



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
División Académica de Ingeniería y Arquitectura



**ANÁLISIS DEL CRITERIO GENERALIZADO DE ESTIMACIÓN DE
EROSIÓN APLICADO EN UN CANAL DE
LABORATORIO**

TRABAJO RECEPTACIONAL BAJO LA MODALIDAD DE:

TESIS

PRESENTA:

CARLOS ALBERTO SARRACINO PÉREZ

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA HIDRÁULICA

ASESOR:

DR. JOSÉ GUADALUPE FABIAN RIVERA TREJO

CO-ASESOR:

DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ

CUNDUACÁN, TABASCO.

NOVIEMBRE 2014.



ANÁLISIS DEL CRITERIO GENERALIZADO DE ESTIMACIÓN DE EROSIÓN APLICADO EN UN CANAL DE LABORATORIO



CARLOS ALBERTO SARRACINO PÉREZ

Tesis presentada para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería Hidráulica

Asesor:

Dr. José Guadalupe Fabián Rivera Trejo

Co-asesor:

Dr. Juan Barajas Fernández

NOVIEMBRE DE 2014



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

55
ANIVERSARIO
UJAT



DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

"2013, CENTENARIO LUCTUOSO DE FRANCISCO I. MADERO
Y JOSÉ MARÍA PINO SUÁREZ"

OFICIO: DAIA/DIR/2205/14

FECHA: 15 de Agosto de 2014

ASUNTO: Autorización de Impresión
Definitiva.

C. LIC. CARLOS ALBERTO SARRACINO PÉREZ
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN
INGENIERÍA HIDRÁULICA
P R E S E N T E.

En virtud de haber elaborado su trabajo recepcional para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Hidráulica bajo la modalidad de "Tesis", el cual ha sido asesorado por los **DR. JOSÉ GUADALUPE FABIÁN RIVERA TREJO Y EL DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ** Profesores Investigadores de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura denominado:

**"ANÁLISIS DE CRITERIO GENERALIZADO DE ESTIMACIÓN DE EROSIÓN APLICADO EN UN
CANAL EXPERIMENTAL"**

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular por el momento, me despido deseándole éxito en su carrera profesional.

ATENTAMENTE

DR. CANELARIO BOLAINA TORRES
DIRECTOR

C.c.p. Archivo.
DRICBT/M.I. JCRH/apl.

Miembro CUMEX desde 2008

**Consorcio de
Universidades
Mexicanas**
UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, Km.1 Col. La Esmeralda, C.P. 86690, Cunduacán, Tabasco, México.
• Tel.-(01 914) 33 6 09 40 • Tel. (01 993) 3 58 15 00 Ext.- 6752 • www.daia.ujat.mx • direccion.daia@ujat.mx •



DAIA

MEMORANDUM

DE: COMISIÓN REVISORA
ASUNTO: APROBACIÓN DE TESIS
FECHA: 11 DE AGOSTO DE 2014
CCP: ARCHIVO
MEM/MIH/01/14

PRESENTE

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo Recepcional denominado:

"ANÁLISIS DE CRITERIO GENERALIZADO DE ESTIMACIÓN DE EROSIÓN APLICADO EN UN CANAL EXPERIMENTAL"

Desarrollado por el C. LIC. CARLOS ALBERTO SARRACINO PÉREZ de la **Maestría en Ingeniería Hidráulica** bajo la modalidad de "tesis" le comunicamos que aceptamos la impresión de dicho trabajo ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISION REVISORA

DR. RUBÉN VÁSQUEZ LEÓN
Revisor

DR. JOSÉ MANUEL VÁSQUEZ RODRÍGUEZ
Revisor

DR. JOSÉ GUADALUPE FABIAN RIVERA TREJO
Revisor

DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ
Revisor

DRA. LAURA LORENA DÍAZ FLORES
Revisor

Carta de Autorización

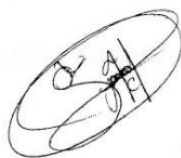
Por este medio, tengo a bien conceder mi autorización para que la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco utilice tanto física como digitalmente la tesis de grado de Maestría en Ingeniería Hidráulica titulada "Análisis del Criterio Generalizado de Estimación de Erosión Aplicado en un Canal de Laboratorio", del cual soy titular de los derechos de autor.

