UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y URBANISMO

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL

DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS ECUACIONES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR ARRASTRE Y SUSPENSIÓN EN LAS INMEDIACIONES DE LOS PUENTES PUCALÁ Y MONSEFÚ – ETEN.

Autores:

Bach. Becerra Pintado, Richard Antony

Bach. Espinoza Requejo, Nayla Gisell

Asesor:
Msc. Guerrero Millones Ana María

Línea de Investigación:
Ingeniería de Procesos - Ingeniería Hidráulica

Pimentel – Perú

2017

ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS ECUACIONES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR ARRASTRE Y SUSPENSIÓN EN LAS INMEDIACIONES DE LOS PUENTES PUCALÁ Y MONSEFÚ – ETEN.

Aprobación de la tesis

_____

Dra. Liz Amelia J. Morales Cabrera
Asesor

_____

Dr. Ing. Omar Coronado Zuloeta
Presidente de Jurado de Tesis

_____

Ing. Guillermo G. Arriola Carrasco
Secretario de Jurado de Tesis

_____

MSc. Ing. Wilmer Zelada Zamora
Vocal de Jurado de Tesis

DEDICATORIA

En primer lugar, dedico todo mi esfuerzo realizado a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, a mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

Richard Antony Becerra Pintado.

Dedico esta tesis principalmente a Dios por brindarme paciencia, dedicación y perseverancia en todo el transcurso de mi formación profesional. A mi padre, por su tenacidad y constancia por ser cada día una mejor persona. A mi madre, por ser la mujer más importante en mi vida; por las enseñanzas recibidas que han sabido guiarme en cada paso que doy.

Nayla Gisell Espinoza Requejo.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos en primer lugar a nuestros padres por su apoyo en todo momento, por los valores inculcados y por la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de nuestras vidas. A su vez también agradecer a nuestra casa de estudios la Universidad Señor de Sipán, por la calidad de enseñanza y por los conocimientos aprendidos en nuestra carrera universitaria; finalmente agradecer al Ing. Guillermo Arriola Carrasco por su apoyo y dedicación, y por habernos brindado la oportunidad de desarrollar nuestra tesis profesional, por haber compartido con nosotros sus conocimientos y sobre todo su amistad; de la misma manera a la Lic. Ana María Guerrero Millones por su asesoría metodológica a lo largo de nuestra investigación.

Richard Antony Becerra Pintado.

Nayla Gisell Espinoza Requejo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN xv

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 15

1.1. Situación Problemática 16
1.1.1. Internacional 16
1.1.2. Nacional 17
1.1.3. Local 18

1.2. Formulación del Problema 20

1.3. Delimitación de la Investigación 20

1.4. Justificación e importancia 21
1.4.1. Justificación Tecnológica 21
1.4.2. Justificación Ambiental 22
1.4.3. Justificación Socioeconómica 22

1.5. Limitaciones de la Investigación 22

1.6. Objetivos 22
1.6.1. Objetivo General 22
1.6.2. Objetivos Específicos: 22

CAPÍTULO II: MARCO TEÒRICO 24

2.1. Antecedentes de Estudios 25

2.2. Estado del Arte 31

2.3. Bases teórico - científicas 32
2.3.1. Transporte de sedimentos 32
2.3.1.1. Definición: 32
2.3.1.2. Clasificación del transporte de Sedimento 33
2.3.1.3. Formas del transporte de sedimentos 34
2.3.1.4. Tipo de transporte de Sedimentos 38
2.3.1.5. Propiedades de los Sedimentos 40
A. Tamaño 41
B. Forma 43
C. Densidad 43
D. Peso Especifico 44
E. Porosidad 45
F. Velocidad de caída de la Partícula 45
2.3.2. Ecuaciones de Transporte de Sedimentos 46
2.3.2.1. Ecuaciones de transporte por arrastre en la capa de fondo 47
A. Ecuación de Meyer – Peter y Müler 47
B. Ecuación de Duboys y Straub 49
C. Ecuacion de Schoklistch 50
D. Ecuacion de Levi (1948) 51
E. Ecuacion de Yalin (1963) 52
2.3.2.2. Ecuaciones de transporte por suspensión. 54
2.3.2.3. Ecuaciones para transporte de fondo en suspensión. 56
A. Ecuación de Brooks (1963) 56
B. Ecuación de Chang, Simons y Richardson 58
C. Ecuación de Bagnold 62
2.3.2.4. Ecuaciones de transporte de sedimentos por lavado (GL) 62

A. Método de Brooks (1963) 63
2.3.3. Estimación del transporte de sedimentos. 64
A. Muestreadores tipo cesta o canasta 64
B. Muestreadores de paneles. 65
C. Muestreadores de foso o cárcava 66
D. Muestreadores de la serie US BM 67
E. Muestreador Helley Smith 67
2.3.4. Características del río Chancay 68
2.3.4.1. Ubicación 68
2.3.4.2. Descripción general 68
2.3.4.3. Caudales máximos alcanzados 69
2.3.4.4. Hidrografía e Hidrología de la Cuenca del Río Chancay - Lambayeque 69
2.3.4.5. Geomorfología 69
2.3.5. Características del Puente Monsefú – Eten 69
2.3.6. Características del Puente Pucalá 70
2.3.7. Ensayos de los Materiales 71
2.3.7.1. Ensayo de granulometría del suelo 72
2.3.7.2. Ensayo de peso especifico 74
2.3.7.3. Ensayo de hidrómetro 76
2.3.8. Clasificación de suelos SUCS 78
2.3.8.1. Suelos gruesos 79
2.3.8.2. Suelos finos 81
2.3.9. Estudio de Impacto Ambiental 81
2.4. Definición de términos básicos 82
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO 84
3.1. Tipo y diseño de la investigación 85
3.1.1 Tipo de investigación 85
3.1.2 Diseño de Investigación 85
3.2. Población y muestra 85
3.3. Hipótesis 85
3.4. Operacionalización de variables 85
3.5. Abordaje metodológico, técnicas e instrumentos de recolección de datos. 88
3.5.1. Abordaje metodológico 88
3.5.2. Técnicas de recolección de datos 88
3.5.3. Instrumentos de recolección de datos 89
3.6. Procedimiento para la recolección de datos 90
3.6.1. Recolección de información disponible 90
3.6.2. Extracción de muestras 91
3.6.3. Características geométricas de la sección 92
3.6.4. Estudio de mecánica de suelos 92
3.6.5. Selección de la ecuación de mejor ajuste 95
3.6.6. Elaboración de planos y detalles según propuestas de solución planteadas 95
3.6.7. Estudio de Impacto Ambiental. 96
3.6.8. Presupuesto 96
3.6.9. Costos 97
3.7. Análisis estadístico e interpretación de los datos 98
3.7.1. Análisis estadístico 98
3.7.2. Interpretación de los datos 99

3.8. Principios éticos 99
3.8.1. Ética de recolección de datos 99
3.8.2. Ética de la publicación 99
3.8.3. Ética de aplicación 99
3.9. Criterios de rigor científico 100
3.9.1. Criterios generales 100
3.9.2. Criterios de confiabilidad 100
3.9.3. Criterios de credibilidad 100
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS 101
4.1. Determinación de las características geométricas de la sección del río. 102
4.2. Resultados de los ensayos realizados en laboratorio de suelos 103
4.2.1. Contenido de humedad de la muestra 103
4.2.2. Análisis Granulométrico por tamizado 104
4.2.3. Peso específico de la muestra 105
4.3. Velocidad de caída de la partícula 107
4.3.1. Velocidad de caída según la Ley de Stokes 107
4.3.2. Velocidad de caída según el método de Rubey 108
4.4. Cuantificación del transporte de sedimentos por arrastre y suspensión 109
4.4.1. Extracciones realizadas 109
4.4.2. Cuantificación en campo del transporte de sedimentos 112
4.4.3. Cuantificación del transporte de sedimento con las ecuaciones empíricas 114
4.5. Selección de la ecuación de mejor ajuste al río Chancay 116
CAPÍTULO V: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN 123
5.1. Descripción: 124
5.2. Estudio Hidráulico e Hidrológico: 125
5.2.1. Análisis de consistencia 125
5.2.2. Pruebas de bondad de ajuste 126
5.2.3. Selección del período de retorno 128
5.2.4. Análisis estadístico de datos hidrológicos 128
5.2.5. Selección del caudal de diseño 129
5.2.6. Ancho estable del río 130
5.2.7. Socavación del cauce 131
5.2.8. Sección propuesta de descolmatación 133
5.3. Estudio de Impacto Ambiental 134
5.4. Modelamiento en Hec – Ras del Río Chancay 136
5.6. Presupuesto de la alternativa de solución 142
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 143
6.1. Conclusiones 144
6.2. Recomendaciones 147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Intervalos de tamaños de partículas de sedimentos 28
Tabla 2: Comparación de los valores de transporte como carga de fondo calculados con los datos medidos en Nampostá Grande 30
Tabla 3: Tabla de notación de simbología empleada en los diferentes tipos de transporte de sedimento 40
Tabla 4: Densidades relativas de algunos minerales constituidos de partículas sedimentarias 44
Tabla 5: Valores ensayados para los parámetros estudiados según Meyer – Peter y Muller 49
Tabla 6: Serie de tamices de malla cuadrada 72
Tabla 7: Densidad relativa del agua y factor de conversiones K para diferentes temperaturas 76
Tabla 8: Valores de K para el cálculo del diámetro de partículas en el análisis hidrométrico 78
Tabla 9: Tipología de Suelos (SUCS) 79
Tabla 10: Tabla de definición de términos básicos para el transporte de sedimentos 82
Tabla 11: Cuadro de Variable Independiente 86
Tabla 12: Cuadro de Variable dependiente 87
Tabla 13: Instrumentos para el diagnóstico 93
Tabla 14: Tabla de costos en pasajes a las visitas a las zonas de estudio 97
Tabla 15: Tabla de costos en Servicios Particulares 97
Tabla 16: Tabla de costos para materiales e insumos utilizados 97
Tabla 17: Tabla de costos de ensayos realizados en Laboratorio 98
Tabla 18: Presupuesto total de la investigación 98
Tabla 19: Parámetros hidráulicos de las secciones del río Chancay en inmediaciones del puente Pucalá 102
Tabla 20: Parámetros hidráulicos de las secciones del río Chancay en inmediaciones del puente Monsefú - Eten 103
Tabla 21: Porcentajes (%) del contenido de humedad de las muestras extraídas en inmediaciones del Puente Pucalá 103
Tabla 22: Porcentajes (%) del contenido de humedad de las muestras extraídas en inmediaciones del Puente Monsefú - Eten 104
Tabla 23: Diámetros obtenidos de la curva granulométrica de las extracciones en inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten para las ecuaciones por arrastre 104
Tabla 24: Diámetros obtenidos de la curva granulométrica de las extracciones en inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten para las ecuaciones por suspensión 105
Tabla 25: Valores de peso específico en g/cm^3, para las muestras extraídas por arrastre y suspensión que pasan la malla Nº 4 106
Tabla 26: Valores de peso específico de los suelos retenidos en la malla Nº 4, para las muestras extraídas por arrastre 106
Tabla 27: Velocidad de caída de la partícula en cm/s, mediante la Ley de Stokes, para las muestras extraídas en inmediaciones del Puente Pucalá 107
Tabla 28: Velocidad de caída de la partícula en cm/s, mediante la Ley de Stokes, para las muestras extraídas en inmediaciones del Puente Monsefú - Eten 107
Tabla 29: Velocidad de caída de la partícula en m/s, mediante el método de Rubey, para las muestras extraídas en inmediaciones del Puente Pucalá 108
Tabla 30: Velocidad de caída de la partícula en m/s, mediante el método de Rubey, para las muestras extraídas en inmediaciones del Puente Monsefú - Eten 108
Tabla 31: Pesos en gramos de las tomas por arrastre extraídas en inmediaciones del puente Pucalá 109
Tabla 32: Pesos en gramos de las tomas por suspensión extraídas en inmediaciones del puente Pucalá 110
Tabla 33: Pesos en gramos de las tomas por arrastre extraídas en inmediaciones del puente Monsefú - Eten 111
Tabla 34: Pesos en gramos de las tomas por suspensión extraídas en inmediaciones del puente Monsefú - Eten 111

Tabla 35: Transporte de sedimento total (arrastre y suspensión) cuantificado en campo – Puente Pucalá 112
Tabla 36: Transporte de sedimento total (arrastre y suspensión) cuantificado en campo – Puente Monsefú - Eten 113
Tabla 37: Transporte de sedimentos por arrastre cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Pucalá 114
Tabla 38: Transporte de sedimentos total en suspensión cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Pucalá 115
Tabla 39: Transporte de sedimentos por arrastre cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Monsefú - Eten 115
Tabla 40: Transporte de sedimentos total en suspensión cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Monsefú - Eten 116
Tabla 41: Porcentajes de variación del transporte de sedimento total cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Pucalá 117
Tabla 42: Porcentajes de variación del transporte de sedimento total cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Pucalá 118
Tabla 43: Caudal sólido total transportado en arrastre cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Pucalá 119
Tabla 44: Caudal sólido total transportado en suspensión cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Pucalá 119
Tabla 45: Caudal sólido total transportado en arrastre cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Monsefú - Eten 120
Tabla 46: Caudal sólido total transportado en suspensión cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Monsefú - Eten 120
Tabla 47: Porcentaje de transporte de sedimentos por arrastre y suspensión para inmediaciones del Puente Pucalá 121
Tabla 48: Porcentaje de transporte de sedimentos por arrastre y suspensión para inmediaciones del Puente Monsefú - Eten 122
Tabla 49: Descargas Máximas Anuales – Estación Bocatoma Raca Rumi (m^3/s) . **¡Error! Marcador no definido.**5
Tabla 50: Caudales corregidos (m3/s) – Estación hidrométrica Raca Rumi 1266
Tabla 51: Valores de Δ máximo según Weibull, Hazen, California y Turkey 1277
Tabla 52: Caudales de diseño para los distintos períodos de retorno 12929
Tabla 53: Ancho estable de la sección para las inmediaciones del Puente Pucalá 1300
Tabla 54: Ancho estable de la sección para las inmediaciones del Puente Monsefú - Eten 1300
Tabla 55: Profundidades de socavación para los pilares del puente Pucalá 1311
Tabla 56: Profundidades de socavación para los pilares del puente Monsefú - Eten 1322
Tabla 57: Profundidades de socavación general para las inmediaciones de los Puentes Pucalá y Monsefú - Eten 1322

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Comparación del Puente Pucalá, antes y después de la llegada del Niño Costero, produciendo diferentes consecuencias 19
Figura 2: Comparación del Puente Monsefú – Eten, antes y después de la llegada del Niño Costero produciendo diferentes consecuencias 20
Figura 3: Modelación Hidráulica de un río en el Sofware Hec – Ras. 31
Figura 4: Descripción adaptada del transporte de sedimentos desde su origen. 32
Figura 5: Comportamiento del transporte de sedimentos en un río, visto en planta 33
Figura 6: Comportamiento del transporte de sedimentos en un río, vista longitudinal 33
Figura 7: Clasificación del transporte de sedimentos en corrientes naturales. 34
Figura 8: Fuerzas en una partícula de sedimento en el fondo del cauce 35
Figura 9: Transporte de sedimentos por rodadura, situados en el fondo del cauce 35
Figura 10: Movimiento por rodadura de las partículas de sedimento 36
Figura 11: Transporte de sedimentos por saltación en el lecho de un río 36
Figura 12: Movimiento por saltación de las partículas de sedimentos 37
Figura 13: Movimiento por deslizamiento de las partículas de sedimentos 37
Figura 14: Transporte de Sedimentos en Suspensión 37
Figura 15: Organigrama de los tipos de transporte de sedimentos según Maza, J y García M. (Elaboración propia) 40
Figura 16: Esquema de las dimensiones triaxiales en una partícula 42
Figura 17: Esquema de la composición de una partícula sedimentaria, para la indicación de los símbolos utilizados 43
Figura 18: Esquema de concentración de sedimentos propuesto por Rouse 56
Figura 19: Parámetro $gBSq\ Cd/2$ en función de $\kappa UU * \ y\ z$ según Brooks 58
Figura 20: Valores de I_3 en función de A y z_2 según Chang, Simons y Richardson en 1967 61
Figura 21: Valores de I_4 en función de A y z_2 según Chang, Simons y Richardson en 1967 61
Figura 22: Muestreador australiano Muhlhofer 65
Figura 23: Μυεστρεαδορ Πολψακοϖ, δε δε φονδο ψ δε πανελεσ 66
Figura 24: Muestreador de tipo portátil de foso o cárcava 66
Figura 25: Muestreador de la serie USBM – 54, planta y cortes 67
Figura 26: Muestreador tipo Helley Smith 67
Figura 27: Ubicación de la Cuenca Chancay – Lambayeque 68
Figura 28: Río Chancay en Inmediaciones del Puente Monsefú – Eten 70
Figura 29: Río Chancay en inmediaciones del puente Pucalá 71
Figura 30: Columna de tamices de las diferentes medidas sobre la máquina de ensayo 73
Figura 31: Ensayo de peso específico 75
Figura 32: Prueba de la velocidad de las partículas con hidrómetro. 77
Figura 33: Diagrama de procesos, procedimiento de recolección de datos. 90
Figura 34: Zona de toma de muestras en el puente Pucalá. Adaptado de Google Earth, imágenes por satélite. 91
Figura 35: Zona de toma de muestras en el puente Monsefú – Eten. Adaptado de Google Earth, imágenes por satélite. 91
Figura 36: Gráfica de las extracciones por arrastre en inmediaciones del puente Pucalá en un período de 2 meses 110
Figura 37: Gráfica de las extracciones por suspensión en inmediaciones del puente Pucalá en un período de 2 meses 110
Figura 38: Gráfica de las extracciones por arrastre en inmediaciones del puente Monsefú – Eten en un período de 2 meses 111
Figura 39: Gráfica de las extracciones por suspensión en inmediaciones del puente Monsefú – Eten en un período de 2 meses. 112
Figura 40: Prueba K-S a una distribución normal para Hazen 127
Figura 41: Graficas de los métodos empleados y curva de registros históricos 129
Figura 42: Sección para la Ejecución de descolmatación en inmediaciones del Puente Pucalá 133

Figura 43: Sección para la ejecución de descolmatación en inmediaciones del puente Monsefú - Eten....133
Figura 44: Matriz de resultados del impacto ambiental analizado en las inmediaciones del puente Pucalá....134
Figura 45: Matriz de resultados del impacto ambiental analizado en las inmediaciones del puente Monsefú - Eten....135
Figura 46: Sección transversal Km 0+020 – Aguas Abajo....136
Figura 47: Sección transversal Km 0+120 – Eje del Puente....136
Figura 48: Sección transversal Km 0+020 – Aguas Abajo (Propuesta)....137
Figura 49: Sección transversal Km 0+120 – Eje del Puente (Propuesta)....137
Figura 50: Perfil de velocidades – Puente Pucalá....138
Figura 51: Perfil de velocidades – Puente Pucalá (Propuesta)....138
Figura 52: Sección transversal Km 0+340 – Aguas Abajo....139
Figura 53: Sección transversal Km 0+250 – Eje del puente....139
Figura 54: Sección transversal Km 0+340 – Aguas Abajo (Propuesta)....140
Figura 55: Sección transversal Km 0+230 – Eje del Puente (Propuesta)....140
Figura 56: Perfil de velocidades – Puente Monsefú Eten....140
Figura 57: Perfil de velocidades – Puente Pucalá (Propuesta)....141

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo Nº 01: Ensayos de Análisis granulométrico por tamizado…….....
Anexo Nº 02: Ensayos de Peso Específico para arenas……
Anexo Nº 03: Ensayos de Peso Específico para gravas……
Anexo Nº 04: Velocidad de sedimentación……..…….
Anexo Nº 04.01: Ensayos de Hidrómetro……...…….
Anexo Nº 04.02: Velocidad de caída – Método de Rubey…..……..
Anexo Nº 05: Cuantificación del transporte de Sedimentos……...
Anexo Nº 05.01: Ecuaciones para transporte en arrastre…….
Anexo Nº 05.02: Ecuaciones para transporte en suspensión……..
Anexo Nº06: Cálculos de la propuesta de investigación…….
Anexo Nº 06.01: Análisis de consistencia……..…….
Anexo Nº 06.02: Pruebas de bondad de ajuste……..……..…….
Anexo Nº 06.03: Análisis Estadístico de datos hidrológicos……..…….
Anexo Nº 06.04: Verificación del ancho estable del cauce……..
Anexo Nº 06.05: Determinación de la profundidad de socavación…….
Anexo Nº 07: Informe de Modelamiento en Hec - Ras……
Anexo Nº 08: Informe de Impacto Ambiental……
Anexo Nº 09: Planilla de Metrados……
Anexo Nº 10: Presupuesto……..
Anexo Nº 10.01: Análisis de precios unitarios……...…….
Anexo Nº 10.02: Cálculo de Movilización y Desmovilización de maquinaria……..……..
Anexo Nº 10.03: Cálculo de flete……..……..…….
Anexo Nº 11: Cronograma……
Anexo Nº 12: Panel Fotográfico……
Anexo Nº 13: Planos……

RESUMEN

Los grandes proyectos de Ingeniería Hidráulica en nuestro país exigen una evaluación previa de su factibilidad tanto técnica como económica.

Con este proyecto de investigación se pretende dar a conocer el porcentaje de transporte de sedimentos que ocurren en los ríos de nuestra localidad, enfocándose en el problema de la sobre sedimentación, el cual reduce la capacidad hidráulica del río. En esta investigación fue fundamental demostrar la importancia del estudio del transporte de sedimentos en el Río Chancay, teniendo como muestra las inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten, realizando extracciones por medio de muestreadores manuales tipo Helley Smith.

Esta investigación consiste en el estudio comparativo de las ecuaciones de transporte de sedimentos por arrastre y suspensión para seleccionar la ecuación más aceptable y de mejor ajuste en las zonas de estudio, utilizando las fórmulas propuestas por Meyer – Peter & Müller, Schocklistch, Levi y Yalin para el transporte por arrastre y las ecuaciones de Chang Simons & Richardson, Bagnold y Brooks para el transporte en suspensión.

Finalmente, como conclusiones se obtuvieron que las ecuaciones de mejor ajuste por arrastre fueron las ecuaciones de Schoklistch y Meyer Peter - Müller, mientras que para el sedimento transportado en suspensión resulta de mejor ajuste las ecuaciones de Brooks y Chang Simons – Brooks, siendo los resultados para ambas zonas de estudio (Pucalá y Monsefú – Eten). El producto de esta investigación podrá ser utilizado como fuente de información ante la necesidad de proyectar y planificar estructuras hidráulicas en las proximidades del río Chancay.

Palabras claves: Transporte de Sedimentos, Ecuaciones Empíricas, Muestreadores manuales, Avenidas Máximas, Impacto Ambiental, Descolmatación.

ABSTRACT

The large Hydraulic Engineering projects in our country require a prior assessment of their technical and economic feasibility.

The aim of this research is to report the percentage of sediment transport that occurs in the rivers of our locality, focusing on the problem of over sedimentation, which can reduce the hydraulic capacity, hence the importance of its study. In this research it was fundamental to demonstrate the importance of the study of sediment transport by drag and suspension in the Chancay River, having as a sample the vicinity of the Pucalá and Monsefú - Eten bridges, making extractions by means of manual samplers type Helley Smith, being analyzed in the laboratory by the respective tests.

This research consists on a comparative study of the equations of transport of sediments by drag and suspension. In order to select the most acceptable and better adjustment equation to the study areas, were used the equations of Meyer - Peter and Müller, Schocklistch, Levi and Yalin for the transport by drag; and the equations of Chang, Simons & Richardson, Bagnold and Brooks for the transport in suspension.

Finally, it is concluded that the best fit equations are the Schoklistch and Meyer Peter - Müller equations, while for the sediment transported in suspension, the Brooks and Chang Simons - Brooks, being the results for both study areas (Pucalá and Monsefú - Eten). This results could be used as an information source in order to project and plan hydraulic structures in the Chancay river nearness.

Key words: Sediment Transport, Empirical Equations, Manual samplers, Maximum Avenues, Environmental Impact, Descolmatation.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que se presentan en los ríos es la sedimentación y la acumulación de los mismos, esta problemática presente en varias regiones de nuestro país origina que el curso del agua se vea obstaculizado impidiendo su libre curso, conllevando a que los ríos se desborden ante avenidas máximas. Además, en las inmediaciones de un puente, al estar en contacto directo, la estructura tiene mayores probabilidades de sufrir daños, por lo que la falta de consideración del transporte de sedimentos en la elaboración y planeamiento de proyectos hidráulicos generan problemas de gran magnitud.

Esta investigación realizada en el río Chancay en inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten, los que actualmente se encuentran con acumulación de sedimentos, conllevó a determinar la cantidad de sedimentos transportados en distintas fechas, en un período de dos meses y de esta manera conocer las variaciones que ocurren en el transporte; cuantificándolo mediante ecuaciones empíricas propuestas por distintos investigadores. Al cuantificar el transporte de sedimentos se determinó cuál de las ecuaciones por arrastre y suspensión, son de mejor ajuste en las zonas de estudio.

Conociendo estos resultados, serán de mucha importancia al momento de querer realizar algún tipo de estructura hidráulica, teniendo datos del transporte de sedimentos por arrastre y suspensión de las zonas de estudio mencionadas, por lo que el ingeniero proyectista podrá optar y recomendar mejoras en el diseño hidráulico y/o estructural en la estructura a proyectar.

Esta investigación está estructurada de la siguiente manera: Capitulo I – Problema de investigación; Capítulo II – Marco teórico; Capítulo III – Marco metodológico; Capítulo IV – Análisis e interpretación de resultados; Capítulo V – Propuesta de investigación; Capítulo VI – Conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Situación Problemática

1.1.1. Internacional

Algunos de los problemas presentados a nivel internacional son los siguientes:

Sitio web, Colegio de Ingenieros de Venezuela (CIV). (2017), El ingeniero Eduardo Páez – Pumar, de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat, encargado de la Comisión en Infraestructura, informó para el sitio web que el puente Guanape II en el Estado Vargas de Venezuela, se fracturó por presentar algunas irregularidades, refiriéndose como "*preocupante*" al problema de la sedimentación. Este problema se presenta por la falta de mantenimiento de las quebradas: "*La sedimentación ha ido en aumento y junto a ella ha crecido vegetación, es de tal magnitud el proceso de sedimentación que cuando el puente Guanape II se fractura, queda apoyado sobre el sedimento y no termina de colapsar, de no aplicarse las medidas correspondientes los puentes serán arrasados por los desbordes con fuertes inundaciones*", señaló el ingeniero especialista para el diario venezolano.

La falta de consideración sobre un estudio de sedimentos se manifiesta para el siguiente acontecimiento en Colombia: Revista Semana. (2016), editor de la revista, Santos. A, difundió acerca de la construcción del nuevo puente Pumarejo sobre el Río Magdalena, el que representa a su vez una de las mega obras de mayor importancia para el gobierno colombiano. Para mayo del 2016 el Consorcio SES comenzó a construir el puente Pumarejo, durante la ejecución del puente, comenzó a preocupar el hecho de que la velocidad del agua se duplicará en el río que atraviesa la estructura, generando a su vez sedimentaciones y erosiones alrededor de su cimentación; una de las negligencias del proyecto lo menciona el oficial de Marina Enrique Requerida Otero, entrevistado por la revista SEMANA, indicó que la previa modelación hidráulica del puente no consideró los efectos erosivos o sedimentarios.

Por otro lado, Diario digital Hoy. (2012), El especialista en construcción de puentes y túneles, Miguel Liberato, aseguró para el diario que sin el retiro de la sobre sedimentación seguirán los problemas en los puentes del Sur de Santo Domingo en República Dominicana. Además, mencionó que los daños al puente Los Pilones, en la carretera Baní-Azua, y otros tres de esa misma vía, fueron originados por vicios de diseño y por acumulación de sedimentos, lo que ha ocasionado un estancamiento de cauces, aumentado los riesgos de desborde y hasta tanto las autoridades no tomen conciencia de los efectos de la sobre sedimentación, los aproches seguirán siendo víctimas de la socavación.

1.1.2. Nacional

Una de las problemáticas ocurridas en nuestro país, en Tumbes a la altura del río que lleva su mismo nombre, éste se encontraba sedimentado obstaculizando el curso del agua, teniendo al puente Francos con problemas de un posible colapso.

Diario Correo. (2015), El jefe regional Manuel Boggio perteneciente al Instituto Nacional de Defensa Civil, anunció para el diario; "*El puente Francos lamentablemente está destinado a colapsar si es que las lluvias continúan*". Recalcó que el problema de sedimentación, en el mismo puente Francos, como en el río Tumbes, está obstaculizando el libre curso de las aguas, lo que afecta considerablemente la infraestructura. "*La sedimentación que hoy presenta el puente en cuestión, debió ser retirada por la empresa contratista de la Defensa Ribereña, sin embargo, esto no se ha realizado, es por ello los problemas que hoy se presentan*".

Otra problemática a nivel nacional ocurrida en Piura: Diario Correo. (2015), El Secretario Técnico del Comité de Operaciones de Emergencia Regional, Eduardo Arbulú (coronel), mencionó que el río Piura a la altura del puente Sánchez Cerro registraba un caudal de 662 metros cúbicos por segundo, también indicó que lo que podría afectar a las poblaciones con las crecidas es la sedimentación existente en el cauce del río Piura; ello viene ocurriendo en la zona donde se encuentra el puente Independencia, en el cual se tiene que realizar trabajos de mantenimiento para que pueda soportar crecidas similares a las de fenómenos de El Niño anteriores.

Por otro lado, en el departamento de Ica, Diario Correo. (2015), El jefe Regional del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), César Chonate, señaló para el diario que las autoridades municipales deben trabajar en la posibilidad de que el fenómeno del Niño será extraordinario y que haría discurrir hasta 700 m^3/seg de agua por el río Ica. Ante esta problemática también se pronunció el alcalde del lugar. Ramos, C (2015), alcalde provincial afirmó que el tramo entre el puente Socorro y sector La Primavera debe ser rehabilitado en la margen derecha por su vulnerabilidad. Por la falta de limpieza y acumulación de sedimentos debajo, los puentes, Socorro, Grau, Cuervo y Los Maestros constituyen un peligro.

1.1.3. Local

Son muchos los proyectos de ingeniería que presentan problemas de sedimentación; un puente, al estar construido sobre las inmediaciones de un río, se encuentra en contacto directo con el mismo, por lo que presenta la probabilidad de sufrir daños originados por los sedimentos; las pocas mediciones y la falta de consideración del transporte de sedimentos en la elaboración y planeamiento de proyectos hidráulicos generan problemas de gran magnitud al impedir el libre curso del río.

El mayor transporte de sedimentos sucede en épocas de máximas avenidas, si el caudal de un río incrementa aceleradamente, el transporte de sedimentos será en mayores cantidades. Un fenómeno del niño como el ocurrido en el año 1998 podría perjudicar considerablemente un puente, afectándolo inicialmente desde la subestructura.

En Lambayeque se encuentran dos puentes de gran significación: los puentes Pucalá y Monsefú – Eten, que atraviesan el curso del Rio Chancay y que actualmente se encuentran con problemas de sobre sedimentación. El Puente Pucalá presenta grandes cantidades de gravas y arcillas, mientras que en inmediaciones del Puente Monsefú – Eten se pueden obtener partículas de arena a lo largo de su recorrido.

La problemática principal se basa en que, al estar ubicados en Lambayeque, uno de los departamentos más afectados por el Fenómeno del Niño de 1998, demuestra su vulnerabilidad ante eventos climáticos y la escasa información y limitación de una correcta investigación de transporte de sedimentos solo empeora la situación.

Además, las últimas lluvias generadas por el fenómeno del Niño Costero en el mes de Marzo del Presente año provocaron grandes crecidas de caudal en el Río, removiendo y transportando grandes cantidades de sedimento, los cuales han ido depositándose en las zonas en estudio.

Puente Pucalá, 12 de febrero del 2017, exceso de vegetación y acumulación de sedimento

Puente Pucalá, 29 de marzo del 2017, posterior a la llegada del Fenomeno del Niño Costero

Figura 1: Comparación del Puente Pucalá, antes y después de la llegada del Niño Costero, produciendo diferentes consecuencias

Puente Monsefú - Eten, 12 de febrero del 2017, acumulación de sedimento y vegetación.

Puente Monsefú - Eten, 26 de marzo del 2017, posterior a la llegada del Fenómeno del Niño Costero

Figura 2: Comparación del Puente Monsefú – Eten, antes y después de la llegada del Niño Costero produciendo diferentes consecuencias

1.2. Formulación del Problema

¿Cuáles son las ecuaciones de transporte de sedimentos que resulten de mejor ajuste según el estudio comparativo realizado tanto para arrastre como suspensión, en el río Chancay para las inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú - Eten?

1.3. Delimitación de la Investigación

La presente tesis tiene como campo de investigación el transporte de sedimentos que transcurren por el Río Chancay en dos puentes que atraviesan su cauce: Los puentes Pucalá y Monsefú – Éten en los cuáles se realizó la toma de datos.

Uno de ellos es el Puente Pucalá ubicado en el distrito de Pucalá, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque; la ruta de acceso desde Chiclayo hasta Pucalá comienza con la Carretera Chongoyape – Cochabamba – Cajamarca y continúa con la Carretera Pucalá. El segundo puente en mención es el Puente Monsefú – Éten, como su nombre indica, se encuentra situado en el tramo Monsefú – Éten, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque; la ruta de acceso desde Chiclayo hasta el puente mencionado se realiza por la Carretera Monsefú.

1.4. Justificación e importancia

Es fundamental en esta tesis demostrar la importancia de la realización de estudios de sedimentación en los puentes Pucalá y Monsefú – Eten por ser estructuras que satisfacen necesidades de comunicación y transporte a los pobladores beneficiados, las pocas mediciones del transporte de sedimentos conlleva a desconocer los efectos que éstos generan en las estructuras hidráulicas, por lo tanto, los esfuerzos para contrarrestar este tipo de perjuicios generalmente tienen un costo muy grande, sin embargo, es necesario que sean tomados en cuenta dentro de la elaboración y planificación de proyectos de la misma índole.

1.4.1. Justificación Tecnológica

Esta investigación permitió cuantificar los sedimentos por arrastre y suspensión producidos en el río Chancay en las inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Éten. Con esta investigación no sólo se pretendió realizar el estudio teórico empleando las fórmulas empíricas propuestas por los investigadores, se buscó también realizar estudios de campo empleando muestreadores manuales para sedimentación por arrastre y suspensión.

Para desarrollar la investigación se efectuaron ensayos en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Señor de Sipán. Los ensayos a ejecutarse correspondieron al análisis granulométrico por tamizado, análisis granulométrico por sedimentación, densidad y peso específico. Luego de obtener estos datos se analizaron la diferencia significativa de las ecuaciones aplicables al transporte de sedimentos por arrastre y por suspensión que presenten los puentes en estudio.

1.4.2. Justificación Ambiental

La presente investigación cuenta con un estudio de impacto ambiental, que logrará prevenir e identificar los efectos que genere la descolmatación del cauce del río Chancay en las zonas de estudio.

1.4.3. Justificación Socioeconómica

Al conocer adecuadamente el porcentaje de los sedimentos por arrastre y por suspensión que se genera en el río Chancay en las inmediaciones de los Puentes Pucalá y Monsefú - Éten, estos resultados contribuirán a reducir los efectos que los sedimentos puedan producir cuando se tenga que realizar proyectos hidráulicos en el río en mención, además de asegurar a las comunidades aledañas que se evitarán pérdidas en servicios básicos y comunicación evitando la falla de los puentes.

1.5. Limitaciones de la Investigación

Las crecidas del caudal del río en el mes de marzo, producidas por las lluvias del Fenómeno del Niño Costero, limitó la toma de muestras en esas fechas por el gran incremento del cauce, por lo que se tuvo que esperar a la disminución del mismo para proceder a la extracción de muestras de sedimentos.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Comparar las ecuaciones de transporte de sedimentos por arrastre y suspensión en las inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Éten.

1.6.2. Objetivos Específicos:

1. Determinar las características geométricas de la sección del cauce del río Chancay en las inmediaciones de los Puentes Pucalá y Monsefú – Eten.

2. Efectuar los ensayos de granulometría por tamizado, granulometría por sedimentación y peso específico de los sedimentos extraídos por arrastre y suspensión.

3. Calcular la velocidad de caída de las partículas mediante la Ley de Stokes.

4. Estimar la producción de transporte de sedimentos por arrastre y suspensión, cuantificado en campo y empleando las diversas fórmulas empíricas.

5. Seleccionar la ecuación de mejor ajuste al rio Chancay en las inmediaciones de los Puente Pucalá y Monsefú – Éten.

6. Proponer una alternativa de solución ante los efectos ocasionados por los sedimentos para los puentes Pucalá y Monsefú – Eten.

