

UNIVERSIDAD DE CUENCA



Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Determinación de la tasa de transporte de carga de lecho en ríos de montaña con pendientes entre el 4% y 10% y sedimento grueso, considerando material de lecho con una granulometría natural.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Autores:

Pedro Andrés Matovelle Carrillo
CI: 0302599410

Sebastián Eugenio Torres Flores
CI: 0302143565

Directora:

Ing. Verónica Margarita Carrillo Serrano. Msc.
CI: 0104040480

CUENCA – ECUADOR

Marzo, 2019



Resumen

El transporte de sedimentos ha sido ampliamente estudiado, sin embargo, los estudios más importantes que se reportan en la literatura se han desarrollado para casos de pendiente suave y sedimento principalmente fino. El transporte de sedimento en cauces de montaña caracterizados por sus altas pendientes y la presencia en su lecho de material de gran tamaño representa un proceso complejo que genera inconvenientes en las obras hidráulicas como captaciones, embalses, entre otros, causando la pérdida de capacidad de almacenamiento y de captación del agua y en ocasiones dejándolas fuera de servicio. Es así, que se evidencia la necesidad de cuantificar de manera más precisa el proceso de transporte de sedimentos en este tipo de ríos. En el presente trabajo de investigación se determinó una relación empírica para cuantificar de manera adecuada la tasa de transporte de carga de lecho en base de un modelo físico que representa las condiciones de un cauce de montaña. Como parte fundamental de la caracterización de éste proceso el material implementado en el modelo fue la granulometría del lecho del río Tabacay. El estudio se realizó en el laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca. La correlación existente entre la ecuación obtenida de forma experimental con los valores registrados en el laboratorio, indica que está es representativa de las condiciones presentes en los ríos de montaña, ya que posee una bondad de ajuste con un R_2 igual a 0.94. Además los valores obtenidos con esta ecuación al ser comparados con los valores de ecuaciones presentes en la literatura que reportan condiciones similares a las expuestas en esta investigación son semejantes, es por ello que se puede concluir que esta ecuación puede ser aplicada como una herramienta válida para la determinación de la tasa de transporte de sedimentos en ríos de alta pendiente.

Palabras Clave:

Transporte de sedimento. Canales de alta pendiente. Rios de montaña. Ecuación.



Abstract

Sediment transport has been extensively studied, however, the most important studies reported in the literature have been developed for cases of low slope and sediment mainly fine. The transport of sediment in channels of mountain is characterized by steep slopes and the presence of great size material on his deathbed represents a complex process that generates disadvantages in the hydraulic structures as abstractions, reservoirs, among others, causing the loss of storage capacity and water catchment and sometimes leaving them out of service. Thus, there is evidence of the need to quantify more accurately the sediment transport process in this type of river. In this investigation, it was determined an empirical relationship to adequately quantify the rate of transport of bed load on the basis of a physical model that represents the conditions of a channel of mountain. A fundamental part of the characterization of this process is that the material implemented in the model was the granulometry of the Tabacay river's bed. The study was carried out in the laboratory of Hydraulic & Fluid's Dynamic of the Department of Civil Engineering of the University of Cuenca. The correlation between the equation obtained experimentally with the values measured in the laboratory indicates that this equation is representative of the conditions present in the mountain rivers, as it has a goodness-of-fit with an R^2 equal to 0.94. In addition, the values obtained with this equation are similar to the values of equations present in the literature that report analogous conditions that is why, it can be concluded that this equation can be applied as a valid tool for the determination of the rate of sediment transport in rivers of high slope.

Keywords:

Sediment transport. Steep channels. Mountain rivers. Equation.



Contenido

1. Introducción 12

2. Materiales y Métodos 14

 2.1 Transporte de Sedimentos 14

 2.2 Ecuaciones para la cuantificación del transporte de carga de lecho. 16

 2.3 Configuración Experimental..... 18

 2.4 Material del lecho 20

 2.5 Escalamiento 20

 2.6 Experimentación 24

 2.7 Análisis Estadístico. 24

 2.7.1 Parámetros de Validación 26

 2.7.2 Prueba de Hipótesis 27

3. Resultados y Discusión 29

 3.1 Resultados calibración del vertedero..... 29

 3.2 Tasa de transporte de sedimentos..... 29

 3.3 Resultados de la regresión lineal 31

 3.4 Resultados comparación de ecuaciones 40

4. Conclusiones y Recomendaciones 44

5. Bibliografía 46

6. Anexos..... 49

 6.1 Resultados de las Simulaciones..... 49

 6.2 Datos de laboratorio llevados a escala real 53

 6.3 Datos Linealizados..... 55

 6.4 Comparación de Ecuaciones 57



Listado de Tablas

Tabla 1. Valores referenciales del Criterio de Nash – Sutcliffe 26
Tabla 2. Análisis de Varianza 27
Tabla 3. Resultados Simulación 29
Tabla 4. Correlación: Variables principales vs Tasa 32
Tabla 5. Correlación: Variables secundarias vs Tasa 34
Tabla 6. Coeficientes para Regresión 35
Tabla 7. Variables linealizadas 35
Tabla 8. Resultados de la Regresión Lineal Múltiple 36
Tabla 9. Estadísticas de Regresión Múltiple 37
Tabla 10. Análisis de Varianza 38
Tabla 11. Validación de Hipótesis 38
Tabla 12. Tabla de Varianza (Modelo sin %PI) 39
Tabla 13. Prueba F. para validación del modelo sin %PI 40
Tabla 14. Parámetros de Validación 40
Tabla 15. Tasa de Transporte de Sedimento en función de las ecuaciones de diversos autores . 41
Tabla 16. Parámetros de Validación (Shocklitsch). 43

Tablas Anexo 1

Tabla A1- 1. Datos Pendiente 4% 49
Tabla A1- 2. Datos Pendiente 5% 49
Tabla A1- 3. Datos Pendiente 6% 50
Tabla A1- 4. Datos Pendiente 7% 50
Tabla A1- 5. Datos Pendiente 8% 51
Tabla A1- 6. Datos Pendiente 9% 51
Tabla A1- 7. Datos Pendiente 10% 52

Tablas Anexo 2

Tabla A2- 1. Resultados de la simulación llevados a escala real 53

Tablas Anexo 3

Tabla A3- 1. Datos linealizados 55

Tablas Anexo 4

Tabla A4- 1. Parámetros de validación 57
Tabla A4- 2. Tasas de carga de lecho para varias ecuaciones 57



Listado de Figuras

Figura 1. Diagrama de Shields 16

Figura 2. Configuración Vertedero 18

Figura 3. Granulometría Promedio de Cauce Natural 20

Figura 4. Curvas Granulométricas 24

Figura 5: Curva de Calibración 29

Figura 6. Calado vs tasa 31

Figura 7. Caudal vs Tasa 31

Figura 9. Vel. Sup vs Tasa 31

Figura 8. Vel Media vs Tasa 31

Figura 10. D14 vs Tasa 32

Figura 11. D86 vs Tasa 32

Figura 12. D90 vs Tasa 32

Figura 13. D50 vs Tasa 32

Figura 14. Pendiente vs Tasa 34

Figura 15. Porcentaje de Piedras de gran Tamaño vs Tasa 34

Figura 16. Diagrama de Dispersión de Tasas 38

Figura 17. Dispersión de Tasas (Modelo sin %PI) 39

Figura 18. Comparación de Ecuaciones. 42



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Pedro Andrés Matovelle Carrillo en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Determinación de la tasa de transporte de carga de lecho en ríos de montaña con pendientes entre el 4% y 10% y sedimento grueso, considerando material de lecho con una granulometría natural", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Marzo de 2019



Pedro Andrés Matovelle Carrillo

C.I: 0302599410



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Sebastián Eugenio Torres Flores en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Determinación de la tasa de transporte de carga de lecho en ríos de montaña con pendientes entre el 4% y 10% y sedimento grueso, considerando material de lecho con una granulometría natural", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Marzo de 2019

Sebastián Eugenio Torres Flores

C.I: 0302143565



Cláusula de Propiedad Intelectual

Pedro Andrés Matovelle Carrillo, autor del trabajo de titulación "determinación de la tasa de transporte de carga de lecho en ríos de montaña con pendientes entre el 4% y 10% y sedimento grueso, considerando material de lecho con una granulometría natural", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Marzo de 2019



Pedro Andrés Matovelle Carrillo

C.I.: 0302599410



Cláusula de Propiedad Intelectual

Sebastián Eugenio Torres Flores, autor del trabajo de titulación "Determinación de la tasa de transporte de carga de lecho en ríos de montaña con pendientes entre el 4% y 10% y sedimento grueso, considerando material de lecho con una granulometría natural", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Marzo de 2019

Sebastián Eugenio Torres Flores

C.I: 0302143565



Agradecimientos

Queremos expresar de manera especial nuestro agradecimiento a la Ing. Verónica Carrillo por la dedicación y apoyo brindado, pues ella fortaleció nuestros conocimientos para poder salir adelante durante este proceso.

De igual manera, al Sr. Franklin Riera Técnico del laboratorio de Hidráulica y Fluidos de la Facultad de Ingeniería, a los Arq. Edison Castillo, Armando Atancuri y Jonathan Aguirre que nos abrieron las puertas del Taller de Maquetaría y Diseño en Madera y del Laboratorio de Aplicaciones Constructivas y Bioclimáticas de la facultad de Arquitectura para finalizar esta importante meta.

Agradezco a Dios por permitirme alcanzar un logro más en mi vida estudiantil, a mis padres y hermanas por estar junto a mí en este largo camino, a mis abuelitos siempre pendientes y cuidando de mí. De igual manera gracias a mis amigos que me han ayudado y acompañado en este trayecto. Gracias infinitas a todos los que de una u otra manera han formado parte de mí caminar por la Universidad. ¡Lo Logramos!

Pedro Matovelle

A Dios, ya que me ha brindado la sabiduría, el conocimiento y fortaleza para poder culminar este trabajo de titulación.

A mis Padres Wilson Virgilio Torres Heredia y María Eugenia Flores González quienes con su amor y ejemplo me han enseñado lo que significa el esfuerzo y trabajo. Además siendo mi fortaleza para poder alcanzar todas mis metas. Sin ustedes no lo hubiera logrado.

De igual manera y con mucho cariño a nuestra prestigiosa Universidad, por haberme brindado la oportunidad de prepararme a lo largo de estos años.

Sebastián Torres



Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres Ruth Carrillo y Patricio Matovelle, a mis hermanas Carolina y Patricia por su confianza y apoyo a lo largo de mi carrera.

Pedro Matovelle

A Dios por mantenerme siempre enfocado y en el camino del conocimiento.
A mis Padres por cuidarme, protegerme y guiarme en todo momento.

Sebastián Torres



1. Introducción

El análisis de los fenómenos del movimiento y transporte de partículas sólidas en un fluido (transporte de sedimento), que se produce debido a las fuerzas de arrastre que ejerce el flujo sobre las partículas, es de gran importancia no solo para el caso de los procesos hidráulicos, sino también en otros campos del conocimiento como la geomorfología y la ingeniería ambiental (Niño, 2004). Un aspecto indispensable a ser tomado en cuenta en el transporte y deposición de sedimentos es principalmente el mantenimiento y operación de obras hidráulicas como embalses o captaciones, en donde el principal problema es la pérdida de capacidad de almacenamiento y captación del agua a lo largo de su vida útil debido a la acción del sedimento (McCuen, 1989). Dada su complejidad y la alta variabilidad de los parámetros que intervienen en el transporte de sedimento, para la formulación de modelos que representen las interacciones partícula – fluido, se ha utilizado ampliamente la experimentación para la obtención de fórmulas empíricas que permite la consideración de varios escenarios de acción bajo condiciones controladas de laboratorio, para estimar la tasa de transporte de sedimentos, sin embargo; dichas formulaciones generalmente se han obtenido en condiciones específicas y simplificadas (en la mayoría de los casos), lo cual implica que la aplicación de dicha formulación para condiciones diferentes reduzca la confiabilidad y presión de los resultados. De acuerdo a diversos análisis de comparación de las distintas formulaciones se ha determinado que se registran diferencias de varias órdenes de magnitud cuando se comparan las tasas obtenidas con las distintas ecuaciones para los mismos datos de entrada. (Pacheco T. & Carrillo S., 2014).

Diversos estudios sobre el transporte de sedimentos han sido desarrollados por autores como Meyer-Peter 1951, Müller 1948, Shields 1936, Einstein 1942, DuBoys 1879, siendo estos los principales en el estudio del transporte de sedimentos de material fino. (Lamb, Dietrich, & Venditti, 2008) Mientras que en el estudio del transporte de partículas gruesas los más representativos son: Bagnold 1980, Gilbert 1914, Carson y Griffiths 1987, Parker 2008, Ferguson 2002 y otros (Goode & Wohl, 2010). No obstante estudios revelan que en zonas particulares, de modo especial los ríos de montaña dichas ecuaciones sobrestiman los valores del transporte de sedimento (Yager, et al., 2007). Existen estudios desarrollados previamente (Schoklitsch (1962) y Shamov (1959)), en los que se pretende determinar las tasas de transporte incluyendo variables típicas como las que se tiene en causas de montaña, como pendientes elevadas, y sedimento grueso, sin embargo, variables como la pendiente pueden alcanzar valores mayores a los que han sido considerados como alta pendiente. A pesar de que se ha ganado precisión en la determinación del transporte de sedimento aun para casos más extremos (pendientes mayores a 5%) persiste aun la falta de precisión en su cuantificación (Georgiev, 1990).

De esta manera, se establece la necesidad de determinar una relación que permita cuantificar el arrastre de sedimentos de modo adecuado para condiciones de pendiente elevada, material de lecho y sedimento grueso, que son las condiciones presentes en causas de montaña, especialmente en la región andina del Ecuador. (Judd & Peterson, 1969). Con este objetivo se plantea para el presente proyecto el desarrollo de un modelo físico que permita la simulación del transporte de sedimento (carga de lecho) en un canal de laboratorio con gran pendiente, además, se utilizará como sedimento material natural con una granulometría representativa de un cauce de montaña, de esta forma se espera obtener resultados que permitan el desarrollo de una teoría más general



(fórmula empírica) que posibilite una cuantificación adecuada de los procesos de transporte de sedimento.

Adicionalmente, se plantea la realización de un análisis comparativo entre cinco ecuaciones existentes en la literatura para condiciones similares a las utilizadas en la experimentación (Parker 1979, Schoklitsch 1962, Nielsen Simplificado 1992, Meyer – Peter 1951 y Einstein 1942) con la expresión desarrollada en base a los resultados del modelo físico.



2. Materiales y Métodos

2.1 Transporte de Sedimentos

El transporte de sedimentos en el lecho de un río está gobernado por el balance entre las fuerzas actuantes (fuerza de arrastre y empuje) y las fuerzas resistentes (peso propio y fuerza de rozamiento), en función de la relación que existe entre dichas fuerzas, el transporte de sedimentos se puede clasificar en: transporte en suspensión; siendo este el principal medio de transporte de partículas pequeñas, en donde la fuerza de empuje (Fuerza vertical del flujo) es mayor que el peso propio de los granos, y el transporte de fondo; en donde la resultante entre la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre, es mayor al peso de la partícula, sin embargo; estas no se transportan en suspensión, este movimiento puede generarse mediante la rodadura o arrastre de la partícula, o mediante pequeños saltos a lo largo del cauce. (Hamburg, 2014)

El transporte de carga de lecho o transporte de fondo se define como el movimiento de las partículas que son arrancadas de una capa de lecho de aproximadamente dos veces el diámetro de la partícula representativa por encima del lecho firme que se mueven ya sea deslizándose, rodando o mediante pequeños saltos (Einstein, 1950). La capa de lecho se considera como la capa en la cual el movimiento turbulento del agua no afecta a las partículas de sedimento, de tal manera que las partículas no son suspendidas. (van Rijn, 1984). El ancho de la capa de lecho está dado por:

$$\delta_s = \frac{11.6 * v}{v_x}$$

Ecuación 1.

Donde:

v , Viscosidad cinemática del agua.

v_x , Velocidad de corte a lo largo de la capa de lecho.

Además, el ancho de la cama de lecho se puede expresar también en función del parámetro crítico de Shields:

$$\delta_s = d_s \cdot (\tau_* - (\tau_*)_c)$$

Ecuación 2.

Donde:

δ_s , Espesor de la capa de lecho.

d_s , Diámetro del sedimento.

$(\tau_*)_c$, Parámetro crítico de Shields.

τ_* , Parámetro de Shields.

Iniciación del movimiento



El inicio del movimiento de las partículas depende de varios parámetros como la variación de velocidad en el eje vertical, esfuerzo cortante a lo largo del cauce y las propiedades físicas de las partículas como diámetro, peso específico, etc. (Pacheco T. & Carrillo S., 2014)

Shields (1936) establece que el movimiento de partículas se da cuando el parámetro crítico de Shields τ_{*c} que representa el esfuerzo cortante adimensional para el cual se tiene movimiento incipiente, es superado por el parámetro de estabilidad, el cual está dado por:

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{[\rho^* (s-1) * g * d_s]}$$

Ecuación 3.

Donde:

S , corresponde al peso específico relativo de las partículas.

d_s , representa el diámetro característico de las mismas.

τ_0 Esfuerzo cortante de frontera actuante, definido en función de las condiciones de flujo.

Al analizarse el movimiento de sedimentos en un canal de laboratorio Chen (1996) expresa que el esfuerzo cortante para canales anchos es igual a:

$$\tau_0 = \rho g y_n \text{ sen } \theta$$

Ecuación 4.

Donde:

ρ Es la densidad del fluido

g es la gravedad

y_n Altura media de flujo

Y , $\text{sen } \theta$ Pendiente del cauce

Con lo que se puede definir a la velocidad de corte como:

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

Ecuación 5.

Shields (1936) define un diagrama que relaciona el parámetro de estabilidad (esfuerzo cortante actuante adimensional) con el número de Reynolds de la partícula que permite establecer si dicha partícula para determinadas condiciones de flujo se encuentra en movimiento o reposo, en la Figura 1 a continuación se presenta dicho diagrama que es conocido como el Diagrama de Shields.

$$Re_* = \frac{V_* d_s}{\nu}$$

Ecuación 6.

