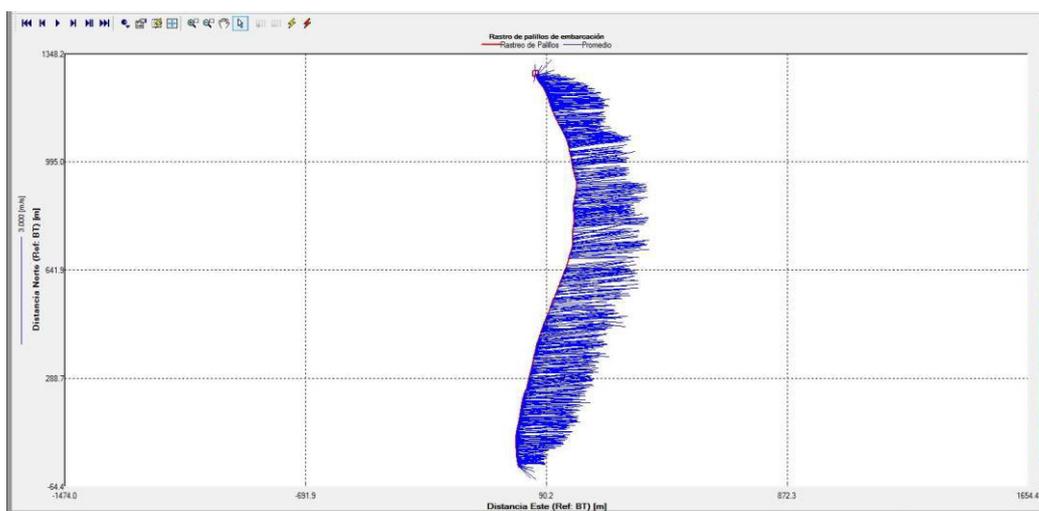


Figura 3.10. Líneas de corriente en la sección de aforo en la sección de aforo. Fuente: Elaboración propia. Software WinRiver II, 2019.

Tabla 3.11. Resumen de la pasada 3. Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Duración	505,3	[s]
Q Total	45,180,75	[m ³ /s]
Ancho	1,302,57	[m]
Área Total	29,528,16	[m ²]
Q/Área	1,53	[m/s]

3.3.5.4 Pasada 4.

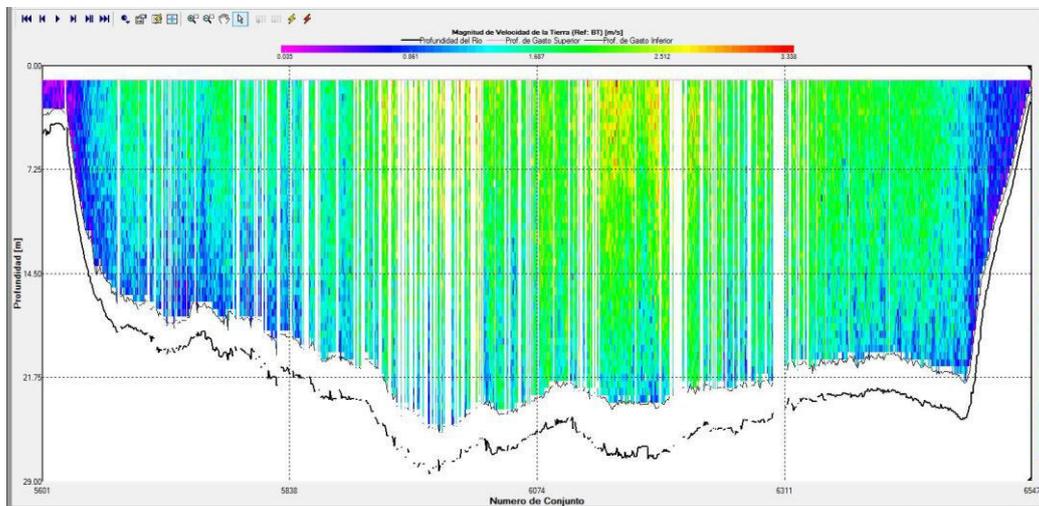


Figura 3.11. Distribución de velocidades en la sección de aforo. Fuente: *Elaboración propia. Software WinRiver II, 2019.*

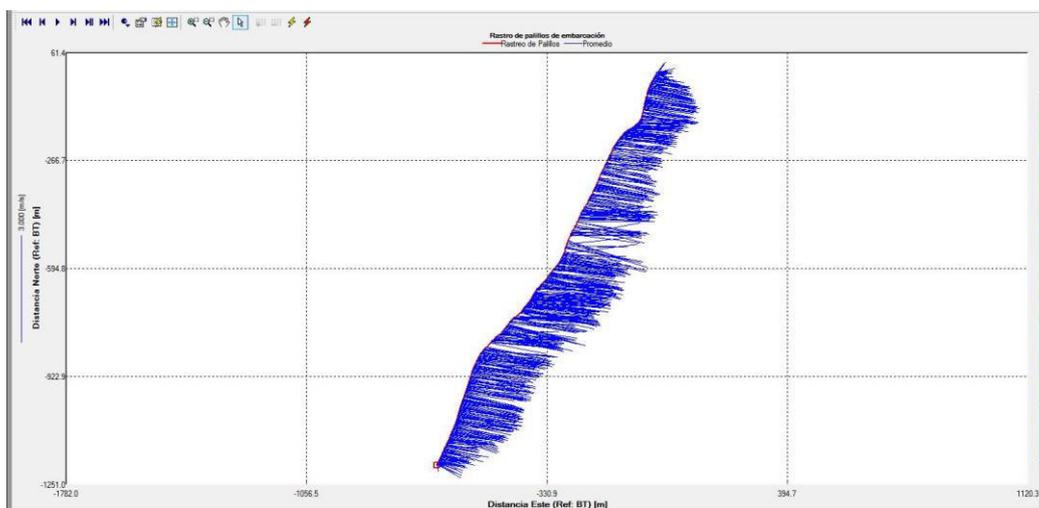


Figura 3.12. Líneas de corriente en la sección de aforo en la sección de aforo. Fuente: *Elaboración propia. Software WinRiver II, 2019.*

Tabla 3.12. *Resumen de la pasada 4.* Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Duración	641,88	[s]
Q Total	44,663,99	[m ³ /s]
Ancho	1,380,41	[m]
Área Total	30,840,02	[m ²]
Q/Área	1,448	[m/s]

3.3.6 Resumen de los aforos.

A continuación, se presenta una tabla en donde se resumen los resultados de la medición realizada.

Tabla 3.13. *Resumen de los aforos.* Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Transecto	Caudal total m ³ /s	Ancho m	Área total m ²	Velocidad media m/s	Acimut geográfico °	Declinación magnética °
Pasada 1	44.959,31	1.293,70	28.786,48	1,562	89,46	
Pasada 2	44.982,77	1.307,45	29.316,60	1,534	96,75	
Pasada 3	45.180,75	1.302,57	29.528,16	1,530	86,21	
Pasada 4	44.663,99	1.380,41	30.840,02	1,448	97,83	-7.88
Promedio	44.946,71	1.321,03	29.617,81	1,519		
Desviación estándar	213,05	39,99	872,48	0,049		
Std./ Avg.	0,00	0,03	0,03	0,03		

3.3.7 Análisis aplicado al transporte de sedimentos.

Como se logra observar en los métodos de transporte de sedimentos descritos en el Capítulo II, estos asumen una velocidad media representativa de toda la sección transversal, sin embargo, como sabemos esto puede ser válido para canales de ancho pequeño en donde el tirante siempre sea constante en la sección y en donde no haya interés de conocer una

medición que está compuesta por celdas, en este caso, para la Pasada 3, se logró calcular que el ancho de la sección transversal es de 1,302.57 m, partiendo desde el ensamble 4745 y terminando en el 5489. Si dividimos la sección en 10 partes iguales tendríamos aproximadamente 10 Zonas que miden 130.2 m cada una aproximadamente, tal y como se observa en la tabla siguiente.

Tabla 3.14. *Resumen de los resultados obtenidos para cada zona. Fuente: Elaboración propia, 2019.*

Zona	Velocidad media	Caudal	Ancho	Tirante medio
Zona 1	1.17	2252.30	129.73	14.80
Zona 2	1.29	3076.52	130.39	18.24
Zona 3	1.52	4358.22	129.72	22.10
Zona 4	1.83	5742.25	130.25	24.03
Zona 5	1.82	6380.32	130.29	26.90
Zona 6	1.81	6071.70	129.46	25.88
Zona 7	1.78	5631.26	130.88	24.14
Zona 8	1.76	5057.83	131.12	21.92
Zona 9	1.59	4546.07	130.91	21.81
Zona 10	1.05	2064.27	129.83	15.08

La velocidad media, el caudal y el ancho han sido calculado mediante la utilización del software, mientras que el tirante medio se ha calculado considerando que cada zona es representada por un canal rectangular.

3.4 Muestreo de Sedimentos de Fondo y de Suspensión.

Debido a que el río Amazonas presenta en este tramo de estudio un ancho superior a 1Km se decidió dividir la sección transversal de investigación en 10 zonas de muestreo, de tal manera que las muestras recolectadas sean más representativas a cada zona y ya no a toda la sección.

Se determinó que se debería de obtener una muestra de fondo en cada zona, mientras que dos muestras de suspensión por cada una también, a fin de poder determinar la curva de concentraciones en cada una de las zonas. Adicional a eso se extrajeron dos muestras en suspensión adicionales para la validación de la curva de concentraciones. Las ubicaciones de cada una de las muestras se observan en la figura 3.15.

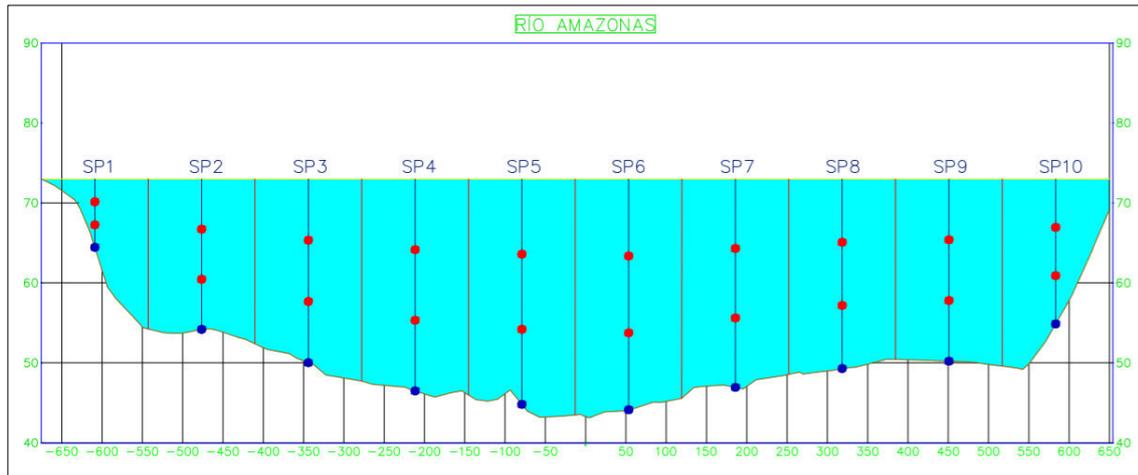


Figura 3.15. Ubicaciones de las muestras de sedimentos extraídas. Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la imagen anterior se observa la sección transversal en donde se está realizando la investigación, esta sección ha sido obtenida a partir de un levantamiento batimétrico monohaz. Como se logra observar la sección transversal ha sido dividida en 10 zonas, en donde se ha definido como punto de muestreo el centro de cada una de estas zonas. Además, se ha determinado la toma de muestras de suspensión en las siguientes profundidades, a 1/3 de profundidad (en donde se encuentra la velocidad máxima teórica) y a 2/3 de profundidad (en donde se encuentra la velocidad media teórica), estas están representadas en la figura mediante los círculos rojos, así como los círculos azules representan las ubicaciones de las tomas de muestra de fondo. Adicionalmente se han extraído dos muestras de sedimentos de suspensión de las verticales 2 y 4 con la finalidad de comprobar los perfiles de concentración obtenidos.

Las ubicaciones de cada una de las verticales de muestreo, se logran visualizar en la siguiente tabla:

Tabla 3.15. Ubicaciones de las verticales de muestreo.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Verticales de muestreo	Coordenadas en UTM	
	Este	Norte
SP-1	266,787.00	9'556,890.00
SP-2	266,777.00	9'556,757.00
SP-3	266,768.00	9'556,625.00
SP-4	266,758.00	9'556,492.00
SP-5	266,748.00	9'556,360.00
SP-6	266,739.00	9'556,227.00
SP-7	266,729.00	9'556,094.00
SP-8	266,719.00	9'555,962.00
SP-9	266,710.00	9'555,829.00
SP-10	266,700.00	9'555,696.00

A continuación, se muestran en la figura 3.16 las ubicaciones de cada una de las verticales de muestreo en una imagen satelital.



Figura 3.16. Ubicaciones de las verticales de muestreo. Fuente: *Elaboración propia. Software Sasplanet, 2019.*

3.4.1 Sedimentos en suspensión.

La recolección de las muestras de sedimentos en suspensión se realizó mediante la utilización de una botella Van Dorn en los 10 verticales anteriormente definidas, y en las 02 profundidades en cada vertical. Es necesario indicar que como mínimo se tiene que extraer 02 muestras por vertical, ya que las ecuaciones que describen el perfil de concentraciones se

calibra con estas dos, siendo ya no necesario el conocer el tamaño característico de los sedimentos en suspensión de lavado, que en la mayoría de veces es complicado determinar (siendo la utilización de estas muestras para la determinación de transporte de sedimentos de lavado).

La botella Van Dorn es un tubo con dos aberturas en los extremos, tal como se observa en la fotografía 3.4, la cual se sumerge a la profundidad requerida y esta profundidad es determinada por una driza graduada que va descendiendo en conjunto con la botella, una vez que la botella llega a su posición, se desliza un mensajero, usando como guía otra driza, el cual impacta en un botón que acciona el sistema de cierre automático de las dos aberturas. Finalmente, la botella se asciende hasta la cubierta, en donde se vierte su contenido en unos recipientes previamente rotulados con los datos necesarios para su identificación, estos son: ubicación, número de muestra, fecha de muestreo y nombre del río.



Fotografía 3.4. Botella Van Dorn. Fuente: Elaboración propia, 2019.

3.4.1.1 Resultados de los análisis.

Las muestras recolectadas se llevaron a analizar al laboratorio con el fin de obtener la concentración de sedimentos de lavado por cada muestra.

Tabla 3.16. Resultados de las concentraciones de las muestras extraídas. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Muestra	Concentración a 1/3 (ppm)	Concentración a 1/2 (ppm)	Concentración a 2/3 (ppm)
SP-1	290.36		350.70
SP-2	290.88	396.73	465.30
SP-3	321.76		554.50
SP-4	325.44	513.66	537.50
SP-5	354.47		639.40
SP-6	356.81		725.80
SP-7	365.74		519.50
SP-8	326.79		473.80
SP-9	305.16		553.10
SP-10	240.72		525.60

3.4.2 Sedimentos de fondo.

La recolección de las muestras de fondo se realizó mediante la utilización de una draga manual de arrastre con la cual se logró extraer 10 muestras de fondo, en donde se logró observar que los materiales que conforman el lecho del río son principalmente arenas y, limos y arcillas en ínfimas proporciones.

El muestreador de arrastre es un recipiente de forma hidrodinámica, el cual se sumerge hasta impactar en el fondo y mientras se va arrastrando recolecta muestras de los sedimentos, finalmente es levando hasta la cubierta de la embarcación, en donde se procede a colocar las muestras en recipientes previamente rotulados con información que permita su identificación.

A continuación, se muestra en la fotografía 3.5 el muestreador utilizado.



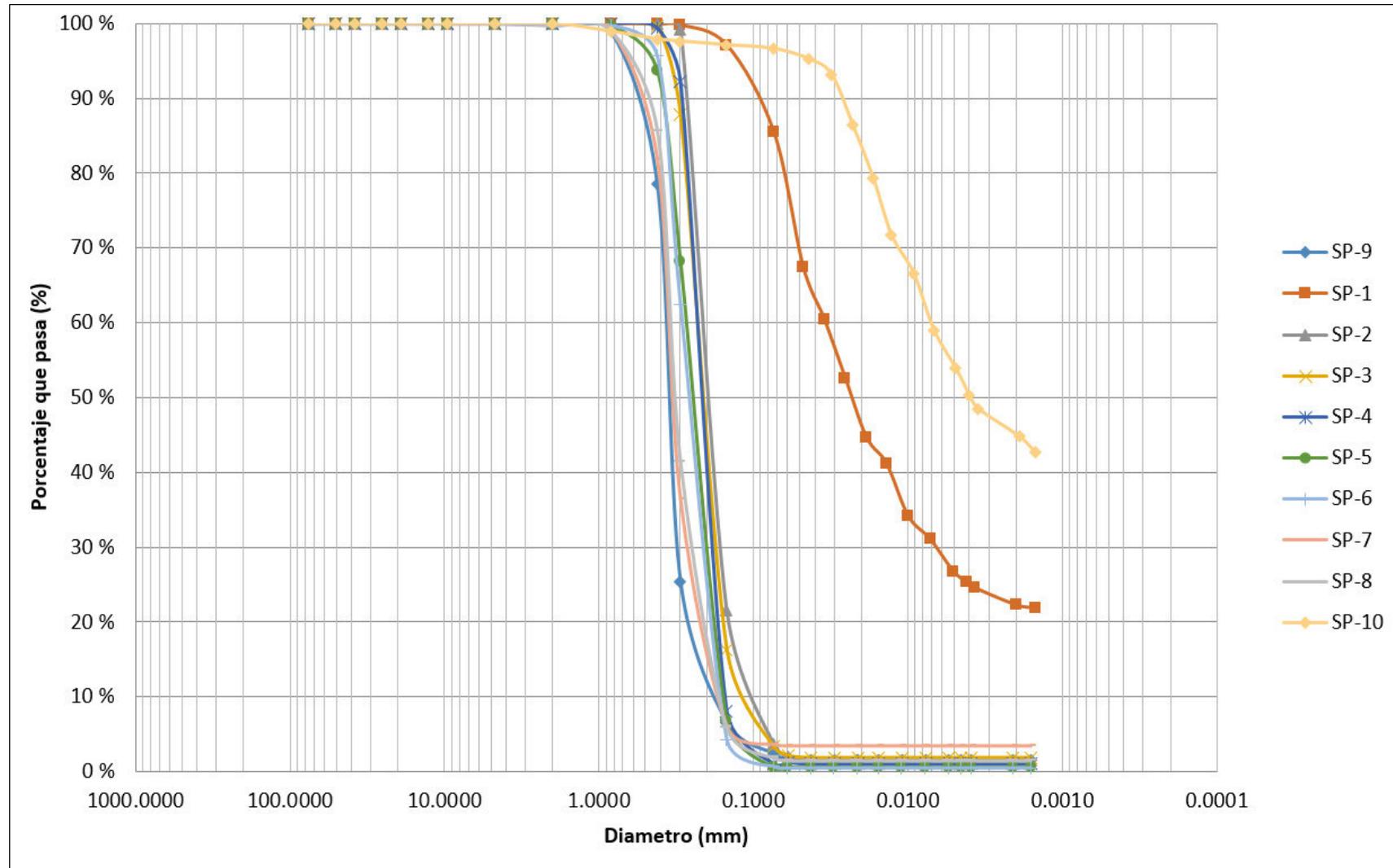
Fotografía 3.5. Draga manual de arrastre. Fuente: Elaboración propia, 2019.

3.4.2.1 Resultados de los análisis.

Las muestras recolectadas se llevaron a analizar al laboratorio con el fin de obtener las curvas granulométricas de cada una, y la gravedad específica.

De los resultados obtenidos se logra observar que la composición del fondo en la zona de investigación es principalmente de arenas hasta un 98 %, lo restante vendría a ser limos y arcillas.

A continuación, en la figura 3.17 se logran observar todas las curvas granulométricas de las muestras extraídas.



A continuación, se muestra en la tabla 3.17 algunos parámetros característicos de cada muestra recogida.

Tabla 3.17. *Características de las muestras de fondo.* Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Muestra	Gravedad específica	D(16) mm	D(35) mm	D(50) mm	D(65) mm	D(84) mm	D(90) mm
SP-1	2.654	-	0.011	0.024	0.042	0.070	0.095
SP-2	2.719	0.140	0.180	0.200	0.230	0.260	0.270
SP-3	2.706	0.155	0.185	0.220	0.250	0.280	0.305
SP-4	2.732	0.170	0.195	0.220	0.240	0.280	0.295
SP-5	2.705	0.180	0.220	0.250	0.290	0.360	0.390
SP-6	2.695	0.180	0.230	0.260	0.310	0.360	0.380
SP-7	2.665	0.200	0.300	0.340	0.370	0.440	0.510
SP-8	2.715	0.190	0.280	0.330	0.360	0.420	0.460
SP-9	2.715	0.240	0.320	0.350	0.380	0.470	0.520
SP-10	2.518	-	-	0.0038	0.0085	0.022	0.027

Capítulo 4

Análisis y Cálculos

Como ya se explicó en el capítulo anterior se realizará el análisis del transporte de sedimentos considerando que la sección transversal se encuentra dividida en 10 zonas o partes de igual ancho, siendo así que se realizará inicialmente la determinación de todas las características hidráulicas y geométricas necesarias de cada zona, así como también de las propiedades del agua y propiedades de las partículas.

Posteriormente se realizarán los cálculos utilizando cada uno de los métodos indicados en el capítulo II.

Es correcto indicar que el método a emplear para calcular el transporte de sedimentos de fondo, por arrastre y por suspensión es el que considera solo necesario conocer las características del material de fondo, y en función a esto el método nos permite determinar concentraciones teóricas de partículas de fondo en suspensión y de esta manera nos permite estimar el transporte de fondo en suspensión sin la necesidad de tener muestras recolectadas en campo de sólidos en suspensión con diámetros mayores a 0.074 mm (diámetro del tamiz #200), el cual es el que determina si el sólido en suspensión pertenece al fondo o es de lavado.

Para el caso de transporte de sedimentos de lavado, se utilizarán los métodos en donde nos permite conocer la distribución de concentraciones en una vertical mediante el conocimiento de dos concentraciones obtenidas de muestras de suspensión de partículas con diámetros menores a 0.074 recolectadas en campo, ya que por las mismas dimensiones diminutas de las partículas es difícil determinar un diámetro representativo de las mismas, los otros métodos a utilizar son el método de ajustes con información recolectada con el ADCP y el método de índice acústico.

4.1 Parámetros Necesarios

A continuación, en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se van a determinar cada uno de los parámetros necesarios para los cálculos del transporte de sedimentos.

Tabla 4.1. *Variables hidráulicas y geométricas.* Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9	Zona 10
Caudal (m ³ /s)	2,252.300	3,076.520	4,358.220	5,742.250	6,380.320	6,071.700	5,631.260	5,057.830	4,546.070	2,064.270
Área hidráulica (m ²)	1,925.043	2,384.899	2,867.250	3,137.842	3,505.670	3,354.530	3,163.629	2,873.767	2,859.164	1,965.971
Perímetro mojado (m)	239.619	136.778	143.120	137.756	152.961	136.880	142.915	135.474	132.831	295.625
Radio hidráulico (m)	8.034	17.436	20.034	22.778	22.919	24.507	22.136	21.213	21.525	6.650
Tirante (m)	14.800	18.240	22.100	24.030	26.900	25.880	24.140	21.920	21.810	15.080
Ancho medio (m)	129.730	130.390	129.720	130.250	130.290	129.460	130.880	131.120	130.910	129.830
Velocidad media (m/s)	1.170	1.290	1.520	1.830	1.820	1.810	1.780	1.760	1.590	1.050
Pendiente hidráulica (m/m)	0.0000326									

Tabla 4.2. *Propiedades del agua.* Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Temperatura (°C)	27.7
Densidad (kg/m ³)	996.31
Peso específico(kgf/m ³)	996.31
Viscosidad cinemática (m ² /s)	0.84457x10 ⁶

Tabla 4.3. *Propiedades de las partículas.* Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9	Zona 10
Gravedad específica	2.654	2.719	2.706	2.732	2.705	2.695	2.665	2.715	2.715	2.518
Densidad (Kg/m ³)	2,644.22	2,708.98	2,696.03	2,721.93	2,695.03	2,685.07	2,655.18	2,704.99	2,704.99	2,508.72
Peso específico (Kgf/m ³)	2,644.22	2,708.98	2,696.03	2,721.93	2,695.03	2,685.07	2,655.18	2,704.99	2,704.99	2,508.72
D16 (mm)	-	0.104	0.105	0.170	0.180	0.180	0.200	0.190	0.240	-
D35 (mm)	0.012	0.108	0.108	0.195	0.220	0.230	0.300	0.280	0.320	-
D50 (mm)	0.024	0.200	0.220	0.220	0.250	0.260	0.340	0.330	0.350	0.0038
D65 (mm)	0.045	0.230	0.250	0.240	0.290	0.310	0.370	0.360	0.380	0.0085
D84 (mm)	0.070	0.270	0.280	0.280	0.360	0.360	0.440	0.420	0.470	0.022
D90 (mm)	0.095	0.280	0.305	0.295	0.390	0.380	0.510	0.460	0.520	0.027
Concentración a 1/3 (Kgf/m ³)	0.290	0.291	0.322	0.325	0.354	0.357	0.366	0.327	0.305	0.241
a-1/3 (m)	10	12	15	16	18	17	16	15	15	10
Concentración a 1/2 (Kgf/m ³)		0.397		0.514						
a-1/2 (m)		9		12						
Concentración a 2/3 (Kgf/m ³)	0.351	0.465	0.555	0.538	0.639	0.726	0.520	0.474	0.553	0.526
a-2/3 (m)	5	6	7	8	9	9	8	7	7	5

4.2 Transporte de Sedimentos de Fondo por Arrastre y en Suspensión

4.2.1 Método de Einstein.

Para la aplicación del método de Einstein utilizaremos la metodología antes descrita en el ítem 2.8.1, para esto se dividirá la curva granulométrica en 10 partes, a fin de garantizar la representatividad de la muestra. Es decir, se realizarán 100 cálculos para esta sección transversal.

Los cálculos se inician al asumir un valor de R' menor que R , con lo cual se determinan las demás variables que intervienen para la estimación del factor de corrección x mediante la utilización de la figura 2.10, luego se procede a calcular la velocidad media mediante la utilización de la Ec. 2.22, este resultado es comparado con la velocidad media medida en campo, en caso de que sean diferentes se repite el procedimiento hasta que exista concordancia entre ambas. Luego con la ayuda de las Ec. 2.23 y Ec. 2.24. se calcula X , y posteriormente Y mediante la utilización de la figura 2.11.

Para el transporte de sedimentos por arrastre y en suspensión de fondo se dividió la curva granulométrica en 10 partes, tal y como se indicó líneas arriba, estas partes estarán representadas por los diámetros D_5 , D_{15} , D_{25} , D_{35} , D_{45} , D_{55} , D_{65} , D_{75} , D_{85} y D_{95} , tal y como se pueden observar en todas las tablas de desglose de cálculos de este método.

Para la estimación de transporte de fondo por arrastre se determinaron los factores de corrección ε y ϕ_* con la ayuda de las figuras 2.11 y 2.12 respectivamente tal y como se muestran en los cálculos de las tablas 4.4, 4.7, 4.10, 4.13, 4.16, 4.19, 4.22, 4.25, 4.28 y 4.31.

Para la estimación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión se determinaron los valores de las integrales I_1 e I_2 mediante la utilización de métodos numéricos, también es posible determinálas mediante el uso de las figuras 2.13 y 2.14, tal y como se observa

en el desglose de cálculos en las tablas 4.5, 4.6, 4.8, 4.9, 4.11, 4.12, 4.14, 4.15, 4.17, 4.18, 4.20, 4.21, 4.23, 4.24, 4.26, 4.27, 4.29 y 4.30.

A continuación, se mostrarán los desgloses de los cálculos anteriormente descritos para cada zona de análisis.

4.2.1.1 Zona 1.

En la zona 1 no es posible determinar las variables necesarias para utilizar el método de Einstein, debido a que no se puede determinar un valor de k/δ'_0 , el cual relaciona la rugosidad del fondo y la subcapa viscosa, este valor tiene que ser mayor a 0.32 como mínimo para poder determinar los factores de corrección x e Y

4.2.1.2 Zona 2.

Se asume	$R' =$	4.95	m
	$V'^* =$	0.0398	m/s
	$\delta'_0 =$	0.0002	m
	$\frac{D_{65}}{\delta'_0} =$	0.931	
Según la figura 2.10.	$x =$	1.61	
	$V =$	1.2901	m/s
	$R'' =$	12.486	m
	$\frac{D_{65}}{x\delta'_0} =$	0.5782	
	$X =$	0.000343	
Según la figura 2.11.	$Y =$	0.79	

Tabla 4.4. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Orden	Diámetro	π_i	D_i (m)	D_i/X	ε_i	ψ_{*i}	ϕ_{*i}	gBi (Kgf/s.m)
1	D ₅	0.1	0.000079	0.23	28.00	9.90	0.12	0.0001
2	D ₁₅	0.1	0.000130	0.38	9.00	5.23	0.66	0.0011
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.49	5.10	3.88	1.25	0.0031
4	D ₃₅	0.1	0.000180	0.52	4.40	3.54	1.50	0.0040
5	D ₄₅	0.1	0.000190	0.55	4.30	3.65	1.35	0.0039
6	D ₅₅	0.1	0.000200	0.58	3.65	3.27	1.80	0.0057
7	D ₆₅	0.1	0.000230	0.67	2.75	2.83	2.10	0.0081
8	D ₇₅	0.1	0.000250	0.73	2.45	2.74	2.25	0.0099
9	D ₈₅	0.1	0.000270	0.79	2.10	2.54	2.50	0.0123
10	D ₉₅	0.1	0.000280	0.82	1.90	2.38	2.60	0.0136

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (gBi) obtenemos que para la Zona 2 se transporta 0.06 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 8.06 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho

Tabla 4.5. *Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	Diámetro	p_i	D_i (m)	a_i (m)	A_i	F1	W_i (m/s)	z_i
1	D ₅	0.1	0.000079	0.000158	0.0000087	0.1804	0.0066	0.2205
2	D ₁₅	0.1	0.000130	0.000260	0.0000143	0.3336	0.0156	0.5229
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.000340	0.0000186	0.4315	0.0231	0.7735
4	D ₃₅	0.1	0.000180	0.000360	0.0000197	0.4522	0.0249	0.8341
5	D ₄₅	0.1	0.000190	0.000380	0.0000208	0.4715	0.0267	0.8935
6	D ₅₅	0.1	0.000200	0.000400	0.0000219	0.4895	0.0284	0.9517
7	D ₆₅	0.1	0.000230	0.000460	0.0000252	0.5361	0.0334	1.1177
8	D ₇₅	0.1	0.000250	0.000500	0.0000274	0.5620	0.0365	1.2216
9	D ₈₅	0.1	0.000270	0.000540	0.0000296	0.5844	0.0394	1.3202
10	D ₉₅	0.1	0.000280	0.000560	0.0000307	0.5945	0.0409	1.3678

Tabla 4.6. *Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

J1	J2	I1	I2	gBSi (Kgf/s.m)
1.0845	-1.5556	2,070.2464	-2,969.5485	2.6650
1.6367	-3.9884	72.5491	-176.7915	1.0051
3.3466	-13.2218	8.5178	-33.6522	0.2945
4.2639	-18.8574	5.5544	-24.5649	0.2405
5.5695	-27.3419	3.7897	-18.6046	0.1529
7.4488	-40.1821	2.7027	-14.5796	0.1496
19.8287	-132.5943	1.2317	-8.2362	0.0851
40.2993	-295.7473	0.8491	-6.2311	0.0658
83.1295	-650.0914	0.6367	-4.9792	0.0577
119.5345	-957.2337	0.5654	-4.5277	0.0549

Sumando los resultados del transporte por unidad de ancho de los sedimentos de fondo en suspensión (gBSi) obtenemos 4.77 kgf/s.m, y finalmente multiplicando por el ancho medio obtenemos 622.11 kgf/s de transporte para la zona 2.

4.2.1.3 Zona 3.

Se asume	$R' =$	6.66 m
	$V'^* =$	0.0462 m/s
	$\delta_o' =$	0.0002 m
	$\frac{D_{65}}{\delta_o'} =$	1.2
Según la figura 2.10.	$x =$	1.6
	$V =$	1.5203 m/s
	$R'' =$	13.374 m
	$\frac{D_{65}}{x \cdot \delta_o'} =$	0.7335
Según la figura 2.11.	$X =$	0.000296
	$Y =$	0.83

Tabla 4.7. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Orden	Diámetro	pi	Di (m)	Di/X	ε_i	ψ_{*i}	ϕ_{*i}	gBi (Kgf/s.m)
1	D ₅	0.1	0.000080	0.27	19.00	6.14	0.45	0.0004
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.51	4.80	2.91	1.90	0.0038
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.57	3.60	2.47	2.50	0.0061
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.62	3.30	2.47	2.50	0.0069
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.68	2.60	2.10	3.20	0.0100
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.74	2.30	2.04	3.20	0.0115
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.84	2.00	2.02	3.20	0.0140
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.88	1.80	1.89	3.40	0.0157
9	D ₈₅	0.1	0.000310	1.05	1.50	1.88	3.40	0.0205
10	D ₉₅	0.1	0.000340	1.15	1.30	1.79	3.60	0.0249

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (gBi) obtenemos que para la Zona 3 se transporta 0.11 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 14.76 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho

Tabla 4.8. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Orden	Diámetro	p_i	D_i (m)	a_i (m)	A_i	F1	w_i (m/s)	z_i
1	D ₅	0.1	0.000080	0.000160	0.0000072	0.1829	0.0067	0.2090
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.000300	0.0000136	0.3847	0.0193	0.6019
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.000340	0.0000154	0.4306	0.0230	0.7173
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.000370	0.0000167	0.4611	0.0257	0.8014
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.000400	0.0000181	0.4886	0.0283	0.8829
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.000440	0.0000199	0.5208	0.0316	0.9870
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.000500	0.0000226	0.5612	0.0363	1.1338
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.000520	0.0000235	0.5728	0.0378	1.1802
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.000620	0.0000281	0.6205	0.0447	1.3959
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.000680	0.0000308	0.6425	0.0485	1.5137

Tabla 4.9. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

J1	J2	I1	I2	gBSi (Kgf/s.m)
1.0755	-1.5138	2,703.5975	-3,805.3984	13.3102
1.9631	-5.5744	36.7176	-104.2630	1.7571
2.7501	-9.7957	13.6218	-48.5201	0.9747
3.7428	-15.6892	7.1800	-30.0975	0.5519
5.3350	-25.9404	4.1407	-20.1331	0.4302
9.1187	-52.4075	2.2661	-13.0237	0.2485
22.5441	-155.1884	1.1643	-8.0150	0.1362
30.9647	-222.5993	0.9799	-7.0443	0.1245
155.4200	-1,275.7840	0.5293	-4.3448	0.0765
399.6701	-3,411.5861	0.4154	-3.5457	0.0696

Sumando los resultados del transporte por unidad de ancho de los sedimentos de fondo en suspensión (gBSi) obtenemos 17.68 kgf/s.m, y finalmente multiplicando por el ancho medio obtenemos 2,293.39 kgf/s de transporte para la zona

4.2.1.4 Zona 4.

Se asume	$R' =$	9.16 m
	$V'^* =$	0.0541 m/s
	$\delta_o' =$	0.0002 m
	$\frac{D_{65}}{\delta_o'} =$	1.3
Según la figura 2.10.	$x =$	1.59
	$V =$	1.83 m/s
	$R'' =$	13.618 m
	$\frac{D_{65}}{x \cdot \delta_o'} =$	0.831
Según la figura 2.11.	$X =$	0.000253
	$Y =$	0.81

Tabla 4.10. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	Diámetro	pi	Di (m)	Di/X	ε_i	ψ_{*i}	ϕ_{*i}	gBi (Kgf/s.m)
1	D5	0.1	0.000140	0.55	4.10	1.82	3.80	0.0071
2	D15	0.1	0.000170	0.67	2.70	1.45	5.00	0.0124
3	D25	0.1	0.000180	0.71	2.50	1.43	5.50	0.0149
4	D35	0.1	0.000195	0.77	2.20	1.36	5.50	0.0168
5	D45	0.1	0.000210	0.83	2.00	1.33	6.00	0.0205
6	D55	0.1	0.000230	0.91	1.60	1.17	6.50	0.0254
7	D65	0.1	0.000240	0.95	1.50	1.14	7.00	0.0292
8	D75	0.1	0.000260	1.03	1.40	1.15	6.50	0.0306
9	D85	0.1	0.000280	1.11	1.15	1.02	7.50	0.0394
10	D95	0.1	0.000320	1.27	1.10	1.11	7.00	0.0450

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (gBi) obtenemos que para la Zona 4 se transporta 0.24 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 31.13 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho

Tabla 4.11. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	Diámetro	p_i	D_i (m)	a_i (m)	A_i	F_i	W_i (m/s)	z_i
1	D ₅	0.1	0.000140	0.000280	0.0000117	0.3612	0.0176	0.5161
2	D ₁₅	0.1	0.000170	0.000340	0.0000141	0.4324	0.0232	0.6807
3	D ₂₅	0.1	0.000180	0.000360	0.0000150	0.4531	0.0251	0.7340
4	D ₃₅	0.1	0.000195	0.000390	0.0000162	0.4815	0.0277	0.8119
5	D ₄₅	0.1	0.000210	0.000420	0.0000175	0.5070	0.0303	0.8871
6	D ₅₅	0.1	0.000230	0.000460	0.0000191	0.5369	0.0336	0.9831
7	D ₆₅	0.1	0.000240	0.000480	0.0000200	0.5503	0.0351	1.0292
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.000520	0.0000216	0.5743	0.0382	1.1181
9	D ₈₅	0.1	0.000280	0.000560	0.0000233	0.5952	0.0411	1.2026
10	D ₉₅	0.1	0.000320	0.000640	0.0000266	0.6295	0.0464	1.3596

Tabla 4.12. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

J1	J2	I1	I2	gBSi (Kgf/s.m)
1.6149	-3.8928	85.1473	-205.2497	7.8044
2.4478	-8.1241	18.6817	-62.0036	2.8037
2.9129	-10.7378	12.0790	-44.5265	2.1065
3.9105	-16.7541	6.7261	-28.8171	1.2550
5.4527	-26.7729	4.0582	-19.9258	0.8711
8.9538	-51.3273	2.3248	-13.3267	0.5710
11.6747	-71.3678	1.8377	-11.2340	0.4977
20.4247	-138.8016	1.2407	-8.4313	0.3259
36.4923	-268.0919	0.9083	-6.6729	0.2880
118.1341	-957.1340	0.5777	-4.6804	0.1892

Sumando los resultados del transporte por unidad de ancho de los sedimentos de fondo en suspensión (gBSi) obtenemos 16.71 kgf/s.m, y finalmente multiplicando por el ancho medio obtenemos 2,176.83 kgf/s de transporte para la zona 4.

4.2.1.5 Zona 5.

Se asume	$R' =$	9.35 m
	$V'^* =$	0.0547 m/s
	$\delta_o' =$	0.0002 m
	$\frac{D_{65}}{\delta_o'} =$	1.6
Según la figura 2.10.	$x =$	1.51
	$V =$	1.82 m/s
	$R'' =$	13.569 m
	$\frac{D_{65}}{x \cdot \delta_o'} =$	0.065
Según la figura 2.11.	$X =$	0.000250
	$Y =$	0.74

Tabla 4.13. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	Diámetro	ρ_i	D_i (m)	D_i/X	ε_i	ψ_{*i}	ϕ_{*i}	gBi (Kgf/s.m)
1	D ₅	0.1	0.000150	0.60	3.40	1.70	4.25	0.0086
2	D ₁₅	0.1	0.000170	0.68	2.52	1.43	5.50	0.0134
3	D ₂₅	0.1	0.000190	0.76	2.30	1.46	5.00	0.0144
4	D ₃₅	0.1	0.000220	0.88	1.75	1.29	5.80	0.0209
5	D ₄₅	0.1	0.000240	0.96	1.45	1.16	6.50	0.0266
6	D ₅₅	0.1	0.000270	1.08	1.30	1.17	6.50	0.0318
7	D ₆₅	0.1	0.000290	1.16	1.15	1.11	7.00	0.0381
8	D ₇₅	0.1	0.000330	1.32	1.10	1.21	6.50	0.0429
9	D ₈₅	0.1	0.000360	1.44	1.05	1.26	5.80	0.0437
10	D ₉₅	0.1	0.000410	1.64	1.00	1.37	5.50	0.0503

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (gBi) obtenemos que para la Zona 5 se transporta 0.29 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 37.89 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Tabla 4.14. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Orden	Diámetro	p_i	D_i (m)	a_i (m)	A_i	F_i	W_i (m/s)	z_i
1	D ₅	0.1	0.000150	0.000300	0.0000112	0.3846	0.0193	0.5625
2	D ₁₅	0.1	0.000170	0.000340	0.0000126	0.4305	0.0230	0.6704
3	D ₂₅	0.1	0.000190	0.000380	0.0000141	0.4706	0.0265	0.7746
4	D ₃₅	0.1	0.000220	0.000440	0.0000164	0.5208	0.0316	0.9225
5	D ₄₅	0.1	0.000240	0.000480	0.0000178	0.5486	0.0348	1.0150
6	D ₅₅	0.1	0.000270	0.000540	0.0000201	0.5837	0.0392	1.1453
7	D ₆₅	0.1	0.000290	0.000580	0.0000216	0.6033	0.0420	1.2269
8	D ₇₅	0.1	0.000330	0.000660	0.0000245	0.6356	0.0472	1.3788
9	D ₈₅	0.1	0.000360	0.000720	0.0000268	0.6550	0.0508	1.4842
10	D ₉₅	0.1	0.000410	0.000820	0.0000305	0.6808	0.0564	1.6462

Tabla 4.15. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.
Fuente: Elaboración propia, 2019.