7. Realizar un estudio de impacto ambiental.

8. Elaborar el presupuesto de la alternativa de solución.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de Estudios

Transporte de sedimentos en suspensión

Restrepo, J; Ortiz, J; Otero, L y Ospino, S. (2015), analizaron los datos históricos de transporte de sedimentos en suspensión en siete cuencas del litoral Caribe colombiano (Mulatos, Sinú, Magdalena, Fundación, Aracataca, Palomino, Ranchería), con diferentes características climáticas y topográficas, con el fin de estimar los aportes fluviales de sedimento hacia la zona litoral, aplicando pruebas de continuidad y homogeneidad a los promedios mensuales de transporte de sedimentos en suspensión, analizando las series de tiempo mediante pruebas estadísticas, obteniendo como conclusión que el río Magdalena contribuyó con la mayor cantidad de estos sedimentos, con un transporte de sedimentos en suspensión (TSS) de 142,6 $x10^6$ Ton/año, que correspondió al 38 % del total de los aportes de sedimentos en suspensión estimados para esta región, por ello se ha considerado que el aporte de TSS en la mayoría de estos ríos se debe fundamentalmente a su alta variabilidad natural.

Esta investigación sirvió de mucha ayuda, logrando determinar cuál fue la cuenca que transportaba mayor cantidad de sedimentos, obteniendo conclusiones concretas, las cuales se tendrán en cuenta al momento de realizar un seguimiento del sedimento en suspensión en años posteriores o para otras cuencas.

Calibración de una ecuación de transporte de sedimentos

Sarango, C. (2013), se enfocó en el estudio del río Zamora de la cuenca El Limón en Ecuador, considerando sus características para cálculo del caudal, además de extracción del material de arrastre por medio de muestreadores (canastillas metálicas), para proceder a ser estudiados mediante ensayos de laboratorio, y aplicando métodos para el cálculo del transporte de sedimentos de fondo, propuesta por distintos autores, para proceder a aplicar el software Laboratorio Virtual de Hidrología, efectuando un análisis de correlación entre las características del sedimento de la cuenca y la sección y el sedimento capturado, que determinará la ecuación más aceptable cumpliendo con los parámetros de validación para la cuenca El Limón, en conclusión Sarango demostró que la ecuación particular para la cuenca el Limón del río Zamora, en el campo es:

$$gB = -1.93147 + 0.6358e^{2.1645V} - 0.4672e^{8.1724q}$$

Donde gB: cantidad de sedimentos, q: caudal unitario y V: velocidad, dando un coeficiente de correlación R^2 = 0.96, el coeficiente de eficiencia de Nash (Coef Nash) = 0.963; y el error cuadrático medio fue de 2.602. Además, una de las ecuaciones aceptadas resultó la de Inglis, la cual se ajusta perfectamente, dando los siguientes resultados: R^2 = 0.82, Coef Nash = 0.718, y un error cuadrático medio de 4.118, por lo tanto, las ecuaciones encontradas para la determinación del transporte de sedimentos brindan resultados óptimos, cumpliendo con los rangos establecidos de los parámetros de validación.

Este estudio del río Zamora servirá de gran apoyo al momento de querer realizar una investigación del sedimento por arrastre, encontrando una ecuación que se ajuste a la zona de estudio, además de la ecuación que hallaron que es de mucha ayuda para la continuación de investigaciones en el río Zamora, o seguir la metodología para estudios en otras cuencas.

Análisis de sedimentos utilizando un enfoque de la programación estructurada.

Arias-Madrid, D; López-Paz, O y Jiménez-Builes, J. (2012), realizaron un estudio hecho en Colombia el cual se basa en el diseño de un algoritmo utilizado en el análisis de muestras no consolidadas de sedimentos, queriendo plasmar en un corto tiempo las características principales presentes en la partícula de sedimento y clasificarlas de esta manera eficaz y rápidamente con la ayuda de un programa estructurado; para el funcionamiento del programa se debe ingresar primero el peso de las partículas de acuerdo a su medida la cual se obtiene del proceso de tamizaje, al digitar en el programa el resultado del peso de las partículas que contiene cada malla inmediatamente se obtiene cálculos resueltos por el método de los Momentos, dicho método se basa en diferentes ecuaciones, siendo un total de cuatro, representando la desviación estándar, el promedio, el Skewness y la Kurtosis, así, permitiendo al primer momento clasificar la muestra según su tamaño; para el segundo, este examina las partículas de sedimento, qué tan homogéneas y parecidas resultan; en el caso del tercer momento, éste mide la tendencia de las partículas hacia un tamaño determinado ó la simetría respecto a un valor medio evaluando la predisposición hacia un tamaño grueso o fino; y por último, el cuarto

momento estudia si la distribución de la muestra resulta ser mala o buena respecto al valor central. Finalmente concluyen que el algoritmo diseñado confirma la aplicabilidad de que la programación estructurada resuelve dificultades ante la clasificación de un sedimento y permite identificar características como el tamaño de la partícula del sedimento, la forma de sus granos, así como la energía que poseía y la escasez o exceso de partículas que la conforman, de esa misma forma permite conocer el lugar de origen de las partículas del sedimento, es decir, si estos provienen del río o de la playa a partir del segundo y tercer momento.

Esta investigación resulta muy importante al momento de querer obtener una clasificación de los sedimentos estudiados, debido a que el programa estructurado que realizaron será de mucha ayuda para clasificar, examinar y distribuir las partículas de sedimento; así con la ayuda del algoritmo que plantearon poder aplicarlo para saber el origen del sedimento que se necesite estudiar.

Transporte de sedimentos por mediciones directas mediante modelos empíricos

Iroumé, A y Paula G.Y. (2009) realizaron un estudio correspondiente a la cuenca del estero Tres Arroyos al sur de Chile, esta cuenca cuenta con 5,93 km^2 de superficie, la cual presenta suelos de origen volcánico, de textura areno limosa teniendo en promedio poco más del 60% de arena gruesa y algo menos del 30% de limos. La concentración de sedimentos en suspensión (CSS) se obtuvo a través de muestras de aproximadamente 0,33 litros, extraídos con un tomador de muestras tipo Helley Smith, estas mediciones se compararon con los resultados obtenidos mediante los modelos de transporte: Meyer-Peter y Muller, Graf et al., Bagnold, Van Rijn y Bathurst et al., Schoklitsch, Engelund y Hansen, Einstein, Smart y Jaeggi, concluyendo que para la cuenca del estero Tres Arroyo, la producción de sedimentos en el periodo octubre 1997 - mayo 2005 resultó ser de $7.1*10^3$ toneladas, el cual corresponde a un transporte sólido medio de 171 ton/año/km^2, con participación de un 55,7% de los sedimentos en suspensión. La producción de sedimentos en suspensión varía en el rango de 17 y 1084 ton/año, mientras el sedimento de fondo (> 20 mm) alcanza rango de 14 y 677 ton/año., diferencias atribuidas a la magnitud de las crecidas de caudal en la cuenca. A su vez, la mayoría de las ecuaciones para determinar el transporte sólido basadas en

las mediciones realizadas en terreno (con caudales hasta 2,14 m^3/s) tienden a sobrestimar la producción del transporte de sedimentos, a excepción de las ecuaciones propuestas por Van Rijn y Bathurst et al., como primera aproximación se recomienda el uso del modelo de transporte de Bathurst para el diseño de obras hidráulicas para cuencas cercanas a la zona de estudio.

El estudio del transporte de sedimentos por arrastre y suspensión resulta de gran ayuda para su determinación cuando se plantee la construcción de alguna estructura hidráulica, es por ello que esta investigación podrá ser utilizada para realizar algún estudio de un río, determinando de manera precisa la cantidad de sedimento que viene acumulándose.

Velocidad de caída de sedimentos en suspensión por efectos de turbulencia

Salinas, H; García, J.A y Díaz, C. (2008), realizaron experimentos en México, para ello consideraron una condición de flujo estacionario mediante un canal experimental, el cual contó con las siguientes medidas: 2 m de largo y 10 x 15 cm de sección, para el transporte de sedimentos, utilizando distinto datos de caudal líquido, encontrándose en rango de 0.43 l/s y 1.48 l/s, de la misma manera diferentes diámetros de partículas de sedimentos. Los diámetros de las partículas de sedimentos que fueron parte del análisis variaron en rangos de 0.075 mm y 0.425 mm:

Tabla 1:

Intervalos de tamaños de partículas de sedimentos

	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3
Amplitud (mm)	0.075 a 0.15	0.15 a 0.3	0.3 a 0.425
Diámetro medio (mm)	0.1125	0.225	0.3625

Nota: Salinas, H; García, J.A y Díaz, C.

Para la medición de los campos de velocidades, se utilizó una cámara digital tipo CCD de alta resolución, capturando alrededor de 100 imágenes por segundo, concluyendo que el análisis del transporte de sedimentos para una mezcla cuasi-uniforme en diferentes condiciones de variación de flujo líquido y sólido, han permitido dar explicación a los efectos de interacción entre el fluido y los sólidos los

cuales influyen grandemente en las propiedades del flujo, principalmente en las características de la turbulencia y también en la velocidad de caída de las partículas. De la misma manera, esta técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) ha permitido obtener los valores de velocidades de caída para distintos intervalos de tamaño de partículas en suspensión, con números de Reynolds entre 4250 y 14800, comprobando que la velocidad de la caída de la partícula varía de acuerdo a la profundidad y la turbulencia. Por otra parte, pese a los avances determinados en esta investigación, se concluye finalmente realizar una investigación adicional para determinar una relación entre el número de Reynolds y el coeficiente de arrastre de las partículas (cantidad adimensional que se usa para cuantificar el arrastre), con el principal objetivo de obtener una manera de calcular la velocidad de caída de las partículas en condiciones de turbulencia incrementadas (números de Reynolds mayores).

La siguiente metodología de estudio, es muy innovadora, por los equipos utilizados para evaluar el comportamiento de los sedimentos, lo que realza la investigación, su desarrollo ayuda a capturar en varias imágenes el comportamiento del sedimento con el flujo a diferentes velocidades.

Transporte de sedimentos del Arroyo Napostá Grande, Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires

Pérez, D y Perillo, G. (2002), centran su investigación en el arroyo Napostá Grande de Argentina, cuyo propósito fué establecer lugares aptos para realizar el muestreo, así como también establecer metodologías que permitan describir la mecánica del transporte de sedimentos de la zona en estudio. A pesar de que existe un gran número de obras hidráulicas sobre el curso inferior del arroyo, no existen datos publicados acerca del caudal sólido transportados por el mismo, por lo tanto, en esta investigación se propone una formulación que mejor represente el transporte de sedimentos por arrastre y suspensión. Las mediciones se llevaron a cabo en una sección transversal del arroyo especialmente seleccionada, se obtuvieron muestras del sedimento transportado como carga de fondo por medio de trampas tipo Helley-Smith en cinco puntos diferentes del arroyo durante 13 minutos para cada punto; para la determinación del sedimento por suspensión en cambio, se extrajeron 2 muestras de 5 litros de agua. Posteriormente, se ejecutaron los

ensayos necesarios para cada recolección de muestras, el resultado obtenido en campo del transporte de fondo fue comparado con estimaciones realizadas aplicando algunas de las fórmulas propuestas por Meyer-Peter-Muller, (1948), Bagnold (1966), Einstein (1950) y Yalin (1972), concluyéndose que la formulación que mejor predijo el valor de transporte de fondo medidos en el Arroyo Napostá Grande fue la que propone Einstein, aunque por defecto, según se muestra en la tabla 2:

Tabla 2

Comparación de los valores de transporte como carga de fondo calculados con los datos medidos en Napostá Grande.

Fórmula	Transporte total ($g.seg^{-1}$)	Error (%)
M-P-P	248	126.20
Bagnold	129	17.32
Einstein	95	-13.63
Yalin	93	-15.54

Nota: M-P-P: Fórmula de Meyer Peter – Müller. Adaptado de "Transporte de sedimentos del Arroyo Napostá Grande, Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires", por D. E. Pérez & G. M. E. Perillo, 2002, *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, vol. 9 no.2.

El transporte de sedimentos en suspensión fue calculado mediante curvas de perfiles de concentración dadas por la teoría de la difusión según Yalin, (1972) del cual se obtiene que la concentración de sedimentos en suspensión fue de 539,6 mg/s con velocidades de caída ponderadas de 0,00737 cm/s y 0,00354 cm/s para las muestras 1 y 2, respectivamente.

El presente estudio en el arroyo Napostá Grande, ayuda a determinar de manera cuantitativa el transporte de sedimentos por arrastre y suspensión, los cual es de mucha ayuda, por lo que puede utilizarse para investigaciones posteriores, debido a que muchas veces no se toma en cuenta el estudio de sedimentos para la construcción de estructuras hidráulicas.

2.2. Estado del Arte

Sofware Hec – Ras:

TYC GIS. (2017). Rebeca Benayas, Licenciada en Ciencias Ambientales, publicó en su blog, a cerca del software que se obtiene de manera gratuita, su uso se ha generalizado, debido a su constante actualización, realizando mejoras en su desarrollo. *"Esto ha hecho que poco a poco la gran mayoría de administraciones hayan comenzado a exigir el estudio del impacto que pueden representar sobre la dinámica de los cauces cualquier tipo de actuación con un modelo hidráulico suficientemente fiable, como es el caso de HEC-RAS"*, recalcó Benayas.

(US Army Corps of Engineers). El software Hec – Ras (hydrologic engineering centers river analysis system) permite a los usuarios poder realizar cálculos de caudal constante, unidimensional y bidimensional, así como también cálculos y un modelo de transporte de sedimentos, cama móvil y modelos de calidad de agua / agua.

Este software además permite simular flujos en cauces ya sean naturales o artificiales, así poder determinar el nivel del agua, por lo que su objetivo principal es realizar estudios de inundabilidad y determinar las zonas inundables. (TYC GIS. 2017).

Figura 3: Modelación Hidráulica de un río en el Sofware Hec – Ras. Adaptado de Blog Curso Gis, 2017.

2.3. Bases teórico - científicas

2.3.1. Transporte de sedimentos

2.3.1.1. Definición:

García, M; Maza, J. (1985). La sedimentación se entiende por aquellas partículas de suelo y roca de una cuenca, las cuales son arrastradas y transportadas por una corriente de agua. Por su comportamiento, el sedimento al ser transportado en el flujo puede diferenciarse en dos grandes grupos: el de fondo y el de suspensión. Al realizar el estudio en un tramo del río, el primero conformado por el material del fondo del cauce, y el segundo el cual no se encuentra dentro de ese material, este último conformado por partículas muy finas, por ejemplo, limos y arcillas que el agua fácilmente transporta en suspensión.

La cantidad total de sedimento transportado aplicable en el diseño de obras hidráulicas pueden resultar excesivas o también deficientes, de tal manera que para lograr un diseño óptimo de las obras que se encontrarán sometidas al efecto de los sedimentos es necesario evaluar, además de la información histórica existente, la relación existente entre la cuenca como productora de los sedimentos y el río como conductor de los mismos. (García, M; Maza, J. 1985).

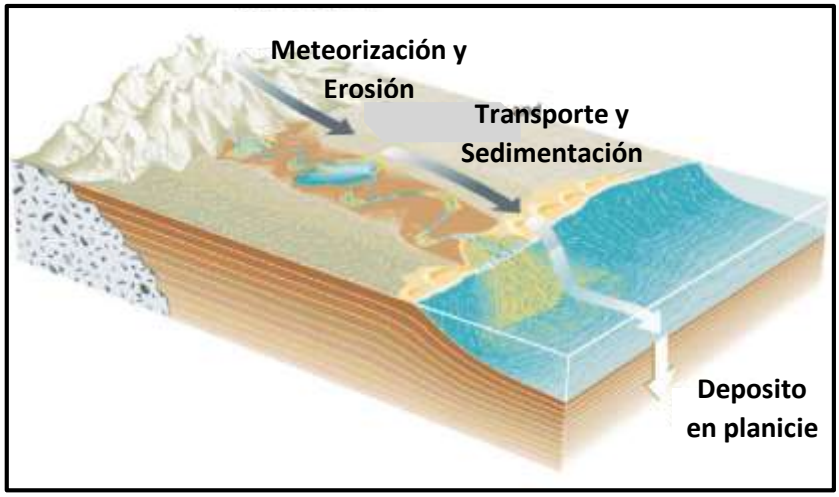
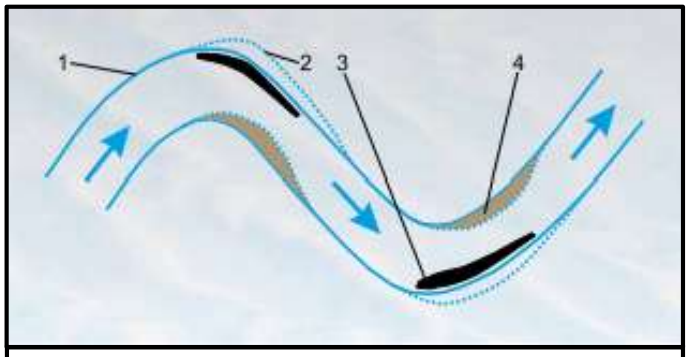


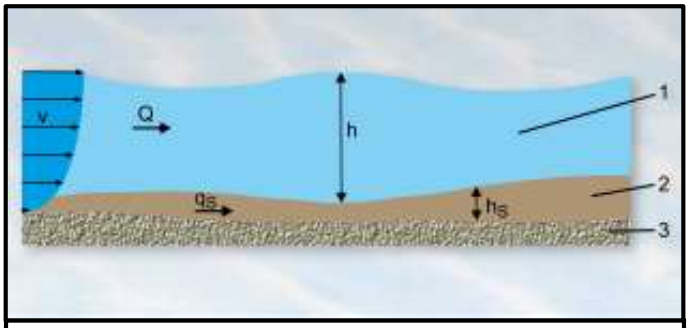
Figura 4: Descripción adaptada del transporte de sedimentos desde su origen. Adaptado de Ibáñez, J, 2008, Blog Madridmasd.

García, F. (2009). El desplazamiento de las partículas se debe principalmente a la acción del flujo ejercida sobre ellas, mediante fuerzas normales y de corte, se sabe que las partículas de sedimentos se mueven en cauces aluviales mediante dos mecanismos; Transporte de fondo, Transporte en suspensión.



1 lecho de río original, 2 lecho de río modificado por el transporte de sedimentos en un momento posterior, 3 socavación/erosión, 4 sedimentación.

Figura 5: Comportamiento del transporte de sedimentos en un río, visto en planta. Adaptado de Catálogo G.U.N.T Hamburg – Equipos para la educación en ingeniería – Ingeniería Hidráulica – Transporte de Sedimentos (Pag. 153)



1 agua, 2 sedimento móvil, 3 fondo fijo; v velocidad de flujo, Q descarga, qs capacidad de transporte de sedimentos, h profundidad de descarga, hs espesor de la capa de sedimentos

Figura 6:Comportamiento del transporte de sedimentos en un río, vista longitudinal. Adaptado de Catálogo G.U.N.T Hamburg – Equipos para la educación en ingeniería – Ingeniería Hidráulica – Transporte de sedimentos (Pag. 153)

2.3.1.2. Clasificación del transporte de Sedimento

El transporte de sedimentos en un río puede clasificarse atendiendo a los siguientes criterios:

A. Por el modo de transporte

El sedimento puede ser transportado en suspensión, sostenido por la turbulencia del flujo, o por el fondo rodando, deslizando o saltando. (Martín J, 2003).

B. Por el origen del material

Según el origen del material el sedimento puede ser de lecho o de lavado, se entiende por carga de lavado al material muy fino y el cuál siempre es transportado en suspensión. Un criterio práctico para separar un material sea de lecho o de lavado es aplicando el tamaño de las partículas, D= 0.0625mm; para partícula inferiores a este diámetro como el caso de arcillas y de limos, procede mayoritariamente del lavado de la cuenca mientras que el material superior (Arenas), proceden del lecho. (Martín J, 2003).

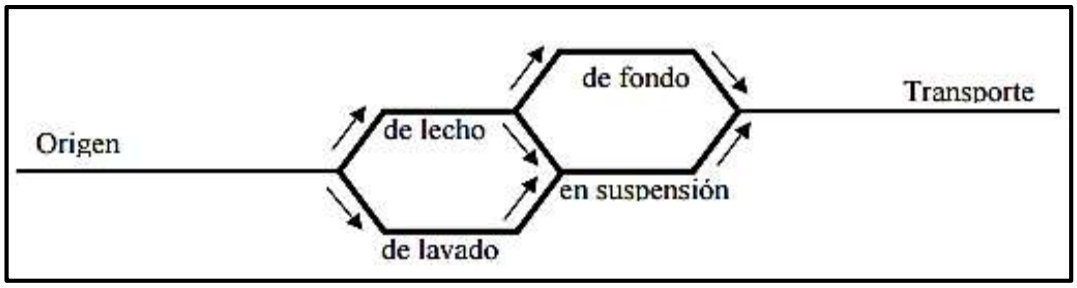
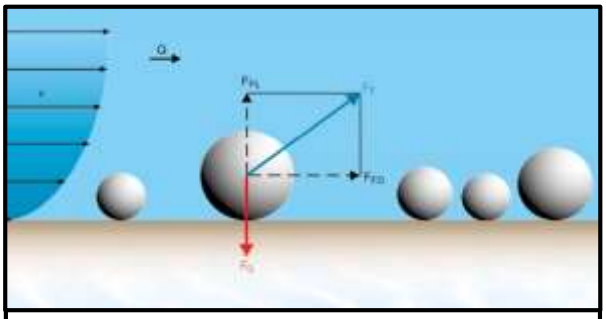


Figura 7: Clasificación del transporte de sedimentos en corrientes naturales. Adaptado de "Transporte de Sedimentos en corrientes Naturales: Revisión Técnica de Ecuaciones Empíricas de Predicción del Arrastre de Sedimentos de Fondo" por Bravo – Espinoza M, Osterkamp W. y López V, 2004, Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, vol. 22, num. 3.

2.3.1.3. Formas del transporte de sedimentos

Como ya se mencionó anteriormente, el transporte de sedimentos se da en el fondo, pudiendo trasladarse de diferentes formas: rodando, saltando y deslizando; y en suspensión que se transporta de acuerdo con la turbulencia del flujo trasladándose con el caudal del río.

Gunt Hamburg, (Catálogo de Ingeniería). Para el caso de una partícula de sedimento situada en un flujo actúan sobre ella distintas fuerzas. Por lo tanto, la forma del transporte de sedimentos dependerá del tamaño, así como de la masa y la forma de la partícula de sedimento y de la fuerza de flujo que actúa sobre la misma.



V: velocidad de flujo, Q: descarga, FG peso, FF fuerza de flujo, FFL: fuerza de sustentación, FFD: fuerza de arrastre.

Figura 8: Fuerzas en una partícula de sedimento en el fondo del cauce. Adaptado de Catálogo G.U.N.T Hamburg – Equipos para la educación en ingeniería – Ingeniería Hidráulica – Transporte de Sedimentos (Pag. 154)

Gunt Hamburg, (Catálogo de Ingeniería). La fuerza de flujo FF representa la fuerza resultante de la fuerza de sustentación FFL, la cual actúa de forma vertical, y la fuerza de arrastre FFD, que actúa de manera horizontal. Para que la partícula de sedimento deje el fondo del canal, saltando o transportándose en suspensión, la fuerza de sustentación debe ser mayor que el peso opuesto FG del grano de sedimento. La fuerza del flujo que actúa sobre las partículas pequeñas es menor que en los grandes debido a la distribución de la velocidad de flujo "*v*" entre el fondo del canal y la superficie del agua. En partículas de mayor tamaño, el peso FG es mayor y evita que los sedimentos se transporten en suspensión.

A. Rodadura

Un ejemplo claro de ello son las piedras, ya que normalmente son los granos de sedimentos grandes los que se transportan de esta manera, permaneciendo en constante contacto con el fondo.

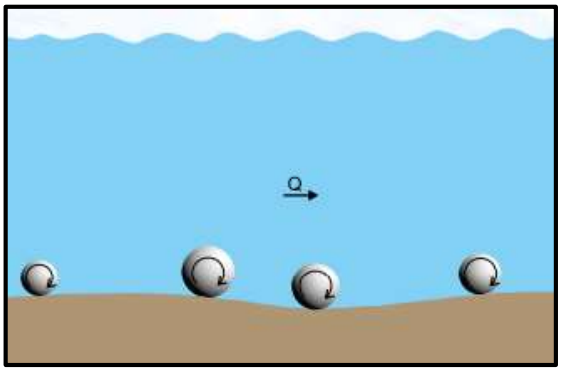


Figura 9: Transporte de sedimentos por rodadura, situados en el fondo del cauce. Adaptado de Catalogo G.U.N.T Hamburg – Equipos para la educación en ingeniería – Ingeniería Hidráulica – Transporte de sedimentos (Pag 155)

García, F. (2009). El movimiento rodante consiste en el avance de las partículas por medio de una rotación en torno a un punto de contacto, generado por un torque local.

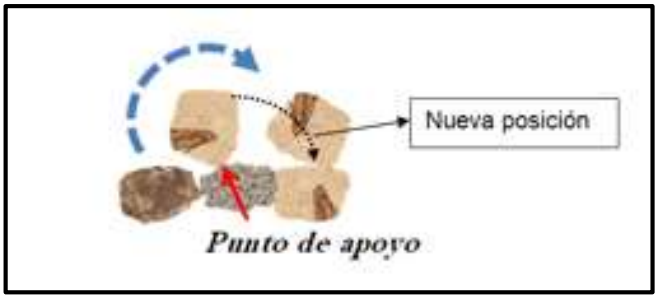


Figura 10: Movimiento por rodadura de las partículas de sedimento. Adaptado de García, F. (2009). Modelo de transporte de sedimentos de carga de fondo en cauces fluviales.

B. Saltación

Para este tipo de transporte de sedimento pondremos como ejemplo pequeñas piedras de grava, los cuales son desprendidos brevemente del fondo del cauce, siendo arrastrados por el flujo antes que vuelvan a depositarse, logrando un efecto de saltación.

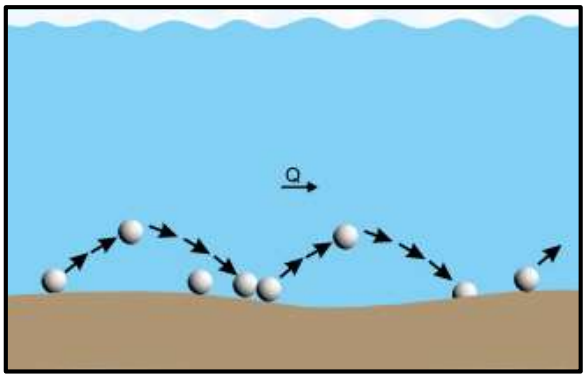


Figura 11: Transporte de sedimentos por saltación en el lecho de un río. Adaptado de Catálogo G.U.N.T Hamburg – Equipos para la educación en ingeniería – Ingeniería Hidráulica – Transporte de Sedimentos (Pag 155)

García, F. (2009). El tipo de transporte que se denomina "*transporte de saltación*"; donde las partículas de sedimento son apartadas del fondo del cauce por el flujo traduciéndose ello en saltos intermitentes, los cuales alcanzan alturas de unos pocos diámetros de partícula. Este modo de transporte también ocurre para flujos gaseosos o de aire; frecuentemente se aprecia en el movimiento de sedimento inducido mediante la ción del viento.

Figura 12: Movimiento por saltación de las partículas de sedimentos. Adaptado de García, F. (2009). Modelo de transporte de sedimentos de carga de fondo en cauces fluviales.

C. Deslizamiento

García, F. (2009). Este tipo de movimiento deslizante ocurre cuando partículas de sedimento están apoyadas sobre una superficie lo suficientemente plana, por lo que no existe ningún punto de apoyo en torno al cual la partícula pueda rotar.

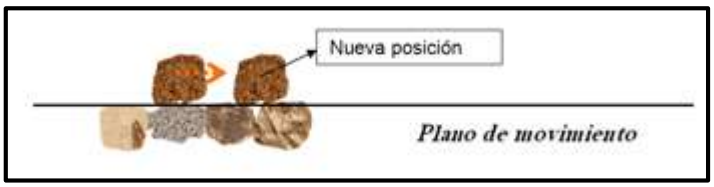


Figura 13: Movimiento por deslizamiento de las partículas de sedimentos. Adaptado de García, F. (2009. Modelo de transporte de sedimentos de carga de fondo en cauces fluviales.

D. Suspensión

En este tipo de transporte, los sedimentos no tienen contacto alguno con el fondo, ya sea debido a los siguientes factores como: velocidad de sedimentación, turbulencia del flujo, diámetro de la partícula y densidades tanto de la partícula como del agua.

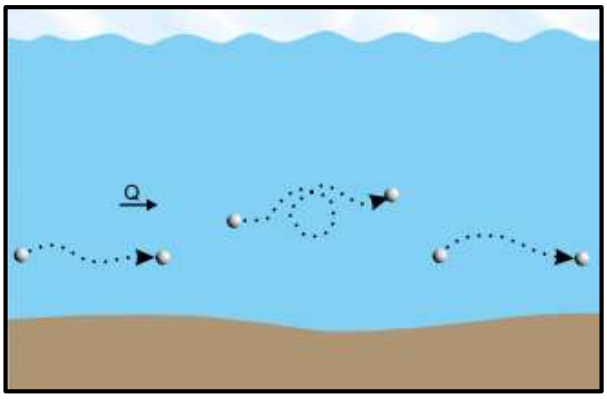


Figura 14: Transporte de Sedimentos en Suspensión. Adaptado de García, F. (2009). Modelo de transporte de sedimentos de carga de fondo en cauces fluviales.

García, F. (2009). El transporte de sedimentos en suspensión tiene la característica de ser parte del flujo líquido y suspendido en el flujo a partir de cierto nivel por encima del lecho hasta la superficie libre. Esto ocurre en intercambios continuos de turbulencia.

2.3.1.4. Tipo de transporte de Sedimentos

A. Arrastre en la capa de fondo (G_B)

Es el material del fondo del cauce que es arrastrado por la corriente dentro de la capa de fondo, cuyo espesor, según Einstein, es igual a dos veces el diámetro de la partícula considerada. El arrastre en la capa de fondo se calcula en función de las características hidráulicas de la corriente, de la geometría del cauce y de las propiedades físicas del material del fondo (Maza, J y García M,1985).

B. Transporte del fondo en suspensión (G_{BS})

Es el material de fondo del cauce que es transportado por la corriente en suspensión, debido a la turbulencia y velocidad que presenta el río, eleva a las partículas de sedimento desde el fondo manteniéndolas en suspensión, aunque constantemente se producen intercambios de partículas entre las que hay en la capa de fondo y las transportadas en suspensión. Cuando el material del lecho del río es de material grueso o presenta menor turbulencia, se tiene poco material transportado en suspensión cerca de la superficie y concentraciones mayores cerca del fondo (Maza, J y García M,1985).

C. Transporte total de fondo (G_{BT})

Según Maza, J y García, M (1985) conformado por el material de fondo el cual es transportado por el flujo del agua ya sea transporte por arrastre o por el transporte de fondo en suspensión. Por consiguiente, el transporte total de fondo se determinará con la sumatoria de:

$$G_{BT} = G_B + G_{BS}$$

D. Transporte de lavado (G_L)

Conformado por material muy fino que pasa por la malla Nº 200 que es transportado en suspensión y no se encuentra en contacto alguno con el fondo del cauce;

considerando una sección determinada, el material de lavado en su totalidad proviene de los tramos aguas arriba. El transporte por lavado se origina en el suelo de la cuenca erosionado por las gotas de lluvia, también proviene de la erosión del rio que se produce en las márgenes del mismo, depende también de la cantidad de partículas finas que la cuenca aporta al río bajo la acción de la lluvia (Maza, J y García M,1985).

E. Transporte en suspensión (G_S)

Está conformado por la totalidad de partículas que son transportadas en suspensión y viene a ser la suma del transporte de fondo en suspensión más el transporte por lavado. Se cumple así la relación:

$$G_S = G_{BS} + G_L$$

Cuando se tome una muestra de agua – sedimento, resulta conveniente separar el material que proviene del fondo del cauce y el material transportado en lavado. La manera más práctica de hacerlo consiste en tamizar la muestra por la malla Nº 200 la cual cuenta con una abertura de 0.074mm (Valor cercano a 0.0625 mm establecido como separación entre ambos materiales). Para las partículas retenidas dicha malla corresponden al material del fondo y las que pasan, y quedan en la charola, al material de lavado. (Maza, J y García M,1985).

F. Transporte total

Según Maza, J y García, M (1985), está conformado por todas las partículas que son transportadas por el río, procedan del fondo o sean de lavado. Por lo que se cumple:

$$G_T = G_L + G_{BT}$$

$$G_T = G_L + G_{BS} + G_B$$

Entonces tenemos finalmente:

$$G_T = G_S + G_B$$

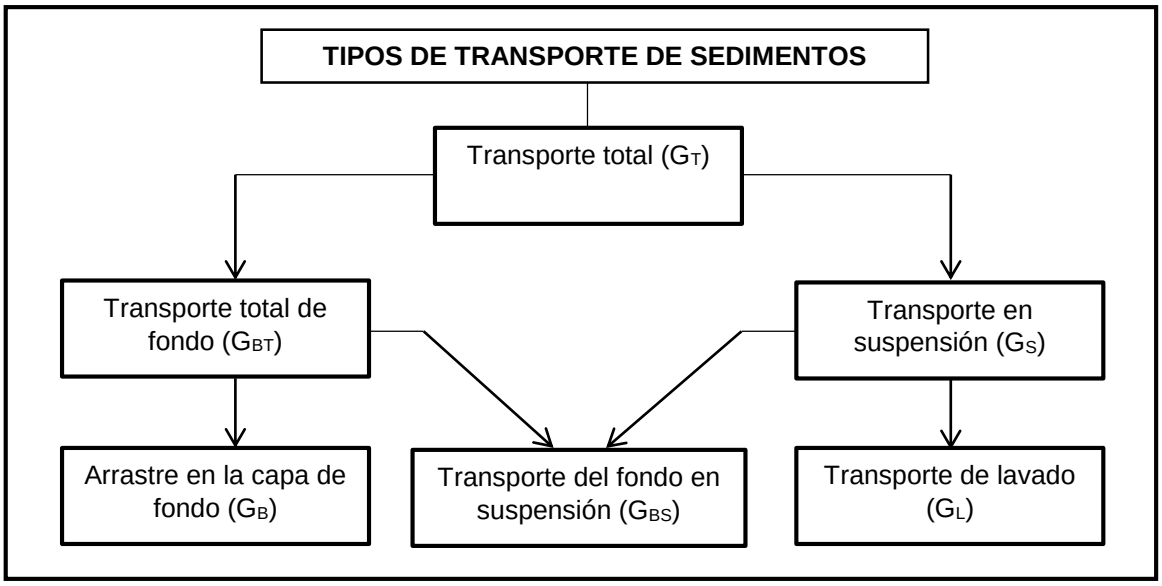


Figura 15: Organigrama de los tipos de transporte de sedimentos según Maza, J y García M. (Elaboración propia)

Tabla 3

Tabla de notación de simbología empleada en los diferentes tipos de transporte de sedimento

Notación				
Formas de Transporte	Kgf/s.m N/s.m	Kgf/s N/s	m^3/s.m	m^3/s
Arrastre en la capa de fondo	g_B	G_B	q_B	Q_B
Transporte de fondo en suspensión	g_{BS}	G_{BS}	q_{BS}	Q_{BS}
Transporte de fondo	g_{BT}	G_{BT}	q_{BT}	Q_{BT}
Transporte de lavado	g_L	G_L	q_T	Q_T
Transporte en suspensión	g_S	G_S	q_S	Q_S
Transporte total	g_T	G_T	q_T	Q_T

Nota: Notación de transporte de sedimentos. Adaptado de "Cap.10 Manual de Ingeniería de Ríos, Transporte de Sedimentos", por Maza, J & García, M, 1985, Cap 10 del Manual de Ingeniería de Ríos.

2.3.1.5. Propiedades de los Sedimentos

García, M. Maza, J. (1985). Las características principales, referente a un sedimento no cohesivo se refieren principalmente a las partículas que lo conforman, considerando estas partículas como entes aislados. Definiendo los valores de su tamaño, densidad, forma, peso específico y velocidad de caída.

A. Tamaño

García, M. Maza, J. (1985). Esta propiedad constituye una de las más importantes y cabe decir la más utilizada, ya que las partículas no definen su tamaño con una sola dimensión. Las irregularidades en su forma impiden una buena clasificación de las partículas de sedimento. Debido a ello ha sido necesario idear métodos y procedimientos de laboratorio los cuales, junto con técnicas estadísticas, sirven de ayuda para cuantificar adecuadamente las características de un sedimento, de la misma manera describir y definir dimensiones.

La partícula de sedimento define su tamaño en términos de su volumen o la velocidad de caída que presenta, o también por las dimensiones de aberturas de la malla de un tamiz o por sus dimensiones triaxiales. Todas las definiciones están influenciadas por la forma o densidad que presenta la partícula, a excepción de la definición dada en términos del volumen de la partícula. Por lo que, el tamaño de una partícula de sedimento dependerá de las dimensiones que se mida, de acuerdo a como se haya definido y del procedimiento utilizado, establecidos como: Diámetro nominal, diámetro de cribado, diámetro de sedimentación, diámetro estándar y diámetros triaxiales. García, M. Maza, J. (1985).

Diámetro nominal

$$D_{nominal} = \left[{}^{6}/_{\pi} * Vp\right]^{1/3}$$

Vp = Volumen de la partícula

García, M. Maza, J. (1985). El diámetro nominal es el menos utilizado para estudios de transporte de sedimentos. De preferencia se usa para definir el tamaño de partículas gruesas, debido a que la medición del volumen de una partícula se hace tanto más difícil y poco práctica, mientras sus dimensiones sean menores, según su tamaño y forma.