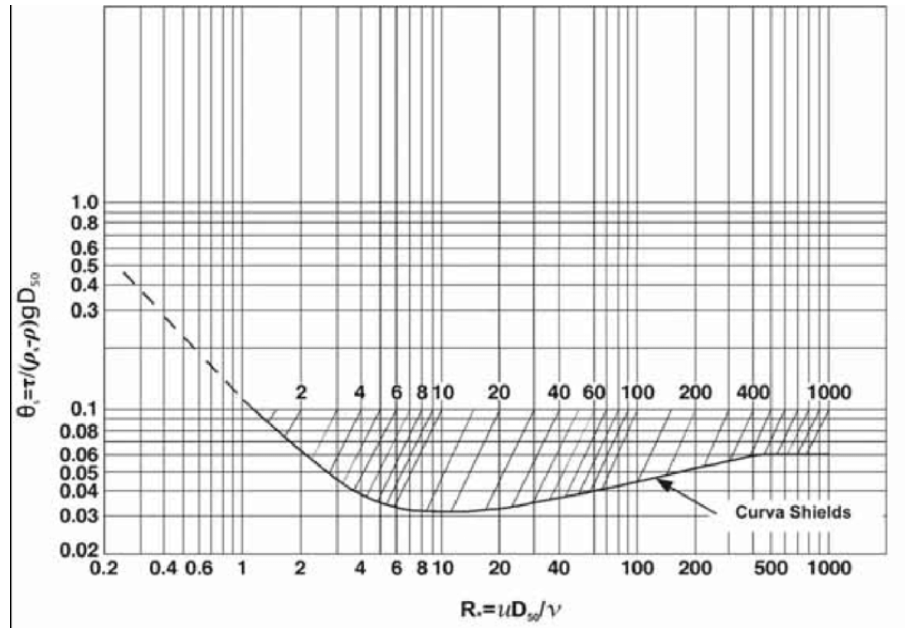


Figura 1. Diagrama de Shields
Fuente: (Dos Santos, 2010)

2.2 Ecuaciones para la cuantificación del transporte de carga de lecho.

De forma general, la tasa de transporte de carga por unidad de ancho se define como:

$$q_s = C_s * V_s * \delta_s$$

Ecuación 7.

Donde:

q_s , Tasa de transporte de carga de lecho.

C_s , Concentración volumétrica de sedimento.

δ_s , Espesor de la capa de lecho.

V_s , Velocidad promedio del sedimento en la capa de carga de lecho.

Esta ecuación ha sido empleada para determinar la tasa de transporte en función de diversos parámetros y condiciones específicas, sin embargo; en la práctica todavía existe una gran incertidumbre en la predicción del transporte de carga de lecho. (Einstein, 1950) Diversos autores han desarrollado formulaciones empíricas para la determinación de la tasa de transporte de carga de lecho de las cuales se han seleccionado las ecuaciones que han sido determinadas con base a condiciones similares a las planteadas para el presente estudio, para realizar un análisis comparativo de los resultados. A continuación se presentan dichas ecuaciones con sus parámetros de obtención (cuando se reportan) que definen sus rangos de aplicación, al encontrarse fuera de estos límites se deberá realizar un proceso de validación adicional. (Wohl & Cenderelli, 2000)

- Meyer – Peter (1949 – 1951):



$$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)gd_s^3}} = \left(\frac{4\tau_0}{\rho(s-1)gd_s} - 0.188 \right)^{3/2}$$

Ecuación 8.

Determinada para

$$1.25 < s < 4.25$$

$$d_s = d_{50}$$

S = 1.25 (arenas de lignina).

- Einstein (1942):

$$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)gd_s^3}} = 2.15 \exp\left(-0.391 \frac{\rho(s-1)gd_s}{\tau_0}\right)$$

Ecuación 9.

Determinada para

$$1.25 < s < 4.25$$

$$0.315 < d_s < 28.6 \text{ mm}$$

$$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)gd_s^3}} < 0.4$$

$$d_s \approx d_{35} \text{ a } d_{45}$$

- Parker (1979):

$$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)gd_s^3}} = 11.2 \left(\frac{(\tau_* - 0.03)^{4.5}}{\tau_*^3} \right)$$

Ecuación 10.

- Nielsen simplificada (1992):

$$q_s = C_s * V_s * \delta_s$$

Ecuación 11.

Determinada para:

$$C_s = 0.65$$

$$\frac{V_s}{V_*} = 4.8$$

$$\frac{\delta_s}{d_s} = 2.5(\tau_* - \tau_0)$$

- Schoklitsch (1950):

$$m_s = 2500 * \text{sen}(\theta)^{\frac{3}{2}} * (q - q_c)$$

Ecuación 12.

Donde:

$$q_c = 0.26 * (s - 1)^{\frac{5}{3}} * (d_{40})^{\frac{3}{2}} * \text{sen}(\theta)^{-\frac{7}{6}}$$

2.3 Configuración Experimental

La presente investigación se desarrolló en modelo físico el cual fue implementado en el canal de pendiente variable del *Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca*, el cual tiene una longitud de 12.50 m con un ancho de 30 cm y paredes laterales de altura 45 cm. La pendiente que puede adoptar el canal varía de -0.5% a 2.5% y posee una bomba capaz de suministrar hasta 26 litros por segundo.

Las pendientes consideradas para las simulaciones, varían desde 4% a 10%, por lo que se consideró la adición de un fondo artificial para el canal que permita alcanzar estos valores de pendiente elevada.

Para el control del flujo que circula por el canal se dispuso a la entrada de un vertedero triangular de pared delgada, debido a que su precisión es mayor cuando se tiene calados pequeños, puesto que; para un mismo caudal los valores de h son mayores que los de otros tipos de vertederos (rectangular, trapezoidal, etc.)

Para el vertedero triangular se consideró un ángulo en la cresta de 60° , el vértice del triángulo se encuentra a una altura de 20 cm sobre el fondo del canal y tiene un ancho de 30 cm. La configuración final del vertedero se muestra en la Figura 2.

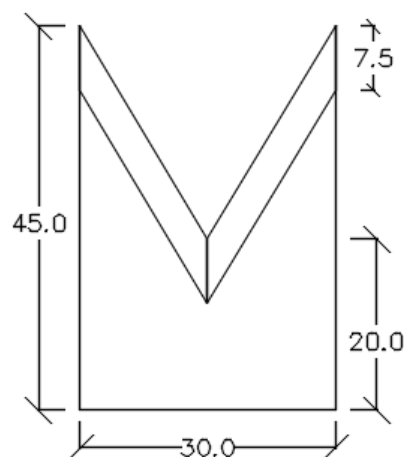


Figura 2. Configuración Vertedero

La expresión general para determinar la descarga que pasa sobre un vertedero tiene la siguiente forma: (Marbello Perez, 2005)



$$Q = C * h_v^B$$

Ecuación 13.

Donde:

C, Coeficiente según el tipo de vertedero.

B, Exponente de la carga que depende de la forma geométrica del vertedero.

Para determinar los valores de las constantes *B* y *C* (calibración de la ecuación), se miden los niveles de agua sobre la cresta a una distancia igual a 4*H* (*H* corresponde al valor máximo esperado de carga sobre el vertedero) (Marbello Perez, 2005) correspondientes a los determinados caudales. Para la estimación de velocidades, se utilizaron los equipos de medición de velocidad de flujo Vectrino Plus y el Flow Water y mediante la ecuación de la continuidad $Q = V * A$, se determinó el valor del caudal.

Mediante la linealización de la Ecuación 13 con los valores de caudal y calado medidos en laboratorio se obtiene la siguiente relación: $2.6085x + 0.1145$, donde el coeficiente *C* es 1.1241 y el exponente *B* es 2.6085 para la ecuación calibrada del vertedero.

Debido a la necesidad de la utilización de un fondo artificial para el canal se produce hacia aguas atrás la sumergencia del vertedero de control por lo que es necesaria la corrección o ajuste de los valores del caudal determinados mediante la Ecuación 13. Para determinar de manera precisa el gasto a través de un vertedero triangular sumergido, es necesario realizar una corrección, de los valores estimados para descarga libre, para ello diversos autores han desarrollado factores que permiten corregir dichos valores (Novak. P, et al., 2007). Entre los autores destacados se encuentra Villemonte (Sf), quien expresa el valor del caudal en función del grado de sumergencia y el exponente de carga de acuerdo al tipo de vertedero. Esta fórmula se expresa de la siguiente forma:

$$Q = f * Q_i$$

Ecuación 14

En donde:

$$f = (1 - S^n)^{0.385}$$

Ecuación 15

Por lo que el caudal del vertedero triangular sumergido está dado por:

$$Q = Q_i(1 - S^n)^{0.385}$$

Ecuación 16

Donde:



Q , Caudal del Vertedero Sumergido.

Q_i , Caudal del Vertedero con descarga libre.

S , Grado de sumergencia (H_2/H_1).

n , Exponente de Carga que depende del perfil del vertedero ($n = 5/2$; Vertedero Triangular).

2.4 Material del lecho

Para la simulación del proceso de transporte de sedimento se ha tomado como caso de estudio al río Tabacay, del cual se dispone de información de caracterización de secciones transversales a lo largo del río, así como también de las propiedades del material de lecho, se han considerado para el análisis, 14 secciones transversales a lo largo de su recorrido y en función de la caracterización granulométrica del material del lecho de cada sección transversal, se determinó una granulometría característica para su utilización en las simulaciones de laboratorio,. En la Figura 3 se indica la granulometría representativa del cauce natural. Con esta granulometría se efectuó el escalamiento de diámetros que permitan la simulación en laboratorio, siguiendo el procedimiento que se indica en el apartado 2.5.

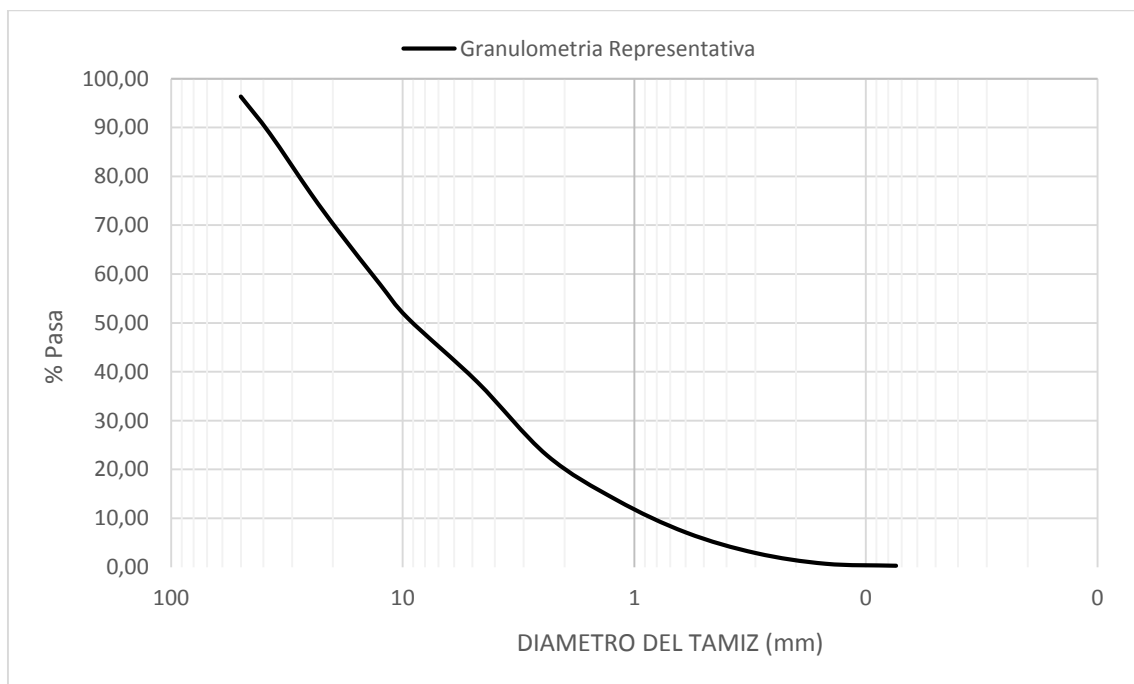


Figura 3. Granulometría Promedio de Cauce Natural

Adicionalmente, para proporcionar a las simulaciones, la variabilidad que presentan un río en condiciones normales, referente a la influencia de clastos de gran tamaño en el proceso de transporte, se ejecutarán las simulaciones con cuatro porcentajes de partículas de gran tamaño correspondientes a 5, 15, 25 y 35%, los porcentajes corresponden a las relación entre el área (en planta), que ocupan las partículas de gran tamaño, con respecto del área total.

2.5 Escalamiento



El estudio de los procesos de flujo mediante la utilización de modelos físicos ha sido ampliamente utilizado especialmente en casos como el del presente estudio, puesto que la alta tridimensionalidad, turbulencia y aleatoriedad del transporte de sedimento restan aplicabilidad a teorías generalmente desarrolladas para condiciones más estables y controladas. Para que un modelo a escala reducida constituya una adecuada representación de los procesos observados en la realidad debe cumplir con la similitud geométrica, cinemática y dinámica, que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas (Vergara, 1993).

La similitud geométrica se obtiene cuando se mantiene constante la relación entre las dimensiones del modelo y prototipo, esto implica que todas las dimensiones del modelo en cada una de las direcciones de los ejes coordenados se relacionen mediante la misma escala, siendo así que el modelo y el prototipo son idénticos en forma y difieren únicamente en el tamaño. Esto se expresa a través de un valor fijo conocido como escala de longitudes. ("Condiciones y leyes de semejanza", Sf)

$$\frac{L_p}{L_m} = \lambda_L$$

Ecuación 17.

Donde:

L_p , Longitud del prototipo.

L_m , Longitud homóloga en el modelo.

λ_L , Escala de Longitudes.

Si se cumple que las condiciones de flujo en ambos casos (modelo y prototipo) sean iguales, es decir; que partículas semejantes lleguen a puntos homólogos en tiempos homólogos se obliga a que el modelo además de poseer una escala de longitudes guarde una concordancia de los procesos cinemáticos con lo que se consigue la similitud cinemática ("Condiciones y leyes de semejanza", Sf). En el caso de procesos de flujo en canales abiertos la similitud cinemática se consigue mediante la igualdad del parámetro adimensional característico para este tipo de flujos (número de Froude). Igualando el número de Froude del modelo con el del prototipo se obtiene la relación de escalas que permite conseguir la similitud cinemática como se indica a continuación.

$$F_M = F_P$$

$$\frac{V_M}{\sqrt{g_M y_M}} = \frac{V_P}{\sqrt{g_P y_P}}$$

Donde:

V_M, V_p , Velocidad del modelo y prototipo

g_M, g_P , Gravedad del modelo y prototipo

y_M, y_P , Altura de la lámina de agua del modelo y del prototipo

$$\frac{V_M}{V_P} = \left(\frac{g_M y_M}{g_P y_P} \right)^{1/2}$$



Como el modelo y prototipo están colocados en lugares con iguales condiciones de gravedad

$$\frac{g_M}{g_P} = 1.$$

$$\lambda_V = \frac{V_M}{V_P} \qquad \lambda_l = \frac{y_M}{y_P}$$

$$\lambda_V = \sqrt{\lambda_l}$$

$$\lambda_a = \lambda_l * \lambda_l = \lambda_l^2$$

$$\lambda_q = \lambda_a * \lambda_V = \lambda_l^2 * \lambda_l^{1/2} = \lambda_l^{5/2}$$

Donde

λ_V , Escala de velocidades

λ_l , Escala de longitudes

λ_a , Escala de áreas

λ_q , Escala de caudales

Para definir la escala a utilizar en las simulaciones en laboratorio, se ha escogido una sección característica del río tomado como referencia, se consideraron los valores de ancho y alto de esta sección para el escalamiento. Para la definición de la escala de longitudes, se considera que la sección característica tiene un ancho de 2.45 m, mientras que el canal en donde se realizará la simulación, tiene un ancho de 0.3 m, con lo que la escala de ancho tiene un valor de $\lambda_l = 0.1224$, para el cual corresponde una escala de velocidades $\lambda_V = 0.35$ y una escala de caudales $\lambda_q = 0.0052$.

En virtud de que el modelo es un modelo de lecho móvil, ya que lo que se desea analizar es el proceso de transporte de sedimento, las partículas que forman el lecho deben cumplir la condición de que la relación entre la velocidad de corte (esfuerzo cortante de frontera) y la velocidad de sedimentación se mantenga en modelo y prototipo.

$$\left(\frac{V_*}{Vs}\right)_m = \left(\frac{V_*}{Vs}\right)_p \quad ; \quad \frac{V_{sm}}{V_{sp}} = \frac{V_{*m}}{V_{*p}}$$

$$V_{*m} = \sqrt{g \times H_m \times S_m} \quad ; \quad V_{*p} = \sqrt{g \times H_p \times S_p}$$

$$\frac{V_{sm}}{V_{sp}} = \sqrt{\frac{g \times H_m \times S_m}{g \times H_p \times S_p}}$$

$$\frac{V_{sm}}{V_{sp}} = \sqrt{\lambda_l}$$



$$V_{sm} = 0.35 V_{sp}$$

A partir de la granulometría del lecho se calculan las velocidades de sedimentación correspondientes al prototipo, en función del diámetro de la partícula, de su peso específico sumergido y de la viscosidad del fluido en el que sedimenta, y con la ecuación propuesta por Soulsby. (Pacheco T. & Carrillo S., 2014)

$$V_s = \frac{v}{D} [(10,36^2 + 1,049D_*^3) - 10,36]$$

Ecuación 18.

$$D_* = \left[\frac{gR}{v^2} \right] D$$

Ecuación 19.

Donde:

- g Aceleración de la gravedad
- v Viscosidad cinemática del agua
- D Diámetro medio de los granos
- R $(\rho_s - \rho)/\rho$ Peso específico sumergido de los granos

Se escala dicha velocidad, y se calcula con la misma ecuación (Soulsby) el diámetro escalado de las partículas de sedimento. En la Figura 4 se presentan las curvas granulométricas correspondientes al modelo y al prototipo.