J1	J2	I1	I2	gBSi (Kgf/s.m)
1.7861	-4.7092	56.6349	-149.3218	6.1543
2.3750	-7.7437	21.1231	-68.8722	3.4068
3.3836	-13.5596	9.0565	-36.2934	1.4713
6.5281	-34.2760	3.3143	-17.4020	0.6923
10.8594	-65.7185	1.9898	-12.0418	0.4883
24.9641	-176.0989	1.1195	-7.8970	0.2921
44.5469	-336.9957	0.8402	-6.3564	0.2465
142.6275	-1,178.4657	0.5523	-4.5632	0.1661
333.1540	-2,857.5083	0.4397	-3.7711	0.1284
1,275.7295	-11,331.6820	0.3325	-2.9538	0.1068

Sumando los resultados del transporte por unidad de ancho de los sedimentos de fondo en suspensión (gBSi) obtenemos 13.15 kgf/s.m, y finalmente multiplicando por el ancho medio obtenemos 1,713.68 kgf/s de transporte para la zona

4.2.1.6 Zona 6.

Se asume	$R' =$	9.37 m
	$V'^* =$	0.0547 m/s
	$\delta_o' =$	0.0002 m
	$\frac{D_{65}}{\delta_o'} =$	1.7
Según la figura 2.10.	$x =$	1.48
	$V =$	1.81 m/s
	$R'' =$	15.137 m
	$\frac{D_{85}}{x\delta_o'} =$	1.1663
Según la figura 2.11.	$X =$	0.000250
	$Y =$	0.675

Tabla 4.16. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	Diámetro	pi	Di (m)	Di/X	ε_i	ψ_{*i}	ϕ_{*i}	gBi (Kgf/s.m)
1	D ₅	0.1	0.000160	0.64	3.05	1.58	4.60	0.0102
2	D ₁₅	0.1	0.000180	0.72	2.50	1.46	4.90	0.0130
3	D ₂₅	0.1	0.000200	0.80	2.00	1.30	5.80	0.0180
4	D ₃₅	0.1	0.000230	0.92	1.70	1.27	5.80	0.0222
5	D ₄₅	0.1	0.000260	1.04	1.40	1.18	6.20	0.0285
6	D ₅₅	0.1	0.000270	1.08	1.30	1.14	6.60	0.0321
7	D ₆₅	0.1	0.000310	1.24	1.20	1.21	6.20	0.0371
8	D ₇₅	0.1	0.000340	1.36	1.10	1.21	6.20	0.0426
9	D ₈₅	0.1	0.000370	1.48	1.00	1.20	6.20	0.0483
10	D ₉₅	0.1	0.000400	1.60	1.00	1.30	5.80	0.0508

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (gBi) obtenemos que para la Zona 6 se transporta 0.30 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 39.16 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Tabla 4.17. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	Diámetro	p_i	D_i (m)	a_i (m)	A_i	F_i	W_i (m/s)	z_i
1	D ₅	0.1	0.000160	0.000320	0.0000124	0.4076	0.0210	0.5937
2	D ₁₅	0.1	0.000180	0.000360	0.0000139	0.4505	0.0246	0.6960
3	D ₂₅	0.1	0.000200	0.000400	0.0000155	0.4878	0.0281	0.7944
4	D ₃₅	0.1	0.000230	0.000460	0.0000178	0.5346	0.0331	0.9336
5	D ₄₅	0.1	0.000260	0.000520	0.0000201	0.5722	0.0376	1.0625
6	D ₅₅	0.1	0.000270	0.000540	0.0000209	0.5831	0.0391	1.1033
7	D ₆₅	0.1	0.000310	0.000620	0.0000240	0.6200	0.0445	1.2570
8	D ₇₅	0.1	0.000340	0.000680	0.0000263	0.6420	0.0483	1.3631
9	D ₈₅	0.1	0.000370	0.000740	0.0000286	0.6603	0.0518	1.4627
10	D ₉₅	0.1	0.000400	0.000800	0.0000309	0.6758	0.0551	1.5564

Tabla 4.18. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

J1	J2	I1	I2	gBSi (Kgf/s.m)
1.9240	-5.3843	41.0030	-114.7471	5.1561
2.5686	-8.7951	16.6095	-56.8723	2.5201
3.6471	-15.1347	7.6792	-31.8669	1.5152
6.8772	-36.5828	3.0726	-16.3444	0.6681
14.3439	-91.7088	1.5765	-10.0795	0.3922
18.5962	-124.6328	1.3193	-8.8423	0.3567
54.4246	-416.9720	0.7638	-5.8519	0.2115
122.0529	-992.0698	0.5724	-4.6524	0.1707
268.9349	-2,270.6027	0.4591	-3.8760	0.1484
575.8321	-4,983.2913	0.3850	-3.3320	0.1268

Sumando los resultados del transporte por unidad de ancho de los sedimentos de fondo en suspensión (gBSi) obtenemos 11.27 kgf/s.m, y finalmente multiplicando por el ancho medio obtenemos 1,458.46 kgf/s de transporte para la Zona 6

4.2.1.7 Zona 7.

Se asume	R' =	9.44 m
	V'^* =	0.0549 m/s
	δ_o' =	0.0002 m
	$\frac{D_{65}}{\delta_o'}$ =	2.1
Según la figura 2.10.	x =	1.35
	V =	1.78 m/s
	R'' =	12.696 m
	$\frac{D_{65}}{x \cdot \delta_o'}$ =	1.5375
Según la figura 2.11.	X =	0.000249
	Y =	0.59

Tabla 4.19. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	Diámetro	ρ_i	D_i (m)	D_i/X	ε_i	ψ_{*i}	ϕ_{*i}	gBi (Kgf/s.m)
1	D ₅	0.1	0.000150	0.60	3.40	1.78	3.60	0.0071
2	D ₁₅	0.1	0.000200	0.80	2.00	1.39	5.40	0.0164
3	D ₂₅	0.1	0.000250	1.01	1.40	1.22	6.20	0.0263
4	D ₃₅	0.1	0.000300	1.21	1.20	1.25	5.80	0.0323
5	D ₄₅	0.1	0.000330	1.33	1.05	1.21	6.00	0.0386
6	D ₅₅	0.1	0.000350	1.41	1.03	1.26	5.80	0.0408
7	D ₆₅	0.1	0.000370	1.49	1.00	1.29	5.80	0.0443
8	D ₇₅	0.1	0.000390	1.57	1.00	1.36	5.40	0.0446
9	D ₈₅	0.1	0.000450	1.81	1.00	1.57	4.50	0.0461
10	D ₉₅	0.1	0.000620	2.49	1.00	2.16	2.90	0.0480

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (gBi) obtenemos que para la Zona 7 se transporta 0.34 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 45.09 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Tabla 4.20. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Orden	Diámetro	p_i	D_i (m)	a_i (m)	A_i	F_i	w_i (m/s)	z_i
1	D ₅	0.1	0.000150	0.000300	0.0000124	0.3817	0.0189	0.5613
2	D ₁₅	0.1	0.000200	0.000400	0.0000166	0.4858	0.0278	0.8250
3	D ₂₅	0.1	0.000250	0.000500	0.0000207	0.5587	0.0357	1.0609
4	D ₃₅	0.1	0.000300	0.000600	0.0000249	0.6101	0.0427	1.2690
5	D ₄₅	0.1	0.000330	0.000660	0.0000273	0.6337	0.0465	1.3824
6	D ₅₅	0.1	0.000350	0.000700	0.0000290	0.6472	0.0489	1.4539
7	D ₆₅	0.1	0.000370	0.000740	0.0000307	0.6591	0.0512	1.5225
8	D ₇₅	0.1	0.000390	0.000780	0.0000323	0.6698	0.0535	1.5883
9	D ₈₅	0.1	0.000450	0.000900	0.0000373	0.6956	0.0596	1.7721
10	D ₉₅	0.1	0.000620	0.001240	0.0000514	0.7393	0.0744	2.2106

Tabla 4.21. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

J1	J2	I1	I2	gBSi (Kgf/s.m)
1.7805	-4.6773	54.5655	-143.3408	4.7112
4.1277	-18.1129	6.1231	-26.8688	1.0442
14.1424	-89.9795	1.5842	-10.0793	0.3512
59.0392	-454.5745	0.7365	-5.6704	0.1689
140.7895	-1,151.4322	0.5472	-4.4755	0.1397
248.1233	-2,084.0209	0.4673	-3.9245	0.1217
431.6264	-3,696.9778	0.4088	-3.5012	0.1128
740.1771	-6,434.4183	0.3646	-3.1694	0.0993
3,391.7401	-30,238.9130	0.2792	-2.4888	0.0756
128,546.9607	-1,163,509.0407	0.1782	-1.6134	0.0492

Sumando los resultados del transporte por unidad de ancho de los sedimentos de fondo en suspensión (gBSi) obtenemos 6.87 kgf/s.m, y finalmente multiplicando por el ancho medio obtenemos 899.64 kgf/s de transporte para la Zona

4.2.1.8 Zona 8.

Se asume	R'	=	9.21 m
	V'^*	=	0.0543 m/s
	δ_o'	=	0.0002 m
	$\frac{D_{65}}{\delta_o'}$	=	2.0
Según la figura 2.10.	x	=	1.36
	V	=	1.76 m/s
	R''	=	12.003 m
	$\frac{D_{85}}{x \cdot \delta_o'}$	=	1.4613
Según la figura 2.11.	X	=	0.000252
	Y	=	0.60

Tabla 4.22. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	Diámetro	ρ_i	D_i (m)	D_i/X	ε_i	ψ_{*i}	ϕ_{*i}	gBi (Kgf/s.m)
1	D ₅	0.1	0.000150	0.60	3.40	1.82	3.70	0.0075
2	D ₁₅	0.1	0.000180	0.71	2.50	1.61	4.50	0.0121
3	D ₂₅	0.1	0.000230	0.91	1.65	1.36	5.00	0.0194
4	D ₃₅	0.1	0.000280	1.11	1.30	1.30	5.80	0.0302
5	D ₄₅	0.1	0.000320	1.27	1.15	1.32	5.80	0.0368
6	D ₅₅	0.1	0.000340	1.35	1.10	1.34	5.80	0.0403
7	D ₆₅	0.1	0.000360	1.43	1.05	1.35	5.00	0.0379
8	D ₇₅	0.1	0.000380	1.51	1.00	1.36	5.00	0.0411
9	D ₈₅	0.1	0.000410	1.63	1.00	1.47	4.50	0.0414
10	D ₉₅	0.1	0.000560	2.22	1.00	2.00	3.30	0.0485

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (gBi) obtenemos que para la Zona 8 se transporta 0.31 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 41.33 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Tabla 4.23. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	Diámetro	p_i	D_i (m)	a_i (m)	A_i	F_i	W_i (m/s)	z_i
1	D ₅	0.1	0.000150	0.000300	0.0000137	0.3853	0.0194	0.5875
2	D ₁₅	0.1	0.000180	0.000360	0.0000164	0.4519	0.0249	0.7549
3	D ₂₅	0.1	0.000230	0.000460	0.0000210	0.5358	0.0333	1.0117
4	D ₃₅	0.1	0.000280	0.000560	0.0000255	0.5943	0.0408	1.2382
5	D ₄₅	0.1	0.000320	0.000640	0.0000292	0.6287	0.0461	1.4002
6	D ₅₅	0.1	0.000340	0.000680	0.0000310	0.6429	0.0486	1.4758
7	D ₆₅	0.1	0.000360	0.000720	0.0000328	0.6554	0.0510	1.5482
8	D ₇₅	0.1	0.000380	0.000760	0.0000347	0.6666	0.0533	1.6177
9	D ₈₅	0.1	0.000410	0.000820	0.0000374	0.6811	0.0566	1.7171
10	D ₉₅	0.1	0.000560	0.001120	0.0000511	0.7286	0.0707	2.1465

Tabla 4.24. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

J1	J2	I1	I2	gBSi (Kgf/s.m)
1.8937	-5.2274	41.5015	-114.5604	3.7479
3.1327	-11.9973	10.0711	-38.5691	1.3242
10.4597	-62.0851	1.9918	-11.8229	0.3391
46.4294	-348.1735	0.8081	-6.0603	0.1763
158.4887	-1,298.0306	0.5243	-4.2944	0.1264
288.9824	-2,430.4751	0.4469	-3.7584	0.1140
519.0249	-4,450.1079	0.3905	-3.3484	0.0912
910.2411	-7,911.3348	0.3456	-3.0035	0.0858
2,078.4288	-18,332.4864	0.3004	-2.6497	0.0736
72,550.3166	-653,779.1846	0.1882	-1.6964	0.0523

Sumando los resultados del transporte por unidad de ancho de los sedimentos de fondo en suspensión (gBSi) obtenemos 6.13 kgf/s.m, y finalmente multiplicando por el ancho medio obtenemos 803.88 kgf/s de transporte para la Zona 8

4.2.1.9 Zona 9.

Se asume	R' =	7.76 m
	V'^* =	0.0498 m/s
	δ_o' =	0.0002 m
	$\frac{D_{65}}{\delta_o'}$ =	1.9
Según la figura 2.10.	x =	1.39
	V =	1.59 m/s
	R'' =	13.765 m
	$\frac{D_{65}}{x \cdot \delta_o'}$ =	1.3853
	X =	0.000274
Según la figura 2.11.	Y =	0.63

Tabla 4.25. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	Diámetro	ρ_i	D_i (m)	D_i/X	ε_i	ψ_{*i}	ϕ_{*i}	gBi (Kgf/s.m)
1	D ₅	0.1	0.000140	0.51	4.65	2.75	1.95	0.0036
2	D ₁₅	0.1	0.000240	0.87	1.65	1.67	4.00	0.0165
3	D ₂₅	0.1	0.000300	1.09	1.30	1.65	4.60	0.0265
4	D ₃₅	0.1	0.000320	1.17	1.20	1.62	4.60	0.0292
5	D ₄₅	0.1	0.000340	1.24	1.15	1.65	4.00	0.0278
6	D ₅₅	0.1	0.000360	1.31	1.10	1.67	4.00	0.0303
7	D ₆₅	0.1	0.000380	1.39	1.05	1.69	4.00	0.0329
8	D ₇₅	0.1	0.000400	1.46	1.00	1.69	4.00	0.0355
9	D ₈₅	0.1	0.000470	1.71	1.00	1.99	3.20	0.0362
10	D ₉₅	0.1	0.000630	2.30	1.00	2.66	2.00	0.0351

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (gBi) obtenemos que para la Zona 9 se transporta 0.27 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 35.82 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Tabla 4.26. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	Diámetro	p_i	D_i (m)	a_i (m)	A_i	F_i	W_i (m/s)	z_i
1	D ₅	0.1	0.000140	0.000280	0.0000128	0.3600	0.0175	0.5265
2	D ₁₅	0.1	0.000240	0.000480	0.0000220	0.5492	0.0349	1.0516
3	D ₂₅	0.1	0.000300	0.000600	0.0000275	0.6126	0.0435	1.3115
4	D ₃₅	0.1	0.000320	0.000640	0.0000293	0.6287	0.0461	1.3900
5	D ₄₅	0.1	0.000340	0.000680	0.0000312	0.6429	0.0486	1.4651
6	D ₅₅	0.1	0.000360	0.000720	0.0000330	0.6554	0.0510	1.5370
7	D ₆₅	0.1	0.000380	0.000760	0.0000348	0.6666	0.0533	1.6060
8	D ₇₅	0.1	0.000400	0.000800	0.0000367	0.6765	0.0555	1.6723
9	D ₈₅	0.1	0.000470	0.000940	0.0000431	0.7042	0.0626	1.8869
10	D ₉₅	0.1	0.000630	0.001260	0.0000578	0.7421	0.0764	2.3021

Tabla 4.27. Cálculos del transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

J1	J2	I1	I2	gBSi (Kgf/s.m)
1.6496	-4.0519	73.7764	-181.2168	3.2367
13.2347	-82.6976	1.6434	-10.2687	0.2291
79.6004	-624.2028	0.6529	-5.1195	0.1187
145.6274	-1,186.1591	0.5369	-4.3734	0.1028
263.3724	-2,204.0311	0.4564	-3.8191	0.0804
470.0463	-4,012.8192	0.3984	-3.4010	0.0744
825.2149	-7,148.7653	0.3546	-3.0721	0.0704
1,420.6813	-12,437.1494	0.3198	-2.7996	0.0675
8,381.1238	-74,856.9178	0.2433	-2.1732	0.0508
253,230.2194	-2,276,942.0860	0.1657	-1.4900	0.0332

Sumando los resultados del transporte por unidad de ancho de los sedimentos de fondo en suspensión (gBSi) obtenemos 4.06 kgf/s.m, y finalmente multiplicando por el ancho medio obtenemos 531.99 kgf/s de transporte para la Zona 9.

4.2.1.10 Zona 10.

En la Zona 10 no es posible determinar las variables necesarias para utilizar el método de Einstein, debido a que no se puede determinar un valor de k/δ'_0 , el cual relaciona la rugosidad del fondo y la subcapa viscosa, este valor tiene que ser mayor a 0.32 como mínimo para poder determinar los factores de corrección x e Y .

4.2.1.11 Resumen de resultados.

A continuación, se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos y se calcula el total de sedimentos que transporta en la sección transversal de estudio.

Tabla 4.28. *Resumen de los resultados.* Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Zonas	GB (Kgf/s)	GBS (Kgf/s)
Zona 1	0.0000	0.00
Zona 2	8.0611	622.11
Zona 3	14.7604	2,293.39
Zona 4	31.4276	2,176.83
Zona 5	37.8884	1,713.68
Zona 6	39.1626	1,458.46
Zona 7	45.0934	899.64
Zona 8	41.3340	803.88
Zona 9	35.8173	531.99
Zona 10	0.0000	0.00
Total	253.5447	10,499.98

De la tabla anterior se concluye que en la sección transversal de estudio en el río Amazonas se transporta 253.54 kgf/s de sedimentos como concepto de transporte de fondo por arrastre, mientras que 10,499.98 kgf/s de sedimentos por concepto de transporte de sedimentos de fondo en suspensión.

4.2.2 Método de Bagnold.

El método de Bagnold es complicado de aplicar para la sección de análisis, ya que la gráfica que permite la determinación del valor de $\tan \alpha$ presenta como diámetro mínimo a evaluar a 0.3 mm, sin embargo en nuestra distribución fraccionada de las muestras

tenemos diámetros menores a lo indicado, por lo que sólo se aplicará el método a las secciones y fracciones con diámetros representativos (D_i) mayores al indicado, generando una pobre representación del valor real del transporte de sedimentos.

Para la determinación del transporte de sedimentos de fondo utilizamos la metodología descrita en el ítem 2.8.2, en donde se inicia la estimación con el cálculo del esfuerzo cortante de fondo mediante la utilización de la Ec. 2.31.

Para el transporte de fondo por arrastre se utilizó la Ec. 2.30, en donde se determinaron el ángulo promedio de choque de las partículas y el factor de eficiencia de arrastre de fondo mediante la aplicación de las figuras de 2.16 y 2.15 respectivamente. El disgregado de los cálculos se podrá apreciar en las tablas 4.29, 4.31, 4.33, 4.35, 4.37, 4.39 y 4.41.

Para la estimación del transporte de sedimentos de fondo en suspensión se utilizó la Ec. 2.32, la cual considera la velocidad de caída equivalente obtenida mediante la ecuación 2.34, el disgregado de los se podrán apreciar en las tablas 4.30, 4.32, 4.34, 4.36, 4.38, 4.40 y 4.42.

4.2.2.1 Zona 1.

En la Zona 1 no es posible determinar las variables necesarias para utilizar el método de Bagnold, debido a que los diámetros representativos de cada fracción son menores 0.3 mm.

4.2.2.2 Zona 2.

En la Zona 2 no es posible determinar las variables necesarias para utilizar el método de Bagnold, debido a que los diámetros representativos de cada fracción son menores 0.3 mm.

4.2.2.3 Zona 3.

Se calcula $\tau_o = 0.651 \text{ Kgf/m}^2$

A continuación, en la tabla 4.29 se muestra el disgregado de los cálculos realizados para la estimación del transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.29. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	π_i	D_i (m)	e_{b_i}	τ_*	$\tan \alpha$	gBi (Kgf/s.m)	
1	D ₅	0.1	0.000080	0.000	4.785	0.000	0.0000
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.000	2.552	0.000	0.0000
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.000	2.252	0.000	0.0000
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.000	2.069	0.000	0.0000
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.000	1.914	0.000	0.0000
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.000	1.740	0.000	0.0000
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.000	1.531	0.000	0.0000
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.000	1.472	0.000	0.0000
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.125	1.235	0.748	0.2820
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.125	1.126	0.745	0.2831

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (gBi) obtenemos que para la Zona 3 se transporta 0.57 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 73.30 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho, en donde en la siguiente tabla se podrá observar el desglose del cálculo de la velocidad de caída equivalente.

Tabla 4.30. Determinación de la velocidad de caída equivalente.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	π_i	D_i (m)	F_i	w_i (m/s)	
1	D ₅	0.1	0.000080	0.1829	0.0067
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.3847	0.0193
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.4306	0.0230
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.4611	0.0257
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.4886	0.0283
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.5208	0.0316
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.5612	0.0363
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.5728	0.0378
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.6205	0.0447
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.6425	0.0485

De la tabla anterior, la velocidad de caída equivalente (w_e) vendría a ser la sumatoria de las velocidades de caída correspondiente a cada diámetro representativo de cada fracción de la curva granulométrica (w_i), siendo el resultado 0.0302 m/s.

Finalmente, el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho (g_{BS}) se vendría a calcular con la utilización de la Ec. 2.32, lo cual resulta 0.85 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho promedio de la zona 3 se estimaría el transporte de sedimentos de fondo total (GBS), el cual resulta 110.27 kgf/s.

4.2.2.4 Zona 4.

Se calcula $\tau_o = 0.740 \text{ Kgf/m}^2$

A continuación, en la tabla 4.31 se muestra el desgredado de los cálculos realizados para la estimación del transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.31. *Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	pi	Di (m)	e_{bi}	τ_*	$\tan \alpha$	gBi (Kgf/s.m)
1	D ₅	0.1	0.000080	0.000	4.785	0.000
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.000	2.552	0.000
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.000	2.252	0.000
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.000	2.069	0.000
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.000	1.914	0.000
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.000	1.740	0.000
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.000	1.531	0.000
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.000	1.472	0.000
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.125	1.235	0.748
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.125	1.126	0.745

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (gBi) obtenemos que para la Zona 4 se transporta 0.39 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 51.18 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho, en donde en la siguiente tabla se podrá observar el desgredado del cálculo de la velocidad de caída equivalente.

Tabla 4.32. *Determinación de la velocidad de caída equivalente.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden		pi	Di (m)	Fi	wi (m/s)
1	D ₅	0.1	0.000080	0.1829	0.0067
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.3847	0.0193
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.4306	0.0230
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.4611	0.0257
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.4886	0.0283
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.5208	0.0316
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.5612	0.0363
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.5728	0.0378
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.6205	0.0447
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.6425	0.0485

De la tabla anterior, la velocidad de caída equivalente (w_e) vendría a ser la sumatoria de las velocidades de caída correspondiente a cada diámetro representativo de cada fracción de la curva granulométrica (w_i), siendo el resultado 0.0318 m/s.

Finalmente, el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho (g_{BS}) se vendría a calcular con la utilización de la Ec. 2.32, lo cual resulta 1.35 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho promedio de la Zona 4 se estimaría el transporte de sedimentos de fondo total (GBS), el cual resulta 176.62 kgf/s.

4.2.2.5 Zona 5.

Se calcula $\tau_o = 0.744 \text{ Kgf/m}^2$

A continuación, en la tabla 4.33 se muestra el disgregado de los cálculos realizados para la estimación del transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.33. *Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden		pi	Di (m)	e_{bi}	τ_*	$\tan \alpha$	gBi (Kgf/s.m)
1	D ₅	0.1	0.000080	0.000	4.785	0.000	0.0000
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.000	2.552	0.000	0.0000
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.000	2.252	0.000	0.0000
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.000	2.069	0.000	0.0000
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.000	1.914	0.000	0.0000
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.000	1.740	0.000	0.0000
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.000	1.531	0.000	0.0000
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.000	1.472	0.000	0.0000
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.125	1.235	0.748	0.2820
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.125	1.126	0.745	0.2831

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (g_{Bi}) obtenemos que para la Zona 5 se transporta 1.56 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 203.57 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho, en donde en la siguiente tabla se podrá observar el desglose del cálculo de la velocidad de caída equivalente.

Tabla 4.34. *Determinación de la velocidad de caída equivalente.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	p_i	D_i (m)	F_i	w_i (m/s)	
1	D ₅	0.1	0.000080	0.1829	0.0067
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.3847	0.0193
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.4306	0.0230
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.4611	0.0257
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.4886	0.0283
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.5208	0.0316
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.5612	0.0363
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.5728	0.0378
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.6205	0.0447
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.6425	0.0485

De la tabla anterior, la velocidad de caída equivalente (w_e) vendría a ser la sumatoria de las velocidades de caída correspondiente a cada diámetro representativo de cada fracción de la curva granulométrica (w_i), siendo el resultado 0.0371 m/s.

Finalmente, el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho (g_{BS}) se vendría a calcular con la utilización de la Ec. 2.32, lo cual resulta 1.66 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho promedio de la Zona 5 se estimaría el transporte de sedimentos de fondo total (GBS), el cual resulta 214.28 kgf/s.

4.2.2.6 Zona 6.

Se calcula $\tau_o = 0.796 \text{ Kgf/m}^2$

A continuación, en la tabla 4.35 se muestra el desgredado de los cálculos realizados para la estimación del transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.35. *Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden		pi	Di (m)	e_{bi}	τ_*	$\tan \alpha$	gBi (Kgf/s.m)
1	D ₅	0.1	0.000080	0.000	4.785	0.000	0.0000
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.000	2.552	0.000	0.0000
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.000	2.252	0.000	0.0000
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.000	2.069	0.000	0.0000
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.000	1.914	0.000	0.0000
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.000	1.740	0.000	0.0000
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.000	1.531	0.000	0.0000
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.000	1.472	0.000	0.0000
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.125	1.235	0.748	0.2820
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.125	1.126	0.745	0.2831

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (gBi) obtenemos que para la Zona 6 se transporta 1.66 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 214.28 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho, en donde en la siguiente tabla se podrá observar el desgredado del cálculo de la velocidad de caída equivalente.

Tabla 4.36. *Determinación de la velocidad de caída equivalente.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden		pi	Di (m)	Fi	w_i (m/s)
1	D ₅	0.1	0.000080	0.1829	0.0067
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.3847	0.0193
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.4306	0.0230
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.4611	0.0257
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.4886	0.0283
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.5208	0.0316
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.5612	0.0363
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.5728	0.0378
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.6205	0.0447
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.6425	0.0485

De la tabla anterior, la velocidad de caída equivalente (w_e) vendría a ser la sumatoria de las velocidades de caída correspondiente a cada diámetro representativo de cada fracción de la curva granulométrica (w_i), siendo el resultado 0.0383 m/s.

Finalmente, el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho (g_{BS}) se vendría a calcular con la utilización de la Ec. 2.32, lo cual resulta 1.15 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho promedio de la Zona 6 se estimaría el transporte de sedimentos de fondo total (GBS), el cual resulta 149.31 kgf/s.

4.2.2.7 Zona 7.

Se calcula $\tau_o = 0.719 \text{ Kgf/m}^2$

A continuación, en la tabla 4.37 se muestra el disgregado de los cálculos realizados para la estimación del transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.37. Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden		p_i	D_i (m)	e_{b_i}	τ_*	$\tan \alpha$	g_{Bi} (Kgf/s.m)
1	D ₅	0.1	0.000080	0.000	4.785	0.000	0.0000
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.000	2.552	0.000	0.0000
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.000	2.252	0.000	0.0000
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.000	2.069	0.000	0.0000
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.000	1.914	0.000	0.0000
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.000	1.740	0.000	0.0000
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.000	1.531	0.000	0.0000
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.000	1.472	0.000	0.0000
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.125	1.235	0.748	0.2820
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.125	1.126	0.745	0.2831

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (g_{Bi}) obtenemos que para la Zona 7 se transporta 2.57 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 336.09 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho, en donde en la siguiente tabla se podrá observar el disgregado del cálculo de la velocidad de caída equivalente.

Tabla 4.38. *Determinación de la velocidad de caída equivalente.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden		pi	Di (m)	Fi	wi (m/s)
1	D ₅	0.1	0.000080	0.1829	0.0067
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.3847	0.0193
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.4306	0.0230
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.4611	0.0257
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.4886	0.0283
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.5208	0.0316
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.5612	0.0363
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.5728	0.0378
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.6205	0.0447
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.6425	0.0485

De la tabla anterior, la velocidad de caída equivalente (w_e) vendría a ser la sumatoria de las velocidades de caída correspondiente a cada diámetro representativo de cada fracción de la curva granulométrica (w_i), siendo el resultado 0.0459 m/s.

Finalmente, el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho (g_{BS}) se vendría a calcular con la utilización de la Ec. 2.32, lo cual resulta 0.83 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho promedio de la Zona 7 se estimaría el transporte de sedimentos de fondo total (GBS), el cual resulta 108.09 kgf/s.

4.2.2.8 Zona 8.

Se calcula $\tau_o = 0.689 \text{ Kgf/m}^2$

A continuación, en la tabla 4.39 se muestra el disgregado de los cálculos realizados para la estimación del transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.39. *Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden		pi	Di (m)	e_{bi}	τ_*	$\tan \alpha$	gBi (Kgf/s.m)
1	D ₅	0.1	0.000080	0.000	4.785	0.000	0.0000
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.000	2.552	0.000	0.0000
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.000	2.252	0.000	0.0000
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.000	2.069	0.000	0.0000
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.000	1.914	0.000	0.0000
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.000	1.740	0.000	0.0000
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.000	1.531	0.000	0.0000
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.000	1.472	0.000	0.0000
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.125	1.235	0.748	0.2820
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.125	1.126	0.745	0.2831

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (g_{Bi}) obtenemos que para la Zona 8 se transporta 2.13 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 279.81 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho, en donde en la siguiente tabla se podrá observar el desglose del cálculo de la velocidad de caída equivalente.

Tabla 4.40. *Determinación de la velocidad de caída equivalente.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden	p_i	D_i (m)	F_i	w_i (m/s)
1	D ₅	0.1	0.000080	0.1829
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.3847
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.4306
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.4611
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.4886
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.5208
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.5612
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.5728
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.6205
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.6425

De la tabla anterior, la velocidad de caída equivalente (w_e) vendría a ser la sumatoria de las velocidades de caída correspondiente a cada diámetro representativo de cada fracción de la curva granulométrica (w_i), siendo el resultado 0.0445 m/s.

Finalmente, el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho (g_{BS}) se vendría a calcular con la utilización de la Ec. 2.32, lo cual resulta 0.82 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho promedio de la Zona 8 se estimaría el transporte de sedimentos de fondo total (GBS), el cual resulta 107.92 kgf/s.

4.2.2.9 Zona 9.

Se calcula $\tau_o = 0.699 \text{ Kgf/m}^2$

A continuación, en la tabla 4.41 se muestra el desgredado de los cálculos realizados para la estimación del transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.41. *Cálculos del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden		pi	Di (m)	e_{bi}	τ_*	$\tan \alpha$	gBi (Kgf/s.m)
1	D ₅	0.1	0.000080	0.000	4.785	0.000	0.0000
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.000	2.552	0.000	0.0000
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.000	2.252	0.000	0.0000
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.000	2.069	0.000	0.0000
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.000	1.914	0.000	0.0000
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.000	1.740	0.000	0.0000
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.000	1.531	0.000	0.0000
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.000	1.472	0.000	0.0000
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.125	1.235	0.748	0.2820
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.125	1.126	0.745	0.2831

Sumando los resultados del transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho (gBi) obtenemos que para la Zona 9 se transporta 2.62 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho medio de esta zona obtendríamos finalmente un transporte de 342.55 kgf/s.

A continuación, se presentan los cálculos para el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho, en donde en la siguiente tabla se podrá observar el desgredado del cálculo de la velocidad de caída equivalente.

Tabla 4.42. *Determinación de la velocidad de caída equivalente.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden		pi	Di (m)	Fi	w_i (m/s)
1	D ₅	0.1	0.000080	0.1829	0.0067
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.3847	0.0193
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.4306	0.0230
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.4611	0.0257
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.4886	0.0283
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.5208	0.0316
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.5612	0.0363
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.5728	0.0378
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.6205	0.0447
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.6425	0.0485

De la tabla anterior, la velocidad de caída equivalente (w_e) vendría a ser la sumatoria de las velocidades de caída correspondiente a cada diámetro representativo de cada fracción de la curva granulométrica (w_i), siendo el resultado 0.0489 m/s.

Finalmente, el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho (g_{BS}) se vendría a calcular con la utilización de la Ec. 2.32, lo cual resulta 0.62 kgf/s.m, ahora multiplicando por el ancho promedio de la Zona 9 se estimaría el transporte de sedimentos de fondo total (GBS), el cual resulta 81.07 kgf/s.

4.2.2.10 Zona 10.

En la Zona 10 no es posible determinar las variables necesarias para utilizar el método de Bagnold, debido a que los diámetros representativos de cada fracción son menores 0.3 mm.

4.2.2.11 Resumen de resultados.

A continuación, se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos y se calcula el total de sedimentos que transporta en la sección transversal de estudio.

Tabla 4.43. *Resumen de los resultados.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Zonas	GB (Kgf/s)	GBS (Kgf/s)
Zona 1	0.00	0.00
Zona 2	0.00	0.00
Zona3	73.30	110.27
Zona 4	51.18	175.62
Zona 5	203.57	147.74
Zona 6	214.28	149.31
Zona 7	336.09	108.09
Zona 8	279.81	107.92
Zona 9	342.55	81.07
Zona 10	0.00	0.00
Total	1,500.79	880.01

De la tabla anterior se concluye que en la sección transversal de estudio en el río Amazonas se transporta 1,500.79 Kgf/s de sedimentos como concepto de transporte de

fondo por arrastre, mientras que 880.01 Kg/s de sedimentos por concepto de transporte de sedimentos de fondo en suspensión.

4.2.3 Método de Tofaletti.

Para la determinación del transporte de fondo por arrastre y en suspensión se utilizará la metodología descrita en el ítem 2.8.4, para lo cual se han fraccionado las curvas granulométricas en 10 partes a fin de obtener una mayor representatividad. Tofaletti logró dividir el transporte de sedimentos de fondo en 4 capas, de las cuales el transporte de sedimentos de fondo por arrastre por unidad de ancho vendría a estar representado por g_{Bi} y el transporte de sedimentos de fondo en suspensión por unidad de ancho vendría a estar representado por la suma de g_{b_i} , g_{c_i} y g_{u_i} .

La estimación inicia con el cálculo del esfuerzo cortante de fondo, para posteriormente realizar los cálculos de y_e , y_m , n_v y T_Z mediante la utilización de las Ec. 2.66, Ec. 2.67, Ec. 2.60 y Ec. 2.62 respectivamente. Posteriormente se procede a determinar las demás variables y los exponentes e_{1_i} , e_{2_i} y e_{3_i} para cada diámetro representativo mediante la aplicación de las Ec. 2.57, Ec. 2.58 y Ec. 2.59 respectivamente como se logra observar en las tablas 4.44, 4.46, 4.48, 4.50, 4.52, 4.54, 4.56 y 4.58.

Posteriormente en las tablas 4.45, 4.47, 4.49, 4.51, 4.53, 4.55, 4.57 y 4.59 se proceden a determinar g_{Bi} , g_{b_i} , g_{c_i} y g_{u_i} mediante la aplicación de las Ec. 2.48, Ec. 2.69, Ec. 2.70 y Ec. 2.71.

Finalmente se procede a calcular el transporte de fondo por arrastre y en suspensión.

A continuación, se muestra el desglose de los cálculos realizados por cada zona.

4.2.3.1 Zona 1.

En la Zona 1 no es posible utilizar el método de Tofaletti debido a que el parámetro adimensional v_1 es mayor a 7,000, lo que impide utilizar la figura para determinar v_3 .

4.2.3.2 Zona 2.

$$\begin{aligned}
 \text{Se calculan } \tau_o &= 0.5663 \text{ Kgf/m}^2 \\
 y_e &= 1.5513 \text{ m} \\
 &= 6.9745 \text{ m} \\
 \frac{y_m}{u_v} &= 0.1591 \\
 T_z &= 206.0694
 \end{aligned}$$

En la tabla siguiente se muestran las determinaciones de las velocidades de caída de las partículas para cada fracción y de los exponentes.

Tabla 4.44. *Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	y_{Bi}	F_{1i}	W_i	Z_i	e_{1i}	e_{2i}	e_{3i}	
		m	m		m/s					
1	D5	0.1	0.000079	0.0002	0.1804	0.0066	0.2379	0.8022	0.9212	0.9792
2	D15	0.1	0.000130	0.0003	0.3336	0.0156	0.5643	0.3126	0.5948	0.7325
3	D25	0.1	0.000170	0.0003	0.4315	0.0231	0.8348	-0.0931	0.3243	0.5280
4	D35	0.1	0.000180	0.0004	0.4522	0.0249	0.9002	-0.1912	0.2589	0.4785
5	D45	0.1	0.000190	0.0004	0.4715	0.0267	0.9643	-0.2874	0.1947	0.4300
6	D55	0.1	0.000200	0.0004	0.4895	0.0284	1.0271	-0.3815	0.1320	0.3826
7	D65	0.1	0.000230	0.0005	0.5361	0.0334	1.2063	-0.6503	-0.0472	0.2472
8	D75	0.1	0.000250	0.0005	0.5620	0.0365	1.3184	-0.8184	-0.1593	0.1624
9	D85	0.1	0.000270	0.0005	0.5844	0.0394	1.4249	-0.9782	-0.2658	0.0819
10	D95	0.1	0.000280	0.0006	0.5945	0.0409	1.4761	-1.0551	-0.3170	0.0431

Luego se procede a determinar las siguientes variables.

$$\begin{aligned}
 \text{Se calcula } v_1 &= 4756.4451 \\
 v_2 &= 7.9 \times 10^9 \\
 \text{Aplicando la figura 2.23 } v_3 &= 32.30 \\
 \text{Se calcula } V'_* &= 0.0399 \text{ m/s} \\
 e_o &= 0.0018 \\
 \text{Según la figura 2.22 } K_T &= 1.00 \quad \text{Debido a que } e_o \text{ es menor que } 0.2 \\
 \text{Se calcula } e_1 &= 0.7392 \\
 \text{Según la figura 2.22 } A &= 50.00 \\
 \text{Se calcula } AK_T &= 50.00 \quad \text{Tiene que ser mayor que } 16 \\
 T_T &= 0.0642
 \end{aligned}$$

Finalmente se procede con la determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} en la siguiente tabla.

Tabla 4.45. *Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} .*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	g_{bi}	M_i	g_{ci}	g_{ui}	g_{Bi}	
			Kgf/s.m		Kgf/s.m	Kgf/s.m	Kgf/s.m	
1	D5	0.1	0.000079	0.1388	0.0884	0.4416	0.7345	0.0001
2	D15	0.1	0.000130	0.0605	0.0322	0.1079	0.1152	0.0002
3	D25	0.1	0.000170	0.0387	0.0164	0.0400	0.0296	0.0005
4	D35	0.1	0.000180	0.0352	0.0139	0.0315	0.0213	0.0006
5	D45	0.1	0.000190	0.0321	0.0118	0.0248	0.0154	0.0007
6	D55	0.1	0.000200	0.0295	0.0100	0.0196	0.0111	0.0008
7	D65	0.1	0.000230	0.0234	0.0060	0.0097	0.0043	0.0012
8	D75	0.1	0.000250	0.0203	0.0042	0.0061	0.0023	0.0015
9	D85	0.1	0.000270	0.0179	0.0030	0.0038	0.0012	0.0018
10	D95	0.1	0.000280	0.0168	0.0025	0.0030	0.0009	0.0019

De la tabla anterior se concluye que el transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{Bi} , resultando 0.01 kgf/s.m, mientras que el transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} , resultando 2.04 kgf/s.m. Finalmente multiplicando ambos transportes determinados por el ancho medio de la zona, podríamos estimar el transporte total de sedimentos de fondo por arrastre y en suspensión, resultando 1.18 kgf/s y 265.60 kgf/s respectivamente.

4.2.3.3 Zona 3.

$$\begin{aligned}
 \text{Se calculan } \tau_o &= 0.6507 \text{Kgf/m}^2 \\
 y_e &= 1.7824 \text{m} \\
 y_m &= 8.0136 \text{m} \\
 n_v &= 0.1591 \\
 T_z &= 206.0694
 \end{aligned}$$

En la tabla siguiente se muestran las determinaciones de las velocidades de caída de las partículas para cada fracción y de los exponentes.

Tabla 4.46. Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

		ρ_i	D_i m	y_{B_i} m	F_{1_i}	w_i m/s	Z_i	e_{1_i}	e_{2_i}	e_{3_i}
1	D5	0.1	0.000080	0.0002	0.1829	0.0067	0.2480	0.7871	0.9111	0.9716
2	D15	0.1	0.000150	0.0003	0.3847	0.0193	0.7141	0.0879	0.4450	0.6192
3	D25	0.1	0.000170	0.0003	0.4306	0.0230	0.8510	-0.1174	0.3081	0.5157
4	D35	0.1	0.000185	0.0004	0.4611	0.0257	0.9508	-0.2670	0.2083	0.4403
5	D45	0.1	0.000200	0.0004	0.4886	0.0283	1.0474	-0.4120	0.1117	0.3673
6	D55	0.1	0.000220	0.0004	0.5208	0.0316	1.1710	-0.5974	-0.0119	0.2738
7	D65	0.1	0.000250	0.0005	0.5612	0.0363	1.3450	-0.8585	-0.1860	0.1422
8	D75	0.1	0.000260	0.0005	0.5728	0.0378	1.4002	-0.9411	-0.2411	0.1006
9	D85	0.1	0.000310	0.0006	0.6205	0.0447	1.6561	-1.3250	-0.4970	-0.0929
10	D95	0.1	0.000340	0.0007	0.6425	0.0485	1.7958	-1.5346	-0.6367	-0.1985

Luego se procede a determinar las siguientes variables.

Se calcula

$$v_1 = 5375.6413$$

$$v_2 = 1.3 \times 10^{10}$$

Aplicando la figura 2.23

$$v_3 = 33.00$$

Se calcula

$$V_*' = 0.0459 \text{ m/s}$$

$$e_o = 0.0017$$

Según la figura 2.22

$$K_T = 1.00 \quad \text{Debido a que } e_o \text{ es menor que } 0.2$$

Se calcula

$$e_1 = 0.6429$$

Según la figura 2.22

$$A = 32.50$$

Se calcula

$$AK_T = 32.50 \quad \text{Tiene que ser mayor que } 16$$

$$T_T = 0.0642$$

Finalmente se procede con la determinación de g_{B_i} , g_{b_i} , g_{c_i} y g_{u_i} en la siguiente tabla.

Tabla 4.47. Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} .

Fuente: Elaboración propia, 2019.

	pi	Di	g_{bi} Kgf/s.m	M_i	g_{ci} Kgf/s.m	g_{ui} Kgf/s.m	g_{Bi} Kgf/s.m	
1	D5	0.1	0.000080	0.4814	0.2668	1.5063	2.4711	0.0002
2	D15	0.1	0.000150	0.1689	0.0734	0.2247	0.1957	0.0010
3	D25	0.1	0.000170	0.1371	0.0531	0.1368	0.0988	0.0016
4	D35	0.1	0.000185	0.1190	0.0416	0.0948	0.0597	0.0022
5	D45	0.1	0.000200	0.1045	0.0325	0.0658	0.0363	0.0028
6	D55	0.1	0.000220	0.0892	0.0232	0.0406	0.0189	0.0039
7	D65	0.1	0.000250	0.0721	0.0137	0.0196	0.0072	0.0055
8	D75	0.1	0.000260	0.0675	0.0115	0.0153	0.0052	0.0060
9	D85	0.1	0.000310	0.0504	0.0045	0.0045	0.0011	0.0080
10	D95	0.1	0.000340	0.0432	0.0025	0.0022	0.0004	0.0086

De la tabla anterior se concluye que el transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{Bi} , resultando 0.04 kgf/s.m, mientras que el transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} , resultando 6.34 kgf/s.m. Finalmente multiplicando ambos transportes determinados por el ancho medio de la zona, podríamos estimar el transporte total de sedimentos de fondo por arrastre y en suspensión, resultando 5.16 kgf/s y 822.17 kgf/s respectivamente.

4.2.3.4 Zona 4.

$$\begin{aligned}
 \text{Se calculan } \tau_o &= 0.7398 \text{Kgf/m}^2 \\
 y_e &= 2.0265 \text{m} \\
 y_m &= 9.1113 \text{m} \\
 n_v &= 0.1591 \\
 T_z &= 206.0694
 \end{aligned}$$

En la tabla siguiente se muestran las determinaciones de las velocidades de caída de las partículas para cada fracción y de los exponentes.

Tabla 4.48. *Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

		ρ_i	D_i m	y_{B_i} m	F_{1_i}	W_i m/s	Z_i	e_{1_i}	e_{2_i}	e_{3_i}
1	D5	0.1	0.000140	0.0003	0.3612	0.0176	0.6913	0.1222	0.4678	0.6365
2	D15	0.1	0.000170	0.0003	0.4324	0.0232	0.9119	-0.2087	0.2472	0.4697
3	D25	0.1	0.000180	0.0004	0.4531	0.0251	0.9832	-0.3157	0.1759	0.4158
4	D35	0.1	0.000195	0.0004	0.4815	0.0277	1.0875	-0.4722	0.0716	0.3369
5	D45	0.1	0.000210	0.0004	0.5070	0.0303	1.1882	-0.6233	-0.0291	0.2608
6	D55	0.1	0.000230	0.0005	0.5369	0.0336	1.3168	-0.8161	-0.1577	0.1636
7	D65	0.1	0.000240	0.0005	0.5503	0.0351	1.3787	-0.9089	-0.2196	0.1168
8	D75	0.1	0.000260	0.0005	0.5743	0.0382	1.4977	-1.0875	-0.3386	0.0268
9	D85	0.1	0.000280	0.0006	0.5952	0.0411	1.6108	-1.2572	-0.4518	-0.0587
10	D95	0.1	0.000320	0.0006	0.6295	0.0464	1.8212	-1.5727	-0.6621	-0.2178

Luego se procede a determinar las siguientes variables.

Se calcula

$$v_1 = 6605.4463$$

$$v_2 = 2.3 \times 10^{10}$$

Aplicando la figura 2.23

$$v_3 = 33.80$$

Se calcula

$$V'_* = 0.0541 \text{ m/s}$$

$$e_o = 0.0014$$

Según la figura 2.22

$$K_T = 1.00 \quad \text{Debido a que } e_o \text{ es menor que } 0.2$$

Se calcula

$$e_1 = 0.5453$$

Según la figura 2.22

$$A = 29.50$$

Se calcula

$$AK_T = 29.50 \quad \text{Tiene que ser mayor que } 16$$

$$T_T = 0.0642$$

Finalmente se procede con la determinación de g_{B_i} , g_{b_i} , g_{c_i} y g_{u_i} en la siguiente tabla.

Tabla 4.49. Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} .

Fuente: Elaboración propia, 2019.

	pi	Di	g_{bi}	M_i	g_{ci}	g_{ui}	g_{Bi}	
			Kgf/s.m		Kgf/s.m	Kgf/s.m	Kgf/s.m	
1	D5	0.1	0.000140	0.4133	0.1684	0.5757	0.5171	0.0020
2	D15	0.1	0.000170	0.2990	0.1025	0.2601	0.1728	0.0042
3	D25	0.1	0.000180	0.2719	0.0867	0.2000	0.1205	0.0053
4	D35	0.1	0.000195	0.2379	0.0669	0.1348	0.0703	0.0071
5	D45	0.1	0.000210	0.2103	0.0512	0.0906	0.0411	0.0092
6	D55	0.1	0.000230	0.1807	0.0353	0.0530	0.0202	0.0122
7	D65	0.1	0.000240	0.1683	0.0291	0.0404	0.0141	0.0137
8	D75	0.1	0.000260	0.1473	0.0195	0.0234	0.0069	0.0164
9	D85	0.1	0.000280	0.1302	0.0129	0.0135	0.0034	0.0187
10	D95	0.1	0.000320	0.1042	0.0055	0.0045	0.0009	0.0212

De la tabla anterior se concluye que el transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{Bi} , resultando 0.11 kgf/s.m, mientras que el transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} , resultando 4.53 kgf/s.m. Finalmente multiplicando ambos transportes determinados por el ancho medio de la zona, podríamos estimar el transporte total de sedimentos de fondo por arrastre y en suspensión, resultando 14.31 kgf/s y 589.53 kgf/s respectivamente.

4.2.3.5 Zona 5.

$$\begin{aligned}
 \text{Se calculan } \tau_o &= 0.7444 \text{Kgf/m}^2 \\
 y_e &= 2.0390 \text{m} \\
 y_m &= 9.1675 \text{m} \\
 n_v &= 0.1591 \\
 T_z &= 206.0694
 \end{aligned}$$

En la tabla siguiente se muestran las determinaciones de las velocidades de caída de las partículas para cada fracción y de los exponentes.

Tabla 4.50. *Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	y_{Bi}	F_{1i}	W_i	Z_i	e_{1i}	e_{2i}	e_{3i}	
		m	m		m/s					
1	D5	0.1	0.000150	0.0003	0.3846	0.0193	0.7471	0.0385	0.4120	0.5943
2	D15	0.1	0.000170	0.0003	0.4305	0.0230	0.8903	-0.1764	0.2688	0.4860
3	D25	0.1	0.000190	0.0004	0.4706	0.0265	1.0288	-0.3840	0.1303	0.3814
4	D35	0.1	0.000220	0.0004	0.5208	0.0316	1.2251	-0.6786	-0.0660	0.2329
5	D45	0.1	0.000240	0.0005	0.5486	0.0348	1.3481	-0.8630	-0.1890	0.1399
6	D55	0.1	0.000270	0.0005	0.5837	0.0392	1.5211	-1.1226	-0.3620	0.0091
7	D65	0.1	0.000290	0.0006	0.6033	0.0420	1.6295	-1.2851	-0.4704	-0.0728
8	D75	0.1	0.000330	0.0007	0.6356	0.0472	1.8312	-1.5877	-0.6721	-0.2253
9	D85	0.1	0.000360	0.0007	0.6550	0.0508	1.9712	-1.7976	-0.8121	-0.3311
10	D95	0.1	0.000410	0.0008	0.6808	0.0564	2.1864	-2.1205	-1.0273	-0.4938

Luego se procede a determinar las siguientes variables.

Se calcula	$v_1 = 5976.2545$	
	$v_2 = 2.2 \times 10^{10}$	
Aplicando la figura 2.23	$v_3 = 33.70$	
Se calcula	$V'_* = 0.0540 \text{ m/s}$	
	$e_o = 0.0017$	
Según la figura 2.22	$K_T = 1.00$	Debido a que e_o es menor que 0.2
Se calcula	$e_1 = 0.5467$	
Según la figura 2.22	$A = 29.50$	
Se calcula	$AK_T = 29.50$	Tiene que ser mayor que 16
	$T_T = 0.0642$	

Finalmente se procede con la determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} en la siguiente tabla.

Tabla 4.51. *Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} .*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	g_{bi}	M_i	g_{ci}	g_{ui}	g_{Bi}	
			Kgf/s.m		Kgf/s.m	Kgf/s.m	Kgf/s.m	
1	D5	0.1	0.000150	0.3617	0.1415	0.4499	0.3744	0.0023
2	D15	0.1	0.000170	0.2936	0.1024	0.2682	0.1835	0.0038
3	D25	0.1	0.000190	0.2439	0.0737	0.1605	0.0908	0.0058
4	D35	0.1	0.000220	0.1911	0.0438	0.0740	0.0320	0.0096
5	D45	0.1	0.000240	0.1653	0.0304	0.0439	0.0160	0.0123
6	D55	0.1	0.000270	0.1358	0.0170	0.0198	0.0057	0.0160
7	D65	0.1	0.000290	0.1206	0.0114	0.0116	0.0029	0.0180
8	D75	0.1	0.000330	0.0972	0.0050	0.0041	0.0008	0.0200
9	D85	0.1	0.000360	0.0841	0.0027	0.0019	0.0003	0.0202
10	D95	0.1	0.000410	0.0677	0.0010	0.0006	0.0001	0.0190

De la tabla anterior se concluye que el transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{B_i} , resultando 0.13 kgf/s.m, mientras que el transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{b_i} , g_{c_i} y g_{u_i} , resultando 3.50 kgf/s.m. Finalmente multiplicando ambos transportes determinados por el ancho medio de la zona, podríamos estimar el transporte total de sedimentos de fondo por arrastre y en suspensión, resultando 16.54 kgf/s y 456.26 kgf/s respectivamente.