La Universidad Juárez Autónoma de Tabasco podrá hacer uso de la tesis mencionada para propósitos educativos, de difusión y sin fines de lucro; asimismo se autoriza para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID), o cualquier otra red académica que por conveniencia educativa sea considerada por la Universidad.

Por lo anterior, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco queda liberada de cualquier reclamación legal que se pudiera llegar a ejercer, relativa al uso y manipulación de dicha tesis para los fines estipulados en el presente.

Se extiende la presente carta a los 06 días del mes de Noviembre de 2014, en la ciudad de Cunduacán, Tabasco.

Autoriza



Carlos Alberto Sarracino Pérez

Agradecimientos

A mis asesores de tesis, Dr. Fabián Rivera Trejo y Dr. Juan Barajas Fernández, por la ayuda incondicional brindada para la realización de esta tesis; por su valioso apoyo y amistad.

A mis amigos, que estuvieron presentes y atentos a la realización de esta investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada perteneciente al proyecto en investigación de Ciencias Básicas "Análisis de las ecuaciones de transporte de sedimentos para la estimación de carga morfológica del bajo Grijalva".

Y en especial agradezco a mis padres, esposa e hijos, por su amor incomparable, alentador y motivante; compañía esencial para afrontar cada desafío en la vida.



RESUMEN

La estimación de parámetros como la erosión, a partir de evidencia experimental, es importante para modelar de manera más eficiente el comportamiento de un río. En el Laboratorio de Hidráulica de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la UJAT, se dispone de un modelo físico del río de la Sierra del estado de Tabasco en una mesa de arena. El modelo presenta una curva del río y un canal derivador alimentado por sistemas de bombeo. El canal derivador está formado de un fondo fijo (concreto) y otro móvil (arena de río). En dicho modelo se realizaron pruebas experimentales, con la finalidad de observar físicamente el comportamiento de la erosión sobre el fondo móvil del canal derivador. El análisis de los datos obtenidos permitió su comparación con modelos de predicción y obtener los modelos que mejor predicen la erosión en relación a las características del fondo que presenta el río de la Sierra.

En este trabajo se realizó una estimación de la erosión sobre el lecho arenoso del canal del modelo físico del río de la Sierra, después se utilizó una serie de treinta combinaciones de ecuaciones de fricción y de velocidad crítica basadas en el criterio generalizado Fariás-Pilán-Peche-Olmos para predecir la erosión. Los datos experimentales y dichos modelos se compararon y como resultado se determinó que los modelos Maza-Echavarría eran los que mejor predicen erosiones extremas.

El comportamiento del fondo se analizó a diferentes velocidades de flujo hasta alcanzar el equilibrio en el fondo del río. La verificación de que el equilibrio se había alcanzado en el fondo se hizo mediante un perfilador topográfico.

Los resultados indican que la estimación de la erosión a través de modelos matemáticos y su validación con datos experimentales pueden ser utilizados en la simulación del transporte de sedimentos en ríos entre experimentación y estimación permite establecer modelos matemáticos de erosión adecuados para el uso en ecuaciones de transporte de sedimentos en ríos.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



ÍNDICE

CAPITULO 1 FUNDAMENTOS	1
CAPITULO 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	4
2.1 INSTRUMENTACIÓN DEL PROTOTIPO	6
2.1.1 MEDICIÓN DE NIVELES.....	7
2.1.2 MEDICIÓN DE PERFILES TOPOGRÁFICOS.....	9
2.1.3 AFORO DE CAUDAL	10
2.1.4 MEDICIÓN DE VELOCIDADES.....	11
2.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	12
2.2.1 MEDICIONES DE VELOCIDAD.....	13
2.2.2 MEDICIONES DEL NIVEL.....	13
2.2.3 MEDICIONES DE PERFIL TOPOGRÁFICO DEL CAUCE.....	13
2.3 CAMPAÑA DE PRUEBAS.....	14
2.4 PERFILES OBTENIDOS DURANTE LAS PRUEBAS.....	19
CAPITULO 3 IMPLEMENTACION DEL MÉTODO NUMÉRICO	23
3.1 VELOCIDADES CRÍTICA Y DE EQUILIBRIO.....	23
3.2 RESISTENCIA AL FLUJO.....	27
3.3 FORMULACIÓN GENERALIZADA.....	27
3.4 CASO DE APLICACIÓN: CANAL DE LABORATORIO.....	28
CAPITULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
REFERENCIAS.....	41