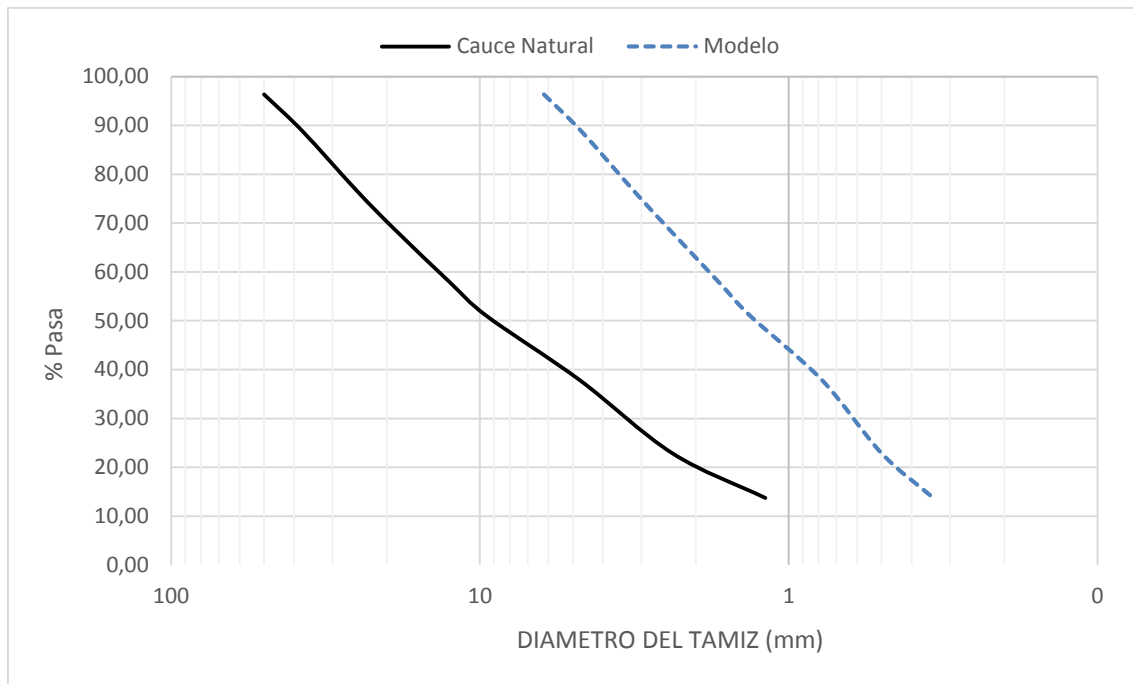


Figura 4. Curvas Granulométricas

2.6 Experimentación

Las simulaciones del transporte de carga de lecho se realizaron considerando como componente fijo la cama de lecho construida a partir de la granulometría resultante (Figura 4) luego del proceso de escalamiento. En esta cama de lecho, adicionalmente, se implementó un porcentaje de clastos de gran tamaño el cual se consideró como un porcentaje del área total (en planta), dichos porcentajes tienen valores de 5%, 15%, 25% y 35%. Para la toma de datos se consideraron 5 caudales que varían desde 0.44 L/s a 15.39 L/s, entre los cuales se encuentran eventos regulares del río. Adicionalmente se analizaron 7 valores de pendiente, con valores correspondientes a 4%, 5%, 6%, ..., 10%, para lo cual se implementaron fondos artificiales en el canal, como ya se indicó anteriormente.

Considerando todas las variaciones indicadas para los parámetros de simulación, pendiente, caudal y porcentaje de partículas de gran tamaño se definió un total de 140 simulaciones, para cada una de las cuales se midieron, parámetros hidráulicos del flujo (calados y velocidades), así como también las tasas de transporte de sedimento.

Mediante la utilización de cámaras de alta velocidad se siguió el recorrido de partículas de sedimento previamente identificadas y marcadas, lo que permite determinar su velocidad de transporte.

2.7 Análisis Estadístico.

Los datos procedentes de las 140 simulaciones realizadas fueron sometidos a un análisis de regresión lineal simple con el cual se determinó la correlación que presenta cada una de las variables independientes (independiente del proceso de transporte de sedimento) pendiente,



porcentaje de piedras de gran tamaño, calado, velocidad, caudal líquido, y diámetro representativo, con la variable dependiente (tasa de transporte).

Una vez establecida dicha correlación se procedió a efectuar un análisis de regresión lineal múltiple siguiendo la forma de la relación que se presenta en la Ecuación 20, como se puede observar, esta es similar a la ecuación básica de movimiento de carga de lecho (Ecuación 7), en el presente estudio se consideran las variables independientes descritas para obtener una relación que describa el proceso de transporte de sedimento observado en laboratorio.

$$q_s = C a_1^{x_1} a_2^{x_2} \dots a_n^{x_n}$$

Ecuación 20.

Donde a_1, a_2, \dots, a_n representan las variables independientes medidas en el laboratorio a las que les corresponden los exponentes x_1, x_2, \dots, x_n respectivamente que resultan del proceso de ajuste, se determinaron mediante la linealización de la Ecuación 20, al igual que el valor de la constante C;

El modelo de regresión lineal simple es el más utilizado cuando se necesita predecir una variable cuantitativa a partir de otra variable cuantitativa, en donde una de estas se considera como la variable explicativa o predictora (x) y la otra como la variable dependiente o de respuesta (y). En donde la ecuación que representa la relación entre estas dos variables es la ecuación de una línea recta (Molina & Rodrigo, 2010; Montgomery and Runger, 2011).

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x + \epsilon$$

Ecuación 21

Aunque la regresión lineal es una potente herramienta para obtener información entre dos variables (explicativa y dependiente), no es aplicable cuando se utiliza para entender fenómenos en los que influyen más de dos variables explicativas, es por ello que se emplea el modelo de regresión lineal múltiple, el cual es idéntico al modelo de regresión lineal con la diferencia de que correlaciona más de una variable explicativa con la variable dependiente (Montero Granados, 2016).

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + \dots + b_j \cdot x_j + \epsilon$$

Ecuación 22:

Donde:

Y, Variable a predecir.

$b_0 - b_1 - b_2 - b_3 - b_j$, Coeficientes parciales de la regresión.

X_i , Variables independientes.

ϵ , Error en la estimación de parámetros dado por variables no controladas.

La bondad de ajuste describe el adecuamiento del modelo a los datos observados, es decir, mide el grado de similitud de los datos observados con los datos obtenidos mediante el modelo. Esta similitud se mide en función de:



- **Coefficiente de Correlación Múltiple (R):** Indica la proporción en la que una variable dependiente se relaciona con un conjunto de variables independientes. (Devore, 2008)
- **Coefficiente de Determinación (R²):** Indica el porcentaje de datos observados que son explicados por el modelo.
- **Coefficiente de Determinación Ajustado (R²ajustado):** Indica el porcentaje de datos observados que son explicados por el modelo sin importar el número de variables.
- **Error típico de Predicción:** Indica el porcentaje de datos que no son explicados por el modelo.

2.7.1 Parámetros de Validación

Para verificar la bondad de ajuste del modelo mediante los datos medidos se utilizan parámetros de validación como: El coeficiente de correlación (R²), el coeficiente de relación de Nash & Sutcliffe (E) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

- **Coefficiente de Correlación (R²):** Es una medida adimensional que indica la relación lineal entre datos observados y simulados, que generalmente se encuentra en un intervalo de -1 a 1, en donde un valor de cero significa una ausencia de correlación; el valor de 1 representa una tendencia positiva lineal perfecta y el valor de -1 señala una tendencia negativa lineal perfecta entre los datos. La ecuación mediante la cual se calcula el coeficiente de correlación es: (Montgomery & Runger, 2011)

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i(X_i - \bar{X}))^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 * \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Ecuación 23:

- **Coefficiente de eficiencia de Nash & Sutcliffe (E):** Este indicador mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. El coeficiente E tendrá un valor de 1 cuando la simulación sea perfecta, mientras que tendrá un valor negativo cuando el modelo sea pobre y será cero cuando se ajusten las observaciones al valor promedio. Se recomienda para la toma de decisiones en cuanto a la bondad de ajuste del modelo los valores presentados en la Tabla 1:

*Tabla 1. Valores referenciales del Criterio de Nash – Sutcliffe
Fuente: (Molnar, 2011)*

E	Ajuste
< 0,2	Insuficiente
0,2 - 0,4	Satisfactorio
0,4 - 0,6	Bueno
0,6 - 0,8	Muy Bueno
> 0,8	Excelente

Su ecuación se define como (Molnar, 2011):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n ((X_i - Y_i)^2)}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$



- **Raíz del error cuadrático medio (RMSE):** Permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los valores observados. Valores iguales a 0 indicaran que la relación es perfecta, mientras que valores mayores indicaran un ajuste más pobre. La ecuación se representa como: (Cabrera, Sf)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{N}}$$

Ecuación 25: Error cuadrático Medio.

Donde:

 X_i , Valor observado. Y_i , Valor calculado. \bar{X} , Media de los valores observados. \bar{Y} , Media de los valores calculados.

2.7.2 Prueba de Hipótesis

Prueba f

Para determinar si existe una relación entre un conjunto de variables independientes con una variable dependiente es necesario establecer las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula: $H_0: X_1 = X_2 = \dots = X_n = 0$

Hipótesis Alternativa: $H_1: \text{al menos un } X_i \neq 0$

Por lo que es necesario definir un análisis de varianza, el cual está dado por:

Tabla 2. Análisis de Varianza
Fuente: Rojo Abuín

Tabla de Varianza				
Fuente Variación	Suma Cuadrados	Grados de Libertad	Media Cuadrática	Estadístico de Prueba
Regresión	VE	k	MSR	F*
Residual	VNE	n-p	MSE	
Total	VT	n-1		

Donde:



VE, Suma total de cuadrados de la regresión.

VNE, Suma total de cuadrados de los errores.

VT, Suma total de cuadrados, $VT = VE + VNE$.

MSR, Cuadrado de la media de las estimaciones del modelo. $MSR = VE / k$

MSE, Cuadrado de la media de los residuos. $MSE = VNE / n-p$

F*, Estadístico de prueba. $F^* = MSR / MSE$

Para verificar las hipótesis planteadas anteriormente se hace uso del estadístico de prueba (F*), el cual sigue una distribución Fisher con $X_1 = k$ y $X_2 = n-p$ grados de libertad. Para un alfa (nivel de significancia) de 1%, 5% y 10% se establece el nivel de confianza del test a un 99%, 95% y 90%. De modo que:

$$\text{Si } F^* \leq F(1 - \alpha; k; n - p), \text{ se acepta la hipótesis nula.}$$

Y

$$\text{Si } F^* > F(1 - \alpha; k; n - p), \text{ se rechaza la hipótesis nula.}$$

Al rechazar la hipótesis nula se concluye que existe al menos una variable independiente que está relacionada con la variable dependiente. (Devore, 2008)



3. Resultados y Discusión

3.1 Resultados calibración del vertedero

La ecuación de calibración del vertedero de entrada corresponde a $Q = 1.1241 * H_V^{2.6085}$. En la Figura 5 se presenta dicha curva para el vertedero triangular implementado en el canal de laboratorio.

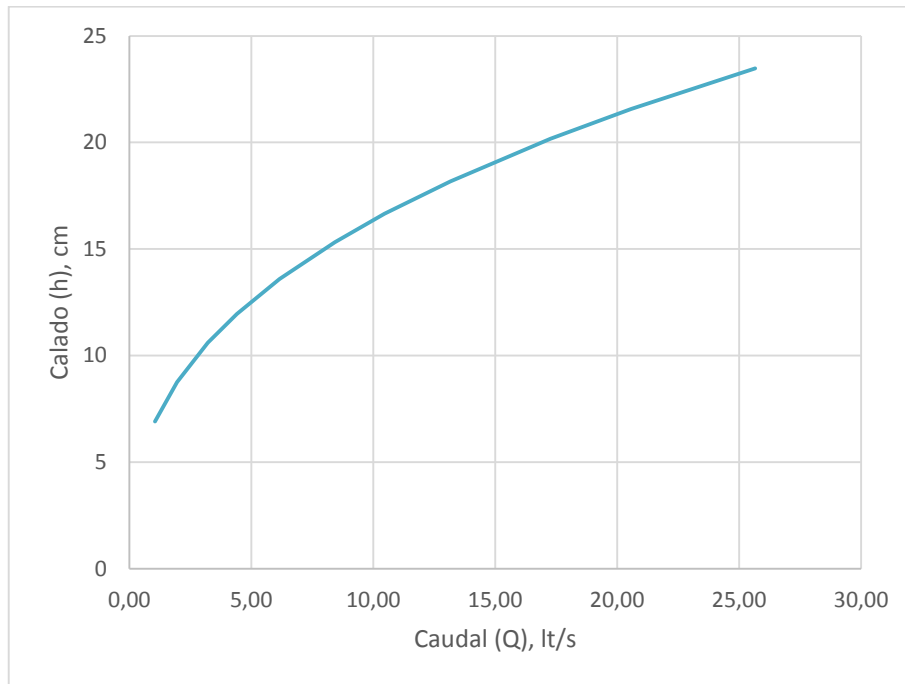


Figura 5: Curva de Calibración

3.2 Tasa de transporte de sedimentos

Para las 140 simulaciones realizadas se midieron los valores de velocidad media de flujo, calado medio, velocidad superficial, y su correspondiente tasa de transporte. Un fragmento de los resultados de las simulaciones realizadas se presenta en la Tabla 3, donde se pueden observar el valor que toman las variables independientes y la variable dependiente.

Tabla 3. Resultados Simulación

Pendiente [%]	% Piedras de Gran Tamaño	Caudal [m ³ /s]	Velocidad Media [m/s]	Velocidad Superficial [m/s]	Calado [m]	Tasa [Kg/s]
4	35%	0.00047	0.10275	0.41617	0.01850	0.00452
4	35%	0.00194	0.41441	0.64134	0.01800	0.09436
4	35%	0.00495	0.86918	0.67130	0.01900	0.29316
4	35%	0.00938	1.42195	0.93379	0.02200	0.42078
4	35%	0.01335	1.27144	0.93336	0.03500	0.68911
5	35%	0.00074	0.23150	0.33061	0.01450	0.00458
5	35%	0.00243	0.58990	0.61203	0.01650	0.16634



5	35%	0.00523	1.12423	0.67008	0.01550	0.38063
5	35%	0.00941	1.11990	0.85565	0.02800	0.53155
5	35%	0.01204	0.96682	0.93524	0.04150	1.20500
6	35%	0.00076	0.23271	0.24750	0.01550	0.01508
6	35%	0.00248	0.61754	0.56897	0.01433	0.22098
6	35%	0.00540	0.87856	0.65349	0.02050	0.43622
6	35%	0.00984	1.19255	0.87302	0.02750	0.75326
6	35%	0.01524	1.26999	1.01486	0.04000	1.25169
7	35%	0.00074	0.33034	0.31646	0.01875	0.04243
7	35%	0.00247	0.63307	0.48925	0.01300	0.22841
7	35%	0.00531	0.95764	0.62143	0.01850	0.65961
7	35%	0.00989	1.17712	0.91880	0.02800	1.22609
7	35%	0.01537	1.44293	1.14577	0.03550	1.58327
8	35%	0.00051	0.22584	0.39778	0.01500	0.05255
8	35%	0.00119	0.33153	0.57797	0.01433	0.40027
8	35%	0.00157	0.49816	0.44814	0.01050	0.19864
8	35%	0.00698	0.89465	1.04167	0.02600	0.99324
8	35%	0.01408	1.51345	1.40046	0.03100	1.31729
9	35%	0.00054	0.16330	0.22242	0.01100	0.14662
9	35%	0.00226	0.62838	0.54213	0.01200	0.15027
9	35%	0.00203	0.42269	0.53708	0.01600	0.41112
9	35%	0.00681	0.75663	1.01829	0.03000	1.04819
9	35%	0.01461	1.29828	1.12720	0.03750	2.02146
10	35%	0.00094	0.16855	0.53538	0.01850	0.25434
10	35%	0.00260	0.69298	1.01496	0.01250	0.56627
10	35%	0.00215	0.57248	0.57507	0.01250	0.50479
10	35%	0.00707	0.85673	1.13070	0.02750	1.34389
10	35%	0.01436	1.49550	2.08333	0.03200	2.26503

En la Tabla 3, para el rango de valores presentados, se observa que la tasa de transporte de sedimentos incrementa conforme aumenta la pendiente, de manera similar se produce un incremento en la tasa con un crecimiento del caudal; mientras que a medida que el porcentaje de piedras de gran tamaño aumenta, la tasa disminuye. Sin embargo, para el caso del 35% de clastos de gran tamaño con una determinada combinación de pendiente y caudal, este incrementa el movimiento de la cama de lecho, debido a que las condiciones de flujo se ven afectadas por la formación de olas.

Los valores obtenidos en la Tabla 3 corresponden a los datos provenientes del modelo físico en laboratorio, estos valores deberán ser escalados para obtener su valor correspondiente al prototipo.

El Anexo 1 presenta los valores de parámetros medidos en el laboratorio.

En el Anexo 2 especifica los valores de las variables correspondientes a los valores de prototipo.



3.3 Resultados de la regresión lineal

Los valores de las diferentes variables obtenidas del proceso de simulación se procesaron mediante análisis de regresión lineal simple y regresión lineal múltiple para determinar los parámetros más influyentes en la tasa de transporte de sedimentos, con lo que se estableció una ecuación para el movimiento de carga de lecho.

El análisis de regresión lineal simple consiste en determinar la correlación que presenta cada una de las variables independientes con la variable dependiente, para ello se analiza la bondad de ajuste de cada uno de estos modelos, donde un R^2 cercano a 1 indica un mayor grado de incidencia de la variable independiente sobre la variable dependiente.