4.2.3.6 Zona 6.

$$\begin{aligned} \text{Se calculan } \tau_o &= 0.7960 \text{Kgf/m}^2 \\ y_e &= 2.1803 \text{m} \\ y_m &= 9.8028 \text{m} \\ n_v &= 0.1591 \\ T_z &= 206.0694 \end{aligned}$$

En la tabla siguiente se muestran las determinaciones de las velocidades de caída de las partículas para cada fracción y de los exponentes.

Tabla 4.52. *Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	ρ_i	D_i m	y_{B_i} m	F_{1_i}	W_i m/s	Z_i	e_{1_i}	e_{2_i}	e_{3_i}	
1	D5	0.1	0.000160	0.0003	0.4076	0.0210	0.7583	0.0217	0.4008	0.5858
2	D15	0.1	0.000180	0.0004	0.4505	0.0246	0.8890	-0.1745	0.2700	0.4870
3	D25	0.1	0.000200	0.0004	0.4878	0.0281	1.0147	-0.3630	0.1444	0.3920
4	D35	0.1	0.000230	0.0005	0.5346	0.0331	1.1924	-0.6295	-0.0333	0.2576
5	D45	0.1	0.000260	0.0005	0.5722	0.0376	1.3571	-0.8765	-0.1980	0.1331
6	D55	0.1	0.000270	0.0005	0.5831	0.0391	1.4092	-0.9547	-0.2501	0.0937
7	D65	0.1	0.000310	0.0006	0.6200	0.0445	1.6055	-1.2491	-0.4464	-0.0546
8	D75	0.1	0.000340	0.0007	0.6420	0.0483	1.7411	-1.4526	-0.5820	-0.1572
9	D85	0.1	0.000370	0.0007	0.6603	0.0518	1.8682	-1.6432	-0.7091	-0.2533
10	D95	0.1	0.000400	0.0008	0.6758	0.0551	1.9880	-1.8228	-0.8289	-0.3438

Luego se procede a determinar las siguientes variables.

Se calcula	$v_1 = 5748.4985$	
	$v_2 = 2.2 \times 10^{10}$	
Aplicando la figura 2.23	$v_3 = 33.25$	
Se calcula	$V'_* = 0.0544 \text{ m/s}$	
	$e_o = 0.0018$	
Según la figura 2.22	$K_T = 1.00$	Debido a que e_o es menor que 0.2
Se calcula	$e_1 = 0.5423$	
Según la figura 2.22	$A = 29.50$	
Se calcula	$AK_T = 29.50$	Tiene que ser mayor que 16
	$T_T = 0.0642$	

Finalmente se procede con la determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} en la siguiente tabla.

Tabla 4.53. Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} .

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	g_{bi} Kgf/s.m	M_i	g_{ci} Kgf/s.m	g_{ui} Kgf/s.m	g_{Bi} Kgf/s.m	
1	D5	0.1	0.000160	0.3189	0.1190	0.3875	0.3176	0.0021
2	D15	0.1	0.000180	0.2621	0.0886	0.2401	0.1646	0.0033
3	D25	0.1	0.000200	0.2199	0.0657	0.1498	0.0864	0.0049
4	D35	0.1	0.000230	0.1742	0.0414	0.0742	0.0335	0.0078
5	D45	0.1	0.000260	0.1420	0.0254	0.0367	0.0132	0.0109
6	D55	0.1	0.000270	0.1333	0.0215	0.0290	0.0097	0.0119
7	D65	0.1	0.000310	0.1059	0.0107	0.0113	0.0029	0.0151
8	D75	0.1	0.000340	0.0908	0.0063	0.0056	0.0012	0.0165
9	D85	0.1	0.000370	0.0789	0.0037	0.0028	0.0005	0.0170
10	D95	0.1	0.000400	0.0693	0.0022	0.0014	0.0002	0.0169

De la tabla anterior se concluye que el transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{Bi} , resultando 0.11 kgf/s.m, mientras que el transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} , resultando 3.16 kgf/s.m. Finalmente multiplicando ambos transportes determinados por el ancho medio de la zona, podríamos estimar el transporte total de sedimentos de fondo por arrastre y en suspensión, resultando 13.77 kgf/s y 409.52 kgf/s respectivamente.

4.2.3.7 Zona 7.

$$\begin{aligned} \text{Se calculan } \tau_o &= 0.7190 \text{Kgf/m}^2 \\ y_e &= 1.9694 \text{m} \\ y_m &= 8.8546 \text{m} \\ n_v &= 0.1591 \\ T_z &= 206.0694 \end{aligned}$$

En la tabla siguiente se muestran las determinaciones de las velocidades de caída de las partículas para cada fracción y de los exponentes.

Tabla 4.54. *Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	y_{Bi}	F_{1i}	W_i	Z_i	e_{1i}	e_{2i}	e_{3i}	
		m	m		m/s					
1	D5	0.1	0.000150	0.0003	0.3817	0.0189	0.7419	0.0463	0.4172	0.5982
2	D15	0.1	0.000200	0.0004	0.4858	0.0278	1.0903	-0.4764	0.0688	0.3348
3	D25	0.1	0.000250	0.0005	0.5587	0.0357	1.4021	-0.9441	-0.2430	0.0991
4	D35	0.1	0.000300	0.0006	0.6101	0.0427	1.6771	-1.3566	-0.5180	-0.1088
5	D45	0.1	0.000330	0.0007	0.6337	0.0465	1.8270	-1.5814	-0.6679	-0.2221
6	D55	0.1	0.000350	0.0007	0.6472	0.0489	1.9215	-1.7232	-0.7624	-0.2936
7	D65	0.1	0.000370	0.0007	0.6591	0.0512	2.0122	-1.8592	-0.8531	-0.3621
8	D75	0.1	0.000390	0.0008	0.6698	0.0535	2.0992	-1.9898	-0.9401	-0.4279
9	D85	0.1	0.000450	0.0009	0.6956	0.0596	2.3421	-2.3540	-1.1830	-0.6115
10	D95	0.1	0.000620	0.0012	0.7393	0.0744	2.9216	-3.2233	-1.7625	-1.0496

Luego se procede a determinar las siguientes variables.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } v_1 &= 5174.5887 \\ v_2 &= 2.1 \times 10^{10} \\ \text{Aplicando la figura 2.23 } v_3 &= 32.70 \\ \text{Se calcula } V'_* &= 0.0544 \text{ m/s} \\ e_o &= 0.0021 \\ \text{Según la figura 2.22 } K_T &= 1.00 \quad \text{Debido a que } e_o \text{ es menor que } 0.2 \\ \text{Se calcula } e_1 &= 0.5424 \\ \text{Según la figura 2.22 } A &= 29.50 \\ \text{Se calcula } AK_T &= 29.50 \quad \text{Tiene que ser mayor que } 16 \\ T_T &= 0.0642 \end{aligned}$$

Finalmente se procede con la determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} en la siguiente tabla.

Tabla 4.55. Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} .

Fuente: Elaboración propia, 2019.

	pi	Di	g_{bi} Kgf/s.m	M_i	g_{ci} Kgf/s.m	g_{ui} Kgf/s.m	g_{Bi} Kgf/s.m	
1	D5	0.1	0.000150	0.3359	0.1347	0.4223	0.3540	0.0021
2	D15	0.1	0.000200	0.2080	0.0589	0.1171	0.0609	0.0064
3	D25	0.1	0.000250	0.1434	0.0237	0.0320	0.0108	0.0126
4	D35	0.1	0.000300	0.1058	0.0088	0.0085	0.0020	0.0173
5	D45	0.1	0.000330	0.0903	0.0047	0.0039	0.0007	0.0185
6	D55	0.1	0.000350	0.0818	0.0032	0.0023	0.0004	0.0188
7	D65	0.1	0.000370	0.0746	0.0021	0.0014	0.0002	0.0186
8	D75	0.1	0.000390	0.0683	0.0014	0.0009	0.0001	0.0182
9	D85	0.1	0.000450	0.0538	0.0005	0.0002	0.0000	0.0161
10	D95	0.1	0.000620	0.0316	0.0000	0.0000	0.0000	0.0095

De la tabla anterior se concluye que el transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{Bi} , resultando 0.14 kgf/s.m, mientras que el transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} , resultando 2.21 kgf/s.m. Finalmente multiplicando ambos transportes determinados por el ancho medio de la zona, podríamos estimar el transporte total de sedimentos de fondo por arrastre y en suspensión, resultando 18.08 kgf/s y 289.36 kgf/s respectivamente.

4.2.3.8 Zona 8.

$$\begin{aligned}
 \text{Se calculan } \tau_o &= 0.6890 \text{Kgf/m}^2 \\
 y_e &= 1.8872 \text{m} \\
 y_m &= 8.4851 \text{m} \\
 n_v &= 0.1591 \\
 T_z &= 206.0694
 \end{aligned}$$

En la tabla siguiente se muestran las determinaciones de las velocidades de caída de las partículas para cada fracción y de los exponentes.

Tabla 4.56. *Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	y_{B_i}	F_{1_i}	W_i	Z_i	e_{1_i}	e_{2_i}	e_{3_i}	
		m	m		m/s					
1	D5	0.1	0.000150	0.0003	0.3853	0.0194	0.7843	-0.0173	0.3748	0.5662
2	D15	0.1	0.000180	0.0004	0.4519	0.0249	1.0078	-0.3525	0.1513	0.3972
3	D25	0.1	0.000230	0.0005	0.5358	0.0333	1.3506	-0.8668	-0.1915	0.1381
4	D35	0.1	0.000280	0.0006	0.5943	0.0408	1.6529	-1.3202	-0.4938	-0.0905
5	D45	0.1	0.000320	0.0006	0.6287	0.0461	1.8692	-1.6448	-0.7101	-0.2540
6	D55	0.1	0.000340	0.0007	0.6429	0.0486	1.9702	-1.7961	-0.8111	-0.3303
7	D65	0.1	0.000360	0.0007	0.6554	0.0510	2.0668	-1.9411	-0.9077	-0.4034
8	D75	0.1	0.000380	0.0008	0.6666	0.0533	2.1596	-2.0803	-1.0005	-0.4736
9	D85	0.1	0.000410	0.0008	0.6811	0.0566	2.2922	-2.2792	-1.1331	-0.5738
10	D95	0.1	0.000560	0.0011	0.7286	0.0707	2.8655	-3.1392	-1.7064	-1.0072

Luego se procede a determinar las siguientes variables.

Se calcula	$v_1 = 5187.0223$	
	$v_2 = 2.0 \times 10^{10}$	
Aplicando la figura 2.23	$v_3 = 32.70$	
Se calcula	$V'_* = 0.0538 \text{ m/s}$	
	$e_o = 0.0021$	
Según la figura 2.22	$K_T = 1.00$	Debido a que e_o es menor que 0.2
Se calcula	$e_1 = 0.5485$	
Según la figura 2.22	$A = 29.50$	
Se calcula	$AK_T = 29.50$	Tiene que ser mayor que 16
	$T_T = 0.0642$	

Finalmente se procede con la determinación de g_{B_i} , g_{b_i} , g_{c_i} y g_{u_i} en la siguiente tabla.

Tabla 4.57. *Determinación de g_{B_i} , g_{b_i} , g_{c_i} y g_{u_i} .*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	g_{b_i}	M_i	g_{c_i}	g_{u_i}	g_{B_i}	
			Kgf/s.m		Kgf/s.m	Kgf/s.m	Kgf/s.m	
1	D5	0.1	0.000150	0.3235	0.1287	0.3724	0.2945	0.0026
2	D15	0.1	0.000180	0.2387	0.0762	0.1656	0.0964	0.0052
3	D25	0.1	0.000230	0.1587	0.0294	0.0419	0.0152	0.0120
4	D35	0.1	0.000280	0.1143	0.0101	0.0101	0.0024	0.0178
5	D45	0.1	0.000320	0.0915	0.0041	0.0032	0.0006	0.0198
6	D55	0.1	0.000340	0.0827	0.0026	0.0019	0.0003	0.0199
7	D65	0.1	0.000360	0.0752	0.0017	0.0011	0.0001	0.0196
8	D75	0.1	0.000380	0.0687	0.0011	0.0006	0.0001	0.0190
9	D85	0.1	0.000410	0.0605	0.0006	0.0003	0.0000	0.0178
10	D95	0.1	0.000560	0.0360	0.0000	0.0000	0.0000	0.0110

De la tabla anterior se concluye que el transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{B_i} , resultando 0.14 kgf/s.m, mientras que el transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{b_i} , g_{c_i} y g_{u_i} , resultando 2.26 kgf/s.m. Finalmente multiplicando ambos transportes determinados por el ancho medio de la zona, podríamos estimar el transporte total de sedimentos de fondo por arrastre y en suspensión, resultando 18.97 kgf/s y 295.88 kgf/s respectivamente.

4.2.3.9 Zona 9.

$$\begin{aligned} \text{Se calculan } \tau_o &= 0.6991 \text{Kgf/m}^2 \\ y_e &= 1.9150 \text{m} \\ y_m &= 8.6099 \text{m} \\ n_v &= 0.1591 \\ T_z &= 206.0694 \end{aligned}$$

En la tabla siguiente se muestran las determinaciones de las velocidades de caída de las partículas para cada fracción y de los exponentes.

Tabla 4.58. *Determinación de la velocidad de caída y de los exponentes.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	ρ_i	D_i m	y_{B_i} m	F_{1_i}	W_i m/s	Z_i	e_{1_i}	e_{2_i}	e_{3_i}	
1	D5	0.1	0.000140	0.0003	0.3600	0.0175	0.6304	0.2136	0.5287	0.6825
2	D15	0.1	0.000240	0.0005	0.5492	0.0349	1.2590	-0.7295	-0.0999	0.2073
3	D25	0.1	0.000300	0.0006	0.6126	0.0435	1.5702	-1.1962	-0.4111	-0.0280
4	D35	0.1	0.000320	0.0006	0.6287	0.0461	1.6642	-1.3372	-0.5051	-0.0990
5	D45	0.1	0.000340	0.0007	0.6429	0.0486	1.7540	-1.4720	-0.5950	-0.1670
6	D55	0.1	0.000360	0.0007	0.6554	0.0510	1.8401	-1.6011	-0.6810	-0.2320
7	D65	0.1	0.000380	0.0008	0.6666	0.0533	1.9227	-1.7250	-0.7636	-0.2945
8	D75	0.1	0.000400	0.0008	0.6765	0.0555	2.0022	-1.8441	-0.8431	-0.3545
9	D85	0.1	0.000470	0.0009	0.7042	0.0626	2.2590	-2.2294	-1.0999	-0.5487
10	D95	0.1	0.000630	0.0013	0.7421	0.0764	2.7562	-2.9751	-1.5971	-0.9246

Luego se procede a determinar las siguientes variables.

Se calcula	$v_1 = 4561.0205$	
	$v_2 = 1.5 \times 10^{10}$	
Aplicando la figura 2.23	$v_3 = 32.00$	
Se calcula	$V'_* = 0.0497 \text{ m/s}$	
	$e_o = 0.0024$	
Según la figura 2.22	$K_T = 1.00$	Debido a que e_o es menor que 0.2
Se calcula	$e_1 = 0.5942$	
Según la figura 2.22	$A = 31.00$	
Se calcula	$AK_T = 31.00$	Tiene que ser mayor que 16
	$T_T = 0.0642$	

Finalmente se procede con la determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} en la siguiente tabla.

Tabla 4.59. Determinación de g_{Bi} , g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} .

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	g_{bi} Kgf/s.m	M_i	g_{ci} Kgf/s.m	g_{ui} Kgf/s.m	g_{Bi} Kgf/s.m	
1	D5	0.1	0.000140	0.2381	0.1046	0.3741	0.3651	0.0009
2	D15	0.1	0.000240	0.0970	0.0214	0.0342	0.0141	0.0056
3	D25	0.1	0.000300	0.0669	0.0075	0.0083	0.0022	0.0090
4	D35	0.1	0.000320	0.0600	0.0052	0.0052	0.0012	0.0097
5	D45	0.1	0.000340	0.0543	0.0037	0.0033	0.0007	0.0101
6	D55	0.1	0.000360	0.0493	0.0025	0.0021	0.0004	0.0104
7	D65	0.1	0.000380	0.0451	0.0018	0.0013	0.0002	0.0104
8	D75	0.1	0.000400	0.0414	0.0013	0.0008	0.0001	0.0103
9	D85	0.1	0.000470	0.0316	0.0004	0.0002	0.0000	0.0092
10	D95	0.1	0.000630	0.0194	0.0000	0.0000	0.0000	0.0060

De la tabla anterior se concluye que el transporte de fondo por arrastre por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{Bi} , resultando 0.08 kgf/s.m, mientras que el transporte de fondo en suspensión por unidad de ancho vendría a ser la suma de todos los g_{bi} , g_{ci} y g_{ui} , resultando 1.52 kgf/s.m. Finalmente multiplicando ambos transportes determinados por el ancho medio de la zona, podríamos estimar el transporte total de sedimentos de fondo por arrastre y en suspensión, resultando 10.66 kgf/s y 198.54 kgf/s respectivamente.

4.2.3.10 Zona 10.

En la Zona 10 no es posible utilizar el método de Tofaletti, debido el parámetro adimensional v_1 es mayor a 7,000, lo que impide utilizar las grafica para determinar v_3 .

4.2.3.11 Resumen de resultados.

A continuación, se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos y se calcula el total de sedimentos que transporta en la sección transversal de estudio.

Tabla 4.60. *Resumen de los resultados.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Zonas	GB (Kgf/s)	GBS (Kgf/s)
Zona 1	0.00	0.00
Zona 2	1.18	265.60
Zona 3	5.16	822.17
Zona 4	14.31	589.53
Zona 5	16.54	456.26
Zona 6	13.77	409.52
Zona 7	18.08	289.36
Zona 8	18.97	295.88
Zona 9	10.66	198.54
Zona 10	0.00	0.00
Total	98.66	3,326.85

De la tabla anterior se concluye que en la sección transversal de estudio en el río Amazonas se transporta 98.66 Kgf/s de sedimentos como concepto de transporte de fondo por arrastre, mientras que 3,326.85 Kgf/s de sedimentos por concepto de transporte de sedimentos de fondo en suspensión.

4.2.4 Método de Engelund y Fredsoe.

Para la estimación del transporte de fondo por arrastre y en suspensión utilizaremos el método descrito en el ítem 2.8.5, en donde se sugiere también el fraccionamiento de la curva granulométrica en 10 parte iguales.

La aplicación del método inicia con la estimación de la velocidad de caída equivalente, para posteriormente determinar el diámetro equivalente (D_e) mediante la aplicación de la

Ec. 2.80, esto puede observar en las tablas 4.57, 4.58, 4.59, 4.60, 4.61, 4.62, 4.63, 4.64, 4.65 y 4.66.

Posteriormente se proceden a calcular las demás variables necesarias para la estimación del transporte de fondo por arrastre mediante la aplicación de la Ec. 2.75.

Luego se procede a calcular el transporte de fondo en suspensión mediante la aplicación de la Ec. 2.84.

4.2.4.1 Zona 1.

Se calcula $\tau_o = 0.2609 \text{Kgf/m}^2$

Tabla 4.61. *Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	F_i	W_i	$D_i^3 w_i$
		m		m/s	m4/s
1	D5 0.1	0.000000	0.0000	0.0000	0.00E+00
2	D15 0.1	0.000000	0.0000	0.0000	0.00E+00
3	D25 0.1	0.000004	0.0021	0.0000	1.09E-21
4	D35 0.1	0.000011	0.0097	0.0001	1.72E-19
5	D45 0.1	0.000018	0.0202	0.0003	2.02E-18
6	D55 0.1	0.000028	0.0392	0.0008	1.83E-17
7	D65 0.1	0.000042	0.0716	0.0019	1.38E-16
8	D75 0.1	0.000056	0.1091	0.0033	5.77E-16
9	D85 0.1	0.000073	0.1590	0.0055	2.13E-15
10	D95 0.1	0.000130	0.3290	0.0151	3.32E-14

Para la estimación del transporte de fondo por arrastre se procede de la siguiente manera:

Se calcula $W_e = 0.0027 \text{ m/s}$
 $D_e = 0.000110 \text{ m}$
 $D_* = 3.1179$
 $t_{*c} = 0.0725$
 $R' = 4.5023 \text{ m}$
 $t'_* = 0.8064$
 Según la figura $\alpha = 29.00$
 Se calcula $p = 0.9201$
 $gB = 0.0401 \text{ Kgf/s.m}$
 $GB = 5.2059 \text{ Kgf/s}$

De los cálculos anteriores se logra observar que para la Zona 1 se genera un transporte de sedimentos totales por arrastre de 5.21 kgf/s.

Ahora procedemos a realizar los cálculos para estimar el transporte de fondo en suspensión.

Se calcula	$\lambda_b =$	2.8424
	Ca =	0.2631 m ³ /m ³
	A =	0.0000
	z =	0.1783
	J1 =	1.0541
	J2 =	-1.4100
	I1 =	2,109.6428
	I2 =	-2,821.8920
	gBS =	1,842.2383 Kgf/s.m
	GBS =	238,993.5718 Kgf/s

Finalmente obtenemos que el transporte de fondo en suspensión sería de 238,993.57 kgf/s para la Zona 1.

De los resultados obtenidos observamos que existe una sobreestimación en el cálculo del transporte de fondo en suspensión, y esto es debido a que la curva granulométrica no está completa y a que los diámetros representativos de cada fracción son muy ínfimos, esto genera que se calcule una velocidad de caída equivalente de muy bajo valor, lo que origina posteriormente un valor muy pequeño del parámetro z y valores muy elevados de las integrales I₁ e I₂.

4.2.4.2 Zona 2.

Se calcula $\tau_o = 0.5663 \text{Kgf/m}^2$

Tabla 4.62. *Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	F_i	W_i	$D_i^3 w_i$
		m		m/s	m ⁴ /s
1	D5 0.1	0.000079	0.1804	0.0066	3.25E-15
2	D15 0.1	0.000130	0.3336	0.0156	3.43E-14
3	D25 0.1	0.000170	0.4315	0.0231	1.14E-13
4	D35 0.1	0.000180	0.4522	0.0249	1.45E-13
5	D45 0.1	0.000190	0.4715	0.0267	1.83E-13
6	D55 0.1	0.000200	0.4895	0.0284	2.27E-13
7	D65 0.1	0.000230	0.5361	0.0334	4.06E-13
8	D75 0.1	0.000250	0.5620	0.0365	5.70E-13
9	D85 0.1	0.000270	0.5844	0.0394	7.76E-13
10	D95 0.1	0.000280	0.5945	0.0409	8.97E-13

Para la estimación del transporte de fondo por arrastre se procede de la siguiente manera:

Se calcula	W_e	=	0.0276 m/s
	D_e	=	0.000230 m
	D_*	=	6.6039
	t_{*c}	=	0.0405
	d'	=	5.9109 m
	t'_*	=	0.4872
Según la figura	α	=	29.00
Se calcula	p	=	0.8824
	gB	=	0.0954 Kgf/s.m
	GB	=	12.4424 Kgf/s

De los cálculos anteriores se logra observar que para la Zona 2 se genera un transporte de sedimentos totales por arrastre de 12.44 kgf/s.

Ahora procedemos a realizar los cálculos para estimar el transporte de fondo en suspensión.

Se calcula	λ_b	=	2.3083
	Ca	=	0.2208 m ³ /m ³
	A	=	0.0000
	z	=	1.5841
	$J1$	=	829.6786
	$J2$	=	-7,411.3753
	$I1$	=	0.3694
	$I2$	=	-3.2996
	gBS	=	0.2478 Kgf/s.m
	GBS	=	32.3108 Kgf/s

Finalmente obtenemos que el transporte de fondo en suspensión sería de 32.31 kgf/s para la Zona 2.

4.2.4.3 Zona 3.

Se calcula	τ_o	=	0.6507 Kgf/m ²
------------	----------	---	---------------------------

Tabla 4.63. *Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.*
 Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	F_i	W_i	$D_i^3 w_i$	
		m		m/s	m4/s	
1	D5	0.1	0.000080	0.1829	0.0067	3.43E-15
2	D15	0.1	0.000150	0.3847	0.0193	6.50E-14
3	D25	0.1	0.000170	0.4306	0.0230	1.13E-13
4	D35	0.1	0.000185	0.4611	0.0257	1.62E-13
5	D45	0.1	0.000200	0.4886	0.0283	2.26E-13
6	D55	0.1	0.000220	0.5208	0.0316	3.37E-13
7	D65	0.1	0.000250	0.5612	0.0363	5.67E-13
8	D75	0.1	0.000260	0.5728	0.0378	6.64E-13
9	D85	0.1	0.000310	0.6205	0.0447	1.33E-12
10	D95	0.1	0.000340	0.6425	0.0485	1.90E-12

Para la estimación del transporte de fondo por arrastre se procede de la siguiente manera:

Se calcula	W_e	=	0.0302 m/s
	D_e	=	0.000261 m
	D_*	=	7.4765
	t_{*c}	=	0.0379
	R'	=	7.9727 m
	t'_*	=	0.5834
Según la figura	α	=	29.00
Se calcula	p	=	0.8988
	gB	=	0.1313 Kgf/s.m
	GB	=	17.0287 Kgf/s

De los cálculos anteriores se logra observar que para la Zona 3 se genera un transporte de sedimentos totales por arrastre de 17.03 kgf/s.

Ahora procedemos a realizar los cálculos para estimar el transporte de fondo en suspensión.

Se calcula	λ_b	=	2.5840
	Ca	=	0.2436 m3/m3
	A	=	0.0000
	z	=	1.4938
	J1	=	382.3105
	J2	=	-3,331.5156
	I1	=	0.4291
	I2	=	-3.7390
	gBS	=	0.4411 Kgf/s.m
	GBS	=	57.2241 Kgf/s

Finalmente obtenemos que el transporte de fondo en suspensión sería de 57.22 kgf/s para la Zona 3.

4.2.4.4 Zona 4.

Se calcula $\tau_o = 0.7398 \text{Kgf/m}^2$

Tabla 4.64. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

	pi	Di	F_i	W_i	$D_i^3 w_i$	
		m		m/s	m4/s	
1	D5	0.1	0.000140	0.3612	0.0176	4.83E-14
2	D15	0.1	0.000170	0.4324	0.0232	1.14E-13
3	D25	0.1	0.000180	0.4531	0.0251	1.46E-13
4	D35	0.1	0.000195	0.4815	0.0277	2.06E-13
5	D45	0.1	0.000210	0.5070	0.0303	2.80E-13
6	D55	0.1	0.000230	0.5369	0.0336	4.08E-13
7	D65	0.1	0.000240	0.5503	0.0351	4.86E-13
8	D75	0.1	0.000260	0.5743	0.0382	6.71E-13
9	D85	0.1	0.000280	0.5952	0.0411	9.01E-13
10	D95	0.1	0.000320	0.6295	0.0464	1.52E-12

Para la estimación del transporte de fondo por arrastre se procede de la siguiente manera:

Se calcula $W_e = 0.0318 \text{ m/s}$
 $D_e = 0.000247 \text{ m}$
 $D_* = 7.0999$
 $t_{*c} = 0.0389$
 $R' = 10.8840 \text{ m}$
 $t'_* = 0.8302$
 Según la figura $\alpha = 29.00$
 Se calcula $p = 0.9249$
 $gB = 0.1555 \text{ Kgf/s.m}$
 $GB = 20.2501 \text{ Kgf/s}$

De los cálculos anteriores se logra observar que para la Zona 4 se genera un transporte de sedimentos totales por arrastre de 20.25 kgf/s.

Ahora procedemos a realizar los cálculos para estimar el transporte de fondo en suspensión.

Se calcula	$\lambda_b =$	2.9220
	Ca =	0.2688 m ³ /m ³
	A =	0.0000
	z =	1.3486
	J1 =	47.1448
	J2 =	-287.4515
	I1 =	0.2364
	I2 =	-1.4416
	gBS =	0.4601 Kgf/s.m
	GBS =	59.9218 Kgf/s

Finalmente obtenemos que el transporte de fondo en suspensión sería de 59.92 kgf/s para la Zona 4.

4.2.4.5 Zona 5.

Se calcula $\tau_o = 0.7398 \text{Kgf/m}^2$

Tabla 4.65. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.
Fuente: Elaboración propia, 2019.

	pi	Di	F_i	W_i	$D_i^3 w_i$
		m		m/s	m ⁴ /s
1	D5 0.1	0.000150	0.3846	0.0193	6.50E-14
2	D15 0.1	0.000170	0.4305	0.0230	1.13E-13
3	D25 0.1	0.000190	0.4706	0.0265	1.82E-13
4	D35 0.1	0.000220	0.5208	0.0316	3.36E-13
5	D45 0.1	0.000240	0.5486	0.0348	4.81E-13
6	D55 0.1	0.000270	0.5837	0.0392	7.72E-13
7	D65 0.1	0.000290	0.6033	0.0420	1.02E-12
8	D75 0.1	0.000330	0.6356	0.0472	1.70E-12
9	D85 0.1	0.000360	0.6550	0.0508	2.37E-12
10	D95 0.1	0.000410	0.6808	0.0564	3.89E-12

Para la estimación del transporte de fondo por arrastre se procede de la siguiente manera:

Se calcula	$W_e =$	0.0371 m/s
	$D_e =$	0.000309 m
	$D_* =$	8.8412
	$t_{*c} =$	0.0352
	$R' =$	11.1248 m
	$t'_* =$	0.6886
Según la figura	$\alpha =$	29.10
Se calcula	p =	0.9119
	gB =	0.1906 Kgf/s.m
	GB =	24.8273 Kgf/s

De los cálculos anteriores se logra observar que para la Zona 5 se genera un transporte de sedimentos totales por arrastre de 24.83 kgf/s.

Ahora procedemos a realizar los cálculos para estimar el transporte de fondo en suspensión.

Se calcula	$\lambda_b =$	2.7762
	Ca =	0.2583 m ³ /m ³
	A =	0.0000
	z =	1.5540
	J1 =	665.1047
	J2 =	-5,942.5238
	I1 =	0.3869
	I2 =	-3.4567
	gBS =	0.5669 Kgf/s.m
	GBS =	73.8638 Kgf/s

Finalmente obtenemos que el transporte de fondo en suspensión sería de 73.86 kgf/s para la Zona 5.

4.2.4.6 Zona 6.

Se calcula $\tau_o = 0.7960 \text{Kgf/m}^2$

Tabla 4.66. *Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

		π_i	D_i m	F_i	W_i m/s	$D_i^3 w_i$ m ⁴ /s
1	D5	0.1	0.000160	0.4076	0.0210	8.61E-14
2	D15	0.1	0.000180	0.4505	0.0246	1.44E-13
3	D25	0.1	0.000200	0.4878	0.0281	2.25E-13
4	D35	0.1	0.000230	0.5346	0.0331	4.02E-13
5	D45	0.1	0.000260	0.5722	0.0376	6.61E-13
6	D55	0.1	0.000270	0.5831	0.0391	7.69E-13
7	D65	0.1	0.000310	0.6200	0.0445	1.33E-12
8	D75	0.1	0.000340	0.6420	0.0483	1.90E-12
9	D85	0.1	0.000370	0.6603	0.0518	2.62E-12
10	D95	0.1	0.000400	0.6758	0.0551	3.53E-12

Para la estimación del transporte de fondo por arrastre se procede de la siguiente manera:

Se calcula	W_e	=	0.0383 m/s
	D_e	=	0.000312 m
	D_*	=	8.9183
	t_{*c}	=	0.0351
	R'	=	11.0349 m
	t'_*	=	0.6798
Según la figura	α	=	29.10
Se calcula	p	=	0.9110
	gB	=	0.1907 Kgf/s.m
	GB	=	24.6922 Kgf/s

De los cálculos anteriores se logra observar que para la Zona 6 se genera un transporte de sedimentos totales por arrastre de 24.69 kgf/s.

Ahora procedemos a realizar los cálculos para estimar el transporte de fondo en suspensión.

Se calcula	λ_b	=	2.7687
	Ca	=	0.2577 m ³ /m ³
	A	=	0.0000
	z	=	1.6129
	J1	=	1,101.4893
	J2	=	-9,960.9862
	I1	=	0.3520
	I2	=	-3.1836
	gBS	=	0.4997 Kgf/s.m
	GBS	=	64.6926 Kgf/s

Finalmente obtenemos que el transporte de fondo en suspensión sería de 64.69 kgf/s para la Zona 6.

4.2.4.7 Zona 7.

Se calcula $\tau_o = 0.7190 \text{Kgf/m}^2$

Tabla 4.67. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.
Fuente: Elaboración propia, 2019.

	pi	Di	F_i	W_i	$D_i^3 w_i$
		m		m/s	m4/s
1	D5 0.1	0.000150	0.3817	0.0189	6.38E-14
2	D15 0.1	0.000200	0.4858	0.0278	2.22E-13
3	D25 0.1	0.000250	0.5587	0.0357	5.58E-13
4	D35 0.1	0.000300	0.6101	0.0427	1.15E-12
5	D45 0.1	0.000330	0.6337	0.0465	1.67E-12
6	D55 0.1	0.000350	0.6472	0.0489	2.10E-12
7	D65 0.1	0.000370	0.6591	0.0512	2.60E-12
8	D75 0.1	0.000390	0.6698	0.0535	3.17E-12
9	D85 0.1	0.000450	0.6956	0.0596	5.43E-12
10	D95 0.1	0.000620	0.7393	0.0744	1.77E-11

Para la estimación del transporte de fondo por arrastre se procede de la siguiente manera:

Se calcula	W_e	=	0.0459 m/s
	D_e	=	0.000423 m
	D_*	=	12.0049
	t_{*c}	=	0.0326
	R'	=	11.1982 m
	t'_*	=	0.5186
Según la figura	α	=	29.20
Se calcula	p	=	0.8889
	gB	=	0.2462 Kgf/s.m
	GB	=	32.2193 Kgf/s

De los cálculos anteriores se logra observar que para la Zona 7 se genera un transporte de sedimentos totales por arrastre de 32.22 kgf/s.

Ahora procedemos a realizar los cálculos para estimar el transporte de fondo en suspensión.

Se calcula	λ_b	=	2.4607
	Ca	=	0.2337 m3/m3
	A	=	0.0000
	z	=	1.9186
	J1	=	13,478.9028
	J2	=	-123,690.0975
	I1	=	0.2351
	I2	=	-2.1576
	gBS	=	0.3648 Kgf/s.m
	GBS	=	47.7475 Kgf/s

Finalmente obtenemos que el transporte de fondo en suspensión sería de 47.75 kgf/s para la Zona 7.

4.2.4.8 Zona 8.

Se calcula $\tau_o = 0.7190 \text{ Kgf/m}^2$

Tabla 4.68. *Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	F_i	W_i	$D_i^3 w_i$
		m		m/s	m4/s
1	D5 0.1	0.000150	0.3853	0.0194	6.53E-14
2	D15 0.1	0.000180	0.4519	0.0249	1.45E-13
3	D25 0.1	0.000230	0.5358	0.0333	4.06E-13
4	D35 0.1	0.000280	0.5943	0.0408	8.95E-13
5	D45 0.1	0.000320	0.6287	0.0461	1.51E-12
6	D55 0.1	0.000340	0.6429	0.0486	1.91E-12
7	D65 0.1	0.000360	0.6554	0.0510	2.38E-12
8	D75 0.1	0.000380	0.6666	0.0533	2.92E-12
9	D85 0.1	0.000410	0.6811	0.0566	3.90E-12
10	D95 0.1	0.000560	0.7286	0.0707	1.24E-11

Para la estimación del transporte de fondo por arrastre se procede de la siguiente manera:

Se calcula $W_e = 0.0445 \text{ m/s}$
 $D_e = 0.000391 \text{ m}$
 $D_* = 11.2096$
 $t_{*c} = 0.0329$
 $R' = 10.8601 \text{ m}$
 $t'_* = 0.5281$
 Según la figura $\alpha = 29.20$
 Se calcula $p = 0.8904$
 $gB = 0.2289 \text{ Kgf/s.m}$
 $GB = 30.0146 \text{ Kgf/s}$

De los cálculos anteriores se logra observar que para la Zona 8 se genera un transporte de sedimentos totales por arrastre de 30.01 kgf/s.

Ahora procedemos a realizar los cálculos para estimar el transporte de fondo en suspensión.

Se calcula	$\lambda_b =$	2.4618
	Ca =	0.2338 m ³ /m ³
	A =	0.0000
	z =	1.8864
	J1 =	9,789.0793
	J2 =	-89,179.9281
	I1 =	0.2413
	I2 =	-2.1980
	gBS =	0.3513 Kgf/s.m
	GBS =	46.0685 Kgf/s

Finalmente obtenemos que el transporte de fondo en suspensión sería de 46.07 kgf/s para la Zona 8.

4.2.4.9 Zona 9.

Se calcula $\tau_o = 0.6991 \text{ Kgf/m}^2$

Tabla 4.69. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.
Fuente: Elaboración propia, 2019.

	pi	Di	F_i	W_i	$D_i^3 w_i$
		m		m/s	m ⁴ /s
1	D5 0.1	0.000140	0.3600	0.0175	4.79E-14
2	D15 0.1	0.000240	0.5492	0.0349	4.82E-13
3	D25 0.1	0.000300	0.6126	0.0435	1.18E-12
4	D35 0.1	0.000320	0.6287	0.0461	1.51E-12
5	D45 0.1	0.000340	0.6429	0.0486	1.91E-12
6	D55 0.1	0.000360	0.6554	0.0510	2.38E-12
7	D65 0.1	0.000380	0.6666	0.0533	2.92E-12
8	D75 0.1	0.000400	0.6765	0.0555	3.55E-12
9	D85 0.1	0.000470	0.7042	0.0626	6.50E-12
10	D95 0.1	0.000630	0.7421	0.0764	1.91E-11

Para la estimación del transporte de fondo por arrastre se procede de la siguiente manera:

Se calcula	$W_e =$	0.0489 m/s
	$D_e =$	0.000432 m
	$D_* =$	12.4023
	$t_{*c} =$	0.0324
	$R' =$	9.2608 m
	$t'_* =$	0.4071
Según la figura	$\alpha =$	29.20
Se calcula	p =	0.8656
	gB =	0.2211 Kgf/s.m
	GB =	28.9447 Kgf/s

De los cálculos anteriores se logra observar que para la Zona 9 se genera un transporte de sedimentos totales por arrastre de 28.94 kgf/s.

Ahora procedemos a realizar los cálculos para estimar el transporte de fondo en suspensión.

Se calcula	$\lambda_b =$	2.0164
	Ca =	0.1942 m ³ /m ³
	A =	0.0000
	z =	2.2486
	J1 =	248,122.3532
	J2 =	-2,314,157.4670
	I1 =	0.1711
	I2 =	-1.5961
	gBS =	0.1957 Kgf/s.m
	GBS =	25.6128 Kgf/s

Finalmente obtenemos que el transporte de fondo en suspensión sería de 25.61 kgf/s para la Zona 9.

4.2.4.10 Zona 10.

Se calcula $\tau_o = 0.2160 \text{ Kgf/m}^2$

Tabla 4.70. Determinación de la velocidad de caída correspondiente a cada fracción de la curva.
Fuente: Elaboración propia, 2019.

		pi	Di	F_i	W_i	$D_i^3 w_i$
			m		m/s	m ⁴ /s
1	D5	0.1	0.000000	0.0000	0.0000	0.00E+00
2	D15	0.1	0.000000	0.0000	0.0000	0.00E+00
3	D25	0.1	0.000000	0.0000	0.0000	0.00E+00
4	D35	0.1	0.000000	0.0000	0.0000	0.00E+00
5	D45	0.1	0.000002	0.0007	0.0000	2.43E-23
6	D55	0.1	0.000005	0.0027	0.0000	2.50E-21
7	D65	0.1	0.000009	0.0063	0.0001	4.35E-20
8	D75	0.1	0.000015	0.0147	0.0002	7.44E-19
9	D85	0.1	0.000023	0.0280	0.0005	6.30E-18
10	D95	0.1	0.000039	0.0615	0.0015	8.79E-17

Para la estimación del transporte de fondo por arrastre se procede de la siguiente manera:

Se calcula	W_e	=	0.0002 m/s
	D_e	=	0.000034 m
	D_*	=	0.9495
	t_{*c}	=	0.2314
	R'	=	3.1844 m
	t'_*	=	1.9832
Según la figura	α	=	29.20
Se calcula	p	=	0.9621
	gB	=	0.0101 Kgf/s.m
	GB	=	1.3119 Kgf/s

De los cálculos anteriores se logra observar que para la Zona 10 se genera un transporte de sedimentos totales por arrastre de 1.31 kgf/s.

Ahora procedemos a realizar los cálculos para estimar el transporte de fondo en suspensión.

Se calcula	λ_b	=	3.3023
	Ca	=	0.2939 m ³ /m ³
	A	=	0.0000
	z	=	0.0181
	J1	=	1.0005
	J2	=	-1.0306
	I1	=	37,806.6576
	I2	=	-38,944.4958
	gBS	=	10,279.6138 Kgf/s.m
	GBS	=	1,334,602.2625 Kgf/s

Finalmente obtenemos que el transporte de fondo en suspensión sería de 1'334,602.26 kgf/s para la Zona 10.

De los resultados obtenidos observamos que existe una sobreestimación en el cálculo del transporte de fondo en suspensión, y esto es debido a que la curva granulométrica no está completa y a que los diámetros representativos de cada fracción son ínfimos, esto genera que se calcule una velocidad de caída equivalente de muy bajo valor, lo que origina posteriormente un valor muy pequeño del parámetro z y valores muy elevados de las integrales I_1 e I_2 .

4.2.4.11 Resumen de los resultados.

A continuación, se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos omitiendo los cálculos del transporte de fondo en suspensión de las zonas 1 y 10, y se calcula el total de sedimentos que se transporta en la sección transversal de estudio.

Tabla 4.71. *Resumen de los resultados.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Zonas	GB (Kgf/s)	GBS (Kgf/s)
Zona 1	5.21	0.00
Zona 2	12.44	32.31
Zona 3	17.03	57.22
Zona 4	20.25	59.92
Zona 5	24.83	73.86
Zona 6	24.69	64.69
Zona 7	32.22	47.75
Zona 8	30.01	46.07
Zona 9	28.94	25.61
Zona 10	1.31	0.00
Total	196.94	407.44

De la tabla anterior se concluye que en la sección transversal de estudio en el río Amazonas se transporta 196.94 Kgf/s de sedimentos como concepto de transporte de fondo por arrastre, mientras que 407.44 Kgf/s de sedimentos por concepto de transporte de sedimentos de fondo en suspensión.

4.2.5 Método de Kikkawa e Ishikawa.

La estimación de transporte de sedimentos de fondo se realizó mediante la aplicación del método descrito en el ítem 2.8.6, en el cual se recomienda el fraccionamiento de la curva granulométrica en 3 partes, la cuales vendrían a estar representas por los D_{16} , D_{50} y D_{84} .

La estimación del transporte de fondo por arrastre se realiza mediante la aplicación de la Ec. 2.101 y el transporte de fondo en suspensión se realiza mediante la aplicación de la

Ec. 2.110, los resultados de los cálculos los podemos observar desde la tabla 4.68 hasta la tabla 4.87.

4.2.5.1 Zona 1.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } \tau_o &= 0.2609 && \text{Kgf/m}^2 \\ V_* &= 0.0507 && \text{m/s} \\ c &= 0.7834 \\ a &= 0.6498 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra el disgregado de los cálculos realizados para la estimación del transporte de sedimentos de fondo y en suspensión.

Tabla 4.72. Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

		p_i	D_i m	F_i	w_i m/s	W_i	t_{*i}	x_i	$\phi(x_i)$
1	D16	3.33	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	D50	3.33	0.0000	0.0311	0.0006	0.9791	6.5977	-1.7696	0.9616
3	D84	3.33	0.0001	0.1499	0.0051	1.0000	2.2621	-1.3280	0.9079

Tabla 4.73. Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re_* .

Fuente: Elaboración propia, 2019.

α_i	β_i	$f_z(t_{*i})$	gBi Kgf/s.m	gBSi Kgf/s.m	Re_*
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6.9273	0.1482	5.8244	0.1128	-72.2741	1.4404
7.0755	0.0000	1.9713	0.1114	-9.2286E+20	4.2011

Finalmente se determina que el transporte de sedimentos de fondo por arrastre total (GB) vendría ser la suma de todos los gBi multiplicado por el ancho medio, lo cual resulta 29.08 kgf/s, sin embargo, para el transporte de fondo en suspensión se logró observar resultados incongruentes (magnitudes negativas), esto se debe a que el valor del Re_* es menor que 7.5, tal y como se indica el ítem de restricciones 2.8.6.3.

4.2.5.2 Zona 2.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } \tau_o &= 0.5663 && \text{Kgf/m}^2 \\ V_* &= 0.0747 && \text{m/s} \\ c &= 0.7106 \\ a &= 0.8683 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra el desgredo de los cálculos realizados para la estimación del transporte de sedimentos de fondo y en suspensión.

Tabla 4.74. *Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	F_i	w_i	W_i	t_{*i}	X_i	$\phi(x_i)$	
		m		m/s			m4/s		
1	D16	3.33	0.0001	0.3603	0.0175	0.6166	2.3619	-1.3565	0.9125
2	D50	3.33	0.0002	0.4895	0.0284	0.4394	1.6534	-1.0807	0.8601
3	D84	3.33	0.0003	0.5736	0.0380	0.3252	1.2718	-0.8049	0.7895

Tabla 4.75. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re_* .*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

α_i	β_i	$f_z(t_{*i})$	gBi Kgf/s.m	gBSi Kgf/s.m	Re_*
4.3629	2.7124	2.0615	0.2386	0.4599	12.3783
3.1092	3.9660	1.4128	0.2337	0.2205	17.6833
2.3011	4.7741	1.0448	0.2246	0.1288	22.9884

Finalmente se determina que el transporte de sedimentos de fondo por arrastre total (GB) vendría ser la suma de todos los gBi multiplicado por el ancho medio, lo cual resulta 90.87 kgf/s, así como el transporte de sedimentos de fondo en suspensión vendaría a ser la suma de los valores de gBSi de cada fracción, lo cual resulta 105.50 kgf/s.

4.2.5.3 Zona 3.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } \tau_o &= 0.6507 && \text{Kgf/m}^2 \\ V_* &= 0.0800 && \text{m/s} \\ c &= 0.7367 \\ a &= 0.7899 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra el desgredo de los cálculos realizados para la estimación del transporte de sedimentos de fondo y en suspensión.