Diámetro de cribado

$$D_{cribado} = 0.90\ D_{nominal}$$

Utilizado para gravas y arenas, comúnmente usado para definir el tamaño de partículas mayores a 0.062 mm, es decir es el tamaño de la abertura del tamiz por la cual pasa justamente la partícula. García, M. Maza, J. (1985).

Diámetro de sedimentación

Corresponde al diámetro de una esfera con densidad y velocidad de caída iguales al de la partícula de que se trata, ambas al caer en el mismo líquido y a la misma temperatura. García, M. Maza, J. (1985).

Diámetro estándar

Diámetro de una esfera con una densidad relativa de 2.65 y con la misma velocidad de caída que la partícula considerada, cuando ambas caen en agua destilada a 24 °C. Los diámetros de sedimentación se emplean habitualmente para definir el tamaño de partículas muy finas, por ejemplo, limos o arcillas. Los diámetros más utilizados en la práctica son el de cribado y el de sedimentación. Para una muestra que ha sido tamizada de manera correcta, el diámetro de cribado corresponde aproximadamente a su diámetro de sedimentación. García, M. Maza, J. (1985).

Diámetros triaxiales

Una partícula de sedimento también puede definir su tamaño en función de tres dimensiones características de la misma, denotándose a continuación, en orden decreciente de magnitud, con las letras a, b, c, es decir, a > b > c, medidas en la dirección de tres ejes ortogonales entre sí, haciendo coincidir uno de ellos, por ejemplo, con la mayor dimensión de la partícula, ya que con ellas se pretende determinar el largo, ancho y espesor de la partícula. García, M. Maza, J. (1985).

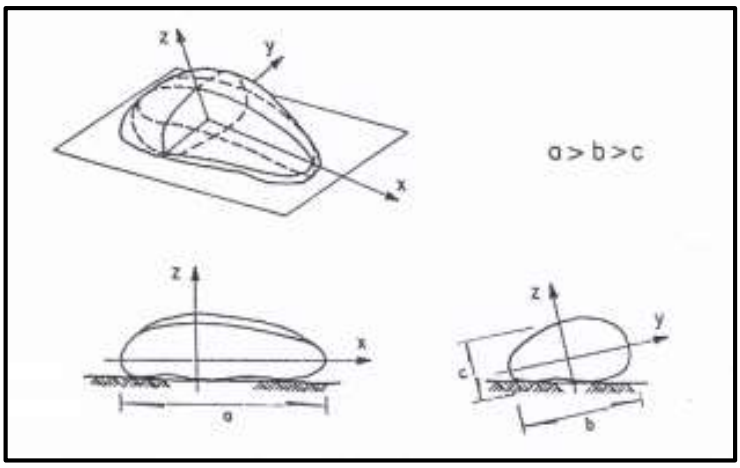


Figura 16: Esquema de las dimensiones triaxiales en una partícula. Adaptado de García, M. Maza, J. (1998). Origen y propiedades de los sedimentos.

B. Forma

García, M. Maza, J. (1985). La forma de la partícula de sedimento describe su aspecto o apariencia de la misma, independientemente de su densidad, composición mineralógica y tamaño. Esta característica es importante, porque influye en el movimiento de las partículas las cuales caen o se desplazan dentro del flujo.

C. Densidad

García, M. Maza, J. (1985). Por lo general, las partículas de sedimento no son completamente sólidas, sino que éstas poseen cierto grado de porosidad y/o relación de vacíos. Es por ello que en una partícula natural se distinguen tres fases constituyentes las cuales son: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida conformada por partículas minerales, la fase liquida por el agua y la gaseosa por el aire. Para el caso de las fases líquida y gaseosa de la partícula suelen comprenderse en el volumen de vacíos, mientras que la fase sólida constituye el volumen de sólidos.

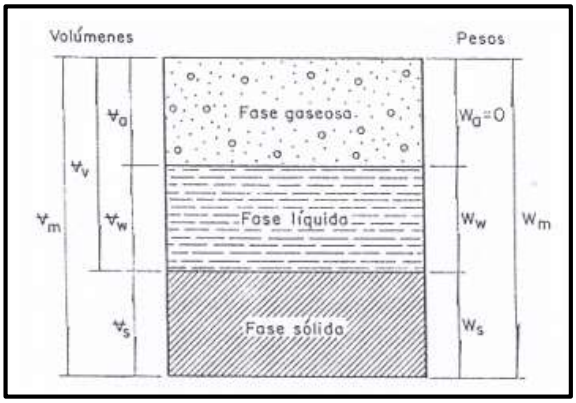


Figura 17: Esquema de la composición de una partícula sedimentaria, para la indicación de los símbolos utilizados. Adaptado de García, M. Maza, J. (1985). Origen y propiedades de los sedimentos

Para calcular la densidad de una partícula de sedimento, viene a ser la relación entre la masa y el volumen que posee.

$$\rho_S = \frac{M}{\forall}$$

ps = densidad de la partícula (kg/m^3)

M = masa de la partícula (kg)

∀ = volumen de solidos (m^3)

En la siguiente tabla se pueden apreciar los nombres y densidades relativas de algunos minerales constitutivos de partículas sedimentarias.

Tabla 4

Densidades relativas de algunos minerales constituidos de partículas sedimentarias

Mineral	Densidad
Feldespato	2.54 – 2.76
Cuarzo	2.60 – 2.70
Biotita	2.70 – 3.20
Moscovita	2.76 – 3.10
Serpentina	2.20 – 2.65
Calcita	2.72
Dolomita	2.85
Anhidrita	2.89 – 2.98
Fluorita	3.18
Limodrita	3.60 – 4.00
Granate	3.50 – 4.30
Corindón	4.02
Zircón	4.68
Hematites	5.25
Magnetita	5.00 – 5.20
Pirita	5.02
Cuprita	6.00
Casiterita	6.80 – 7.10
Galena	7.40 – 7.80

Nota: Adaptado de Origen y propiedades de los sedimentos, por García, M. Maza, J. (1998). Del Manual de Ingeniería de ríos, Capitulo 7.

D. Peso Especifico

García, M. Maza, J. (1985). El peso específico de la fase sólida de una partícula, γ_s, se define como el cociente que resulta de comparar el peso de su fase o materia sólida, con el volumen de sólidos, es decir:

$$\gamma_S = \frac{Ws}{\forall}$$

γs = peso específico de la partícula (N/m^3 o kg/s^2m^2)

Ws = peso de la partícula

∀ = volumen de solidos (m^3)

También pudiendo obtenerse directamente, conociendo el valor de su densidad:

$$\gamma_S = \rho_S * g$$

γs = peso específico de la partícula (N/m^3 o kg/s^2m^2)

ps = densidad de la partícula

g = volumen de solidos (m^3)

E. Porosidad

Se encuentra definida como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen del sedimento:

$$n = \frac{V_V}{V_S}$$

n = porosidad

Vv = Volumen de vacíos

Vs = Volumen de sedimentos

F. Velocidad de caída de la Partícula

Salinas, H. García, J. (2011). Un parámetro común de ciertos análisis cuantitativos del transporte de sedimentos es determinar la velocidad de sedimentación (velocidad de caída) de partículas en un fluido en movimiento. Son básicamente dos tipos de métodos predictivos para determinar la velocidad de caída: uno es la solución analítica de Stokes, aplicable a partículas esféricas con Reynolds de la partícula menores a la unidad, y el otro son fórmulas empíricas basadas en datos experimentales.

Norma ASTM D 422. (2007). La ley de Stokes considera la velocidad final de una partícula simple cayendo en un líquido infinito, el tamaño calculado representa el diámetro de esferas que caerían a la misma velocidad que las partículas de suelo. El análisis realizado con el hidrómetro utiliza la relación entre la velocidad de caída de esferas en un fluido, el diámetro de las esferas, el peso específico tanto de la esfera como del fluido, y la viscosidad del fluido, en la forma expresada por el físico inglés G. G. Stokes en la ecuación conocida como la ley de Stokes:

$$v = \left(\frac{2g(\gamma_s - \gamma_f)}{9n}\right)\left(\frac{D}{2}\right)^2$$

v = velocidad de caída (cm/s)

γs = peso específico de la partícula (g/cm^3)

γf = peso específico del fluido (usualmente agua)

n = viscosidad absoluta o dinámica del fluido (g/cm*s)

D = diámetro característico (cm)

g = aceleración de la gravedad 980.7 cm/s^2

Salinas, G; Stintz, M; Wessely, B. (2005). Se considera un tiempo que tiende al infinito y una partícula esférica y rígida, la ecuación anterior determina la velocidad de caída de la partícula, denominada también como velocidad de Stokes. Esta velocidad en el caso de conjuntos o colectivos de partículas se ve influenciada por la interacción que se genera entre las partículas, manifestándose mediante choques entre ellas, el arrastre producido por la turbulencia provocada por la sedimentación dentro del recipiente donde esto ocurre. Todos estos efectos, dependiendo de la concentración de material particulado de las muestras de sedimento tienden a disminuir la velocidad de sedimentación, de ahí se determina la importancia de su evaluación.

La magnitud más importante para caracterizar la sedimentación es la velocidad de caída de la partícula en el fluido inmóvil. (Martín J, 2003).

2.3.2. Ecuaciones de Transporte de Sedimentos

Iroume, A. (2003). Los contenidos de materiales en suspensión en los cauces están estrechamente relacionados con los caudales y los aportes de sedimentos arrastrados por los escurrimientos superficiales de las laderas de las cuencas generados durante los períodos de tormentas. Sin embargo, los sedimentos transportados por los cauces no sólo provienen de las erosiones en las laderas, sino que también de los procesos erosivos en la red de drenaje de las cuencas.

2.3.2.1. Ecuaciones de transporte por arrastre en la capa de fondo

Después de analizar varias fórmulas de transporte, Díaz y Maza encontraron que las fórmulas propuestas por **Shields, Pernecker y Vollmer, Einstein – Brown y Bogardi** pueden dar el transporte total de fondo y no únicamente por arrastre (Maza, J y García M, 1985).

En todas las ecuaciones presentadas a continuación, se debe tener en cuenta un parámetro adimensional de aplicación que sirve para mostrar el comportamiento de cada expresión y las diferencias más importantes entre los resultados de las ecuaciones presentadas, (Maza, J y Val, R):

$$\tau_* = \frac{Rh.S}{\Delta.D}$$

Donde:

τ_*: Número adimensional de Shields asociado a τ_0.

Cabe resaltar que cuando la sección del río es muy ancha, se cumple que B≥40d, donde el radio hidráulico es casi igual al tirante: R ≈ d, (Maza, J y García M, 1985).

Donde:

d: Tirante o profundidad de la corriente en m.

B: Ancho de la superficie libre de la corriente en m.

A. Ecuación de Meyer – Peter y Müler

Basile, P. (2000). Esta ecuación corresponde a la relación empírica basada en el exceso de la tensión de corte adimensional. La cual ha sido verificada mediante valores experimentales usando sedimentos con diámetros comprendidos entre 0.4 mm y 28.65 mm; uniformes y heterogéneos.

Maza, J y García, M (1985) mencionan que las ecuaciones de Meyer-Peter y Müller para la determinación del arrastre en la capa de fondo fueron obtenidas a partir de experiencias realizadas de 1932 a 1948 en el Instituto Tecnológico Federal de Zurich. En 1948 fue presentado un resumen de todas ellas. Para obtener la fórmula general de Meyer – Peter y Müller se efectuaron primero cuatro series al final de las cuáles propusieron una fórmula para cada serie siendo la última de carácter

general. Dichos experimentos se hicieron para material granular con las siguientes características:

- Partículas con diámetro uniforme con peso específico de 2680 Kgf/m^3.
- Partículas de diámetro uniforme, pero usando en cada experimento uno de tres materiales con peso específico diferente.
- Partículas de diferentes tamaños, es decir, granulometrías más o menos graduadas con peso específico de 2680 Kgf/m^3.
- Igual que el ítem anterior, pero realizando también pruebas para otros dos materiales con pesos específicos diferentes.

Se utiliza esta fórmula con D = Dm y se emplea para cualquier $\boldsymbol{\tau_*}$,(Maza, A y Val R).

$$\boldsymbol{g_B = 8\gamma_s g^{1/2}\Delta^{1/2}D_m{}^{3/2}\left[\left(\frac{n'}{n}\right)^{3/2}\tau * -0.047\right]^{3/2}}$$

Dónde:

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \qquad \tau * = \frac{Rh.S}{\Delta.D} \qquad n' = \frac{(D_{90})^{1/6}}{26}$$

Si se cumple la condición que $\tau *$>1, el arrastre en la capa de fondo resulta independiente del tamaño de las partículas, simplificándose a la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{g_B = \frac{8\gamma_s g^{1/2}(R.S)^{3/2}}{\Delta}\left(\frac{n'}{n}\right)^{9/4}}$$

g_B: Arrastre de partículas en la capa de fondo en Kgf/m.s.

γ_s : Peso específico del sedimento (kgf/m^3).

γ: Peso específico del agua (kgf/m^3).

g: Aceleración de la gravedad expresada en m/s^2.

Δ : Densidad relativa de las partículas sumergidas.

Dm: Diámetro medio de las partículas (m).

n’: rugosidad debida a las partículas, obtenida con la fórmula de M. - P. y Müller.

n: rugosidad total del cauce. Se obtiene de la fórmula de Manning.

τ_*: Número adimensional de Shields asociado a τ_0.

D_{90}: Tamaño del sedimento, donde el 90% del material es menor a d_{90}.

R: Radio hidráulico (m).

S: Pendiente hidráulica del río.

Rangos y límites de aplicación

Maza, J y García, M (1985), de acuerdo con los ensayos realizados por Meyer – Peter y Müller, los parámetros se hicieron variar entre los siguientes valores:

Tabla 5

Valores ensayados para los parámetros estudiados según Meyer – Peter y Müller

Valores ensayados para los parámetros estudiados		
Parámetros	Mínimo	Máximo
Tamaño de las partículas (D y Dm) uniformes y no uniformes en m.	0.0004	0.030
Pesos específicos en Kgf/m^3	1250	4200
Pendientes	0.0004	0.020
Tirantes (m)	0.01	1.20m
Gastos líquidos, en m^3/s	0.002	4.0
Sección del canal en m	2.0m x 2.0m	
Longitud del canal en m	50.0m	

Nota: Valores ensayados para los parámetros estudiados según *Meyer – Peter y Müller.* Adaptado de “Cap.10 Manual de Ingeniería de Ríos, por Maza, J & García, M, 1985, Cap 10 del Manual de Ingeniería de Ríos.

La ecuación de carácter general planteada es recomendable para cauces arenosos con diámetros mayor de 0.0002 m, hasta grava gruesa con diámetros ≤ de 0.030m, según Maza, J y García, M (1985).

B. Ecuación de Duboys y Straub

Vásquez, D. (2012). Duboys propuso en 1879 el primer modelo histórico a cerca del transporte de fondo. Basándose en ideas como: para iniciar el movimiento de las partículas del lecho de un río es necesario que el esfuerzo de cortante basal

alcance y supere un valor crítico. Luego de iniciado el movimiento, para Duboys el transporte de sedimento es simplemente por el deslizamiento de sucesivas capas de sedimento, con espesor del orden del diámetro de las partículas, unas sobre otras. La velocidad de deslizamiento de las partículas decrece o disminuyen con la profundidad hasta ser totalmente nulas.

Se utiliza esta fórmula con D = D_{50} y se utiliza si $\boldsymbol{\tau_*}$ ≤ 1.30, (Maza, A y Val R).

$$\boldsymbol{g_B = 0.01003(\gamma_s - \gamma)^2 D^{1.25} \tau_* (\tau_* - \tau_{*c})}$$

Si se cumple la condición τ_*>20$\tau_* c$, utilizar la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{g_B = 0.01003(\gamma_s - \gamma)^2 D^{1.25} \tau_*}$$

$$\tau *_C = \frac{\tau c}{(\gamma s - \gamma) D_{50}}$$

$$\tau_C = 41.8 D^{0.82} - 0.017 Ln(454D)$$

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$$

Dónde:

g_B: Arrastre unitario en la capa de fondo expresado en Kgf/m.s

γ_s: Peso específico del sedimento expresado en Kgf/m^3.

γ: Peso específico del agua expresado en Kgf/m^3.

D: Diámetro representativo de la partícula expresado en m, empleando D_{50}.

τ_*: Número adimensional de Shields asociado a τ_0.

τ_{*c}: Número adimensional de Shields.

τ_C: Esfuerzo cortante critico

g: Aceleración de la gravedad en m/s^2.

Δ : Densidad relativa de las partículas sumergidas.

ν: Viscosidad cinemática del agua en m^2/s en función de la temperatura.

C. Ecuacion de Schoklistch

Vásquez, D. (2012). Schoklistch utiliza para el desplazamiento matemático de su ecuación caudales unitarios y no esfuerzos de corte. La ecuación que propuso es

una versión corregida de una ecuación anterior del mismo autor basado en sus experimentos con arenas uniformes con diámetros de 1 – 2 mm, y en los datos también experimentales, sobre arenas y gravas 0.305, 0.788 y 4.94 mm.

Se utiliza esta fórmula con D= D_{40} y se utiliza para cualquier $\boldsymbol{\tau}_*$ (Maza, A y Val R).

$$T_F = 2500S^{1/3}\left[qS^{7/6} - 2.351x10^{-5}\Delta^{5/3}D^{7/18}\right] \qquad (Kg/s - m)$$

$$S_F = \frac{2500}{\gamma_s}S^{1/3}\left[qS^{7/6} - 2.351x10^{-5}\Delta^{5/3}D^{7/18}\right] \qquad (m^3/s - m)$$

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$$

Dónde:

T_F : Transporte unitario de lecho en el fondo o carga de fondo expresado en peso.

S_F : Transporte unitario de lecho en el fondo o carga de fondo expresado en volumen.

S: pendiente hidráulica del río.

q: Caudal unitario líquido del río expresado en m^3/m.s igual a Q/B.

Q: Gasto líquido del río expresado en m^3/s.

B: Ancho de la superficie libre de la corriente en m.

Δ : Densidad relativa de las partículas sumergidas.

D: diámetro representativo D_{40} expresado en m.

γ_s : Peso específico del sedimento.

γ: Peso específico del agua.

D. Ecuacion de Levi (1948)

Maza, J y García, M (1985), para esta ecuación se emplean los valores de la velocidad crítica y velocidad media de la corriente; para lo cual Levi propuso la siguiente ecuación para determinar el gasto sólido del material.

$$\boldsymbol{g_B = \frac{0.002\gamma s.U^3(U - Uc)}{g^{3/2}(d.Dm)^{1/4}}}$$

Para determinar la velocidad crítica del flujo se emplea la siguiente ecuación teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

$$\frac{d}{Dm} \geq 60 \qquad Uc = 1.4\sqrt{g.Dm}\left(\frac{Dmax}{Dm}\right)^{1/7} Ln\left[\frac{d}{7.Dm}\right]$$

$$\frac{d}{Dm} < 60 \qquad Uc = 1.4\sqrt{g.Dm}\left(\frac{Dmax}{Dm}\right)^{1/7}\left[1 + Ln\sqrt{\frac{d}{7.Dm}}\right]$$

$$Dmax = D_m.1.276^{3.0923}$$

Donde:

gB: Arrastre de partículas en la capa de fondo en Kgf/m.s.

γ_s: Peso específico del sedimento en (kgf/m^3).

g: Aceleración de la gravedad en m/s^2.

d: Tirante promedio de la sección de río (m).

Dm: Diámetro medio de las partículas (m).

Dmax: Diámetro máximo de las partículas (m).

U: Velocidad media del escurrimiento (m/s).

Uc: Velocidad crítica del escurrimiento (m/s).

Rango de los datos y límites de aplicación

La ecuación propuesta es ideal para sedimentos arenosos, recordando que a su vez es el material que más abunda en el cauce natural de los ríos. (Maza, J y García, M; 1985).

E. Ecuacion de Yalin (1963)

Según Maza, J y García, M (1985), Yalin publicó su fórmula para cuantificar el arrastre en la capa de fondo el cual consideró que la relación de transporte está dada por la expresión:

$$g_B = W_B U_B$$

Donde:

W_B : Es el peso total de las partículas del fondo transportadas por unidad de área.

U_B: Velocidad con que las partículas son movidas por el flujo.

Según Maza, J y García, M (1985), Yalin desarrolló una expresión para evaluar la velocidad U_B del grano transportado, efectuando el balance de las fuerzas que actúan contra la partícula. U_B es igual a la velocidad promedio de las partículas cuando efectúan un salto promedio, de lo que obtuvo la siguiente ecuación, donde C_1 es una constante adimensional:

$$\frac{U_B}{U_*} = C_1\left(1 - \frac{1}{a_y s_y} Ln\left(1 + a_y s_y\right)\right)$$

Para el peso total de las partículas del fondo transportadas por unidad de área W_B, y con C_2 siendo una constante adimensional, Yalin dedujo que (Maza, J y García, M; 1985):

$$W_B = C_2 s_y D(\gamma_s - \gamma)$$

Maza, J y García, M (1985), al sustituir las ecuaciones de U_B / U_* y W_B donde las constantes C_1 y C_2 fueron analizadas por Yalin resultando 0.635, se obtiene g_B:

$$g_B = 0.635 s_y D U_*(\gamma_s - \gamma)\left[1 - \frac{1}{a_y s_y} Ln\left(1 + a_y s_y\right)\right]$$

Se utiliza esta fórmula con D= Dm y se emplea para cualquier $\boldsymbol{\tau}_*$, donde tenemos que (Maza, A y Val R):

$$a_y = 2.5\tau_{*c}\left(\frac{\gamma}{\gamma_s}\right)^{0.4}$$

$$S_y = \frac{\tau * - \tau *_C}{\tau *_C}$$

$$U_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho}\right)^{1/2} = \sqrt{g.Rh.S}$$

Donde:

g_B: Arrastre de partículas en la capa de fondo en Kgf/m.s.

s_y: Número adimensional de Shields.

D: Dm, diámetro medio de las partículas (m).

U_*: Velocidad al cortante del flujo, en m/s.

γ_s : Peso específico del sedimento (kgf/m³).

γ: Peso específico del agua (kgf/m³).

a_y: Fórmula adimensional empleada según Yalin.

τ_{*c}: Número adimensional de Shields.

Rangos y límites de aplicación

Se emplea esta fórmula para valores de un diámetro medio de 0.000787 m – 0.00286m. La fórmula se emplea para materiales bien graduados en la cual la desviación estándar geométrica σ_g de la muestra sea mayor que 3 (Maza, J y García, M; 1985).

2.3.2.2. Ecuaciones de transporte por suspensión.

Las ecuaciones para estimar el transporte total de sedimentos por suspensión, como lo señalaron Maza, J y García, M (1985) se subdivide en dos componentes: Transporte de sedimentos de fondo en suspensión (G_{BS}) y transporte de lavado (G_L), cuya sumatoria representa el transporte total de sedimentos en suspensión que transcurren por un río.

Un parámetro importante para estimar el transporte de sedimentos por suspensión es conocer la distribución de concentración de sedimentos dentro de una vertical:

Distribución de concentraciones

Según Maza, J y García, M (1985), se tiene una lista de diferentes autores que han investigado a lo largo de los años la distribución de concentración de partículas en una vertical; entre ellos tenemos a Rouse; Lane y Kalinske; Einstein y Chien; Hunt; Velikanov; Chang, Simons y Richardson; entre otros (p.265).

Maza, J y García, M (1985), para conocer la distribución de concentraciones de las partículas en suspensión se debe obtener en primer lugar la concentración de sedimentos por lavado (Ca_L) y la concentración de sedimentos de fondo en suspensión (Ca_{BS}), siendo la concentración total de la muestra la sumatoria de ambos (p.266):

$$Ca = Ca_L + Ca_{BS}$$

Maza, J y García, M (1985), al extraer una muestra de agua con sedimentos, una vez seca la muestra se debe tamizar por la malla 200, el material retenido en esta malla se entenderá que proviene del fondo mientras que el material que pasó la malla conformará el material de lavado; el peso de cada uno de ellos comprende la concentración Ca_{BS} y Ca_L respectivamente. (p.267)

Es importante señalar que, para obtener la distribución granulométrica, cuando la muestra retenida en la malla 200 es mayor que 100 gr, se puede obtener dicha distribución mediante tamizado, en cambio si el peso de la muestra retenida en la malla 200 no supera los 100 gr, se obtendrá la distribución granulométrica obteniendo primero la velocidad de caída de las partículas y a partir de ello el diámetro representativo. (Maza, J y García, M; 1985, p.266)

Fórmula propuesta por Rouse para obtener la concentración de sedimentos (1937)

Maza, J y García, M (1985) señalan que la ecuación propuesta por Rouse permite obtener la concentración de sedimentos a cualquier distancia ***y*** medida desde el fondo del río a partir de una concentración conocida Ca ubicada a una distancia "***a"*** desde el fondo. La fórmula no es correcta cuando ***y=d*** y ***y=0***, donde ***"d"*** es el tirante medio del cauce y ***"0"*** el nivel de fondo del río, ya que según la ecuación planteada la concentración en estos puntos sería C=0, lo cual no es correcto; sin embargo, por estas razones la fórmula no pierde utilidad. (p. 277)

$$C = Ca\left[\left(\frac{d-y}{y}\right)\left(\frac{a}{d-a}\right)\right]^{\omega/kU_*}$$

C: Concentración de sedimentos de lavado o de fondo en suspensión medida a una distancia "y", en Kg.f/m^3.

Ca: Concentración de partículas de lavado o de fondo en suspensión (Ca_L, Ca_{BS}) medida a una distancia "a" del lecho del río, ppm.

d: Profundidad del flujo expresado en m.

y: Distancia medida desde el fondo del lecho a la cual se desea valuar C.

a: Distancia vertical desde el fondo del lecho para conocer Ca.

ω: Velocidad de caída de la partícula en m/s.

k: Constante de Von-Karman equivalente a 0.4.

U_*: Velocidad al cortante del flujo, en m/s.

$$U_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho}\right)^{1/2} = \sqrt{g.Rh.S}$$

g: Aceleración de la gravedad expresada en m/s^2.

Rh: Radio hidráulico (m).

S: Pendiente hidráulica del río.

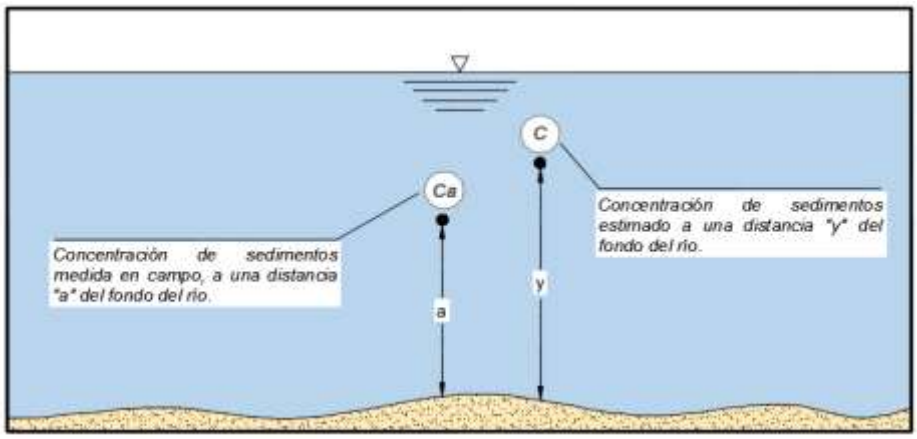


Figura 18: Esquema de concentración de sedimentos propuesto por Rouse, Elaboración propia

2.3.2.3. Ecuaciones para transporte de fondo en suspensión.

Maza, J y García, M (1985), el transporte de sedimentos por suspensión se obtiene a una distancia "y" desde el fondo del lecho (p. 353 y 354).

A. Ecuación de Brooks (1963)

Según Maza, J y García, M (1985), Brooks propuso su fórmula para determinar g_{BS} de manera similar a la fórmula de Einstein en 1950, sin embargo, la fórmula de Brooks resulta más sencilla de aplicar, la cual determina el transporte de fondo en suspensión en toda la vertical, en unidad de ancho y tiempo, donde (p.371):

$$\boldsymbol{g_{BS} = q.C_{d/2}\left[J_1 + \frac{U_*}{kU}(J_1 + J_2)\right]}$$

q: Caudal unitario líquido, también expresado como Ud.

$C_{d/2}$: Concentración a la mitad del tirante expresada en kg.f/m^3

U_*: Velocidad al cortante del flujo, en m/s.

k: Constante de Von-karman equivalente a 0.4.

U: Velocidad media del flujo calculado mediante:

Régimen Inferior

$$U = 7.58we\left(\frac{d}{D_{84}}\right)^{0.634}\left(\frac{S}{\Delta}\right)^{0.456} ; \frac{1}{S} \geq 83.5\left(\frac{d}{\Delta D_{84}}\right)^{0.35}$$

Régimen Superior

$$U = 6.25we\left(\frac{d}{D_{84}}\right)^{0.644}\left(\frac{S}{\Delta}\right)^{0.352} ; \frac{1}{S} \geq 83.5\left(\frac{d}{\Delta D_{84}}\right)^{0.382}$$

k_s: Altura de la rugosidad del fondo, Einstein establece que $k_s = D_{65}$.

D: Profundidad del flujo expresado en m.

$J_1\ y\ J_2$: Integrales de Brooks en función de z y n_o ($z = \frac{2.5\omega}{U_*}\ y\ n_o = y_0/d$).

$$J_1 = \int_{n_0}^{1}\left(\frac{1-E}{E}\right)^{z} dE$$

$$J_2 = \int_{n_0}^{1}\left(\frac{1-E}{E}\right)^{z} LnEdE$$

El transporte de sedimentos de fondo en suspensión también puede ser hallado mediante la figura 19, en función de $z = \frac{2.5\omega}{U_*}$ y $\kappa U/U_*$:

$$\frac{g_{BS}}{q\,C_{d/2}} = f\left(z, \frac{\kappa U}{U_*}\right)$$

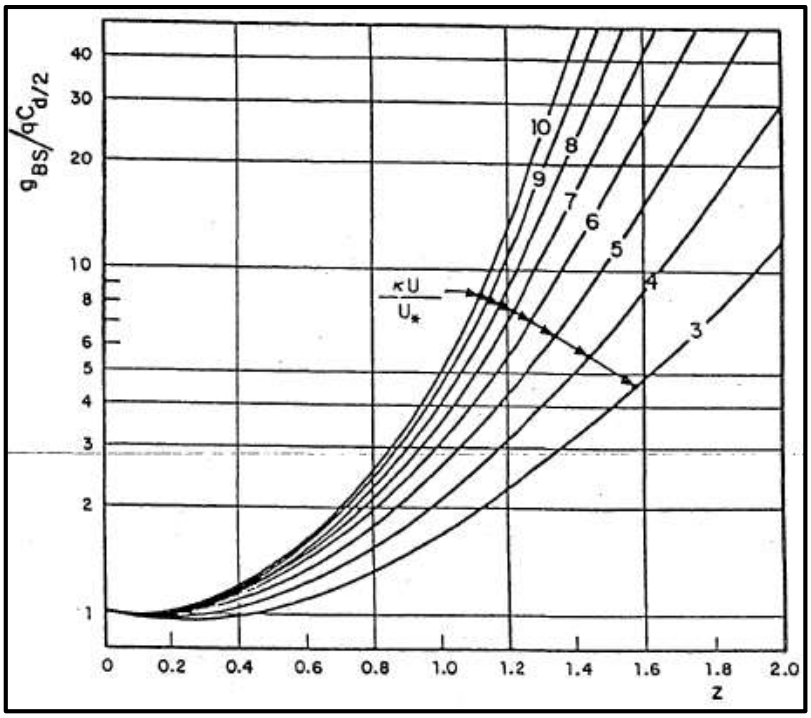


Figura 19: Parámetro $\frac{g_{BS}}{q\,C_{d/2}}$ en función de $\frac{\kappa U}{U_*}$ y z según Brooks. Adaptado de "Transporte de sedimentos ", por Maza, J y García M. (1985), del manual de Ingeniería de Ríos, Capítulo 10.

B. Ecuación de Chang, Simons y Richardson

Según Maza, J y García, M (1985), Chang, Simons y Richardson proponen una ecuación basada en la concentración "Ca" hallada a partir del arrastre y espesor de la capa de fondo, los autores muestran la relación para calcular Ca en el límite superior de la capa fondo, como se muestra:

$$Ca = \frac{g_B}{0.8\,a_b U}$$

Al sustituir Ca en la ecuación:

$$g_{BS} = d\,C_a\left(UI_3 - \frac{2U_*}{\kappa}I_4\right)$$

Se obtiene finalmente:

$$\boldsymbol{g_{BS} = g_B\frac{d}{0.8a_bU}\left(UI_3 - \frac{2U_*}{\kappa}I_4\right)}$$

Donde:

g_B: Arrastre de partículas en la capa de fondo en Kgf/m.s.

d: Tirante medio del cauce expresado en m.

U: Velocidad media de cauce expresado en m/s.

U_*: Velocidad al cortante del flujo, en m/s.

a_b: Espesor de la capa de fondo.

k: Coeficiente de Von - Karman, k = 0.22

I_3 e I_4: Integrales propuestas por Chang, Simons y Richardson, pueden ser halladas mediante las figuras 20 y 21 en función de los parámetros adimensionales A y z_2.

Espesor de la capa de fondo

Según Maza, J y García, M (1985), el espesor de la capa de fondo que proponen Chang, Simons y Richardson, arriba de la cual se presenta el transporte en suspensión equivale a:

$$a_b = \frac{10\ De(\tau_0 - \tau_c)}{\tau_c}$$

Donde:

τ_0: Esfuerzo cortante que el flujo sobre el fondo, en kg.f/m^2.

τ_c: Esfuerzo cortante crítico, en kg.f/m^2, se recomienda emplear la fórmula de Straub.

De: Diámetro representativo de la muestra.

Fórmula para De:

$$D_e = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} {D_i}^3 \omega_i}{N\omega_e}\right]^{1/3}$$

$$De = \sqrt{0.35Dm}$$

Di: Diámetro de las partículas en que ***i*** es de la muestra, dado en peso, es menor que ese tamaño.

Dm: Diámetro medio de la partícula.

ω_i: Velocidad de caída de cada diámetro medio de las fracciones en que se haya dividido la muestra de sedimentos, obtenida con la ecuación de Rubey.

N: Número de fracciones en que se divide la muestra.

ω_e: Velocidad de caída equivalente, o velocidad de caída del diámetro representativo De, para lo cual se tiene.

$$we = F1\sqrt{g.\Delta.De}$$

Fórmula para τ_0:

$$\tau_0 = \rho.g.Rh.S$$

Fórmula para τ_c:

$$\tau_C = (\gamma s - \gamma)Dm\left[\frac{0.2196}{D*} + 0.077exp\left[-\left(\frac{30.35}{D*}\right)\right]^{0.563}\right]$$

$$D_* = D[g\Delta/v^2]^{1/3}$$

Obtención de integrales $I_3 + I_4$

Tenemos para:

$$I_{3=} A_1 \int_A^1 \left(\frac{\sqrt{E}}{1-\sqrt{1-E}}\right)^{z_2} dE$$

$$I_{4=} A_1 \int_A^1 \left(\frac{\sqrt{E}}{1-\sqrt{1-E}}\right)^{z_2} \left[\left(Ln\left(\frac{\sqrt{E}}{1-\sqrt{1-E}}\right) - \sqrt{1-E} - \frac{1}{3}\right)\right] dE$$

Siendo A = a_b/d y E = y/d.

Los valores de las integrales I_3 e I_4 pueden obtenerse con ayuda de las figuras 20 y 21 en función de A y z_2 mostradas a continuación:

$$z_2 = \frac{\omega_e}{0.75\kappa U_*}$$

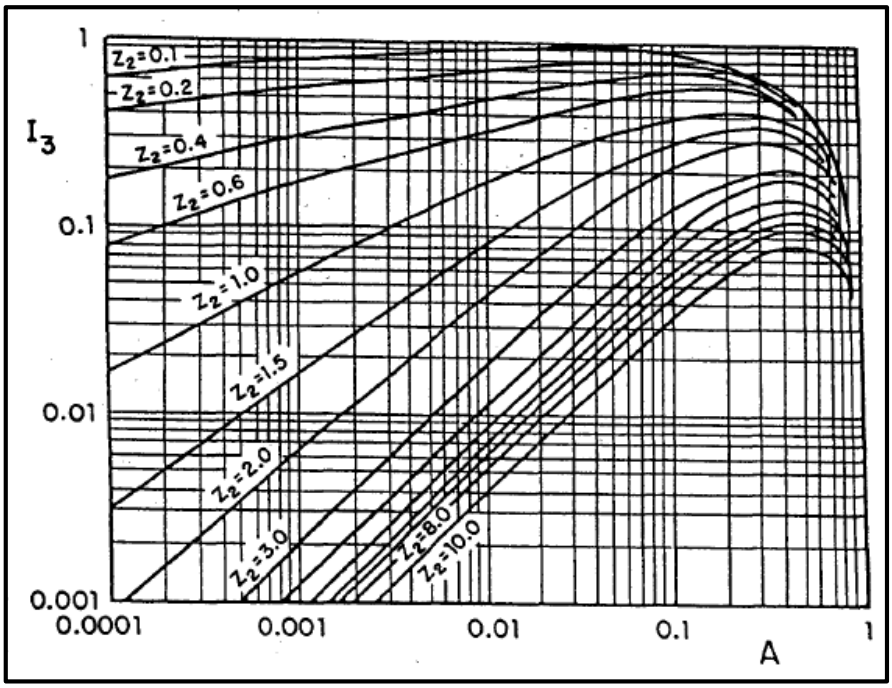


Figura 20: Valores de I_3 en función de A y z_2 según Chang, Simons y Richardson en 1967. Adaptado de "Transporte de sedimentos", por Maza, J y García M. (1985) del Manual de Ingeniería de Ríos, Capítulo 10.