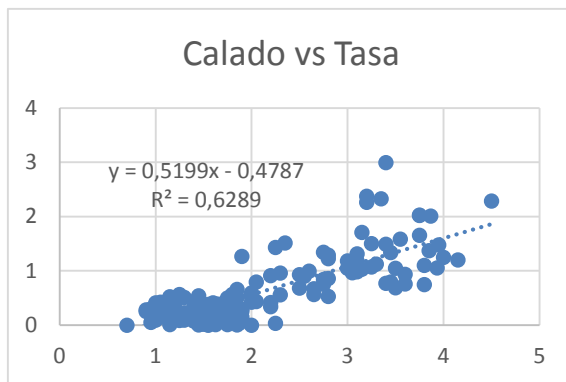


Figura 6. Calado vs tasa

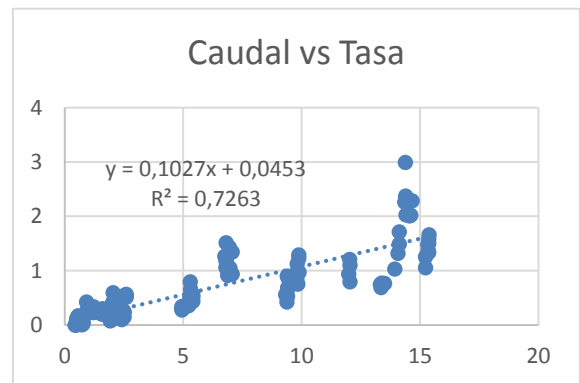


Figura 7. Caudal vs Tasa

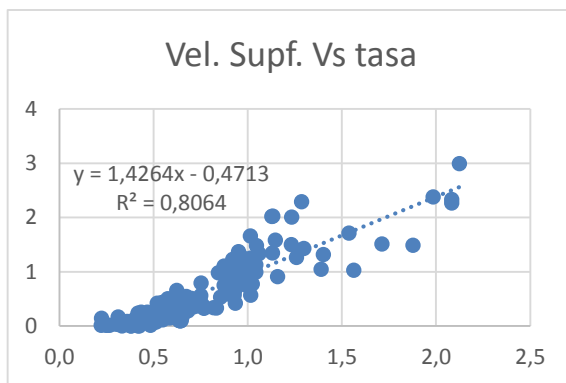


Figura 8. Vel Media vs Tasa

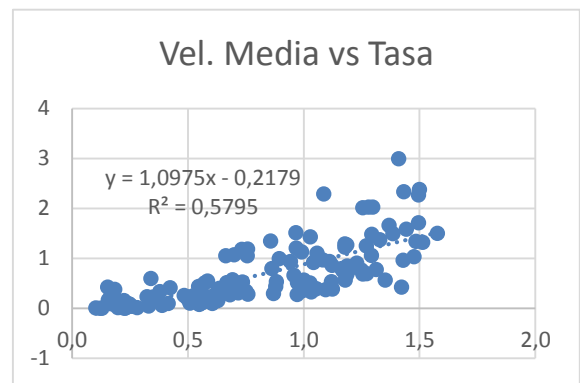


Figura 9. Vel. Sup vs Tasa

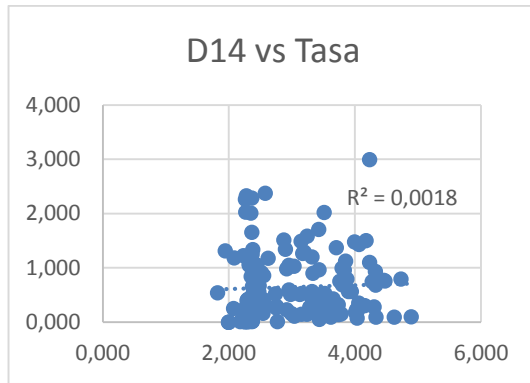


Figura 10. D14 vs Tasa

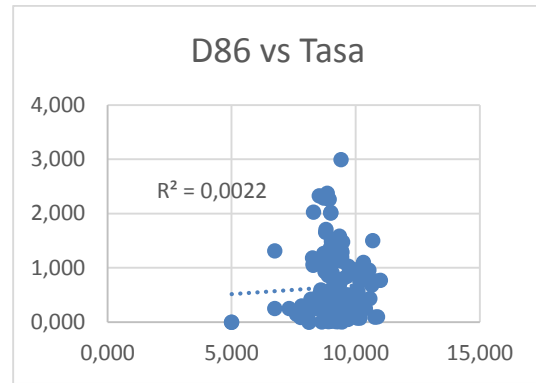


Figura 11. D86 vs Tasa

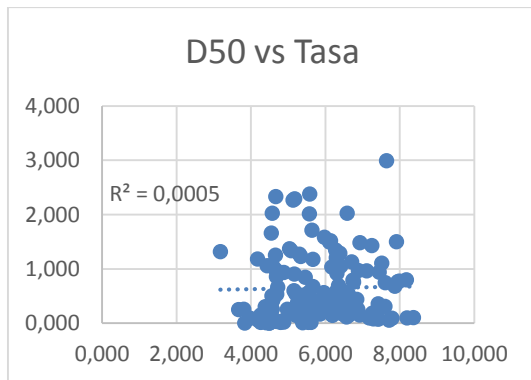


Figura 12. D90 vs Tasa

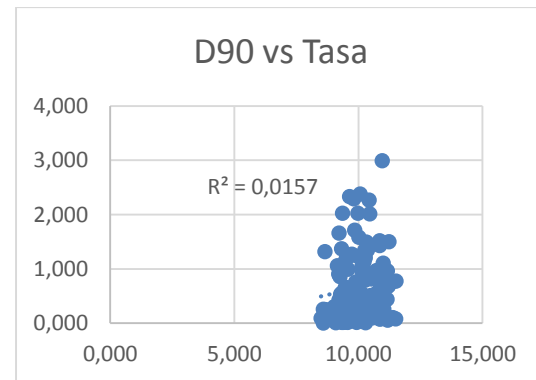


Figura 13. D50 vs Tasa

Los valores de correlación de cada una de las variables principales, se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Correlación: Variables principales vs Tasa

Variable	Símbolo	Coefficiente R2
Calado	y	0.63
Caudal	Q	0.73
Diámetro 14	D14	0.00
Diámetro 50	D50	0.01
Diámetro 86	D86	0.00
Diámetro 90	D90	0.02
Pendiente	m	0.11
Porcentaje de Piedras	%PI	0.03
Velocidad Media	Vm	0.59
Velocidad Superficial	Vsup	0.81



Como se refleja en la

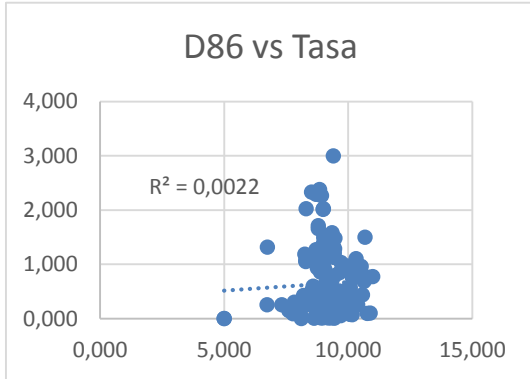


Figura 10. D14 vs Tasa

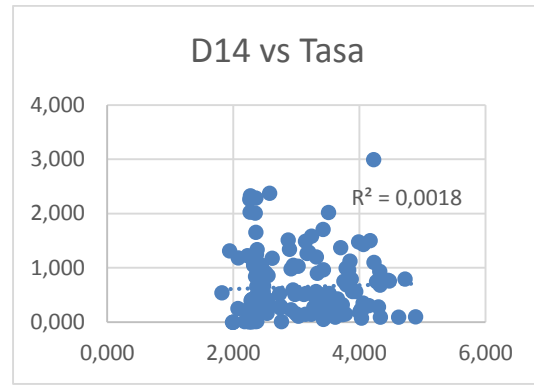
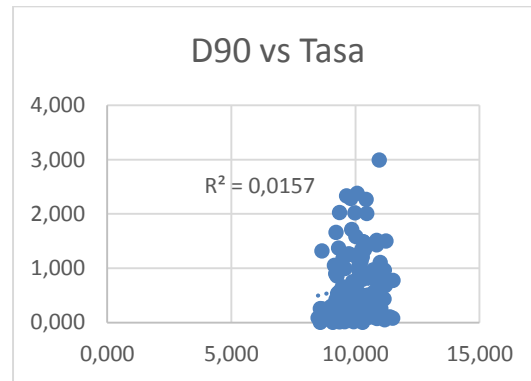
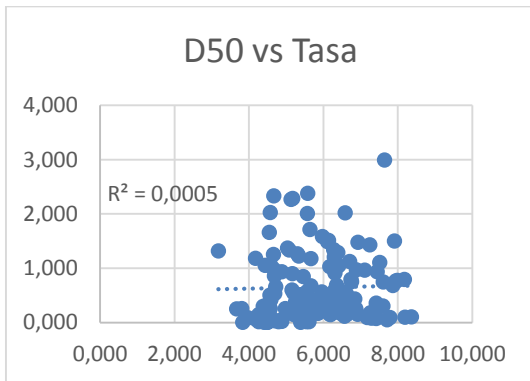


Figura 11. D86 vs Tasa



Los valores de correlación de cada una de las variables principales, se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4 la velocidad superficial es la variable que mejor ajuste tiene al representar la tasa de transporte en función de la misma, seguida del caudal y calado, mientras que la velocidad media es la variable de flujo que menor R^2 presenta. Valores muy bajos de correlación se observan entre los diámetros característicos del material transportado (D_{14} , D_{50} , D_{86} y D_{90}), pero de aquí se destaca que el que tiene mayor correlación es el D_{90} , por lo que este valor será utilizado para su inclusión en el modelo que se pretende. El ajuste de la tasa con la pendiente, presenta también valores bajos de correlación, sin embargo, tal como se puede observar en la Figura 14, la pendiente define una tendencia en el transporte de sedimento, que es a mayor pendiente mayor transporte, pero variables adicionales como el caudal líquido ayudan a definir de mejor manera esta tendencia. Situación similar ocurre cuando se analiza el porcentaje de piedras de gran tamaño directamente

con la tasa de transporte, es decir que a pesar de que se define un tendencia de que la tasa de transporte disminuye a medida que aumenta el porcentaje de piedras de gran tamaño, esta tendencia esta comandada también por la influencia de otra variable como el caudal líquido.

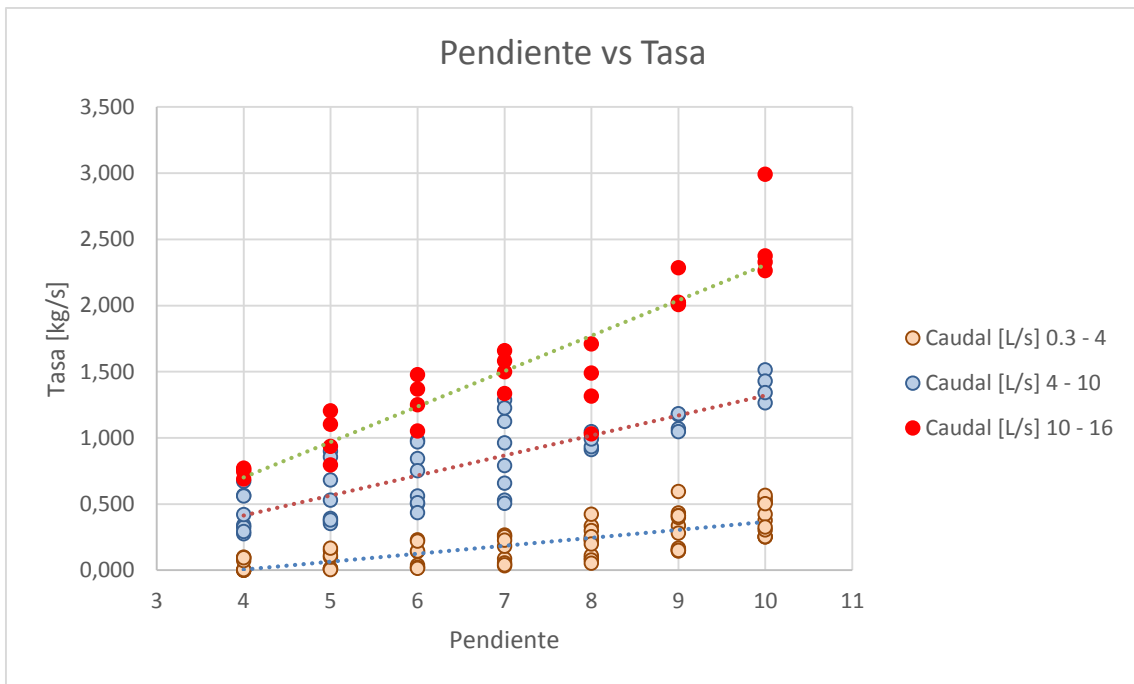


Figura 14. Pendiente vs Tasa

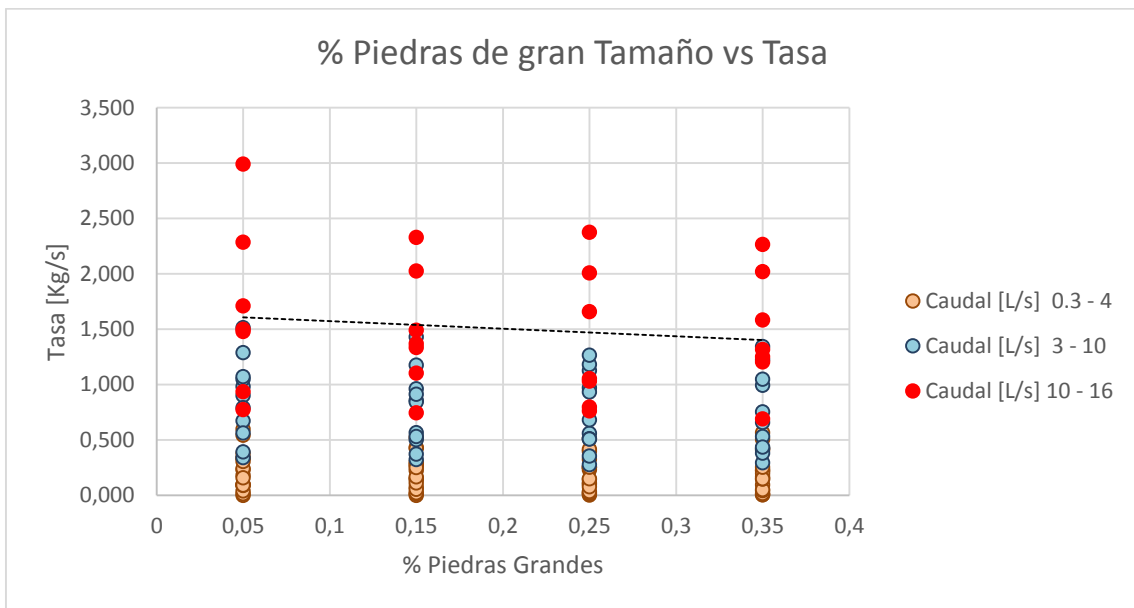


Figura 15. Porcentaje de Piedras de gran Tamaño vs Tasa

Diversos autores han expresado sus ecuaciones para el transporte de sedimentos en función de variables adicionales a las presentadas anteriormente; estos parámetros son conocidos como variables secundarias, pues se obtienen a partir de las variables primarias. Por esta razón en la Tabla 5 se muestra la correlación que presentan algunos de los parámetros secundarios más utilizados para el análisis con la tasa de transporte.

Tabla 5. Correlación: Variables secundarias vs Tasa



Variable	Símbolo	Coefficiente R2
Esfuerzo Cortante	T_o	0.83
Velocidad de Corte	V_x	0.80
Espesor de la cama de lecho	δ_s	0.82
Parámetro de Estabilidad	T_x	0.77

Tal como se puede verificar, el ajuste con estas variables secundarias es considerablemente más alto, ya que estas son una combinación conveniente de las variables primarias, en el presente estudio, se pretende una relación general que describa el proceso de transporte de sedimento, por lo que se optará por la utilización de las variables primarias tal como se describe en la Tabla 6.

Tabla 6. Coeficientes para Regresión

Parámetros	Coefficiente
Calado	a1
Caudal	a2
D90	a3
Pendiente	a4
Porcentaje de Piedras	a5
Velocidad Media	a6

En la Tabla 7 se presenta un extracto de los datos empleados para la regresión lineal múltiple después del proceso de linealización.

Tabla 7. Variables linealizadas

Ln (%PI)	Ln (P)	Ln (Q)	Ln (Vm)	Ln (y)	Ln (D90)	Ln (Tasa)
-1.050	-3.219	-7.672	-2.275	-3.990	-4.576	-4.196
-1.050	-3.219	-6.245	-0.881	-4.017	-4.528	-1.157
-1.050	-3.219	-5.307	-0.140	-3.963	-4.582	-0.023
-1.050	-3.219	-4.669	0.352	-3.817	-4.649	0.338
-1.050	-3.219	-4.316	0.240	-3.352	-4.615	0.832
-1.050	-2.996	-7.211	-1.463	-4.234	-4.701	-4.181
-1.050	-2.996	-6.018	-0.528	-4.104	-4.651	-0.590
-1.050	-2.996	-5.254	0.117	-4.167	-4.542	0.238
-1.050	-2.996	-4.666	0.113	-3.576	-4.680	0.572
-1.050	-2.996	-4.420	-0.034	-3.182	-4.578	1.390
-1.050	-2.813	-7.186	-1.458	-4.167	-4.675	-2.990
-1.050	-2.813	-6.000	-0.482	-4.245	-4.662	-0.306



-1.050	-2.813	-5.221	-0.129	-3.887	-4.496	0.374
-1.050	-2.813	-4.621	0.176	-3.594	-4.617	0.921
-1.050	-2.813	-4.184	0.239	-3.219	-4.628	1.428
-1.050	-2.659	-7.204	-1.108	-3.977	-4.690	-1.956
-1.050	-2.659	-6.004	-0.457	-4.343	-4.613	-0.273
-1.050	-2.659	-5.237	-0.043	-3.990	-4.658	0.788
-1.050	-2.659	-4.616	0.163	-3.576	-4.604	1.408
-1.050	-2.659	-4.176	0.367	-3.338	-4.603	1.663
-1.050	-2.526	-7.585	-1.488	-4.200	-4.494	-1.742
-1.050	-2.526	-6.735	-1.104	-4.245	-4.590	0.288
-1.050	-2.526	-6.457	-0.697	-4.556	-4.664	-0.412
-1.050	-2.526	-4.965	-0.111	-3.650	-4.648	1.197
-1.050	-2.526	-4.263	0.414	-3.474	-4.750	1.480
-1.050	-2.408	-7.526	-1.812	-4.510	-4.726	-0.716
-1.050	-2.408	-6.091	-0.465	-4.423	-4.588	-0.691
-1.050	-2.408	-6.200	-0.861	-4.135	-4.628	0.315
-1.050	-2.408	-4.989	-0.279	-3.507	-4.670	1.251
-1.050	-2.408	-4.226	0.261	-3.283	-4.607	1.908
-1.050	-2.303	-6.974	-1.781	-3.990	-4.758	-0.165
-1.050	-2.303	-5.953	-0.367	-4.382	-4.658	0.635
-1.050	-2.303	-6.144	-0.558	-4.382	-4.584	0.520
-1.050	-2.303	-4.952	-0.155	-3.594	-4.570	1.500
-1.050	-2.303	-4.244	0.402	-3.442	-4.563	2.022

El Anexo 3 presenta los datos linealizados empleados para el análisis de regresión lineal múltiple.

Luego del proceso de regresión lineal múltiple se obtuvieron los valores de los exponentes y la constante para la Ecuación 20, estos valores se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de la Regresión Lineal Múltiple

Parámetros	Valor
Contante [C]	2.03E+06
Calado	-1.121
Caudal	2.143
D90	0.884
Pendiente	1.652
Porcentaje de Piedras	-0.070
Velocidad Media	-1.225

Los valores estadísticos del modelo obtenido, se presentan en la Tabla 9, donde se aprecia valores de correlación cercanos a la unidad demostrando así que este representa de gran manera los



procesos observados en las simulaciones en laboratorio, a la vez que se tiene un error típico de desviación estándar relativamente bajo.

Tabla 9. Estadísticas de Regresión Múltiple

Parámetro	Símbolo	Valor
Coefficiente de Correlación Múltiple	R	0.952
Coefficiente de Determinación	R ²	0.907
Coefficiente de Determinación Ajustado	R ² ajustado	0.903
Error Típico de Desviación Estándar	Et	0.393

De esta manera, la ecuación obtenida para el transporte de sedimentos, presenta la siguiente forma:

$$q_s = \frac{2.03E6 * Q^{2.143} * D_{90}^{0.884} * m^{1.652}}{y^{1.121} * \%PI^{0.07} * V_m^{1.225}}$$

Ecuación 26.