Tabla 4.76. *Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	F_i	w_i	W_i	t_{*i}	X_i	$\phi(x_i)$	
		m		m/s			m4/s		
1	D16	3.33	0.000155	0.3967	0.0202	0.5915	2.4699	-1.3846	0.9169
2	D50	3.33	0.000220	0.5208	0.0316	0.4244	1.7401	-1.1265	0.8700
3	D84	3.33	0.000280	0.5939	0.0407	0.3252	1.3672	-0.8883	0.8128

Tabla 4.77. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re_* .*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

α_i	β_i	$f_2(t_{*i})$	gBi Kgf/s.m	gBSi Kgf/s.m	Re_*
4.1852	2.8901	2.1587	0.3364	0.5705	14.6900
3.0029	4.0723	1.4938	0.3304	0.2863	20.8503
2.3008	4.7743	1.1393	0.3207	0.1802	26.5368

Finalmente se determina que el transporte de sedimentos de fondo por arrastre total (GB) vendría ser la suma de todos los gBi multiplicado por el ancho medio, lo cual resulta 128.10 kgf/s, así como el transporte de sedimentos de fondo en suspensión total (GBS) vendría a ser la suma de los valores de gBSi de cada fracción multiplicado por el ancho medio de la zona, lo cual resulta 134.52 kgf/s.

4.2.5.4 Zona 4.

Se calcula $\tau_o = 0.7398$ Kgf/m²
 $V_* = 0.0854$ m/s
 $C = 0.7668$
 $a = 0.6996$

A continuación, se muestra el disgregado de los cálculos realizados para la estimación del transporte de sedimentos de fondo y en suspensión.

Tabla 4.78. *Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos.*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di m	F_i	w_i m/s	W_i	t_{*i}	X_i m4/s	$\phi(x_i)$	
1	D16	3.33	0.000170	0.4324	0.0232	0.5660	2.5220	-1.3973	0.9188
2	D50	3.33	0.000220	0.5225	0.0319	0.4463	1.9488	-1.2200	0.8888
3	D84	3.33	0.000280	0.5952	0.0411	0.3467	1.5312	-1.0073	0.8431

Tabla 4.79. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re_* .*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

α_i	β_i	$f_2(t_{*i})$	gBi Kgf/s.m	gBSi Kgf/s.m	Re_*
4.1852	2.8901	2.1587	0.3364	0.5705	14.6900
3.0029	4.0723	1.4938	0.3304	0.2863	20.8503
2.3008	4.7743	1.1393	0.3207	0.1802	26.5368

Finalmente se determina que el transporte de sedimentos de fondo por arrastre total (GB) vendría ser la suma de todos los gBi multiplicado por el ancho medio, lo cual resulta

183.76 kgf/s, así como el transporte de sedimentos de fondo en suspensión total (GBS) vendría a ser la suma de los valores de gBSi de cada fracción multiplicado por el ancho medio de la zona, lo cual resulta 185.84 kgf/s.

4.2.5.5 Zona 5.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } \tau_o &= 0.7444 && \text{Kgf/m}^2 \\ V_* &= 0.0856 && \text{m/s} \\ c &= 0.7648 \\ a &= 0.7056 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra el desglose de los cálculos realizados para la estimación del transporte de sedimentos de fondo y en suspensión.

Tabla 4.80. *Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	F_i	w_i	W_i	t_{*i}	X_i	$\phi(x_i)$	
		m		m/s			m4/s		
1	D16	3.33	0.0002	0.4512	0.0248	0.5429	2.4345	-1.3756	0.9155
2	D50	3.33	0.0003	0.5611	0.0363	0.3964	1.7528	-1.1328	0.8714
3	D84	3.33	0.0004	0.6550	0.0508	0.2673	1.2173	-0.7513	0.7738

Tabla 4.81. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re_* .*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

α_i	β_i	$f_2(t_{*i})$	gBi Kgf/s.m	gBSi Kgf/s.m	Re_*
3.8411	3.2342	2.1269	0.4782	0.6514	18.2463
2.8049	4.2703	1.5057	0.4702	0.3542	25.3421
1.8915	5.1837	0.9896	0.4450	0.1845	36.4926

Finalmente se determina que el transporte de sedimentos de fondo por arrastre total (GB) vendría ser la suma de todos los gBi multiplicado por el ancho medio, lo cual resulta 181.56 kgf/s, así como el transporte de sedimentos de fondo en suspensión total (GBS) vendría a ser la suma de los valores de gBSi de cada fracción multiplicado por el ancho medio de la zona, lo cual resulta 155.06 kgf/s.

4.2.5.6 Zona 6.

Se calcula $\tau_o = 0.7960$ Kgf/m²
 $V_* = 0.0885$ m/s
 $c = 0.7554$
 $a = 0.7337$

A continuación, se muestra el desglose de los cálculos realizados para la estimación del transporte de sedimentos de fondo y en suspensión.

Tabla 4.82. Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

	pi	Di	F_i	w_i	W_i	t_{*i}	x_i	$\phi(x_i)$	
		m		m/s			m4/s		
1	D16	3.33	0.000180	0.4505	0.0246	0.5578	2.6186	-1.4195	0.9221
2	D50	3.33	0.000260	0.5722	0.0376	0.3957	1.8129	-1.1615	0.8773
3	D84	3.33	0.000360	0.6546	0.0506	0.2810	1.3093	-0.8391	0.7993

Tabla 4.83. Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re_* .

Fuente: Elaboración propia, 2019.

α_i	β_i	$f_2(t_{*i})$	gBi Kgf/s.m	gBSi Kgf/s.m	Re_*
3.9470	3.1283	2.2923	0.5045	0.7352	18.8680
2.7996	4.2756	1.5613	0.4963	0.3754	27.2538
1.9883	5.0868	1.0822	0.4763	0.2132	37.7360

Finalmente se determina que el transporte de sedimentos de fondo por arrastre total (GB) vendría ser la suma de todos los gBi multiplicado por el ancho medio, lo cual resulta 191.22 kgf/s, así como el transporte de sedimentos de fondo en suspensión total (GBS) vendría a ser la suma de los valores de gBSi de cada fracción multiplicado por el ancho medio de la zona, lo cual resulta 171.38 kgf/s.

4.2.5.7 Zona 7.

Se calcula $\tau_o = 0.7190$ Kgf/m²
 $V_* = 0.0841$ m/s
 $c = 0.7637$
 $a = 0.7090$

A continuación, se muestra el desglose de los cálculos realizados para la estimación del transporte de sedimentos de fondo y en suspensión.

Tabla 4.84. *Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	F_i	w_i	W_i	t_{*i}	X_i	$\phi(x_i)$	
		m		m/s			m4/s		
1	D16	3.33	0.000200	0.4858	0.0278	0.4936	2.1671	-1.2986	0.9030
2	D50	3.33	0.000340	0.6406	0.0477	0.2840	1.2748	-0.8076	0.7903
3	D84	3.33	0.000440	0.6919	0.0587	0.2108	0.9851	-0.4569	0.6761

Tabla 4.85. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re_* .*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

α_i	β_i	$f_2(t_{*i})$	gBi Kgf/s.m	gBSi Kgf/s.m	Re_*
3.4926	3.5826	1.8853	0.4532	0.5084	19.9247
2.0094	5.0658	1.0477	0.4281	0.1934	33.8720
1.4917	5.5834	0.7415	0.3921	0.1185	43.8343

Finalmente se determina que el transporte de sedimentos de fondo por arrastre total (GB) vendría ser la suma de todos los gBi multiplicado por el ancho medio, lo cual resulta 166.67 kgf/s, así como el transporte de sedimentos de fondo en suspensión total (GBS) vendría a ser la suma de los valores de gBSi de cada fracción multiplicado por el ancho medio de la zona, lo cual resulta 107.36 kgf/s.

4.2.5.8 Zona 8.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } \tau_o &= 0.6890 && \text{Kgf/m}^2 \\ V_* &= 0.0824 && \text{m/s} \\ c &= 0.7660 \\ a &= 0.7020 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra el desglose de los cálculos realizados para la estimación del transporte de sedimentos de fondo y en suspensión.

Tabla 4.86. *Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	F_i	w_i	W_i	t_{*i}	X_i	$\phi(x_i)$	
		m		m/s			m4/s		
1	D16	3.33	0.000190	0.4712	0.0266	0.5026	2.1222	-1.2838	0.9004
2	D50	3.33	0.000330	0.6360	0.0474	0.2788	1.2219	-0.7560	0.7752
3	D84	3.33	0.000420	0.6855	0.0576	0.2103	0.9601	-0.4168	0.6616

Tabla 4.87. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re_* .*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

α_i	β_i	$f_2(t_{*i})$	gBi Kgf/s.m	gBSi Kgf/s.m	Re_*
3.5564	3.5189	1.8446	0.4256	0.4939	18.5293
1.9724	5.1027	0.9943	0.3985	0.1750	32.1825
1.4882	5.5869	0.7131	0.3637	0.1094	40.9595

Finalmente se determina que el transporte de sedimentos de fondo por arrastre total (GB) vendría ser la suma de todos los gBi multiplicado por el ancho medio, lo cual resulta 155.74 kgf/s, así como el transporte de sedimentos de fondo en suspensión total (GBS) vendría a ser la suma de los valores de gBSi de cada fracción multiplicado por el ancho medio de la zona, lo cual resulta 102.05 kgf/s.

4.2.5.9 Zona 9.

Se calcula $\tau_o = 0.6991$ Kgf/m²
 $V_* = 0.0830$ m/s
 $C = 0.7391$
 $a = 0.7827$

A continuación, se muestra el disgregado de los cálculos realizados para la estimación del transporte de sedimentos de fondo y en suspensión.

Tabla 4.88. *Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos.*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	F_i	w_i	W_i	t_{*i}	X_i	$\phi(x_i)$	
		m		m/s			m4/s		
1	D16	3.33	0.000240	0.5492	0.0349	0.3998	1.7048	-1.1084	0.8662
2	D50	3.33	0.000350	0.6493	0.0498	0.2633	1.1690	-0.6998	0.7580
3	D84	3.33	0.000470	0.7042	0.0626	0.1859	0.8706	-0.2540	0.6002

Tabla 4.89. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re_* .*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

α_i	β_i	$f_2(t_{*i})$	gBi Kgf/s.m	gBSi Kgf/s.m	Re_*
2.8285	4.2467	1.4610	0.3712	0.2895	23.5770
1.8633	5.2118	0.9400	0.3483	0.1440	34.3831
1.3157	5.7594	0.6075	0.3022	0.0792	46.1716

Finalmente se determina que el transporte de sedimentos de fondo por arrastre total (GB) vendría ser la suma de todos los gBi multiplicado por el ancho medio, lo cual resulta

133.74 kgf/s, así como el transporte de sedimentos de fondo en suspensión total (GBS) vendría a ser la suma de los valores de gBSi de cada fracción multiplicado por el ancho medio de la zona, lo cual resulta 67.12 kgf/s.

4.2.5.10 Zona 10.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } \tau_o &= 0.2160 && \text{Kgf/m}^2 \\ V_* &= 0.0461 && \text{m/s} \\ c &= 0.7804 \\ a &= 0.6588 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra el disgregado de los cálculos realizados para la estimación del transporte de sedimentos de fondo y en suspensión.

Tabla 4.90. *Determinación de las variables para la estimación del transporte de sedimentos.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	pi	Di	F_i	w_i	W_i	t_{*i}	x_i	$\emptyset(x_i)$	
		m		m/s			m4/s		
1	D16	3.33	0.000240	0.5492	0.0349	0.3998	1.7048	-1.1084	0.8662
2	D50	3.33	0.000350	0.6493	0.0498	0.2633	1.1690	-0.6998	0.7580
3	D84	3.33	0.000470	0.7042	0.0626	0.1859	0.8706	-0.2540	0.6002

Tabla 4.91. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo unitario y del Re_* .*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

α_i	β_i	$f_z(t_{*i})$	gBi Kgf/s.m	gBSi Kgf/s.m	Re_*
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7.0717	0.0038	33.2109	0.0864	-4.6530x10 ⁰⁶	0.2075
6.9468	0.1287	5.7307	0.0863	-90.1370	1.2013

Finalmente se determina que el transporte de sedimentos de fondo por arrastre total (GB) vendría ser la suma de todos los gBi multiplicado por el ancho medio, lo cual resulta 22.42 kgf/s, sin embargo, para el transporte de fondo en suspensión se logró observar resultados incongruentes (magnitudes negativas), esto se debe a que el valor del Re_* es menor que 7.5, tal y como se indica el ítem de restricciones 2.8.6.3.

4.2.5.11 Resumen de los resultados.

A continuación, se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos y se calcula el total de sedimentos que se transporta en la sección transversal de estudio.

Tabla 4.92. *Resumen de los resultados.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Zonas	GB (Kgf/s)	GBS (Kgf/s)
Zona 1	29.08	-
Zona 2	90.87	105.50
Zona 3	128.10	134.52
Zona 4	183.76	185.84
Zona 5	181.56	155.06
Zona 6	191.22	171.38
Zona 7	166.67	107.36
Zona 8	155.74	102.05
Zona 9	133.74	67.12
Zona 10	22.42	-
Total	1,283.16	1,028.82

De la tabla anterior se concluye que en la sección transversal de estudio en el río Amazonas se transporta 1,283.16 Kgf/s de sedimentos como concepto de transporte de fondo por arrastre, mientras que 1,028.82 Kgf/s de sedimentos por concepto de transporte de sedimentos de fondo en suspensión.

4.2.6 Método de Van Rijn.

Para la estimación del transporte de sedimentos de fondo utilizaremos el método descrito en el ítem 2.8.7, en donde se considera como diámetro característico al D_{50} y ya no existe la necesidad de fraccionar la curva granulométrica.

Para la estimación del transporte de sedimentos de fondo por arrastre utilizaremos las ecuaciones 2.125 y 2.126, las cuales dependen principalmente del parámetro de condición del transporte (T). Los disgregados de los cálculos se podrán observar en las tablas 4.82, 4.85, 4.88, 4.91, 4.94, 4.97, 4.100 y 4.103.

Para la estimación del transporte de sedimentos de fondo en suspensión utilizaremos la ecuación 2.132, la cual considera diferentes concentraciones de la parte superior de la capa de fondo C_a en función del tipo de fondo. Los disgregados de los cálculos se podrán

observar en las tablas 4.83, 4.84, 4.86, 4.87, 4.89, 4.90, 4.92, 4.93, 4.95, 4.96, 4.98, 4.99, 4.101, 4.102, 1.104 y 4.105.

4.2.6.1 Zona 1.

No es posible la aplicación del método debido a que una de las restricciones implica que el D50 se encuentre en el intervalo siguiente: $0.2\text{mm} \leq D50 \leq 2\text{mm}$.

4.2.6.2 Zona 2.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } k &= 0.4 \\ c_0 &= 1760.8285 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra una tabla en donde se encuentra el disgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.93. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

D_*	τ_c Kgf/m ²	C' m ⁻¹ s ⁻¹	τ_o' Kgf/m ²	T	gB Kgf/s. m	GB Kgf/s
5.7401	0.0195	97.7710	0.1734	7.9162	0.0415	5.4096

De la tabla anterior se logró determinar que el transporte de fondo por arrastre total es 5.41 kgf/s.

A continuación de muestran dos tablas en donde se encuentra el disgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo en suspensión.

Tabla 4.94. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

V_* m/s	k_s m	a m	Ca Kgf/m ³	σ_g	D_s m	w_s m/s
0.0747	0.2184	0.2184	0.4907	1.3643	0.0002	0.0297

Tabla 4.95. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

β	Z	ψ	z'	A	F	gBS Kgf/s.m	GBS Kgf/s
1.3172	0.7559	0.0453	0.8012	0.0120	0.0606	0.6992	91.1622

Finalmente se logró determinar que el transporte de fondo en suspensión total vendría a ser 91.16 kgf/s.

4.2.6.3 Zona 3.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } k &= 0.4 \\ c_0 &= 1752.4097 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra una tabla en donde se encuentra el disgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.96. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

D_*	τ_c Kgf/m ²	C' m ⁻¹ s ⁻¹	τ_o' Kgf/m ²	T	gB Kgf/s. m	GB Kgf/s
6.2982	0.0199	98.3187	0.2381	10.9882	0.0755	9.7907

De la tabla anterior se logró determinar que el transporte de fondo por arrastre total es 9.79 kgf/s.

A continuación de muestran dos tablas en donde se encuentra el disgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo en suspensión.

Tabla 4.97. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

V_*	k_s	a	Ca Kgf/m ³	σ_g	D_s	w_s
0.0800	0.1333	0.2210	0.8442	1.3460	0.0002	0.0336

Tabla 4.98. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

β	Z	ψ	z'	A	F	gBS Kgf/s.m	GBS Kgf/s
1.3520	0.7757	0.0588	0.8345	0.0100	0.0481	1.3652	177.0879

Finalmente se logró determinar que el transporte de fondo en suspensión total vendría a ser 177.088 kgf/s.

4.2.6.4 Zona 4.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } k &= 0.4 \\ C_0 &= 1769.2473 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra una tabla en donde se encuentra el desgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.99. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

D_*	τ_c Kgf/m ²	C' m ⁻¹ s ⁻¹	τ_o' Kgf/m ²	T	gB Kgf/s. m	GB Kgf/s
6.3300	0.0201	99.2339	0.3388	15.8607	0.1329	17.3164

De la tabla anterior se logró determinar que el transporte de fondo por arrastre total es 17.32 kgf/s.

A continuación de muestran dos tablas en donde se encuentra el desgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo en suspensión.

Tabla 4.100. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

V_*	k_s	a	Ca Kgf/m ³	σ_g	D_s	w_s
0.0854	0.0544	0.2403	1.3574	1.2834	0.0002	0.0339

Tabla 4.101. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

β	Z	ψ	z'	A	F	gBS Kgf/s.m	GBS Kgf/s
1.3163	0.7553	0.0678	0.8231	0.0100	0.0498	2.9705	386.9065

Finalmente se logró determinar que el transporte de fondo en suspensión total vendría a ser 386.91 kgf/s.

4.2.6.5 Zona 5.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } k &= 0.4 \\ C_0 &= 1751.7621 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra una tabla en donde se encuentra el desgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.102. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

D_*	τ_c	C'	τ_o'	T	gB	GB
	Kgf/m ²	m ⁻¹ s ⁻¹	Kgf/m ²		Kgf/s. m	Kgf/s
7.1556	0.0207	97.9335	0.3441	15.5964	0.1487	19.3741

De la tabla anterior se logró determinar que el transporte de fondo por arrastre total es 19.37 kgf/s.

A continuación se muestran dos tablas en donde se encuentra el desgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo en suspensión.

Tabla 4.103. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

V_*	k_s	a	Ca	σ_g	D_s	w_s
			Kgf/m ³			
0.0856	0.0655	0.2690	1.2823	1.4144	0.0003	0.0394

Tabla 4.104. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

β	Z	ψ	z'	A	F	gBS	GBS
						Kgf/s.m	Kgf/s
1.4233	0.8081	0.0748	0.8829	0.0100	0.0419	2.6298	342.6394

Finalmente se logró determinar que el transporte de fondo en suspensión total vendría a ser 342.64 kgf/s.

4.2.6.6 Zona 6.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } k &= 0.4 \\ C_o &= 1745.2860 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra una tabla en donde se encuentra el desgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.105. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

D_*	τ_c Kgf/m ²	C' m ⁻¹ s ⁻¹	τ_o' Kgf/m ²	T	gB Kgf/s. m	GB Kgf/s
7.4273	0.0210	97.8343	0.3410	15.2764	0.1502	19.4425

De la tabla anterior se logró determinar que el transporte de fondo por arrastre total es 19.44 kgf/s.

A continuación de muestran dos tablas en donde se encuentra el disgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo en suspensión.

Tabla 4.106. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

V_*	k_s	a	Ca Kgf/m ³	σ_g	D_s	w_s
0.0885	0.0872	0.2588	1.3238	1.4145	0.0003	0.0411

Tabla 4.107. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

β	Z	ψ	z'	A	F	gBS Kgf/s.m	GBS Kgf/s
1.4305	0.8108	0.0764	0.8872	0.0100	0.0414	2.5664	332.2435

Finalmente se logró determinar que el transporte de fondo en suspensión total vendría a ser 332.24 kgf/s.

4.2.6.7 Zona 7.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } k &= 0.4 \\ c_0 &= 1725.8580 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra una tabla en donde se encuentra el disgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.108. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

D_*	τ_c Kgf/m ²	C' m ⁻¹ s ⁻¹	τ_o' Kgf/m ²	T	gB Kgf/s. m	GB Kgf/s
9.6549	0.0235	94.9901	0.3498	13.8913	0.1764	23.0894

De la tabla anterior se logró determinar que el transporte de fondo por arrastre total es 23.09 kgf/s.

A continuación se muestran dos tablas en donde se encuentra el disgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo en suspensión.

Tabla 4.109. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

V_*	k_s	a	Ca Kgf/m ³	σ_g	D_s	w_s
0.0841	0.0612	0.2414	1.4710	1.4971	0.0003	0.0540

Tabla 4.110. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

β	Z	ψ	z'	A	F	gBS Kgf/s.m	GBS Kgf/s
1.8237	0.8797	0.1038	0.9835	0.0100	0.0318	2.0074	262.7252

Finalmente se logró determinar que el transporte de fondo en suspensión total vendría a ser 262.73 kgf/s.

4.2.6.8 Zona 8.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } k &= 0.4 \\ C_0 &= 1758.2381 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra una tabla en donde se encuentra el disgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.111. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

D_*	τ_c Kgf/m ²	C' m ⁻¹ s ⁻¹	τ_o' Kgf/m ²	T	gB Kgf/s. m	GB Kgf/s
9.4639	0.0237	95.0426	0.3417	13.4198	0.1666	21.8458

De la tabla anterior se logró determinar que el transporte de fondo por arrastre total es 21.85 kgf/s.

A continuación se muestran dos tablas en donde se encuentra el disgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo en suspensión.

Tabla 4.112. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

V_*	k_s	a	Ca Kgf/m ³	σ_g	D_s	w_s
0.0824	0.0510	0.2192	1.5301	1.5048	0.0003	0.0535

Tabla 4.113. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

β	Z	ψ	z'	A	F	gBS Kgf/s.m	GBS Kgf/s
1.8433	0.8807	0.1056	0.9863	0.0100	0.0315	1.8608	243.9916

Finalmente se logró determinar que el transporte de fondo en suspensión total vendría a ser 243.99 kgf/s.

4.2.6.9 Zona 9.

$$\begin{aligned} \text{Se calcula } k &= 0.4 \\ C_0 &= 1758.2381 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra una tabla en donde se encuentra el disgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo por arrastre.

Tabla 4.114. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo por arrastre total.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

D_*	τ_c Kgf/m ²	C' m ⁻¹ s ⁻¹	τ_o' Kgf/m ²	T	gB Kgf/s. m	GB Kgf/s
10.0374	0.0245	94.0448	0.2848	10.6189	0.1259	16.4754

De la tabla anterior se logró determinar que el transporte de fondo por arrastre total es 16.48 kgf/s.

A continuación de muestran dos tablas en donde se encuentra el disgregado de los cálculos realizados para el transporte de fondo en suspensión.

Tabla 4.115. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

V_*	k_s	a	Ca Kgf/m ³	σ_g	D_s	w_s
0.0830	0.1227	0.2181	1.1280	1.4006	0.0004	0.0565

Tabla 4.116. *Determinación de transporte de sedimentos de fondo en suspensión total.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

β	Z	ψ	z'	A	F	gBS Kgf/s.m	GBS Kgf/s
1.9290	0.8833	0.0972	0.9805	0.0100	0.0320	1.2524	163.9518

Finalmente se logró determinar que el transporte de fondo en suspensión total vendría a ser 163.95 kgf/s.

4.2.6.10 Zona 10.

No es posible la aplicación del método debido a que una de las restricciones implica que el D50 se encuentre en el intervalo siguiente: $0.2\text{mm} \leq D50 \leq 2\text{mm}$.

4.2.6.11 Resumen de resultados.

A continuación, se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos y se calcula el total de sedimentos que transporta en la sección transversal de estudio.

Tabla 4.117. *Resumen de los resultados.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Zonas	GB (Kgf/s)	GBS (Kgf/s)
Zona 1	-	-
Zona 2	5.41	91.16
Zona 3	9.79	177.09
Zona 4	17.32	386.91
Zona 5	19.37	342.64
Zona 6	19.44	332.24
Zona 7	23.09	262.73
Zona 8	21.85	243.99
Zona 9	16.48	163.95
Zona 10	-	-
Total	132.74	2,000.71

De la tabla anterior se concluye que en la sección transversal de estudio en el río Amazonas se transporta 132.74 kgf/s de sedimentos como concepto de transporte de fondo por arrastre, mientras que 2,000.71 kgf/s de sedimentos por concepto de transporte de sedimentos de fondo en suspensión.

4.3 Transporte de Sedimentos de Lavado

Se analizarán todos los métodos anteriormente descritos en el Capítulo 2, tales como los métodos empíricos, el método de ajuste y el método de índice acústico.

4.3.1 Método de Lane y Kalinske.

Se determinará el transporte de sedimentos de lavado mediante la aplicación de la metodología descrita en el ítem 2.9.1, para esto se aplicará la ecuación 2.157, en donde se considera la determinación de la curva de concentraciones mediante la utilización de dos concentraciones puntuales conocidas, para esto primero se determina la velocidad de caída de las partículas representativas w mediante la aplicación de la ecuación 2.158. Luego con esto se procede a calcular la concentración de sedimentos ubicado justo encima de la capa de fondo C_{2Dm} . Una vez obtenido esto, y ya conociendo el valor del coeficiente de Manning se procede a determinar el valor aproximado de la integral P_1 mediante la

aplicación de la ecuación 2.162. Finalmente se realiza el cálculo del transporte de sedimentos de lavado.

4.3.1.1 Zona 1.

A continuación, se observará el disgregado del cálculo de todas las variables que intervienen en el transporte de sedimentos de lavado.

Tabla 4.118. *Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	Rh	V*	w	2Dm	C _(2Dm)	A
m ² /s	m	m/s	m/s		Kgf/m ³	
17.3614	8.0338	0.0507	0.0019	0.0001	0.4248	0.0000049

Tabla 4.119. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

n	P1	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
0.0294	0.1000	0.7373	95.6488

De la tabla anterior se puede concluir que el transporte de sedimentos de lavado para la Zona 1 es de 95.65 kgf/s.

4.3.1.2 Zona 2.

A continuación, se observará el disgregado del cálculo de todas las variables que intervienen en el transporte de sedimentos de lavado.

Tabla 4.120. *Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	Rh	V*	w	2Dm	C _(2Dm)	A
m ² /s	m	m/s	m/s		Kgf/m ³	
23.5948	17.4363	0.0747	0.0071	0.0004	0.7430	0.0000217

Tabla 4.121. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

n	P1	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
0.0307	0.1007	1.7646	230.0846

De la tabla anterior se puede concluir que el transporte de sedimentos de lavado para la Zona 2 es de 230.08 kgf/s.

Como para esta vertical tenemos una muestra de suspensión a una profundidad de mitad del tirante, es posible realizar una comparación entre la estimación medida en campo y la realizada mediante la curva de concentraciones obtenidas por este método.

Tabla 4.122. *Concentración a mitad del tirante obtenida mediante Lane y Kalinske.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

d/2 m	C(d/2) Kgf/m ³
9.12	0.3644

La concentración medida en campo en el tirante medio fue de 0.397 Kgf/s, con lo que se concluye que la curva de concentraciones estimada presenta un error de tan solo 8.21 %.

4.3.1.3 Zona 3.

A continuación, se observará el disgregado del cálculo de todas las variables que intervienen en el transporte de sedimentos de lavado.

Tabla 4.123. *Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q m ² /s	Rh m	V* m/s	w m/s	2Dm	C _(2Dm) Kgf/m ³	A
33.5971	20.0339	0.0800	0.0080	0.0004	0.8936	0.0000196

Tabla 4.124. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

n	P1	g L Kgf/m.s	GL Kgf/s
0.0296	0.0940	2.8231	366.2093

De la tabla anterior se puede concluir que el transporte de sedimentos de lavado para la Zona 3 es de 366.21 kgf/s.

4.3.1.4 Zona 4.

A continuación, se observará el disgregado del cálculo de todas las variables que intervienen en el transporte de sedimentos de lavado.

Tabla 4.125. *Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	Rh	V*	w	2Dm	C _(2Dm)	A
m ² /s	m	m/s	m/s		Kgf/m ³	
44.0864	22.7783	0.0854	0.0086	0.0004	0.8906	0.0000186

Tabla 4.126. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

n	P1	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
0.0260	0.0814	3.1974	416.4677

De la tabla anterior se puede concluir que el transporte de sedimentos de lavado para la Zona 4 es de 416.47 kgf/s.

Como para esta vertical tenemos una muestra de suspensión a una profundidad de mitad del tirante, es posible realizar una comparación entre la estimación medida en campo y la realizada mediante la curva de concentraciones obtenidas por este método.

Tabla 4.127. *Concentración a mitad del tirante obtenida mediante Lane y Kalinske.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

d/2	C(d/2)
m	Kgf/m ³
9.12	0.4178

La concentración medida en campo en el tirante medio fue de 0.514 Kgf/s, con lo que se concluye que la curva de concentraciones estimada presenta un error de 18.72 %.

4.3.1.5 Zona 5.

A continuación, se observará el disgregado del cálculo de todas las variables que intervienen en el transporte de sedimentos de lavado.

Tabla 4.128. *Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	Rh	V*	w	2Dm	C _(2Dm)	A
m ² /s	m	m/s	m/s		Kgf/m ³	
48.9701	22.9187	0.0856	0.0101	0.0005	1.1534	0.0000196

Tabla 4.129. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

n	P1	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
0.0282	0.0866	4.8936	637.5847

De la tabla anterior se puede concluir que el transporte de sedimentos de lavado para la Zona 5 es de 637.58 kgf/s.

4.3.1.6 Zona 6.

A continuación, se observará el disgregado del cálculo de todas las variables que intervienen en el transporte de sedimentos de lavado.

Tabla 4.130. *Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	Rh	V*	w	2Dm	C _(2Dm)	A
m ² /s	m	m/s	m/s		Kgf/m ³	
46.9002	24.5071	0.0885	0.0136	0.0005	1.6133	0.0000210

Tabla 4.131. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

n	P1	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
0.0276	0.0854	6.4656	837.0370

De la tabla anterior se puede concluir que el transporte de sedimentos de lavado para la Zona 6 es de 837.04 kgf/s.

4.3.1.7 Zona 7.

A continuación, se observará el desgredado del cálculo de todas las variables que intervienen en el transporte de sedimentos de lavado.

Tabla 4.132. *Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	Rh	V*	w	2Dm	C _(2Dm)	A
m ² /s	m	m/s	m/s		Kgf/m ³	
43.0261	22.1364	0.0841	0.0059	0.0007	0.7388	0.0000283

Tabla 4.133. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

n	P1	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
0.0268	0.0839	2.6675	349.1178

De la tabla anterior se puede concluir que el transporte de sedimentos de lavado para la Zona 7 es de 349.12 kgf/s.

4.3.1.8 Zona 8.

A continuación, se observará el desgredado del cálculo de todas las variables que intervienen en el transporte de sedimentos de lavado.

Tabla 4.134. *Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	Rh	V*	w	2Dm	C _(2Dm)	A
m ² /s	m	m/s	m/s		Kgf/m ³	
38.5741	21.2127	0.0824	0.0056	0.0006	0.6559	0.0000293

Tabla 4.135. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

n	P1	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
0.0254	0.0809	2.0462	268.2991

De la tabla anterior se puede concluir que el transporte de sedimentos de lavado para la Zona 8 es de 268.30 kgf/s.

4.3.1.9 Zona 9.

A continuación, se observará el desgredado del cálculo de todas las variables que intervienen en el transporte de sedimentos de lavado.

Tabla 4.136. *Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	Rh	V*	w	2Dm	C _(2Dm)	A
m ² /s	m	m/s	m/s		Kgf/m ³	
34.7267	21.5248	0.0830	0.0090	0.0007	0.9307	0.0000328

Tabla 4.137. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

n	P1	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
0.0280	0.0893	2.8862	377.8386

De la tabla anterior se puede concluir que el transporte de sedimentos de lavado para la Zona 9 es de 377.84 kgf/s.

4.3.1.10 Zona 10.

A continuación, se observará el desgredado del cálculo de todas las variables que intervienen en el transporte de sedimentos de lavado.

Tabla 4.138. *Determinación de la velocidad de caída, la concentración por encima de la capa de fondo y el parámetro de cambio A.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	Rh	V*	w	2Dm	C _(2Dm)	A
m ² /s	m	m/s	m/s		Kgf/m ³	
15.8998	6.6502	0.0461	0.0072	0.0000	1.1480	0.0000012

Tabla 4.139. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

n	P1	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
0.0332	0.1124	2.0523	266.4554

De la tabla anterior se puede concluir que el transporte de sedimentos de lavado para la Zona 10 es de 266.46 kgf/s.

4.3.1.11 Resumen de resultados.

A continuación, se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos y se calcula el total de sedimentos de lavado que se transporta en la sección transversal de estudio.

Tabla 4.140. *Resumen de los resultados.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Zonas	GL (Kgf/s)
Zona 1	95.65
Zona 2	230.08
Zona 3	366.21
Zona 4	416.47
Zona 5	637.58
Zona 6	837.04
Zona 7	349.12
Zona 8	268.30
Zona 9	377.84
Zona 10	266.46
Total	3,844.74

De la tabla anterior se concluye que en la sección transversal de estudio en el río Amazonas se transporta 3,844.74 kgf/s de sedimentos como concepto de transporte de sedimentos de lavado en suspensión.

4.3.2 Método de Einstein.

Se determinará el transporte de sedimentos de lavado mediante la aplicación de la metodología descrita en el ítem 2.9.2, para lo cual se utilizará la Ec. 2.164 en donde es necesario estimar la velocidad cortante asociada a las partículas, la concentración de sedimentos en el extremo superior de la capa de fondo, la variable z relacionada a la velocidad de caída de las partículas y las integrales J_1 y J_2 las cuales fueron calculadas en el Método de Einstein para transporte de fondo.

4.3.2.1 Zona 1.

En la Zona 1 no es posible determinar las variables necesarias para utilizar el método de Einstein, debido a que no se puede determinar un valor de k/δ'_0 , el cual relaciona la

rugosidad del fondo y la subcapa viscosa, este valor tiene que ser mayor a 0.32 como mínimo para poder determinar los factores de corrección x e Y .

4.3.2.2 Zona 2.

En la siguiente tabla se muestra el desglose del cálculo del transporte de lavado.

Tabla 4.141. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

z	$2D_{65}$	$C(2D_{65})$	A	$g L$	GL
	m	(Kgf/m ³)		Kgf/m.s	Kgf/s
0.3429	0.0005	13.7424	0.0000252	110.9778	14470.3974

De la tabla anterior se concluye que el transporte de lavado para la Zona 2 es de 14470.40 kgf/s

Como para esta vertical tenemos una muestra de suspensión a una profundidad de mitad del tirante, es posible realizar una comparación entre la estimación medida en campo y la realizada mediante la curva de concentraciones obtenidas por este método.

Tabla 4.142. *Concentración a mitad del tirante obtenida mediante Einstein.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

$d/2$	$C(d/2)$
m	Kgf/m ³
9	0.3641

La concentración medida en campo en el tirante medio fue de 0.397 Kgf/s, con lo que se concluye que la curva de concentraciones estimada presenta un error de tan solo 8%.

Así mismo ya que contamos con las mediciones de velocidades puntuales con el ADCP, analizaremos el grado de certeza que cuenta la estimación de la ecuación de distribución de velocidades en la vertical. La distribución utilizada por Einstein corresponde a la de Keulegan.

Tabla 4.143. Comparación de la velocidad obtenidas por el perfil utilizado por Einstein y obtenidas por el ADCP.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Profundidad	y o a	Velocidad ADCP	Velocidad Ecuación	Error
d/3	12	1.34	1.47	-9%
d/2	9	0.89	1.44	-61%
2d/3	6	0.67	1.40	-109%

Como se logra observar en la tabla anterior las estimaciones de las velocidades obtenidas producto de la ecuación de distribución de velocidad presenta un error de hasta 100 %.

4.3.2.3 Zona 3.

En la siguiente tabla se muestra el desglose del cálculo del transporte de lavado.

Tabla 4.144. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

z	2D ₆₅	C(2D ₆₅)	A	g L	GL
	m	(Kgf/m ³)		Kgf/m.s	Kgf/s
0.3589	0.0005	19.5825	0.0000226	202.9597	26,327.9321

De la tabla anterior se concluye que el transporte de lavado para la Zona 3 es de 26,327.93 kgf/s.

4.3.2.4 Zona 4.

En la siguiente tabla se muestra el desglose del cálculo del transporte de lavado.

Tabla 4.145. Determinación del transporte de sedimentos de lavado.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

z	2D ₆₅	C(2D ₆₅)	A	g L	GL
	m	(Kgf/m ³)		Kgf/m.s	Kgf/s
0.3641	0.0005	21.4712	0.0000200	146.8074	19,121.6586

De la tabla anterior se concluye que el transporte de lavado para la Zona 4 es de 19,121.66 kgf/s.

Como para esta vertical tenemos una muestra de suspensión a una profundidad de mitad del tirante, es posible realizar una comparación entre la estimación medida en campo y la realizada mediante la curva de concentraciones obtenidas por este método.

Tabla 4.146. *Concentración a mitad del tirante obtenida mediante Einstein.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

d/2 m	C(d/2) Kgf/m ³
12	0.4177

La concentración medida en campo en el tirante medio fue de 0.514 Kgf/s, con lo que se concluye que la curva de concentraciones estimada presenta un error de 20 % aproximadamente.

Así mismo ya que contamos con las mediciones de velocidades puntuales con el ADCP, analizaremos el grado de certeza que cuenta la estimación de la ecuación de distribución de velocidades en la vertical. La distribución utilizada por Einstein corresponde a la de Keulegan.

Tabla 4.147. *Comparación de la velocidad obtenidas por el perfil utilizado por Einstein y obtenidas por el ADCP.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Profundidad	y o a	Velocidad ADCP	Velocidad Ecuación	Error
d/3	16	1.90	2.02	-7%
d/2	12	1.33	1.98	-50%
2d/3	8	1.18	1.93	-64%

Como se logra observar en la tabla anterior las estimaciones de las velocidades obtenidas producto de la ecuación de distribución de velocidad presenta un error de hasta 64 %.

4.3.2.5 Zona 5.

En la siguiente tabla se muestra el disgregado del cálculo del transporte de lavado.

Tabla 4.148. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

z	2D ₆₅	C(2D ₆₅)	A	g L	GL
	m	(Kgf/m ³)		Kgf/m.s	Kgf/s
0.4243	0.0006	45.5826	0.0000216	601.0212	78,307.05

De la tabla anterior se concluye que el transporte de lavado para la Zona 5 es de 78,307.05 kgf/s.

4.3.2.6 Zona 6.

En la siguiente tabla se muestra el disgregado del cálculo del transporte de lavado.

Tabla 4.149. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

z	2D ₆₅	C(2D ₆₅)	A	g L	GL
	m	(Kgf/m ³)		Kgf/m.s	Kgf/s
0.5553	0.0006	188.3418	0.0000240	735.9487	95,275.9209

De la tabla anterior se concluye que el transporte de lavado para la Zona 6 es de 95,275.92 kgf/s.

4.3.2.7 Zona 7.

En la siguiente tabla se muestra el disgregado del cálculo del transporte de lavado.

Tabla 4.150. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

z	2D ₆₅	C(2D ₆₅)	A	g L	GL
	m	(Kgf/m ³)		Kgf/m.s	Kgf/s
0.2549	0.0007	6.1502	0.0000307	4,051.2198	530,223.6489

De la tabla anterior se concluye que el transporte de lavado para la Zona 7 es de 530,223.65 kgf/s.

4.3.2.8 Zona 8.

En la siguiente tabla se muestra el disgregado del cálculo del transporte de lavado.

Tabla 4.151. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

z	2D ₆₅	C(2D ₆₅)	A	g L	GL
	m	(Kgf/m ³)		Kgf/m.s	Kgf/s
0.2426	0.0007	4.8266	0.0000328	3,747.8982	491,424.4057

De la tabla anterior se concluye que el transporte de lavado para la Zona 8 es de 491,424.41 kgf/s.

4.3.2.9 Zona 9.

En la siguiente tabla se muestra el desglose del cálculo del transporte de lavado.

Tabla 4.152. *Determinación del transporte de sedimentos de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

z	$2D_{65}$	$C(2D_{65})$	A	g L	GL
	m	(Kgf/m ³)		Kgf/m.s	Kgf/s
0.3866	0.0008	21.8994	0.0000348	5,588.0554	731,532.3375

De la tabla anterior se concluye que el transporte de lavado para la Zona 9 es de 731,532.34 kgf/s.

4.3.2.10 Zona 10.

En la Zona 10 no es posible determinar las variables necesarias para utilizar el método de Einstein, debido a que no se puede determinar un valor de k/δ'_0 , el cual relaciona la rugosidad del fondo y la subcapa viscosa, este valor tiene que ser mayor a 0.32 como mínimo para poder determinar los factores de corrección x e Y .

4.3.2.11 Resumen de resultados.

A continuación, se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos y se calcula el total de sedimentos de lavado que se transporta en la sección transversal de estudio.

Tabla 4.153. *Resumen de los resultados.*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Zonas	GL (Kgf/s)
Zona 1	0.00
Zona 2	14,470.40
Zona 3	26,327.93
Zona 4	19,121.66
Zona 5	78,307.05
Zona 6	95,275.65
Zona 7	530,223.65
Zona 8	491,424.41
Zona 9	731,532.34
Zona 10	0.00
Total	1'986,683.08

De la tabla anterior se concluye que en la sección transversal de estudio en el río Amazonas se transporta 1'986,683.08 Kgf/s de sedimentos como concepto de transporte de sedimentos de lavado en suspensión.

4.3.3 Método de Brooks.

Para la estimación del transporte de lavado se utilizará el método descrito en el ítem 2.9.3 con la aplicación de la Ec. 2.170, para esto es necesario la determinación de la variable asociada a la velocidad de caída de las partículas z , para posteriormente determinar la concentración de sedimentos a mitad del tirante. Posteriormente se determina el valor de la función f mediante la aplicación de la figura 2.26.

4.3.3.1 Zona 1.

En la tabla siguiente se muestra el desglose de los cálculos de la variable asociada a la velocidad de caída, así como de la concentración de sedimentos en el tirante medio.

Tabla 4.154. *Determinación de z y $C(d/2)$.*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	R	V*	z	d/2	C(d/2)
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)
17.3614	8.0338	0.0507	0.1357	7.4000	0.3204

Así también, se muestra en la siguiente tabla la estimación del transporte de lavado total.

Tabla 4.155. *Determinación del transporte.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

kV/V^*	$f(z, Kv/V^*)$	$g L$ Kgf/m.s	GL Kgf/s
9.2330	1.0000	5.5621	721.5674

De la tabla anterior se concluye que el transporte de sedimentos de lavado es 721.57 kgf/s.

4.3.3.2 Zona 2.

En la tabla siguiente se muestra el desglose de los cálculos de la variable asociada a la velocidad de caída, así como de la concentración de sedimentos en el tirante medio.

Tabla 4.156. *Determinación de z y C(d/2).*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q m2/s	R m	V^* m/s	z	d/2 m	C(d/2) (Kgf/m3)
23.5948	17.4363	0.0747	0.3429	9.1200	0.3641

Así también, se muestra en la siguiente tabla la estimación del transporte de lavado total.

Tabla 4.157. *Determinación del transporte.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

kV/V^*	$f(z, Kv/V^*)$	$g L$ Kgf/m.s	GL Kgf/s
6.9100	1.2000	10.3104	1,344.37

De la tabla anterior se concluye que el transporte de sedimentos de lavado es 1,344.37 kgf/s.

Como para esta vertical tenemos una muestra de suspensión a una profundidad de mitad del tirante, es posible realizar una comparación entre la estimación medida en campo y la realizada mediante la curva de concentraciones obtenidas por este método.

La concentración medida en campo en el tirante medio fue de 0.397 Kgf/s, con lo que se concluye que la curva de concentraciones estimada presenta un error de 9 %.

Así mismo ya que contamos con las mediciones de velocidades puntuales con el ADCP, analizaremos el grado de certeza que cuenta la estimación de la ecuación de distribución de velocidades en la vertical. La distribución utilizada por Brooks corresponde a la de Prandtl-von-Karman.

Tabla 4.158. Comparación de la velocidad obtenidas por el perfil utilizado por Einstein y obtenidas por el ADCP.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Profundidad	y o a	Velocidad ADCP	Velocidad Ecuación	Error
d/3	12	1.34	1.40	-4%
d/2	9	0.89	1.34	-51%
2d/3	6	0.67	1.27	-90%

Como se logra observar en la tabla anterior las estimaciones de las velocidades obtenidas producto de la ecuación de distribución de velocidad presenta un error de hasta 90 %.

4.3.3.3 Zona 3.

En la tabla siguiente se muestra el desglose de los cálculos de la variable asociada a la velocidad de caída, así como de la concentración de sedimentos en el tirante medio.

Tabla 4.159. Determinación de z y $C(d/2)$.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

q	R	V*	z	d/2	C(d/2)
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)
33.5971	20.0339	0.0800	0.3589	11.0500	0.4212

Así también, se muestra en la siguiente tabla la estimación del transporte de lavado total.

Tabla 4.160. Determinación del transporte.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

kV/V*	f(z, Kv/V*)	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
7.5959	1.25	17.6874	2,294.4052

De la tabla anterior se concluye que el transporte de sedimentos de lavado es 2,294.41 kgf/s.

4.3.3.4 Zona 4.

En la tabla siguiente se muestra el desglose de los cálculos de la variable asociada a la velocidad de caída, así como de la concentración de sedimentos en el tirante medio.

Tabla 4.161. *Determinación de z y C(d/2).*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	R	V*	z	d/2	C(d/2)
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)
44.0864	22.7783	0.0854	0.3641	12.0150	0.4177

Así también, se muestra en la siguiente tabla la estimación del transporte de lavado total.

Tabla 4.162. *Determinación del transporte.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

kV/V*	f(z,Kv/V*)	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
8.5764	1.25	23.0199	2,998.3403

De la tabla anterior se concluye que el transporte de sedimentos de lavado es 2,998.34 kgf/s.

Como para esta vertical tenemos una muestra de suspensión a una profundidad de mitad del tirante, es posible realizar una comparación entre la estimación medida en campo y la realizada mediante la curva de concentraciones obtenidas por este método.

La concentración medida en campo en el tirante medio fue de 0.514 Kgf/s, con lo que se concluye que la curva de concentraciones estimada presenta un error de 18.74 %.

Así mismo ya que contamos con las mediciones de velocidades puntuales con el ADCP, analizaremos el grado de certeza que cuenta la estimación de la ecuación de distribución de velocidades en la vertical. La distribución utilizada por Brooks corresponde a la de Prandtl-von-Karman.

Tabla 4.163. Comparación de la velocidad obtenidas por el perfil utilizado por Einstein y obtenidas por el ADCP.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Profundidad	y o a	Velocidad ADCP	Velocidad Ecuación	Error
d/3	16	1.90	1.96	-3%
d/2	12	1.33	1.90	-43%
2d/3	8	1.18	1.81	-54%

Como se logra observar en la tabla anterior las estimaciones de las velocidades obtenidas producto de la ecuación de distribución de velocidad presenta un error de hasta 54 %.

4.3.3.5 Zona 5.

En la tabla siguiente se muestra el desglose de los cálculos de la variable asociada a la velocidad de caída, así como de la concentración de sedimentos en el tirante medio.