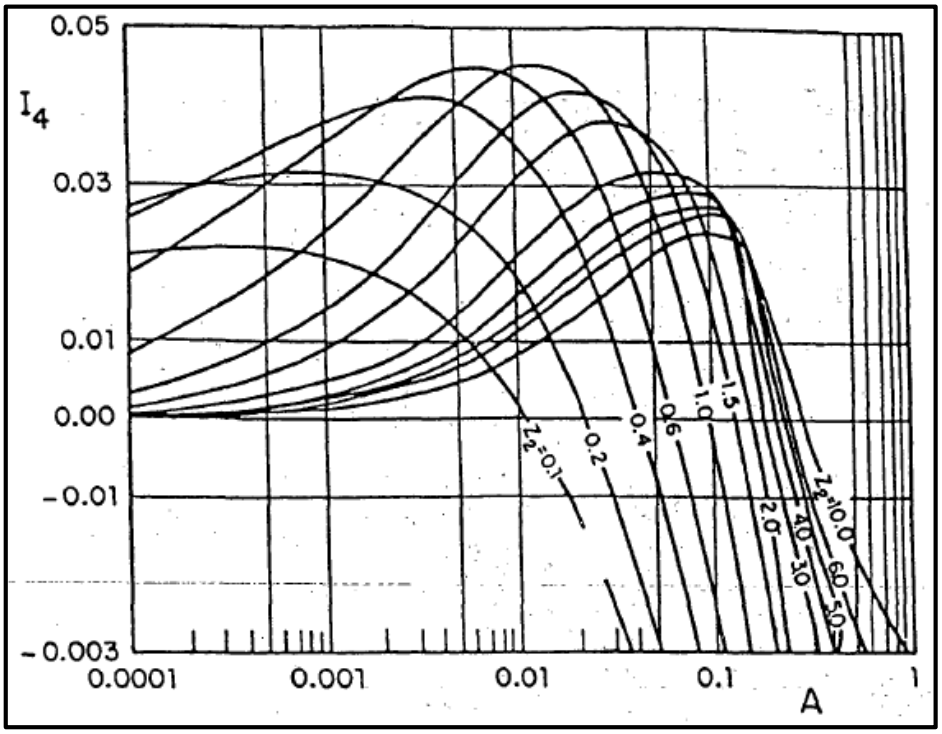


Figura 21: Valores de I_4 en función de A y z_2 según Chang, Simons y Richardson en 1967. Adaptado de "Transporte de sedimentos", por Maza, J y García M. (1985) del Manual de Ingeniería de Ríos, Capítulo 10.

C. Ecuación de Bagnold

Bagnold presenta su fórmula en 1966 para obtener el transporte de fondo en canales, el método inicialmente es complejo en su parte teórica, sin embargo, resulta fácil de aplicar y aporta buenos resultados cuando el material del lecho se encuentra mal graduado (Maza, J y García, M; 1985, p.426).

$$\boldsymbol{g_{BS} = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma}\right)\frac{0.01}{\left(\frac{\omega_e}{U} - tan\beta\right)}\tau_0 U}$$

γ_s : Peso específico del sedimento (kgf/m³).

γ: Peso específico del agua (kgf/m³).

U: Velocidad media de la corriente expresada en m/s.

τ_0: Esfuerzo cortante que el flujo sobre el fondo, en kg.f/m^2.

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

ω_e: Velocidad de caída equivalente, o velocidad de caída del diámetro representativo De, para lo cual se tiene.

$$we = F1\sqrt{g.\Delta.De}$$

Bagnold expresa que la velocidad de caída equivalente ω_e debe ser representaiva del conjunto de ellas. Cuando el sedimento está mal graduado, es decir que es casi uniforme, ω_e = ω_{50}, si el sedimento está muy bien graduado se obtendrá $\omega_e = \sum_{i=1}^{N} p_i\omega_i$ (Maza, J y García, M; 1985, p.428).

2.3.2.4. Ecuaciones de transporte de sedimentos por lavado (GL)

Se emplean dos métodos para cuantificar el transporte de lavado en un río, el primer método es utilizado cuando la muestra es pequeña y no es posible conocer su distribución granulométrica, el segundo método en cambio, consiste en emplear las fórmulas propuestas para el transporte de fondo en suspensión, cambiando Ca_{BS} por Ca_L (Maza, J y García, M; 1985, p.17)

Primer método:

$$g_L = C_L.q$$

Donde:

g_L: Transporte de lavado expresado en kgf /m.s.

C_L: Concentración de sedimentos de lavado en kg.f/m^3.

q: Gasto líquido unitario igual a Q/B donde B es el ancho de la superficie libre; expresado en m^3/s.m.

Segundo método:

A. Método de Brooks (1963)

$$g_L = q.C_{d/2}\left[J_1 + \frac{U_*}{kU}(J_1 + J_2)\right]$$

q: Caudal unitario líquido, también expresado como Ud.

$C_{d/2}$: Concentración de lavado a la mitad del tirante expresada en kg.f/m^3

U_*: Velocidad al cortante del flujo, en m/s.

k: Constante de Von - karman equivalente a 0.4.

U: Velocidad media del flujo calculado mediante:

Régimen Inferior

$$U = 7.58we\left(\frac{d}{D_{84}}\right)^{0.634}\left(\frac{S}{\Delta}\right)^{0.456};\ \frac{1}{S} \geq 83.5\left(\frac{d}{\Delta D_{84}}\right)^{0.35}$$

Régimen Superior

$$U = 6.25we\left(\frac{d}{D_{84}}\right)^{0.644}\left(\frac{S}{\Delta}\right)^{0.352};\ \frac{1}{S} \geq 83.5\left(\frac{d}{\Delta D_{84}}\right)^{0.382}$$

k_s: Altura de la rugosidad del fondo, Einstein establece que $k_s = D_{65}$.

D: Profundidad del flujo expresado en m.

$J_1\ y\ J_2$: Integrales de Brooks en función de z y n_o ($z = \frac{2.5\omega}{U_*}\ y\ n_o = y_0/d$).

$$J_1 = \int_{n_0}^{1}\left(\frac{1-E}{E}\right)^{z} dE$$

$$J_2 = \int_{n_0}^{1} \left(\frac{1-E}{E}\right)^{z} LnEdE$$

El transporte de sedimentos de fondo en suspensión también puede ser hallado mediante la figura 19 mostrada anteriormente, en función de $z = \frac{2.5\omega}{U_*}$ y $\kappa U/U_*$:

$$\frac{g_L}{q\ C_{d/2}} = f\left(z, \frac{\kappa U}{U_*}\right)$$

Maza, J y García, M (1985), las fórmulas presentadas son válidas para material con diámetro uniforme, cuando se desee aplicar hacia un material con una granulometría definida, se debe dividir la curva granulométrica en fracciones y se realizará el proceso para cada uno de ellos (p.375).

$$\frac{g_{Li}}{p_i q\ C_{d/2}} = f\left(z_i, \frac{\kappa U}{U_*}\right)$$

2.3.3. Estimación del transporte de sedimentos.

La cuantificación de sedimento calculada en campo, con la cual se realiza una comparación con las ecuaciones ya mencionadas anteriormente, se determina mediante la siguiente ecuación, y sus unidades serán kg/s-m.

$$G = \gamma_s * \frac{Q}{B}\left(\frac{kg}{s-m}\right)$$

G: Gasto sólido transportado en unidades de peso.

γ_s : Peso específico del sedimento (kgf/m³).

Q: Gasto sólido del río expresado en m^3/s.

B: Ancho de la superficie libre de la corriente en m.

La cuantificación del transporte de sedimentos en un río puede realizarse mediante dos formas: Por medición directa y por medio de ecuaciones propuestas por diferentes investigadores.

A. Muestreadores tipo cesta o canasta

Brea, J. Balocchi, F. (2010). Estos tipos de muestreadores contienen un recipiente permeable en el cual captan el material arrastrado, una vez que el muestreador

entra en contacto con el fondo, acciona una compuerta, que al izarse el equipo la compuerta se cierra una vez registrado el tiempo de duración de muestreo. El agua y el material sólido, al pasar por la entrada del muestreador, reducen su velocidad, lo que ayuda a que el material quede depositado en el interior del muestreador. El muestreador tipo cesta presenta una resistencia al flujo, así como un incremento en la entrada y una reducción en su velocidad. También son conocidos como muestreadores de presión diferencial.

Los muestreadores típicos, también denominados, muestreador de Muhlhofer, el diseño elaborado en Austria por Muhlhofer para realizar mediciones del transporte por arrastre de la capa de fondo en ríos; el equipo cuenta con una eficiencia del 40 al 60%. También existe el muestrador de Arnhem, diseñado en Holanda, en el laboratorio del Delft (1968), recomendable para arenas y gravas. Otro tipo de muestreador desarrollado por Vinckers (1953) en Holanda, denominado como muestrador Sphinx. La eficiencia de estos dos últimos muestreadores, según Novak (1969) es alta, y en ciertos casos llega a tener una eficiencia del 100%. Brea, J. Balocchi, F. (2010).

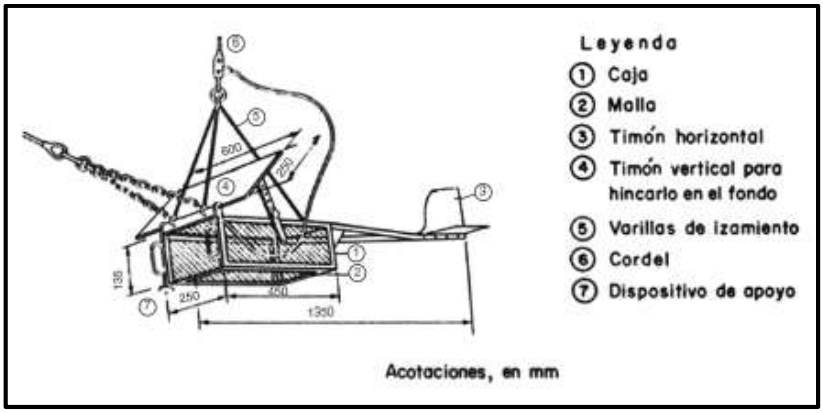
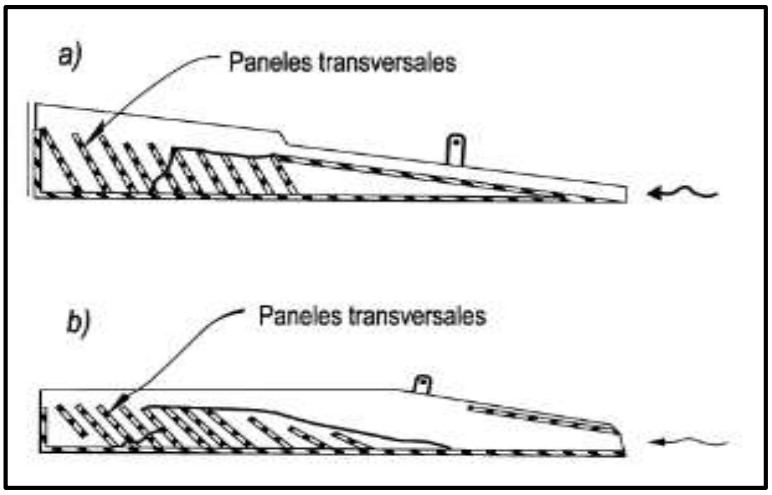


Figura 22: Muestreador australiano Muhlhofer. Adaptado de José Daniel Brea y Francisco Balocchi – UNESCO 2010 (Pag 84).

B. Muestreadores de paneles.

Brea, J. Balocchi, F. (2010). Los muestreadores de paneles, utilizados en Rusia, presentan longitudinalmente una sección en forma de cuña, colocándose en el fondo del cauce, exponiendo al flujo el área menor respecto a la cuña, consiguiendo con ello una menor resistencia al mismo. Durante su operación, por ejemplo, para el caso del muestreador Polyakov, el material que penetra al moverse por la parte

superior del mismo va llenando los paneles por el peso propio del material. Este tipo de muestreador es ideal para flujos con velocidades bajas y poco arrastre, debido a la obstrucción provocada al flujo. Para usarlo este equipo deberá estar totalmente calibrado.



Φιγυρα 23: Μυεστρεαδορ Πολψακοτ, δε δε φονδο ψ δε πανελεσ. Αδαπταδο δε θοσ Δανιελ Βρ εα ψ Φρανχισχο Βαλοχχηι ΥΝΕΣΧΟ 2010 (Π⟨γ.86).

C. Muestreadores de foso o cárcava

Brea, J. Balocchi, F. (2010). Es un muestreador semi-portátil. En ciertas ocasiones es conveniente realizar extracciones de muestras de manera continua, siendo conveniente construir un foso o cárcava encargado de captar y acumular el material transportado por la corriente, y posteriormente extraerlo mediante algún mecanismo (por ejemplo, con un equipo de bombeo) para cuantificarlo en el tiempo.

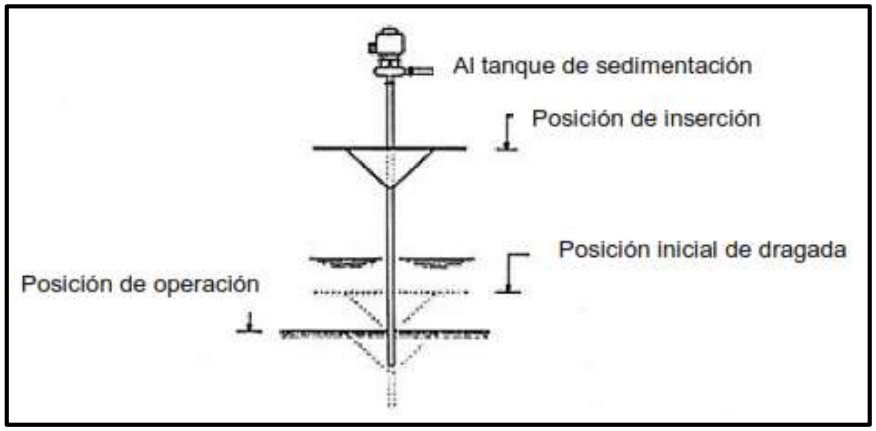


Figura 24: Muestreador de tipo portátil de foso o cárcava. Adaptado de José Daniel Brea y Francisco Balocchi UNESCO 2010 (Pag 87).

D. Muestreadores de la serie US BM

Brea, J. Balocchi, F. (2010). Desarrollados por la Interagency Committee on Water Resources son del tipo US BM, permiten recepcionar el material dos pulgadas por arriba del lecho sin tener pérdidas del material fino.

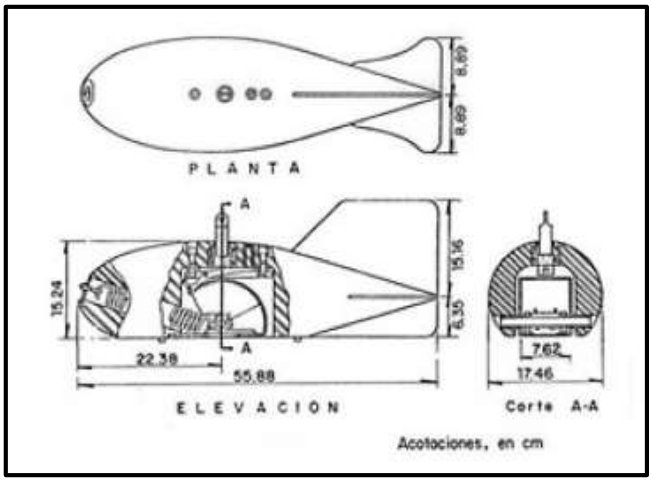


Figura 25: Muestreador de la serie USBM – 54, planta y cortes. Adaptado de José Daniel Brea y Francisco Balocchi UNESCO 2010 (Pag 87).

E. Muestreador Helley Smith

El muestreador Helley – Smith (Emmett, 1979) es recomendable para lechos con presencia de gravas y arenas. Este muestreador cuenta con una boquilla de sección rectangular de la cual emerge una bolsa permeable encargada de captar el material. El pórtico que asegura el muestreador contiene un dispositivo (aleta) dándole forma aerodinámica y permitiéndole alinearse a la corriente. Tanto la boquilla como la malla que conforma la bolsa difieren en dimensión para lechos de grava o arena.

Figura 26: Muestreador tipo Helley Smith. Adaptado de Erh consults (2013)

2.3.4. Características del río Chancay

2.3.4.1. Ubicación

Políticamente la Cuenca Hidrográfica del río Chancay - Lambayeque está ubicada en el Norte del Perú, en los departamentos de Lambayeque y Cajamarca. Geográficamente, se encuentra entre los 6º 20' y 6º 56' de Latitud Sur, y 78º 38' y 80º 00' de longitud Oeste. (Ministerio de Agricultura y Riego, 2008).

Límites

Norte : Con la Cuenca Motupe y la Cuenca Chamaya.

Sur : Cuenca Jequetepeque – Zaña.

Este : Cuenca del Chotano.

Oeste : Océano Pacífico.

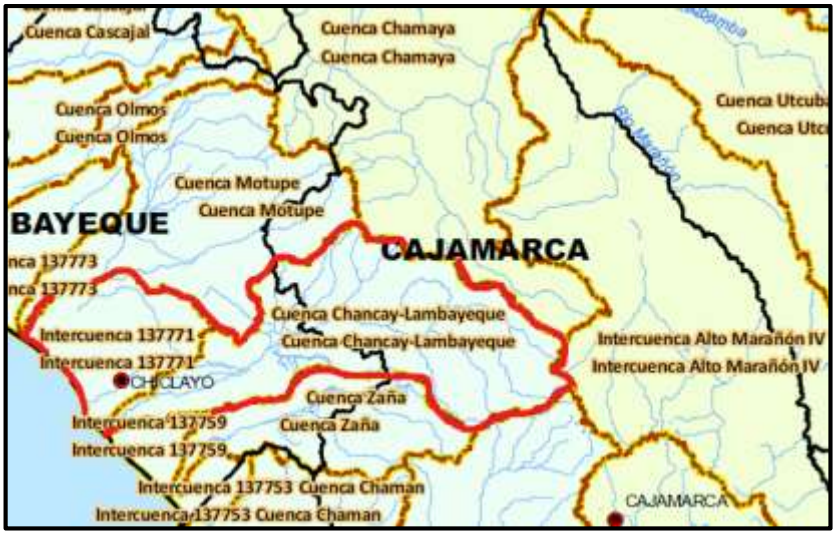


Figura 27: Ubicación de la Cuenca Chancay – Lambayeque. Adaptado de "Mapa de Cuencas Hidrográficas del Perú" por Sistema de Iformación Geográfica del Ministerio del Ambiente – SIGMINAM, 2010, Ministerio del Ambiente.

2.3.4.2. Descripción general

El río Chancay - Lambayeque pertenece a la vertiente del Pacífico y nace en la laguna de Mishacocha con el nombre de Quebrada Mishacocha (cerros Coymolache y Los Callejones) a una altitud de 3.800 m. Posteriormente adopta sucesivamente los nombres de Chicos y Llantén, conociéndose como el de río Chancay - Lambayeque desde su confluencia con el río San Juan hasta el repartidor La Puntilla. (Ministerio de Agricultura y Riego, 2008).

2.3.4.3. Caudales máximos alcanzados

En 1998, se produjeron las mayores precipitaciones, llegando a 113 litros/m^2 en Chiclayo y 182 litros/m^2 en Ferreñafe, los caudales máximos alcanzados por los ríos fueron en La Leche con 400 m^3/s y Chancay - Reque con 600 m^3/s. La máxima Avenida para el río Chancay - Lambayeque, se reporta para el año 1983 (Min. De Agricultura), que por el vertedero de la bocatoma Raca Rumi (Reservorio Tinajones), habría pasado un caudal máximo extraordinario del orden de los 1,200 m^3/s (Ministerio de Agricultura y Riego, 2008).

2.3.4.4. Hidrografía e Hidrología de la Cuenca del Río Chancay - Lambayeque

La cuenca del río Chancay – Lambayeque cuenta con una extensión de 5,309 $Km^{2,}$ de los cuales aproximadamente 1400 Km^2 pertenecen a la cuenca húmeda. Las descargas medidas en la Estación Carhuaquero indican una ocurrencia medio anual de 25.8 m^3/s, habiendo durante el año épocas de avenidas durante 3 meses: Febrero – Abril. (Instituto Nacional de Recursos Nacionales INRENA y Ministerio de Agrigultura, 1994).

2.3.4.5. Geomorfología

Un estudio realizado por el Instituto Nacional de Recursos Nacionales INRENA y Ministerio de Agricultura, (1994) señala que la cuenca en estudio tiene una forma semejante a la mayoría de los ríos de la Costa, es decir, ancha en su parte alta y estrecha en su parte media formándose en la cuenca baja un extenso valle donde se asienta lo más importante de la agricultura. Específicamente la cuenca del Río Chancay - Lambayeque comprende dos zonas bien diferenciadas:

a. Zona baja o valle, que se ubica desde el nivel del mar hasta los 500 m.s.n.m.

b. Zona alta o sierra desde los 500 hasta los 3,500 m.s.n.m.

2.3.5. Características del Puente Monsefú – Eten

El puente Monsefú - Éten construido por el Consorcio INCOT SAC, dicho puente tiene una longitud de 152 m que cruza el río Chancay, es de tipo Cantiléver con vigas pos-tensadas, losa de concreto armado. Esta infraestructura permite unir los pueblos de Monsefú, Éten y Puerto Éten. Así, el principal objetivo de este proyecto fue obtener una adecuada transitabilidad en esta vía, que permita un acceso

permanente y constante a los mercados locales, distritales y departamentales (Infraestructura Peruana, 2014).

Figura 28: Río Chancay en Inmediaciones del Puente Monsefú – Eten, de 152 m de longitud.

Puente cantiléver

Villarino, A. (2010) nos menciona que estructuras de gran magnitud cuyo principio es el sistema cantiléver, son construidas mediante la técnica de voladizos sucesivos, por medio de ménsulas proyectadas en el espacio a partir de la ménsula previa. Los puentes de este tipo reciben su nombre de los brazos voladizos (cantiléver) los cuales se proyectan desde las pilas, de la misma manera también pueden proyectarse hacia las orillas sustentando los extremos de dos tramos suspendidos. El puente cantiléver puede aplicarse fácilmente en puentes de cerchas de acero y tablero superior. (Escudero, J.)

2.3.6. Características del Puente Pucalá

El puente Pucalá construido por el Servicio Industrial de la Marina (SIMA), inaugurado en diciembre del año 2013 demandó una inversión de 11 millones de soles, dicho puente tiene una longitud 134 m y capacidad para 48 toneladas. Es de tipo pórtico, y está conformado por vigas de acero de alma llena y losa de concreto armado. Posee dos carriles (Infraestructura Peruana, 2015).

Figura 29: Río Chancay en inmediaciones del puente Pucalá

Puentes del tipo pórtico

Cabrera, J. (2005), es una estructura intermedia entre el arco y la viga por lo que presenta características propias de ambos, presentan pilas y tablero igual que los puentes viga lo que da lugar a un mecanismo resistente complejo debido a que en él interviene la resistencia a flexión de sus elementos. Al mismo tiempo se produce un efecto pórtico debido a las reacciones horizontales que aparecen en sus apoyos.

Puente mixto

La estructura mixta es una forma novedosa de colaboración del acero y el concreto, no mezclados como el caso del concreto armado y pretensado, pero sí se encuentran conectados entre sí trabajando conjuntamente. La principal ventaja de este tipo de puentes es debido a que su construcción se puede hacer igual que la de un puente metálico, representando su mayor ligereza como una ventaja. El problema singular de este tipo de puentes en cambio se debe a la conexión entre el concreto y el acero para asegurar que ambos materiales trabajen conjuntamente, esta conexión se realiza con elementos metálicos, conectores que van soldados al acero y embebidos en el concreto, al que se unen por adherencia. (Villarino, 2010).

2.3.7. Ensayos de los Materiales

Meza, V. (2012). La mecánica de suelos hace un énfasis principalmente en el estudio de suelos que se han originado en ambientes sedimentarios, para el caso de suelos cohesivos y suelos granulares, encontrándose en estado seco o en

saturado. Ambas condiciones son situaciones extremas, y a la vez, el suelo es considerado como un sistema en la cual interactúan dos fases. La condición de suelos saturados está presente en suelos situados bajo el nivel freático, estando presentes las siguientes fases: sólida y liquida, es decir, que los espacios vacíos o poros del suelo están ocupados por agua.

2.3.7.1. Ensayo de granulometría del suelo

Norma ASTM D 422. (2007). Este ensayo se realiza con el fin de determinar de manera cuantitativa la distribución de tamaños de partículas de suelo, determinando mediante este método los diferentes porcentajes de suelo que pasan por las diferentes mallas o tamices estandarizados que van desde el tamiz de 3" hasta la malla Nº 200.

Para el desarrollo de este ensayo se necesitarán balanzas calibradas de sensibilidad de 0.01 gr, para pesar el material que pase por los distintos tamices, también se utilizará una estufa o un horno el cual mantendrá la muestra a una temperatura de 110 ± 5 ºC, así como envases para el manejo y secado de muestras, se necesitarán materiales adicionales como brocha o cepillo y por último los distintos tamices estandarizados, (Norma NTP 339-128, 1999).

Tabla 6

Serie de Tamices de malla cuadrada

TAMICES	ABERTURA (mm)
3"	75,000
2"	50,800
1 ½"	38,100
1"	25.400
¾"	19,000
⅜"	9,500
N° 4	4,760
N° 10	2,000
N° 20	0,840
N° 40	0,425
N° 60	0,260
N° 140	0,106
N° 200	0,075

Adaptado de "Manual de ensayo de Materiales, MTC 2016", Edición de Mayo 2016

Manual MTC. (2016). Según las características de los materiales finos de la muestra, el análisis granulométrico por tamizado se realiza, bien con la totalidad de la muestra, o bien con parte de ella después de separar los finos por lavado. La muestra a prepararse estará constituida por dos fracciones, una retenida sobre el tamiz de 4,760 mm (Nº 4) y otra que pasa dicho tamiz. Ambas fracciones se ensayarán por separado.

Figura 30: Columna de tamices de las diferentes medidas sobre la máquina de ensayo. Adaptado de civilgeeks.com

Para iniciar con el procedimiento del ensayo, tendremos dos tipos de análisis una para la muestra retenida en el tamiz Nº4 y para la fracción que pasa dicha malla.

a. Análisis por medio de tamizado de la fracción retenida en el tamiz Nº 4

Para este proceso utilizar los tamices entre la malla 3” y Nº4, para el tamizado manual, los tamices se mueven de un lado a otro, operando cada tamiz individualmente durante un minuto cada uno, hasta cuando no pase más del 1% de la parte retenida. Se determina el peso de cada fracción en una balanza con una sensibilidad de 0,1 %. La suma de los pesos de todas las fracciones y el peso, inicial de la muestra no debe diferir en más de 1 %. (Manual MTC, 2016).

b. Análisis granulométrico de la fracción fina

La fracción de tamaño mayor que el tamiz de 0,074 mm (Nº 200), se analizará por tamizado en seco, lavando la muestra previamente sobre el tamiz Nº 200, pesándolos con exactitud de 0,01 g. Se recoge lo retenido en un recipiente, se seca en el horno a una temperatura de 110±5 ºC y se pesa, y finalmente se tamiza en seco repitiendo el procedimiento mencionado en el párrafo anterior. (Manual MTC, 2016).

Se calcula el porcentaje de material que pasa por el tamiz de 0,074 mm (Nº 200) de la siguiente forma:

$$\%Pasa\ 0.074 = \frac{PesoTotal - Peso\ Retenido\ en\ el\ Tamiz\ de\ 0.074}{PesoTotal} x100$$

Se calcula el porcentaje retenido sobre cada tamiz en la siguiente forma:

$$\%Retenido = \frac{Peso\ Retenido\ en\ el\ Tamiz}{Peso\ Total} x100$$

Se calcula el porcentaje más fino, restando en forma acumulativa de 100 % los porcentajes retenidos sobre cada tamiz.

$$\%Pasa = 100 - \%Retenido\ acumulado$$

2.3.7.2. Ensayo de peso especifico

Manual MTC. (2016). Este método de ensayo cubre la determinación de la gravedad específica de sólidos de suelo que pasan el tamiz de 4,75 mm (Nº 4) mediante un picnómetro de agua. La gravedad específica de sólidos de suelo es usada para calcular la densidad de los sólidos de suelo.

Norma NTP 339-131. (1999). Para la realización del siguiente ensayo utilizaremos una balanza con aproximación al 0.01 gr, así como una bomba de vacío capaz de producir una presión absoluta igual o menor de 100 mm de columna de mercurio, un picnómetro, y un termómetro para las tomas de temperatura.

La muestra de suelo se ensaya con su contenido natural de humedad o puede también ensayarse seca al horno. La cantidad mínima de muestra cuando se use suelo seco y un frasco volumétrico debe ser 25 gr. Cuando la muestra se seque al horno esta deberá estar a 110 ºC ± 5 ºC, luego de ello deberá saturarse en agua destilada por lo menos 12 horas. (Norma NTP 339-131, 1999).

Para iniciar con el procedimiento, lo primero es determinar la masa del picnómetro limpio y seco con una aproximación de 0,01g (repita esta determinación cinco veces

y registrar el promedio), luego llenar el picnómetro con agua desairada por encima o debajo de la marca de calibración y tomar el peso y temperatura de inicio. Colocar el embudo en el picnómetro. El pico del embudo debe extenderse pasando la marca de calibración o sello del tapón. Vierta directamente los sólidos de suelo en el embudo, enjuagar cualquier partícula de suelo remanente en el embudo dentro del picnómetro. Desairar el picnómetro con la muestra, luego de dicho proceso dejar a temperatura ambiente para finalmente tomar lecturas del peso y temperatura de ensayo. (Norma NTP 339-131, 1999).

Figura 31: Ensayo de peso específico. Adaptado de J&Flem Laboratorio de ensayo de materiales (2010)

El cálculo del peso específico relativo de solidos será de la siguiente manera:

$$Ma(Tx) = \frac{Densidad\ del\ agua\ Tx}{Densidad\ del\ agua\ Ti} * (Ma - Mf) + Mf$$

Ma: Masa de la Fiola + Agua

Mf: Masa de la Fiola

Tx: temperatura del ensayo

Ti: Temperatura calibrada

Tabla 7

Densidad relativa del agua y factor de conversiones K para diferentes temperaturas

Temperatura (ºC)	Densidad relativa del agua (g/ml)	Factor de corrección K
20.0	0.9982343	1.0000
20.5	0.9981288	0.9999
21.0	0.9980233	0.9998
21.5	0.9979126	0.9997
22.0	0.9978019	0.9996
22.5	0.9976861	0.9995
23.0	0.9975702	0.9993
23.5	0.9974494	0.9992
24.0	0.9973286	0.9991
24.5	0.9972028	0.9990
25.0	0.9970770	0.9988
25.5	0.9969463	0.9987
26.0	0.9968156	0.9986
26.5	0.9966804	0.9984
27.0	0.9965451	0.9983
27.5	0.9964052	0.9982
28.0	0.9962652	0.9980
28.5	0.9962070	0.9979
29.0	0.9959761	0.9977

Adaptado de Norma Técnica Peruana NTP 339-131, pag 8

Por último, el peso específico estará determinado por la siguiente ecuación:

$$Gs = Ma(Tx) * K$$

2.3.7.3. Ensayo de hidrómetro

Norma NTP 339-128. (1999). El siguiente ensayo consiste en determinar de manera cuantitativa la distribución de tamaños de partículas de los suelos. La clasificación de partículas retenidas en el tamiz Nº 200, mayores a 75 µm, se efectúa por tamizado, mientras que las partículas menores a 75 µm, se realiza por el proceso de sedimentación basado en la Ley de Stokes, a través del ensayo de Hidrómetro.

Norma ASTM D 422. (2007). Para la realización de este ensayo, se necesitarán una balanza con una precisión de 0.01 g para pesar el material, un aparato de agitación encargado de batir la mezcla, un hidrómetro ASTM, 151 H o 152 H,

cilindros de sedimentación con capacidad de 1000 ml, un termómetro con precisión de 0.5ºC y por último un agente dispersor (Hexametafostato de Sodio).

Figura 32: Prueba de la velocidad de las partículas con hidrómetro. Adaptado de página web, Universidad Nacional Autónoma de México.

El tamaño aproximado de la muestra utilizado para el análisis mediante el método del hidrómetro tiene variaciones con el tipo de suelo que va a ser ensayado. La cantidad solicitada para suelos arenosos es de 75 a 100 g y para limos y arcillas de 50 a 60 g (peso seco). El peso exacto de la muestra en suspensión puede ser determinado antes o después del ensayo. (Manual MTC, 2016).

Para iniciar con el ensayo se debe conocer el peso específico de los sólidos, determinado con el ensayo anterior, en un recipiente a parte colocar 125 ml de agua destilada con 5 gr del defluctuante, mezclar y luego terminar de mezclar junto con la muestra, dejando en reposo la mezcla para el caso de arenas de 2 – 4 horas, y 24 horas para el caso de arcillas, Luego se transfiere la mezcla al vaso dispersor y agregar agua de ser necesario, y colocar en el agitador durante 3 o 15 minutos según el material, posteriormente la muestra será introducida al cilindro de sedimentación, agitar el cilindro durante un minuto con el objetivo de remover las partículas asentadas en el fondo, al tener contacto el cilindro con la mesa se inicia el cronómetro, introduciendo el hidrómetro, se inician a tomar lecturas y temperatura en tiempos determinados. (Manual MTC, 2016).

Lectura de hidrómetro corregida. Calcular las lecturas de hidrómetro corregidas por menisco (R) sumándole a cada lectura de hidrómetro no corregida (R'), la corrección por menisco Cm, o sea:

$$R = R' + Cm$$

El diámetro de las partículas de suelo en suspensión en el momento de realizar cada lectura de hidrómetro se puede calcular también con la fórmula siguiente:

$$D\ (mm) = K\sqrt{L/_t}$$

Tabla 8

Valores de K para el cálculo del diámetro de partículas en el análisis hidrométrico

Tem	Peso específico de las partículas del suelo								
ºC	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85
10	0,01659	0,01631	0,01604	0,1583	0,1555	0,01532	0,01510	0,01488	0,01468
11	0,01636	0,01608	0,01582	0,01557	0,01533	0,01511	0,01489	0,01468	0,01448
12	0,01613	0,01586	0,01560	0,01535	0,01512	0,01490	0,01468	0,01448	0,01428
13	0,01591	0,01565	0,01539	0,01515	0,01492	0,01470	0,01449	0,01428	0,01409
14	0,01571	0,01544	0,01519	0,01495	0,01474	0,01451	0,01430	0,01410	0,01391
15	0,01551	0,01525	0,01500	0,01476	0,01454	0,01432	0,01412	0,01392	0,01373
16	0,01530	0,01505	0,01481	0,01457	0,01435	0,01414	0,01394	0,01374	0,01356
17	0,01521	0,01486	0,01462	0,01439	0,01417	0,01396	0,01376	0,01356	0,01338
18	0,01492	0,01467	0,01443	0,01421	0,01399	0,01378	0,01359	0,01339	0,01321
19	0,01437	0,01449	0,01425	0,01403	0,01382	0,01361	0,01342	0,01323	0,01305
20	0,01456	0,01431	0,01408	0,01386	0,01365	0,01344	0,01325	0,01307	0,01289
21	0,01438	0,01414	0,01391	0,01369	0,01348	0,01328	0,01309	0,01291	0,01273
22	0,01421	0,01397	0,01374	0,01353	0,01332	0,01312	0,01294	0,01276	0,01258
23	0,01404	0,01381	0,01358	0,01337	0,01317	0,01297	0,01279	0,01261	0,01243
24	0,01388	0,01365	0,01342	0,01321	0,01301	0,01282	0,01264	0,01246	0,01229
25	0,01372	0,01349	0,01327	0,01306	0,01286	0,01267	0,01249	0,01232	0,01215
26	0,01357	0,01334	0,01312	0,01291	0,01272	0,01253	0,01235	0,01219	0,01201
27	0,01342	0,01319	0,01297	0,01277	0,01258	0,01239	0,01221	0,01204	0,01188
28	0,01327	0,01304	0,01283	0,01264	0,01244	0,01225	0,01208	0,01191	0,01175
29	0,01312	0,01290	0,01269	0,01249	0,01230	0,01212	0,01195	0,01178	0,01162
30	0,01298	0,01276	0,01256	0,01236	0,01217	0,01199	0,01182	0,01165	0,01149

Adaptado de "Manual de ensayo de Materiales, MTC 2016", Edición de Mayo 2016

2.3.8. Clasificación de suelos SUCS

En el año 1942 el Dr. Casagrande desarrolló un sistema que permitía clasificar los suelos según su textura, posteriormente en colaboración con el Bureau of Reclamation se creó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Para clasificar los suelos este sistema se basa en lo siguiente: Porcentaje de grava, arena y finos (Fracción que pasa el tamiz N°200), curva de distribución

granulométrica y las características de plasticidad y compresibilidad de los suelos (Manual MTC, 2016).