Donde:

Q, Caudal [m³/s]

D₉₀, Diámetro 90 [m]

m, Pendiente [m/m]

V_m, Velocidad media [m/s]

y, Calado [m]

%PI, Porcentaje de Piedra de gran tamaño [m²/m²]

Adicionalmente se realizó un modelo de regresión lineal múltiple sin considerar la influencia del porcentaje de piedras de gran tamaño debido a que al ser una relación de áreas elevado a un exponente cercano a cero (0.07) toma valores similares a 1, por lo cual su influencia en la tasa de transporte es mínima. La ecuación de este análisis es:

$$q_s = \frac{4.04E6 * Q^{2.181} * D_{90}^{0.989} * m^{1.652}}{y^{1.150} * V_m^{1.277}}$$

Ecuación 27.

Modelo de regresión lineal múltiple considerando la influencia del porcentaje de piedras de gran tamaño.

Al comparar los datos obtenidos mediante la Ecuación 26 con los datos medidos en el laboratorio se puede establecer un diagrama de Dispersión de Tasas (Figura 16), en donde se observa que



para valores de tasa menores a 0.7 Kg/s-m la ecuación sobrestima, mientras que para un rango de valores de 0.7 a 2 Kg/s-m no existe una tendencia marcada para sobrestimar o subestimar los valores de la tasa, ya que estos valores se encuentran cercanos a la línea de tendencia. Para un rango de 2 a 5.5 Kg/s-m la ecuación tiende a subestimar estos datos y para valores mayores a 5.5 Kg/s-m las tasas calculadas con el modelo son mayores a las tasas medidas en el laboratorio.

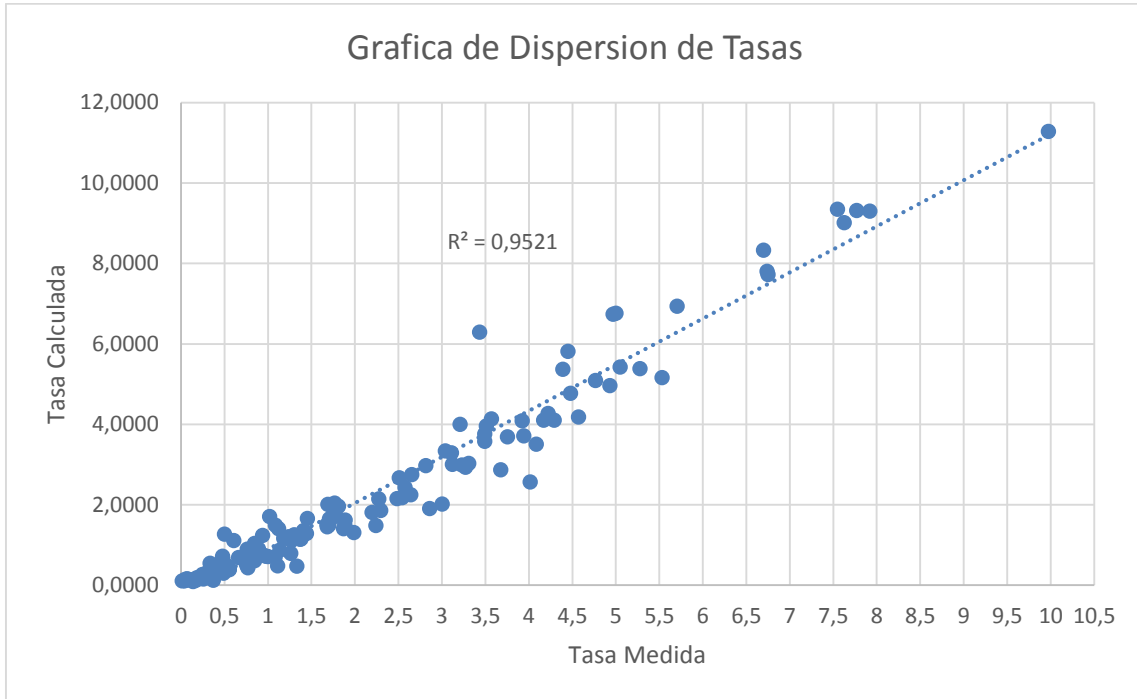


Figura 16. Diagrama de Dispersión de Tasas

Prueba de Hipótesis F (Fisher)

En la Tabla 10 se presentan los datos obtenidos del análisis de varianza para el modelo lineal múltiple.

Tabla 10. Análisis de Varianza

Tabla de Varianza				
Fuente Variación	Suma Cuadrados	Grados de Libertad	Media Cuadrática	Estadístico de Prueba
Regresión	761.24	5	152.25	402.202
Residual	49.21	130	0.379	
Total	810.45	135		

Como se puede observar en la Tabla 11, el estadístico de prueba es mayor al valor obtenido mediante la distribución de Fisher para cada uno de los intervalos de significancia del modelo, con lo que se rechaza la hipótesis nula en cada caso, concluyendo que existe al menos una variable independiente que se relaciona con la variable dependiente.

Tabla 11. Validación de Hipótesis



Valores de Alfa	Distribución de Fisher	$F^* > F(1-\alpha; k; n-p)$	Solución
1%	0.316334682	3.161	Si Cumple
5%	0.437841617	2.284	Si Cumple
10%	0.528515288	1.892	Si Cumple

Modelo de regresión lineal múltiple sin considerar la influencia del porcentaje de piedras de gran tamaño.

Al comparar los datos obtenidos mediante la Ecuación 27 con los datos medidos en el laboratorio se puede establecer un diagrama de Dispersión de Tasas (Figura 17), en donde se observa que para valores de tasa menores a 0.7 Kg/s-m la ecuación sobrestima, mientras que para un rango de valores de 0.7 a 1.9 Kg/s-m no existe una tendencia marcada para sobrestimar o subestimar los valores de la tasa, ya que estos valores se encuentran cercanos a la línea de tendencia. Para un rango de 1.9 a 5.7 Kg/s-m la ecuación tiende a subestimar estos datos y para valores mayores a 5.7 Kg/s-m las tasas calculadas con el modelo son mayores a las tasas medidas en el laboratorio.

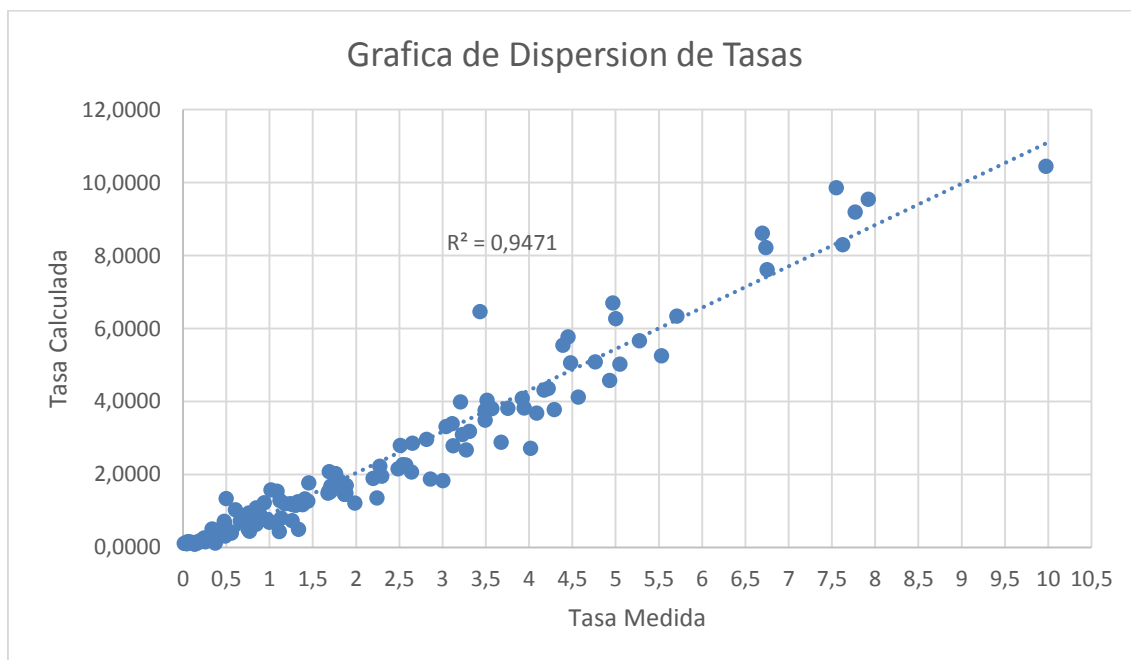


Figura 17. Dispersión de Tasas (Modelo sin %PI)

Prueba de Hipótesis F (Fisher)

En la Tabla 12 se presentan los datos obtenidos del análisis de varianza para el modelo lineal múltiple.

Tabla 12. Tabla de Varianza (Modelo sin %PI)



Tabla de Varianza				
Fuente Variación	Suma Cuadrados	Grados de Libertad	Media Cuadrática	Estadístico de Prueba
Regresión	747.19	5	149.44	388.50
Residual	50.00	130	0.38	
Total	797.19	135		

Como se puede observar en la Tabla 13, el estadístico de prueba es mayor al valor obtenido mediante la distribución de Fisher para cada uno de los intervalos de significancia del modelo, con lo que se rechaza la hipótesis nula en cada caso, concluyendo que existe al menos una variable independiente que se relaciona con la variable dependiente.

Tabla 13. Prueba F. para validación del modelo sin %PI

Valores de Alfa	Distribución de Fisher	F* > F(1-a; k; n-p)	Solución
1%	0.316334682	3.161	Si Cumple Se rechaza la Hipótesis Nula
5%	0.437841617	2.284	Si Cumple Se rechaza la Hipótesis Nula
10%	0.528515288	1.892	Si Cumple Se rechaza la Hipótesis Nula

Parámetros de Validación

En la Tabla 14 se presentan los parámetros de validación (Suma de la Media de los Cuadrados, Coeficiente de Nash, Coeficiente de Determinación Múltiple y Coeficiente de Correlación) para las ecuaciones de tasa de transporte de carga de lecho planteadas anteriormente.

Tabla 14. Parámetros de Validación

Parámetro	Símbolo	Ecuación sin %PI	Ecuación con %PI
Raíz del Error Cuadrático Medio	RMSE	0.61	0.60
Coeficiente de Nash	E	0.91	0.91
Coeficiente de Correlación	R2	0.93	0.94

Como se puede observar los valores de los parámetros son relativamente iguales, en donde, para el modelo en el que no se considera la influencia del %PI el valor del RMSE difiere en una centésima del otro modelo, lo cual se ve reflejado en el Coeficiente de Correlación ya que el modelo que considera la influencia del %PI posee un mayor coeficiente de correlación.

3.4 Resultados comparación de ecuaciones

En función a los datos experimentales obtenidos de la simulación y los datos teóricos que proporcionan las diferentes ecuaciones existentes en la literatura se realizó un análisis



comparativo que permite conocer el grado de correlación entre la ecuación experimental y las ecuaciones de literatura, un fragmento de estos datos se presentan en la Tabla 15:

Tabla 15. Tasa de Transporte de Sedimento en función de las ecuaciones de diversos autores

Tasa Medida [Kg/s-m]	Tasa Calculada	qs Shocklitsch	qs Nilsen	qs Mey. Peter	qs Parker	qs Einstein
2,576	2,429	2,623	1,351	0,754	0,00	0,01
2,485	2,155	2,613	1,506	0,892	0,00	0,01
2,543	2,178	2,645	1,455	0,822	0,00	0,01
2,297	1,856	2,617	1,212	0,789	0,00	0,01
3,123	3,006	3,283	1,919	1,151	0,00	0,01
3,678	2,868	3,298	2,130	1,249	0,00	0,01
2,653	2,752	3,296	1,853	1,079	0,00	0,01
4,017	2,565	3,295	2,269	1,426	0,00	0,01
4,932	4,965	5,518	2,788	1,742	0,00	0,01
4,570	4,184	5,523	2,416	1,677	0,00	0,01
3,513	3,958	5,486	2,450	1,732	0,00	0,01
4,172	4,103	5,485	2,684	1,776	0,00	0,01
5,001	6,765	6,965	2,849	1,638	0,00	0,01
4,451	5,816	6,967	2,844	1,792	0,00	0,01
5,531	5,159	6,979	2,895	2,033	0,00	0,01
5,278	5,386	6,968	2,900	1,871	0,00	0,01
5,707	6,935	7,823	2,913	1,911	0,00	0,01
4,968	6,742	7,822	3,421	2,144	0,00	0,01
3,434	6,296	7,720	3,007	1,911	0,00	0,01
4,391	5,366	7,797	2,494	1,867	0,00	0,01
7,625	9,012	9,691	5,906	3,901	0,00	0,01
6,752	7,728	9,516	4,288	2,966	0,00	0,01
6,698	8,329	9,611	5,019	3,105	0,00	0,01
6,738	7,803	9,648	4,571	2,966	0,00	0,01
9,976	11,284	11,117	5,080	2,998	0,00	0,01
7,770	9,319	11,134	4,365	2,933	0,00	0,01
7,921	9,303	11,132	4,259	2,737	0,00	0,01
7,550	9,349	11,101	4,412	2,737	0,00	0,01

Dispersión de Tasas

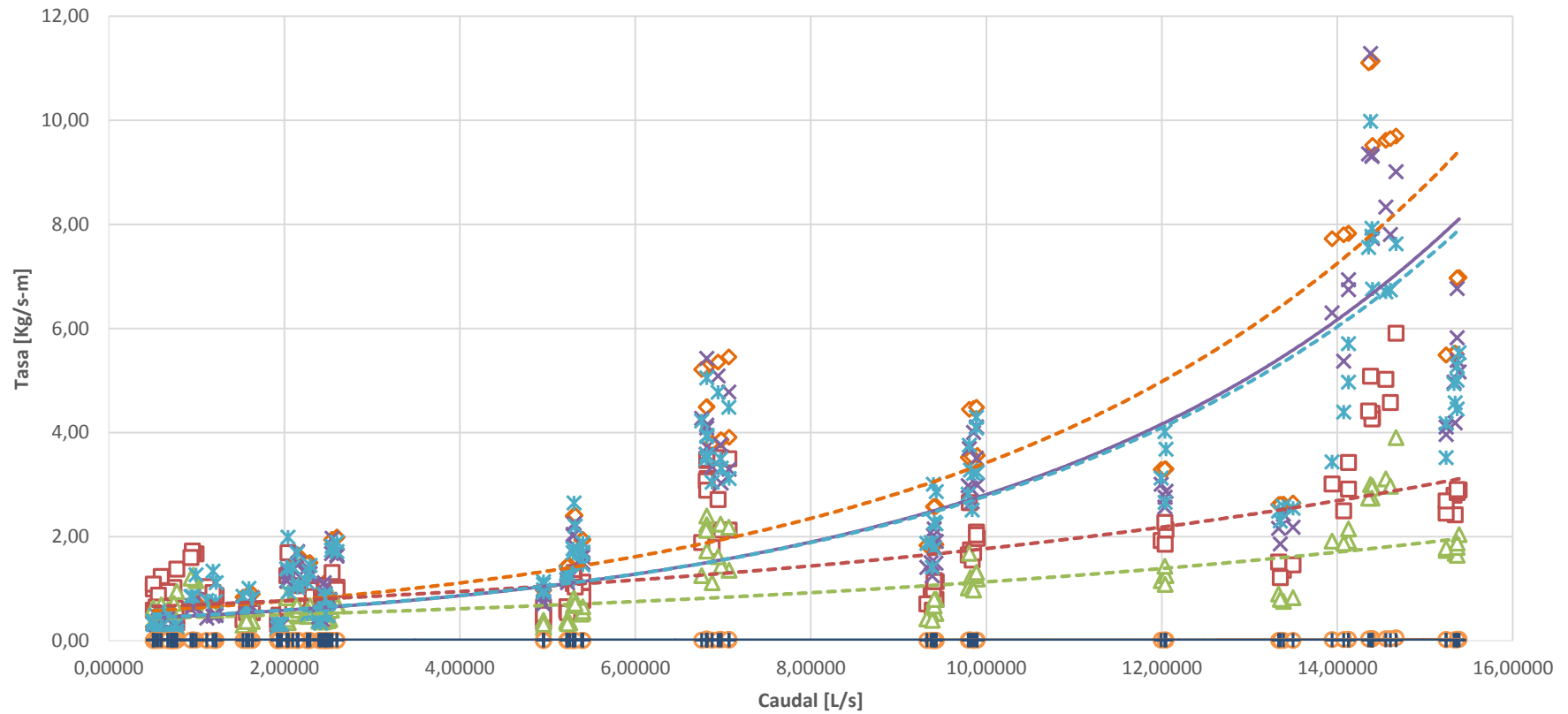


Figura 18. Comparación de Ecuaciones.

Como se puede observar en la Figura 18 las Ecuaciones desarrolladas por Parker y Einstein no presentan ninguna concordancia al ser comparados con los valores medidos en el laboratorio, ya que estos son cercanos a cero, pues estas ecuaciones fueron desarrolladas para condiciones de pendiente fuera del rango de los analizados en el presente estudio.

En cuanto a los valores de la tasa de transporte calculada con las ecuaciones de Shocklitsch, Nilsen y Meyer Peter presentan cierta similitud cuando los valores de caudal y pendiente son bajos, ya que estos valores tienden a estar cerca de la línea de tendencia, a medida que el caudal aumenta los valores de las tasas de las ecuaciones de Nilsen y Meyer Peter subestiman las tasas medidas, mientras que la ecuación de Shocklitsch las sobrestima.

La Ecuación de Shocklitsch es una de las pocas ecuaciones que es desarrollada bajo condiciones similares a las del cauce natural, considerando para su análisis material de lecho como grava y aplicada a condiciones de alta pendiente (Georgiev, 1990), es por ello que se puede evidenciar la alta correlación que presenta esta ecuación con los valores obtenidos en el laboratorio y con la ecuación formulada. En la Tabla 16 se presentan los parámetros estadísticos de la ecuación de Shocklitsch con respecto a la Ecuación Formulada, en donde se puede observar que estos valores no difieren en gran medida.

Tabla 16. Parámetros de Validación (Shocklitsch).

Parámetro	Símbolo	Ecuación formulada	Ecuación de Shocklitsch
Suma de la Media de los Cuadrados	RMSE	0,60	1,03
Coefficiente de Nash	E	0,91	0,73
Coefficiente de Correlación	R2	0,94	0,87

En el Anexo 4 se presenta la tabla con los valores de tasas de transporte de sedimento para las diferentes ecuaciones.