Tabla 4.164. Determinación de z y $C(d/2)$.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

q	R	V*	z	d/2	C(d/2)
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)
48.9701	22.9187	0.0856	0.4243	13.4500	0.4773

Así también, se muestra en la siguiente tabla la estimación del transporte de lavado total.

Tabla 4.165. Determinación del transporte.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

kV/V*	f(z, Kv/V*)	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
8.5034	1.25	29.2170	3,806.6886

De la tabla anterior se concluye que el transporte de sedimentos de lavado es 3,806.69 kgf/s.

4.3.3.6 Zona 6.

En la tabla siguiente se muestra el desglose de los cálculos de la variable asociada a la velocidad de caída, así como de la concentración de sedimentos en el tirante medio.

Tabla 4.166. *Determinación de z y C(d/2).*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	R	V*	z	d/2	C(d/2)
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)
46.9002	24.5071	0.0885	0.5553	12.9400	0.5120

Así también, se muestra en la siguiente tabla la estimación del transporte de lavado total.

Tabla 4.167. *Determinación del transporte.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

kV/V*	f(z, Kv/V*)	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
8.1780	1.50	36.0198	4,663.1203

De la tabla anterior se concluye que el transporte de sedimentos de lavado es 4,663.12 kgf/s.

4.3.3.7 Zona 7.

En la tabla siguiente se muestra el desglose de los cálculos de la variable asociada a la velocidad de caída, así como de la concentración de sedimentos en el tirante medio.

Tabla 4.168. *Determinación de z y C(d/2).*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	R	V*	z	d/2	C(d/2)
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)
43.0261	22.1364	0.0841	0.2549	12.0700	0.4348

Así también, se muestra en la siguiente tabla la estimación del transporte de lavado total.

Tabla 4.169. *Determinación del transporte.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

kV/V*	f(z, Kv/V*)	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
8.4622	1.10	20.5790	2,693.3815

De la tabla anterior se concluye que el transporte de sedimentos de lavado es 2,693.38 kgf/s.

4.3.3.8 Zona 8.

En la tabla siguiente se muestra el desglose de los cálculos de la variable asociada a la velocidad de caída, así como de la concentración de sedimentos en el tirante medio.

Tabla 4.170. *Determinación de z y C(d/2).*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	R	V*	z	d/2	C(d/2)
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)
38.5741	21.2127	0.0824	0.2426	10.9600	0.3945

Así también, se muestra en la siguiente tabla la estimación del transporte de lavado total.

Tabla 4.171. *Determinación del transporte.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

kV/V*	f(z,Kv/V*)	g L	GL
		Kgf/m.s	Kgf/s
8.5474	1.10	16.7393	2,194.8615

De la tabla anterior se concluye que el transporte de sedimentos de lavado es 2,194.86 kgf/s.

4.3.3.9 Zona 9.

En la tabla siguiente se muestra el desglose de los cálculos de la variable asociada a la velocidad de caída, así como de la concentración de sedimentos en el tirante medio.

Tabla 4.172. *Determinación de z y C(d/2).*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	R	V*	z	d/2	C(d/2)
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)
34.7267	21.5248	0.0830	0.3866	10.9050	0.4139

Así también, se muestra en la siguiente tabla la estimación del transporte de lavado total.

Tabla 4.173. *Determinación del transporte de lavado.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

kV/V*	f(z,Kv/V*)	g L Kgf/m.s	GL Kgf/s
7.6656	1.20	17.2480	2,257.9296

De la tabla anterior se concluye que el transporte de sedimentos de lavado es 2,257.93 kgf/s.

4.3.3.10 Zona 10.

En la tabla siguiente se muestra el desglose de los cálculos de la variable asociada a la velocidad de caída, así como de la concentración de sedimentos en el tirante medio.

Tabla 4.174. *Determinación de z y C(d/2).*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q m2/s	R m	V* m/s	z	d/2 m	C(d/2) (Kgf/m3)
15.8998	6.6502	0.0461	0.5662	7.5400	0.3536

Así también, se muestra en la siguiente tabla la estimación del transporte de lavado total.

Tabla 4.175. *Determinación del transporte de lavado.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

kV/V*	f(z,Kv/V*)	g L Kgf/m.s	GL Kgf/s
9.1073	1.55	8.7155	1,131.5352

De la tabla anterior se concluye que el transporte de sedimentos de lavado es 1,131.54 kgf/s.

Resumen de resultados. A continuación, se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos y se calcula el total de sedimentos de lavado que se transporta en la sección transversal de estudio.

Tabla 4.176. *Resumen de los resultados.*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Zonas	GL (Kgf/s)
Zona 1	721.57
Zona 2	1,344.37
Zona 3	2,294.41
Zona 4	2,998.34
Zona 5	3,806.69
Zona 6	4,663.12
Zona 7	2,693.38
Zona 8	2,194.86
Zona 9	2,257.93
Zona 10	1,131.54
Total	24,106.20

De la tabla anterior se concluye que en la sección transversal de estudio en el río Amazonas se transporta 24,106.20 kgf/s de sedimentos como concepto de transporte de sedimentos de lavado en suspensión.

4.3.4 Método de Chang, Simons y Richardson.

Para la determinación del transporte de lavado se utilizará el método descrito en el ítem 2.9.4, mediante la aplicación de la ecuación 2.175, para esto se determinarán las variables que intervienen el cálculo, tales como la variable asociada a la velocidad de caída z_2 , la concentración en el borde superior de la capa de fondo C_{ab} , el coeficiente de von Karman y la solución de las integrales I3 e I4 mediante la aplicación de las figuras 2.28 y 2.29 respectivamente.

4.3.4.1 Zona 1.

En las siguientes tablas se podrá observar el desglose de los cálculos para la determinación del transporte de lavado.

Tabla 4.177. *Determinación del espesor de la capa de fondo ab.*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

w_e	D_e	t_c	ab
m/s	m	Kgf/m ²	m
0.000027	0.0005	0.1084	0.0072

Tabla 4.178. *Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	R	V*	z2	ab	C(ab)	V*De/v
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)	
17.3614	8.0338	0.0507	0.3886	0.0072	1.3005	30.6535

Tabla 4.179. *Determinación del transporte de lavado.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

A	k	I3	I4	g L	GL
				Kgf/m.s	Kgf/s
0.0005	0.2300	0.28	0.033	6.0256	781.7019

Finalmente, de la última tabla se logra estimar que el transporte de fondo de lavado es de 781.70 kgf/s.

4.3.4.2 Zona 2.

En las siguientes tablas se podrá observar el disgregado de los cálculos para la determinación del transporte de lavado.

Tabla 4.180. *Determinación del espesor de la capa de fondo ab.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

w _e	D _e	t _c	ab
m/s	m	Kgf/m ²	m
0.000276	0.0011	0.1653	0.0259

Tabla 4.181. *Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	R	V*	z2	ab	C(ab)	V*De/v
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)	
23.5948	17.4363	0.0747	0.9675	0.0259	7.0964	94.4300

Tabla 4.182. *Determinación del transporte de lavado.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

A	k	I3	I4	g L	GL
				Kgf/m.s	Kgf/s
0.0014	0.2300	0.07	0.027	9.4190	1,228.1445

Finalmente, de la última tabla se logra estimar que el transporte de fondo de lavado es de 1,228.14 kgf/s.

Como para esta vertical tenemos una muestra sedimentos en suspensión a una profundidad de mitad del tirante, es posible realizar una comparación entre la estimación medida en campo y la realizada mediante la curva de concentraciones obtenidas por este método.

Tabla 4.183. *Concentración a mitad del tirante obtenida mediante Chang, Simons y Richardson.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

d/2 m	C(d/2) Kgf/m ³
9.1200	0.3571

La concentración medida en campo en el tirante medio fue de 0.397 Kgf/s, con lo que se concluye que la curva de concentraciones estimada presenta un error de 10 %.

Así mismo ya que contamos con las mediciones de velocidades puntuales con el ADCP, analizaremos el grado de certeza que cuenta la estimación de la ecuación de distribución de velocidades en la vertical. La distribución utilizada por ellos fue una propia.

Tabla 4.184. *Comparación de la velocidad obtenidas por el perfil utilizado por Chang, Simons y Richardson y obtenidas por el ADCP.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Profundidad	y o a	Velocidad ADCP	Velocidad Ecuación	Error
d/3	12	1.34	1.45	-8%
d/2	9	0.89	1.39	-56%
2d/3	6	0.67	1.29	-93%

Como se logra observar en la tabla anterior las estimaciones de las velocidades obtenidas producto de la ecuación de distribución de velocidad presenta un error de hasta 93 %.

4.3.4.3 Zona 3.

En las siguientes tablas se podrá observar el desgredado de los cálculos para la determinación del transporte de lavado.

Tabla 4.185. *Determinación del espesor de la capa de fondo ab.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

w_e	D_e	t_c	ab
m/s	m	Kgf/m ²	m
0.000302	0.0012	0.1799	0.0317

Tabla 4.186. *Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	R	V*	z2	ab	C(ab)	V*De/v
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)	
33.5971	20.0339	0.0800	1.0186	0.0317	9.5023	114.8850

Tabla 4.187. *Determinación del transporte de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

A	k	I3	I4	g L	GL
				Kgf/m.s	Kgf/s
0.0014	0.2300	0.07	0.027	18.3975	2,386.5237

Finalmente, de la última tabla se logra estimar que el transporte de fondo de lavado es de 2,386.52 kgf/s.

4.3.4.4 Zona 4.

En las siguientes tablas se podrá observar el desgredado de los cálculos para la determinación del transporte de lavado.

Tabla 4.188. *Determinación del espesor de la capa de fondo ab.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

w_e	D_e	t_c	ab
m/s	m	Kgf/m ²	m
0.000318	0.0011	0.1731	0.0375

Tabla 4.189. *Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	R	V*	z2	ab	C(ab)	V*De/v
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)	
44.0864	22.7783	0.0854	1.0040	0.0375	8.7979	115.7461

Tabla 4.190. *Determinación del transporte de lavado.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

A	k	I3	I4	g L Kgf/m.s	GL Kgf/s
0.0016	0.2300	0.071	0.028	21.8733	2,848.9977

Finalmente, de la última tabla se logra estimar que el transporte de fondo de lavado es de 2,849.00 kgf/s.

Como para esta vertical tenemos una muestra de suspensión a una profundidad de mitad del tirante, es posible realizar una comparación entre la estimación medida en campo y la realizada mediante la curva de concentraciones obtenidas por este método.

Tabla 4.191. *Concentración a mitad del tirante obtenida mediante Chang, Simons y Richardson.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

d/2 m	C(d/2) Kgf/m ³
9.1200	0.4259

La concentración medida en campo en el tirante medio fue de 0.514 Kgf/s, con lo que se concluye que la curva de concentraciones estimada presenta un error de 17 %.

Así mismo ya que contamos con las mediciones de velocidades puntuales con el ADCP, analizaremos el grado de certeza que cuenta la estimación de la ecuación de distribución de velocidades en la vertical. La distribución utilizada fue propuesta por ellos mismos.

Tabla 4.192. *Comparación de la velocidad obtenidas por el perfil utilizado por Chang, Simons y Richardson y obtenidas por el ADCP.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Profundidad	y o a	Velocidad ADCP	Velocidad Ecuación	Error
d/3	16	1.90	2.03	-7%
d/2	12	1.33	1.96	-48%
2d/3	8	1.18	1.85	-57%

Como se logra observar en la tabla anterior las estimaciones de las velocidades obtenidas producto de la ecuación de distribución de velocidad presenta un error de hasta 57 %.

4.3.4.5 Zona 5.

En las siguientes tablas se podrá observar el desgredado de los cálculos para la determinación del transporte de lavado.

Tabla 4.193. *Determinación del espesor de la capa de fondo ab.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

w_e	D_e	t_c	ab
m/s	m	Kgf/m ²	m
0.000371	0.0014	0.2021	0.0385

Tabla 4.194. *Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	R	V*	z2	ab	C(ab)	V*De/v
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)	
48.9701	22.9187	0.0856	1.2086	0.0385	19.3898	145.3367

Tabla 4.195. *Determinación del transporte de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

A	k	I3	I4	g L	GL
				Kgf/m.s	Kgf/s
0.0014	0.2300	0.035	0.023	24.2941	3,165.2743

Finalmente, de la última tabla se logra estimar que el transporte de fondo de lavado es de 3,165.27 kgf/s.

4.3.4.6 Zona 6.

En las siguientes tablas se podrá observar el desgredado de los cálculos para la determinación del transporte de lavado.

Tabla 4.196. *Determinación del espesor de la capa de fondo ab.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

w_e	D_e	t_c	ab
m/s	m	Kgf/m ²	m
0.000383	0.0014	0.2036	0.0422

Tabla 4.197. *Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	R	V*	z2	ab	C(ab)	V*De/v
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)	
46.9002	24.5071	0.0885	1.5811	0.0422	59.0897	151.8961

Tabla 4.198. *Determinación del transporte de lavado.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

A	k	I3	I4	g L	GL
				Kgf/m.s	Kgf/s
0.0016	0.2300	0.016	0.018	23.0964	2,990.0620

Finalmente, de la última tabla se logra estimar que el transporte de fondo de lavado es de 2,990.06 kgf/s.

4.3.4.7 Zona 7.

En las siguientes tablas se podrá observar el disgregado de los cálculos para la determinación del transporte de lavado.

Tabla 4.199. *Determinación del espesor de la capa de fondo ab.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

w _e	D _e	t _c	ab
m/s	m	Kgf/m ²	m
0.000459	0.0020	0.2539	0.0360

Tabla 4.200. *Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q	R	V*	z2	ab	C(ab)	V*De/v
m ² /s	m	m/s		m	(Kgf/m ³)	
43.0261	22.1364	0.0841	0.7222	0.0360	3.9222	195.4856

Tabla 4.201. *Determinación del transporte de lavado.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

A	k	I3	I4	g L	GL
				Kgf/m.s	Kgf/s
0.0015	0.2300	0.15	0.035	22.8554	2,991.3207

Finalmente, de la última tabla se logra estimar que el transporte de fondo de lavado es de 2,991.32 kgf/s.

4.3.4.8 Zona 8.

En las siguientes tablas se podrá observar el desgregado de los cálculos para la determinación del transporte de lavado.

Tabla 4.202. *Determinación del espesor de la capa de fondo ab.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

w_e m/s	D_e m	t_c Kgf/m ²	ab m
0.000445	0.0018	0.2395	0.0340

Tabla 4.203. *Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q m ² /s	R m	V* m/s	z ²	ab m	C(ab) (Kgf/m ³)	V*De/v
38.5741	21.2127	0.0824	0.6916	0.0340	3.1844	176.9328

Tabla 4.204. *Determinación del transporte de lavado.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

A	k	I3	I4	g L Kgf/m.s	GL Kgf/s
0.0016	0.2300	0.16	0.036	17.8566	2,341.3633

Finalmente, de la última tabla se logra estimar que el transporte de fondo de lavado es de 2,341.36 kgf/s.

4.3.4.9 Zona 9.

En las siguientes tablas se podrá observar el desgregado de los cálculos para la determinación del transporte de lavado.

Tabla 4.205. *Determinación del espesor de la capa de fondo ab.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

w_e m/s	D_e m	t_c Kgf/m ²	ab m
0.000489	0.0020	0.2582	0.0343

Tabla 4.206. *Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q m ² /s	R m	V* m/s	z ²	ab m	C(ab) (Kgf/m ³)	V*De/v
34.7267	21.5248	0.0830	1.1056	0.0343	11.5818	197.1941

Tabla 4.207. *Determinación del transporte de lavado.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

A	k	I3	I4	g L Kgf/m.s	GL Kgf/s
0.0016	0.2300	0.055	0.026	17.3515	2,271.4794

Finalmente, de la última tabla se logra estimar que el transporte de fondo de lavado es de 2,271.48 kgf/s.

4.3.4.10 Zona 10.

En las siguientes tablas se podrá observar el desglose de los cálculos para la determinación del transporte de lavado.

Tabla 4.208. *Determinación del espesor de la capa de fondo ab.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

w _e m/s	D _e m	t _c Kgf/m ²	ab m
0.000002	0.0002	0.0768	0.0029

Tabla 4.209. *Determinación de la concentración en el borde superior de la capa de fondo.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

q m ² /s	R m	V* m/s	z ₂	ab m	C(ab) (Kgf/m ³)	V*De/v
15.8998	6.6502	0.0461	1.6047	0.0029	242.4010	8.7395

Tabla 4.210. *Determinación del transporte de lavado.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

A	k	I3	I4	g L Kgf/m.s	GL Kgf/s
0.0002	0.3300	0.004	0.005	10.2443	1,330.0214

Finalmente, de la última tabla se logra estimar que el transporte de fondo de lavado es de 1,330.02 kgf/s.

4.3.4.11 Resumen de resultados.

A continuación, se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos y se calcula el total de sedimentos de lavado que se transporta en la sección transversal de estudio.

Tabla 4.211. *Resumen de los resultados.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Zonas	GL (Kgf/s)
Zona 1	781.70
Zona 2	1,228.14
Zona 3	2,386.52
Zona 4	2,849.00
Zona 5	3,165.27
Zona 6	2,990.06
Zona 7	2,991.32
Zona 8	2,341.36
Zona 9	2,271.48
Zona 10	1,330.02
Total	22,334.89

De la tabla anterior se concluye que en la sección transversal de estudio en el río Amazonas se transporta 22,334.89 Kgf/s de sedimentos como concepto de transporte de sedimentos de lavado en suspensión.

4.3.5 Método de ajuste mediante datos del ADCP.

4.3.5.1 Zona 1.

A continuación, se mostrará una tabla en donde se observarán las velocidades obtenidas por el ADCP en la vertical representativa de la zona 1, con la finalidad de determinar los coeficientes experimentales del perfil de velocidades para esta vertical, tal y como se indicó en el Capítulo 2.

Tabla 4.212. *Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 1.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Profundidad en el centro de la celda	V (m/s)	y (m)	Ln (y)
1.49	1.359	14.25	2.66
1.99	1.441	13.75	2.62
2.49	1.313	13.25	2.58
2.99	1.483	12.75	2.55
3.49	1.662	12.25	2.51
3.99	1.008	11.75	2.46
4.49	1.692	11.25	2.42
4.99	1.619	10.75	2.37
5.49	1.426	10.25	2.33
5.99	1.081	9.75	2.28
6.49	1.193	9.25	2.22
6.99	1.215	8.75	2.17
7.49	1.355	8.25	2.11
7.99	1.269	7.75	2.05
8.49	1.283	7.25	1.98
8.99	1.156	6.75	1.91
9.49	1.457	6.25	1.83
9.99	1.351	5.75	1.75
10.49	1.329	5.25	1.66
10.99	1.174	4.75	1.56
11.49	1.267	4.25	1.45
11.99	1.084	3.75	1.32
12.49	1.063	3.25	1.18
12.99	1.288	2.75	1.01
13.49	1.056	2.25	0.81
13.99	1.070	1.75	0.56
14.49	1.015	1.25	0.22
14.99	0.824	0.75	-0.29
15.49	0.644	0.25	-1.39

Graficando las velocidades en función de la profundidad (ver figura 4.1) obtenemos:

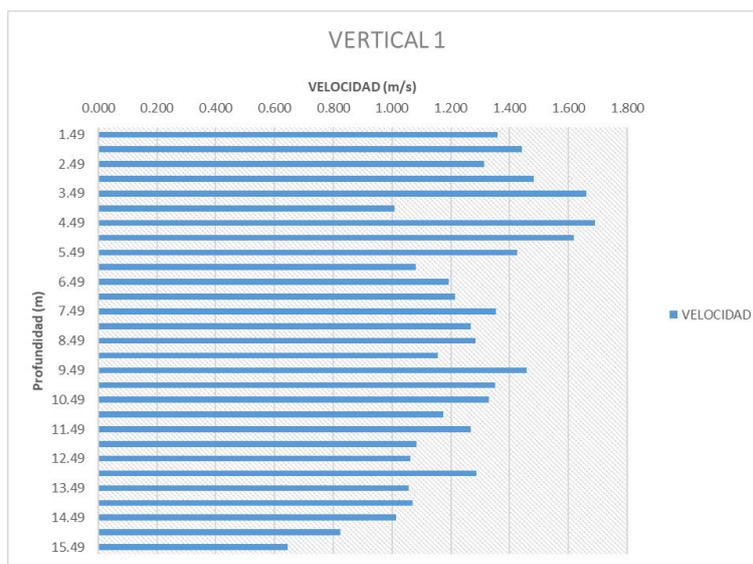


Figura 4.1. Perfil de velocidades zona 1. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Graficando la velocidad vs el logaritmo natural de la distancia medida desde el fondo hasta el centro de la celda (ver figura 4.2), obtenemos:

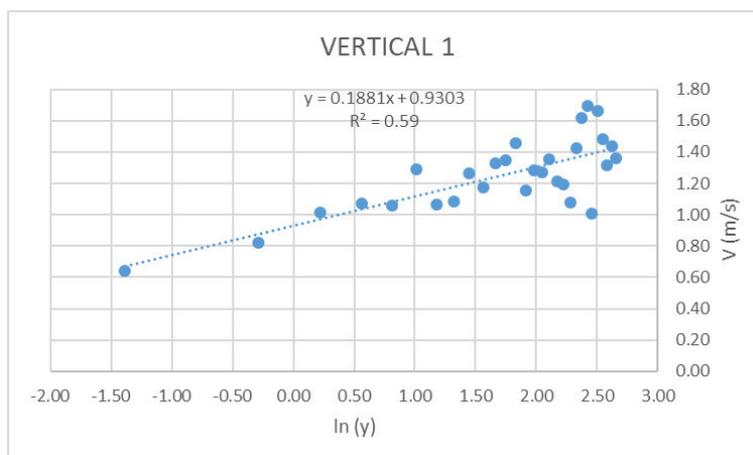


Figura 4.2. Ln(Y) vs Velocidad. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Como resultado obtenemos un coeficiente de determinación de $R^2=0.59$, lo que indica que tenemos una correlación entre ambas variables de 76 %, lo cual a su vez expresa una buena correlación.

Luego del análisis de regresión lineal obtenemos que la ecuación que define el perfil de velocidades en la vertical 1 es la siguiente:

$$V_y = 0.1882 \ln y + 0.9301 \quad [\text{Ec. 4.1}]$$

Ahora utilizando la ecuación de distribución de concentraciones de Lane y Kalinske y las muestras de concentración tomadas en la vertical 1 a 1/3 y 2/3 de profundidad, tenemos lo siguiente:

$$C_y = 0.2900 e^{-0.5702 \left(\frac{y-10.4933}{15.7400} \right)} \quad [\text{Ec. 4.2}]$$

Ahora utilizando la ecuación 2.187 de transporte de lavado por unidad de ancho para flujo bidimensional en superficie libre por encima de la capa de fondo y reemplazando las ecuaciones 4.1 y 4.2 y considerando que a vendría a representar el espesor de la capa de fondo, el cual según Einstein está definido por $2D_{65}$, sin embargo en este análisis hemos notado que para ese espesor se estaría considerando velocidades negativas según el perfil de velocidad definido, por lo que para estos cálculos se estará considerando como espesor de la capa de fondo a la altura y en la cual la velocidad V_y sea igual a 0.

Finalmente, la ecuación vendría a tomar la forma de:

$$gL = \int_{0.000084}^{15.74} (0.1882 \ln y + 0.9301) 0.2900 e^{-0.5702 \left(\frac{y-10.4933}{15.7400} \right)} dy \quad [\text{Ec. 4.2}]$$

Con lo que realizando los cálculos de integración obtenemos los siguientes resultados.

$$gL = 6.27 \frac{kgf}{m.s}$$

$$GL = 813.90 \text{ kgf/s}$$

4.3.5.2 Zona 2.

A continuación, se mostrará una tabla en donde se observará las velocidades obtenidas por el ADCP en la vertical representativa de la zona 2, con la finalidad de determinar los coeficientes experimentales para esta vertical.

Tabla 4.213. *Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 2.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

V(m/s)	y (m)	Ln (y)
1.250	15.750	2.757
1.400	15.250	2.725
1.174	14.750	2.691
1.136	14.250	2.657
1.517	13.750	2.621
1.828	13.250	2.584
1.232	12.750	2.546
1.145	12.250	2.506
1.607	11.750	2.464
1.340	11.250	2.420
1.380	10.750	2.375
1.391	10.250	2.327
1.093	9.750	2.277
1.313	9.250	2.225
0.892	8.750	2.169
1.169	8.250	2.110
1.261	7.750	2.048
1.072	7.250	1.981
1.013	6.750	1.910
0.719	6.250	1.833
0.669	5.750	1.749
0.821	5.250	1.658
1.158	4.750	1.558
0.772	4.250	1.447
0.821	3.750	1.322
0.961	3.250	1.179
0.722	2.750	1.012
1.017	2.250	0.811
0.890	1.750	0.560
0.805	1.250	0.223
0.593	0.750	-0.288
0.915	0.250	-1.386

Graficando las velocidades en función de la profundidad (ver figura 4.3) obtenemos:

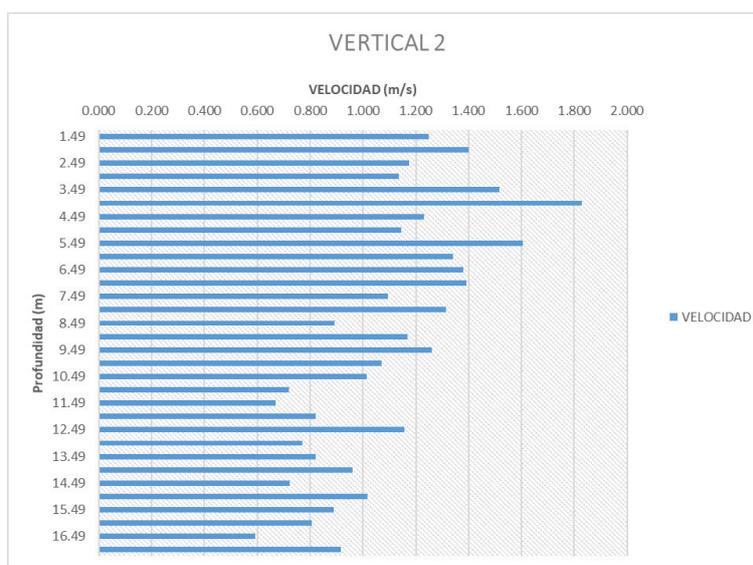


Figura 4.3. Perfil de velocidades zona 2. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Graficando la velocidad vs el logaritmo natural de la distancia medida desde el fondo hasta el centro de la celda (ver figura 4.4, obtenemos:

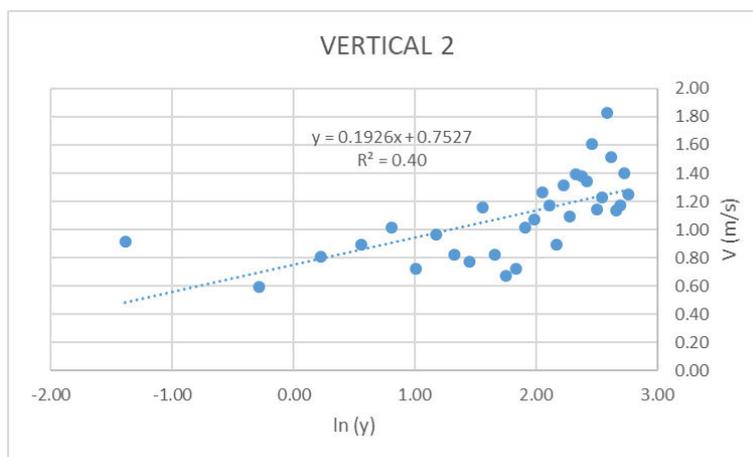


Figura 4.4. Ln(Y) vs Velocidad. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Como resultado obtenemos un coeficiente de determinación de $R^2=0.40$, lo que indica que tenemos una correlación entre ambas variables de 63 %, lo cual a su vez expresa una buena correlación.

Luego del análisis de regresión lineal obtenemos que la ecuación que define el perfil de velocidades en la vertical 2 es la siguiente:

$$V_y = 0.1926 \ln y + 0.7527 \quad [\text{Ec. 4.4}]$$

Ahora utilizando la ecuación de distribución de concentraciones de Lane y Kalinske y las muestras de concentración tomadas en la vertical 2 a 1/3 y 2/3 de profundidad, tenemos lo siguiente:

$$C_y = 0.2910 e^{-1.4081 \left(\frac{y-11.4933}{17.2400} \right)} \quad [\text{Ec. 4.5}]$$

Ahora utilizando la ecuación 2.187 de transporte de lavado por unidad de ancho para flujo bidimensional en superficie libre por encima de la capa de fondo y reemplazando las ecuaciones 4.4 y 4.5 y considerando que a vendría a representar el espesor de la capa de fondo, el cual según Einstein está definido por $2D_{65}$, sin embargo en este análisis hemos notado que para ese espesor se estaría considerando velocidades negativas según el perfil de velocidad definido, por lo que para estos cálculos se estará considerando como espesor de la capa de fondo a la altura y en la cual la velocidad V_y sea igual a 0.

Finalmente, la ecuación vendría a tomar la forma de:

$$gL = \int_{0.000460}^{17.2400} (0.1926 \ln y + 0.7527) 0.2910 e^{-1.4081 \left(\frac{y-11.4933}{17.2400} \right)} dy \quad [\text{Ec. 4.6}]$$

Con lo que realizando los cálculos de integración obtenemos los siguientes resultados.

$$gL = 7.14 \frac{kgf}{m.s}$$

$$GL = 930.79 \text{ kgf/s}$$

4.3.5.3 Zona 3.

A continuación, se mostrará una tabla en donde se observará las velocidades obtenidas por el ADCP en la vertical representativa de la zona 3, con la finalidad de determinar los coeficientes experimentales para esta vertical.

Tabla 4.214. *Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 3.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

v (m/s)	y (m)	Ln(y)
1.404	18.750	2.931
2.007	18.250	2.904
1.934	17.750	2.876
1.744	17.250	2.848
1.522	16.750	2.818
1.603	16.250	2.788
1.661	15.750	2.757
2.082	15.250	2.725
1.820	14.750	2.691
1.988	14.250	2.657
1.927	13.750	2.621
1.806	13.250	2.584
1.939	12.750	2.546
1.835	12.250	2.506
1.725	11.750	2.464
1.313	11.250	2.420
1.521	10.750	2.375
1.670	10.250	2.327
1.308	9.750	2.277
1.514	9.250	2.225
1.265	8.750	2.169
1.702	8.250	2.110
1.663	7.750	2.048
1.418	7.250	1.981
1.254	6.750	1.910
1.524	6.250	1.833
1.741	5.750	1.749
1.147	5.250	1.658
0.959	4.750	1.558
1.412	4.250	1.447
1.393	3.750	1.322
1.236	3.250	1.179
1.180	2.750	1.012
1.439	2.250	0.811
1.130	1.750	0.560
1.191	1.250	0.223
1.480	0.750	-0.288
1.209	0.250	-1.386

Graficando las velocidades en función de la profundidad (ver figura 4.5), obtenemos:

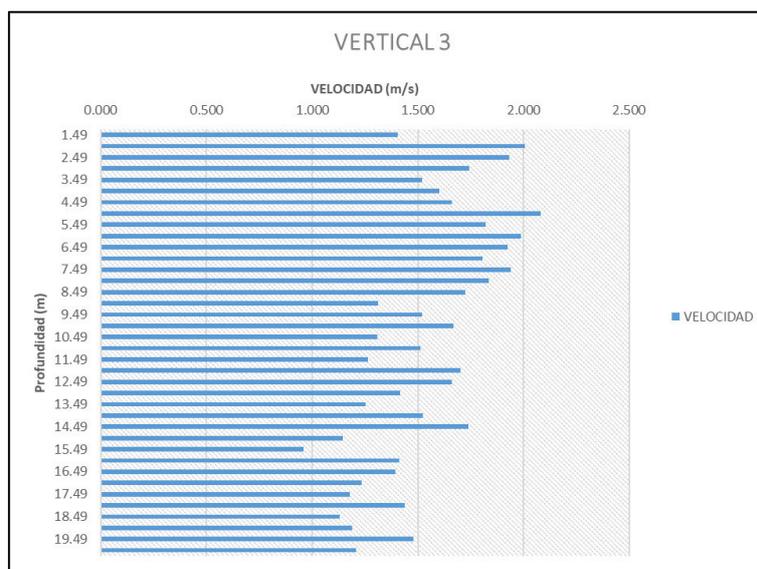


Figura 4.5. Perfil de velocidades zona 3. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Graficando la velocidad vs el logaritmo natural de la distancia medida desde el fondo hasta el centro de la celda (ver figura 4.6), obtenemos:

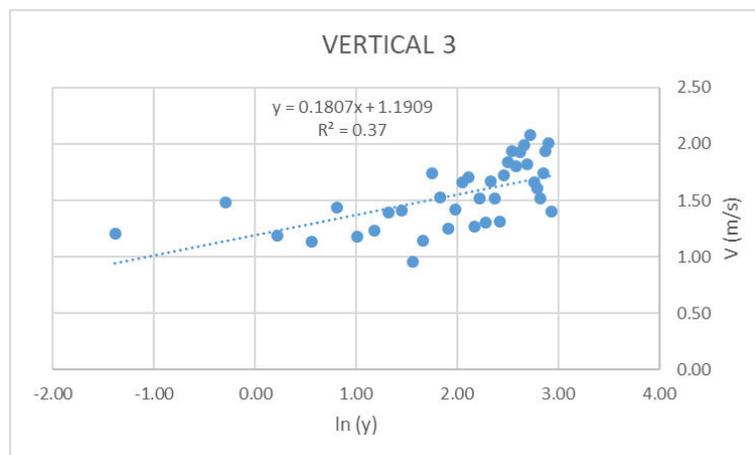


Figura 4.6. Ln(Y) vs Velocidad. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Como resultado obtenemos un coeficiente de determinación de $R^2=0.37$, lo que indica que tenemos una correlación entre ambas variables de 60 %, lo cual a su vez expresa una buena correlación.

Luego del análisis de regresión lineal obtenemos que la ecuación que define el perfil de velocidades en la vertical 3 es la siguiente:

$$V_y = 0.1806 \ln y + 1.1910 \quad [\text{Ec. 4.7}]$$

Ahora utilizando la ecuación de distribución de concentraciones de Lane y Kalinske y las muestras de concentración tomadas en la vertical 3 a 1/3 y 2/3 de profundidad, tenemos lo siguiente:

$$C_y = 0.3220 e^{-1.6305 \left(\frac{y-13.4933}{20.24} \right)} \quad [\text{Ec. 4.8}]$$

Ahora utilizando la ecuación 2.187 de transporte de lavado por unidad de ancho para flujo bidimensional en superficie libre por encima de la capa de fondo y reemplazando las ecuaciones 4.7 y 4.8 y considerando que a vendría a representar el espesor de la capa de fondo, el cual según Einstein está definido por $2D_{65}$, sin embargo en este análisis hemos notado que para ese espesor se estaría considerando velocidades negativas según el perfil de velocidad definido, por lo que para estos cálculos se estará considerando como espesor de la capa de fondo a la altura y en la cual la velocidad V_y sea igual a 0.

Finalmente, la ecuación vendría a tomar la forma de:

$$gL = \int_{0.0014}^{20.2400} (0.1806 \ln y + 1.1910) 0.3220 e^{-1.6305 \left(\frac{y-13.4933}{20.24} \right)} dy \quad [\text{Ec. 4.9}]$$

$$gL = 14.07 \frac{kgf}{m.s}$$

$$GL = 1,825.30 \text{ kgf/s}$$

4.3.5.4 Zona 4.

A continuación, se mostrará una tabla en donde se observará las velocidades obtenidas por el ADCP en la vertical representativa de la zona 4, con la finalidad de determinar los coeficientes experimentales para esta vertical.

Tabla 4.215. *Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 4.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

v (m/s)	y (m)	Ln (y)
1.706	19.750	2.983
1.191	19.250	2.958
1.525	18.750	2.931
1.490	18.250	2.904
1.329	17.750	2.876
1.456	17.250	2.848
1.492	16.750	2.818
1.572	16.250	2.788
1.769	15.750	2.757
1.432	15.250	2.725
1.531	14.750	2.691
1.897	14.250	2.657
1.636	13.750	2.621
1.359	13.250	2.584
0.996	12.750	2.546
1.673	12.250	2.506
1.471	11.750	2.464
1.543	11.250	2.420
1.327	10.750	2.375
1.047	10.250	2.327
1.172	9.750	2.277
1.704	9.250	2.225
1.200	8.750	2.169
1.190	8.250	2.110
1.332	7.750	2.048
1.551	7.250	1.981
1.175	6.750	1.910
1.457	6.250	1.833
1.596	5.750	1.749
1.431	5.250	1.658
1.154	4.750	1.558
0.986	4.250	1.447
1.368	3.750	1.322
1.047	3.250	1.179
1.023	2.750	1.012
0.704	2.250	0.811
0.697	1.750	0.560
0.990	1.250	0.223
0.826	0.750	-0.288
0.912	0.250	-1.386

Graficando las velocidades en función de la profundidad (ver figura 4.7), obtenemos:

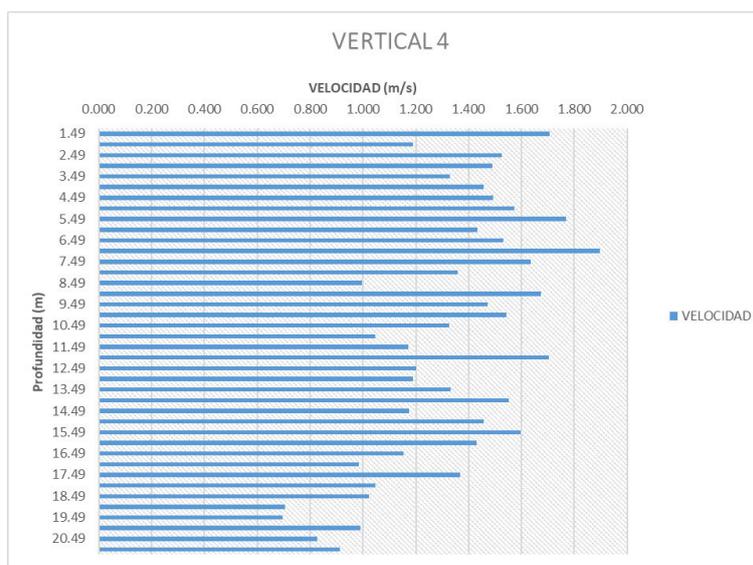


Figura 4.7. Perfil de velocidades zona 4. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Graficando la velocidad vs el logaritmo natural de la distancia medida desde el fondo hasta el centro de la celda (ver figura 4.8), obtenemos:

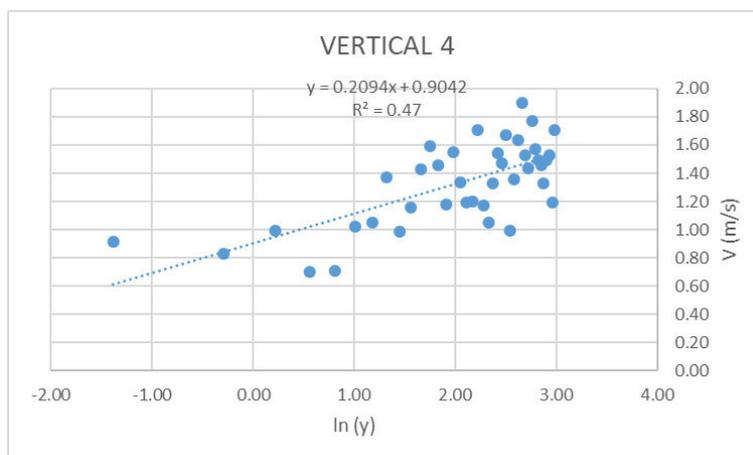


Figura 4.8. Ln(Y) vs Velocidad. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Como resultado obtenemos un coeficiente de determinación de $R^2=0.47$, lo que indica que tenemos una correlación entre ambas variables de 68 %, lo cual a su vez expresa una buena correlación.

Luego del análisis de regresión lineal obtenemos que la ecuación que define el perfil de velocidades en la vertical 4 es la siguiente:

$$V_y = 0.2094 \ln y + 0.9042 \quad [\text{Ec. 4.10}]$$

Ahora utilizando la ecuación de distribución de concentraciones de Lane y Kalinske y las muestras de concentración tomadas en la vertical 3 a 1/3 y 2/3 de profundidad, tenemos lo siguiente:

$$C_y = 0.3250 e^{-1.5093 \left(\frac{y-14.1600}{21.24} \right)} \quad [\text{Ec. 4.11}]$$

Ahora utilizando la ecuación 2.187 de transporte de lavado por unidad de ancho para flujo bidimensional en superficie libre por encima de la capa de fondo y reemplazando las ecuaciones 4.10 y 4.11 y considerando que a vendría a representar el espesor de la capa de fondo, el cual según Einstein está definido por $2D_{65}$, sin embargo en este análisis hemos notado que para ese espesor se estaría considerando velocidades negativas según el perfil de velocidad definido, por lo que para estos cálculos se estará considerando como espesor de la capa de fondo a la altura y en la cual la velocidad V_y sea igual a 0.

Finalmente, la ecuación vendría a tomar la forma de:

$$gL = \int_{0.0133}^{21.2400} (0.2094 \ln y + 0.9042) 0.3250 e^{-1.5093 \left(\frac{y-14.1600}{21.24} \right)} dy \quad [\text{Ec. 4.12}]$$

$$gL = 12.20 \frac{kgf}{m.s}$$

$$GL = 1,589.04 \text{ kgf/s}$$

4.3.5.5 Zona 5.

A continuación, se mostrará una tabla en donde se observará las velocidades obtenidas por el ADCP en la vertical representativa de la zona 5, con la finalidad de determinar los coeficientes experimentales para esta vertical.

Tabla 4.216. *Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 5.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

v (m/s)	y (m)	Ln(y)
2.730	25.250	3.229
2.719	24.750	3.209
2.868	24.250	3.188
3.113	23.750	3.168
3.091	23.250	3.146
2.885	22.750	3.125
2.937	22.250	3.102
2.800	21.750	3.080
2.630	21.250	3.056
2.717	20.750	3.033
2.474	20.250	3.008
2.194	19.750	2.983
2.201	19.250	2.958
2.460	18.750	2.931
2.471	18.250	2.904
2.806	17.750	2.876
2.763	17.250	2.848
2.740	16.750	2.818
2.313	16.250	2.788
2.514	15.750	2.757
2.408	15.250	2.725
2.134	14.750	2.691
2.546	14.250	2.657
2.216	13.750	2.621
2.164	13.250	2.584
2.124	12.750	2.546
1.589	12.250	2.506
1.709	11.750	2.464
1.908	11.250	2.420
2.019	10.750	2.375
2.337	10.250	2.327
2.248	9.750	2.277
2.307	9.250	2.225
2.132	8.750	2.169
1.669	8.250	2.110
1.564	7.750	2.048
1.384	7.250	1.981
1.477	6.750	1.910
1.569	6.250	1.833
1.488	5.750	1.749
1.935	5.250	1.658
1.450	4.750	1.558
2.163	4.250	1.447
1.849	3.750	1.322
1.638	3.250	1.179
1.758	2.750	1.012
1.218	2.250	0.811
0.960	1.750	0.560
1.293	1.250	0.223
1.017	0.750	-0.288
0.615	0.250	-1.386

Graficando las velocidades en función de la profundidad (ver figura 4.9), obtenemos:

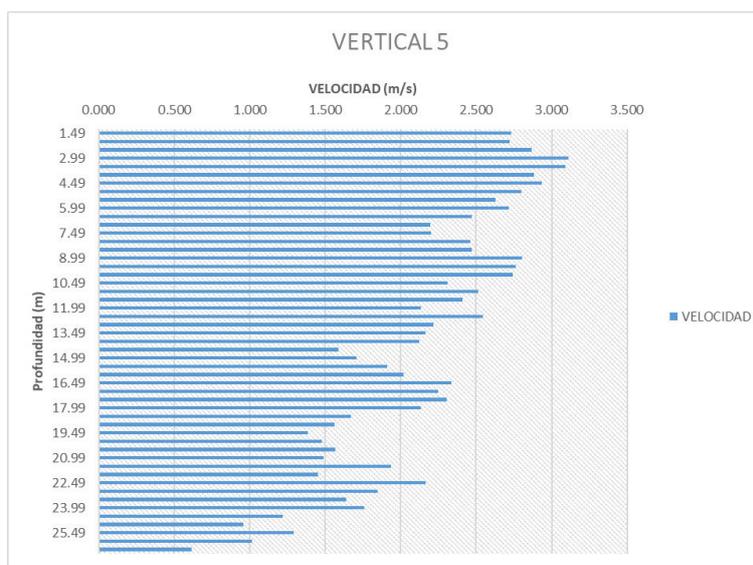


Figura 4.9. Perfil de velocidades zona 5. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Graficando la velocidad vs el logaritmo natural de la distancia medida desde el fondo hasta el centro de la celda (ver figura 4.10), obtenemos:

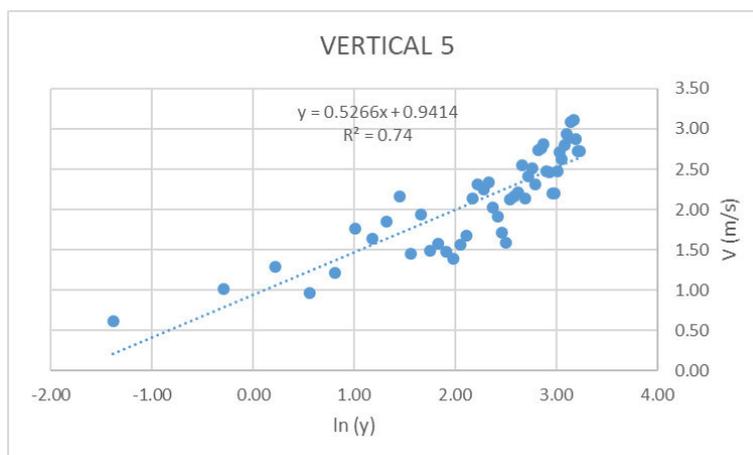


Figura 4.10. Ln(Y) vs Velocidad. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Como resultado obtenemos un coeficiente de determinación de $R^2=0.74$, lo que indica que tenemos una correlación entre ambas variables de 86 %, lo cual a su vez expresa una buena correlación.

Luego del análisis de regresión lineal obtenemos que la ecuación que define el perfil de velocidades en la vertical 5 es la siguiente:

$$V_y = 0.5266lny + 0.9414 \quad [\text{Ec. 4.13}]$$

Ahora utilizando la ecuación de distribución de concentraciones de Lane y Kalinske y las muestras de concentración tomadas en la vertical 3 a 1/3 y 2/3 de profundidad, tenemos lo siguiente:

$$C_y = 0.3540e^{-1.7737\left(\frac{y-17.8267}{26.74}\right)} \quad [\text{Ec. 4.14}]$$

Ahora utilizando la ecuación 2.187 de transporte de lavado por unidad de ancho para flujo bidimensional en superficie libre por encima de la capa de fondo y reemplazando las ecuaciones 4.13 y 4.14 y considerando que a vendría a representar el espesor de la capa de fondo, el cual según Einstein está definido por $2D_{65}$, sin embargo en este análisis hemos notado que para ese espesor se estaría considerando velocidades negativas según el perfil de velocidad definido, por lo que para estos cálculos se estará considerando como espesor de la capa de fondo a la altura y en la cual la velocidad V_y sea igual a 0.