Tabla 9:

Tipología de Suelos (SUCS)

Símbolo	Características generales		
GW	Gravas (> 50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos < 5%)	Bien graduadas
GP			Pobremente graduadas
GM		Con finos (Finos > 12%)	Componente limoso
GC			Componente arcilloso
SW	Arenas (< 50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos <5%)	Bien graduadas
SP			Pobremente graduadas
SM		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
SC			Componente arcilloso
ML	Limos	Baja plasticidad (LL<50)	
MH		Alta plasticidad (LL>50)	
CL	Arcillas	Baja plasticidad (LL<50)	
CH		Alta plasticidad (LL>50)	
OL	Suelos orgánicos	Baja plasticidad (LL<50)	
OH		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	Turba	Suelos altamente orgánicos	

Nota: Tipología de Suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Adaptado de "Manual de Carreteras", por Bañón L & Beviá J, 2000; Cap.15 - Suelos.

2.3.8.1. Suelos gruesos

Se encuentran las gravas y arenas (G y S), se denomina suelo grueso cuando más del 50% de sus partículas son retenidas en la malla N°200, de lo contrario es suelo fino si menos del 50% de sus partículas son retenidas en la malla N°200. Se trata de gravas si más del 50% de su fracción gruesa (Retenida en la malla N°200) no pasa la malla N°4, y se trata de arenas para el caso contrario (Juárez E & Rico A, 2005).

Grupos GW y SW

Se trata de suelos bien graduados (Gravas y arenas) y con pocos finos o limpios en su totalidad. En caso de contener partículas finas éstas no deben ser mayor que el 5% en peso. Una grava bien graduada debe presentar un coeficiente de uniformidad mayor que 4 (Cu > 4) y el coeficiente de curvatura debe estar comprendido entre 1 y 3 (1 < Cc < 3); para el caso de las arenas bien graduadas, su coeficiente de uniformidad será mayor que 6 (Cu > 6) y su coeficiente de curvatura estará entre los mismos límites para las gravas (Juárez E & Rico A, 2005).

Coeficiente de uniformidad Cu:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Coeficiente de curvatura Cc:

$$Cc = \frac{{D_{30}}^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Grupos GP y SP

Según Juárez E & Rico A, 2005, este tipo de suelos son mal graduados ya que no cumplen con los requisitos de graduación según los coeficientes de uniformidad y curvatura. Se trata de suelos uniformes presentando predominio de un solo tamaño o faltando algunos intermedios.

Grupos GM y SM

En este grupo se encuentran los suelos cuyo contenido de finos son superiores al 12% en peso, la plasticidad varía entre nula y media, es decir, es requisito que el índice de plasticidad de la fracción que pasa la malla N°40 sea menor a 4 (Juárez E & Rico A, 2005).

Grupos GC y SC

Según Juárez E & Rico A, 2005, al igual que en el grupo anterior, el contenido de partículas finas será mayor que el 12% en peso, sin embargo, la plasticidad en este tipo de suelo varía de media a alta con índice de plasticidad mayor a 7.

2.3.8.2. Suelos finos

En este grupo se encuentran los limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos y arcillas orgánicas (O). Estos 3 tipos de suelo se subdividen según su límite líquido; si el límite líquido es menor que 50%, serán suelos de compresibilidad baja o media (L) de cuya combinación se obtendrán los suelos tipo ML, CL y OL. Si el límite líquido es mayor que 50%, se tratará de suelos con alta compresibilidad (H) obteniéndose los grupos MH, CH y OH (Juárez E & Rico A, 2005).

2.3.9. Estudio de Impacto Ambiental

Arboleda, J. (2008). Muchas de las actividades realizadas por el hombre, en especial aquellas de producción o prestación de bienes y servicios, suministro de materias primas y desarrollo de infraestructura, interactúan de alguna forma con el entorno donde se desarrollan, tanto en su construcción como en su funcionalidad u operación. *"Por ejemplo, consumen recursos naturales, remueven vegetación, utilizan suelos productivos, modifican el paisaje, desplazan personas, producen residuos o emisiones, etc.; es decir, generan cambios en las condiciones ambientales que pueden ser muy variables en cuanto a su significancia, magnitud, duración, extensión, etc."* Para dichos casos, es de vital importancia la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), como la principal herramienta que permite determinar no solo las consecuencias ambientales de cualquier emprendimiento, sino también proponer las acciones necesarias para atender dichas secuelas.

ANLA. (Autoridad Nacional de licencias Ambientales). El estudio de impacto ambiental es el instrumento primordial cuando se requiera tomar decisiones acerca de proyectos, obras o actividades que requieren licencia ambiental y de esta manera se exigirá en todos los casos en que se requiera licencia ambiental de acuerdo con la ley. Este estudio deberá tener en su contenido un objeto y alcance de estudio, resumen ejecutivo, área de influencia, identificación de comunidades y recursos naturales y por último la propuesta de plan de manejo ambiental del proyecto.

2.4. Definición de términos básicos

Tabla 10

Tabla de definición de términos básicos para el transporte de sedimentos

Término	Definición
Acarreo	Sedimento transportado mecánicamente por acción del viento o del agua, llevando así la carga de un lugar hacia otro. (Wordreference).
Arcillas	Roca sedimentaria formada a partir de depósitos de grano muy fino, compuesta esencialmente por silicatos de aluminio, de consistencia pastosa. (Wordreference).
Carga de lavado	Acarreo del material más fino transportado en suspensión, precedente de tramos aguas arriba, generado por lluvias y erosión. (Maza, J y García M, 1985).
Carga de lecho o de fondo	Movimiento de partículas en contacto con el lecho del río, las cuales ruedan, deslizan o saltan. (García, F. 2009).
Carga en suspensión	Movimiento de la totalidad de las partículas en suspensión dentro del flujo en una corriente de un río, conformado por sedimento de lavado y de fondo en suspensión. (Maza, J y García M,1985).
Caudal máximo	Es el aporte o gasto máximo de agua en determinados periodos.
Concentración de sedimento	Cantidad de sedimento acumulado en grandes cantidades, por acción del viento o del agua.
Contorno de un río	Expresión utilizada para denominar las márgenes de un río.
Cortante de fondo	Es la fuerza resistente que se genera a partir de la fricción entre el agua y el material de fondo. Llamada también tensión cortante de fondo.
Cuenca	Área definida en general topográficamente y drenada por distintos cursos de agua, los cuales afluyen a un mismo río. (Wordreference).
Formulas empíricas	Ecuaciones establecidas por diferentes autores para estimar la cantidad de sedimentos.
Hidrómetro	Instrumento que sirve para medir la gravedad específica de la muestra en suspensión y para tomar lecturas en gramos por litro (g/lt), utilizando hidrómetros 151H y 152H respectivamente, (ASTM D 422).
Limos	Es un sedimento transportado en suspensión por los ríos y por el viento, que se deposita en el lecho de los cursos de agua o sobre los terrenos que han sido inundados.
Material fino	Suelos con diámetros de partículas muy pequeños, con diámetros inferiores a 0.075 mm, correspondiente a la categoría del limo y arcilla, pasando totalmente por el tamiz Nro. 200.

Muestreadores de sedimentos	Son instrumentos o equipos que ayudan a extraer muestras de sedimentos por arrastre o suspensión de ríos y/o canales.
Nivel freático	Corresponde al nivel superior de una capa freática o de un acuífero en general. Conocido también como napa freática, (Wikipedia).
Partículas de sedimentos	Granos de material sólido acumulado sobre la superficie terrestre derivado de las acciones y procesos que actúan en la atmósfera, por precipitaciones meteorológicas, circulación de aguas superficiales o subterráneas. (García, M; Maza, J. 1985).
Rugosidad	Irregularidades que posee una superficie, dependiendo de su acabado superficial. (Wordreference).
Sedimento Cohesivo	Constituído por partículas de granos muy finas, como arcillas, siendo la fuerza de cohesión mayor al peso de cada gramo. (Gunt Hamburg, Catálogo de Ingeniería).
Sedimento no Cohesivo	Material granular constituido por granos gruesos como gravas y arenas, oponiéndose las partículas a la fuerza de arrastre. (Gunt Hamburg, Catálogo de Ingeniería).
Transporte de sedimentos	Degradación natural del suelo, transportados por acciones del agua o el viento. (García, M; Maza, J. 1985).
Turbulencia del flujo	Movimiento del fluido que se da de forma caótica, en las que las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas forman pequeños remolinos. (Wikipedia).
Velocidad del flujo	Es la velocidad en la cual el fluido circula a través de una sección de tubería, rio o canal.
Velocidad de sedimento	Es la velocidad en la cual se desplazan las partículas o granos de sedimento, por acción del aire o el agua.
Viga pos tensada	Vigas reforzadas por medio de cables, con suficiente compresión axial para que se eliminen todos los esfuerzos de tensión que actúen en el concreto (Villareño, 2010).

Nota: Elaboración propia

CAPÍTULO III
MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

3.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación realizado es experimental, debido a los principios encontrados en el método científico; dichos experimentos se basan en ensayos, los cuales se desarrollaron en laboratorio para la precisión de su análisis.

Cuantitativa, puesto que se busca contestar las preguntas de investigación y comprobar la hipótesis, mediante el análisis realizado.

3.1.2 Diseño de Investigación

En el estudio se utilizó la investigación pre - experimental, por su acercamiento al problema de investigación en la realidad, además de no existir manipulación de la variable independiente.

3.2. Población y muestra

Población

Río Chancay - Lambayeque

Muestra

Toma de sedimentos por arrastre y suspensión ubicados en el eje de la estructura y a 150 m aguas arriba y aguas abajo para cada uno de los puentes en estudio.

3.3. Hipótesis

Al cuantificar el transporte de sedimentos se determinará, mediante el estudio comparativo, cuál de las ecuaciones tanto para arrastre como suspensión, son las de mejor ajuste a los tramos estudiados.

3.4. Operacionalización de variables

Variable Independiente

Río Chancay

Variable dependiente

Transporte de sedimentos por arrastre y suspensión.

Tabla 11

Cuadro de Variable Independiente

Variable Independiente	Dimensiones	Indicadores	Índice	Técnicas de recolección de datos	Instrumentos de recolección de datos	Instrumento de medición
Río Chancay	Sección transversal	Área Hidráulica	(m^2)	Levantamiento topográfico y Análisis de documentos	Guía de análisis de documentos	Recolección de datos
		Radio Hidráulico	(m)	Análisis de documentos	Guía de análisis de documentos	Recolección de datos
	Nivel de agua	Tirante hidráulico	(m)	Observación y Análisis de documentos	Guía de análisis de documentos	Recolección de datos
	Velocidad del agua	Velocidad	(m/s)	Observación y Análisis de documentos	Guía de análisis de documentos	Recolección de datos
	Desniveles	Pendiente	(m/m)	Levantamiento Topográfico	Guía de análisis de documentos	Estación Total
	Irregularidad del cauce	Rugosidad	$0.025 < n < 0.60$	Observación y Análisis de documentos	Guía de análisis de documentos	Recolección de datos
	Caudal de rio	Caudal	(m^3/s)	Observación y Análisis de documentos	Guía de análisis de documentos	Recolección de datos

Nota: Elaboración propia

Tabla 12

Cuadro de Variable Dependiente

Variable Dependiente	Dimensiones	Indicadores	Sub Indicadores	Índice	Técnicas de recolección de datos	Instrumentos de recolección de datos	Instrumento de medición
Transporte de sedimentos	Análisis Granulométrico	Granulometría	Peso	(kg)	Ensayos de laboratorio	Guía de análisis de documentos	Balanza calibrada
			Diámetro	(mm)	Análisis de documentos y ensayos de laboratorio	Guía de análisis de documentos	Recolección de datos y muestreo de suelo
	Peso específico del material	Peso específico de solidos	Temperatura	(ºC)	Ensayos de laboratorio	Guía de análisis de documentos	Termómetro
			Peso especifico	(g/cm^3)	Análisis de documentos y ensayos de laboratorio	Guía de análisis de documentos	Recolección de datos y muestreo de suelo
	Velocidad de caída de la partícula	Hidrómetro	Velocidad	(cm/s)	Análisis de documentos y ensayos de laboratorio	Guía de análisis de documentos	Recolección de datos y muestreo de suelo
			Diámetro	(mm)	Análisis de documentos y ensayos de laboratorio	Guía de análisis de documentos	Recolección de datos y muestreo de suelo

Nota: Elaboración propia

3.5. Abordaje metodológico, técnicas e instrumentos de recolección de datos.

3.5.1. Abordaje metodológico

A. Métodos

Método Analítico

Se utilizó el método analítico, debido a que, una vez definidas las variables, se pudo deducir la hipótesis para un buen análisis de los sedimentos por arrastre y suspensión en el rio Chancay, para las inmediaciones de ambos puentes estudiados.

Método Inductivo

Para la presente investigación, se recopilaron ideas e información de diferentes autores que investigaron situaciones similares, así como también información de artículos, normas técnicas, etc.

Método Deductivo

Luego de haber obtenido el desarrollo de la presente investigación con resultados satisfactorios, el cual implicó el proceso de un estudio en campo y topográfico, un estudio hidráulico, un estudio de mecánica de suelos y estudio de impacto ambiental, se pudo iniciar con la selección de la ecuación de mejor ajuste en arrastre y suspensión al rio en estudio, conllevando a seleccionar una alternativa de solución en las zonas de estudio.

3.5.2. Técnicas de recolección de datos

Observación

Permitió estudiar el transporte de sedimentos por arrastre y suspensión en el rio Chancay en inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten, empleando muestreadores manuales y de esta manera estimar la producción de transporte de sedimentos en el transcurso de las semanas.

Análisis de documentos

Se tuvo como documentos de apoyo; tesis, libros, artículos, ensayos, etc., relacionados al tema de investigación, con la finalidad de tener más clara la información faltante para desarrollar un buen trabajo de investigación.

Ensayos en laboratorio

Se realizaron los ensayos necesarios para la debida comparación de los sedimentos por arrastre y suspensión del rio Chancay.

3.5.3. Instrumentos de recolección de datos

Guía de observación

Se emplearon los siguientes formatos:

a. Formato y guías para el estudio y ensayos de suelos.

b. Formato para el estudio topográfico.

Se revisaron normas técnicas que facilitaron un adecuado desarrollo para la recolección de datos, así como también la realización de los ensayos de laboratorio conllevando a obtener resultados adecuados.

Visitas a campo

Con el apoyo de los muestreadores manuales obtenidos en el laboratorio de Hidráulica, se procedió a visitar ambos puentes en estudio para la obtención de las muestras de sedimentos al rio, posteriormente llevarlos a laboratorio para su respectivo estudio.

Guía de análisis documental

Como guía documental para la realización ensayos se tuvo la norma técnica peruana, siguiendo el proceso establecido en cada una de ellas, teniendo como referencia la norma NTP 339.127; NTP 339.128; NTP 339.131.

3.6. Procedimiento para la recolección de datos

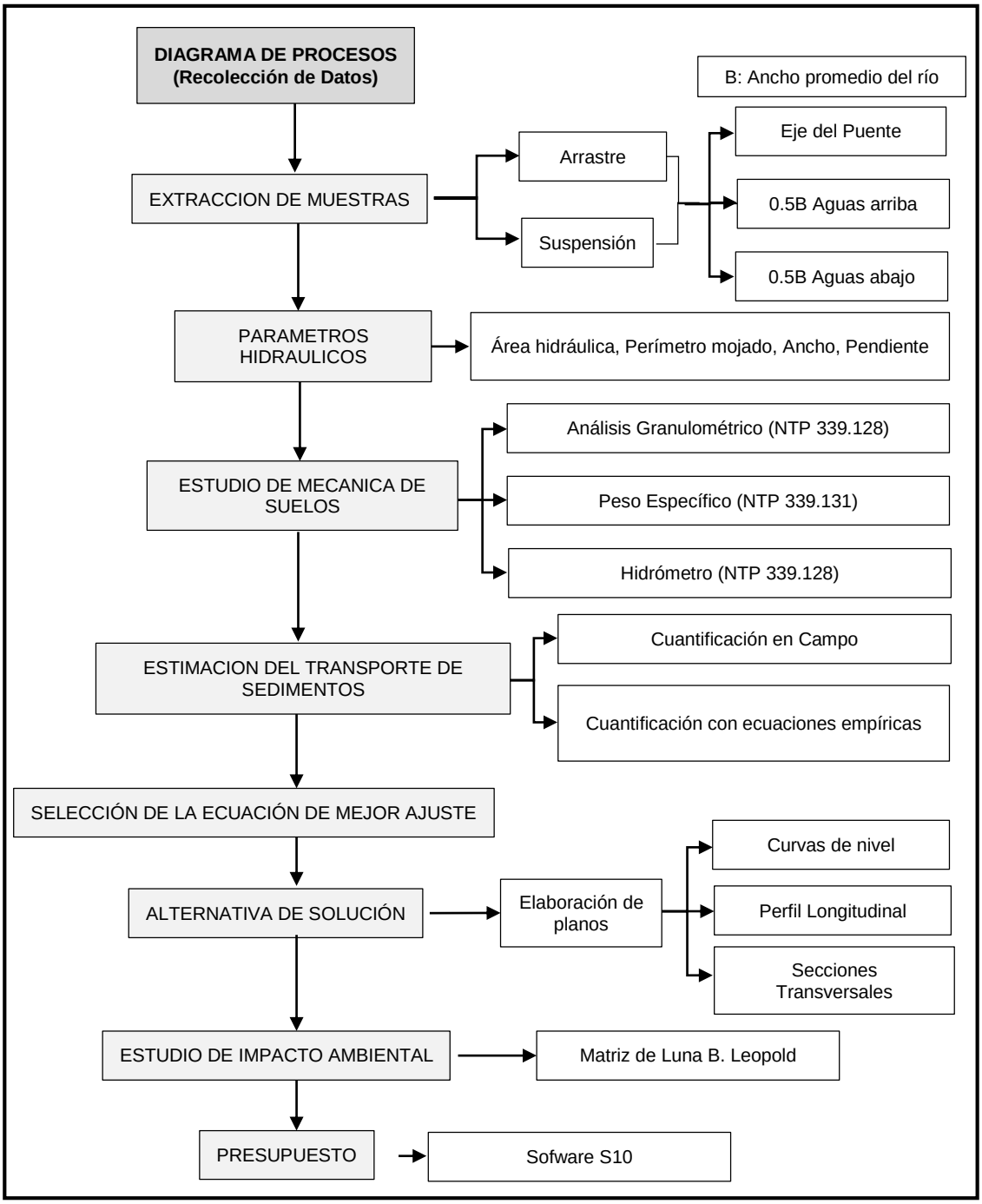


Figura 33: Diagrama de procesos, procedimiento de recolección de datos.

3.6.1. Recolección de información disponible

Se investigó y recolectó la información necesaria de las revistas, tesis, artículos, libros, estudios realizados anteriormente, etc.; con la finalidad de obtener un buen trabajo de investigación.

3.6.2. Extracción de muestras

Se inició con la visita a campo (Rio Chancay) para la obtención de muestras de sedimentos por arrastre y suspensión, las cuales son extraídas en las inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten.

Las extracciones se realizaron cada dos semanas, lo cual ayudó a tener un mejor seguimiento del transporte de sedimentos en distintas fechas.

Se extrajeron muestras en 3 puntos específicos, una el eje del puente, otra a 0.5B aguas arriba y a 0.5B aguas abajo, siendo B el ancho promedio del rio, en cada punto se realizó una extracción por arrastre y otra por suspensión, esta metodología se desarrolló en cada uno de los puentes en estudio.

Figura 34: Zona de toma de muestras en el puente Pucalá. Adaptado de Google Earth, imágenes por satélite.

Figura 35: Zona de toma de muestras en el puente Monsefú – Eten. Adaptado de Google Earth, imágenes por satélite.

3.6.3. Características geométricas de la sección

Inició con la realización del levantamiento topográfico de los lugares de estudio considerando el levantamiento en planta desde el eje del puente aguas arriba y aguas abajo. Incluyendo para este procedimiento la elaboración del perfil longitudinal y las secciones transversales, para la obtención de los parámetros hidráulicos de la sección.

Los parámetros hallados consistieron en: Área hidráulica, perímetro, pendiente, radio hidráulico y ancho del río.

El radio hidráulico se calculó de la siguiente manera:

$$Rh = \frac{Area\ de\ la\ seccion(m^2)}{Perimetro\ de\ la\ seccion(m)}$$

A su vez el ancho del río se calculó de la siguiente manera:

$$B = \frac{Area\ de\ la\ seccion(m^2)}{Tirante\ promedio\ de\ la\ seccion(m)}$$

El Caudal (Q) determinado para cada visita realizada se calculó con la ecuación de Manning:

$$Q\left(m^3/_s\right) = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$$

n: Rugosidad

S: Pendiente del río (m/m)

A: Área de la sección del río (m^2)

R: Radio hidráulico (m)

3.6.4. Estudio de mecánica de suelos

Se realizaron los ensayos de granulometría para la cual se tamizaron las muestras extraídas con el fin de obtener los diámetros necesarios que fueron utilizadas en las fórmulas mostradas anteriormente; se elaboró también el ensayo de peso específico de las muestras obtenidas, así como también el ensayo del hidrómetro o granulometría por sedimentación que nos ayudó a determinar la velocidad de

caída de la partícula obtenida mediante la Ley de Stokes, y la clasificación de los suelos finos.

La normativa utilizada para los ensayos es la siguiente:

- Contenido de Humedad: ASTM D 2216
- Análisis granulométrico por tamizado: ASTM D 422; NTP 339.128
- Análisis granulométrico por sedimentación: ASTM D 422; NTP 339.128
- Peso específico: NTP 339.131

Para ello se requirió de los siguientes equipos y materiales:

Tabla 13

Instrumentos para el diagnóstico

Ítem	Descripción
Equipos	Equipo topográfico Horno Balanza Calibrada Hornilla
Materiales	Material obtenido por muestreo del Rio Chancay
Instrumentos	Muestreadores de sedimentos Tamices Taras metálicas Bandejas Hidrómetro Probetas Fiola Canastilla

Nota: Elaboración propia

Para la obtención del contenido de humedad de la muestra, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%\, w = \frac{Peso\ muestra\ húmeda - Peso\ muestra\ seca}{Peso\ de\ muestra\ seca} x100$$

Para los cálculos del ensayo de análisis granulométrico por tamizado las ecuaciones utilizadas fueron las siguientes:

$$Pasa\ 0.074 = \frac{PesoTotal - Peso\ Retenido\ en\ el\ Tamiz\ de\ 0.074}{PesoTotal} x100$$

El porcentaje retenido sobre cada tamiz se obtuvo:

$$\%Retenido = \frac{Peso\ Retenido\ en\ el\ Tamiz}{Peso\ Total} x100$$

Se calcula el porcentaje más fino, restando en forma acumulativa de 100 % los porcentajes retenidos sobre cada tamiz.

$$\%Pasa = 100 - \%Retenido\ acumulado$$

Para el ensayo de Hidrómetro, perteneciente a la misma normativa del análisis granulométrico por tamizado, para calcular las lecturas corregidas de hidrómetro se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$R = R' + Cm$$

R: Lectura Corregida por menisco

R': Lectura del hidrómetro

Cm: Lectura en agua destilada

Para la obtención de los diámetros, en el ensayo se utilizó la siguiente ecuación:

$$D(mm) = K\sqrt{L/_t}$$

L: Longitud del Hidrómetro

t: Tiempo de obtención de los datos (min)

K: Ver Tabla Nº 8

Finalmente, para el ensayo de peso específico, se obtuvo mediante las siguientes ecuaciones:

$$Ma(Tx) = \frac{Densidad\ del\ agua\ Tx}{Densidad\ del\ agua\ Ti} * (Ma - Mf) + Mf$$

Ma: Masa de la Fiola + Agua

Mf: Masa de la Fiola

Tx: temperatura del ensayo

Ti: Temperatura calibrada

Obtención del peso específico:

$$Gs = Ma(Tx) * K$$

3.6.5. Selección de la ecuación de mejor ajuste

Las muestras de sedimentos extraídas en las zonas de estudio, luego de ser analizadas mediante los ensayos en laboratorio, se cuantificó el sedimento acumulado en campo mediante la siguiente ecuación:

$$G = \gamma_s * \frac{Q}{B} \left(\frac{kg}{s - m}\right)$$

G: Gasto solido transportado

γ_s : Peso específico del sedimento (kgf/m³).

Q: Gasto líquido del río expresado en m^3/s.

B: Ancho de la superficie libre de la corriente en m.

Se determinó la cuantificación de sedimentos (kg/sm) con las ecuaciones empíricas, obtenidas del Manual de Ríos, para el sedimento por arrastre se determinó con las ecuaciones de: Meyer – Peter – Muler, Schoklistch, Levi, Yalin; y para el sedimento en suspensión mediante las ecuaciones de: Chang, Simons y Richardson, Bagnold y la ecuación de Brooks.

Posteriormente, el valor obtenido para cada punto de extracción se comparó con los resultados obtenidos de las ecuaciones empíricas propuestas por los investigadores, seleccionando así cual fue la ecuación de mejor ajuste para cada una de las zonas en estudio.

3.6.6. Elaboración de planos y detalles según propuestas de solución planteadas

Los planos y propuesta de una alternativa de solución que se plantearon estuvieron asociados a los resultados obtenidos de la presente investigación además del plano de ubicación del puente.

Utilizando el software AUTOCAD, los planos fueron: Plano de ubicación del Puente, Plano de curvas de nivel, Plano de perfil Longitudinal del tramo en estudio y Planos de secciones transversales aguas arriba y aguas abajo.

3.6.7. Estudio de Impacto Ambiental.

Se definió según las alternativas adecuadas y recomendables desde el punto de vista tecnológico y ambiental.

El estudio de impacto ambiental fue realizado mediante la Matriz de Luna B. Leopold, para su realización se tomó en cuenta los factores y acciones ocurridos en las zonas de estudio.

Se hizo un análisis adecuado de la matriz de Leopold ubicando en primer lugar las acciones y factores que pudieran causar impacto ambiental, una vez armada la matriz y sin rellenar las cuadrículas se observó cada una de las cuadrículas situadas bajo cada acción propuesta y se examinó si causarían impacto en el factor correspondiente; de ser el caso, se hizo una diagonal para las acciones que sí podrían causar impacto. Para las cuadrículas que fue necesario trazar la diagonal, se rellenaron de la siguiente manera, siguiendo el procedimiento que indica Echarri, L (1998):

a. Se colocó en la izquierda de la cuadrícula con diagonal un valor asignado del 1 al 10 indicando la magnitud del impacto, (+) si el impacto es positivo, (-) si es negativo.

b. Se colocó para la parte inferior derecha de la misma manera, valores del 1 al 10, (+) si el impacto es positivo y (-) si es negativo indicando la importancia del impacto, es decir, si es regional o solo local.

3.6.8. Presupuesto

El presupuesto fue obtenido, con el metrado de la alternativa de solución, y con el análisis de precios unitarios.

Para la obtención del presupuesto de la propuesta planteada, se realizó con ayuda del software S10 Presupuestos 2005.

3.6.9. Costos

Tabla 14

Tabla de costos en pasajes a las visitas a las zonas de estudio

Detalles	Cantidad	Pucalá	M - Eten	Parcial	Total
1º Visita - Inspección del lugar	1.00	S/ 18.00	S/ 16.00	S/ 34.00	
2º Visita - Inspección del lugar	1.00	S/ 18.00	S/ 16.00	S/ 34.00	
3º Visita - Inspección del lugar	1.00	S/ 27.00	S/ 19.50	S/ 46.50	
4º Visita - Extracción de Muestras	1.00	S/ 36.50	S/ 27.00	S/ 63.50	
5º Visita - Extracción de Muestras	1.00	S/ 36.50	S/ 27.00	S/ 63.50	
6º Visita - Extracción de Muestras	1.00	S/ 36.50	S/ 27.00	S/ 63.50	
7º Visita – Extracción de Muestras	1.00	S/ 36.50	S/ 27.00	S/ 63.50	
8º Visita - Levantamiento Topográfico	1.00	S/ 37.50	S/ 32.50	S/ 70.00	
Sub Total					S/ 438.50

Nota: Elaboración Propia

Tabla 15

Tabla de costos en Servicios Particulares

Detalles	Unidad	Cantidad	P.U.	Parcial	Total
Levantamiento topográfico	días	2.00	S/ 200.00	S/ 400.00	
Impresiones	glb	1.00	S/ 100.00	S/ 100.00	
Servicio de ploteos	und	1.00	S/ 30.00	S/ 30.00	
					S/ 530.00

Nota: Elaboración Propia

Tabla 16

Tabla de costos para materiales e insumos utilizados

Detalles	Unidad	Cantidad	P.U.	Parcial	Total
Termómetro	und	1.00	S/ 40.00	S/ 40.00	
Filtro de tela, Malla, Bolsas herméticas	glb	1.00	S/ 40.00	S/ 40.00	
Taras metálicas	glb	1.00	S/ 26.00	S/ 26.00	
Frasco lavador	und	1.00	S/ 8.00	S/ 8.00	
Agua Destilada	und	11.00	S/ 7.00	S/ 77.00	
Hexametafostato de Sodio NaPO3	und	1.00	S/ 360.00	S/ 360.00	
Sub Total					S/ 551.00

Nota: Elaboración Propia

Tabla 17

Tabla de costos de ensayos realizados en laboratorio

Detalles	Cantidad	P.U.	Parcial	Total
Contenido de Humedad de la Muestra	48.00	S/ 10.00	S/ 480.00	
Análisis Granulométrico por tamizado – S. finos	48.00	S/ 30.00	S/ 1440.00	
Análisis Granulométrico por tamizado – S. granular	9.00	S/ 50.00	S/ 450.00	
Análisis Granulométrico por Sedimentación	45.00	S/ 120.00	S/ 5400.00	
Peso específico del suelo método del picnómetro	16.00	S/ 30.00	S/ 480.00	
Peso específico y absorción del agregado grueso	4.00	S/ 60.00	S/ 240.00	
Sub Total				S/ 8490.00

Nota: Elaboración Propia

Tabla 18

Presupuesto total de la Investigación

Detalles	Sub total	Total
Visitas de extracciones (Pasajes)	S/ 438.50	
Servicios Particulares	S/ 530.00	
Materiales e Insumos	S/ 551.00	
Ensayos de Laboratorio	S/ 8490.00	
Presupuesto total		S/ 10009.50

Nota: Elaboración Propia

3.7. Análisis estadístico e interpretación de los datos

3.7.1. Análisis estadístico

Se realizaron los cálculos y análisis de los sedimentos por arrastre y suspensión de las inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten, los cuales intersectan el flujo del rio Chancay, cuantificando el transporte de sedimentos en cada visita.

Mediante los datos obtenidos de la sección del río, gracias al levantamiento topográfico, estos se organizaron en hojas de cálculo, para determinar los parámetros hidráulicos de la sección.

Los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio para la presente investigación fueron organizados con la ayuda de técnicas gráficas para su análisis estadístico, entre ellas se encuentran la gráfica de dispersión para la curva

granulométrica, y graficas que ayudaron a comparar lo cuantificado en campo con los resultados de las ecuaciones empíricas, con apoyo de programas como Microsoft Excel 2016.

3.7.2. Interpretación de los datos

Dichas herramientas ayudaron a interpretar y exponer de forma objetiva y concreta los datos adquiridos en campo.

Posteriormente se compararon los resultados y definiendo cuál de las ecuaciones tanto para arrastre y suspensión es la que más se adecúa al rio Chancay según lo cuantificado en campo, para cada uno de los puentes.

3.8. Principios éticos

3.8.1. Ética de recolección de datos

La recopilación de datos topográficos cuenta con instrumentos calibrados y actualizados, siendo plasmados en los formatos de nivelación y taquimetría.

Se contó con bases teóricas actualizadas y confidenciales que nos permitió como guía recopilar la información necesaria para esta investigación.

Se respetó la norma técnica peruana para la recolección de muestras in situ del estudio de mecánica de suelos.

3.8.2. Ética de la publicación

Deberá reconocerse el esfuerzo realizado por los autores de esta investigación, en caso de servir como apoyo para posteriores investigaciones, por el aporte brindado, una medida por la cual evitará el plagio.

3.8.3. Ética de aplicación

La presente investigación generará beneficios sociales, económicos y de impacto ambiental, dependiendo del derecho para utilizar los resultados de la investigación. El buen impacto que genere la presente investigación será de acorde al código de ética profesional, es el caso del Colegio de ingenieros del Perú, que cuenta con un código de ética profesional en la ingeniería civil, el cual será tomado en cuenta a medida que sea aplicable en la investigación.

3.9. Criterios de rigor científico

3.9.1. Criterios generales

La población de análisis contó con una muestra significativa reuniendo las características esenciales, que en medida que se lograron, se atribuyeron con resultados satisfactorios.

3.9.2. Criterios de confiabilidad

Para asegurar precisión, exactitud y confiabilidad en los resultados, ante esta medida se consultó a los respectivos especialistas para el correcto desarrollo, en los procesos necesarios para esta investigación.

3.9.3. Criterios de credibilidad

Para la recolección de información, la cual sirvió para un análisis correcto e interpretación adecuada, luego de realizado el trabajo en campo y gabinete, fue recopilada con el debido cuidado, y coherencia, para así poder evitar ambigüedad en los resultados.

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. Determinación de las características geométricas de la sección del río.

Los parámetros hidráulicos obtenidos del levantamiento topográfico de los lugares de estudio conllevan a obtener sus valores para cada extracción realizada, los cuales se muestran en las siguientes tablas, teniendo como datos:

Tirante medio (d), Área hidráulica (A), Perímetro mojado (P), Radio hidráulico (Rh), Espejo de agua (T), Ancho medio (BM), Rugosidad del cauce (n), Caudal del río (Q), Velocidad del fluido (V), Caudal unitario (q), Pendiente (S).

Tabla 19:

Parámetros hidráulicos de las secciones del Rio Chancay en inmediaciones del puente Pucalá.

Fechas	Punto	d (m)	A (m2)	P (m)	Rh=A/P	T (m)	BM=A/d	"n"	Q (m3/s)	V (m/s)	q=Q/B	S (‰)
	Eje puente	2.28	151.40	69.56	2.18	68.42	66.43	0.08355	184.88	1.22	2.78	3.69
01/04/2017	A. Arriba	2.17	156.18	74.17	2.11	73.71	72.04	0.08425	185.00	1.18	2.57	3.69
	A. Abajo	1.75	175.34	103.51	1.69	103.03	100.00	0.08220	184.14	1.05	1.84	3.69
	Eje puente	1.37	71.45	53.67	1.33	55.08	52.27	0.06621	79.32	1.11	1.52	3.69
14/04/2017	A. Arriba	1.28	66.622	54.28	1.23	54.09	52.09	0.05827	79.61	1.20	1.53	3.69
	A. Abajo	1.44	66.07	48.118	1.37	47.75	45.98	0.06261	79.20	1.20	1.72	3.69
	Eje puente	1.11	50.00	49.69	1.01	49.27	45.25	0.05964	51.13	1.02	1.13	3.69
01/05/2017	A. Arriba	0.80	36.962	45.98	0.80	45.87	46.03	0.03779	51.37	1.39	1.12	3.69
	A. Abajo	0.98	37.22	38.65	0.96	38.42	38.02	0.04344	50.76	1.36	1.34	3.69
	Eje puente	0.76	28.82	38.99	0.74	38.74	37.83	0.03547	40.36	1.40	1.07	3.69
28/05/2017	A. Arriba	0.75	32.44	44.66	0.73	44.56	43.31	0.03913	40.70	1.25	0.94	3.69
	A. Abajo	0.98	39.16	39.16	1.00	38.91	39.96	0.05960	39.91	1.02	1.00	3.69

Nota: Elaboración propia

Según las tablas mostradas, los tirantes disminuyen con cada visita realizada, lo cual conlleva a la disminución de los demás parámetros como el área, perímetro y radio hidráulico, donde estos valores ayudaron a cuantificar el transporte de sedimentos.

Tabla 20:

Parámetros hidráulicos de las secciones del Rio Chancay en inmediaciones del puente Monsefú - Eten.

Fechas	Punto	d (m)	A (m2)	P (m)	Rh=A/P	T (m)	BM=A/d	"n"	Q (m3/s)	V (m/s)	q=Q/B	S (‰)
	Eje puente	0.52	59.27	112.88	0.53	112.75	113.32	0.03725	59.49	1.00	0.52	3.30
03/04/2017	A. Arriba	0.52	68.21	135.12	0.50	135.08	132.31	0.04151	59.84	0.88	0.45	3.30
	A. Abajo	0.53	56.41	106.74	0.53	106.26	106.43	0.03570	59.33	1.05	0.56	3.30
	Eje puente	0.43	41.18	95.10	0.43	95.02	95.32	0.03922	34.52	0.84	0.36	3.30
16/04/2017	A. Arriba	0.38	49.80	131.78	0.38	131.76	131.91	0.04269	35.02	0.70	0.27	3.30
	A. Abajo	0.41	41.74	99.09	0.42	98.66	100.82	0.03899	34.55	0.83	0.34	3.30
	Eje puente	0.37	33.89	91.23	0.37	91.17	90.84	0.04081	24.64	0.73	0.27	3.30
30/04/2017	A. Arriba	0.30	38.68	129.73	0.30	129.71	129.81	0.03970	24.98	0.65	0.19	3.30
	A. Abajo	0.37	34.97	95.16	0.37	94.76	95.02	0.04204	24.51	0.70	0.26	3.30
	Eje puente	0.32	27.62	87.55	0.32	87.51	87.70	0.03965	18.55	0.67	0.21	3.30
28/05/2017	A. Arriba	0.26	32.31	123.65	0.26	123.63	124.28	0.04044	18.76	0.58	0.15	3.30
	A. Abajo	0.31	28.47	91.24	0.31	90.87	90.96	0.04158	18.10	0.64	0.20	3.30

Nota: Elaboración propia

4.2. Resultados de los ensayos realizados en laboratorio de suelos

4.2.1. Contenido de humedad de la muestra

El contenido de humedad de la muestra, con el cual se determinó el porcentaje húmedo que contenía, realizado según la Norma NTP 339.127.