4. Conclusiones y Recomendaciones

- En el presente estudio se han desarrollado simulaciones del proceso de transporte de sedimento considerando las variaciones de parámetros como caudal, pendiente, y porcentaje de partículas de sedimento de gran tamaño presentes en el cauce del río. Adicionalmente, se consideró la utilización de partículas de sedimento de formas y distribución naturales, lo que permite la obtención de un modelo experimental más general.
- El material de lecho considerado para el análisis del transporte de sedimentos proviene del escalamiento del árido presente en el Río Tabacay. El material escalado presenta tamaños desde 1.19 mm hasta los 12.5 mm. A pesar de que las variables principales no presentan valores de correlación en un análisis de regresión lineal simple tan altos como los que se obtienen mediante la utilización de variables indirectas o secundarias, son utilizadas para la obtención de un modelo experimental del transporte de sedimentos de carga de lecho.
- La ecuación obtenida en función de los resultados de las simulaciones para la estimación de la tasa de transporte de sedimentos es:

$$q_s = \frac{2.03E6 * Q^{2.143} * D_{90}^{0.884} * m^{1.652}}{y^{1.121} * \%PI^{0.07} * V_m^{1.225}}$$

La misma que posee un $R^2 = 0.94$, un coeficiente de eficiencia de Nash = 0.91 y un RMSE = 0.60

- Adicionalmente, se consideró la exclusión del parámetro porcentaje de piedras de gran tamaño del análisis, puesto que de acuerdo a coeficiente obtenido no presenta mayor influencia en el proceso de transporte para el rango de los datos considerados en este estudio. La ecuación es:

$$q_s = \frac{4.04E6 * Q^{2.181} * D_{90}^{0.989} * m^{1.652}}{y^{1.150} * V_m^{1.277}}$$

La misma que posee un $R^2 = 0.93$, un coeficiente de eficiencia de Nash = 0.91 y un RMSE = 0.61.

- Los dos modelos que se presentan poseen un gran ajuste con los datos provenientes de las simulaciones tanto así que las diferencias en sus parámetros de ajuste varían en el tercer decimal. Según los valores referenciales dados por Nash – Sutcliffe se establece un ajuste excelente para ambos modelos, por lo que la consideración de dicho parámetro podría obviarse, al ser un parámetro de difícil medición en campo.
- A partir de las ecuaciones determinadas del modelo de regresión lineal múltiple se puede evidenciar que la pendiente tiene una relación directamente proporcional a la tasa de transporte, además de ser una de las variables que más influyen debido al valor del exponente que posee en ambas ecuaciones. Esto se ve reflejado ya que como se mencionó anteriormente a mayor pendiente y mayor caudal mayor tasa.
- Al comparar las tasas de transporte obtenidas de las ecuaciones seleccionadas con las tasas medidas en el laboratorio, se determinó que la ecuación de Parker y de Einstein no presentan semejanza alguna, obteniendo un R^2 igual a cero. Mientras que Meyer – Peter



tiene un valor de 0.15, Nilsen de 0.47 y Shocklitsch de 0.87 siendo esta ecuación la que mejor se ajusta a los resultados obtenidos en el laboratorio.



5. Bibliografía

"Condiciones y leyes de semejanza". (Sf).

Ackers, P., & White, W. R. (1973). Sediment transport: New approach and analysis. *Journal of the Hydraulics division*, 2041-2060.

Bravo Espinoza, M., Osterkamp, W. R., & Lopes, V. L. (2004). Revisión técnica de ecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimentos de fondo . *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*.

Cabrera, J. (Sf). Calibración de modelos hidrológicos.

Carling, P. A., & Reader, N. A. (1982). Structure, composition and bulk properties of upland stream gravels. *Earth surface Processes and Landforms*, 349-365.

Chen, W., Tan, S.K., & Tay. (1996). Distribution, fractional composition and release of sediment-bound heavy metals in tropical reservoirs. *Water, air, and soil pollution* .

Devore, J. L. (2008). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. California.

Devore, J. L. (s.f.). *Probabilidad y Estadística para ingeniería y Ciencias*.

Dos Santos, V. (2010). Processos Fluviais em Barras de Soldamento: Río Paraná.

Einstein, H. A. (1950). The bed load function for sediment transportation in open channel flows. En S. C. service, *Technical Bulletin*. Washington D.C.

EMAPAL EP. (2003). *Plan de manejo de la cuenca del rio Tabacay*. Azogues.

Georgiev, B. V. (1990). Reliability of bed load measurements in mountain rivers. *Hidrological Measurements, The water cycle*.

Gessler, J. (1964). Beginning and ceasing of sediment motion. *Water Resources Publications*.

Ghilardi, T., Franca, M. J., & Schleiss, A. J. (2014). Sediment transport in steep channels with large roughness elements. *River Flow 2014*, 899-907.

Gomez, B., & Church, M. (1986). An Assessment of Bed Load Sediment Transport Formulae for Gravel Bed Rivers. *Water Resources Research*, 1161-1186.

Goode, J. R., & Wohl, E. (2010). Coarse sediment transport in a bedrock channel with complex bed topography. *Water Resources Research*.

Hamburg, G. (2014). Fundamentos del transporte de sedimentos.

Judd, H., & Peterson, D. (1969). Hydraulics of Large Bed Element Channels. *Utah Water Research Laboratory*.



- Lamb, M. P., Dietrich, W. E., & Venditti, J. (2008). Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel slope? *Journal of Geophysical Research Atmospheres*.
- Marbello Perez, R. (2005). *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica*. Medellín.
- McCuen, R. H. (1989). *Hydrologic analysis and design*.
- Misri, R. L., Garde, R. J., & Ranga Raju, K. G. (1984). Bed Load Transport of Coarse Nonuniform Sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Molina, J. G., & Rodrigo, M. F. (2010). *El modelo de regresión lineal*. Obtenido de OCW- UV: http://ocw.uv.es/ciencias-sociales-y-juridicas/estadistica-i/tema_6.pdf
- Molnar, P. (2011). "Calibration" Watershed Modelling. *Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management*.
- Montero Granados, R. (2016). *Modelos de regresion lineal múltiple*. Granada: Departamento de Economía Aplicada.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2011). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. New York.
- Niño, Y. (2004). *Hidráulica fluvial y transporte de Sedimentos*. Chile.
- Novak, P., Moffat, A., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2007). *Hydraulic Structures*.
- Pacheco T., E., & Carrillo S., V. (2014). Transporte de fondo potencial mediante estudio en modelo físico de lecho móvil. *Maskana*, 73-81.
- Papanicolaou, A., Bdour, A., & Wicklein, E. (2004). One-dimensional hydrodynamic/sediment transport model applicable to steep mountain streams. *Journal of Hydraulic Research*, 357-375.
- Sotelo Ávila, G. (1997). *Hidráulica General*. Mexico D.F.: Limusa.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales*. Mexico D.F.
- van Rijn, L. C. (1984). Sediment Transport, Part 1: Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1431-1456.
- Vergara, M. (1993). *Técnicas de modelación en Hidráulica*. Mexico: Alfaomega.
- Wohl, E. E., & Cenderelli, A. (2000). Sediment deposition and transport patterns following a reservoir sediment release. *Water resources Research*.
- Yager, E. M., Kenworthy, M., & Monsalve, A. (2015). Taking the river inside: Fundamental advances from laboratory experiments in measuring and understanding bedload transport processes. *Geomorphology*. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.002>



Yager, E. M., Kirchner, J. W., & Dietrich, W. E. (2007). Calculating bed load transport in steep boulder bed channels. *WATER Resources Research*.



6. Anexos

6.1 Resultados de las Simulaciones

Anexo 1. Tabla de datos crudos

Tabla A1- 1. Datos Pendiente 4%

Fuente: Propia

Pendiente [%]	Carga de Agua		Caudal		% Piedras de gran tamaño	Velocidad Superficial [m/s]	Velocidad Media			Tasa de Transporte		
	Calado Aguas Arriba [cm]	Calado Aguas Abajo [cm]	f	Q [L/s]			Calado Rampa		Velocidad Media [m/s]	Tiempo [s]	Peso Material [g]	Tasa [kg/s]
							Aguas Arriba	Aguas Abajo				
4	9,69	9,65	0,17	0,44	5%	0,38	0,70	2,40	0,13	293,70	138,2	0,0005
	10,07	10,03	0,17	0,48	15%	0,38	0,70	0,70	0,23	257,80	21,9	0,0001
	10,11	10,07	0,17	0,48	25%	0,42	1,40	2,60	0,12	250,00	185,3	0,0007
	9,96	9,92	0,17	0,47	35%	0,42	1,20	2,50	0,10	244,60	1104,7	0,0045
	12,13	11,57	0,43	1,97	5%	0,64	1,63	1,63	0,48	46,50	4433,6	0,10
	12,11	11,58	0,42	1,92	15%	0,51	1,60	1,60	0,48	40,80	3000,9	0,07
	12,11	11,58	0,42	1,92	25%	0,63	1,50	1,50	0,56	48,00	4835,0	0,10
	12,12	11,58	0,42	1,94	35%	0,64	1,80	1,80	0,41	56,50	5331,6	0,09
	15,14	13,33	0,61	4,95	5%	0,69	2,20	2,20	0,75	20,10	6850,4	0,34
	15,14	13,33	0,61	4,95	15%	0,77	2,00	1,20	1,03	20,73	6723,0	0,32
	15,14	13,33	0,61	4,95	25%	0,68	2,00	1,40	0,97	20,47	5675,3	0,28
	15,14	13,33	0,61	4,95	35%	0,67	2,20	1,60	0,87	23,55	6904,0	0,29
	18,29	14,88	0,70	9,43	5%	0,89	3,50	1,80	1,19	10,80	7268,2	0,67
	18,02	14,30	0,73	9,37	15%	0,92	3,00	2,30	1,18	11,70	6617,1	0,57
	18,28	14,97	0,70	9,33	25%	0,93	3,10	1,50	1,35	12,50	7008,8	0,56
	18,20	14,72	0,71	9,38	35%	0,93	3,00	1,40	1,42	12,10	5091,4	0,42
	20,93	17,04	0,70	13,39	5%	1,02	3,60	3,20	1,31	5,20	4018,4	0,77
	20,98	17,20	0,70	13,33	15%	0,99	4,00	3,60	1,17	5,10	3802,6	0,75
	20,93	16,94	0,71	13,50	25%	0,91	3,60	3,60	1,25	5,10	3891,4	0,76
	20,89	16,98	0,71	13,35	35%	0,93	3,70	3,30	1,27	7,30	5030,5	0,69

Tabla A1- 2. Datos Pendiente 5%

Fuente: Propia

Pendiente [%]	Carga de Agua		Caudal		% Piedras de gran tamaño	Velocidad Superficial [m/s]	Velocidad Media			Tasa de Transporte		
	Calado Aguas Arriba [cm]	Calado Aguas Abajo [cm]	f	Q [L/s]			Calado Rampa		Velocidad media [m/s]	Tiempo [s]	Peso Material [g]	Tasa [kg/s]
							Aguas Arriba	Aguas Abajo				
5	6,34	4,07	0,86	0,72	5%	0,22	1,50	2,00	0,22	149,4	1944,9	0,013
	6,34	4,19	0,84	0,71	15%	0,26	1,00	1,30	0,28	157,3	1937	0,012
	6,34	4,24	0,84	0,71	25%	0,48	0,90	2,35	0,20	246,3	3312	0,013
	6,43	4,25	0,84	0,74	35%	0,33	1,20	1,70	0,23	241,4	1106,3	0,005
	9,91	5,73	0,89	2,41	5%	0,65	2,30	1,50	0,51	37,3	3758,30	0,10
	9,94	5,89	0,89	2,41	15%	0,58	2,30	1,50	0,51	32,0	4840,60	0,15
	9,97	6,16	0,87	2,39	25%	0,55	1,40	2,00	0,56	33,2	3723,40	0,11
	9,95	5,80	0,89	2,43	35%	0,61	1,80	1,50	0,59	43,2	7181,1	0,17
	13,32	7,72	0,89	5,22	5%	0,76	2,40	0,90	1,05	16	6260,9	0,39
	13,31	7,50	0,90	5,25	15%	0,74	1,80	1,40	1,09	15,8	5887,8	0,37
	13,37	7,96	0,88	5,22	25%	0,71	2,00	1,50	0,99	15,7	5565	0,35
	13,33	7,73	0,89	5,23	35%	0,67	2,10	1,00	1,12	20,41	7768,6	0,38
	16,69	9,68	0,89	9,40	5%	0,88	2,20	2,90	1,23	6,03	5434,2	0,90
	16,72	9,73	0,89	9,43	15%	0,91	2,80	2,80	1,12	6,88	5902,2	0,86
	16,71	9,75	0,89	9,41	25%	0,88	2,50	2,50	1,25	6,8	4638,6	0,68
	16,71	9,75	0,89	9,41	35%	0,86	3,20	2,40	1,12	10,2	5421,8	0,53
	18,36	10,83	0,89	11,99	5%	0,91	4,00	3,20	1,11	5,44	5096,4	0,94
	18,42	10,99	0,88	12,05	15%	0,87	4,50	3,10	1,06	5,61	6190,6	1,10
	18,26	10,18	0,90	12,04	25%	0,98	3,60	3,30	1,16	5,45	4338,2	0,80
	18,35	10,67	0,89	12,04	35%	0,94	5,00	3,30	0,97	5,06	6097,3	1,21



Tabla A1- 3. Datos Pendiente 6%
Fuente: Propia

Pendiente [%]	Carga de Agua		Caudal		% Piedras de gran tamaño	Velocidad Superficial [m/s]	Velocidad Media			Tasa de Transporte		
	Calado Aguas Arriba [cm]	Calado Aguas Abajo [cm]	f	Q [L/s]			Calado Rampa		Velocidad media [m/s]	Tiempo [s]	Peso Material [g]	Tasa [kg/s]
							Aguas Arriba	Aguas Abajo				
6	5,95	-	1,00	0,72	5%	0,30	1,60	2,10	0,26	126,90	4988,8	0,04
	5,95	-	1,00	0,72	15%	0,25	1,00	2,00	0,22	121,90	2713,8	0,02
	5,99	-	1,00	0,73	25%	0,33	1,30	1,70	0,22	122,00	2557,5	0,02
	6,08	-	1,00	0,76	35%	0,25	1,00	2,10	0,23	111,40	1680,3	0,02
	9,64	-	1,00	2,52	5%	0,49	1,00	2,00	0,60	37,56	8685,2	0,23
	9,61	-	1,00	2,50	15%	0,53	1,90	1,00	0,57	21,57	3101,1	0,14
	9,60	-	1,00	2,49	25%	0,48	1,10	2,00	0,56	18,56	2686,2	0,14
	9,58	-	1,00	2,48	35%	0,57	1,20	1,67	0,62	20,28	4481,4	0,22
	12,92	1,01	1,00	5,40	5%	0,75	2,00	1,60	1,00	12,50	7034,8	0,56
	12,91	1,06	1,00	5,39	15%	0,68	2,30	1,20	1,03	12,90	6492,0	0,50
	12,92	1,05	1,00	5,40	25%	0,70	2,30	1,40	0,97	18,70	9543,5	0,51
	12,92	0,93	1,00	5,40	35%	0,65	1,80	2,30	0,88	11,00	4798,4	0,44
	16,27	2,67	1,00	9,82	5%	0,84	3,30	2,90	1,06	12,90	12668,8	0,98
	16,25	2,50	1,00	9,80	15%	0,89	3,30	2,20	1,19	6,70	5659,1	0,84
	16,32	2,69	1,00	9,90	25%	0,90	3,40	2,70	1,08	6,90	6689,3	0,97
	16,28	2,62	1,00	9,84	35%	0,87	3,30	2,20	1,19	6,90	5197,5	0,75
	19,32	3,84	0,99	15,33	5%	1,05	4,20	3,70	1,29	5,40	7989,8	1,48
	19,32	3,67	0,99	15,34	15%	0,95	4,10	3,60	1,33	5,00	6854,9	1,37
	19,27	3,67	0,99	15,24	25%	0,96	4,20	3,67	1,29	5,20	5480,7	1,05
	19,27	3,67	0,99	15,24	35%	1,01	4,30	3,70	1,27	5,40	6759,1	1,25

Tabla A1- 4. Datos Pendiente 7%
Fuente: Propia

Pendiente [%]	Carga de Agua		Caudal		% Piedras de gran tamaño	Velocidad Superficial [m/s]	Velocidad Media			Tasa de Transporte		
	Calado Aguas Arriba [cm]	Calado Aguas Abajo [cm]	f	Q [L/s]			Calado Rampa		Velocidad media [m/s]	Tiempo [s]	Peso Material [g]	Tasa [kg/s]
							Aguas Arriba	Aguas Abajo				
7	6,11	-	1,00	0,77	5%	0,36	0,70	1,80	0,25	118,3	10354,2	0,09
	6,14	-	1,00	0,78	15%	0,35	0,90	1,00	0,39	88,9	4895,7	0,06
	6,14	-	1,00	0,78	25%	0,31	1,50	3,00	0,23	98,7	3311,1	0,03
	6,04	-	1,00	0,74	35%	0,32	1,50	2,25	0,33	101,5	4305,4	0,04
	9,55	-	1,00	2,46	5%	0,54	2,10	0,90	0,55	31,3	5718,20	0,18
	9,55	-	1,00	2,46	15%	0,59	1,40	1,00	0,68	21,5	5733,50	0,27
	9,57	-	1,00	2,47	25%	0,46	1,00	2,40	0,48	23,4	5960,00	0,25
	9,57	-	1,00	2,47	35%	0,49	1,20	1,40	0,63	14,8	3380,5	0,23
	12,83	-	1,00	5,30	5%	0,75	2,40	1,70	0,86	8,8	6976,4	0,79
	12,82	-	1,00	5,29	15%	0,64	2,20	1,80	0,88	9,0	4768,9	0,53
	12,82	-	1,00	5,29	25%	0,63	2,20	1,40	0,98	8,4	4257,9	0,51
	12,84	-	1,00	5,31	35%	0,62	2,00	1,70	0,96	9,6	6332,3	0,66
	16,29	-	1,00	9,89	5%	0,96	3,20	2,40	1,18	5,4	6955,1	1,29
	16,27	-	1,00	9,86	15%	0,92	2,30		1,43	6,2	5967,9	0,96
	16,24	-	1,00	9,81	25%	1,04	4,10	2,50	0,99	6,4	7207,5	1,13
	16,29	-	1,00	9,89	35%	0,92	3,20	2,40	1,18	8,2	10053,9	1,23
	19,29	-	1,00	15,37	5%	1,23	3,60	2,90	1,58	3,9	5851,7	1,50
	19,29	-	1,00	15,37	15%	1,06	3,40	3,50	1,48	4,1	5474,6	1,34
	19,30	-	1,00	15,39	25%	1,01	4,10	3,40	1,37	5,6	9292,1	1,66
	19,29	-	1,00	15,37	35%	1,15	4,00	3,10	1,44	5,2	8233	1,58