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2. 1 MESA DE ARENA, LABORATORIO DE HIDRÁULICA, UJAT	5
FIGURA 2. 2 CANAL DE ESTUDIO, LABORATORIO DE HIDRÁULICA, UJAT	6
FIGURA 2. 3 CONTROL DE AJUSTE DE MEDIDOR DE NIVELES	8
FIGURA 2. 4 PC PROCESADOR DE DATOS.	8
FIGURA 2. 5 Sonda CH 0	8
FIGURA 2. 6 Sonda CH 1	8
FIGURA 2. 7 Sonda CH 3	8
FIGURA 2. 8 Sonda CH 3	8
FIGURA 2. 9 Sonda CH 5	9
FIGURA 2. 10 FOTOGRAFÍA A ALTA RESOLUCIÓN	9
FIGURA 2. 11 PERFILADOR TOPOGRÁFICO EN OPERACIÓN	10
FIGURA 2. 12 PERFILADOR TOPOGRÁFICO CONECTADO A PC.	10
FIGURA 2. 13 DETALLE DEL PERFIL MEDIDO	10
FIGURA 2. 14 VERTEDOR TRIANGULAR.	11
FIGURA 2. 15 ESCALA DIGITAL MITUTOYO	11
FIGURA 2. 16 MONITOR DE VELOCIDADES MARCA NIXON.	11
FIGURA 2. 17 DETALLE DE MICROPROPELA DE BAJA VELOCIDAD No. 403 MARCA NIXON.	11
FIGURA 2. 18 INSTRUMENTACIÓN PARA PRUEBAS EN EL PROTOTIPO.	12
FIGURA 2. 19 CONFIGURACIÓN INICIAL DEL ÁREA DE ESTUDIO PREVIAMENTE COMPACTADA	15
FIGURA 2. 20 INICIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA CON GASTOS RELATIVAMENTE BAJOS.	15
FIGURA 2. 21 PROCESO DE SATURACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.	16
FIGURA 2. 22 COMIENZO DE MEDICIONES DEL PERFIL INICIAL DEL FONDO DEL CAUCE	16
FIGURA 2. 23 DETALLE DE LA SATURACIÓN DEL LECHO	18
FIGURA 2. 24 VISTA PANORÁMICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	19
FIGURA 2. 25 PERFILADOR OBTENIENDO DATOS DEL CANAL	19
FIGURA 2. 26 PERFILES DE LA SECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	21
FIGURA 2. 27 PERFIL DE EQUILIBRIO.	22
FIGURA 3. 1 HOJA DE CÁLCULO UTILIZADA EN EL METODO NUMÉRICO	29
FIGURA 3. 2 COMPARACIÓN DEL PERFIL OBSERVADO DESPUÉS DE LA EROSIÓN CON LOS PERFILES CALCULADO NUMÉRICAMENTE..	38
FIGURA 3. 3 COMPARACIÓN DEL PERFIL OBSERVADO DESPUÉS DE LA EROSIÓN CON LOS PERFILES CALCULADO NUMÉRICAMENTE..	39