Tabla 21:

Porcentajes (%) del contenido de humedad de las muestras extraídas en inmediaciones del Puente Pucalá.

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS		FECHAS DE EXTRACCIÓN			
		01/04/2017	14/04/2017	01/05/2017	28/05/2017
SUSPENSIÓN	AGUAS ABAJO	38.933	47.946	42.547	31.273
	EJE DEL PUENTE	47.515	58.070	55.990	31.583
	AGUAS ARRIBA	58.996	8.204	38.437	29.414
ARRASTRE	AGUAS ABAJO	1.241	28.610	26.749	23.185
	EJE DEL PUENTE	1.019	24.296	29.086	28.517
	AGUAS ARRIBA	4.092	30.356	39.562	30.463

Nota: Elaboración propia

Tabla 22:

Porcentajes (%) del contenido de humedad de las muestras extraídas en inmediaciones del Puente Monsefú - Eten.

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS		FECHAS DE EXTRACCION			
		03/04/2017	16/04/2017	30/04/2017	28/05/2017
SUSPENSION	AGUAS ABAJO	44.243	35.855	31.041	26.750
	EJE DEL PUENTE	39.499	30.519	33.903	37.322
	AGUAS ARRIBA	48.423	27.303	31.000	27.037
ARRASTRE	AGUAS ABAJO	38.423	26.589	30.147	27.526
	EJE DEL PUENTE	31.764	27.151	28.562	25.246
	AGUAS ARRIBA	30.062	25.397	27.470	27.419

Nota: Elaboración propia

En la tabla Nº 21, en inmediaciones del puente Pucalá, el porcentaje de humedad para las tomas en arrastre es menor para las tomas en suspensión, siendo el rango para arrastre de 1.02% - 39.56% y 8.20% - 58.99% para suspensión; lo mismo ocurre en inmediaciones del puente Monsefú – Eten, en la tabla Nº 22 se aprecian porcentajes de 25.39% - 38.42% para arrastre y 26.78% - 48.42% para suspensión.

4.2.2. Análisis Granulométrico por tamizado

Tabla 23:

Diámetros obtenidos de la curva granulométrica de las extracciones en inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten para las ecuaciones por arrastre.

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PUENTES		DIAMETRO	FECHAS DE EXTRACCION			
		D	03/04/2017	16/04/2017	30/04/2017	28/05/2017
PUCALA	AGUAS ABAJO	D40	21.158	0.269	0.474	0.257
		D50	23.217	0.336	0.527	0.294
		D90	37.836	22.484	0.805	15.887
	EJE DEL PUENTE	D40	27.416	0.265	0.174	0.124
		D50	29.229	0.385	0.240	0.142
		D90	38.584	33.432	17.048	0.252
	AGUAS ARRIBA	D40	24.321	0.208	0.177	0.268
		D50	27.364	0.251	0.203	0.293
		D90	43.456	13.982	0.373	0.419
MONSEFU - ETEN	AGUAS ABAJO	D40	0.146	0.277	0.330	0.267
		D50	0.162	0.299	0.371	0.307
		D90	0.248	0.402	0.722	0.724
	EJE DEL PUENTE	D40	0.158	0.283	0.305	0.290
		D50	0.180	0.306	0.330	0.313
		D90	0.349	0.419	0.585	0.458
	AGUAS ARRIBA	D40	0.309	0.370	0.298	0.279
		D50	0.342	0.433	0.320	0.307
		D90	0.672	0.765	0.458	0.558

En la tabla Nº 23 se muestran los diámetros D40, D50 y D90 obtenidos directamente de la curva granulométrica luego de haber realizado el análisis granulométrico por tamizado; datos utilizados en las ecuaciones por arrastre.

Tabla 24:

Diámetros obtenidos de la curva granulométrica de las extracciones en inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten para las ecuaciones por suspensión.

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PUENTES		DIAMETRO	FECHAS DE EXTRACCION			
		D	03/04/2017	16/04/2017	30/04/2017	28/05/2017
PUCALA	AGUAS ABAJO	D50	0.218	0.246	0.226	0.269
		D65	0.275	0.305	0.285	0.316
		D84	0.369	0.398	0.363	0.388
	EJE DEL PUENTE	D50	0.274	0.166	0.174	0.149
		D65	0.317	0.200	0.210	0.183
		D84	0.379	0.253	0.285	0.238
	AGUAS ARRIBA	D50	0.166	0.093	0.302	0.306
		D65	0.197	0.101	0.356	0.347
		D84	0.244	0.337	0.477	0.407
MONSEFU - ETEN	AGUAS ABAJO	D50	0.164	0.304	0.336	0.160
		D65	0.192	0.352	0.391	0.189
		D84	0.236	0.424	0.580	0.231
	EJE DEL PUENTE	D50	0.268	0.219	0.315	0.090
		D65	0.309	0.275	0.366	0.116
		D84	0.369	0.360	0.502	0.184
	AGUAS ARRIBA	D50	0.286	0.307	0.302	0.297
		D65	0.327	0.352	0.336	0.335
		D84	0.386	0.418	0.384	0.390

Nota: Elaboración propia

En la tabla Nº 24 se muestran los diámetros D50, D65 y D84 obtenidos directamente de la curva granulométrica, estos valores fueron utilizados en las ecuaciones para el transporte en suspensión.

En el Anexo Nº 01 se muestras los resultados del análisis granulométrico por tamizado de cada extracción.

4.2.3. Peso específico de la muestra

Los valores mostrados en la siguiente tabla corresponden al peso específico de las muestras de sedimentos extraídas en las diferentes fechas de estudio, estos valores fueron determinados mediante el ensayo de gravedad específica para suelos finos según la Norma NTP 339.131.

A la vez también se determinó el peso específico del material granular retenido en la malla Nº 4, para las muestras por arrastre encontradas en inmediaciones del puente Pucalá, el ensayo realizado de peso específico y absorción según la Norma NTP 400.021.

Tabla 25

Valores de peso específico en g/cm^3, para las muestras extraídas por arrastre y suspensión que pasan la malla Nº 4

Puentes / Fechas	PUENTE PUCALA		PUENTE MONSEFU ETEN	
	ARRASTRE	SUSPENSION	ARRASTRE	SUSPENSION
01/04/17 - 03/04/17	2.54	2.42	2.88	2.34
14/04/17 - 16/04/17	2.55	2.79	2.71	2.82
30/04/17 - 01/05/17	2.76	2.62	2.66	2.65
28/05/2017	2.79	2.46	2.47	2.42

Nota: Elaboración propia

Tabla 26:

Valores de peso específico de los suelos retenidos en la malla Nº4, para las muestras extraídas por arrastre

Puente / Fechas	PUENTE PUCALA
	ARRASTRE
01/04/2017	2.69
14/04/2017	2.82
01/05/2017	2.74
28/05/2017	2.77

Nota: Elaboración propia

Según los resultados mostrados en la tabla Nº 25, se determinó que para el sedimento transportado en arrastre en el puente Pucalá se mantiene en un rango de 2.54 – 2.79 g/cm^3, mientras que para el sedimento transportado en suspensión el rango es de 2.42 – 2.79 g/cm^3; por otro lado, para el puente Monsefú – Eten los rangos de pesos especifico por arrastre y suspensión son de 2.47 – 2.88 g/cm^3 y 2.34 – 2.82 g/cm^3 respectivamente.

La tabla Nº 26, que muestra los pesos específicos del material granular transportado en arrastre en inmediaciones del puente Pucalá se encuentran en un rango de 2.69 – 2.82 g/cm^3.

4.3. Velocidad de caída de la partícula

4.3.1. Velocidad de caída según la Ley de Stokes

La velocidad de caída obtenida por el ensayo de hidrómetro según la Norma NTP 339.128 y según la Ley de Stokes:

$$v\ (cm/s) = \left(\frac{2g\left(\gamma_s - \gamma_f\right)}{9n}\right)\left(\frac{D}{2}\right)^2$$

En las siguientes tablas se muestran las velocidades para cada extracción.

Tabla 27:

Velocidad de caída de la partícula en cm/s, mediante la Ley de Stokes, para las muestras extraídas en inmediaciones del Puente Pucalá.

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS		FECHAS DE EXTRACCIÓN			
		01/04/2017	14/04/2017	01/05/2017	28/05/2017
SUSPENSIÓN	AGUAS ABAJO	0.0416	0.0430	0.0409	0.0430
	EJE DEL PUENTE	0.0319	0.0428	0.0441	0.0416
	AGUAS ARRIBA	0.0337	0.0433	0.0419	0.0423
ARRASTRE	AGUAS ABAJO	-	0.0423	0.0446	0.0425
	EJE DEL PUENTE	-	0.0401	0.0428	0.0406
	AGUAS ARRIBA	-	0.0427	0.0438	0.0435

Nota: Elaboración propia

Tabla 28:

Velocidad de caída partícula en cm/s, mediante la Ley de Stokes, para las muestras extraídas en inmediaciones del Puente Monsefú – Eten.

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS		FECHAS DE EXTRACCIÓN			
		03/04/2017	16/04/2017	30/04/2017	28/05/2017
SUSPENSIÓN	AGUAS ABAJO	0.0300	0.0415	0.0430	0.0425
	EJE DEL PUENTE	0.0335	0.0416	0.0414	0.0367
	AGUAS ARRIBA	0.0384	0.0411	0.0426	0.0436
ARRASTRE	AGUAS ABAJO	0.0343	0.0406	0.0426	0.0450
	EJE DEL PUENTE	0.0366	0.0405	0.0426	0.0431
	AGUAS ARRIBA	0.0416	0.0421	0.0428	0.0453

Nota: Elaboración propia

4.3.2. Velocidad de caída según el método de Rubey

Para corroborar las velocidades determinadas por la ley de Stokes por medio del ensayo de hidrómetro, se realizó el cálculo utilizando el método de Rubey, calculando de la misma manera la velocidad de caída de la partícula en cm/s:

$$w\ (m/s) = F1\sqrt{g.\Delta.D}$$

$$F1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g.\Delta.D^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{g.\Delta.D^3}}$$

F1 se interpreta como un valor adimensional para la velocidad de caída, siendo D el diámetro medio en "m", y v la viscosidad cinemática del agua en "m^2/s".

Tabla 29:

Velocidad de caída de la partícula en m/s, mediante el método de Rubey, para las muestras extraídas en inmediaciones del Puente Pucalá.

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS		FECHAS DE EXTRACCIÓN			
		01/04/2017	14/04/2017	01/05/2017	28/05/2017
SUSPENSIÓN	AGUAS ABAJO	0.0266	0.0361	0.0310	0.0346
	EJE DEL PUENTE	0.0344	0.0221	0.0218	0.0161
	AGUAS ARRIBA	0.0185	0.0088	0.0417	0.0396
ARRASTRE	AGUAS ABAJO	0.4850	0.0445	0.0686	0.0434
	EJE DEL PUENTE	0.5443	0.0500	0.0344	0.0179
	AGUAS ARRIBA	0.5266	0.0335	0.0287	0.0436

Nota: Elaboración propia

Tabla 30:

Velocidad de caída partícula en m/s, mediante el método de Rubey, para las muestras extraídas en inmediaciones del Monsefú - Eten.

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS		FECHAS DE EXTRACCIÓN			
		03/04/2017	16/04/2017	30/04/2017	28/05/2017
SUSPENSIÓN	AGUAS ABAJO	0.0171	0.0451	0.0461	0.0171
	EJE DEL PUENTE	0.0320	0.0320	0.0432	0.0064
	AGUAS ARRIBA	0.0346	0.0458	0.0421	0.0371
ARRASTRE	AGUAS ABAJO	0.0223	0.0427	0.0504	0.0390
	EJE DEL PUENTE	0.0255	0.0435	0.0452	0.0396
	AGUAS ARRIBA	0.0510	0.0587	0.0445	0.0391

Nota: Elaboración propia

Las velocidades de caída de las partículas fueron analizadas por las fórmulas propuestas por Rubey y por la Ley de Stokes (Ensayo del hidrómetro), de ambas ecuaciones se obtuvieron valores con una diferencia considerable, puesto que la "Ley de Stokes es válida en el movimiento de partículas moviéndose a velocidades bajas"; es decir, que estudia el movimiento de las mismas para bajos números de Reynolds (Flujo laminar). Esto no se asemeja al comportamiento hidráulico que presentan los ríos, en este caso: El Río Chancay; por lo tanto, se hizo el estudio de esta investigación empleando la fórmula de Rubey.

4.4. Cuantificación del transporte de sedimentos por arrastre y suspensión

4.4.1. Extracciones realizadas

Las extracciones se realizaron en 4 fechas diferentes, para verificar las variaciones del transporte de sedimento en un período de 2 meses, desde el 01 de abril hasta el 28 de mayo. En las siguientes tablas se muestran los pesos en gramos (gr) del sedimento extraído en intervalos de tiempo de 10 – 15 min.

Tabla 31:

Pesos en gramos de las tomas por arrastre extraídas en inmediaciones del puente Pucalá

Fecha	Eje del Puente	Aguas Abajo	Aguas Arriba
01/04/2017	1000.00	1718.00	1056.00
14/04/2017	2134.50	1073.00	1488.00
01/05/2017	1635.00	3614.00	398.22
28/05/2017	910.00	1203.50	286.70

Nota: Elaboración propia

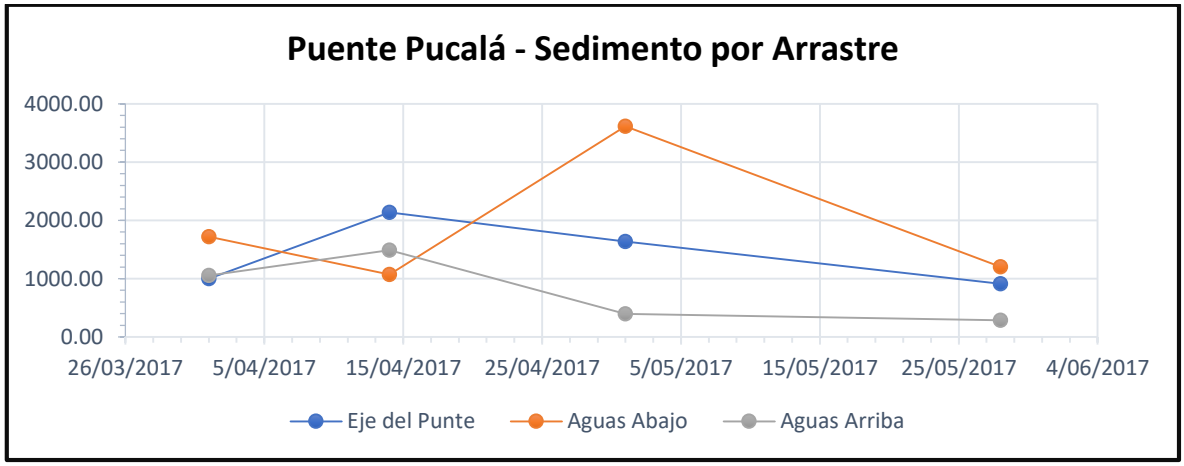


Figura 36: Gráfica de las extracciones por arrastre en inmediaciones del puente Pucalá en un período de 2 meses

Según se muestra en la gráfica, el comportamiento por arrastre asciende en la segunda extracción y en las siguientes es notable su decrecimiento, a excepción de la toma aguas abajo donde en la tercera extracción aumenta al doble su extracción respecto a la anterior.

Tabla 32

Pesos en gramos de las tomas por suspensión extraídas en inmediaciones del puente Pucalá

Fecha	Eje del Puente	Aguas Abajo	Aguas Arriba
01/04/2017	2031.00	846.00	1699.00
14/04/2017	312.63	654.00	251.15
01/05/2017	362.46	619.00	345.60
28/05/2017	182.29	390.72	246.00

Nota: Elaboración propia

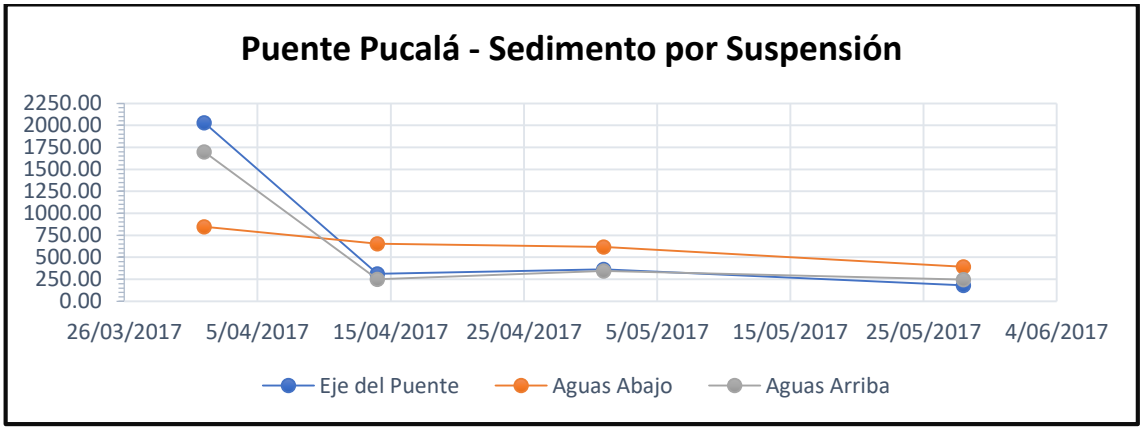


Figura 37: Gráfica de las extracciones por suspensión en inmediaciones del puente Pucalá en un período de 2 meses.

Para el caso del sedimento transportado en suspensión, según se aprecia en el gráfico, su cantidad fue disminuyendo con las siguientes extracciones, para las tomas en el eje del puente y aguas arriba hubo un pequeño aumento en la tercera extracción respecto a la anterior, para posteriormente descender.

Tabla 33:

Pesos en gramos de las tomas por arrastre en inmediaciones del puente Monsefú – Eten.

Fecha	Eje del Puente	Aguas Abajo	Aguas Arriba
03/04/2017	2563.00	1694.00	2963.00
16/04/2017	1864.80	2712.00	4239.00
30/04/2017	1223.50	1597.00	3600.00
28/05/2017	795.00	815.00	1868.00

Nota: Elaboración propia

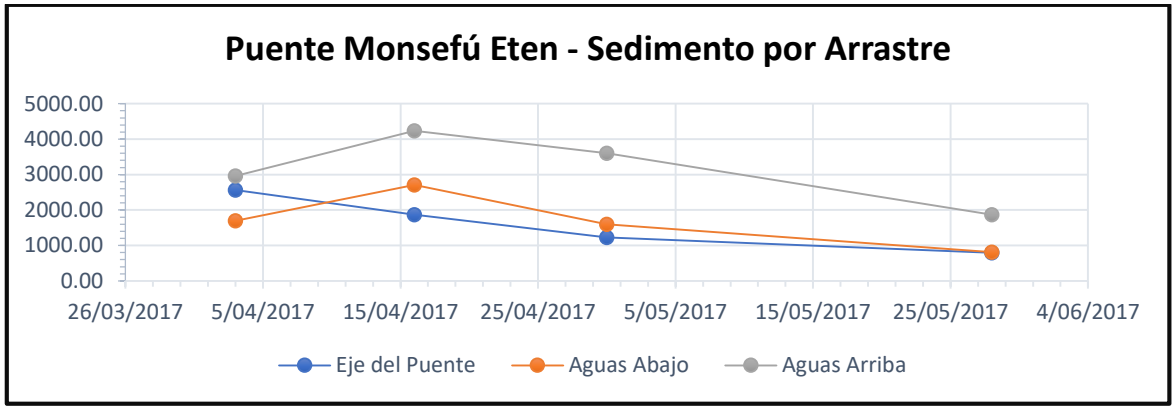


Figura 38: Gráfica de las extracciones por arrastre en inmediaciones del puente Monsefú – Eten en un período de 2 meses.

Para el caso de la toma en el eje del puente su descenso es continuo con cada extracción, a comparación de las tomas aguas arriba y aguas abajo que incrementan en la segunda extracción, y en las siguientes ya es notable su descenso.

Tabla 34:

Pesos en gramos de las tomas por suspensión extraídas en inmediaciones del puente Monsefú – Eten.

Fecha	Eje del Puente	Aguas Abajo	Aguas Arriba
03/04/2017	2297.00	1366.00	1462.00
16/04/2017	479.66	925.00	3553.50
30/04/2017	356.27	865.00	2439.00
28/05/2017	158.26	380.37	1263.50

Nota: Elaboración propia

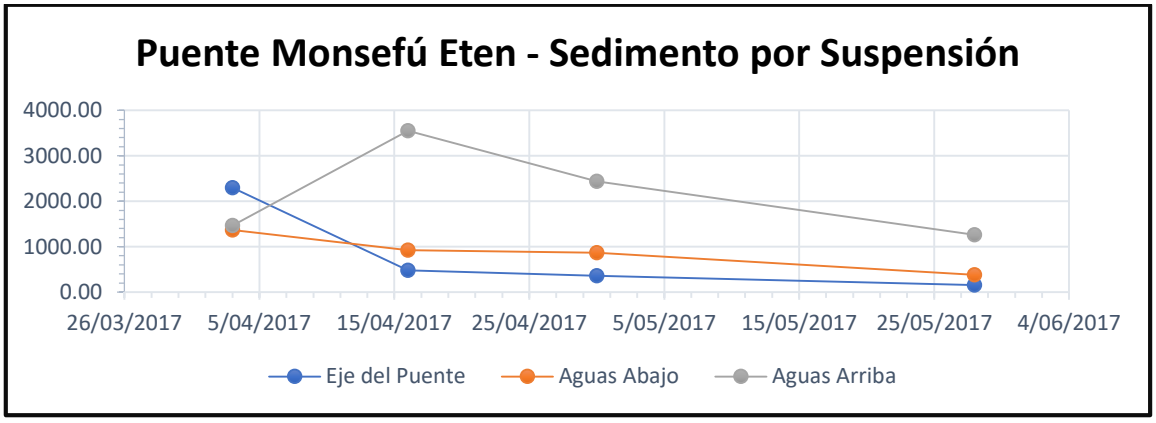


Figura 39: Gráfica de las extracciones por suspensión en inmediaciones del puente Monsefú – Eten en un período de 2 meses.

Según lo mostrado, para la toma en el eje del puente y aguas abajo su descenso es continuo con cada extracción, a comparación de la toma aguas arriba que incrementan en la segunda extracción, y en las siguientes ya es notable su descenso.

4.4.2. Cuantificación en campo del transporte de sedimentos

Para determinar la cantidad de transporte de sedimentos, se utilizó la siguiente ecuación.

$$G = \gamma_s * \frac{Qs}{B} \left(\frac{kg}{s - m}\right)$$

Estos valores se determinaron en función del peso específico de los sedimentos, así como el caudal sólido y el ancho del río.

Se sabe que el caudal sólido es un porcentaje del caudal del río, debido a que por ahora no podemos determinar con exactitud el transporte de sedimentos, éste se determinará para distintos porcentajes del caudal del río en un rango de 10% - 50%, sirviendo como una tabulación para comparar con cada uno de ellos los valores obtenidos por las ecuaciones empíricas, de esta manera obtener cuales son las ecuaciones de mejor ajuste y cuál es el porcentaje real de transporte de sedimento.

Tabla 35:

Transporte de sedimento total (arrastre y suspensión) cuantificado en campo – Puente Pucalá

Fechas de extracción	Ubicación	Porcentajes del caudal sólido respecto al caudal del río					
		10%	20%	30%	40%	50%	
01/04/2017	Eje puente	0.701	1.403	2.104	2.805	3.506	Transporte de sedimentos en kg/m.s
	A. Arriba	0.647	1.294	1.941	2.589	3.236	
	A. Abajo	0.464	0.928	1.392	1.856	2.320	
14/04/2017	Eje puente	0.415	0.831	1.246	1.662	2.077	
	A. Arriba	0.418	0.837	1.255	1.674	2.092	
	A. Abajo	0.472	0.943	1.415	1.886	2.358	
01/05/2017	Eje puente	0.303	0.607	0.910	1.213	1.517	
	A. Arriba	0.300	0.599	0.899	1.198	1.498	
	A. Abajo	0.358	0.717	1.075	1.433	1.792	
28/05/2017	Eje puente	0.279	0.559	0.838	1.118	1.397	
	A. Arriba	0.246	0.492	0.738	0.984	1.231	
	A. Abajo	0.262	0.523	0.785	1.046	1.308	

Nota: Elaboración propia

En esta tabla observamos cómo va disminuyendo la cuantificación de transporte de sedimentos con cada fecha, esto se debe a que con cada extracción el caudal del río y su velocidad iba disminuyendo y con ello el transporte de sedimentos.

Tabla 36:

Transporte de sedimento total (arrastre y suspensión) cuantificado en campo – Puente Monsefú - Eten

Fechas de extracción	Ubicación	Porcentajes del caudal sólido respecto al caudal del río					
		10%	20%	30%	40%	50%	
03/04/2017	Eje puente	0.137	0.274	0.411	0.548	0.685	Transporte de sedimentos en kg/m.s
	A. Arriba	0.118	0.236	0.354	0.472	0.590	
	A. Abajo	0.146	0.291	0.437	0.582	0.728	
16/04/2017	Eje puente	0.100	0.200	0.300	0.401	0.501	
	A. Arriba	0.073	0.147	0.220	0.294	0.367	
	A. Abajo	0.095	0.190	0.284	0.379	0.474	
30/04/2017	Eje puente	0.072	0.144	0.216	0.288	0.360	
	A. Arriba	0.051	0.102	0.153	0.204	0.255	
	A. Abajo	0.068	0.137	0.205	0.274	0.342	
28/05/2017	Eje puente	0.052	0.103	0.155	0.207	0.258	
	A. Arriba	0.037	0.074	0.111	0.147	0.184	
	A. Abajo	0.049	0.097	0.146	0.194	0.243	

Nota: Elaboración propia

En las tablas Nº35 y Nº36 mostradas anteriormente se muestran los valores de la cuantificación de sedimento en campo por arrastre y suspensión en inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú - Eten, estos resultados son determinados en

función al peso específico del material extraído y el caudal unitario del río, teniendo mayor concentración de sedimento en las primeras extracciones.

Debido a que el sedimento está conformado por diferentes materiales cada uno con un peso específico diferente a otro, se tomó el promedio de ellos para el cálculo del transporte de sedimentos en kg/m.s.

Las cantidades determinadas del transporte de sedimento, representa el transporte total, es decir comprende el transporte de arrastre y suspensión.

4.4.3. Cuantificación del transporte de sedimento con las ecuaciones empíricas

Se emplearon las ecuaciones empíricas para determinar la cantidad de transporte de sedimentos por arrastre y suspensión para las inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten; mostrando los resultados en las siguientes tablas.

Tabla 37:

Transporte de sedimentos por arrastre cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Pucalá

Fechas de extracción	Ubicación	Ecuaciones empíricas (kg/m.s)				
		M. - P. y Muller	Duboys y Straub	Schoklistch	Levi	Yalin
01/04/2017	Eje puente	1.515	6.526	1.553	0.484	1.029
	A. Arriba	1.268	6.478	1.436	0.446	1.061
	A. Abajo	1.073	4.587	1.027	0.316	0.709
14/04/2017	Eje puente	1.130	11.616	0.851	0.810	16.030
	A. Arriba	0.961	9.618	0.857	1.527	12.663
	A. Abajo	1.157	11.576	0.963	0.901	16.612
01/05/2017	Eje puente	0.718	8.090	0.632	0.799	8.888
	A. Arriba	0.342	6.203	0.627	4.034	5.713
	A. Abajo	0.437	9.426	0.750	2.225	8.864
28/05/2017	Eje puente	0.298	5.317	0.599	4.934	3.993
	A. Arriba	0.281	6.257	0.526	2.240	5.522
	A. Abajo	0.689	8.628	0.559	0.739	9.492

Nota: Elaboración propia

La tabla mostrada anteriormente nos muestran la cuantificación del transporte de sedimentos en kg/m.s, determinado mediante ecuaciones empíricas, para el caso del río en inmediaciones del puente Pucalá.

Cada ecuación propuesta por diferente autor depende de los diámetros obtenidos del análisis granulométrico como los mostrados en las tablas 23 y 24, así como los parámetros hidráulicos del río y sus valores de peso específico, lo que conllevó a los siguientes resultados.

Tabla 38:

Transporte de sedimentos total en suspensión cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Pucalá

Fechas de extracción	Ubicación	Ecuaciones empíricas (kg/m.s)		
		Brooks	Chang - Brooks	Bagnold - Brooks
01/04/2017	Eje puente	0.346	0.136	4.157
	A. Arriba	0.223	0.138	4.413
	A. Abajo	0.122	0.093	3.558
14/04/2017	Eje puente	0.021	0.306	3.210
	A. Arriba	0.001	0.331	2.477
	A. Abajo	0.031	0.288	2.260
01/05/2017	Eje puente	0.018	0.182	2.180
	A. Arriba	0.062	0.290	1.980
	A. Abajo	0.052	0.164	2.851
28/05/2017	Eje puente	0.009	0.339	2.217
	A. Arriba	0.025	0.151	1.597
	A. Abajo	0.028	0.048	1.581

Nota: Elaboración propia

La tabla Nº 38 muestra los valores obtenidos con el cálculo de las ecuaciones para el transporte en suspensión, siendo la sumatoria del transporte de fondo en suspensión y del transporte de lavado.

Tabla 39:

Transporte de sedimentos por arrastre cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Monsefú – Eten

Fechas de extracción	Ubicación	Ecuaciones empíricas (kg/m.s)				
		M. - P. y Muller	Duboys y Straub	Schoklistch	Levi	Yalin
03/04/2017	Eje puente	0.150	3.787	0.246	1.173	2.116
	A. Arriba	0.141	10.415	0.212	0.431	2.342
	A. Abajo	0.146	3.710	0.265	1.519	2.029

16/04/2017	Eje puente	0.110	8.251	0.170	0.372	1.812
	A. Arriba	0.093	4.747	0.127	0.115	1.357
	A. Abajo	0.106	7.935	0.160	0.363	1.722
30/04/2017	Eje puente	0.092	5.661	0.127	0.174	1.367
	A. Arriba	0.064	3.661	0.089	0.103	0.912
	A. Abajo	0.092	5.041	0.122	0.129	1.337
28/05/2017	Eje puente	0.074	4.216	0.099	0.118	1.045
	A. Arriba	0.057	2.864	0.070	0.057	0.732
	A. Abajo	0.077	4.169	0.094	0.087	1.022

Nota: Elaboración propia

Tabla 40:

Transporte de sedimento total en suspensión cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Monsefú – Eten

Fechas de extracción	Ubicación	Ecuaciones empíricas (kg/m.s)		
		Brooks	Chang - Brooks	Bagnold - Brooks
03/04/2017	Eje puente	0.284	0.082	0.810
	A. Arriba	0.632	0.036	0.558
	A. Abajo	0.061	0.107	0.832
16/04/2017	Eje puente	0.154	0.123	0.381
	A. Arriba	5.441	0.091	0.239
	A. Abajo	0.615	0.127	0.286
30/04/2017	Eje puente	0.071	0.057	0.209
	A. Arriba	0.394	0.034	0.138
	A. Abajo	0.143	0.035	0.183
28/05/2017	Eje puente	0.001	0.037	0.230
	A. Arriba	0.178	0.007	0.115
	A. Abajo	0.007	0.007	0.166

Nota: Elaboración propia

4.5. Selección de la ecuación de mejor ajuste al río Chancay

La selección de las ecuaciones de mejor ajuste al río Chancay tomando las inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten, se realizó comparando cuál de los resultados obtenidos mediante el cálculo de las ecuaciones planteadas es la que mejor se ajusta.

Los valores obtenidos por las ecuaciones para las tomas por arrastre se sumaron con los valores obtenidos de las ecuaciones de suspensión, para poder realizar la comparación con lo cuantificado en campo el cual son valores de transporte total (arrastre + suspensión).

Como se mostró anteriormente en las tablas 35 y 36 se ha cuantificado considerando el transporte de sedimentos en distintos porcentajes (10% - 50%), para cada una de estas condiciones se hará la comparación con las sumatorias de las ecuaciones empíricas.

Las ecuaciones que presenten menor porcentaje de variación en cada una de las condiciones serán las que resulten de mejor ajuste, posterior a ello se podrá determinar con exactitud la cantidad y porcentaje del transporte de sedimentos.

El cálculo de los porcentajes de variación fue determinado de la siguiente manera:

Tomando como ejemplo la primera extracción realizada el 01/04/17, para inmediaciones del Puente Pucalá (Ubicación: Eje del puente):

- Sedimento cuantificado en campo (30%): 2.104 kg/m.s
- Cuantificación por ecuaciones “Schoklistch + Brooks”: 1.899 kg/m.s

$$Porcentaje\ de\ variación\ (\%) = \frac{(2.104 - 1.899)(100)}{2.104}$$

$$Porcentaje\ de\ variación\ (\%) = 9.74\ \%$$

$$Porcentaje\ de\ variación - Schoklistch + Brook\ (\%) = 9.74\ \%$$

De esa manera se determinó para cada extracción realizada el porcentaje de variación respecto a su valor determinado en campo, teniendo en cuenta a la vez las consideraciones indicadas por cada uno de los autores en cada una de las ecuaciones desarrolladas. En las siguientes tablas se muestran las ecuaciones que obtuvieron menores porcentajes de variación, lo que conlleva a seleccionar cuales son las de mejor ajuste:

Tabla 41:

Porcentajes de variación del transporte de sedimento total cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Pucalá

Ecuaciones para el transporte total	Porcentajes de sedimento cuantificado en campo					
	10%	20%	30%	40%	50%	
M. P y Muller / Brooks	111.16	30.16	29.61	47.21	57.77	Porcentajes de variación (%)
M. P y Muller / Chang - Brooks	152.08	30.78	19.35	36.98	49.58	
M. P y Muller / Bagnold - Brooks				117.79	74.24	

Schoklistch / Brooks	127.84	13.92	24.05	43.04	54.43
Schoklistch / Chang - Brooks	168.76	34.38	12.74	32.81	46.25
Schoklistch / Bagnold - Brooks				121.97	77.57
Levi / Brooks			121.68	96.88	84.17
Levi / Chang - Brooks			129.15	100.01	85.21

Nota: Elaboración propia

Las celdas sombradas corresponden a los porcentajes de variación más aceptables, de acuerdo con cada una de las condiciones de los cuantificado en campo.

Tabla 42:

Porcentajes de variación del transporte de sedimento total cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Monsefú - Eten

Ecuaciones para el transporte total	Porcentajes de sedimento cuantificado en campo					
	10%	20%	30%	40%	50%	
M. P y Muller / Chang - Brooks	97.36	13.92	34.21	50.66	60.53	Porcentajes de variación (%)
M. P y Muller / Bagnold - Brooks		153.83	69.22	27.10	16.91	
Schoklistch / Chang - Brooks	150.30	25.15	16.72	37.42	49.94	
Schoklistch / Bagnold - Brooks		180.30	86.87	40.15	17.90	
Levi / Chang - Brooks		120.10	64.03	51.49	48.05	
Levi / Bagnold - Brooks				86.26	53.11	

Nota: Elaboración propia

De la misma manera para este caso se presentan de manera sombrada las ecuaciones con menor porcentaje de variación.

Teniendo las ecuaciones de Schoklistch y Meyer, Peter – Muller como ecuaciones de mejor ajuste para arrastre mientras para suspensión las ecuaciones de Brooks y Chang – Brooks.

Conociendo los valores obtenidos por cada ecuación determinamos el caudal sólido del río y el porcentaje de transporte de sedimentos.

Finalmente, los valores del caudal solido (m^3/s), para cada uno de los puentes en estudio se determinó de la siguiente manera:

$$Q_S = \frac{T.S. \ * B}{\gamma_S}$$

Qs: Caudal Sólido transportado en toda la sección del río (m^3/s).

T.S.: Transporte de sedimentos cuantificado con las ecuaciones de mejor ajuste (kg/ms)

B: Ancho del río (m)

γs: Peso específico de la muestra (kg/m^3)

Mostrándose los resultados en las siguientes tablas; de cada una de las ecuaciones que resultaron de mejor ajuste al río, para cada tramo estudiado.