Finalmente, la ecuación vendría a tomar la forma de:

$$gL = \int_{0.1673}^{26.74} (0.5266lny + 0.9414)0.3540e^{-1.7737\left(\frac{y-17.8267}{26.74}\right)} dy \quad [\text{Ec. 4.15}]$$

$$gL = 27.56 \frac{kgf}{m.s}$$

$$GL = 3,591.40 \text{ kgf/s}$$

4.3.5.6 Zona 6.

A continuación, se mostrará una tabla en donde se observará las velocidades obtenidas por el ADCP en la vertical representativa de la zona 6, con la finalidad de determinar los coeficientes experimentales para esta vertical.

Tabla 4.217. *Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 6.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

v (m/s)	y (m)	Ln (y)
2.774	22.250	3.102
2.710	21.750	3.080
2.529	21.250	3.056
2.742	20.750	3.033
2.923	20.250	3.008
2.237	19.750	2.983
2.489	19.250	2.958
2.705	18.750	2.931
2.891	18.250	2.904
2.471	17.750	2.876
2.479	17.250	2.848
2.601	16.750	2.818
2.711	16.250	2.788
2.372	15.750	2.757
2.461	15.250	2.725
2.470	14.750	2.691
2.250	14.250	2.657
2.223	13.750	2.621
1.929	13.250	2.584
1.774	12.750	2.546
1.806	12.250	2.506
2.255	11.750	2.464
2.053	11.250	2.420
2.164	10.750	2.375
1.754	10.250	2.327
2.077	9.750	2.277
2.300	9.250	2.225
2.194	8.750	2.169
2.194	8.250	2.110
2.375	7.750	2.048
2.024	7.250	1.981
1.920	6.750	1.910
2.008	6.250	1.833
2.198	5.750	1.749
2.547	5.250	1.658
2.350	4.750	1.558
2.396	4.250	1.447
2.236	3.750	1.322
2.474	3.250	1.179
2.350	2.750	1.012
2.671	2.250	0.811
2.019	1.750	0.560
2.226	1.250	0.223
1.647	0.750	-0.288
1.461	0.250	-1.386

Graficando las velocidades en función de la profundidad (ver figura 4.11), obtenemos:

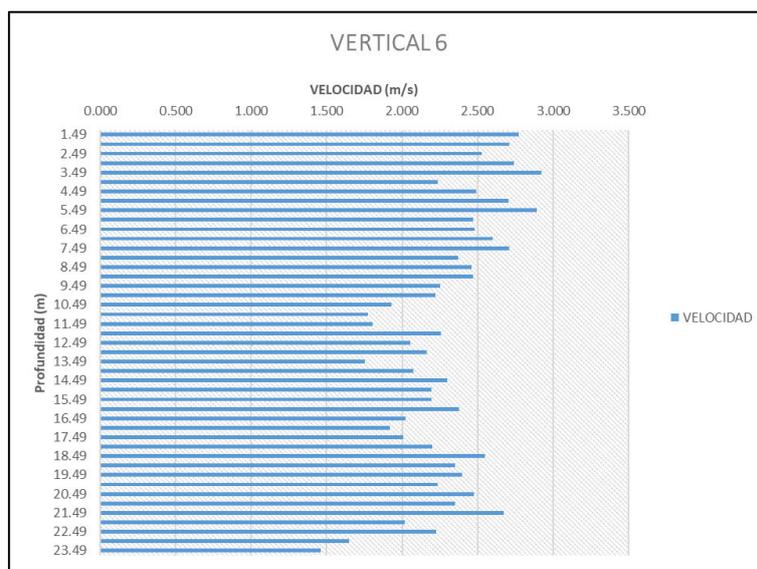


Figura 4.11. Perfil de velocidades zona 6. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Graficando la velocidad vs el logaritmo natural de la distancia medida desde el fondo hasta el centro de la celda (ver figura 4.12), obtenemos:

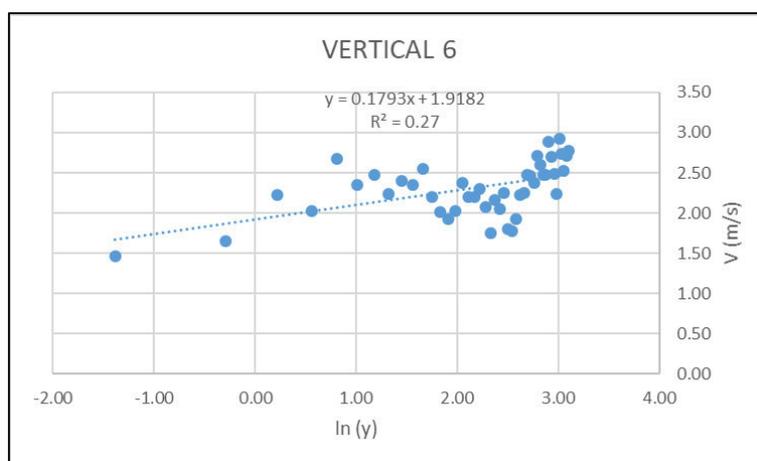


Figura 4.12. Ln(Y) vs Velocidad. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Como resultado obtenemos un coeficiente de determinación de $R^2=0.27$, lo que indica que tenemos una correlación entre ambas variables de 52 %, lo cual a su vez expresa una mediana correlación.

Luego del análisis de regresión lineal obtenemos que la ecuación que define el perfil de velocidades en la vertical 6 es la siguiente:

$$V_y = 0.1793 \ln y + 1.9182 \quad [\text{Ec. 4.16}]$$

Ahora utilizando la ecuación de distribución de concentraciones de Lane y Kalinske y las muestras de concentración tomadas en la vertical 3 a 1/3 y 2/3 de profundidad, tenemos lo siguiente:

$$C_y = 0.3570 e^{-2.1286 \left(\frac{y-15.8267}{23.74} \right)} \quad [\text{Ec. 4.17}]$$

Ahora utilizando la ecuación 2.187 de transporte de lavado por unidad de ancho para flujo bidimensional en superficie libre por encima de la capa de fondo y reemplazando las ecuaciones 4.16 y 4.17 y considerando que a vendría a representar el espesor de la capa de fondo, el cual según Einstein está definido por $2D_{65}$, sin embargo en este análisis hemos notado que para ese espesor se estaría considerando velocidades negativas según el perfil de velocidad definido, por lo que para estos cálculos se estará considerando como espesor de la capa de fondo a la altura y en la cual la velocidad V_y sea igual a 0.

Finalmente, la ecuación vendría a tomar la forma de:

$$gL = \int_{0.000023}^{23.74} (0.1793 \ln y + 1.9182) 0.3570 e^{-2.1286 \left(\frac{y-15.8267}{23.74} \right)} dy \quad [\text{Ec. 4.18}]$$

$$gL = 31.99 \frac{kgf}{m \cdot s}$$

$$GL = 4,141.55 \text{ kgf/s}$$

4.3.5.7 Zona 7.

A continuación, se mostrará una tabla en donde se observará las velocidades obtenidas por el ADCP en la vertical representativa de la zona 7, con la finalidad de determinar los coeficientes experimentales para esta vertical.

Tabla 4.218. *Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 7.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

v (m/s)	y (m)	Ln (y)
2.124	21.750	3.080
2.542	21.250	3.056
2.417	20.750	3.033
2.390	20.250	3.008
2.138	19.750	2.983
2.487	19.250	2.958
2.388	18.750	2.931
2.077	18.250	2.904
2.460	17.750	2.876
2.275	17.250	2.848
2.117	16.750	2.818
2.209	16.250	2.788
2.383	15.750	2.757
1.953	15.250	2.725
2.169	14.750	2.691
2.186	14.250	2.657
2.062	13.750	2.621
2.595	13.250	2.584
2.215	12.750	2.546
1.902	12.250	2.506
1.883	11.750	2.464
1.639	11.250	2.420
2.109	10.750	2.375
1.995	10.250	2.327
2.233	9.750	2.277
2.152	9.250	2.225
2.132	8.750	2.169
2.339	8.250	2.110
2.528	7.750	2.048
2.230	7.250	1.981
2.296	6.750	1.910
2.290	6.250	1.833
1.887	5.750	1.749
1.513	5.250	1.658
1.631	4.750	1.558
1.558	4.250	1.447
1.208	3.750	1.322
1.361	3.250	1.179
1.672	2.750	1.012
1.382	2.250	0.811
1.474	1.750	0.560
0.996	1.250	0.223
1.180	0.750	-0.288
1.108	0.250	-1.386

Graficando las velocidades en función de la profundidad (ver figura 4.13), obtenemos:

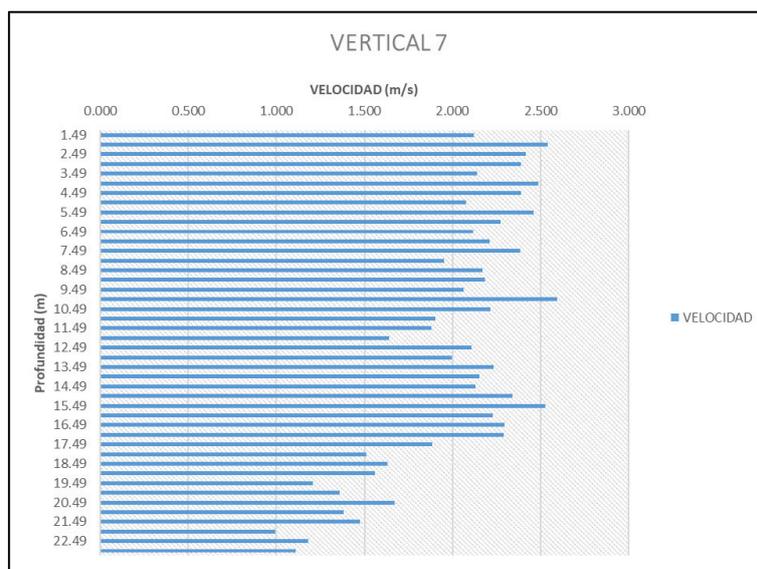


Figura 4.13. Perfil de velocidades zona 7. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Graficando la velocidad vs el logaritmo natural de la distancia medida desde el fondo hasta el centro de la celda (ver figura 4.14), obtenemos:

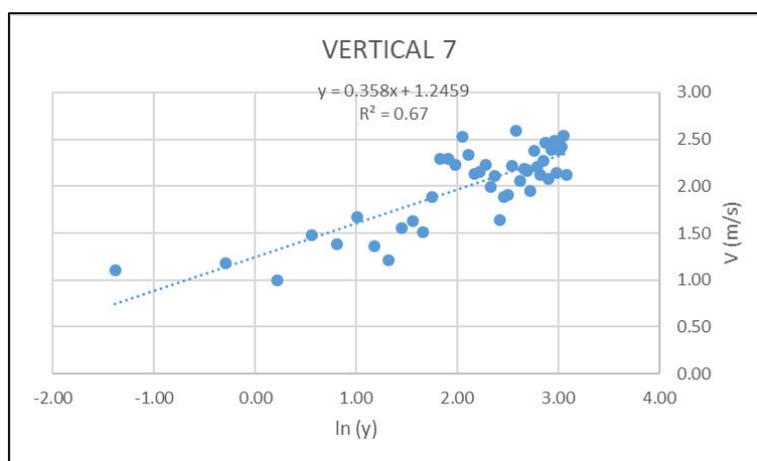


Figura 4.14. Ln(Y) vs Velocidad. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Como resultado obtenemos un coeficiente de determinación de $R^2=0.67$, lo que indica que tenemos una correlación entre ambas variables de 82 %, lo cual a su vez expresa una buena correlación.

Luego del análisis de regresión lineal obtenemos que la ecuación que define el perfil de velocidades en la vertical 7 es la siguiente:

$$V_y = 0.3580 \ln y + 1.2459 \quad [\text{Ec. 4.19}]$$

Ahora utilizando la ecuación de distribución de concentraciones de Lane y Kalinske y las muestras de concentración tomadas en la vertical 7 a 1/3 y 2/3 de profundidad, tenemos lo siguiente:

$$C_y = 0.3660 e^{-1.0507 \left(\frac{y-15.4933}{23.24} \right)} \quad [\text{Ec. 4.20}]$$

Ahora utilizando la ecuación 2.187 de transporte de lavado por unidad de ancho para flujo bidimensional en superficie libre por encima de la capa de fondo y reemplazando las ecuaciones 4.19 y 4.20 y considerando que a vendría a representar el espesor de la capa de fondo, el cual según Einstein está definido por $2D_{65}$, sin embargo en este análisis hemos notado que para ese espesor se estaría considerando velocidades negativas según el perfil de velocidad definido, por lo que para estos cálculos se estará considerando como espesor de la capa de fondo a la altura y en la cual la velocidad V_y sea igual a 0.

Finalmente, la ecuación vendría a tomar la forma de:

$$gL = \int_{0.0308}^{23.24} (0.3580 \ln y + 1.2459) 0.3660 e^{-1.0507 \left(\frac{y-15.4933}{23.24} \right)} dy \quad [\text{Ec. 4.21}]$$

$$gL = 20.33 \frac{kgf}{m.s}$$

$$GL = 2,660.95 \text{ kgf/s}$$

4.3.5.8 Zona 8.

A continuación, se mostrará una tabla en donde se observará las velocidades obtenidas por el ADCP en la vertical representativa de la zona 8, con la finalidad de determinar los coeficientes experimentales para esta vertical.

Tabla 4.219. *Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 8.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

v (m/s)	y (m)	Ln (y)
2.336	19.250	2.958
2.025	18.750	2.931
2.133	18.250	2.904
1.964	17.750	2.876
1.851	17.250	2.848
2.315	16.750	2.818
2.417	16.250	2.788
1.903	15.750	2.757
1.838	15.250	2.725
2.263	14.750	2.691
2.310	14.250	2.657
1.728	13.750	2.621
1.948	13.250	2.584
1.818	12.750	2.546
1.879	12.250	2.506
2.227	11.750	2.464
2.216	11.250	2.420
2.044	10.750	2.375
1.987	10.250	2.327
1.951	9.750	2.277
2.010	9.250	2.225
1.911	8.750	2.169
1.671	8.250	2.110
1.599	7.750	2.048
1.843	7.250	1.981
1.597	6.750	1.910
1.742	6.250	1.833
1.721	5.750	1.749
1.433	5.250	1.658
2.000	4.750	1.558
1.754	4.250	1.447
1.317	3.750	1.322
1.158	3.250	1.179
1.305	2.750	1.012
1.382	2.250	0.811
0.843	1.750	0.560
1.366	1.250	0.223
1.581	0.750	-0.288
1.327	0.250	-1.386

Graficando las velocidades en función de la profundidad (ver figura 4.15), obtenemos:

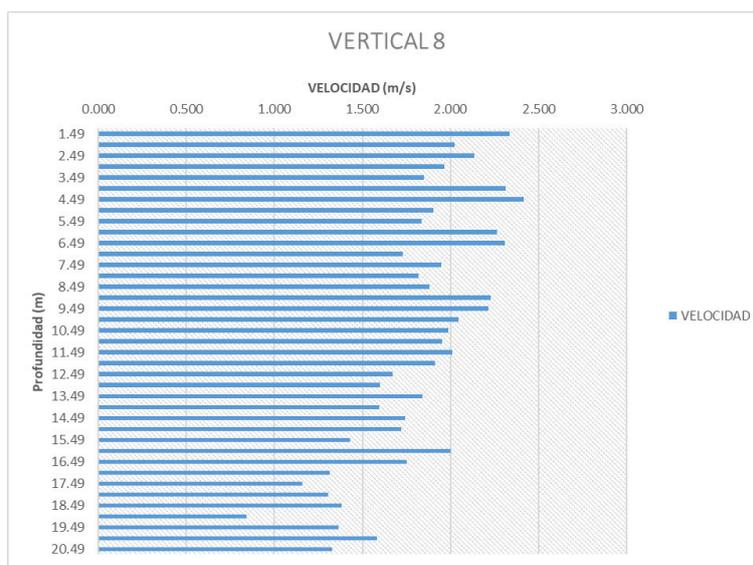


Figura 4.15. Perfil de velocidades zona 8. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Graficando la velocidad vs el logaritmo natural de la distancia medida desde el fondo hasta el centro de la celda (ver figura 4.16), obtenemos:

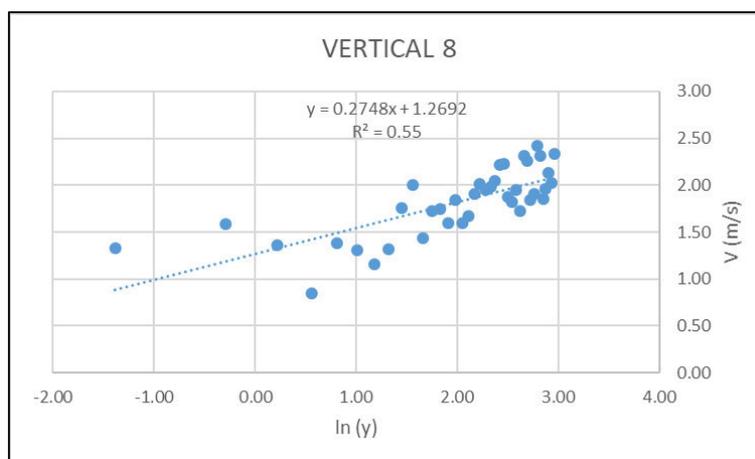


Figura 4.16. Ln(Y) vs Velocidad. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Como resultado obtenemos un coeficiente de determinación de $R^2=0.55$, lo que indica que tenemos una correlación entre ambas variables de 74 %, lo cual a su vez expresa una buena correlación.

Luego del análisis de regresión lineal obtenemos que la ecuación que define el perfil de velocidades en la vertical 8 es la siguiente:

$$V_y = 0.2748 \ln y + 1.2692 \quad [\text{Ec. 4.22}]$$

Ahora utilizando la ecuación de distribución de concentraciones de Lane y Kalinske y las muestras de concentración tomadas en la vertical 8 a 1/3 y 2/3 de profundidad, tenemos lo siguiente:

$$C_y = 0.3270e^{-1.1125\left(\frac{y-13.8267}{20.74}\right)} \quad [\text{Ec. 4.23}]$$

Ahora utilizando la ecuación 2.187 de transporte de lavado por unidad de ancho para flujo bidimensional en superficie libre por encima de la capa de fondo y reemplazando las ecuaciones 4.22 y 4.23 y considerando que a vendría a representar el espesor de la capa de fondo, el cual según Einstein está definido por $2D_{65}$, sin embargo en este análisis hemos notado que para ese espesor se estaría considerando velocidades negativas según el perfil de velocidad definido, por lo que para estos cálculos se estará considerando como espesor de la capa de fondo a la altura y en la cual la velocidad V_y sea igual a 0.

Finalmente, la ecuación vendría a tomar la forma de:

$$gL = \int_{0.0099}^{20.74} (0.2748 \ln y + 1.2692) 0.3270 e^{-1.1125\left(\frac{y-13.8267}{20.74}\right)} dy \quad [\text{Ec. 4.24}]$$

$$gL = 15.02 \frac{kgf}{m.s}$$

$$GL = 1,969.16 \text{ kgf/s}$$

4.3.5.9 Zona 9.

A continuación, se mostrará una tabla en donde se observará las velocidades obtenidas por el ADCP en la vertical representativa de la zona 9, con la finalidad de determinar los coeficientes experimentales para esta vertical.

Tabla 4.220. *Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 9.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

v (m/s)	y (m)	Ln (y)
1.755	19.250	2.958
1.897	18.750	2.931
2.047	18.250	2.904
1.721	17.750	2.876
1.535	17.250	2.848
1.500	16.750	2.818
1.634	16.250	2.788
1.567	15.750	2.757
1.585	15.250	2.725
2.034	14.750	2.691
1.908	14.250	2.657
1.826	13.750	2.621
1.836	13.250	2.584
1.303	12.750	2.546
2.037	12.250	2.506
1.658	11.750	2.464
1.942	11.250	2.420
1.818	10.750	2.375
1.696	10.250	2.327
1.806	9.750	2.277
1.484	9.250	2.225
1.484	8.750	2.169
1.992	8.250	2.110
2.122	7.750	2.048
2.103	7.250	1.981
1.788	6.750	1.910
1.726	6.250	1.833
1.829	5.750	1.749
1.845	5.250	1.658
1.378	4.750	1.558
1.856	4.250	1.447
1.343	3.750	1.322
1.295	3.250	1.179
1.351	2.750	1.012
1.042	2.250	0.811
1.548	1.750	0.560
1.561	1.250	0.223
1.455	0.750	-0.288
1.032	0.250	-1.386

Graficando las velocidades en función de la profundidad (ver figura 4.17), obtenemos:

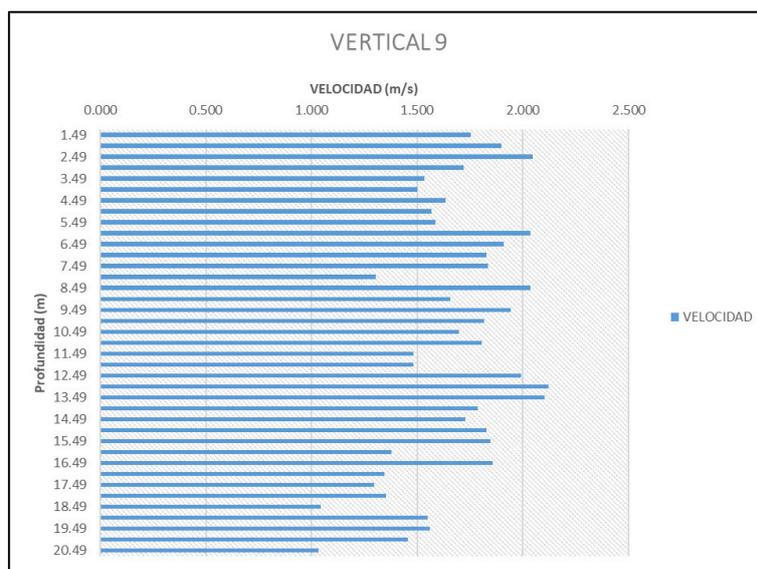


Figura 4.17. Perfil de velocidades zona 9. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Graficando la velocidad vs el logaritmo natural de la distancia medida desde el fondo hasta el centro de la celda (ver figura 4.18), obtenemos:

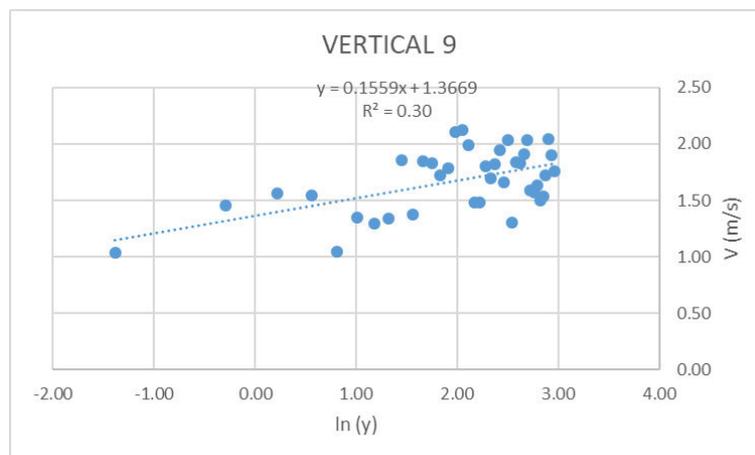


Figura 4.18. Ln(Y) vs Velocidad. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Como resultado obtenemos un coeficiente de determinación de $R^2=0.30$, lo que indica que tenemos una correlación entre ambas variables de 55 %, lo cual a su vez expresa una mediana correlación.

Luego del análisis de regresión lineal obtenemos que la ecuación que define el perfil de velocidades en la vertical 9 es la siguiente:

$$V_y = 0.1559 \ln y + 1.3669 \quad [\text{Ec. 4.25}]$$

Ahora utilizando la ecuación de distribución de concentraciones de Lane y Kalinske y las muestras de concentración tomadas en la vertical 9 a 1/3 y 2/3 de profundidad, tenemos lo siguiente:

$$C_y = 0.3050 e^{-1.7857 \left(\frac{y-13.8267}{20.74} \right)} \quad [\text{Ec. 4.26}]$$

Ahora utilizando la ecuación 2.187 de transporte de lavado por unidad de ancho para flujo bidimensional en superficie libre por encima de la capa de fondo y reemplazando las ecuaciones 4.25 y 4.26 y considerando que a vendría a representar el espesor de la capa de fondo, el cual según Einstein está definido por $2D_{65}$, sin embargo en este análisis hemos notado que para ese espesor se estaría considerando velocidades negativas según el perfil de velocidad definido, por lo que para estos cálculos se estará considerando como espesor de la capa de fondo a la altura y en la cual la velocidad V_y sea igual a 0.

Finalmente, la ecuación vendría a tomar la forma de:

$$gL = \int_{0.0002}^{20.74} (0.1559 \ln y + 1.3669) 0.3050 e^{-1.7857 \left(\frac{y-13.8267}{20.74} \right)} dy \quad [\text{Ec. 4.27}]$$

$$gL = 15.62 \frac{kgf}{m.s}$$

$$GL = 1,969.16 \text{ kgf/s}$$

4.3.5.10 Zona 10.

A continuación, se mostrará una tabla en donde se observará las velocidades obtenidas por el ADCP en la vertical representativa de la zona 10, con la finalidad de determinar los coeficientes experimentales para esta vertical.

Tabla 4.221. Velocidades y alturas sobre el fondo de la vertical representativa de la zona 10.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

v (m/s)	y (m)	Ln (y)
0.930	9.75	2.277
0.863	9.25	2.225
0.775	8.75	2.169
1.076	8.25	2.110
1.174	7.75	2.048
1.043	7.25	1.981
0.866	6.75	1.910
1.035	6.25	1.833
0.725	5.75	1.749
1.087	5.25	1.658
0.781	4.75	1.558
1.160	4.25	1.447
0.766	3.75	1.322
0.803	3.25	1.179
0.816	2.75	1.012
1.220	2.25	0.811
0.693	1.75	0.560
0.075	1.25	0.223
0.548	0.75	-0.288
0.698	0.25	-1.386

Graficando las velocidades en función de la profundidad (ver figura 4.19), obtenemos:

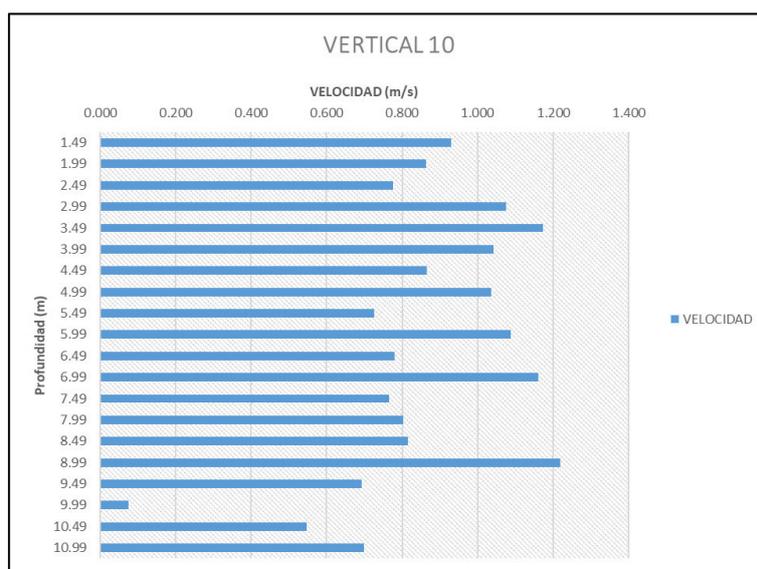


Figura 4.19. Perfil de velocidades zona 10. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Graficando la velocidad vs el logaritmo natural de la distancia medida desde el fondo hasta el centro de la celda (ver figura 4.20), obtenemos:

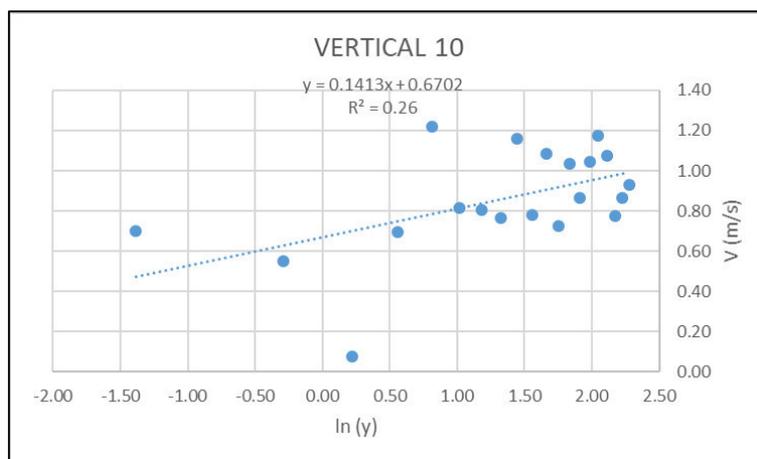


Figura 4.20. Ln(Y) vs Velocidad. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Como resultado obtenemos un coeficiente de determinación de $R^2=0.26$, lo que indica que tenemos una correlación entre ambas variables de 51 %, lo cual a su vez expresa una mediana correlación.

Luego del análisis de regresión lineal obtenemos que la ecuación que define el perfil de velocidades en la vertical 10 es la siguiente:

$$V_y = 0.1413 \ln y + 0.6702 \quad [\text{Ec. 4.28}]$$

Ahora utilizando la ecuación de distribución de concentraciones de Lane y Kalinske y las muestras de concentración tomadas en la vertical 10 a 1/3 y 2/3 de profundidad, tenemos lo siguiente:

$$C_y = 0.2410 e^{-2.3392 \left(\frac{y-7.4933}{11.24} \right)} \quad [\text{Ec. 4.29}]$$

Ahora utilizando la ecuación 2.187 de transporte de lavado por unidad de ancho para flujo bidimensional en superficie libre por encima de la capa de fondo y reemplazando las ecuaciones 4.28 y 4.29 y considerando que a vendría a representar el espesor de la capa de fondo, el cual según Einstein está definido por $2D_{65}$, sin embargo en este análisis hemos notado que para ese espesor se estaría considerando velocidades negativas según

el perfil de velocidad definido, por lo que para estos cálculos se estará considerando como espesor de la capa de fondo a la altura y en la cual la velocidad V_y sea igual a 0.

Finalmente, la ecuación vendría a tomar la forma de:

$$gL = \int_{0.0087}^{11.24} (0.1413 \ln y + 0.6702) 0.2410 e^{-2.3392 \left(\frac{y-7.4933}{11.24} \right)} dy \quad [\text{Ec. 4.30}]$$

$$gL = 3.90 \frac{\text{kgf}}{\text{m.s}}$$

$$GL = 506.80 \text{ kgf/s}$$

4.3.5.11 Resumen de resultados.

A continuación, se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos y se calcula el total de sedimentos de lavado que se transporta en la sección transversal de estudio.

Tabla 4.222. Resumen de resultados por zonas.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Zonas	GL (Kgf/s)
Zona 1	813.90
Zona 2	930.79
Zona 3	1,825.30
Zona 4	1,589.04
Zona 5	3,591.40
Zona 6	4,141.55
Zona 7	2,660.95
Zona 8	1,969.16
Zona 9	2,044.29
Zona 10	506.80
Total	20,073.19

De la tabla anterior se concluye que en la sección transversal de estudio en el río Amazonas se transporta 20,073.19 Kgf/s de sedimentos como concepto de transporte de sedimentos de lavado.

4.3.6 Método del Índice Acústico.

De las mediciones realizadas con el ADCP se obtuvo la información de la retrodispersión en toda la sección transversal, así como se logra observar en la figura 4.21.

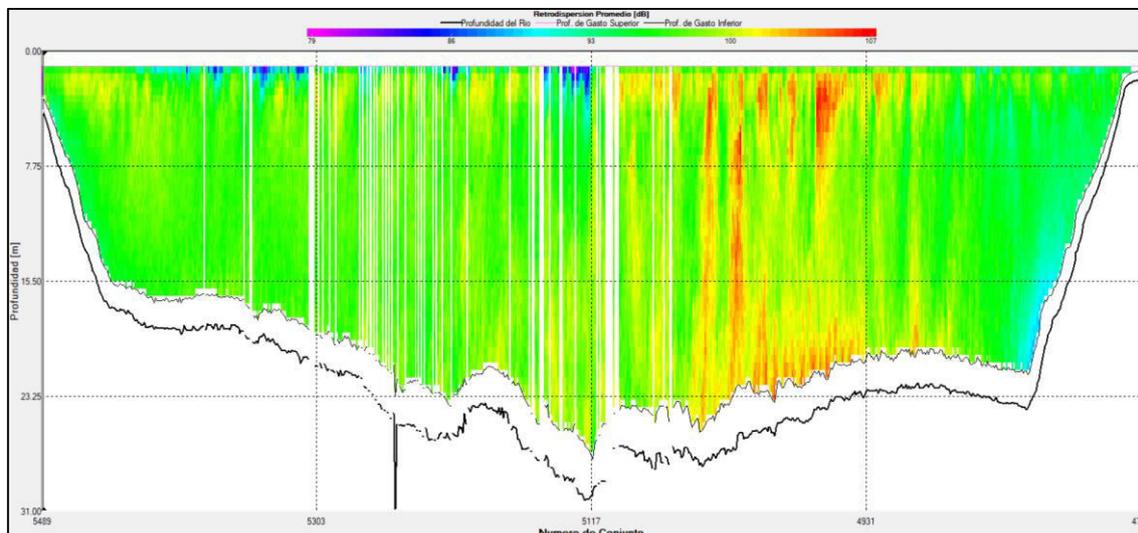


Figura 4.21. Retrodispersión distribuida en toda la sección trasversal de estudio.

Fuente: Elaboración propia. Software WinRiver II, 2019.

Esta información fue exportada en formato ASCII mediante la utilización del software WinRiver II, para su posterior depuración.

Tal como se observa en la figura 4.22.

PROFUNDIDAD	ENSAMBLE 5489	ENSAMBLE 5488	ENSAMBLE 5487	ENSAMBLE 5486	ENSAMBLE 5485	ENSAMBLE 5484	ENSAMBLE 5483	ENSAMBLE 5482	ENSAMBLE 5481	ENSAMBLE 5480	ENSAMBLE 5479	ENSAMBLE 5478
1.24	95.671	96.206	96.418	94.934	95.042	95.465	94.937	95.366	95.677	96.315	95.783	96.2
1.74	97.223	97.441	97.758	96.591	97.546	96.7	97.017	96.706	97.864	96.491	98.075	96.8
2.24	96.815	97.879	97.244	95.972	97.667	95.446	96.398	96.721	96.186	96.189	98.091	96.075
2.74	96.58	98.702	96.269	95.208	97.856	94.682	94.576	94.582	95.528	95.849	96.057	96.792
3.24	ND	ND	ND	97.572	94.612	96.834	93.978	92.819	94.507	94.827	93.131	94.501
3.74	ND	ND	ND	ND	ND	96.164	92.779	92.573	93.202	93.628	93.731	93.831
4.24	ND	92.758	92.436	92.862	93.494	92.853						
4.74	ND	92.236	92.55	93.074								
5.24	ND	92.986	93.086									
5.74	ND											

Figura 4.22. Valores de la retrodispersión en dB distribuidas en toda la sección celda por celda.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Posterior se procedió a realizar los cálculos del coeficiente de corrección del campo cercano para cada celda de información, considerando lo siguiente:

$$A_e = 0.0063 \text{ m}^2$$

$$T = 27.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$c = 1503.6723 \text{ m/s}$$

$$f = 600,000 \text{ Hz}$$

$$r_n = 2.5103$$

$$\theta = 20^\circ$$

$$r = \frac{\text{profundidad} + 0.25}{\cos(20)} \quad [\text{Ec. 4.31}]$$

La constante de 0.25 es añadida debido a que cada celda mide de profundidad 0.5 m, entonces como se tiene que calcular la distancia hacia el centro de la celda, se le añade 0.25.

Finalmente los valores del coeficiente de corrección ϕ para cada celda se pueden observar en la siguiente la figura 4.23:

PROFUNDIDAD	ENSAMBLE 5489	ENSAMBLE 5488	ENSAMBLE 5487	ENSAMBLE 5486	ENSAMBLE 5485	ENSAMBLE 5484	ENSAMBLE 5483	ENSAMBLE 5482	ENSAMBLE 5481	ENSAMBLE 5480	ENSAMBLE 5479	ENSAMBLE 5478
1.24	1.1992	1.1992	1.1992	1.1992	1.1992	1.1992	1.1992	1.1992	1.1992	1.1992	1.1992	1.1992
1.74	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850
2.24	1.0429	1.0429	1.0429	1.0429	1.0429	1.0429	1.0429	1.0429	1.0429	1.0429	1.0429	1.0429
2.74	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243
3.24				1.0150	1.0150	1.0150	1.0150	1.0150	1.0150	1.0150	1.0150	1.0150
3.74						1.0098	1.0098	1.0098	1.0098	1.0098	1.0098	1.0098
4.24								1.0067	1.0067	1.0067	1.0067	1.0067
4.74										1.0048	1.0048	1.0048
5.24											1.0036	1.0036
5.74												

Figura 4.23. Valores de coeficiente de corrección del campo cercano distribuidas en toda la sección celda por celda. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Ahora obtenemos el valor del coeficiente de absorción del agua considerando lo siguiente:

$$f_T = 193.0066$$

$$\sigma_f = 0.0548$$

Por otro lado, obteniendo el valor del coeficiente de atenuación del sedimento con la ayuda de la ecuación propuesta por la USGS:

$$CSS = 622.7\sigma_s - 279.7 \quad [\text{Ec. 4.32}]$$

Como bien se logra observar de la ecuación, el coeficiente de atenuación depende principalmente de la concentración de sedimentos en suspensión, sin embargo, como se

está realizando un análisis celda por celda es imposible obtener dicho coeficiente para cada una de ellas ya que no contamos con un dato de concentración para cada celda, solo para algunos puntos en los cuales se ha logrado extraer una muestra de sólidos en suspensión, como ya se ha explicado en el Capítulo 2, por lo se ha decidido considerar un valor promedio para este coeficiente, teniendo en consideración que esto adiciona un error a las estimaciones que se realicen.

Para la estimación del valor promedio se ha considerado los obtenidos para cada concentración de cada vertical obtenida a 2/3 de la profundidad, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.223. *Determinación del valor medio del coeficiente de atenuación por el sedimento.*
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Vertical de muestreo	C(mg/L)	σ_s
1	350.7	1.0124
2	465.3	1.1964
3	554.5	1.3396
4	537.5	1.3123
5	639.4	1.4760
6	725.8	1.6147
7	519.5	1.2834
8	473.8	1.2101
9	553.1	1.3374
10	525.6	1.2932
	σ_s promedio	1.3076

Con el valor del coeficiente σ_s obtenido, ahora se logra estimar la señal de retrodispersión corregida (ver figura 4.24).

PROFUNDIDAD	ENSAMBLE 5489	ENSAMBLE 5488	ENSAMBLE 5487	ENSAMBLE 5486	ENSAMBLE 5485	ENSAMBLE 5484	ENSAMBLE 5483	ENSAMBLE 5482	ENSAMBLE 5481	ENSAMBLE 5480	ENSAMBLE 5479	ENSAMBLE 5478
1.24	105.441121	105.976121	106.188121	104.704121	104.812121	105.235121	104.707121	105.136121	105.447121	106.085121	105.553121	105.970121
1.74	110.109654	110.327654	110.644654	109.477654	110.432654	109.586654	109.903654	109.592654	110.750654	109.377654	110.961654	109.686654
2.24	112.767737	113.831737	113.196737	111.924737	113.619737	111.398737	112.350737	112.673737	112.138737	112.141737	114.043737	112.027737
2.74	115.424421	117.546421	115.113421	114.052421	116.700421	113.526421	113.420421	113.426421	114.372421	114.693421	114.901421	115.636421
3.24				119.135992	116.175992	118.397992	115.541992	114.382992	116.070992	116.390992	114.694992	116.064992
3.74						120.301191	116.916191	116.710191	117.339191	117.765191	117.868191	117.968191
4.24								119.347742	119.025742	119.451742	120.083742	119.442742
4.74										121.178935	121.492935	122.016935
5.24											124.199613	124.299613
5.74												

Figura 4.24. Valores de la señal de retrodispersión corregida distribuidas en toda la sección celda por celda. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Una vez obtenidos los valores de SCS, se procede a estimar los coeficientes A y Kt mediante regresión lineal, tal y como se logra observar en la siguiente tabla:

Tabla 4.224. Correlación entre Log (C) y SCS.
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Vertical de muestreo	Ensamble	C(mg/L)	Log (C)	SCS
1	5442	350.7	2.5449	147.1259
2	5351	465.3	2.6677	151.5435
3	5267	554.5	2.7439	159.4310
4	5190	537.5	2.7304	162.2240
5	5120	639.4	2.8058	176.9298
6	5057	725.8	2.8608	168.3514
7	4996	519.5	2.7156	168.9175
8	4932	473.8	2.6756	162.2450
9	4866	553.1	2.7428	160.3370
10	4789	525.6	2.7207	133.2029

Para la regresión lineal no se consideraron las estimaciones de los verticales 6 y 10 debido a que aportaban demasiado error a los cálculos, además se consideraron los verticales 7 y 8 como puntos de comprobación, por lo que tampoco participaron en el análisis de regresión.

A continuación de muestra la figura 4.25 en donde se observa la correlación que existe entre la concentración de sedimentos y la retrodispersión corregida.

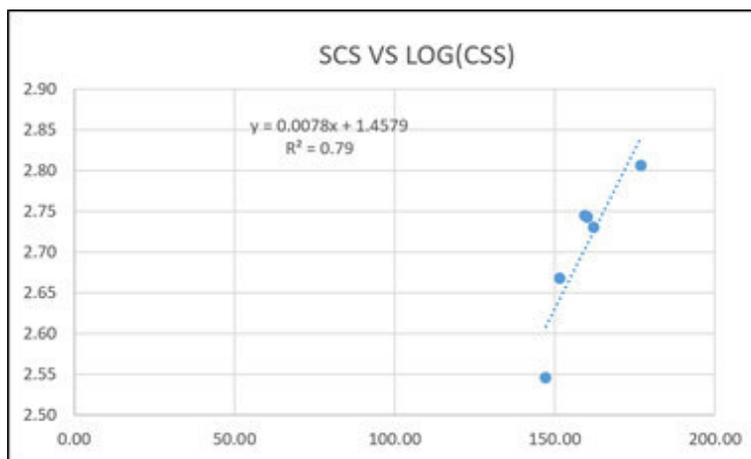


Figura 4.25. Retrodispersión corregida Vs el logaritmo de la concentración de sólidos. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Si bien es cierto no se obtiene una correlación estricta entre las variables, se considera que un factor de R^2 igual a 0.79 es bastante aceptable.

Con lo que se establece que las variables de correlación y de instrumento asumen los siguientes valores:

$$A = 0.0078$$

$$K_t = 1.4579$$

Por lo que la ecuación para la determinación de la concentración en función de la retrodispersión corregida vendría a ser:

$$\text{Log}(\text{CSS}) = 0.0078(\text{SCS}) + 1.4579 \quad [\text{Ec. 4.33}]$$

O también puede ser escrita de la siguiente manera

$$\text{CSS} = 10^{0.0078(\text{SCS})+1.4579} \quad [\text{Ec. 4.34}]$$

Ahora realizando los cálculos de CSS para puntos de las verticales de corroboración se obtiene lo siguiente:

Tabla 4.225. *Determinación del error porcentual entre la concentración obtenida en campo y la obtenida por retrodispersión.*

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Vertical de muestra	Ensamble	C(mg/L) obtenida en campo	C(mg/L) por retrodispersión	% de error
7	4996	519.5	596.2887	15%
8	4932	473.8	528.9457	12%

Como bien se logra observar en los resultados de la corroboración, se ha encontrado un error de estimación de aproximadamente 15 %, lo cual es completamente aceptable, ya que los métodos de estimación teóricos arrojan errores por encima del 50 %.

Luego de realizar el proceso celda por celda se obtuvo la distribución de las concentraciones en toda la sección transversal, tal y como se logra observar en la figura 4.26.

PROFUNDIDAD	ENSAMBLE 5489	ENSAMBLE 5488	ENSAMBLE 5487	ENSAMBLE 5486	ENSAMBLE 5485	ENSAMBLE 5484	ENSAMBLE 5483	ENSAMBLE 5482	ENSAMBLE 5481	ENSAMBLE 5480	ENSAMBLE 5479	ENSAMBLE 5478
1.24	190.6956	192.5368	193.2713	188.1881	188.5535	189.9914	188.1982	189.6539	190.7162	192.9141	191.0796	192.5161
1.74	207.3745	208.1880	209.3767	205.0339	208.5810	205.4357	206.6087	205.4578	209.7757	204.6660	210.5721	205.8050
2.24	217.5146	221.7112	219.1970	214.2461	220.8686	212.2316	215.8916	217.1477	215.0711	215.0827	222.5569	214.6428
2.74	228.1448	237.0075	226.8740	222.5917	233.4336	220.4987	220.0793	220.1031	223.8746	225.1690	226.0118	229.0151
3.24				243.8713	231.2452	240.6602	228.6270	223.9171	230.8095	232.1399	225.1754	230.7847
3.74						249.0286	234.3399	233.4745	236.1270	237.9406	238.3811	238.8097
4.24								244.8005	243.3889	245.2582	248.0580	245.2186
4.74										252.9855	254.4163	256.8219
5.24											267.0896	267.5697
5.74												

Figura 4.26. Valores de concentraciones en mg/L distribuidos en toda la sección transversal celda por celda. Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Considerando la distribución de velocidades obtenidas del ADCP que se muestran en la figura 4.27.

	5489	5488	5487	5486	5485	5484	5483	5482	5481	5480	5479	5478
1.24	0.212	0.102	0.271	0.058	0.408	0.281	0.229	0.643	0.642	0.383	0.169	0.036
1.74	0.089	0.299	0.105	0.502	0.501	0.530	0.311	0.164	0.534	1.000	0.321	0.216
2.24	0.272	0.353	0.222	0.657	0.365	0.407	0.714	0.546	0.609	0.262	0.260	0.444
2.74	0.452	0.378	0.141	0.028	0.471	0.342	0.317	0.256	0.597	0.799	0.381	0.262
3.24				0.286	0.480	0.426	0.687	0.704	0.693	0.755	0.366	0.445
3.74						0.248	0.208	0.800	0.456	0.964	0.692	0.623
4.24								0.308	0.436	0.756	0.215	0.416
4.74										0.380	0.772	0.188
5.24											0.458	0.387
5.74												

Figura 4.27. Valores de velocidades en m/s distribuidos en toda la sección transversal celda por celda.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Ahora considerando que cada celda tiene un ancho promedio de 1.74 m y de profundidad 0.50 m podemos estimar el transporte de sedimentos en Kgf/s en cada celda medida, tal y como se logra observar en la figura 4.28.