Tabla AI- 5. Datos Pendiente 8%
Fuente: Propia

Pendiente [%]	Carga de Agua		Caudal		% Piedras de gran tamaño	Velocidad Superficial [m/s]	Velocidad Media			Tasa de Transporte		
	Calado Aguas Arriba [cm]	Calado Aguas Abajo [cm]	f	Q [L/s]			Calado Rampa		Velocidad media [m/s]	Tiempo [s]	Peso Material [g]	Tasa [kg/s]
							Aguas Arriba	Aguas Abajo				
8	11,67	11,65	0,12	0,51	5%	0,43	1,0	1,0	0,17	67,30	6172,0	0,09
	11,67	11,65	0,12	0,51	15%	0,40	1,5	1,5	0,23	67,10	7505,1	0,11
	11,70	11,67	0,14	0,60	25%	0,39	1,6	1,6	0,25	66,30	5131,3	0,08
	11,68	11,66	0,12	0,51	35%	0,40	1,5	1,5	0,23	67,70	3557,4	0,05
	12,72	12,60	0,24	1,22	5%	0,83	1,4	1,4	0,38	26,00	8682,6	0,33
	12,70	12,58	0,24	1,22	15%	0,61	1,4	1,4	0,35	24,80	5604,1	0,23
	12,83	12,74	0,21	1,12	25%	0,49	1,5	1,5	0,32	21,50	4972,3	0,23
	12,75	12,64	0,23	1,19	35%	0,58	1,4	1,4	0,33	26,00	10407,0	0,40
	12,79	12,54	0,31	1,64	5%	0,42	1,1	1,0	0,52	18,50	4460,2	0,24
	12,74	12,50	0,31	1,60	15%	0,61	1,1	0,8	0,56	18,40	5525,0	0,30
	12,59	12,36	0,30	1,53	25%	0,43	0,8	1,0	0,57	19,88	5064,1	0,25
	12,83	12,61	0,30	1,57	35%	0,45	1,1	1,0	0,50	20,32	4036,3	0,20
	16,59	13,90	0,67	6,97	5%	1,39	3,5	3,5	0,66	9,90	10375,8	1,05
	16,31	13,41	0,69	6,88	15%	1,16	2,3	2,1	1,04	9,50	8670,4	0,91
	16,27	13,06	0,72	7,07	25%	0,97	2,5	2,5	0,94	9,40	8772,2	0,93
	16,39	13,46	0,69	6,98	35%	1,04	2,6	2,6	0,89	9,90	9833,1	0,99
	21,31	17,26	0,71	14,13	5%	1,54	3,4	2,9	1,50	3,37	5769,9	1,71
	21,31	17,26	0,71	14,13	15%	1,88	3,9	2,9	1,39	4,37	6512,6	1,49
	21,24	17,26	0,71	13,94	25%	1,56	3,4	2,9	1,48	3,98	4100,7	1,03
	21,29	17,26	0,71	14,08	35%	1,40	3,3	2,9	1,51	5,82	7666,6	1,32

Tabla AI- 6. Datos Pendiente 9%
Fuente: Propia

Pendiente [%]	Carga de Agua		Caudal		% Piedras de gran tamaño	Velocidad Superficial [m/s]	Velocidad Media			Tasa de Transporte		
	Calado Aguas Arriba [cm]	Calado Aguas Abajo [cm]	f	Q [L/s]			Calado Rampa		Velocidad media [m/s]	Tiempo [s]	Peso Material [g]	Tasa [kg/s]
							Aguas Arriba	Aguas Abajo				
9	7,73	7,26	0,48	0,67	5%	0,65	1,30	1,30	0,17	64,70	10280,2	0,16
	7,70	7,40	0,40	0,57	15%	0,31	1,20	1,20	0,16	61,90	10355,8	0,17
	7,70	7,22	0,48	0,67	25%	0,41	1,00	1,00	0,22	65,40	9774,7	0,15
	7,67	7,40	0,39	0,54	35%	0,22	1,10	1,10	0,16	64,00	9383,8	0,15
	9,52	6,38	0,84	2,04	5%	0,93	2,00	2,00	0,34	18,12	10809,8	0,60
	9,52	6,36	0,84	2,05	15%	0,65	0,90	0,90	0,76	18,28	5150,2	0,28
	9,52	6,46	0,83	2,03	25%	0,65	1,00	1,00	0,68	18,28	7580,1	0,41
	9,52	6,46	0,83	2,03	35%	0,54	1,60	1,60	0,42	18,91	7774,2	0,41
	9,88	6,56	0,84	2,26	5%	0,82	1,10	1,10	0,69	22,60	7602,4	0,34
	9,98	6,77	0,83	2,29	15%	0,54	1,40	1,40	0,55	22,50	9733,9	0,43
	9,98	6,83	0,83	2,28	25%	0,62	1,20	1,20	0,63	23,30	9288,0	0,40
	9,98	6,93	0,82	2,26	35%	0,54	1,20	1,20	0,63	21,60	3245,9	0,15
	14,52	7,20	0,93	6,81	5%	0,96	3,00	3,50	0,70	9,70	10386,1	1,07
	14,43	6,51	0,95	6,82	15%	0,95	2,90	3,30	0,73	9,90	11652,4	1,18
	14,52	7,17	0,93	6,82	25%	0,96	3,00	3,00	0,76	9,60	11355,1	1,18
	14,52	7,22	0,93	6,81	35%	1,02	2,60	3,40	0,76	9,90	10377,1	1,05
	19,71	11,04	0,90	14,67	5%	1,28	4,50	4,50	1,09	3,60	8235,1	2,29
	19,61	11,17	0,90	14,40	15%	1,13	4,20	3,30	1,28	3,60	7291,9	2,03
	19,67	11,12	0,90	14,55	25%	1,23	4,23	3,50	1,25	3,80	7635,2	2,01
	19,70	11,15	0,90	14,61	35%	1,13	4,00	3,50	1,30	3,50	7075,1	2,02



Tabla A1- 7. Datos Pendiente 10%
Fuente: Propia

Pendiente [%]	Carga de Agua		Caudal f	Q [L/s]	% Piedras de gran tamaño	Velocidad Superficial [m/s]	Velocidad Media			Tasa de Transporte		
	Calado Aguas Arriba [cm]	Calado Aguas Abajo [cm]					Calado Rampa		Velocidad d media [m/s]	Tiempo [s]	Peso Material [g]	Tasa [kg/s]
							Aguas Arriba	Aguas Abajo				
10	6,81	2,14	0,98	0,99	5%	0,59	1,80	1,80	0,18	31,11	11793,0	0,38
	6,68	1,12	1,00	0,96	15%	0,64	2,00	1,80	0,17	31,44	7894,2	0,25
	6,68	1,78	0,99	0,95	25%	0,55	1,80	1,90	0,17	32,94	8364,5	0,25
	6,67	2,33	0,97	0,94	35%	0,54	1,80	1,90	0,17	36,46	9273,2	0,25
	9,13	2,44	0,99	2,15	5%	0,57	0,80	1,20	0,72	18,30	5590,8	0,31
	9,04	2,40	0,99	2,10	15%	0,52	1,00	1,10	0,67	18,40	7784,8	0,42
	9,14	2,45	0,99	2,16	25%	0,52	1,10	1,20	0,63	18,37	5988,1	0,33
	9,11	2,21	0,99	2,15	35%	0,58	1,30	1,20	0,57	18,16	9167,0	0,50
	9,70	1,67	1,00	2,55	5%	0,67	1,50	1,40	0,59	18,11	9846,4	0,54
	9,69	1,67	1,00	2,54	15%	0,75	1,20	1,10	0,74	17,70	9230,5	0,52
	9,77	1,09	1,00	2,60	25%	0,67	1,30	1,30	0,67	16,90	8666,2	0,51
	9,77	1,35	1,00	2,60	35%	1,01	1,30	1,20	0,69	20,44	11574,5	0,57
	14,14	2,01	1,00	6,82	5%	1,71	2,30	2,40	0,97	6,80	10299,3	1,51
	14,24	1,91	1,00	6,94	15%	1,30	2,00	2,50	1,03	6,70	9582,1	1,43
	14,10	2,28	1,00	6,76	25%	1,26	2,10	1,70	1,19	6,33	8016,0	1,27
	14,34	2,09	1,00	7,07	35%	1,13	2,60	2,90	0,86	6,73	9044,4	1,34
	18,93	5,41	0,98	14,38	5%	2,12	3,60	3,20	1,41	3,10	9277,4	2,99
	18,93	5,29	0,98	14,39	15%	2,08	3,80	2,90	1,43	3,60	8391,4	2,33
	18,93	5,29	0,98	14,39	25%	1,98	3,50	2,90	1,50	4,00	9505,6	2,38
	18,94	5,77	0,98	14,36	35%	2,08	3,40	3,00	1,50	3,10	7021,6	2,27

**6.2 Datos de laboratorio llevados a escala real**

Anexo 2. Tabla de datos Escalados

Tabla A2- 1. Resultados de la simulación llevados a escala real
Fuente: Propia

m [%]	%PI	Q [m3/s]	Vm [m/s]	Vsup. [m/s]	y [m]	Tasa [m3/s]	m [%]	%PI	Q [m3/s]	Vm [m/s]	Vsup. [m/s]	y [m]	Tasa [m3/s]
4	5%	0,08	0,37	1,09	0,13	0,03	7	25%	1,02	2,80	1,79	0,15	36,79
4	15%	0,09	0,65	1,08	0,06	0,01	7	35%	1,02	2,74	1,78	0,15	47,88
4	25%	0,09	0,34	1,21	0,16	0,05	7	5%	1,90	3,36	2,75	0,23	93,49
4	35%	0,09	0,29	1,19	0,15	0,33	7	15%	1,90	4,08	2,62	0,19	69,87
4	5%	0,38	1,38	1,83	0,13	6,92	7	25%	1,89	2,83	2,98	0,27	81,74
4	15%	0,37	1,37	1,46	0,13	5,34	7	35%	1,90	3,36	2,63	0,23	89,00
4	25%	0,37	1,59	1,81	0,12	7,31	7	5%	2,96	4,50	3,52	0,27	108,91
4	35%	0,37	1,18	1,83	0,15	6,85	7	15%	2,96	4,24	3,03	0,28	96,92
4	5%	0,95	2,14	1,97	0,18	24,74	7	25%	2,96	3,91	2,90	0,31	120,44
4	15%	0,95	2,95	2,19	0,13	23,54	7	35%	2,96	4,12	3,27	0,29	114,92
4	25%	0,95	2,78	1,95	0,14	20,12	8	5%	0,10	0,48	1,23	0,08	6,66
4	35%	0,95	2,48	1,92	0,16	21,28	8	15%	0,10	0,64	1,14	0,12	8,12
4	5%	1,81	3,39	2,55	0,22	48,85	8	25%	0,11	0,71	1,12	0,13	5,62
4	15%	1,80	3,37	2,62	0,22	41,05	8	35%	0,10	0,65	1,14	0,12	3,81
4	25%	1,79	3,86	2,65	0,19	40,70	8	5%	0,24	1,08	2,38	0,11	24,24
4	35%	1,81	4,06	2,67	0,18	30,54	8	15%	0,23	0,99	1,73	0,11	16,40
4	5%	2,57	3,75	2,92	0,28	56,09	8	25%	0,21	0,92	1,41	0,12	16,79
4	15%	2,56	3,34	2,84	0,31	54,12	8	35%	0,23	0,95	1,65	0,12	29,05
4	25%	2,60	3,57	2,60	0,30	55,38	8	5%	0,31	1,48	1,19	0,09	17,50
4	35%	2,57	3,63	2,67	0,29	50,02	8	15%	0,31	1,60	1,74	0,08	21,80
5	5%	0,14	0,62	0,63	0,14	0,94	8	25%	0,29	1,62	1,24	0,07	18,49
5	15%	0,14	0,80	0,76	0,09	0,89	8	35%	0,30	1,42	1,28	0,09	14,42
5	25%	0,14	0,57	1,38	0,13	0,98	8	5%	1,34	1,90	3,97	0,29	76,07
5	35%	0,14	0,66	0,94	0,12	0,33	8	15%	1,32	2,98	3,31	0,18	66,25
5	5%	0,46	1,45	1,84	0,16	7,31	8	25%	1,36	2,69	2,77	0,20	67,74
5	15%	0,46	1,45	1,67	0,16	10,98	8	35%	1,34	2,56	2,98	0,21	72,10
5	25%	0,46	1,61	1,56	0,14	8,14	8	5%	2,72	4,27	4,39	0,26	124,28
5	35%	0,47	1,69	1,75	0,14	12,07	8	15%	2,72	3,96	5,36	0,28	108,18
5	5%	1,00	3,01	2,17	0,14	28,40	8	25%	2,68	4,22	4,46	0,26	74,79
5	15%	1,01	3,13	2,10	0,13	27,05	8	35%	2,71	4,32	4,00	0,25	95,62
5	25%	1,00	2,84	2,04	0,14	25,73	9	5%	0,13	0,49	1,86	0,11	11,53
5	35%	1,01	3,21	1,91	0,13	27,63	9	15%	0,11	0,45	0,89	0,10	12,14
5	5%	1,81	3,51	2,53	0,21	65,41	9	25%	0,13	0,64	1,16	0,08	10,85
5	15%	1,81	3,21	2,60	0,23	62,27	9	35%	0,10	0,47	0,64	0,09	10,64
5	25%	1,81	3,58	2,53	0,20	49,51	9	5%	0,44	1,96	2,34	0,09	24,42
5	35%	1,81	3,20	2,44	0,23	38,58	9	15%	0,44	1,56	1,55	0,11	31,40
5	5%	2,31	3,17	2,61	0,30	68,00	9	25%	0,44	1,81	1,76	0,10	28,93
5	15%	2,32	3,02	2,49	0,31	80,10	9	35%	0,44	1,80	1,55	0,10	10,91
5	25%	2,32	3,32	2,80	0,28	57,78	9	5%	0,39	0,97	2,65	0,16	43,30



5	35%	2,32	2,76	2,67	0,34	87,47	9	15%	0,39	2,17	1,85	0,07	20,45
6	5%	0,14	0,74	0,85	0,15	2,85	9	25%	0,39	1,93	1,87	0,08	30,10
6	15%	0,14	0,62	0,71	0,12	1,62	9	35%	0,39	1,21	1,53	0,13	29,84
6	25%	0,14	0,63	0,95	0,12	1,52	9	5%	1,31	2,00	2,75	0,27	77,72
6	35%	0,15	0,66	0,71	0,13	1,09	9	15%	1,31	2,09	2,71	0,25	85,43
6	5%	0,48	1,71	1,40	0,12	16,78	9	25%	1,31	2,16	2,76	0,25	85,86
6	15%	0,48	1,64	1,51	0,12	10,44	9	35%	1,31	2,16	2,91	0,25	76,08
6	25%	0,48	1,61	1,37	0,13	10,51	9	5%	2,82	3,10	3,67	0,37	166,04
6	35%	0,48	1,76	1,63	0,12	16,04	9	15%	2,77	3,66	3,24	0,31	147,03
6	5%	1,04	2,86	2,14	0,15	40,85	9	25%	2,80	3,58	3,52	0,32	145,84
6	15%	1,04	2,93	1,93	0,14	36,53	9	35%	2,81	3,71	3,22	0,31	146,73
6	25%	1,04	2,78	2,00	0,15	37,04	10	5%	0,19	0,53	1,69	0,15	27,52
6	35%	1,04	2,51	1,87	0,17	31,66	10	15%	0,19	0,48	1,82	0,16	18,23
6	5%	1,89	3,02	2,41	0,25	71,29	10	25%	0,18	0,49	1,58	0,15	18,43
6	15%	1,88	3,39	2,55	0,23	61,31	10	35%	0,18	0,48	1,53	0,15	18,46
6	25%	1,90	3,09	2,58	0,25	70,37	10	5%	0,49	1,67	1,92	0,12	39,47
6	35%	1,89	3,41	2,49	0,23	54,68	10	15%	0,49	2,10	2,13	0,09	37,85
6	5%	2,95	3,70	2,99	0,32	107,4	10	25%	0,50	1,91	1,92	0,11	37,22
6	15%	2,95	3,80	2,71	0,32	99,51	10	35%	0,50	1,98	2,90	0,10	41,10
6	25%	2,93	3,69	2,75	0,32	76,50	10	5%	0,41	2,05	1,62	0,08	22,18
6	35%	2,93	3,63	2,90	0,33	90,86	10	15%	0,40	1,90	1,48	0,09	30,71
7	5%	0,15	0,70	1,02	0,10	6,35	10	25%	0,42	1,79	1,50	0,09	23,66
7	15%	0,15	1,11	1,00	0,08	4,00	10	35%	0,41	1,64	1,64	0,10	36,64
7	25%	0,15	0,66	0,88	0,18	2,44	10	5%	1,31	2,76	4,89	0,19	109,94
7	35%	0,14	0,94	0,90	0,15	3,08	10	15%	1,34	2,94	3,70	0,18	103,81
7	5%	0,47	1,56	1,53	0,12	13,25	10	25%	1,30	3,39	3,60	0,16	91,92
7	15%	0,47	1,95	1,67	0,10	19,39	10	35%	1,36	2,45	3,23	0,23	97,55
7	25%	0,47	1,38	1,33	0,14	18,47	10	5%	2,77	4,03	6,07	0,28	217,23
7	35%	0,47	1,81	1,40	0,11	16,58	10	15%	2,77	4,09	5,95	0,27	169,19
7	5%	1,02	2,46	2,14	0,17	57,54	10	25%	2,77	4,28	5,67	0,26	172,49
7	15%	1,02	2,52	1,82	0,16	38,46	10	35%	2,76	4,27	5,95	0,26	164,41