Tabla 43:

Caudal sólido total transportado en arrastre cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Pucalá

Fechas de extracción	Ubicación	Caudal solido	
		Schoklistch kg/m.s	Schoklistch m^3/s
03/04/2017	Eje puente	1.553	39.410
	A. Arriba	1.436	39.516
	A. Abajo	1.027	39.223
16/04/2017	Eje puente	0.851	16.566
	A. Arriba	0.857	16.616
	A. Abajo	0.963	16.491
30/04/2017	Eje puente	0.632	10.407
	A. Arriba	0.627	10.502
	A. Abajo	0.750	10.377
28/05/2017	Eje puente	0.599	8.144
	A. Arriba	0.526	8.189
	A. Abajo	0.559	8.029

Nota: Elaboración propia

Tabla 44:

Caudal sólido total transportado en suspensión cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Pucalá

Fechas de extracción	Ubicación	Caudal solido	
		Brooks kg/m.s	Brooks m^3/s
03/04/2017	Eje puente	0.346	9.486
	A. Arriba	0.223	6.630
	A. Abajo	0.122	5.035

16/04/2017	Eje puente	0.021	0.393
	A. Arriba	0.001	0.019
	A. Abajo	0.031	0.511
30/04/2017	Eje puente	0.018	0.311
	A. Arriba	0.062	1.089
	A. Abajo	0.052	0.755
28/05/2017	Eje puente	0.009	0.139
	A. Arriba	0.025	0.441
	A. Abajo	0.028	0.456

Nota: Elaboración propia

Tabla 45:

Caudal sólido total transportado en arrastre cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Monsefú - Eten

Fechas de extracción	Ubicación	Caudal solido	
		M. P. Muller kg/m.s	M. P. Muller m^3/s
03/04/2017	Eje puente	0.150	5.896
	A. Arriba	0.141	6.471
	A. Abajo	0.146	5.390
16/04/2017	Eje puente	0.110	3.869
	A. Arriba	0.093	4.527
	A. Abajo	0.106	3.943
30/04/2017	Eje puente	0.092	3.148
	A. Arriba	0.064	3.129
	A. Abajo	0.092	3.293
28/05/2017	Eje puente	0.074	2.633
	A. Arriba	0.057	2.874
	A. Abajo	0.077	2.841

Nota: Elaboración propia

Tabla 46:

Caudal sólido total transportado en suspensión cuantificado con las ecuaciones empíricas – Puente Monsefú - Eten

Fechas de extracción	Ubicación	Caudal solido	
		Chang - Brooks kg/m.s	Chang - Brooks m^3/s
03/04/2017	Eje puente	0.082	3.973
	A. Arriba	0.036	2.036
	A. Abajo	0.107	4.869
16/04/2017	Eje puente	0.123	4.158

	A. Arriba	0.091	4.257
	A. Abajo	0.127	4.540
30/04/2017	Eje puente	0.057	1.954
	A. Arriba	0.034	1.665
	A. Abajo	0.035	1.255
28/05/2017	Eje puente	0.037	1.342
	A. Arriba	0.007	0.360
	A. Abajo	0.007	0.263

Nota: Elaboración propia

Estos valores del caudal sólido por arrastre y suspensión mostrados en las tablas anteriores se tendrán en cuenta para cuando se realice la proyección y/o diseño de alguna estructura hidráulica en el río Chancay, siendo estos resultados de las ecuaciones de mejor ajuste obtenidas en este estudio.

En las tablas 47 y 48 que se muestran a continuación se determinaron los porcentajes del transporte de sedimentos en el Río Chancay para las inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten.

Tabla 47:

Porcentaje de transporte de sedimentos por arrastre y suspensión para inmediaciones del Puente Pucalá

Fechas de extracción	Ubicación	Porcentaje del transporte de sedimentos				
		Gasto liquido del rio m^3/s	Gasto solido - Arrastre m^3/s	Gasto solido - Suspensión m^3/s	% Arrastre	% Suspensión
03/04/2017	Eje puente	184.877	39.410	9.486	21.317	5.131
	A. Arriba	185.004	39.516	6.630	21.360	3.584
	A. Abajo	184.142	39.223	5.035	21.300	2.734
16/04/2017	Eje puente	79.324	16.566	0.393	20.884	0.496
	A. Arriba	79.615	16.616	0.019	20.871	0.023
	A. Abajo	79.201	16.491	0.511	20.822	0.645
30/04/2017	Eje puente	51.134	10.407	0.311	20.352	0.608
	A. Arriba	51.374	10.502	1.089	20.443	2.120
	A. Abajo	50.762	10.377	0.755	20.443	1.487
28/05/2017	Eje puente	40.356	8.144	0.139	20.181	0.343
	A. Arriba	40.702	8.189	0.441	20.120	1.083
	A. Abajo	39.905	8.029	0.456	20.119	1.142

Nota: Elaboración propia

Según lo observado en la tabla, para las inmediaciones del Puente Pucalá el transporte por arrastre es de un 20.70% mientras que para el transporte en suspensión es de un 2.00%.

Tabla 48:

Porcentaje de transporte de sedimentos por arrastre y suspensión para inmediaciones del Puente Monsefú - Eten

Fechas de extracción	Ubicación	Porcentaje del transporte de sedimentos				
		Gasto liquido del rio m^3/s	Gasto solido - Arrastre m^3/s	Gasto solido - Suspensión m^3/s	% Arrastre	% Suspensión
03/04/2017	Eje puente	59.488	5.896	3.973	9.911	6.678
	A. Arriba	59.841	6.471	2.036	10.814	3.403
	A. Abajo	59.333	5.390	4.869	9.084	8.206
16/04/2017	Eje puente	34.521	3.869	4.158	11.208	12.044
	A. Arriba	35.018	4.527	4.257	12.927	12.155
	A. Abajo	34.551	3.943	4.540	11.413	13.141
30/04/2017	Eje puente	24.645	3.148	1.954	12.773	7.929
	A. Arriba	24.981	3.129	1.665	12.526	6.667
	A. Abajo	24.513	3.293	1.255	13.432	5.120
28/05/2017	Eje puente	18.549	2.633	1.342	14.193	7.234
	A. Arriba	18.765	2.874	0.360	15.315	1.917
	A. Abajo	18.096	2.841	0.263	15.701	1.455

Nota: Elaboración propia

Según lo observado en la tabla, para las inmediaciones del Puente Monsefú - Eten el transporte por arrastre es de un 12.50% mientras que para el transporte en suspensión es de un 7.16%.

CAPÍTULO V
PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

5.1. Descripción:

Como medida de prevención para salvaguardar las estructuras, ante avenidas máximas por la posible amenaza del Fenómeno del niño que puede presentarse entre los meses de agosto y diciembre, según los reportes de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), además de la acumulación de sedimento ya encontrada en la zona y el transporte dejado por las lluvias del Niño costero, se pretende realizar una limpieza del cauce, removiendo la sedimentación existente para permitir el libre curso del agua en el río

Para lo cual se observó la importancia de plantear la siguiente propuesta:

DESCOLMATACIÓN DEL RÍO CHANCAY EN LAS INMEDIACIONES DE LOS PUENTES PUCALÁ Y MONSEFÚ - ETEN, PROVINCIA DE CHICLAYO – LAMBAYEQUE.

El planteamiento de la propuesta en mención inicia con la obtención del caudal de diseño del Río Chancay, el valor obtenido del caudal de diseño fue un parámetro determinante en la elaboración de la propuesta; a partir del caudal de diseño se pudo calcular el ancho estable de la sección del Río Chancay para las inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten. Una vez determinado el ancho estable se halló la socavación total producida en ambos lugares con el fin de prever la sección de corte adecuada para la descolmatación en ambas zonas.

El estudio hidrológico del Río Chancay empleó las descargas máximas anuales de la Estación Hidrométrica Raca Rumi, siendo un total de 52 registros desde 1966 – 2017, la fuente de información empleada fue obtenida del SNIRH (Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos) del ANA (Autoridad Nacional del Agua).

Tabla 49:

Descargas Máximas Anuales – Estación Bocatoma Raca Rumi (m^3/s)

Año	Q máx	Año	Q máx
1966	101.60	1992	142.4
1967	155.75	1993	322.23
1968	78.74	1994	218.65
1969	138.24	1995	130.12
1970	193.75	1996	166.05
1971	373.50	1997	119.66
1972	278.15	1998	313.75
1973	211.75	1999	193.16
1974	158.84	2000	197.72
1975	432.06	2001	249.05
1976	875.03	2002	231.88
1977	214.00	2003	149.95
1978	137.41	2004	138.36
1979	162.05	2005	182.55
1980	86.37	2006	267.67
1981	174.11	2007	162.41
1982	164.18	2008	347.16
1983	784.86	2009	357.45
1984	223.05	2010	230.45
1985	51.28	2011	214.39
1986	191.10	2012	327.52
1987	175.92	2013	123.46
1988	117.54	2014	153.17
1989	235.94	2015	267.2
1990	113.07	2016	253.38
1991	158.58	2017	308.62

Nota: Elaboración propia.

5.2. Estudio Hidráulico e Hidrológico:

5.2.1. Análisis de consistencia

Recopilada la información hidrométrica, se efectuó el análisis de consistencia con la finalidad de evaluar los registros proporcionados por la Estación Raca Rumi. Según Villón, M (2005), muchas veces la información hidrológica está expuesta a la no homogeneidad e inconsistencia, por lo tanto, su estudio es fundamental para determinar posibles errores sistemáticos durante la toma de datos.

El análisis de consistencia efectuado en el Río Chancay determinó corregir los caudales proporcionados por la Estación Raca Rumi, cuyos resultados se muestran a continuación:

Tabla 50:

Caudales corregidos (m3/s) – Estación Hidrométrica Raca Rumi.

Año	Q Corr.	Año	Q Corr.
1966	260.37	1992	165.99
1967	174.10	1993	126.00
1968	216.58	1994	207.29
1969	165.32	1995	160.70
1970	191.13	1996	173.91
1971	130.57	1997	153.73
1972	251.07	1998	125.84
1973	205.63	1999	192.29
1974	173.69	2000	193.35
1975	142.03	2001	228.96
1976	238.40	2002	215.28
1977	206.14	2003	171.79
1978	166.24	2004	163.70
1979	175.15	2005	185.17
1980	230.62	2006	242.33
1981	180.23	2007	173.77
1982	173.79	2008	128.13
1983	219.82	2009	128.70
1984	209.95	2010	215.60
1985	161.53	2011	204.78
1986	191.97	2012	125.45
1987	180.29	2013	155.78
1988	153.36	2014	173.26
1989	217.59	2015	243.61
1990	282.35	2016	231.54
1991	175.18	2017	279.79

Nota: Elaboración propia.

5.2.2. Pruebas de bondad de ajuste

Con los caudales corregidos por el análisis de consistencia, posteriormente se realizaron las pruebas de bondad de ajuste empleando la prueba Kolmogorov – Smirnov (K-S); este análisis se efectuó con la finalidad de comprobar que las frecuencias empíricas de los registros hidrométricos corregidos por el análisis de consistencia se ajusten a una distribución normal, analizándose de la misma manera para las probabilidades según Weibull, Hazen, California y Tukey. (El procedimiento detallado se observa en el anexo N° 06.02).

El cálculo del Δ crítico para la prueba K-S, por ser 52 registros hidrométricos (N>35) y con un nivel de significación de 0.05, se empleó la siguiente ecuación:

$$\Delta crítico = \frac{1.36}{\sqrt{N}}$$

$$\Delta crítico = 0.1886$$

Tabla 51:

Valores de Δ máximo según Weibull, Hazen, California y Tukey.

Valores de Δmax			Δ crítico
Δmax según Weibull	0.1107	<	0.1886
Δmax según Hazen	0.1102		
Δmax según California	0.1198		
Δmax según Tukey	0.1231		

Nota: Elaboración propia.

Se observa que el mayor Δ tabular es el calculado empleando la probabilidad según Tukey (Δ max = 0.1231), sin embargo, para todos los casos el Δ tabular es menor que el Δ crítico de Kolmogorov – Smirnov, lo que significa que el ajuste es bueno a un nivel de 0.05 de significación.

Por lo tanto, por ser el método de Hazen el que presenta el menor Δ tabular calculado (Δmáx. = 0.1102), se empleó este método de periodo de retorno para el cálculo del caudal de diseño en los métodos estadísticos.

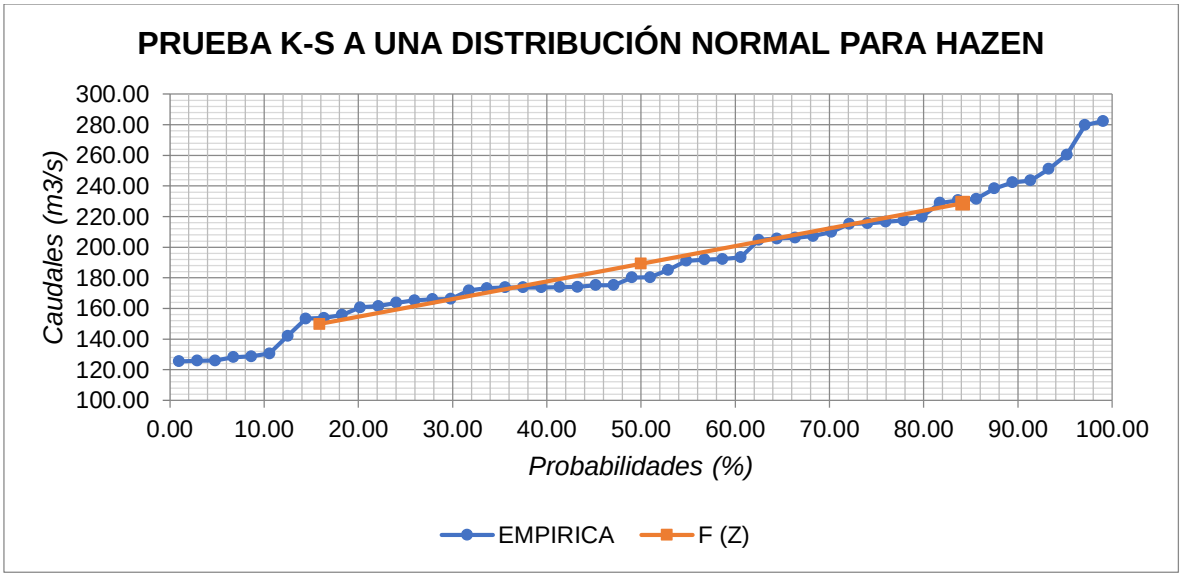


Figura 40: Prueba K-S a una distribución normal para Hazen

5.2.3. Selección del período de retorno

El periodo de retorno de una creciente determinada, se determinó teniendo en cuenta la probabilidad de falla para la vida útil de la estructura, así como el riesgo de falla admisible, mediante la siguiente ecuación de acuerdo con el Manual de Hidrología del MTC.

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^{n}$$

El Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del MTC, en su capítulo III establece los siguientes valores para las inmediaciones de un puente:

- Riesgo admisible 25%
- Vida útil a considerar (n) 40 años

$$25\% = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^{40}$$

Tr = 139.54 años

Tr = 150 años (Periodo de retorno utilizado)

5.2.4. Análisis estadístico de datos hidrológicos

La estimación de los caudales máximos para distintos períodos de retorno se realizó por medio de los métodos de Levediev, Nash, Gamma – 2P, Log Pearson tipo III y Gumbel.

Para cada método se realizó una serie de datos estadísticos, los cuales se muestra con mayor detalle en el Anexo Nº 06.03. Plasmando en resumen la siguiente tabla.

Tabla 52:

Caudales de diseño para los distintos períodos de retorno

T (años)	GUMBEL Qd (m3/s)	LEVEDIEV Qd (m3/s)	NASH Qd (m3/s)	PEARSON III Qd (m3/s)	GAMMA - 2P Qd (m3/s)
5	263.86	224.63	228.78	220.74	222.69
10	287.38	247.78	252.06	241.81	240.63
25	318.46	274.36	281.65	265.69	263.64
50	341.97	290.98	303.72	282.14	279.03
100	365.48	308.18	325.71	297.61	291.58
150	**379.24**	**319.05**	**338.57**	**304.96**	**300.18**
200	389.00	324.65	347.70	312.49	304.61
500	420.08	350.66	376.80	324.36	312.25

Nota: Elaboración propia

5.2.5. Selección del caudal de diseño

Para la selección del caudal de diseño para un período de retorno de 150 años, de graficaron los resultados de los métodos efectuados, junto a la curva de registros.

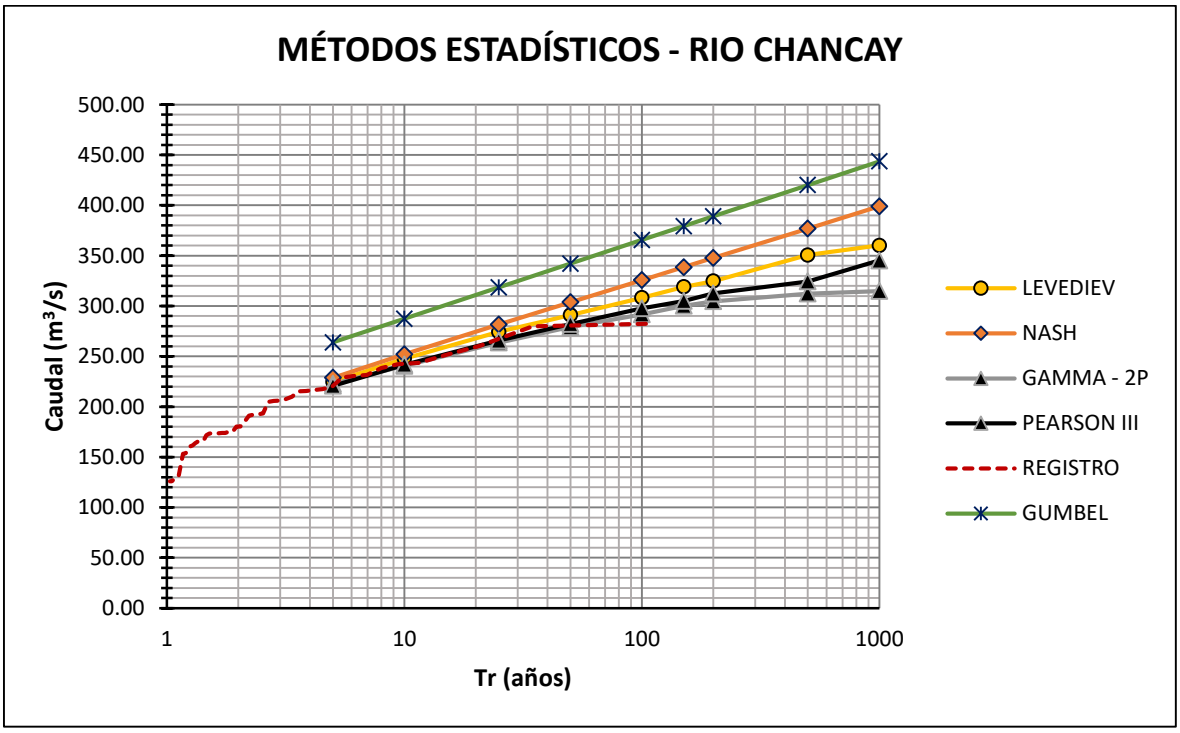


Figura 41: Graficas de los métodos empleados y curva de registros históricos

El método seleccionado será aquel que tenga mejor tendencia respecto a la curva de registros históricos, en este caso se obtuvo por el método de Gamma 2 Parámetros, un caudal de 300.18 m^3/s para un período de retorno de 150 años.

5.2.6. Ancho estable del río

Se realizó la verificación del ancho estable del Río Chancay para inmediaciones del Puente Pucalá y Monsefú – Eten, mediante las ecuaciones de Petits, Simons y Henderson, Blench, Altunin, Maza – Cruickshank, teniendo en cuenta el caudal de diseño obtenido. Ver detalle de cálculos en el Anexo Nº 06.04.

Tabla 53:

Ancho estable de la sección para las inmediaciones del Puente Pucalá

Métodos utilizados	B (m)
Método de Petits	76.93
Método de Simons y Henderson	73.63
Método de Blench	108.63
Método de Altunin	116.14
Maza – Cruickshank	69.53
Recomendación Práctica	70.00

Nota: Elaboración propia

Tabla 54:

Ancho estable de la sección para las inmediaciones del Puente Monsefú - Eten

Métodos utilizados	B (m)
Método de Petits	76.93
Método de Simons y Henderson	98.76
Método de Blench	108.63
Método de Altunin	99.33
Maza – Cruickshank	64.56
Recomendación Práctica	70.00

Nota: Elaboración propia

Para las inmediaciones del puente Pucalá se estableció un ancho estable de 90 m ideal para la topografía que presenta, manteniendo la misma pendiente.

Para el caso de las inmediaciones del puente Monsefú – Eten, se planteó un ancho de 100 m, de la misma manera se ajusta a la topografía existente.

5.2.7. Socavación del cauce

a. Socavación Local

Debido a que la socavación de un río no puede ser calculada con exactitud, se estiman valores de proximidad obtenidos por medio de fórmulas empíricas, con datos reales del río como son el caudal, material del cauce entre otros parámetros.

Se determinaron las profundidades de socavación local para los pilares de los puentes estudiados, para este caso se utilizaron las ecuaciones de Niel, Larras, Breusers, Froelich, para un período de retorno de 500 años según el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje.

Tabla 55:

Profundidades de socavación para los pilares del puente Pucalá.

Métodos utilizados	ys (m)
Método de Neil	3.32
Método de Larras	1.64
Método de Breusers	2.10
Método de Froehlich	2.07

Nota: Elaboración propia

Para el caso del puente Pucalá, se determinó que la profundidad de socavación es de 2.05 m, siendo el promedio de los valores medios. Permitiendo descolmatar a 2.50 m por encima de la cimentación.

Tabla 56:

Profundidades de socavación para los pilares del puente Monsefú - Eten.

Métodos utilizados	ys (m)
Método de Neil	3.52
Método de Larras	2.03
Método de Breusers	2.80
Método de Froehlich	2.99

Nota: Elaboración propia

Para el caso del puente Monsefú – Eten, se determinó que la profundidad de socavación es de 2.72 m, siendo el promedio de los valores medios. Permitiendo descolmatar a 4.20 m por encima de la cimentación.

b. Socavación General

Se determinó la socavación general en el río para cada zona de estudio, posterior a la descolmatación del río; utilizando el método de Lischtvan – Levedieb; para ello se tuvo en cuenta los cálculos realizados anteriormente como la sección estable del cauce, la velocidad de la corriente y un tirante de diseño. Además de contar con un suelo no cohesivo; conformado mayormente por arenas.

Los parámetros hidráulicos se obtuvieron de acuerdo con las secciones propuestas en el ítem siguiente; con un caudal de 312.25 m^3/s, determinado para un período de retorno de 500 años según el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje.

Tabla 57:

Profundidades de socavación general para las inmediaciones de los Puentes Pucalá y Monsefú - Eten

Tramos de estudio	ds (m)
Puente Pucalá	1.00
Puente Monsefú - Eten	2.10

Nota: Elaboración propia

5.2.8. Sección propuesta de descolmatación

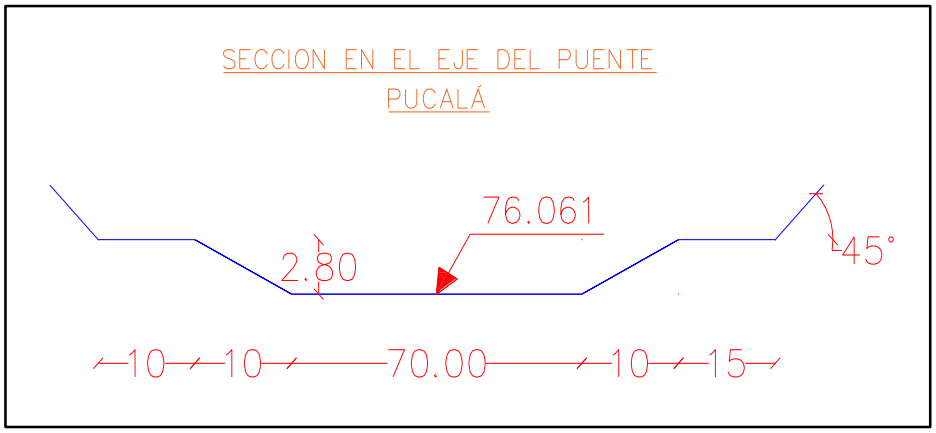


Figura 42: Sección para la Ejecución de descolmatación en inmediaciones del Puente Pucalá

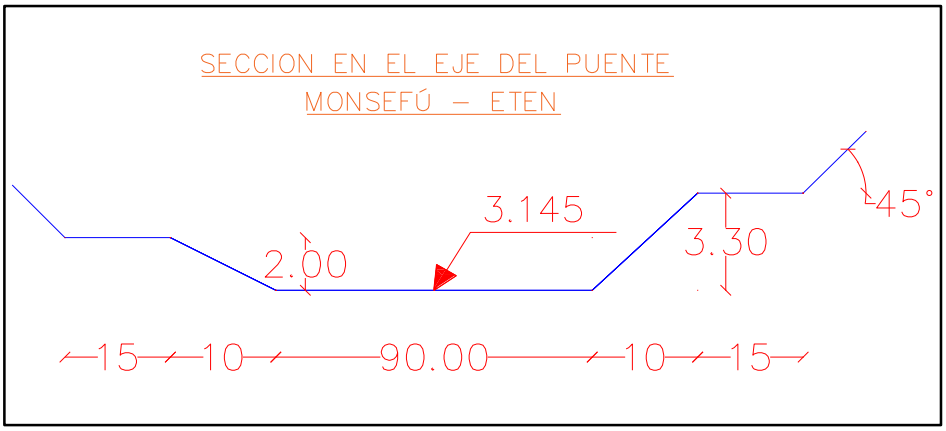


Figura 43: Sección para la ejecución de descolmatación en inmediaciones del puente Monsefú - Eten

Las imágenes mostradas anteriormente corresponden a las secciones representativas de la descolmatación, con estas secciones planteadas se pretende realizar una limpieza del cauce, eliminando la acumulación de sedimento existente en la zona, permitiendo al río un libre curso evitando posibles desbordes ante la amenaza del Fenómeno del Niño. Esta acción se realizará manteniendo la pendiente existente, en un kilómetro de longitud, 500 metros aguas arriba y 500 metros aguas abajo del eje del puente, tanto para el puente Pucalá y Monsefú – Eten, con el fin de salva guardar la estructura.

5.3. Estudio de Impacto Ambiental

El estudio de impacto ambiental realizado mediante la matriz de Luna Leopold, conllevó a obtener un impacto positivo, apreciando detalladamente los resultados en el Anexo Nº 08 y en las siguientes imágenes.

Acciones	Factores		Caracteristicas fisicas y quimicas											Condiciones bilogicas					Factores culturales								SINTESIS			
			Tierra		Agua				Atmosfera		Procesos			Flora		Fauna			Uso tierra		Recreacion			Interes estético			Nº de interacciones		Σ	
			Suelos	Forma de terreno	Superficial	Subterránea	Calidad del agua	Temperatura	Clima	Temperatura	Erosión	Sedimentación	Estabilidad de taludes	Productos agricolas	Plantas acuaticas	Animales terrestres	Peces y moluscos	Insectos	Vida silvestre	Agricultura	Pesca	Navegacion por placer	Salidas al campo	Calidad vida silvestre	Calidad espacio abierto	Diseño del paisaje	-	+	-	+
Modificacion del regimen	Modificacion del habitat			+10/10	+5/5	+5/5		-4/2				+10/10	+3/7		-8/5	-8/8	-5/8	-8/5	-8/8					-8/8	+8/8	+6/5	7	7	49/44	47/50
	Alteracion de la cobertura vegetal del suelo		-5/5	-5/5							+6/8	+8/8		-8/5		-5/5		-5/5	-5/5	-8/8				-5/5			8	2	46/43	14/16
	Alteración del flujo de agua subterranea			+6/8		+6/8		-4/2																			1	2	4/2	12/16
	Control de rios y modificacion de flujo			+10/10	+8/9	+8/9	-2/5	-4/2			+8/9	+10/10	+5/7	-4/5	-4/5	-5/5	-5/8		-6/6	-4/5	-2/6			-6/6	+8/8	+6/5	10	8	42/53	63/67
	Ruido y vibraciones		-8/8		-7/7	-7/7			-5/7							-6/6	-6/6		-6/6		-4/5	-6/6	-6/6	-4/5			11	0	65/69	0/0
Transformacion del terrreno y construccion	Caminos y senderos		-4/5	-4/5										-5/7									-5/6				4	0	18/23	0/0
	Corte y relleno		+7/8	+7/8		+8/9		-4/2			+8/9	+10/10	+5/7	-4/6	-8/5	-5/5	-5/8		-6/6	-4/6	-2/6	-6/6	-6/6	-4/5	+8/8	+6/5	11	8	54/61	59/64
	Excavacion de superficie		+5/8	+5/8							+8/9	+10/10	+5/7	-4/6		-5/5		-5/5	-6/6	-4/6			-6/6	-4/5	+8/8	+6/5	7	7	34/39	47/55
Modificacion del terreno	Control de erosion		+8/9	+8/9							+8/9	+8/10	+6/8							-4/6							1	5	4/6	38/45
	Paisajismo			+7/8	+6/8						+9/9	+10/10	+6/8	-6/6		-4/5			-4/5	-6/6	-2/6	+4/6	+4/6	-4/5	+9/9	+8/8	6	9	26/33	63/72
Accidentes	Falla operacional		-4/6	-5/6	-7/8	-7/8	-8/8	-3/5	-5/7	-2/4						-6/6	-6/6		-6/6		-4/5	-6/6	-6/6	-4/5	-5/5		16	0	84/97	0/0
Sintesis	Nº de interacciones	-	4	3	2	2	2	5	2	1	0	0	0	6	3	8	5	3	8	6	5	3	5	8	1	0	82			
		+	3	7	3	4	0	0	0	0	6	7	6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	5	5		48		
	Σ	-	21/24	14/16	14/15	14/15	10/13	19/13	10/14	2/4	0/0	0/0	0/0	31/35	20/15	44/45	27/36	18/15	47/48	30/37	14/28	18/18	29/30	39/44	5/5	0/0			426/470	
		+	20/25	53/61	19/22	27/31	0/0	0/0	0/0	0/0	47/53	66/68	30/44	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	4/6	4/6	0/0	41/41	32/28				343/385
																													5.19/5.73	7.15/8.02

Figura 44: Matriz de resultados del impacto ambiental analizado en las inmediaciones del puente Pucalá

Acciones	Factores		Caracteristicas fisicas y quimicas											Condiciones bilogicas					Factores culturales								SINTESIS			
			Tierra		Agua				Atmosfera		Procesos			Flora		Fauna			Uso tierra		Recreacion			Interes estético			Nº de interacciones		Σ	
			Suelos	Forma de terreno	Superficial	Subterránea	Calidad del agua	Temperatura	Clima	Temperatura	Erosión	Sedimentación	Estabilidad de taludes	Productos agricolas	Plantas acuaticas	Animales terrestres	Peces y moluscos	Insectos	Vida silvestre	Agricultura	Pesca	Navegacion por placer	Salidas al campo	Calidad vida silvestre	Calidad espacio abierto	Diseño del paisaje	-	+	-	+
Modificacion del regimen	Modificacion del hábitat			+10/10	+5/5	+5/5		-4/2				+10/10	+3/7		-2/5	-2/4	-8/8	-3/2	-8/8					-8/8	+8/8	+7/4	7	7	35/37	48/49
	Alteracion de la cobertura vegetal del suelo		-3/5	-3/5							+3/8	+6/5		-3/7		-1/4		-3/5	-3/5	-6/8				-3/5			8	2	25/44	9/13
	Alteración del flujo de agua subterranea			+6/8		+6/8		-4/2																			1	2	4/2	12/16
	Control de rios y modificacion de flujo			+10/10	+8/9	+8/9	-2/5	-4/2			+8/9	+10/10	+5/7	-2/4	-2/5	-2/4	-8/8		-6/6	-5/7	-4/7			-6/6	+8/8	+7/4	10	8	41/54	64/66
	Ruido y vibraciones		-8/8		-7/7	-7/7			-4/7							-3/4	-8/8		-8/8		-8/8	-5/5	-5/5	-8/8			11	0	71/75	0/0
Transformacion del terrreno y construccion	Caminos y senderos		-2/2	-2/2										-5/7						-5/7			-5/6				5	0	19/24	0/0
	Corte y relleno		+7/8	+7/8		+8/9		-4/2			+8/9	+10/10	+5/7	-4/6	-2/5	-2/4	-8/8		-6/6	-4/6	-4/7	-5/5	-5/5	-6/6	+8/8		11	7	50/60	53/59
	Excavacion de superficie		+4/6	+4/6							+8/9	+10/10	+5/7	-4/6		-2/4		-3/2	-3/6	-4/6			-5/5	-3/6	+8/8	+5/5	7	7	24/35	44/51
Modificacion del terreno	Control de erosion		+7/9	+7/9							+7/9	+8/10	+6/8							-4/6							1	5	4/6	35/45
	Paisajismo			+7/8	+5/7						+9/9	+10/10	+6/8	-4/6		-2/4			-4/5	-4/6	-3/7	+4/5	+4/5	-4/5	+8/7	+5/5	6	9	21/33	58/64
Accidentes	Falla operacional		-4/6	-5/6	-7/8	-7/8	-7/8	-3/5	-4/7	-2/4						-3/4	-8/8		-6/7		-8/8	-5/5	-5/5	-6/7	-5/5		16	0	85/101	0/0
Sintesis	Nº de interacciones	-	4	3	2	2	2	5	2	1	0	0	0	6	3	8	5	3	8	7	5	3	5	8	1	0	83			
		+	3	7	3	4	0	0	0	0	6	7	6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	5	4		47		
	Σ	-	17/21	10/13	14/15	14/15	9/13	19/13	8/14	2/4	0/0	0/0	0/0	22/36	6/15	17/32	40/40	9/9	44/51	32/46	27/37	15/15	25/26	44/51	5/5	0/0			379/471	
		+	18/23	51/59	18/21	27/31	0/0	0/0	0/0	0/0	43/53	64/65	30/44	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	4/5	4/5	0/0	40/39	24/18				323/363
																													4.57/5.67	6.87/7.72

Figura 45: Matriz de resultados del impacto ambiental analizado en las inmediaciones del puente Monsefú - Eten

5.4. Modelamiento en Hec – Ras del Río Chancay

El modelo hidráulico del río chancay, se realizó en el sofware Hec – ras 4.1.0, para los tramos estudiados en inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten, considerando la topografía existente en la zona y los caudales determinados para cada período de retorno. Para realizar la comparación con la propuesta planteada anteriormente.

Este procedimiento se detalla en el Anexo N.º 07

a. Puente Pucalá:

Las secciones transversales aguas abajo y en el eje del puente Pucalá muestran en cada una de ellas las crecidas de caudal para los diferentes periodos de retorno ubicando así las zonas que se encuentran propensas a sufrir desbordes.

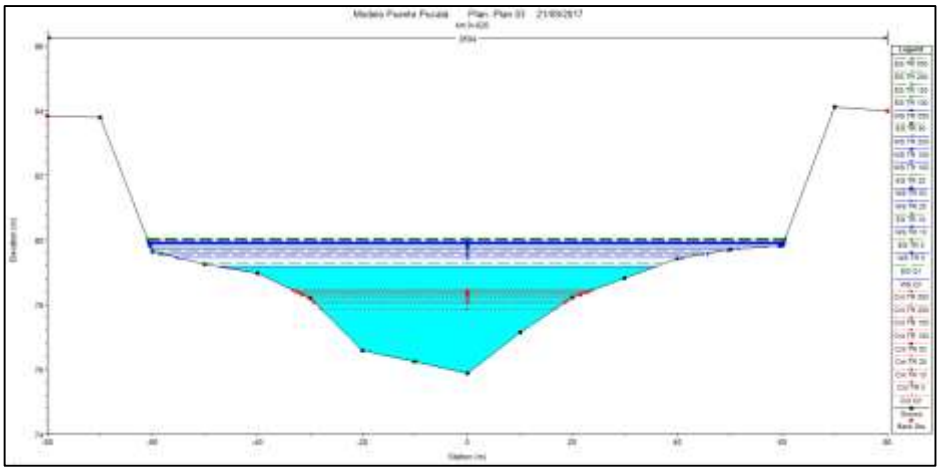


Figura 46: Sección transversal Km 0+020 – Aguas Abajo

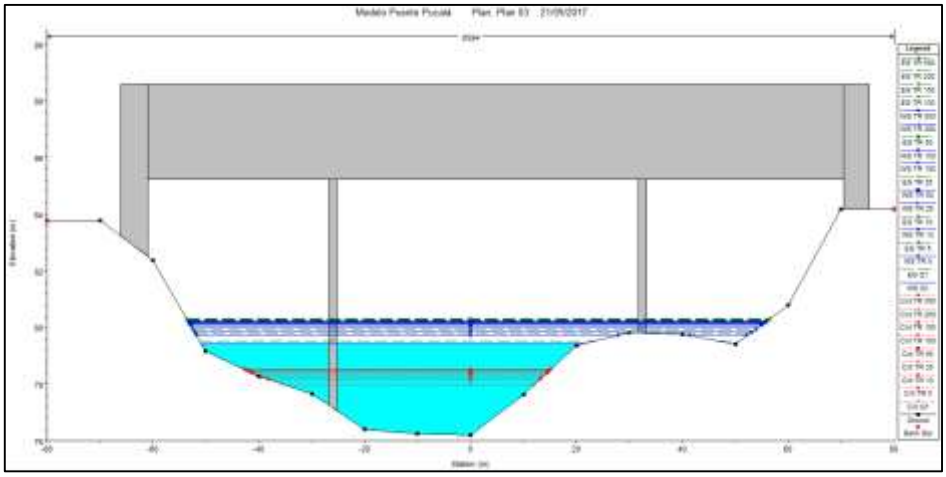


Figura 47: Sección transversal Km 0+120 – Eje del Puente

Posterior a ello, se realizó la modelación hidráulica con la sección propuesta para la descolmatación del río, que se muestra en la figura 42, mostrando a continuación las mismas progresivas para su comparación.