	5489	5488	5487	5486	5485	5484	5483	5482	5481	5480	5479	5478
1.24	0.0353	0.0172	0.0458	0.0095	0.0673	0.0467	0.0377	0.1066	0.1070	0.0646	0.0282	0.0061
1.74	0.0161	0.0544	0.0192	0.0900	0.0914	0.0952	0.0562	0.0295	0.0979	0.1789	0.0591	0.0389
2.24	0.0517	0.0684	0.0425	0.1231	0.0705	0.0755	0.1348	0.1036	0.1145	0.0493	0.0506	0.0833
2.74	0.0901	0.0783	0.0280	0.0054	0.0961	0.0659	0.0610	0.0493	0.1168	0.1573	0.0753	0.0525
3.24				0.0610	0.0970	0.0896	0.1373	0.1378	0.1398	0.1532	0.0720	0.0898
3.74						0.0540	0.0426	0.1633	0.0941	0.2005	0.1442	0.1301
4.24								0.0659	0.0928	0.1621	0.0466	0.0892
4.74										0.0840	0.1717	0.0422
5.24											0.1069	0.0905
5.74												

Figura 4.28. Valores del transporte de sedimentos en kgf/s distribuidos en toda la sección transversal celda por celda. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Finalmente, el transporte total de sedimentos de lavado en suspensión vendría a ser la suma del transporte en cada celda, resultando un valor de: 12,890.53 kgf/s.

Capítulo 5

Discusión y Análisis de Resultados

5.1 Transporte de Sedimentos de Fondo por Arrastre y en Suspensión.

Con el método de Einstein no fue posible estimar los transportes de sedimentos en las zonas 1 y 10 debido a que no se pudo determinar un valor de k/δ'_0 mayor de 0.32. Sin embargo, para las demás zonas de análisis se estimó que el transporte de sedimentos de fondo por arrastre asciende a 253.54 kgf/s y el transporte de sedimentos de fondo en suspensión a 10,499.98 kgf/s.

Con el método de Bagnold no fue posible estimar los transportes de sedimentos para las zonas 1, 2 y 10 debido a que los diámetros representativos de cada fracción son menores a 0.3 mm. Sin embargo, para las demás zonas se logró determinar que el transporte de sedimentos de fondo por arrastre y en suspensión asciende a 1,500.79 kgf/s y 880.01 kgf/s respectivamente, siendo este el primer resultado en donde el transporte de sedimentos de fondo por arrastre es mayor que el transporte de sedimentos de fondo en suspensión.

Con el método de Tofaletti no fue posible estimar los transportes de sedimentos para las zonas 1 y 10 debido a que el parámetro adimensional v_1 fue mayor a 7,000. Sin embargo, para las demás zonas se logró determinar que el transporte de sedimentos de fondo por arrastre y en suspensión ascienden a 98.66 kgf/s y 3,326.85 kgf/s respectivamente.

Con el método de Engelund y Fredsoe fue posible la estimación del transporte de sedimentos en todas las zonas, sin embargo, los resultados obtenidos del transporte de fondo en suspensión para las zonas 1 y 10 no son congruentes, ya que arrojaron magnitudes negativas, por lo que no serán tomados en consideración. El transporte de

sedimentos de fondo calculado para las 10 zonas es de 196.94 kgf/s y el transporte de sedimentos de fondo calculados desde la zona 2 hasta la zona 9 es de 407.44 kgf/s.

Con el método de Kikkawa w Ishikawa fue posible la estimación del transporte de sedimentos en todas las zonas, sin embargo, los resultados obtenidos del transporte de fondo en suspensión para las zonas 1 y 10 no son congruentes, ya que arrojaron magnitudes negativas y esto se debería a que el número de Reynolds asociado a las partículas es menor que 7.5, por lo que no serán tomados en consideración. El transporte de sedimentos de fondo calculado para las 10 zonas es de 1,283.16 kgf/s y el transporte de sedimentos de fondo calculados desde la zona 2 hasta la zona 9 es de 1,028.82 kgf/s. Este es el segundo resultado dónde el transporte por arrastre es mayor al transporte en suspensión.

Con el método de Van Rijn no fue posible estimar el transporte en las zonas 1 y 10 debido a que los D_{50} se encontraban fuera de los intervalos de aplicación, sin embargo, se logró estimar que para las restantes zonas el transporte por arrastre asciende a 132.74 kgf/s y el de suspensión a 2,000.71 kgf/s.

Se observa que con ningún método fue posible estimar los transportes de sedimentos en las zonas 1 y 10, esto se debe principalmente a que los diámetros de las partículas son ínfimos y se encuentran fuera del rango de aplicación.

A continuación, analizaremos los resultados obtenidos mediante la aplicación de los distintos métodos, para esto se presentará una tabla resumen en donde se podrá apreciar la congruencia entre algunos métodos.

Tabla 5.1. *Resumen de los resultados totales.*Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Método	GB (Kgf/s)	GBS (Kgf/s)
Einstein	253.54	10,499.98
Bagnold	1,500.79	880.01
Tofaletti	98.66	3,326.85
Engelund y Fredsoe	196.94	407.44
Kikkawa e Ishikawa	1,283.16	1,028.82
Van Rijn	132.74	2,000.71

Sin duda alguna se han obtenido resultados completamente distintos para un mismo grupo de datos, en donde para el transporte de fondo por arrastre existe cierta similitud entre los resultados obtenidos por los métodos de Einstein, Tofaletti, Engelund y Fredsoe, y Van Rijn; mientras que para el transporte de fondo en suspensión los resultados que presentan cierta similitud son los de Bagnold, Kikkawa e Ishikawa y Van Rijn.

Si bien es cierto es complicado establecer una cantidad exacta que represente al valor del transporte de sedimentos de fondo, en esta investigación se ha logrado determinar un rango en el cual se encontraría dicho valor. El transporte de sedimentos de fondo por arrastre se encuentra comprendido entre 98.66 Kgf/s y 1,500.79 Kgf/s, mientras que el transporte de sedimentos de fondo en suspensión entre 407.44 Kgf/s y 10,499.98 Kgf/s. Siendo el promedio de los métodos que presentan congruencia el que represente con mejor exactitud el valor real.

5.2 Transporte de Sedimentos de Lavado.

Con el método de Lane y Kalinske fue posible estimar el transporte de sedimentos de lavado en todas las zonas, determinándose que el perfil de concentraciones considerado puede presentar errores de hasta 18 %, tal y como se verificó para la zona 4, sin embargo, se ha estimado que el transporte de lavado para las 10 zonas vendría a ser de 3,844.74 kgf/s.

Con el método de Einstein fue posible estimar el transporte de sedimentos de lavado en todas las zonas, determinándose que el perfil de concentraciones considerado puede

presentar errores de hasta 20 %, del mismo modo se ha determinado que el perfil de velocidades considerado en el método puede presentar errores de hasta 100 %, sobrestimando las velocidades en las partes más profundas. Sin embargo, se logró estimar que el transporte de sedimentos de lavado vendría a ser de 1,986,683.08 kgf/s, lo cual comparando con el resultado obtenido por Einstein es exorbitante.

Con el método de Brooks fue posible estimar el transporte de sedimentos de lavado en todas las zonas, determinándose que el perfil de concentraciones considerado puede presentar errores de hasta 18 %, así como también el perfil de velocidades puede presentar errores de hasta 90 %, sobrestimando las velocidades conforme aumenta la profundidad. Sin embargo, se ha determinado que el transporte de lavado para todas las zonas es de 24,106.20 kgf/s.

Con el método de Chang, Simons y Richardson fue posible estimar que el transporte de sedimentos de lavado en todas las zonas es de 22,334.89 kgf/s, sin embargo, se ha logrado observar que el perfil de concentraciones utilizados puede presentar errores de hasta 17 %, mientras que el perfil de velocidades puede presentar errores de hasta 93 % sobrestimando las velocidades conforme aumenta la profundidad.

Con el método de ajuste mediante datos del ADCP fue posible estimar que el transporte de sedimentos de lavado en todas las zonas es de 20,073.19 kgf/s, encontrándose que las correlaciones entre las velocidades medidas en campo con el ADCP y el logaritmo natural de la elevación sobre el fondo se encuentran entre 51 % y 86 % indicando que la ecuación utilizada propuesta por Prandtl – von – Karman expresa un buen ajuste entre ambas variables y es posible la representación del perfil de velocidades mediante esta ecuación. Con esto se determinó cada uno de los coeficientes que acompañan a la Ec. 2.189 y con lo cual fue posible representar cada perfil de velocidad mediante una ecuación diferente.

Debido a esto es posible indicar que en comparación con todos los métodos empíricos anteriormente mencionados este es el que genera mayor confianza con sus resultados.

Con el método de índice acústico fue posible estimar que el transporte de sedimentos de lavado en toda la sección de análisis es de 12,890.53 kgf/s, sin duda alguna es el método que mejor representación genera ya que nos permite obtener la distribución de concentraciones en toda la sección transversal dividida en celdas de 0.5 m x 0.5 m aproximadamente. Para este método se consideró un coeficiente de atenuación promedio de 1.31, el cual resultado de todos los coeficientes hallados de las muestras de concentraciones recolectadas en campo, sin embargo, esto genera un error al cálculo ya que cada concentración de partículas encontradas en cada celda debería de tener un coeficiente de atenuación único.

Del análisis de regresión lineal efectuado entre los resultados de la retrodispersión corregida y el logaritmo de la concentración de sedimentos se logró estimar que el valor de la variable de correlación A es de 0.0078 y que el de Kt es 1.4579, lo cuales fueron reemplazados en la ecuación 4.33.

Se realizaron comparaciones entre las concentraciones obtenidas mediante la aplicación de la ecuación del método de índice acústico y las concentraciones obtenidas de la muestra de campo, encontrándose diferencias de hasta 15%, lo cual nos permite indicar que la aplicación del método es asertiva.

Ahora analizando los resultados obtenidos de los distintos métodos para el transporte de sedimentos de lavado obtenemos lo siguiente:

Tabla 5.2. Resultados de los métodos analizados para el transporte de lavado en suspensión. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Método	GL (Kgf/s)
Lane y Kalinske	3,844.74
Einstein	1,986,683.08
Brooks	24,106.20
Chang, Simons y Richardson	22,334.89
Método de ajuste mediante datos del ADCP	20,073.19
Método del índice acústico	12,890.53

Como logramos observar de la tabla anterior, existe bastante similitud entre los resultados obtenidos por los métodos empíricos de Brooks, Chang, Simons y Richardson, y el método de ajuste mediante datos del ADCP, además logramos notar que con el método del índice acústico también se obtiene un resultado congruente, con la ventaja de que con este método se logra generar una muy buena representación de la distribución espacial de las concentraciones en la sección transversal del río por la cantidad de información que nos entrega el ADCP.

Por otro lado, se ha logrado observar además que todas las ecuaciones de distribución de concentraciones utilizadas en los distintos métodos logran generar una representación real aceptable, obteniendo errores entre el 8% y 20%, siendo que el mejor ajuste se obtiene de Lane y Kalinske.

Por lo dicho anteriormente se estaría recomendando para posteriores estimaciones de transporte de sedimentos la utilización del Método de Ajuste Mediante Datos del ADCP y el Método de Índice Acústico, ya que con estos podremos definir los propios perfiles de velocidades y concentraciones en función de la información real recolectada en campo, así como también obtener la distribución espacial de dichas concentraciones.

Finalmente concluimos que el transporte de sedimentos de lavado calculado mediante la aplicación de los métodos modificados antes descritos obtiene un valor promedio de 22,171.43 Kgf/s.

CONCLUSIONES

- Se han definido las metodologías que se deberían de utilizar para la realización de las mediciones de campo, tales como la geodesia, la medición de los niveles de río, los aforos con ADCP y los muestreos de sedimentos en suspensión y de fondo. De esto se puede resaltar que es necesario dividir a la sección transversal de análisis en partes proporcionales de tal manera que se logre garantizar la representación de los sedimentos que la constituyen, así como también conocer mínimamente dos concentraciones de sedimentos en suspensión en cada vertical de sección, para de esta manera poder definir un perfil de concentraciones utilizando las ecuaciones de transporte de lavado modificadas en aplicación por el autor de esta investigación.
- Se han logrado exponer las bondades del uso de un ADCP para la realización de este tipo de investigaciones, como se definió anteriormente el ADCP no solo brinda información muy detallada de las velocidades y corrientes celda por celda, sino también de la retrodispersión, la cual puede ser utilizada para la estimación del transporte de sedimentos de lavado, tal y como se realizó en esta investigación, demostrando congruencia con los resultados obtenidos con los métodos empíricos y de ajuste.
- Se han realizado modificaciones a las ecuaciones empíricas presentadas por Maza y García en el Capítulo 10 del Manual de Ingeniería de Ríos para el transporte de sedimentos de lavado, de tal manera de que se puedan aplicar con el conocimiento de dos concentraciones de sedimentos en una vertical y sin la necesidad de conocer el diámetro representativo de la partícula directamente.
- Se ha logrado determinar que el perfil de concentraciones que mejor se adecua para este evento del río Amazonas es el de Lane y Kalinske, por lo que se recomienda su utilización para futuras investigaciones.

- Se ha logrado determinar el transporte de sedimentos de fondo, por arrastre y en suspensión, para lo cual se han analizado los métodos de Einstein, Bagnold, Tofaletti, Engelund y Fredsoe, Kikkawa e Ishikawa y Van Rijn, obteniendo congruencia entre los métodos de Einstein, Tofaletti, Engelund y Fredsoe, y Van Rijn para el transporte de fondo por arrastre, y de Bagnold, Kikkawa e Ishikawa y Van Rijn para el transporte de fondo en suspensión, determinándose que el transporte de sedimentos por arrastre se encuentra entre 98.66 kgf/s y 1,500.79 kgf/s, donde la estimación más acertada sería el promedio de todos los métodos que obtuvieron congruencia, lo cual asciende a 170.47 kgf/s. Mientras que se determinó que el transporte de fondo en suspensión se encontraría entre 407.44 kgf/s y 10,499.98 kgf/s, donde la estimación también más acertada sería la del promedio de los métodos que obtuvieron congruencia, lo cual asciende a 1,303.1800 kgf/s.
- Se ha logrado determinar la capacidad del transporte de sedimentos de lavado, para lo cual se analizaron los métodos de Lane y Kalinske, Einstein, Brooks, Chang, Simons y Richardson, de ajuste mediante datos del ADCP y del índice acústico, encontrando congruencia entre los resultados de Brooks, Chang, Simons y Richardson, y el método de ajuste con datos del ADCP, por lo que la estimación más acertada sería el promedio de las estimaciones de todos estos métodos, resultando el valor de 22,171.43 kgf/s.
- Se ha demostrado la importancia y la congruencia del método de índice acústico para la estimación del transporte de sedimentos de lavado, ya que nos permite obtener una distribución espacial en toda la sección transversal del comportamiento de las magnitudes del transporte, sin embargo, habría que obtener una mejor representatividad para el coeficiente de atenuación de sedimentos y no solo considerar promedio de los valores muestreados.

- Se ha determinado que el transporte de sedimentos total en el río Amazonas para un caudal de 44,946.71 m³/s asciende a 23,645.08 Kgf/s, de donde el transporte de fondo por arrastre representa el 1%, el transporte de fondo en suspensión representa el 6 % y el transporte de lavado representa el 94 %.
- Si bien es cierto que cuantitativamente el transporte de fondo por arrastre es insignificante con respecto a las otras estimaciones de transportes, este tiene su importancia en la forma del transporte, ya que por ejemplo en el hipotético caso de analizar una ejecución de dragado en el río Amazonas, el que hiciere perder las profundidades obtenidas por el dragado es sin duda alguna el transporte de sedimentos por arrastre, entonces en ello radica la importancia de su conocimiento y estimación.

RECOMENDACIONES

- Para futuras investigaciones en los ríos amazónicos se recomienda la utilización de las metodologías empleadas y descritas en esta investigación, ya que muchas de ellas han sido modificadas para su aplicabilidad en nuestros ríos de la selva del Perú.
- Para una mejor estimación del transporte de sedimentos de fondo en suspensión se recomienda la extracción de muestras de sedimentos en suspensión lo más cercano al fondo, es decir a profundidades del 80 % del tirante y 90 % del tirante, de tal manera que sea posible la recolección de sedimentos cuyos diámetros sean mayores a 0.074 mm a fin de poder conocer la concentración de los sedimentos de fondo en suspensión y la cuantificación del transporte mediante la aplicación de los métodos del ítem 2.9. En esta investigación no se logró realizar estos cálculos debido a la falta de esta información, por lo que se optó por la cuantificación mediante los métodos en los cuales solo es necesario conocer la composición del fondo.
- Se recomienda la utilización de Perfiladores Acústicos de Corrientes Doppler (ADCP) para la medición de las velocidades, caudales y líneas de corriente, de igual manera para la obtención de la retrodispersión ya que como se ha demostrado en esta investigación su aplicación para el cálculo del transporte de sedimentos es indispensable.
- En la actualidad no existen estándares o metodologías para la realización de estos estudios en el Perú, sin embargo, se vienen desarrollando concesiones para la mejora la navegación en nuestros ríos amazónicos, por lo que se recomienda la utilización de estas metodologías para el establecimiento de estándares por parte de las entidades estatales y privadas a fin de poder realizar comparaciones en un futuro y ver la variabilidad y el impacto que se generó a raíz de estas intervenciones.

Bibliografía

- Apaclla Nalvarte, R. (2014). *Hidráulica Fluvial*. Lima, Perú: Fondo Editorial Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Armijos Cárdenas, E. (2010). *Cuantificación de Flujos Sedimentarios de las Cuencas Amazónicas de Perú* (tesis de postgrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.
- Basile, P. (2018). *Transporte de Sedimentos y Morfodinámica de Ríos Aluviales*. Rosario, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional del Rosario.
- Castillo, L., Martín, J. y Marín, D. (2009). Coeficientes de Resistencia, Transporte de Sedimentos y Caudal Dominante en Regiones Semiáridas. *I Jornada de Ingeniería del Agua*, Madrid, España.
- Chang Howard, H. (1992). *Fluvial Processes in River Engineering*. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company.
- Latosinski, F., Szupiany, R., García, C. y Guerrero, M. Estimación del Transporte de Sedimentos de Fondo en un Gran Río con Perfilador Acústico Doppler.
- Martín Vide, J. (2001). *Ingeniería de Ríos*. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- Maza, J. y García, M. (1996). *Manual de Ingeniería de Ríos*. México: Series del Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de México.
- Maza Álvarez, J. A. y Val Segura, R. (S.F.). Fórmulas para Cuantificar el Arrastre en la Capa de Fondo. *Hidráulica Fundamental*. Recuperado de: http://eias.usalca.cl/isi/coordinadores/rafael_val/96maza.pdf.
- Rocha Felices, A. (1972). *Transporte de Sedimentos*. Lima, Perú: Fondo Editorial Universidad Nacional de Ingeniería.

- Salina, H., Mendoza, L. y García, J. (2014). Herramienta Computacional para el Cálculo de la Tasa de Transporte de Sedimentos de Fondo y en Suspensión en Ríos. *XXII Congreso Nacional de Hidráulica*, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Schumm, S. (1985). Patterns of Alluvial Rivers. *Earth Planet*, 13.
- Van Rijn, L. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Amsterdam, Holanda: Aqua Publications.
- Vega, E. M. (1985). *Estudio de Transporte de Sedimentos con Aplicación al río Ucayali* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.

ANEXO A

Memoria de Cálculo

En este anexo presentaremos el proceso de cálculo para una sección de análisis y en algunos casos en específico para un diámetro representativo de una sección de análisis.

Transporte de Sedimentos de Fondo por Arrastre y en Suspensión.

Método de Einstein.

La memoria de cálculo fue realizada solo para la zona 2, para las demás zonas se seguirá el mismo procedimiento.

El proceso de cálculo se inicia asumiendo un valor de R' menor que R , en este caso será igual a 4 m. Luego se procede a calcular la velocidad de corte asociada a la partícula mediante la aplicación de la ecuación 2.20:

$$V_*' = \sqrt{gR'S} = \sqrt{9.81 * 4 * 0.0000326} = 0.0358 \text{ m/s}$$

Ahora procedemos a calcular el espesor de la subcapa viscosa mediante la aplicación de la ecuación 2.21:

$$\delta_o' = \frac{11.64\nu}{V_*'} = \frac{11.64 * 0.00000084457}{0.0358} = 0.0003 \text{ m}$$

Se calcula el factor de corrección x en función del $\frac{D_{65}}{\delta_o'}$ mediante la aplicación de la figura 2.10 (Ver figura A.1).

$$\frac{D_{65}}{\delta_o'} = \frac{0.00023}{0.0003} = 0.7667$$

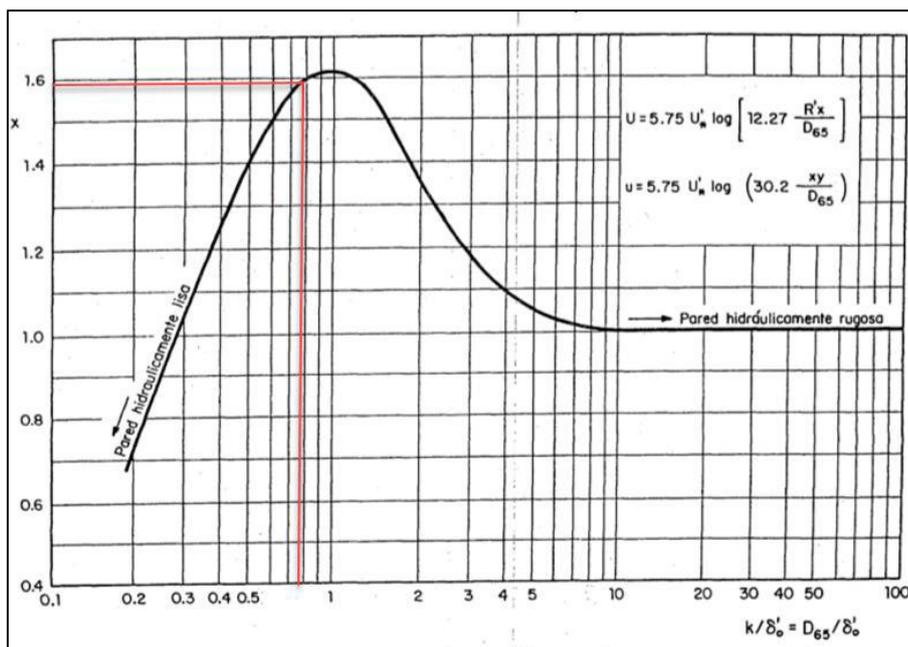


Figura A.1. Determinación del factor de corrección x . Fuente: Elaboración propia, 2019.

De donde x toma el valor de 1.59.

Con esto se estima el valor de la velocidad media del flujo mediante la aplicación de la ecuación 2.22.

$$V = 5.75V_*' \log \left(12.27 \frac{R'x}{D_{65}} \right) = 5.75 * 0.0358 * \log \left(12.27 \frac{4 * 1.59}{0.00023} \right) = 1.1396 \text{ m/s}$$

Comparando con la velocidad promedio medida en campo para la zona 2, la cual es 1.29 m/s según la tabla 4.1, se logra observar que no existe similitud entre ambas magnitudes, por lo que habría que repetir el proceso de cálculo nuevamente asumiendo otro valor de R' hasta que la velocidad medida en campo sea igual a la velocidad media que se obtiene por la aplicación de la ecuación 2.22.

Luego de varios procesos iterativos se estimó que el valor de R' vendría a ser 4.95 m, donde ahora la velocidad de corte asociada a las partículas vendría a ser:

$$V_*' = \sqrt{gR'S} = \sqrt{9.81 * 4.95 * 0.0000326} = 0.0398 \text{ m/s}$$

Ahora procedemos a calcular el espesor de la subcapa viscosa nuevamente mediante la aplicación de la ecuación 2.21:

$$\delta_o' = \frac{11.64v}{V_*'} = \frac{11.64 * 0.00000084457}{0.0397} = 0.000247 \text{ m}$$

Se calcula nuevamente el factor de corrección x en función del $\frac{D_{65}}{\delta_o'}$ mediante la aplicación de la figura 2.10 (Ver figura A.2).

$$\frac{D_{65}}{\delta_o'} = \frac{0.000230}{0.000247} = 0.931$$

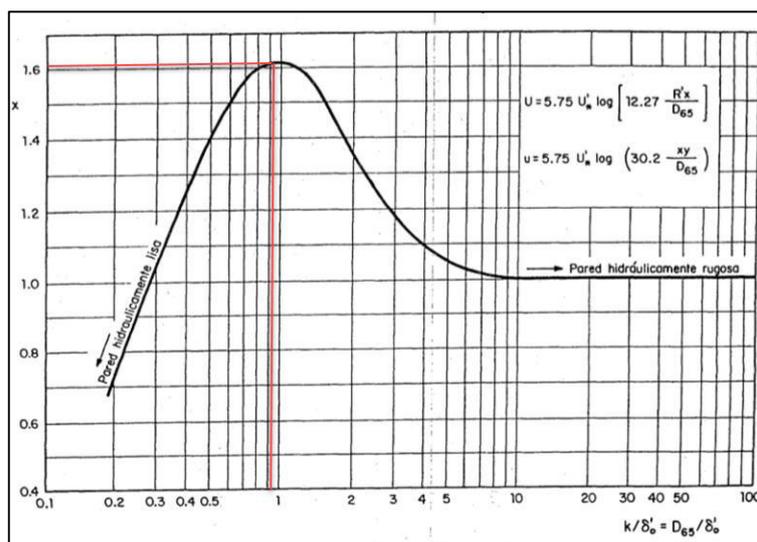


Figura A.2. Determinación del factor de corrección x . Fuente: Elaboración propia, 2019.

De donde x toma el valor de 1.61.

Con esto se estima el valor de la velocidad media del flujo mediante la aplicación de la ecuación 2.22.

$$\begin{aligned} V &= 5.75V_*' \log \left(12.27 \frac{R'x}{D_{65}} \right) = 5.75 * 0.0398 * \log \left(12.27 \frac{4.95 * 1.61}{0.00023} \right) \\ &= 1.2901 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Comparando con la velocidad promedio medida en campo para la zona 2, la cual es 1.29 m/s según la tabla 4.1, se logra observar que los valores obtenidos son iguales, por lo que se aceptan los cálculos y se procede con el desarrollo.

Ahora procedemos a calcular:

$$\frac{D_{65}}{x\delta_o'} = \frac{0.000230}{1.61 * 0.000247} = 0.5782$$

Como $\frac{D_{65}}{x\delta_0'}$ vendría a ser menor que 1.8, entonces:

$$X = 1.39\delta_0' = 1.39 * 0.000247 = 0.000343$$

Ahora procedemos a realizar los cálculos para la primera fracción de la curva granulométrica, la cual vendría a estar representada por $D_5=0.000079$ m

Calculando:

$$\frac{D_i}{X} = \frac{0.000079}{0.000343} = 0.23$$

Ahora procedemos a calcular Y y ε_i en función de $\frac{D_{65}}{\delta_0'}$ y $\frac{D_i}{X}$ respectivamente con la aplicación de la figura 2.11, donde $\frac{D_{65}}{\delta_0'} = 0.931$ y $\frac{D_i}{X} = 0.23$ (Ver figura A.3).

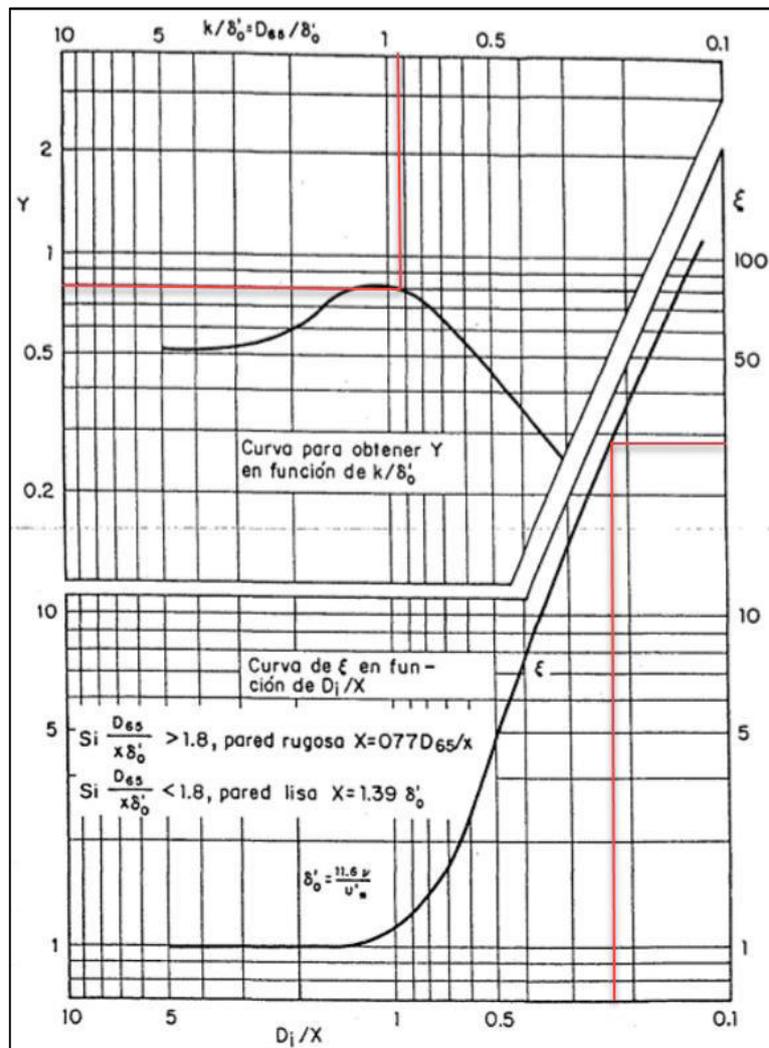


Figura A.3. Determinación de Y y ε_i . Fuente: Elaboración propia, 2019.

De donde se obtiene que $Y = 0.79$ y $\varepsilon_i = 28$.

Ahora procedemos a estimar ψ_{*i} mediante la aplicación de la ecuación 2.25.

$$\begin{aligned}\psi_{*i} &= Y\varepsilon_i \left[\frac{\log 10.6}{\log \left(10.6 \frac{xX}{D_{65}} \right)} \right]^2 \frac{(\gamma_s - \gamma)D_i}{\gamma R'S} \\ &= 0.79 * 28 \\ & * \left[\frac{\log 10.6}{\log \left(10.6 \frac{1.59 * 0.000343}{0.000230} \right)} \right]^2 \frac{(2,708.98 - 996.31) * 0.000079}{996.31 * 4.95 * 0.0000326} \\ &= 9.90\end{aligned}$$

Con la ayuda de la figura 2.12 procedemos a calcular ϕ_{*i} (Ver figura A.4):

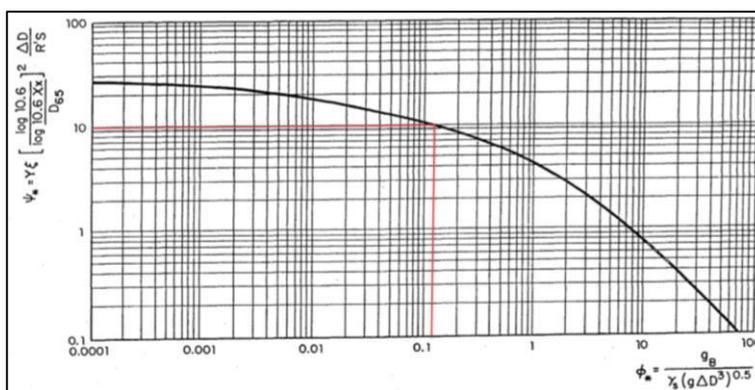


Figura A.4. Estimación de ϕ_{*i} . Fuente: Elaboración propia, 2019.

De donde se obtiene $\phi_{*i} = 0.12$

Finalmente, para la estimación del transporte de sedimentos de fondo procedemos con la aplicación de la ecuación 2.18:

$$\begin{aligned}g_{Bi} &= \phi_{*i} p_i \gamma_s (g \Delta D_i^3)^{1/2} = 0.12 * 0.1 * 2,708.98 * (9.81 * 1.72 * 0.000079^3)^{1/2} \\ &= 0.0001 \frac{kgf}{s.m}\end{aligned}$$

Ahora procedemos con los cálculos para el transporte de sedimentos en suspensión:

Procedemos con el cálculo de a_i :

$$a_i = 2 * D_i = 2 * 0.000079 = 0.000158$$

Calculando:

$$A_i = \frac{a_i}{d} = \frac{0.000158}{18.24} = 0.0000087$$

Ahora procedemos con el cálculo de F_i para la determinación de la velocidad de caída de la partículas.

$$\begin{aligned} F_i &= \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g\Delta D_i^3}\right)} - \sqrt{\frac{36v^2}{g\Delta D_i^3}} \\ &= \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36 * 0.0000087^2}{9.81 * 1.72 * 0.000079^3}\right)} - \sqrt{\frac{36 * 0.0000087^2}{9.81 * 1.72 * 0.000079^3}} \\ F_i &= 0.1804 \end{aligned}$$

Calculando la velocidad de caída:

$$w_i = F_i(g\Delta D_i)^{0.5} = 0.184 * (9.81 * 1.72 * 0.000079)^{0.5} = 0.0066 \text{ m/s}$$

Ahora calculando la velocidad de corte de fondo:

$$V_* = \sqrt{gRS} = \sqrt{9.81 * 17.436 * 0.0000326} = 0.0747 \text{ m/s}$$

Ahora estimamos z_i :

$$z_i = \frac{2.5 * w_i}{V_*} = \frac{2.5 * 0.0066}{0.0747} = 0.2205$$

Resolviendo las integrales J_1 y J_2 :

$$J_{1i} = \int_{A_i}^1 \left(\frac{1-E}{E}\right)^{z_i} dE = \int_{0.0000087}^1 \left(\frac{1-E}{E}\right)^{0.2205} dE = 1.0845$$

$$J_{2i} = \int_{A_i}^1 \left(\frac{1-E}{E}\right)^{z_i} \ln E dE = \int_{0.0000087}^1 \left(\frac{1-E}{E}\right)^{0.2205} \ln E dE = -1.5556$$

Estimando I_1 e I_2 :

$$I_{1i} = 0.216 * \frac{A^{z_i-1}}{(1-A)^{z_i}} J_{1i} = 0.216 * \frac{0.0000087^{0.2205-1}}{(1-0.0000087)^{0.2205}} * 1.0845 = 2,070.2464$$

$$I_{2i} = 0.216 * \frac{A^{zi-1}}{(1-A)^{zi}} J_{2i} = 0.216 * \frac{0.0000087^{0.2205-1}}{(1-0.0000087)^{0.2205}} * -1.5556$$

$$= -2,969.5485$$

Ahora aplicando la ecuación 2.27:

$$g_{BSi} = g_{Bi} \left(\left(2.303 \log \left(\frac{30.2xd}{D_{65}} \right) \right) I_{1i} + I_{2i} \right)$$

$$= g_{Bi} \left(\left(2.303 \log \left(\frac{30.2 * 1.61 * 18.240}{0.00023} \right) \right) * 2,070.2464 \right.$$

$$\left. - 2,969.5485 \right) = 2.6650 \frac{kgf}{s.m}$$

Método de Bagnold.

Los cálculos serán realizados para la zona 3 y específicamente para la fracción 9, para las demás fracciones y zonas el procedimiento es el mismo.

El método inicia con el cálculo del esfuerzo cortante de fondo mediante la aplicación de la ecuación 2.31:

$$\tau_o = \gamma RS = 996.31 * 17.436 * 0.0000326 = 0.651$$

Ahora estimamos el parámetro de Shield:

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)^{Di}} = \frac{0.651}{(2696.03 - 996.31)^{0.000310}} = 1.235$$

Luego, estimamos la tangente del ángulo promedio de choque entre partículas, mediante la aplicación de la figura 2.16 (Ver figura A.5).

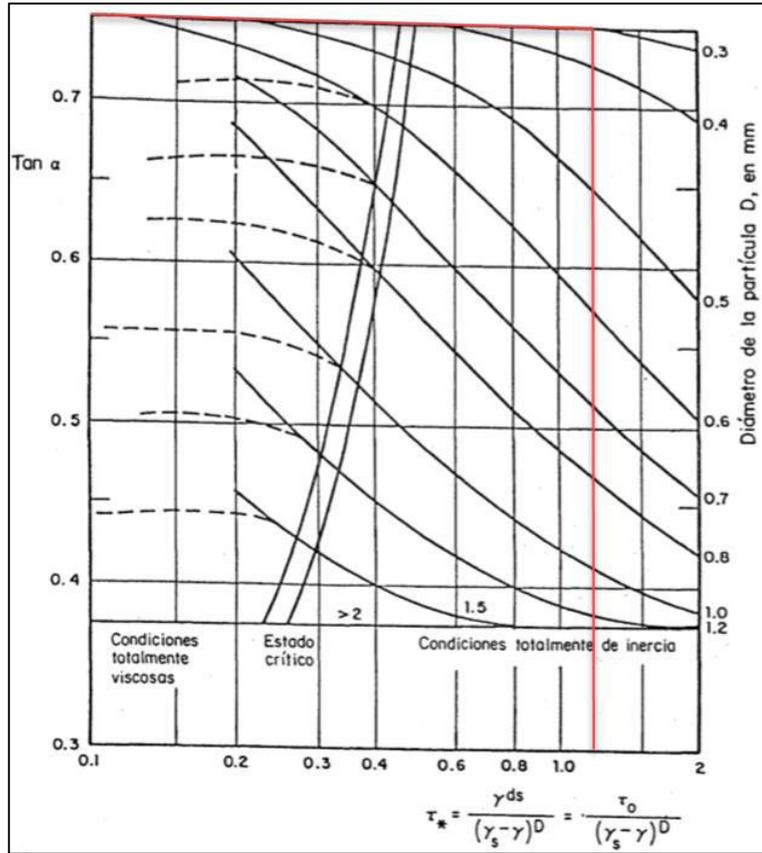


Figura A.5. Estimación la tan (α). Fuente: Elaboración propia, 2019.

De donde:

$$\tan(\alpha) = 0.75$$

Ahora determinamos el factor de eficiencia de arrastre de fondo mediante la aplicación de la figura 2.15 (Ver figura A.6):

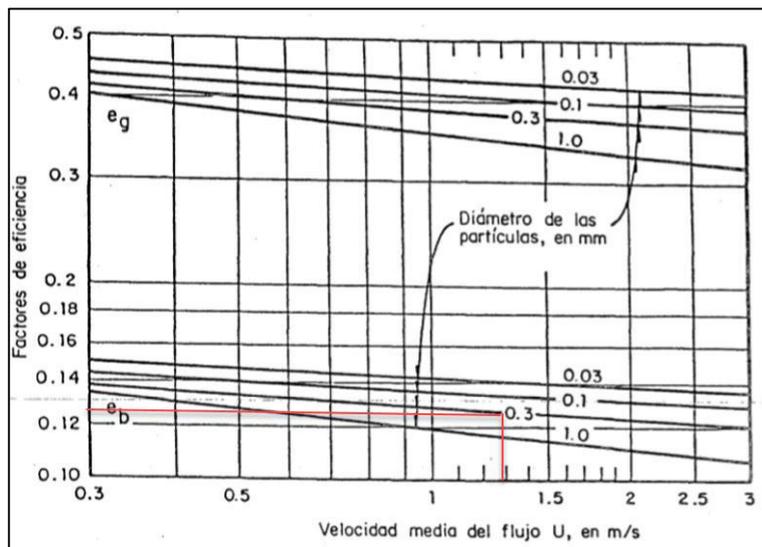


Figura A.6. Determinación del factor de eficiencia. Fuente: Elaboración propia, 2019.

De donde:

$$e_b = 0.125$$

Finalmente aplicando la ecuación 2.30 logramos estimar el transporte de sedimentos por arrastre para la fracción 9 de la curva granulométrica de la zona 3.

$$g_B = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \right) \frac{e_b}{(\tan \alpha)} \tau_o V = \left(\frac{2696.03}{2696.03 - 996.31} \right) * \frac{0.125}{(0.75)} * 0.651 * 1.520$$

$$= 0.2820$$

Ahora procedemos a realizar los cálculos del transporte de fondo en suspensión para la fracción 1 de la curva granulométrica.

Iniciamos calculando el valor de F_i para la determinación de la velocidad de caída de las partículas.

$$F_i = \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g\Delta D_i^3} \right)} - \sqrt{\frac{36v^2}{g\Delta D_i^3}}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36 * 0.00000084457^2}{9.81 * 1.71 * 0.000080^3} \right)} - \sqrt{\frac{36 * 0.00000084457^2}{9.81 * 1.71 * 0.000080^3}}$$

$$F_i = 0.1829$$

Calculando la velocidad de caída:

$$w_i = F_i(g\Delta D_i)^{0.5} = 0.1829 * (9.81 * 1.71 * 0.000080)^{0.5} = 0.0067$$

Se realiza el mismo procedimiento para las otras fracciones de la curva granulométrica obteniendo el siguiente resultado:

Tabla A.1. Resumen de las estimaciones para las demás fracciones.
Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

Orden		p_i	D_i (m)	F_i	w_i (m/s)
1	D ₅	0.1	0.000080	0.1829	0.0067
2	D ₁₅	0.1	0.000150	0.3847	0.0193
3	D ₂₅	0.1	0.000170	0.4306	0.0230
4	D ₃₅	0.1	0.000185	0.4611	0.0257
5	D ₄₅	0.1	0.000200	0.4886	0.0283
6	D ₅₅	0.1	0.000220	0.5208	0.0316
7	D ₆₅	0.1	0.000250	0.5612	0.0363
8	D ₇₅	0.1	0.000260	0.5728	0.0378
9	D ₈₅	0.1	0.000310	0.6205	0.0447
10	D ₉₅	0.1	0.000340	0.6425	0.0485

De donde se estima la velocidad de caída equivalente de las partículas mediante la aplicación de la ecuación 2.34.

$$w_e = \sum_i p_i w_i = 0.0302 \text{ m/s}$$

Finalmente obtenemos el transporte de fondo en suspensión mediante la aplicación de la ecuación 2.32.

$$g_{BS} = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \right) \frac{0.01}{(w_e)} \tau_o V^2 = \left(\frac{2696.03}{2696.03 - 996.31} \right) * \frac{0.01}{(0.0302)} * 0.651 * 1.52^2$$

$$= 0.8501 \frac{\text{kgf}}{\text{s.m}}$$

Método de Toffaleti.

El método será evaluado para la primera fracción de la curva granulométrica de la zona 2.

El método inicia con la determinación de y_e e y_m , los cuales se encuentran escritos en función de R según las ecuaciones 2.66 y 2.67.

$$y_e = \frac{R}{11.24} = \frac{17.436}{11.24} = 1.551$$

$$y_m = 0.4R = 0.4 * 17.436 = 6.975$$

Ahora determinamos y_{B_i} mediante la aplicación de la ecuación 2.65:

$$y_{B_i} = 2D_i = 2 * 0.000079 = 0.000158$$

Estimamos los factores de corrección T_T , n_v y T_Z , los cuales se encuentran escritos en función de la temperatura según las ecuaciones 2.56, 2.60 y 2.62.

$$T_T = 0.059268 + 0.0001782t = 0.059268 + 0.0001782 * 27.7 = 0.0642$$

$$n_v = 0.13516 + 0.000864t = 0.13516 + 0.000864 * 27.7 = 0.1591$$

$$T_Z = 239.326 - 1.2006t = 239.326 - 1.2006 * 27.7 = 206.0694$$

Ahora procedemos con el cálculo de F_i para la determinación de la velocidad de caída de la partículas.

$$F_i = \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g\Delta D_i^3}\right)} - \sqrt{\frac{36v^2}{g\Delta D_i^3}}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36 * 0.00000084457^2}{9.81 * 1.72 * 0.000079^3}\right)} - \sqrt{\frac{36 * 0.00000084457^2}{9.81 * 1.72 * 0.000079^3}}$$

$$F_i = 0.1804$$

Calculando la velocidad de caída:

$$w_i = F_i(g\Delta D_i)^{0.5} = 0.184 * (9.81 * 1.72 * 0.000079)^{0.5} = 0.0066$$

Estimando z_i :

$$z_i = \frac{3.2808w_iV}{T_ZRS} = \frac{3.2808 * 0.0066 * 1.290}{206.0694 * 17.436 * 0.0000326} = 0.2379$$

Obteniendo los exponentes e_{1_i} , e_{2_i} , e_{3_i} mediante la aplicación de las ecuaciones 2.57, 2.58 y 2.59:

$$e_{1_i} = 1 + n_v - 1.5z_i = 1 + 0.1591 - 1.5 * 0.2379 = 0.8022$$

$$e_{2_i} = 1 + n_v - z_i = 1 + 0.1591 - 0.2379 = 0.9212$$

$$e_{3_i} = 1 + n_v - 0.756z_i = 1 + 0.1591 - 0.756 * 0.2379 = 0.9792$$

Ahora estimando v_1 y v_2 según las ecuaciones 2.54 y 2.55:

$$v_1 = \frac{V}{\sqrt{gD_{65}S}} = \frac{1.290}{\sqrt{9.81 * 0.000230 * 0.0000326}} = 4756.4451$$

$$v_2 = \frac{V^3}{g\nu S} = \frac{1.290^3}{9.81 * 0.00000084457 * 0.0000326} = 7.9 * 10^9$$

Procedemos a estimar v_3 con la ayuda de la figura 2.23 (Ver figura A.7):

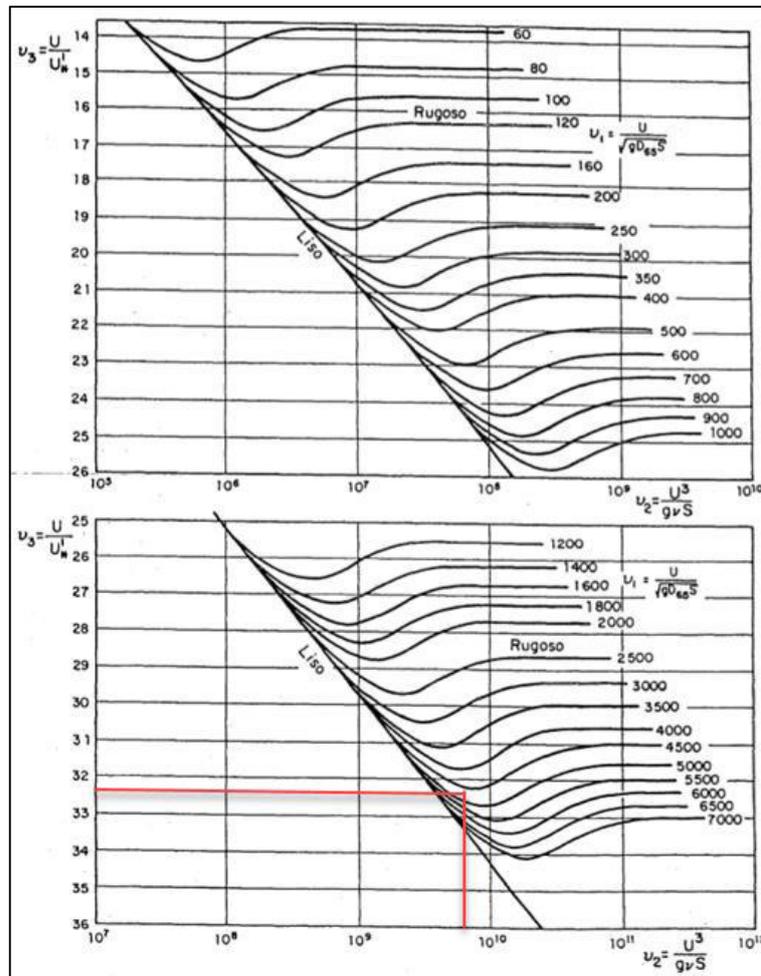


Figura A.7. Determinación de v_3 . Fuente: Elaboración propia, 2019.