**6.3 Datos Linealizados***Anexo 3. Datos linealizados**Tabla A3- 1. Datos linealizados**Fuente: Propia*

Ln (%PI)	Ln (P)	Ln (Vm)	Ln (y)	Ln (D90)	Ln (Tasa)	Ln (%PI)	Ln (P)	Ln (Vm)	Ln (y)	Ln (D90)	Ln (Tasa)
-3,0	-3,2	-2,1	-4,2	-4,8	-6,5	-1,4	-2,7	0,0	-4,0	-4,6	0,5
-1,9	-3,2	-1,5	-5,0	-5,4	-8,2	-1,0	-2,7	0,0	-4,0	-4,7	0,8
-1,4	-3,2	-2,1	-3,9	-4,8	-6,0	-3,0	-2,7	0,2	-3,6	-4,6	1,5
-1,0	-3,2	-2,3	-4,0	-4,6	-4,2	-1,9	-2,7	0,4	-3,8	-4,5	1,2
-3,0	-3,2	-0,7	-4,1	-4,6	-1,1	-1,4	-2,7	0,0	-3,4	-4,6	1,3
-1,9	-3,2	-0,7	-4,1	-4,5	-1,4	-1,0	-2,7	0,2	-3,6	-4,6	1,4
-1,4	-3,2	-0,6	-4,2	-4,7	-1,1	-3,0	-2,7	0,5	-3,4	-4,5	1,6
-1,0	-3,2	-0,9	-4,0	-4,5	-1,2	-1,9	-2,7	0,4	-3,4	-4,6	1,5
-3,0	-3,2	-0,3	-3,8	-4,5	0,1	-1,4	-2,7	0,3	-3,3	-4,7	1,7
-1,9	-3,2	0,0	-4,1	-4,7	0,1	-1,0	-2,7	0,4	-3,3	-4,6	1,7
-1,4	-3,2	0,0	-4,1	-4,5	-0,1	-3,0	-2,5	-1,8	-4,6	-4,5	-1,2
-1,0	-3,2	-0,1	-4,0	-4,6	0,0	-1,9	-2,5	-1,5	-4,2	-4,6	-1,0
-3,0	-3,2	0,2	-3,6	-4,6	0,8	-1,4	-2,5	-1,4	-4,1	-4,5	-1,4
-1,9	-3,2	0,2	-3,6	-4,5	0,6	-1,0	-2,5	-1,5	-4,2	-4,5	-1,7
-1,4	-3,2	0,3	-3,8	-4,5	0,6	-3,0	-2,5	-1,0	-4,3	-4,6	0,1
-1,0	-3,2	0,4	-3,8	-4,6	0,3	-1,9	-2,5	-1,1	-4,3	-4,6	-0,3
-3,0	-3,2	0,3	-3,4	-4,5	0,9	-1,4	-2,5	-1,1	-4,2	-4,5	-0,3
-1,9	-3,2	0,2	-3,3	-4,5	0,9	-1,0	-2,5	-1,1	-4,2	-4,6	0,3
-1,4	-3,2	0,2	-3,3	-4,5	0,9	-3,0	-2,5	-0,7	-4,6	-4,7	-0,2
-1,0	-3,2	0,2	-3,4	-4,6	0,8	-1,9	-2,5	-0,6	-4,7	-4,7	0,0
-3,0	-3,0	-1,5	-4,0	-4,6	-3,1	-1,4	-2,5	-0,6	-4,7	-4,7	-0,2
-1,9	-3,0	-1,3	-4,5	-4,7	-3,2	-1,0	-2,5	-0,7	-4,6	-4,7	-0,4
-1,4	-3,0	-1,6	-4,1	-4,7	-3,1	-3,0	-2,5	-0,4	-3,4	-4,6	1,3
-1,0	-3,0	-1,5	-4,2	-4,7	-4,2	-1,9	-2,5	0,0	-3,8	-4,6	1,1
-3,0	-3,0	-0,7	-4,0	-4,5	-1,1	-1,4	-2,5	-0,1	-3,7	-4,6	1,1
-1,9	-3,0	-0,7	-4,0	-4,6	-0,7	-1,0	-2,5	-0,1	-3,6	-4,6	1,2
-1,4	-3,0	-0,6	-4,1	-4,5	-1,0	-3,0	-2,5	0,4	-3,5	-4,6	1,7
-1,0	-3,0	-0,5	-4,1	-4,7	-0,6	-1,9	-2,5	0,3	-3,4	-4,6	1,6
-3,0	-3,0	0,1	-4,1	-4,6	0,3	-1,4	-2,5	0,4	-3,5	-4,6	1,2
-1,9	-3,0	0,1	-4,1	-4,5	0,2	-1,0	-2,5	0,4	-3,5	-4,7	1,5
-1,4	-3,0	0,0	-4,0	-4,5	0,2	-3,0	-2,4	-1,8	-4,3	-4,6	-0,6
-1,0	-3,0	0,1	-4,2	-4,5	0,2	-1,9	-2,4	-1,9	-4,4	-4,6	-0,6
-3,0	-3,0	0,2	-3,7	-4,7	1,1	-1,4	-2,4	-1,5	-4,6	-4,6	-0,7
-1,9	-3,0	0,1	-3,6	-4,7	1,1	-1,0	-2,4	-1,8	-4,5	-4,7	-0,7
-1,4	-3,0	0,2	-3,7	-4,5	0,8	-3,0	-2,4	-0,4	-4,5	-4,6	0,1
-1,0	-3,0	0,1	-3,6	-4,7	0,6	-1,9	-2,4	-0,6	-4,3	-4,7	0,4
-3,0	-3,0	0,1	-3,3	-4,5	1,1	-1,4	-2,4	-0,5	-4,4	-4,7	0,3
-1,9	-3,0	0,1	-3,3	-4,5	1,3	-1,0	-2,4	-0,5	-4,4	-4,6	-0,7
-1,4	-3,0	0,2	-3,4	-4,5	1,0	-3,0	-2,4	-1,1	-3,9	-4,7	0,7



-1,0	-3,0	0,0	-3,2	-4,6	1,4	-1,9	-2,4	-0,3	-4,7	-4,6	-0,1
-3,0	-2,8	-1,4	-4,0	-4,7	-2,0	-1,4	-2,4	-0,4	-4,6	-4,6	0,3
-1,9	-2,8	-1,5	-4,2	-4,7	-2,6	-1,0	-2,4	-0,9	-4,1	-4,6	0,3
-1,4	-2,8	-1,5	-4,2	-4,7	-2,7	-3,0	-2,4	-0,4	-3,4	-4,7	1,3
-1,0	-2,8	-1,5	-4,2	-4,7	-3,0	-1,9	-2,4	-0,3	-3,5	-4,6	1,4
-3,0	-2,8	-0,5	-4,2	-4,6	-0,3	-1,4	-2,4	-0,3	-3,5	-4,7	1,4
-1,9	-2,8	-0,6	-4,2	-4,7	-0,7	-1,0	-2,4	-0,3	-3,5	-4,7	1,3
-1,4	-2,8	-0,6	-4,2	-4,7	-0,7	-3,0	-2,4	0,1	-3,1	-4,6	2,0
-1,0	-2,8	-0,5	-4,2	-4,7	-0,3	-1,9	-2,4	0,2	-3,3	-4,7	1,9
-3,0	-2,8	0,0	-4,0	-4,7	0,6	-1,4	-2,4	0,2	-3,3	-4,6	1,9
-1,9	-2,8	0,0	-4,0	-4,6	0,5	-1,0	-2,4	0,3	-3,3	-4,6	1,9
-1,4	-2,8	0,0	-4,0	-4,6	0,5	-3,0	-2,3	-1,7	-4,0	-4,7	0,2
-1,0	-2,8	-0,1	-3,9	-4,5	0,4	-1,9	-2,3	-1,8	-4,0	-4,7	-0,2
-3,0	-2,8	0,1	-3,5	-4,7	1,2	-1,4	-2,3	-1,8	-4,0	-4,7	-0,2
-1,9	-2,8	0,2	-3,6	-4,6	1,0	-1,0	-2,3	-1,8	-4,0	-4,8	-0,2
-1,4	-2,8	0,1	-3,5	-4,5	1,2	-3,0	-2,3	-0,5	-4,2	-4,6	0,6
-1,0	-2,8	0,2	-3,6	-4,6	0,9	-1,9	-2,3	-0,3	-4,5	-4,7	0,6
-3,0	-2,8	0,3	-3,2	-4,6	1,6	-1,4	-2,3	-0,4	-4,3	-4,7	0,5
-1,9	-2,8	0,3	-3,3	-4,7	1,5	-1,0	-2,3	-0,4	-4,4	-4,7	0,6
-1,4	-2,8	0,3	-3,2	-4,7	1,3	-3,0	-2,3	-0,3	-4,6	-4,5	0,0
-1,0	-2,8	0,2	-3,2	-4,6	1,4	-1,9	-2,3	-0,4	-4,6	-4,7	0,3
-3,0	-2,7	-1,4	-4,4	-4,8	-1,2	-1,4	-2,3	-0,5	-4,5	-4,6	0,1
-1,9	-2,7	-0,9	-4,7	-4,7	-1,7	-1,0	-2,3	-0,6	-4,4	-4,6	0,5
-1,4	-2,7	-1,5	-3,8	-4,7	-2,2	-3,0	-2,3	0,0	-3,8	-4,5	1,6
-1,0	-2,7	-1,1	-4,0	-4,7	-2,0	-1,9	-2,3	0,0	-3,8	-4,5	1,6
-3,0	-2,7	-0,6	-4,2	-4,5	-0,5	-1,4	-2,3	0,2	-4,0	-4,6	1,4
-1,9	-2,7	-0,4	-4,4	-4,7	-0,1	-1,0	-2,3	-0,2	-3,6	-4,6	1,5
-1,4	-2,7	-0,7	-4,1	-4,5	-0,2	-3,0	-2,3	0,3	-3,4	-4,5	2,3
-1,0	-2,7	-0,5	-4,3	-4,6	-0,3	-1,9	-2,3	0,4	-3,4	-4,6	2,1
-3,0	-2,7	-0,1	-3,9	-4,6	1,0	-1,4	-2,3	0,4	-3,4	-4,6	2,1
-1,9	-2,7	-0,1	-3,9	-4,6	0,6	-1,0	-2,3	0,4	-3,4	-4,6	2,0



6.4 Comparación de Ecuaciones

Anexo 4. .Análisis comparativo de las diferentes ecuaciones

En la Tabla A4- 1 se presentan los parámetros de validación obtenidos para las distintas ecuaciones.

Tabla A4- 1. Parámetros de validación

Ecuación	R ²	E	RMSE
Ecuación Experimental	0,94	0,91	0,60
Parker	0,00	-1,20	2,98
Einstein	0,00	-1,21	2,99
Nilsen Simplificada	0,47	0,61	1,25
Meyer - Peter	0,15	0,16	1,84
Shocklitsch	0,87	0,73	1,05

La Tabla A4- 2 muestra las tasas de transporte de lecho con cada una de las ecuaciones calculadas.

Tabla A4- 2. Tasas de carga de lecho para varias ecuaciones

Tasa Laboratorio [Kg/s-m]	Matovelle - Torres [kg/s-m]	Parker	Shocklitsch	Einstein	Nilsen	Meyer - Peter	Matovelle - Torres	Parker	Shocklitsch	Einstein	Nilsen	Meyer - Peter
0,32	0,29	0,00	0,38	0,01	0,41	0,25	4,11	0,01	4,48	0,01	2,08	1,31
0,25	0,27	0,00	0,37	0,01	0,41	0,24	4,00	0,01	4,46	0,01	1,69	0,97
0,34	0,20	0,00	0,37	0,01	0,32	0,22	3,69	0,02	4,44	0,01	2,65	1,68
0,31	0,27	0,00	0,38	0,01	0,49	0,29	3,50	0,01	4,48	0,01	2,03	1,31
1,14	0,87	0,00	0,97	0,01	0,65	0,39	6,77	0,01	6,97	0,01	2,85	1,64
1,08	0,70	0,00	0,97	0,01	0,36	0,24	5,82	0,02	6,97	0,01	2,84	1,79
0,92	0,76	0,00	0,97	0,01	0,44	0,26	5,16	0,02	6,98	0,01	2,90	2,03
0,98	0,72	0,00	0,97	0,01	0,50	0,31	5,39	0,02	6,97	0,01	2,90	1,87
2,24	1,49	0,00	1,85	0,01	0,79	0,52	0,32	0,00	0,26	0,01	0,58	0,34
1,89	1,50	0,00	1,84	0,01	0,87	0,52	0,12	0,00	0,26	0,01	0,99	0,62
1,87	1,41	0,00	1,83	0,01	0,70	0,42	0,15	0,00	0,31	0,01	1,23	0,69
1,40	1,24	0,00	1,84	0,01	0,58	0,39	0,13	0,00	0,26	0,01	1,09	0,62
2,58	2,43	0,00	2,62	0,01	1,35	0,75	0,48	0,00	0,66	0,01	0,85	0,56
2,49	2,16	0,00	2,61	0,01	1,51	0,89	0,50	0,00	0,66	0,01	0,87	0,56
2,54	2,18	0,00	2,64	0,01	1,46	0,82	0,43	0,00	0,60	0,01	1,03	0,62
2,30	1,86	0,00	2,62	0,01	1,21	0,79	0,47	0,00	0,64	0,01	0,92	0,58
0,04	0,11	0,00	0,19	0,01	0,60	0,39	0,82	0,00	0,89	0,01	0,54	0,36
0,04	0,11	0,00	0,19	0,01	0,31	0,21	0,71	0,00	0,87	0,01	0,44	0,31
0,04	0,11	0,00	0,19	0,01	0,51	0,35	0,65	0,00	0,83	0,01	0,40	0,29
0,02	0,11	0,00	0,20	0,01	0,41	0,29	0,69	0,00	0,85	0,01	0,54	0,36
0,34	0,54	0,00	0,66	0,01	0,78	0,44	3,76	0,02	3,85	0,01	3,51	2,24



0,50	0,46	0,00	0,66	0,01	0,71	0,44	3,34	0,01	3,80	0,01	1,79	1,11
0,37	0,46	0,00	0,65	0,01	0,63	0,37	3,29	0,01	3,91	0,01	2,12	1,35
0,55	0,40	0,00	0,66	0,01	0,53	0,35	3,03	0,01	3,86	0,01	2,12	1,43
1,30	1,26	0,00	1,43	0,01	0,58	0,35	6,93	0,02	7,82	0,01	2,91	1,91
1,24	1,21	0,00	1,44	0,01	0,57	0,34	6,74	0,02	7,82	0,01	3,42	2,14
1,18	1,16	0,00	1,43	0,01	0,65	0,39	6,30	0,02	7,72	0,01	3,01	1,91
1,27	1,11	0,00	1,43	0,01	0,54	0,32	5,37	0,02	7,80	0,01	2,49	1,87
3,00	2,02	0,00	2,57	0,01	0,98	0,69	0,48	0,00	0,42	0,01	0,94	0,60
2,86	1,91	0,00	2,58	0,01	1,13	0,79	0,39	0,00	0,35	0,01	0,87	0,53
2,27	2,15	0,00	2,57	0,01	1,16	0,66	0,42	0,00	0,42	0,01	0,65	0,40
1,77	1,79	0,00	2,57	0,01	1,13	0,79	0,30	0,00	0,34	0,01	0,64	0,47
3,12	3,01	0,01	3,28	0,01	1,92	1,15	1,41	0,00	1,47	0,01	0,72	0,47
3,68	2,87	0,01	3,30	0,01	2,13	1,25	1,29	0,00	1,50	0,01	0,97	0,67
2,65	2,75	0,01	3,30	0,01	1,85	1,08	1,23	0,00	1,49	0,01	0,78	0,53
4,02	2,57	0,01	3,30	0,01	2,27	1,43	1,27	0,00	1,47	0,01	0,84	0,53
0,13	0,11	0,00	0,25	0,01	0,80	0,56	1,31	0,01	1,33	0,01	1,69	1,15
0,07	0,15	0,00	0,25	0,01	0,58	0,40	1,24	0,00	1,33	0,01	0,57	0,34
0,07	0,16	0,00	0,26	0,01	0,60	0,40	1,15	0,00	1,32	0,01	0,64	0,40
0,05	0,15	0,00	0,27	0,01	0,62	0,43	1,15	0,00	1,32	0,01	1,25	0,82
0,77	0,79	0,00	0,90	0,01	0,65	0,40	4,14	0,03	4,49	0,01	3,46	2,39
0,48	0,72	0,00	0,89	0,01	0,57	0,38	4,09	0,02	4,49	0,01	3,49	2,23
0,48	0,65	0,00	0,89	0,01	0,61	0,43	3,71	0,02	4,49	0,01	3,11	2,12
0,74	0,62	0,00	0,89	0,01	0,56	0,38	3,58	0,02	4,49	0,01	3,07	2,12
1,88	1,61	0,00	1,94	0,01	0,78	0,53	9,01	0,05	9,69	0,01	5,91	3,90
1,68	1,51	0,00	1,94	0,01	0,76	0,51	7,73	0,04	9,52	0,01	4,29	2,97
1,70	1,49	0,00	1,94	0,01	0,84	0,56	8,33	0,04	9,61	0,01	5,02	3,11
1,45	1,66	0,00	1,94	0,01	1,12	0,65	7,80	0,04	9,65	0,01	4,57	2,97
3,27	2,93	0,01	3,53	0,01	1,74	1,21	0,79	0,01	0,74	0,01	1,66	1,15
2,82	2,98	0,01	3,52	0,01	1,65	1,01	0,67	0,01	0,72	0,01	1,67	1,25
3,23	2,99	0,01	3,56	0,01	1,96	1,18	0,67	0,01	0,71	0,01	1,72	1,20
2,51	2,67	0,01	3,54	0,01	1,55	1,01	0,61	0,01	0,70	0,01	1,59	1,20
4,93	4,97	0,02	5,52	0,01	2,79	1,74	1,96	0,00	1,94	0,01	1,31	0,83
4,57	4,18	0,02	5,52	0,01	2,42	1,68	1,67	0,00	1,94	0,01	0,87	0,59
3,51	3,96	0,02	5,49	0,01	2,45	1,73	1,65	0,00	1,99	0,01	1,02	0,71
4,17	4,10	0,02	5,49	0,01	2,68	1,78	1,62	0,00	1,99	0,01	0,98	0,66
0,29	0,24	0,00	0,34	0,01	0,51	0,39	1,71	0,00	1,63	0,01	0,79	0,47
0,18	0,18	0,00	0,34	0,01	0,35	0,26	1,36	0,00	1,60	0,01	0,73	0,51
0,11	0,14	0,01	0,34	0,01	1,37	0,94	1,49	0,00	1,64	0,01	0,94	0,59
0,14	0,09	0,00	0,33	0,01	1,02	0,72	1,45	0,00	1,63	0,01	1,05	0,66
0,61	1,11	0,00	1,10	0,01	0,85	0,51	5,42	0,01	5,25	0,01	2,89	1,72
0,89	0,90	0,00	1,10	0,01	0,54	0,36	5,09	0,01	5,35	0,01	2,71	1,61
0,85	1,04	0,00	1,11	0,01	1,06	0,62	4,27	0,01	5,21	0,01	1,88	1,25
0,76	0,90	0,00	1,11	0,01	0,64	0,41	4,77	0,02	5,45	0,01	3,49	2,18
2,64	2,25	0,00	2,40	0,01	1,31	0,82	11,28	0,03	11,12	0,01	5,08	3,00
1,77	2,04	0,00	2,39	0,01	1,24	0,79	9,32	0,04	11,13	0,01	4,37	2,93
1,69	2,01	0,00	2,39	0,01	1,10	0,67	9,30	0,03	11,13	0,01	4,26	2,74



2,20 1,81 0,00 2,40 0,01 1,03 0,70 9,35 0,03 11,10 0,01 4,41 2,74