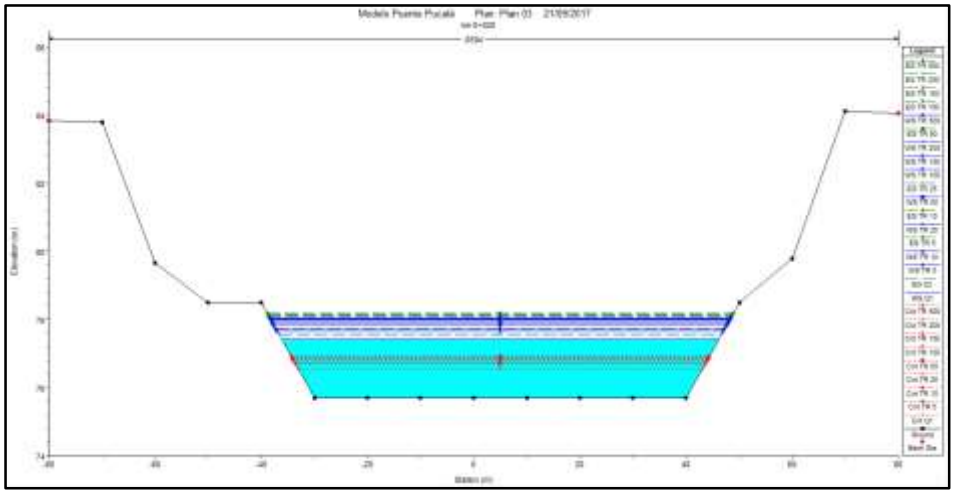


Figura 48: Sección transversal Km 0+020 – Aguas Abajo (Propuesta)

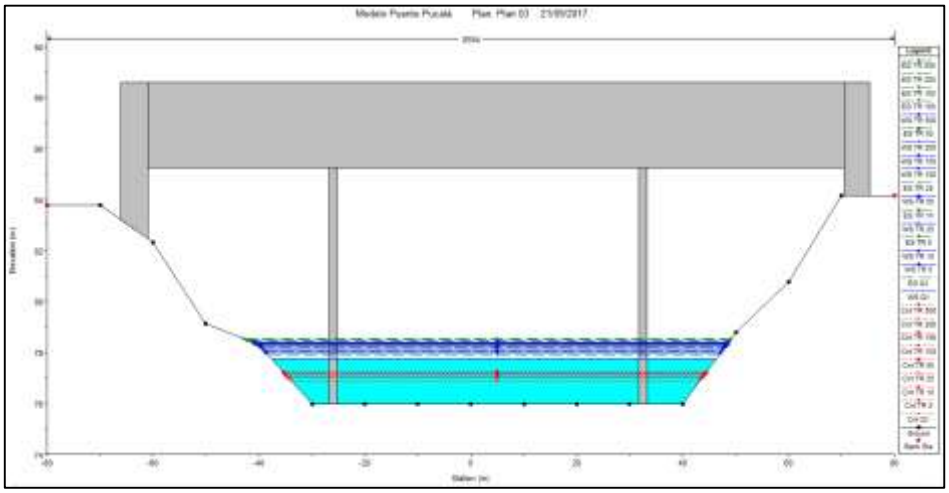


Figura 49: Sección transversal Km 0+120 – Eje del Puente (Propuesta)

Con esta propuesta se aprecia que las secciones presentan una mejor estabilidad, permitiéndole al río no encontrarse con obstáculos en su transcurso, en comparación a las secciones existentes que muestran gran variación en ellas.

Estas secciones propuestas se realizaron teniendo en cuenta el ancho estable, el cual dio como resultado 90 metros.

Las siguientes imágenes muestran los perfiles de velocidades antes y luego de realizada la descolmatación del río.

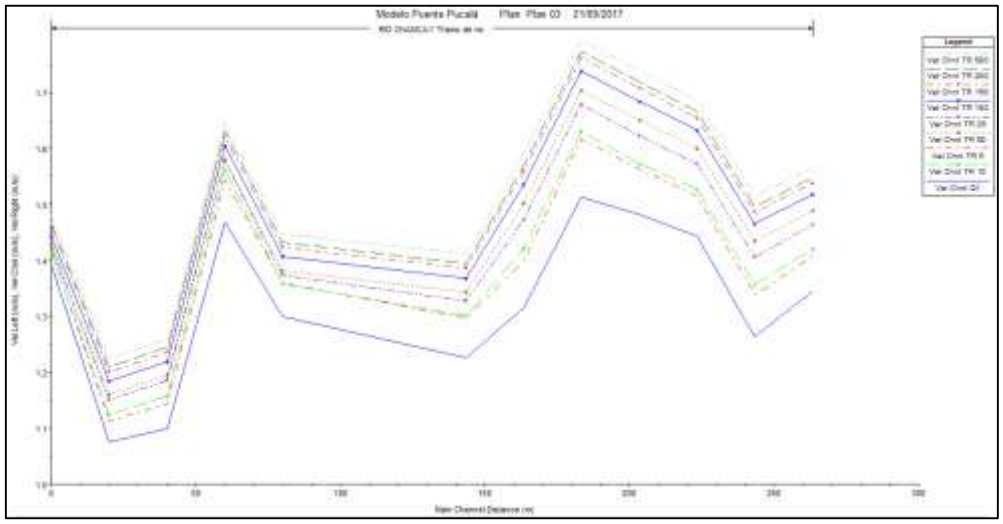


Figura 50: Perfil de velocidades – Puente Pucalá

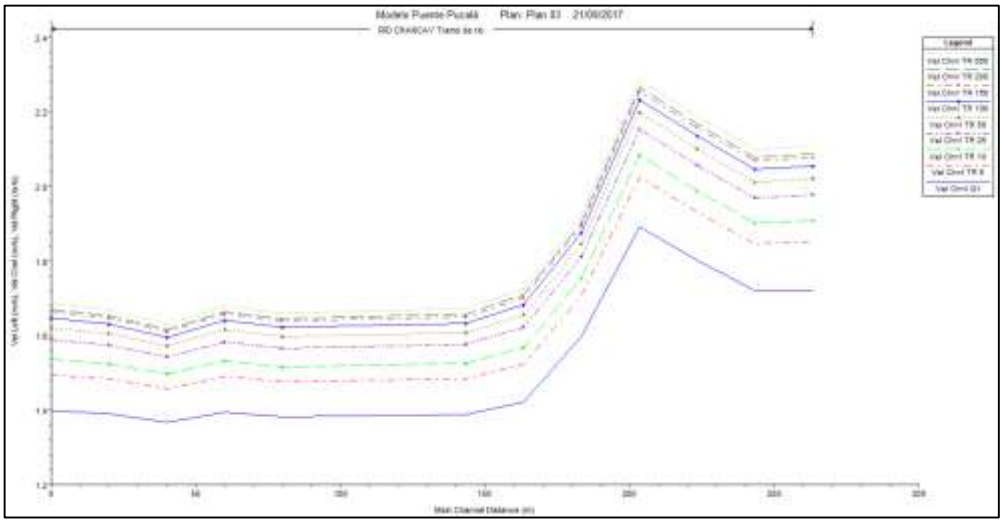


Figura 51: Perfil de velocidades – Puente Pucalá (Propuesta)

El perfil de velocidades mostrado para las condiciones posterior a la descolmatación del río muestra una mayor uniformidad para los distintos periodos de retorno, en comparación a los resultados anteriores que muestran diferentes cambios de velocidades en su recorrido, concluyendo que esta descolmatación ayudará al río a permitir el libre curso del agua cuando se presenten máximas avenidas.

b. Puente Monsefú – Eten:

De la misma manera que el caso anterior, se muestran las secciones transversales aguas abajo y en el eje del puente Monsefú - Eten apreciando en cada una de ellas las crecidas de caudal para los diferentes periodos de retorno.

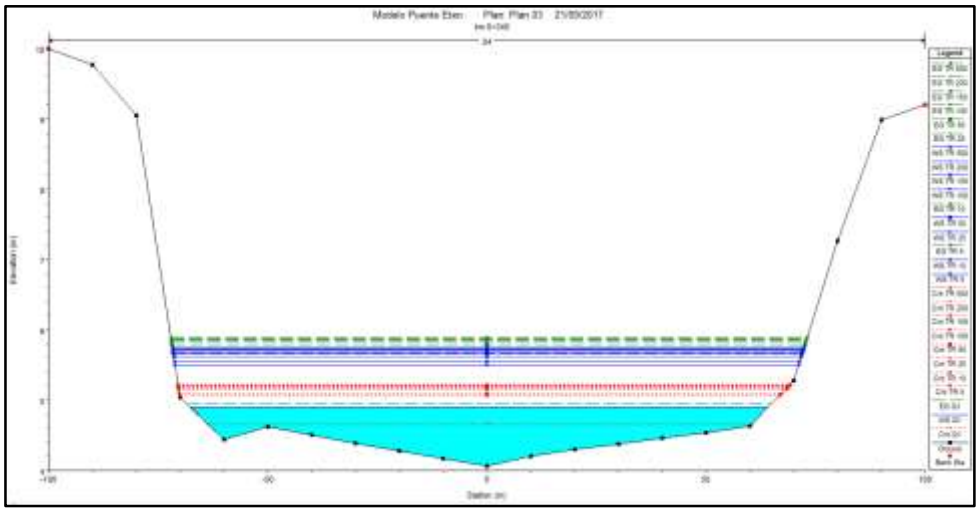


Figura 52: Sección transversal Km 0+340 – Aguas Abajo

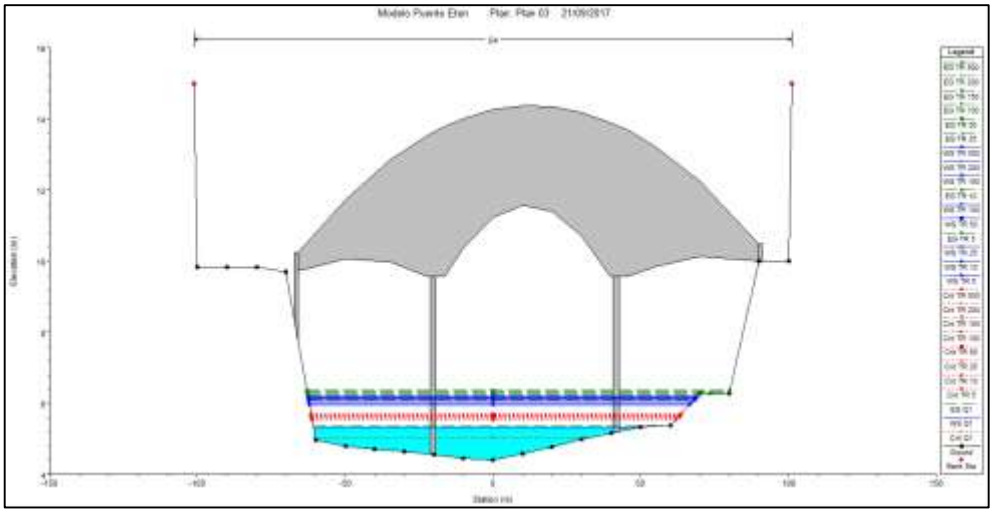


Figura 53: Sección transversal Km 0+250 – Eje del puente

Similar a las inmediaciones del puente Pucalá, para este caso también se realizó la modelación hidráulica con la sección propuesta según la figura 43, mostrando a continuación las mismas progresivas para su comparación.

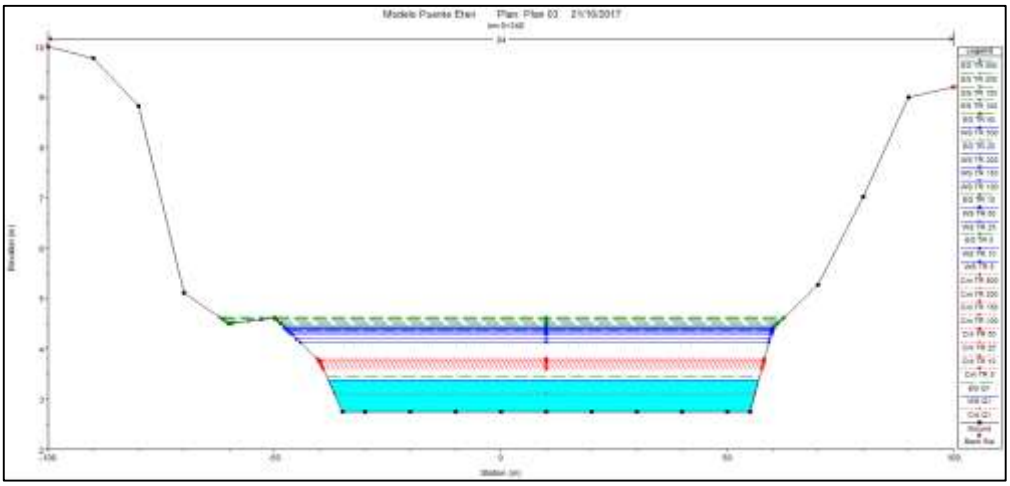


Figura 54: Sección transversal Km 0+340 – Aguas Abajo (Propuesta)

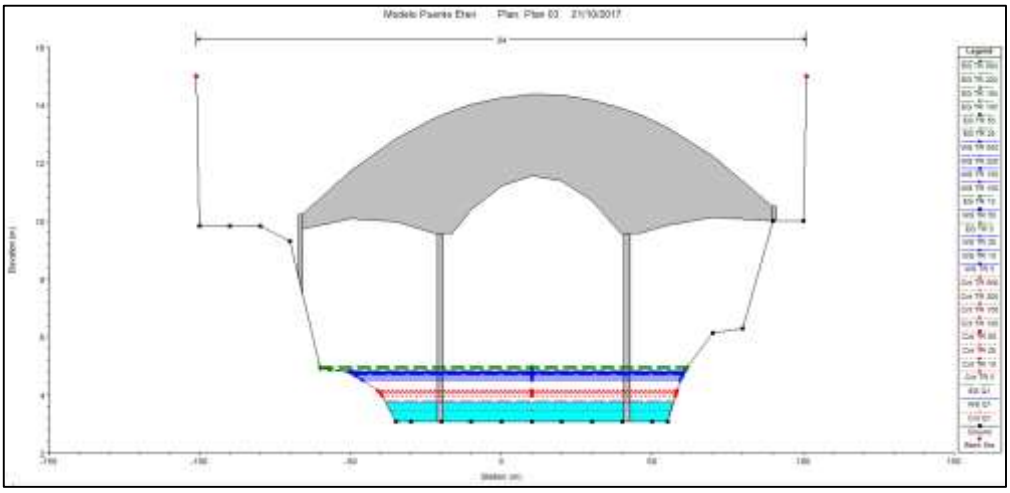


Figura 55: Sección transversal Km 0+230 – Eje del Puente (Propuesta)

Las siguientes imágenes muestran los perfiles de velocidades antes y luego de realizada la descolmatación del río.

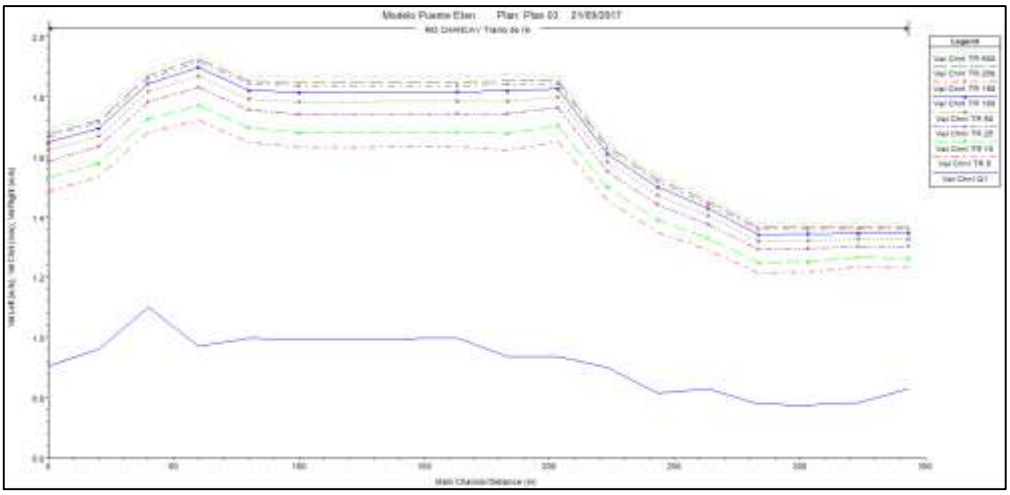


Figura 56: Perfil de velocidades – Puente Monsefú Eten

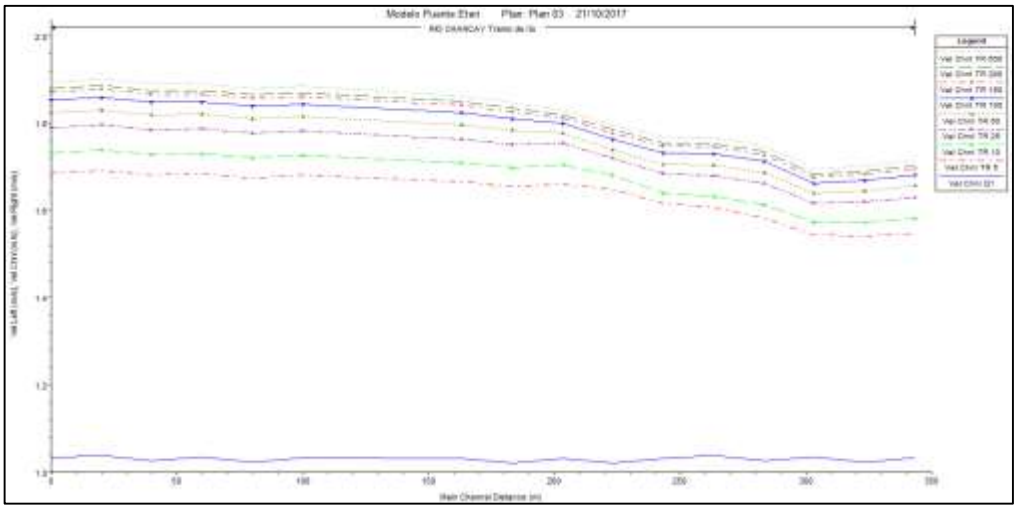


Figura 57: Perfil de velocidades – Puente Pucalá (Propuesta)

El perfil de velocidades nuevamente nos muestra mayor uniformidad para los distintos períodos de retorno para el río luego de la descolmatación, finalmente concluyendo que la descolmatación ayudará al río a permitir el libre curso del agua cuando se presenten máximas avenidas.

5.6. Presupuesto de la alternativa de solución

El presupuesto, mostrado en el Anexo N.º 10 se realizó tomando en cuenta las siguientes partidas:

Obras Provisionales:

- Cartel de Identificación de Obra
- Almacén Oficina y Caseta de guardianía

Trabajos preliminares:

- Trazo, replanteo y control topográfico
- Habilitación caminos de acceso
- Movilización y Desmovilización de maquinaria

Movimiento de tierras

- Descolmatación con maquinaria

Mitigación Ambiental

- Programa de capacitación y educación ambiental
- Programa de contingencia y respuestas a emergencia

Varios

- Patio de Maquinas
- SS.HH. Personal Obrero
- Flete para transporte de materiales a la obra

Finalmente se obtuvo el siguiente presupuesto:

Para Inmediaciones del Puente Pucalá: 512,007.96 soles.

Para Inmediaciones del Puente Monsefú – Eten: 711,608.89 soles.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Las características geométricas del rio Chancay en las inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten, obtenidas mediante el levantamiento topográfico en las zonas de estudio, nos muestra en las secciones transversales la sobre sedimentación en cada uno de los lugares estudiados, para ambos casos se presenta una topografía plana; para el caso de Pucalá, se presenta una pendiente de 0.369%, mientras que para Monsefú – Eten es de 0.330%.

- Los ensayos realizados en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Señor de Sipán permitieron conocer la distribución granulométrica de las muestras de sedimento extraídas, para así poder clasificarlas. Para las inmediaciones del puente Pucalá el sedimento analizado consiste en gravas y arenas pobremente graduadas, obteniendo también limos en alguna de ellas, los cuales resultaron ser de baja plasticidad teniendo un porcentaje de limite liquido inferior al 50%, estas muestras obtenidas tenían un tamaño máximo nominal (TMN) de 1 ½". Para las inmediaciones del puente Monsefú – Eten el sedimento analizado consiste en arenas pobremente graduadas en su totalidad, siendo no plásticas, estas muestras obtenidas tenían un TMN de 2 mm.

- La velocidad de la caída de la partícula de sedimento obtenida mediante la ley de Stokes y por el ensayo de hidrómetro determinó que para las inmediaciones del puente Pucalá se tuvo una variación entre 0.040 – 0.045 cm/s para el transporte por arrastre y 0.032 – 0.044 cm/s para el transporte en suspensión. Por otro lado, en inmediaciones del puente Monsefú – Eten se obtuvieron resultados de 0.034 – 0.045 cm/s para el transporte por arrastre y 0.030 – 0.044 cm/s para el transporte en suspensión. Las velocidades obtenidas con la ecuación de Rubey, concluyó variaciones entre 0.018 – 0.069 m/s y 0.010 – 0.042 m/s para arrastre y suspensión respectivamente en el puente Pucalá, mientras que para Monsefú – Eten las variaciones fueron de 0.022 – 0.059 m/s y 0.010 – 0.046 m/s respectivamente, concluyendo finalmente que el método de Rubey es el más acertado, debido a que la Ley

de Stokes es válida para el movimiento de partículas con velocidades bajas el cual no se asemeja al comportamiento hidráulico que presenta el Río Chancay.

- Con las extracciones realizadas, el transporte de sedimentos para inmediaciones del puente Pucalá, concluye que el transporte de arrastre es 39.38 m3/s y en suspensión de 7.05 m3/s cuando el caudal del río llega hasta 180.00 m3/s, cuando el caudal llega hasta 80.00 m3/s, el transporte de arrastre es de 16.56 m3/s y en suspensión de 0.45 m3/s, finalmente para caudales hasta 50 m3/s se tienen transportes de 9.28 m3/s y 0.34 m3/s para arrastre y suspensión respectivamente. Por otro lado para las inmediaciones del Puente Monsefú - Eten se tiene un transporte de arrastre de 5.92 m3/s y en suspensión de 4.87 m3/s, para caudales hasta 60.00 m3/s, cuando el caudal llega hasta 35.00 m3/s se tiene un transporte de arrastre de 4.11 m3/s y en suspensión de 4.32 m3/s, por último para caudales hasta 25.00 m3/s ocurre un transporte de 2.98 m3/s y 1.14 m3/s por arrastre y suspensión respectivamente. Estos resultados conllevan a concluir que en inmediaciones del puente Pucalá el transporte por arrastre es de un 20.70 % y en suspensión del 2.00 %; Para inmediaciones del puente Monsefú – Eten el transporte de arrastre es de un 12.50 % y en suspensión de 7.16 %.

- Las ecuaciones de mejor ajuste se seleccionaron, teniendo en cuenta cual era la que tenía menor porcentaje de variación con respecto a lo cuantificado en campo, concluyendo que para las inmediaciones del puente Pucalá, en el transporte por arrastre la ecuación que mejor se ajusta es la de Schoklistch, mientas para el transporte en suspensión la ecuación de Brooks es la que resulta de mejor ajuste. Para las inmediaciones del puente Monsefú – Eten para calcular el transporte por arrastre la ecuación de Meyer – Peter y Muller se ajusta perfectamente para todas las variaciones de caudales. Finalmente, para el transporte de sedimento en suspensión la ecuación que resulta de mejor ajuste es la de Chang, Simons – Brooks. Siendo los resultados obtenidos por cada una de las ecuaciones creíbles y confiables.

- Se planteó una descolmatación del cauce del río Chancay en inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten, como medida de emergencia ante la posible llegada del Fenómeno del Niño, permitiendo un libre curso del agua ante avenidas máximas, para lo cual se verificó el ancho estable del cauce el cual resultó 90 m para las inmediaciones del puente Pucalá y 100 m para inmediaciones del Puente Monsefú – Eten, además del cálculo de la socavación en los pilares de los puentes siendo de 2.05 m para Pucalá y 2.72 m para Monsefú – Eten, determinando a la vez la socavación general posterior a la descolmatación siendo de 1.00 m para Pucalá y 2.10 m para Monsefú – Eten.

- Con cada valoración dada llegamos al siguiente resultado; para las inmediaciones del Puente Pucalá el impacto negativo en promedio es [5.19/5.73], mientras que el impacto positivo es [7.15/6.02], por otro lado en inmediaciones del puente Monsefú – Eten el impacto generado tanto negativo como positivo en promedio es [4.57/5.67] y [6.87/7.72] respectivamente, concluyendo que para ambas zonas estudiadas, los resultados generan un impacto positivo, descolmatando la sobre sedimentación en la zona, salvaguardando las estructuras ante avenidas máximas, recalcando que un porcentaje del impacto negativo generado afecta a la vegetación la cual ha crecido en la sobre sedimentación existente, y a su vez ha sido sembrada inapropiadamente en el cauce del río.

- Se realizó el presupuesto de la Descolmatación del cauce, teniendo en cuenta que las partidas de mayor costo son del movimiento de tierras, a través del software S10 2005 se obtuvo un presupuesto final de 512,007.96 soles para Pucalá y 711,608.89 soles para Monsefú – Eten.

6.2. Recomendaciones

- Es recomendable tomar medidas del tirante del río, la mayor cantidad posible a distancias cortas para obtener con mayor certeza el área hidráulica y perímetro de la sección, de igual manera para la realización del levantamiento topográfico, además de contar con equipos calibrados y en buen estado.
- Se recomienda utilizar los instrumentos de laboratorio totalmente limpios y secos para la realización correcta de los ensayos, además de contar con equipos para el caso de las balanzas, totalmente calibradas para evitar ambigüedad en los resultados obtenidos.
- Para el desarrollo del ensayo de hidrómetro se debe tener cuidado al momento de batir la muestra en el equipo agitador, iniciando con poca velocidad para evitar pérdidas de la muestra, de la misma manera realizar cuidadosamente el agitado manual, para evitar resultados deficientes en el cálculo.
- Es importante realizar la extracción de muestras de sedimento en lugares donde no hayan sido afectados o alterados por la comunidad, debido a que esto influye en la alteración de resultados. Es recomendable también colocar los muestreadores en un punto estático para que la muestra no se vea afectada, y en las tomas por arrastre posicionarlo en un sitio adecuado.
- Se podrán contar con los datos obtenidos en la presente investigación, para el diseño de una estructura de protección aguas arriba o en las márgenes del río, para las zonas estudiadas.

REFERENCIAS

ANLA. (Autoridad Nacional de licencias Ambientales). Estudio de Impacto Ambiental. Bogotá, Colombia. Recuperado desde: http://www.anla.gov.co/estudio-impacto-ambiental

Arboleda, J. (2008). Manual para la evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades. (1ra Edición). Medellín, Colombia. Consultado en: http://www.kpesic.com/sites/default/files/Manual_EIA_Jorge%20Arboleda.pdf

Arias - Madrid, D; López - Paz, O & Jiménez - Builes, J. (Octubre, 2012). Análisis de Sedimentos Utilizando un Enfoque de la Programación Estructurada. Tecno Lógicas.n.29. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0123-77992012000200004&lng=es&nrm=iss

Basile, P. (2000). Revisión de ecuaciones de transporte modificadas para sedimentos heterogéneos, en XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – Córdoba 2000.

Bravo-Espinosa, M; Osterkamp, W.R & Lopes, V.L. (Septiembre, 2004). Transporte de sedimentos en corrientes naturales: Revisión Técnica de ecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimentos de fondo. Terra Latinoamericana, vol.22, núm. 3, pp. 377-386. Recuperado de http://www.redalyc.org/pdf/573/57322315.pdf

Brea, J. Balocchi, F. (2010). Procesos de erosión – sedimentación en cauces y cuencas, en Programa Hidrológico Internacional de la Unesco, Volumen 1. Documento técnico Nª 22

Cabrera, J. (2005). Estudio aplicado de los costes de la prevención de riesgos laborales en la construcción de puentes de hormigón. (Tesina). Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Civilgeeks.com (2013). Granulometría de Suelos. En página web civilgeeks.com. Recuperado desde: https://civilgeeks.com/2013/11/25/granulometria-suelos-ing-nestor-luis-sanchez/

Cuenca del Río Chancay Lambayeque. (1994). Recuperado el 17 de febrero del 2017, de: http://www.cepes.org.pe/pdf/OCR/Partidos/diagnostico_calidad_agua-tomo1/diagnostico_calidad_agua_cuenca_rio_chancay-lambayeque.pdf

Diario Correo. (18 de julio del 2015). Ica sin plata para defensas ribereñas. Correo.Recuperado desde: http://diariocorreo.pe/edicion/ica/ica-sin-plata-para-defensas-riberenas-603258/

Diario Correo. (30 de marzo del 2015). El Bajo Piura en alerta por crecida del río. Correo. Recuperado desde: http://diariocorreo.pe/edicion/piura/el-bajo-piura-en-alerta-por-la-crecida-del-rio-576041/

Diario Correo. (30 de marzo del 2015). Puente Francos a punto de colapsar. Correo. Recuperado de: http://diariocorreo.pe/edicion/tumbes/tumbes-puente-francos-a-punto-de-colapsar-576070/

Diario digital Hoy. (21 de noviembre del 2012). Sedimentos afectan puentes región Sur. Hoy. Recuperado de: http://hoy.com.do/sedimentos-afectan-puentes-region-sur/

Erh consults (2013). Noticias, en Erh Consults noticias. Recuperado desde: http://www.erhconsult.net/noticias_esp.php

Escudero, J. (2017). Tipos de puentes. Recuperado el 20 de febrero de 2017, de http://puentes.galeon.com/tipos/pontscantilever.htm

García, F. (2009). Modelo de transporte de sedimentos de carga de fondo en cauces fluviales. en Rev tec u vol.7 no.7 Santa Cruz, Bolivia. Recuperado desde: http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1991-64692009000200003&lng=en&nrm=iso&tlng=en

García, M. Maza, J. (1998). Origen y Propiedades de los sedimentos, en Capítulo 7 del Manual de Ingeniería de ríos, Instituto de ingeniería. UNAM.

Gunt Hamburg, (Catálogo de Ingeniería). Fundamentos del transporte de sedimentos. en Catalogo Gunt Hamburg. Recuperado desde: http://www.gunt.de/images/download/sediment-transport_spanish.pdf

Infraestructura Peruana (2014). Puente Eten. Recuperado el 15 de Marzo del 2014, de http://infraestructuraperuana.blogspot.pe/2012/07/puente-eten.html

Infraestructura Peruana (2015). Puente Pucalá. Recuperado el 24 de Diciembre del 2015, de http://infraestructuraperuana.blogspot.pe/2015/12/puente-pucala.html

Iroume, A. (2003). Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena Región de Chile. en Bosque, Vol. 24 N° 1, 2003, pp. 125-135. Recuperado desde: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002003000100010&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Iroumé, A y Paula G.Y. (2009). La cuantificación del transporte de sedimentos a través de mediciones directas y el uso de modelos empíricos en una cuenca experimental en las montañas de los Andes, el sur de Chile. en Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia v.32 n.2 Maracaibo. Recuperado desde: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702009000200007

J&Flem Laboratorio de ensayo de materiales (2010). Ensayo de Peso específico. en página web J&Flem. Recuperado desde: http://jyflem.es.tl/Galer%EDa/kat-1.htm

Manual MTC. (2016). Manual de Ensayo de Materiales. (Edición Mayo). Lima, Perú.

Martín, J.P. (2003). Ingeniería de Ríos. España: México, D.F: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A de C.V.

Maza, J.A; & García, M. (1985).Estabilidad de Cauces, Capítulo 12 del Manual de Ingeniería de Ríos, Manual de Ingeniería de Ríos, (pp 54 y 55) Recuperado de

http://hernandez-mendez.blogspot.pe/2015/09/manual-de-ingenieria-de-rios-unam-cna.html

Maza, J.A; & García, M. (1985).Transporte de Sedimentos Capítulo 10 del Manual de Ingeniería de Ríos, Manual de Ingeniería de Ríos, (pp 1-96) Recuperado de http://grupos.emagister.com/documento/transporte_de_sedimientos_capitulo_10_del_manual_de_ingenieria_de_rios_unam/1867-1299376

Maza, J.A: & Val, R. Hidráulica Fundamental: Fórmulas para Cuantificar el Arrastre en la Capa de Fondo. Recuperado de http://eias.utalca.cl/isi/coordinadores/rafael_val/96maza.pdf

Meza, V. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. En Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Recuperado desde: http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n31/n31a02.pdf

Ministerio de Agricultura y Riego. (2008). Recuperado el 18 de febrero del 2017, de: http://www.minagri.gob.pe/portal/55-sector-agrario/hidrologia/380-caudales-de-la-vertiente-del-pacifico

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2012). Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje. Recuperado de: http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/970.pdf

Norma ASTM D 422. (2007). Análisis Granulométrico de Suelos por Tamizado. Estados Unidos

Norma NTP 339-128. (1999). Método de ensayo para Análisis Granulométrico. (1ra Edición). Lima, Perú.

Norma NTP 339-131. (1999). Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo. (1ra Edición). Lima, Perú.

Perez, D y Perillo, G. (2002). Transporte de sedimentos del Arroyo Napostá Grande, Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. Recuperado desde: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1853-63602002000200006

Principales cuencas a nivel nacional. (2008). Recuperado el 18 de febrero del 2017, de http://www.minagri.gob.pe/portal/54-sector-agrario/cuencas-e-hidrografia/372-principales-cuencas-a-nivel-nacional

Restrepo, J; Ortiz, J; Otero, L. y Ospino, S. (2017). Transporte de sedimentos en suspensión en los principales ríos del Caribe colombiano: magnitud, tendencias y variabilidad. en Rev. acad. colomb. cienc. exact. fis. nat. [online]. 2015, vol.39, n.153, pp.527-546. ISSN 0370-3908. Recuperado desde: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0370-39082015000400010&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Revista Semana. (2016, 17 de diciembre). Alarma en el río Magdalena. Semana. Recuperado de: http://www.semana.com/nacion/articulo/rio-magdalena-consecuencias-en-las-obras-del-puente-pumarejo/509766

Salinas, G; Stintz, M; Wessely, B. (2005). Aplicación del Método Fotométrico para la Detección de la Distribución de Tamaño de Micro Partículas. en Información Tecnológica-Vol. 16 N°4-2005, págs.: 59-68. Recuperado desde: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642005000400010

Salinas, H; García, J.A y Díaz, C. (2008). Análisis experimental del efecto de la turbulencia en la velocidad de caída de sedimentos en suspensión. en Ing. Invest. Y tecnol. [online]. 2008, vol.9, n.1, pp.49-58. ISSN 1405-7743. Recuperado desde: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1405-77432008000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Salinas, H. García, J. (2011). Fórmula experimental para la velocidad de caída de sedimentos en flujo transversal, en Tecnol. cienc. agua vol.2 no.2 Jiutepec abr./jun. 2011. Recuperado desde: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000200011

Sarango, C. (2013). Calibración de una ecuación para el transporte de sedimentos en la Cuenca El Limón, en el Río Zamora. (Tesis de Titulación). Universidad Técnica particular de Loja.

Sistema de Información Geográfica del Ministerio de Ambiente del Perú. (2010). Mapa de Cuencas Hidrográficas. [Mapa geográfico]. Recuperado de http://geoservidor.minam.gob.pe/geoservidor/Archivos/Mapa/N30_CUENCAS_HIDROGRAFICAS.pdf

Sitio web, Colegio de Ingenieros de Venezuela (CIV). (30 de enero del 2017). Colegio de Ingenieros de Venezuela. Venezuela. Recuperado de http://www.civ.net.ve/noticia/ing-eduardo-paez-pumar

TYC GIS. (2017). ¿Qué es Hec – Ras y para qué sirve?. en Blog Curso Gis, Madrid, España. Recuperado desde: http://www.cursosgis.com/index.php/blog-cursosgis/95-que-es-hec-ras-y-para-que-sirve.html

Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Laboratorio de física de suelos y cuarto de experimentación en columnas. en página web UNAM. Recuperado desde: http://www.geologia.unam.mx/infraestructura/laboratorio-de-fisica-de-suelos-y-cuarto-de-experimentacion-en-columnas

US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. Estados Unidos. Recuperado desde: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/

Vásquez, D. (2012). *Transporte de sedimento como carga de fondo en la cuenca del río Narcea (Vertiente norte de la cordillera Cantábrica).* (Tesis doctoral). Recuperada de http://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/15143

Villarino, A. (Febrero, 2010). Puentes.[Material de docencia para la asignatura de "Ingeniería Civil" de la titulación Ingeniería Técnica de Topografía de la Escuela Politécnica Superior de Ávila]. La Ingenieria Civil. Open Course Ware - Universidad de Salamanca, España.

Villón, M. (2005). Hidrología Estadística. Lima, Perú: Editorial Villón.