De donde:

$$v_3 = 32.3$$

Ahora estimando la V'_* mediante la aplicación de la ecuación 2.53:

$$V'_* = \frac{V}{v_3} = \frac{1.290}{32.3} = 32.30$$

Estimando e_0 y e_1 mediante la aplicación de la ecuación 2.51 y 2.52:

$$e_o = \frac{1'024,870v^{1/3}SD_{65}}{V_*'} = \frac{1'024,870 * 0.00000084457^{1/3} * 0.0000326 * 0.000230}{32.30} = 0.018$$

$$e_1 = \frac{1.459(gv)^{1/3}}{V_*'} = \frac{1.459 * (9.81 * 0.00000084457)^{1/3}}{32.30} = 0.7392$$

Ahora estimamos el coeficiente A y el factor de corrección K_T mediante la aplicación de la figura 2.22 (Ver figura A.8):

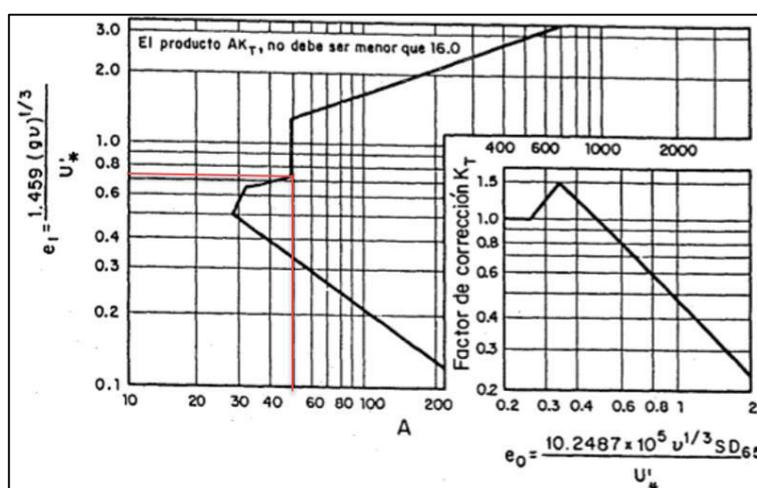


Figura A.8. Determinación del coeficiente A y el factor de corrección K_T .

Fuente: Elaboración propia, 2019.

De donde:

$$A = 50.00$$

$$K_T = 1.00$$

Debido a que e_o es menor que 0.2.

Ahora para proseguir con los cálculos tenemos que corroborar que el valor de AK_T sea mayor que 16.

$$AK_T = 50.00 * 1.00 = 50.00$$

Ahora determinamos g_{b_i} mediante la aplicación de la ecuación 2.50:

$$g_{bi} = \frac{(0.01362V)^{10/3} p_i}{[(AK_T)T_T D_i]^{5/3}} = \frac{(0.01362 * 1.290)^{10/3} * 0.1}{[(50.00 * 1.00) * 0.0642 * 0.000079]^{5/3}} = 0.1388 \frac{kgf}{s.m}$$

Ahora determinando M_i mediante la aplicación de la ecuación 2.49:

$$M_i = \frac{g_{bi} e_{3i}}{(y_e)^{e_{3i}} - (y_{Bi})^{e_{3i}}} = \frac{0.1388 * 0.9792}{(1.551)^{0.9792} - (0.000158)^{0.9792}} = 0.0884$$

Finalmente determinando el transporte de sedimentos por arrastre g_{Bi} mediante la aplicación de la ecuación 2.48:

$$g_{Bi} = M_i (6.5616 D_i)^{e_{3i}} = 0.0884 * (6.5616 * 0.000079)^{0.9792} = 0.0001 \frac{kgf}{s.m}$$

Ahora procedemos a determinar el transporte en suspensión:

$$\begin{aligned} g_{ci} &= \frac{M_i (y_e)^{0.244z_i}}{e_{2i}} [(y_m)^{e_{2i}} - (y_e)^{e_{2i}}] \\ &= \frac{0.0884 * (1.551)^{0.244 * 0.2379}}{0.9212} [(6.975)^{0.9212} - (1.551)^{0.9212}] \\ &= 0.4416 \frac{kgf}{s.m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g_{ui} &= \frac{M_i (y_e)^{0.244z_i} (y_m)^{0.5z_i}}{e_{1i}} [(R)^{e_{1i}} - (y_m)^{e_{1i}}] \\ &= \frac{0.0884 * (1.551)^{0.244 * 0.2379} (6.975)^{0.5 * 0.2379}}{0.8022} [(17.436)^{0.8022} \\ &\quad - (6.975)^{0.8022}] = 0.7345 \frac{kgf}{s.m} \end{aligned}$$

Finalmente determinando el transporte de sedimentos de fondo en suspensión g_{BSi} mediante la aplicación de la ecuación 2.68:

$$g_{BSi} = g_{bi} + g_{ci} + g_{ui} = 0.1388 + 0.4416 + 0.7345 = 1.3149 \frac{kgf}{s.m}$$

Con el objetivo de comprobar que no se ha obtenido un resultado absurdo, se estima la concentración en la frontera superior de la capa de fondo, para esto calculamos la concentración media en la zona baja:

$$C_{b_i} = \frac{M_i}{(1 + nv) V d^{0.758z_i - nv}} = \frac{0.0884}{(1 + 0.1591) * 1.290 * 18.240^{0.758 * 0.2379 - 0.1591}}$$

$$= 0.0556 \frac{kgf}{m^3}$$

Ahora, procedemos a calcular la concentración en la frontera superior de la capa de fondo:

$$C_{B_i} = C_{b_i} \left[\frac{2D_i}{d} \right]^{-0.736z_i} = 0.0556 \left[\frac{2 * 0.000079}{18.2400} \right]^{-0.736 * 0.2379} = 0.4279 \frac{kgf}{m^3}$$

Como obtuvimos un valor de C_{B_i} es menor que 1600 Kgf/m³ por que los resultados con congruentes.

Método de Engelund y Fredsoe.

Hay que indicar que esta estimación es realizada para la primera fracción de la curva granulométrica de la zona 2, para la demás zona y la demás fracciones se tiene que seguir el mismo procedimiento.

El método inicia con la estimación de F_i :

$$F_i = \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g\Delta D_i^3} \right)} - \sqrt{\frac{36v^2}{g\Delta D_i^3}}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36 * 0.00000084457^2}{9.81 * 1.72 * 0.000079^3} \right)} - \sqrt{\frac{36 * 0.00000084457^2}{9.81 * 1.72 * 0.000079^3}}$$

$$F_i = 0.1804$$

Calculando la velocidad de caída:

$$w_i = F_i (g\Delta D_i)^{0.5} = 0.184 * (9.81 * 1.72 * 0.000079)^{0.5} = 0.0066$$

Estimando:

$$D_i^3 w_i = 0.000079^3 * 0.0066 = 3.25 * 10^{-15}$$

Ahora continuamos con las demás estimaciones para las siguientes fracciones de la curva granulométrica:

Tabla A.2. Resumen de las estimaciones para las demás fracciones.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

		p_i	D_i	F_i	W_i	$D_i^3 w_i$
			m		m/s	m ⁴ /s
1	D5	0.1	0.000079	0.1804	0.0066	3.25×10^{-15}
2	D15	0.1	0.000130	0.3336	0.0156	3.43×10^{-14}
3	D25	0.1	0.000170	0.4315	0.0231	1.14×10^{-13}
4	D35	0.1	0.000180	0.4522	0.0249	1.45×10^{-13}
5	D45	0.1	0.000190	0.4715	0.0267	1.83×10^{-13}
6	D55	0.1	0.000200	0.4895	0.0284	2.27×10^{-13}
7	D65	0.1	0.000230	0.5361	0.0334	4.06×10^{-13}
8	D75	0.1	0.000250	0.5620	0.0365	5.70×10^{-13}
9	D85	0.1	0.000270	0.5844	0.0394	7.76×10^{-13}
10	D95	0.1	0.000280	0.5945	0.0409	8.97×10^{-13}

Estimamos la velocidad de caída equivalente mediante la aplicación de la ecuación

2.98:

$$w_e = \sum_{i=1}^N p_i w_i = 0.1 * 0.0066 + 0.1 * 0.0156 + \dots + 0.1 * 0.0409 = 0.0276 \text{ m/s}$$

Ahora estimamos el diámetro equivalente mediante la aplicación de la ecuación 2.86:

$$D_e = \left[\frac{\sum_{i=1}^N D_i^3 w_i}{N w_e} \right]^{1/3} = \left[\frac{3.25 * 10^{-15} + 3.43 * 10^{-14} + \dots + 8.97 * 10^{-13}}{10 * 0.0276} \right]^{1/3}$$

$$= 0.000230 \text{ m}$$

Calculamos el parámetro adimensional de la partícula:

$$D_* = De \left(\frac{g \Delta}{v^2} \right)^{1/3} = 0.000230 * \left(\frac{9.81 * 1.706}{0.00000084457^2} \right)^{1/3} = 6.6039$$

Estimando:

$$t_{*c} = \frac{0.2196}{D_*} + 0.077 \exp \left[- \left(\frac{30.35}{D_*} \right)^{0.563} \right] = \frac{0.2196}{6.6039} + 0.077 \exp \left[- \left(\frac{30.35}{6.6039} \right)^{0.563} \right]$$

$$= 0.0405$$

Ahora estimamos el tirante asociado a las partículas, de la solución de la ecuación 2.88.

$$1.290 = 2.5 \sqrt{9.81 * d' * 0.0000326} \ln \frac{11.1 d'}{0.00023}$$

De donde:

$$d' = 5.9109 \text{ m}$$

Estimando el número adimensional de Shields mediante la aplicación de la ecuación

2.87:

$$\tau'_* = \frac{d'S}{\Delta D_e} = \frac{5.9109 * 0.0000326}{1.706 * 0.000230} = 0.4872$$

Considerando

$$\tan(\alpha) = 0.5095$$

Entonces estimamos la probabilidad de que en una capa sea arrastrada una partícula de fondo:

$$p = \left(1 + \frac{\pi \tan \alpha}{6(\tau'_* - \tau_{*c})}\right)^{-0.25} = \left(1 + \frac{\pi * 0.5095}{6(0.4872 - 0.0405)}\right)^{-0.25} = 0.8824$$

Ahora estimando el arrastre en la capa de fondo mediante la aplicación de la ecuación

2.75:

$$\begin{aligned} g_B &= 5p\gamma_s(g\Delta D_e^3)^{0.5}(\tau'^{0.5} - 0.7\tau_{*c}^{0.5}) \\ &= 5 * 0.8824 * 2708.98 \\ &\quad * (9.81 * 1.706 * 0.000230^3)^{0.5}(0.4872^{0.5} - 0.7 * 0.0405^{0.5}) \\ &= 0.0954 \frac{kgf}{s.m} \end{aligned}$$

Después procedemos a estimar la concentración lineal de fondo mediante la aplicación de la ecuación 2.90:

$$\begin{aligned} \lambda_b &= \left[\frac{\gamma}{0.027\gamma_s\tau'_*} \left(\tau'_* - \tau_{*c} - \frac{\pi p \tan \alpha}{6} \right) \right]^{0.5} \\ &= \left[\frac{996.3100}{0.027 * 2708.9800 * 0.4872} \left(0.4872 - 0.0405 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{\pi * 0.8824 * 0.5095}{6} \right) \right]^{0.5} = 2.3083 \end{aligned}$$

Ahora procedemos a calcular la concentración de referencia:

$$C_a = \frac{0.65}{\left(1 + \frac{1}{\lambda_b}\right)^3} = \frac{0.65}{\left(1 + \frac{1}{2.3083}\right)^3} = 0.2208 \frac{m^3}{m^3}$$

Ahora estimando el valor de A:

$$A = \frac{2D_e}{d} = \frac{2 * 0.000230}{18.2400} = 0.000025$$

Estimando z:

$$z = \frac{w_e}{0.4(gd'S)^{0.5}} = \frac{0.0276}{0.4(9.81 * 5.9109 * 0.0000326)^{0.5}} = 1.5841$$

Calculando J_1 y J_2 :

$$J_1 = \int_A^1 \left(\frac{1-E}{E}\right)^z dE = \int_{0.000025}^1 \left(\frac{1-E}{E}\right)^{1.5841} dE = 829.6786$$

$$J_2 = \int_A^1 \left(\frac{1-E}{E}\right)^z \ln E dE = \int_{0.000025}^1 \left(\frac{1-E}{E}\right)^{1.5841} \ln E dE = -7,411.3753$$

Calculando I_1 y I_2 :

$$I_1 = 0.216 * \frac{A^{z-1}}{(1-A)^z} J_1 = 0.216 * \frac{0.000025^{1.5841-1}}{(1-0.000025)^{1.5841}} * 829.6786 = 0.3694$$

$$I_2 = 0.216 * \frac{A^{z-1}}{(1-A)^z} J_2 = 0.216 * \frac{0.000025^{1.5841-1}}{(1-0.000025)^{1.5841}} * -7,411.3753 = -3.2996$$

Finalmente procedemos a estimar el transporte de fondo en suspensión mediante la aplicación de la ecuación 2.84:

$$\begin{aligned} g_{BS} &= 23.2\gamma_S(g\Delta D_e^3)^{0.5} \tau_*'^{0.5} C_a \left[I_1 \ln\left(\frac{30d}{2.5D_e}\right) + I_2 \right] \\ &= 23.2 * 2,708.98 * (9.81 * 1.706 * 0.000230^3)^{0.5} * 0.4872^{0.5} \\ &\quad * 0.2208 * \left[0.3694 * \ln\left(\frac{30 * 18.24}{2.5 * 0.000230}\right) - 3.2996 \right] = 0.2478 \frac{kgf}{s.m} \end{aligned}$$

Método de Kikkawa e Ishikawa.

Para la realización del método, Kikkawa e Ishikawa dividen la curva granulométrica en 3 fracciones representadas por los diámetros D_{16} , D_{50} y D_{84} . Se realizarán los cálculos para la segunda fracción de la zona 2, la cual es representada por el D_{50} .

El desarrollo del método inicia con el cálculo de la velocidad de corte del fondo mediante la aplicación de la ecuación 2.103.

$$V_* = \sqrt{gRS} = \sqrt{9.81 * 17.436 * 0.0000326} = 0.0747 \text{ m/s}$$

Ahora estimamos el coeficiente c :

$$c = 1 - 5 \frac{V_*}{V} = 1 - 5 * \frac{0.0747}{1.290} = 0.7106$$

Estimando el coeficiente a mediante la aplicación de la ecuación 2.117.

$$a = \frac{15V_*}{V} = \frac{15 * 0.0747}{1.290} = 0.8683$$

Ahora estimando F_i mediante la aplicación de la ecuación 2.123.

$$F_i = \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g\Delta D_i^3}\right)} - \sqrt{\frac{36v^2}{g\Delta D_i^3}}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36 * 0.00000084457^2}{9.81 * 1.72 * 0.000200^3}\right)} - \sqrt{\frac{36 * 0.00000084457^2}{9.81 * 1.72 * 0.000200^3}}$$

$$F_i = 0.4895$$

Calculando la velocidad de caída:

$$w_i = F_i(g\Delta D_i)^{0.5} = 0.4895 * (9.81 * 1.72 * 0.000200)^{0.5} = 0.0284 \text{ m/s}$$

Ahora estimando W_i de la solución de la ecuación 2.121:

$$W_i(2 - W_i) = \exp\left[\frac{-1.77 * (1 - W_i) * 0.0284}{0.0747}\right]$$

De donde:

$$W_i = 0.4394$$

Ahora estimando τ_{*i} mediante la aplicación de la ecuación 2.116:

$$\tau_{*i} = \frac{RS}{\Delta D_i} = \frac{17.436 * 0.0000326}{1.72 * 0.000200} = 1.6534$$

Determinando x_i mediante la aplicación de la ecuación 2.115.

$$x_i = \frac{1.52}{\tau_{*i}} - 2 = \frac{1.52}{1.6534} - 2 = -1.0807 \text{ m}^4/\text{s}$$

Una vez obtenido el valor de x_i procedemos a determinar $\phi(x_i)$ mediante la aplicación de la ecuación 2.114.

$$\phi(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_i}^{\infty} -\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-1.0807}^{\infty} -\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = 0.8601$$

Ahora determinamos los coeficientes α_i y β_i mediante la aplicación de las ecuaciones 2.119 y 2.120.

$$\alpha_i = 7.075W_i = 7.075 * 0.4394 = 3.1092$$

$$\beta_i = 7.075(1 - W_i) = 7.075(1 - 0.4394) = 3.9660$$

Determinamos el valor de la función $f_2(\tau_{*i})$ mediante la aplicación de la ecuación 2.112:

$$\begin{aligned} f_2(\tau_{*i}) &= 0.88\tau_{*i} \left\{ \phi(x_i) + 0.199 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1.52}{\tau_{*i}} - 2 \right)^2 \right] \right\} \\ &= 0.88 * 1.6534 * \left\{ 0.8601 + 0.199 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1.52}{1.6534} - 2 \right)^2 \right] \right\} \\ &= 1.4128 \end{aligned}$$

Procedemos a estimar el transporte de sedimentos de fondo por arrastre:

$$\begin{aligned} g_{Bi} &= \gamma_s c V p_i D_i [f_2(\tau_{*i})] = 2,708.98 * 0.7106 * 1.290 * 0.333 * 0.000200 * 1.4128 \\ &= 0.2337 \frac{\text{kgf}}{\text{s.m}} \end{aligned}$$

Ahora procedemos a estimar el transporte de fondo en suspensión mediante la aplicación de la ecuación 2.110:

$$\begin{aligned}
g_{BSi} &= \gamma_s V p_i D_i [f_2(\tau_{*i})] \left\{ a \alpha_i \left[\frac{\beta_i - 1}{\beta_i^3} + \frac{-\beta_i^2 + \beta_i + 1}{2\beta_i^3} e^{-\beta_i} \right] + \frac{\alpha_i c}{\beta_i} [1 - e^{-\beta_i}] \right\} \\
&= 2,708.98 * 1.29 * 0.333 * 0.0002 * 1.4128 \\
&* \left\{ 0.8683 * 3.1092 * \left[\frac{3.9660 - 1}{3.9660^3} + \frac{-3.9660^2 + 3.9660 + 1}{2 * 3.9660^3} e^{-3.9660} \right] \right. \\
&\quad \left. + \frac{3.1092 * 0.7106}{3.9660} [1 - e^{-3.9660}] \right\} = 0.2205 \frac{kgf}{s.m}
\end{aligned}$$

Método de Van Rijn.

Iniciamos determinando la concentración al nivel de referencia mediante la aplicación de la ecuación 2.151.

$$C_0 = 0.65 \gamma_s = 0.65 * 2,708.98 = 1,760.8295$$

Ahora procedemos a estimar el parámetro de la partícula de Yalin mediante la aplicación de la ecuación 2.136:

$$D_* = D_{50} \left(\frac{g\Delta}{v^2} \right)^{1/3} = 0.0002 \left(\frac{9.81 * 1.72}{0.00000084457^2} \right)^{1/3} = 5.7401$$

Estimamos el esfuerzo cortante crítico mediante la aplicación de la ecuación 2.130:

$$\begin{aligned}
\tau_c &= (\gamma_s - \gamma) D_{50} \left[\frac{0.2916}{D_*} + 0.077 \exp \left\{ - \left(\frac{30.35}{D_*} \right)^{0.563} \right\} \right] \\
&= (2,708.98 - 996.31) \\
&* 0.0002 \left[\frac{0.2916}{5.7401} + 0.077 \exp \left\{ - \left(\frac{30.35}{5.7401} \right)^{0.563} \right\} \right] = 0.0195 \frac{kgf}{m^2}
\end{aligned}$$

Ahora procedemos a estimar C' mediante la aplicación de la ecuación 2.129.7

$$C' = 18 \log \frac{12d}{3D_{90}} = 18 \log \frac{12 * 18.240}{3 * 0.00027} = 97.7710 m^{-1} s^{-1}$$

Determinando el esfuerzo cortante asociado a las partículas mediante la aplicación de la ecuación 2.128:

$$\tau_o' = \gamma \left(\frac{V}{C'} \right)^2 = 996.31 * \left(\frac{1.29}{97.7710} \right)^2 = 0.1734 kgf/m^2$$

Ahora estimamos el parámetro de condición de transporte T mediante la aplicación de la ecuación 2.124:

$$T = \frac{\tau_0' - \tau_c}{\tau_c} = \frac{0.1734 - 0.0195}{0.0195} = 7.9162$$

Como $T > 3$ entonces utilizamos la ecuación 2.126 para estimar el transporte de fondo por arrastre:

$$\begin{aligned} g_B &= 0.1\gamma_s (g\Delta D_{50}^3)^{0.4} v^{0.2} \left(\frac{\tau_0' - \tau_c}{\tau_c} \right)^{1.5} \\ &= 0.1 * 2,708.98 \\ &\quad * (9.81 * 1.72 * 0.0002^3)^{0.4} 0.00000084457^{0.2} \left(\frac{0.1734 - 0.0195}{0.0195} \right)^{1.5} \\ &= 0.0415 \frac{kgf}{s.m} \end{aligned}$$

Ahora procedemos a estimar el transporte de fondo en suspensión, para esto calculamos la velocidad de corte mediante la aplicación de la ecuación 2.133:

$$V_* = \sqrt{gdS} = \sqrt{9.81 * 18.240 * 0.0000326} = 0.0747$$

Estimamos la altura de rugosidad del fondo:

$$k_s = \frac{12d}{\exp\left(\frac{V}{2.5V_*}\right)} = \frac{12 * 18.240}{\exp\left(\frac{1.29}{2.5 * 0.0747}\right)} = 0.2184 \text{ m}$$

Estimando y_o :

$$y_o = 0.033 * k_s = 0.033 * 0.2184 = 0.0072 \text{ m}$$

Espesor de la capa de fondo mediante la aplicación de la ecuación 2.138:

$$a = k_s = 0.2184 \text{ m}$$

Concentración en el nivel de referencia:

$$C_a = 0.015\gamma_s \frac{D_{50} T^{1.5}}{a D_*^{0.3}} = 0.015 * 2,708.98 * \frac{0.0002 * 7.9162^{1.5}}{0.2184 * 5.7401^{0.3}} = 0.4907 \text{ kgf/m}^3$$

Estimando la desviación estándar geométrica:

$$\sigma_g = 0.5 \left(\frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right) = 0.5 \left(\frac{0.00026}{0.00020} + \frac{0.00020}{0.00014} \right) = 1.3643$$

Como $T < 25$ utilizaremos la ecuación 2.146 para estimar el diámetro representativo:

$$D_S = D_{50} [1 + 0.011(\sigma_g - 1)] = 0.00020 * [1 + 0.011(1.3643 - 1)] = 0.002$$

Como $D_S > 0.001$ m entonces estimamos la velocidad de caída aplicando la ecuación 2.144:

$$\begin{aligned} w_S &= 10 \frac{v}{D_S} \left[\left(1 + \frac{0.01 \Delta g D_S^3}{v^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \\ &= 10 \frac{0.00000084457}{0.002} \left[\left(1 + \frac{0.01 * 1.72 * 9.81 * 0.002^3}{0.00000084457^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \\ &= 0.0297 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Como $\frac{w_S}{V_*} = \frac{0.0297}{0.0747} = 0.3976$ entonces utilizamos la ecuación 2.152 para determinar el

factor de difusión β :

$$\beta = 1 + 2 \left(\frac{w_S}{V_*} \right)^2 = 1 + 2 \left(\frac{0.0297}{0.0747} \right)^2 = 1.3172$$

A continuación, determinamos el parámetro de suspensión de Rouse:

$$z = \frac{w_S}{\beta k V_*} = \frac{0.0297}{1.3172 * 0.4 * 0.0747} = 0.7559$$

Determinando el factor global de corrección:

$$\psi = 2.5 \left(\frac{w_S}{V_*} \right)^{0.8} \left(\frac{C_a}{C_0} \right)^{0.4} = 2.5 \left(\frac{0.0297}{0.0747} \right)^{0.8} \left(\frac{0.4907}{1,760.8295} \right)^{0.4} = 0.0453$$

Determinando el factor modificado del parámetro de suspensión:

$$z' = z + \psi = 0.7559 + 0.0453 = 0.8012$$

Estimando A mediante la aplicación de la ecuación 2.155:

$$A = \frac{a}{d} = \frac{0.2184}{18.240} = 0.0120$$

Finalmente estimamos el transporte de fondo en suspensión mediante la aplicación de la ecuación 2.132:

$$\begin{aligned}
 g_{BS} &= \frac{V_* C_a d}{k} \left(\frac{1}{A-1} \right)^{z'} \left[\int_A^{0.5} \left(\frac{1-E}{E} \right)^{z'} \text{Ln} \left(\frac{Ed}{y_0} \right) dE + \int_{0.5}^1 e^{-4z'(E-0.5)} \text{Ln} \left(\frac{Ed}{y_0} \right) dE \right] \\
 &= \frac{0.0747 * 0.0297 * 18.240}{0.4} \left(\frac{1}{0.0120 - 1} \right)^{0.8012} \left[\int_{0.0120}^{0.5} \left(\frac{1-E}{E} \right)^{0.8012} \text{Ln} \left(\frac{E * 18.240}{0.0072} \right) dE \right. \\
 &\quad \left. + \int_{0.5}^1 e^{-4*0.8012(E-0.5)} \text{Ln} \left(\frac{E * 18.240}{0.0072} \right) dE \right] = 0.6992 \frac{kgf}{s.m}
 \end{aligned}$$

Transporte de Sedimentos de Lavado.

Método de Lane y Kalinske.

El cálculo será realizado para la zona 1, para la demás zonas se deberá de seguir el mismo procedimiento.

Estimando la velocidad de corte mediante la aplicación de la ecuación 2.160:

$$V_* = \sqrt{gRS} = \sqrt{9.81 * 8.034 * 0.0000326} = 0.0507 \text{ m/s}$$

Ahora calculamos la velocidad de caída de las partículas mediante la aplicación de la ecuación 2.158.

$$w = -\frac{V_*}{15} \left(\frac{d}{a_2 - a_1} \right) \ln \left(\frac{C_{a2}}{C_{a1}} \right) = -\frac{0.0507}{15} \left(\frac{14.800}{5 - 10} \right) \ln \left(\frac{0.351}{0.290} \right) = 0.0019 \text{ m/s}$$

Estimamos la concentración en la frontera superior de la capa de fondo mediante la aplicación de la ecuación 2.159.

$$C_{2Dm} = C_{a1} e^{\frac{-15w(2Dm-a1)}{V_*d}} = 0.290 e^{\frac{-15*0.0019*(2*0.000036-10)}{0.0507*14.800}} = 0.4248 \text{ kgf/m}^3$$

Ahora estimamos el parámetro de cambio A mediante la ecuación 2.161:

$$A = \frac{2Dm}{d} = \frac{2 * 0.000036}{14.800} = 0.0000049$$

Estimando el coeficiente de Manning mediante la aplicación de la ecuación 2.163:

$$n = \frac{d^{2/3} S^{1/2}}{V} = \frac{14.800^{2/3} 0.0000326^{1/2}}{1.170} = 0.0294$$

Ahora estimamos el valor de integral P_1 :

$$P_1 = 1.7\sqrt{g} \frac{n}{d^{\frac{1}{6}}} = 1.7\sqrt{9.81} \frac{0.0294}{14.800^{\frac{1}{6}}} = 0.100$$

Finalmente estimando el transporte de lavado mediante la aplicación de la ecuación

$$g_L = VdC_{2Dm} e^{\frac{15wA}{V_*}} P_1 = 1.170 * 14.800 * 0.4248 * e^{\frac{15*0.0019*0.0000049}{0.0507}} 0.100$$

$$= 0.7373 \frac{kgf}{s.m}$$

Método de Einstein.

El método de Einstein será aplicado para la zona 2, para las demás zonas se deberá de seguir el mismo procedimiento.

Iniciamos los cálculos con la estimación de la velocidad de corte asociada a las partículas mediante la aplicación de la ecuación 2.165.

$$V_*' = \sqrt{gR'S} = \sqrt{9.81 * 4.95 * 0.0000326} = 0.040 \text{ m/s}$$

Ahora estimamos la variable z relacionada a la velocidad de caída mediante la aplicación de la ecuación 2.166:

$$z = \frac{\log\left(\frac{C_{a1}}{C_{a2}}\right)}{\log\left(\frac{d-a_1}{a_1} \frac{a_2}{d-a_2}\right)} = \frac{\log\left(\frac{0.291}{0.351}\right)}{\log\left(\frac{18.240-12}{12} \frac{6}{18.240-6}\right)} = 0.3429$$

Procedemos a estimar la concentración en la frontera superior de la capa de fondo, para esto utilizamos la ecuación 2.167.

$$C_{2D65} = C_{a1} \left(\frac{d-2D_{65}}{2D_{65}} \frac{a_1}{d-a_1}\right)^z = 0.291 \left(\frac{18.240-2*0.00023}{2*0.00023} \frac{12}{18.240-12}\right)^{0.3429}$$

$$= 13.7424 \text{ kgf/m}^3$$

Estimando el parámetro de cambio A mediante la aplicación de la ecuación 2.168:

$$A = \frac{2D_{65}}{d} = \frac{2*0.00023}{18.240} = 0.0000252$$

Ahora procedemos a calcular el espesor de la subcapa viscosa mediante la aplicación de la ecuación 2.21:

$$\delta_o' = \frac{11.64\nu}{V_*'} = \frac{11.64 * 0.00000084457}{0.040} = 0.00025 \text{ m}$$

Se calcula el factor de corrección x en función del $\frac{D_{65}}{\delta_o'}$ mediante la aplicación de la figura 2.10 (Ver figura A.9).

$$\frac{D_{65}}{\delta_o'} = \frac{0.00023}{0.00025} = 0.9200$$

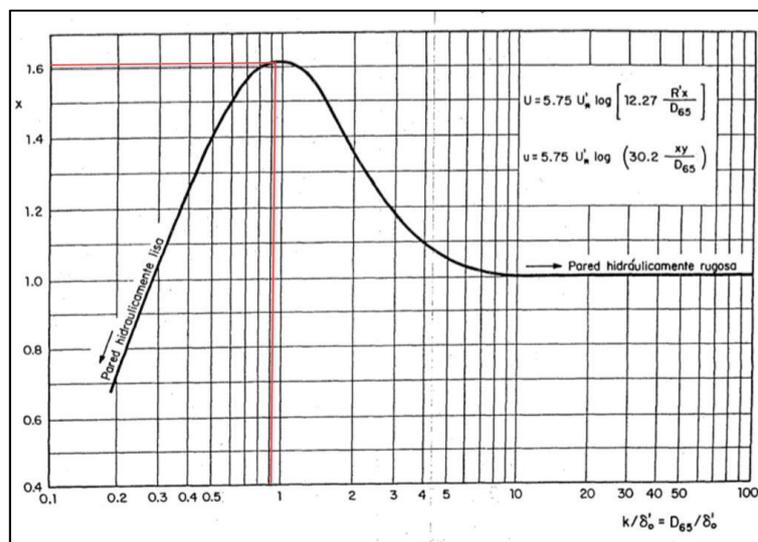


Figura A.9. Determinación del factor de corrección x . Fuente: Elaboración propia, 2019.

De donde $x=1.61$

Calculando las integrales J_1 y J_2 :

$$J_1 = \int_A^1 \left(\frac{1-E}{E} \right)^z dE = \int_{0.0000252}^1 \left(\frac{1-E}{E} \right)^{0.3429} dE = 1.2218$$

$$J_2 = \int_A^1 \left(\frac{1-E}{E} \right)^z \ln E dE = \int_{0.0000252}^1 \left(\frac{1-E}{E} \right)^{0.3429} \ln E dE = -2.1484$$

Ahora procedemos a estimar el transporte de lavado mediante la aplicación de la ecuación 2.164.

$$\begin{aligned}
g_L &= 5.75V_*'C_{2D65}d \left(\frac{A}{1-A} \right)^z \left(J_1 \log \left(30.2 \frac{xd}{k_s} \right) + 0.43429J_2 \right) \\
&= 5.75 * 0.040 * 13.7424 * 18.240 \\
&\quad * \left(\frac{0.0000252}{1-0.0000252} \right)^{0.3429} \left(1.2218 * \log \left(30.2 \frac{1.61 * 18.240}{0.00023} \right) \right. \\
&\quad \left. + 0.43429 * -2.1484 \right) = 110.9778 \frac{kgf}{s.m}
\end{aligned}$$

Método de Brooks.

La aplicación del método se realizará para la zona 1, para las demás zonas se deberá de aplicar le mismo procedimiento.

El método se inicia con la determinación del caudal unitario mediante la aplicación de la ecuación 2.171:

$$q = \frac{Q}{B} = \frac{2,252.300}{129.730} = 17.3614 \text{ m}^2/\text{s}$$

Ahora procedemos a determinar la velocidad de corte mediante la aplicación de la ecuación 2.174:

$$V_* = \sqrt{gRS} = \sqrt{9.81 * 8.034 * 0.0000326} = 0.0507 \text{ m/s}$$

Determinamos la variable z relacionada a la velocidad de caída de las partículas:

$$z = \frac{\log \left(\frac{C_{a1}}{C_{a2}} \right)}{\log \left(\frac{d-a_1}{a_1} \frac{a_2}{d-a_2} \right)} = \frac{\log \left(\frac{0.290}{0.351} \right)}{\log \left(\frac{14.800-10}{10} \frac{5}{14.800-5} \right)} = 0.1357$$

Estimando la concentración de sedimentos ubicada a mitad del tirante mediante la aplicación de la ecuación 2.173:

$$C_{d/2} = C_{a1} \left(\frac{a_1}{d-a_1} \right)^z = 0.290 * \left(\frac{10}{14.800-10} \right)^{0.1357} = 0.3204$$

Ahora determinamos el valor de $\frac{kV}{V_*}$ para luego poder determinar el valor de la función

$$f \left(z, \frac{kV}{V_*} \right).$$

$$\frac{kV}{V_*} = \frac{0.4 * 1.170}{0.0507} = 9.2308$$

Determinando $f\left(z, \frac{kV}{V_*}\right)$ mediante la aplicación de la figura 2.26 (Ver figura A.10):

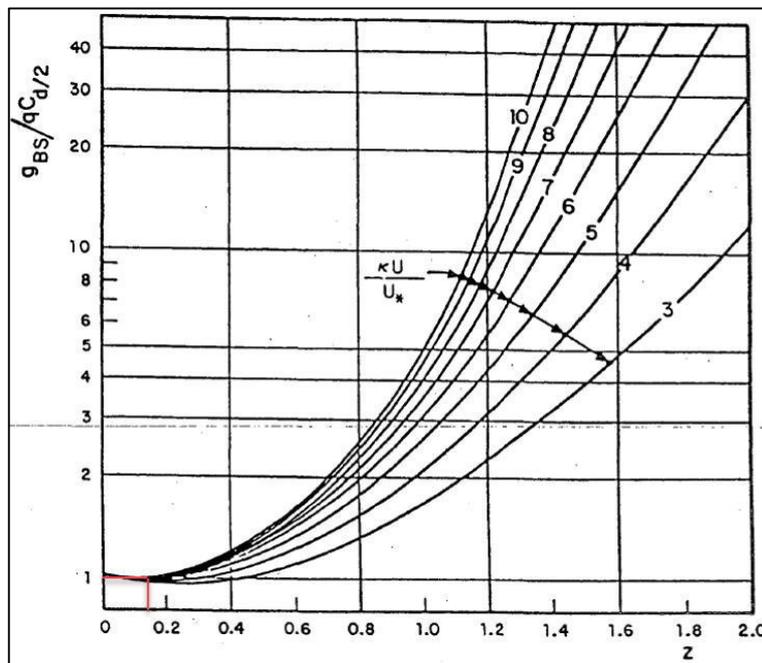


Figura A.10. Determinación de la función f . Fuente: Elaboración propia, 2019.

Donde $f\left(z, \frac{kV}{V_*}\right) = 1$

Finalmente determinamos el transporte de lavado mediante la aplicación de la ecuación 2.170:

$$g_L = qC_{d/2}f\left(z, \frac{kV}{V_*}\right) = 17.3614 * 0.3204 * 1 = 5.5621 \frac{kgf}{s.m}$$

Método de Chang, Simons y Richardson.

El método será aplicado para la zona 1, para las demás zonas se deberá de seguir el mismo procedimiento.

El desarrollo del método inicia con la determinación de la velocidad de caída equivalente y el diámetro equivalente.

A modo de ejemplo vamos a tomar la fracción 5 de curva granulométrica de la zona 1, por lo que procedemos con el cálculo de F_i para la determinación de la velocidad de caída de la partículas.

$$F_i = \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g\Delta D_i^3}\right)} - \sqrt{\frac{36v^2}{g\Delta D_i^3}}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36 * 0.00000084457^2}{9.81 * 1.654 * 0.000018^3}\right)} - \sqrt{\frac{36 * 0.00000084457^2}{9.81 * 1.654 * 0.000018^3}}$$

$$F_i = 0.0202$$

Calculando la velocidad de caída:

$$w_i = F_i(g\Delta D_i)^{0.5} = 0.0202 * (9.81 * 1.654 * 0.000018)^{0.5} = 0.0003$$

Realizamos los mismos cálculos para cada fracción de la curva:

Tabla A.3. Resumen de las estimaciones para las demás fracciones.

Fuente: *Elaboración propia, 2019.*

	p_i	D_i (mm)	D_i (m)	F_i	w_i	$(D_i^3)w_i$
D5	0.1					
D15	0.1					
D25	0.1	0.0040	0.000004	0.0021	0.0000	1.0929×10^{-21}
D35	0.1	0.0110	0.000011	0.0097	0.0001	1.7187×10^{-19}
D45	0.1	0.0180	0.000018	0.0202	0.0003	2.0155×10^{-18}
D55	0.1	0.0280	0.000028	0.0392	0.0008	1.8327×10^{-17}
D65	0.1	0.0420	0.000042	0.0716	0.0019	1.3842×10^{-16}
D75	0.1	0.0560	0.000056	0.1091	0.0033	5.7732×10^{-16}
D85	0.1	0.0730	0.000073	0.1590	0.0055	2.1287×10^{-15}
D95	0.1	0.1300	0.000130	0.3290	0.0151	3.3195×10^{-14}

Estimamos la velocidad de caída equivalente mediante la aplicación de la ecuación

2.98:

$$w_e = \sum_{i=1}^N p_i w_i = 0.000027 \text{ m/s}$$

Ahora estimamos el diámetro equivalente mediante la aplicación de la ecuación 2.86:

$$D_e = \left[\frac{\sum_i^N D_i^3 w_i}{N w_e} \right]^{1/3} = 0.0005 \text{ m}$$

Determinamos el esfuerzo cortante crítico mediante la aplicación de la ecuación 2.181:

$$\begin{aligned}\tau_c &= 41.8D_e^{0.82} - 0.017\ln(454D_e) = 41.8 * 0.0005^{0.82} - 0.017\ln(454 * 0.0005) \\ &= 0.1084 \text{ kgf/m}^2\end{aligned}$$

Determinamos también el esfuerzo cortante del flujo sobre el fondo mediante la aplicación de la ecuación 2.180:

$$\tau_o = \gamma RS = 996.31 * 8.034 * 0.0000326 = 0.2909 \text{ kgf/m}^2$$

Ahora determinamos el espesor de la capa de fondo:

$$a_b = \frac{10D_e(\tau_o - \tau_c)}{\tau_c} = \frac{10 * 0.0005 * (0.2909 - 0.1084)}{\tau_c} = 0.0072 \text{ m}$$

Ahora procedemos a determinar la velocidad de corte mediante la aplicación de la ecuación 2.182:

$$V_* = \sqrt{gRS} = \sqrt{9.81 * 8.034 * 0.0000326} = 0.0507 \text{ m/s}$$

Ahora determinamos la variable relacionada a la velocidad de caída mediante la aplicación de la ecuación 2.176:

$$\begin{aligned}z_2 &= \frac{\log\left(\frac{C_{a1}}{C_{a2}}\right)}{\log\left(\frac{\sqrt{d} - \sqrt{d - a_2}}{\sqrt{a_2}} \frac{\sqrt{a_1}}{\sqrt{d} - \sqrt{d - a_1}}\right)} \\ &= \frac{\log\left(\frac{0.290}{0.351}\right)}{\log\left(\frac{\sqrt{14.800} - \sqrt{14.800 - 5}}{\sqrt{5}} \frac{\sqrt{10}}{\sqrt{14.800} - \sqrt{14.800 - 10}}\right)} = 0.3886\end{aligned}$$

Ahora determinamos la concentración en la frontera superior de la capa de fondo mediante la aplicación de la ecuación 2.177:

$$\begin{aligned}
 C_{a_b} &= C_{a_1} \left(\frac{\sqrt{d} - \sqrt{d - a_1}}{\sqrt{a_1}} \frac{\sqrt{a_b}}{\sqrt{d} - \sqrt{d - a_b}} \right)^{z_2} \\
 &= 0.290 \\
 &* \left(\frac{\sqrt{14.800} - \sqrt{14.800 - 10}}{\sqrt{10}} \frac{\sqrt{0.0072}}{\sqrt{14.800} - \sqrt{14.800 - 0.0072}} \right)^{0.3886} \\
 &= 1.3005 \text{ kgf/m}^3
 \end{aligned}$$

Procedemos a determinar $\frac{V_* D_e}{\nu}$, para posteriormente determinar el valor de la constante de von Karman.

$$\frac{V_* D_e}{\nu} = \frac{0.0507 * 0.0005}{0.00000084457} = 30.6535$$

Determinamos la constante k de von Karman mediante la aplicación de la figura 2.27 (Ver figura A.11).

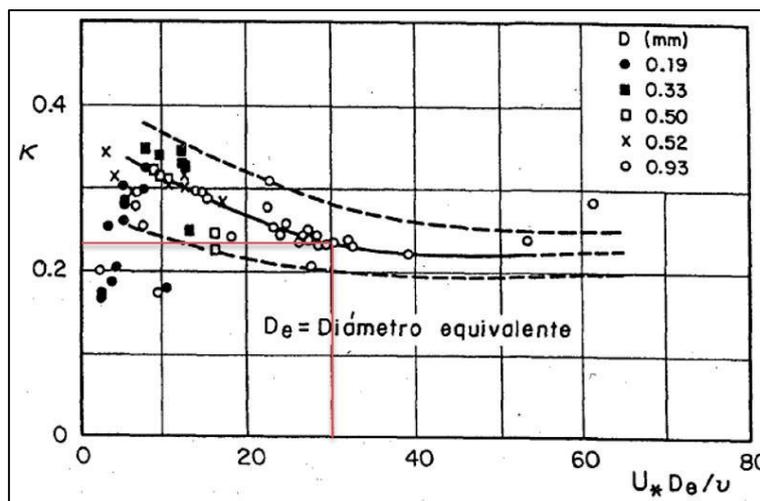


Figura A.11. Determinación de la constante k de von Karman.
Fuente: Elaboración propia, 2019.

De donde $k=0.23$

Ahora determinamos la variable de cambio A mediante la aplicación de la ecuación

2.183:

$$A = \frac{a_b}{d} = \frac{0.0072}{14.800} = 0.0005$$

Ahora procedemos a determinar los valores de las integrales I_3 e I_4 mediante la aplicación de las figuras 2.28 y 2.29 (Ver figura A.12 y A.13):

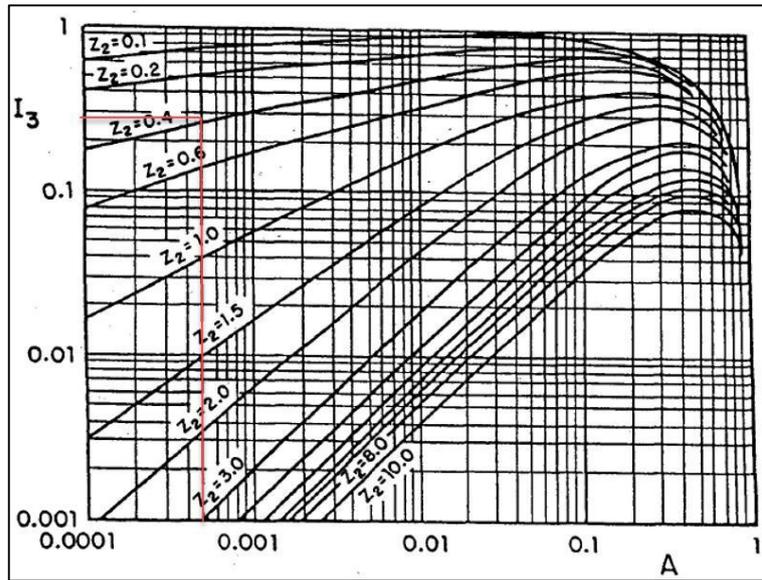


Figura A.12. Determinación de la integral I_3 .
Fuente: Elaboración propia, 2019.

De donde $I_3=0.28$

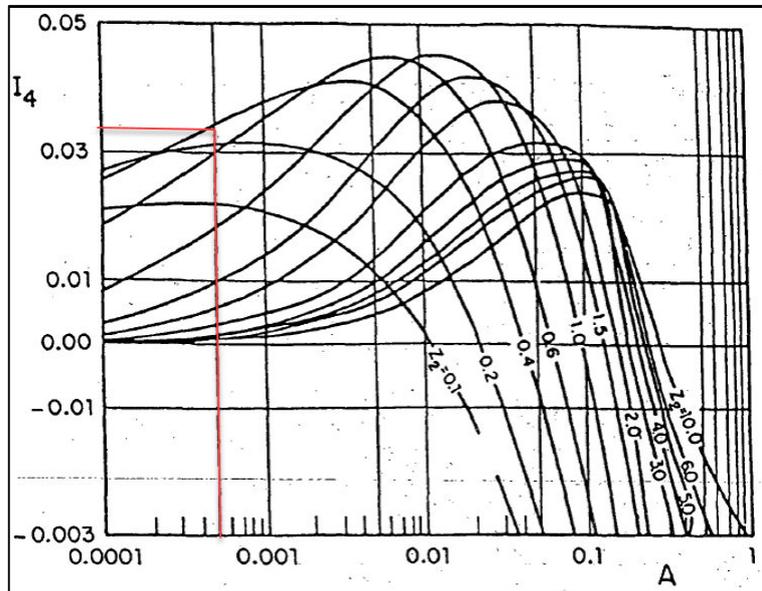


Figura A.13. Determinación de la integral I_4 .
Fuente: Elaboración propia, 2019.

De donde $I_4=0.033$

Finalmente estimando el transporte de lavado mediante la aplicación de la ecuación

2.175:

$$\begin{aligned} g_L &= dC_{ab} \left(VI_3 - \frac{2V_*}{k} I_4 \right) = 14.800 * 1.3005 * \left(1.17 * 0.28 - \frac{2 * 0.0507}{0.23} * 0.033 \right) \\ &= 6.0256 \frac{kgf}{m.s} \end{aligned}$$