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2. 1 TIRANTES INICIALES MEDIDOS CON UN GASTO DE 67.5 L/s.....	17
TABLA 2. 2 EROSIÓN OBSERVADA.....	20
TABLA 3. 1 FÓRMULAS PARA LA VELOCIDAD CRÍTICA. (FUENTE: FARÍAS ET AL, 2008).....	26
TABLA 3. 2 FÓRMULAS DE RESISTENCIA DE FLUJO. (FUENTE: FUENTE: FARÍAS ET AL, 2008).....	27
TABLA 3. 3 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO GENERALIZADO PARA VARIAS COMBINACIONES DE FÓRMULAS DE FRICCIÓN Y DE VELOCIDAD CRÍTICA. EN ESTE CASO SE HA ANALIZADO UNA FRANJA CON TIRANTE INICIAL DE 0.0036M. [DATOS: $Q=0.0675 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=5\text{M}$, $D=0.2546\text{MM}$, $H_m=0.03\text{M}$].....	31
TABLA 3. 4 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO GENERALIZADO PARA VARIAS COMBINACIONES DE FÓRMULAS DE FRICCIÓN Y DE VELOCIDAD CRÍTICA. EN ESTE CASO SE HA ANALIZADO UNA FRANJA CON TIRANTE INICIAL DE 0.0142M. [DATOS: $Q=0.0675 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=5\text{M}$, $D=0.2546\text{MM}$, $H_m=0.03\text{M}$].....	32
TABLA 3. 5 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO GENERALIZADO PARA VARIAS COMBINACIONES DE FÓRMULAS DE FRICCIÓN Y DE VELOCIDAD CRÍTICA. EN ESTE CASO SE HA ANALIZADO UNA FRANJA CON TIRANTE INICIAL DE 0.033M. [DATOS: $Q=0.0675 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=5\text{M}$, $D=0.2546\text{MM}$, $H_m=0.03\text{M}$].....	33
TABLA 3. 6 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO GENERALIZADO PARA VARIAS COMBINACIONES DE FÓRMULAS DE FRICCIÓN Y DE VELOCIDAD CRÍTICA. EN ESTE CASO SE HA ANALIZADO UNA FRANJA CON TIRANTE INICIAL DE 0.035M. [DATOS: $Q=0.0675 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=5\text{M}$, $D=0.2546\text{MM}$, $H_m=0.03\text{M}$].....	34
TABLA 3. 7 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO GENERALIZADO PARA VARIAS COMBINACIONES DE FÓRMULAS DE FRICCIÓN Y DE VELOCIDAD CRÍTICA. EN ESTE CASO SE HA ANALIZADO UNA FRANJA CON TIRANTE INICIAL DE 0.0107M. [DATOS: $Q=0.0675 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=5\text{M}$, $D=0.2546\text{MM}$, $H_m=0.03\text{M}$].....	35
TABLA 3. 8 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO GENERALIZADO PARA VARIAS COMBINACIONES DE FÓRMULAS DE FRICCIÓN Y DE VELOCIDAD CRÍTICA. EN ESTE CASO SE HA ANALIZADO UNA FRANJA CON TIRANTE INICIAL DE 0.001M. [DATOS: $Q=0.0675 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=5\text{M}$, $D=0.2546\text{MM}$, $H_m=0.001\text{M}$].....	36
TABLA 3. 9 COMPARATIVA DE EROSIÓN OBSERVADA VS EROSIÓN ESTIMADA.....	37



CAPITULO 1 FUNDAMENTOS

Los sistemas fluviales involucran una amplia gama de procesos complejos ligados entre sí. Incluyen factores internos como son el gasto líquido y el gasto sólido; y externos como son las fronteras físicas del río (la geometría).

Mientras que en las últimas décadas la hidrología, el clima y el uso del suelo han recibido gran atención, la interacción entre la transferencia de sedimentos y los cambios morfológicos han sido prácticamente ignorados (Raven *et al*, 2010). El transporte de fondo es el factor determinante para el desarrollo de la morfología en ríos aluviales. Los problemas fluviales asociados con el transporte de sedimentos son los relacionados con el déficit, exceso o alteración de los procesos naturales debidos a interferencias antropogénicas (Habersack y Laronne *et al*, 2002).

En México, y particularmente, el caso del Delta del Grijalva, han sufrido históricamente el embate de las inundaciones (Rivera *et al*, 2010). En los últimos años se han presentado grandes desastres debidos a problemas de erosión, flujo de lodos y material grueso arrastrado por avenidas extraordinarias ocurridas en nuestro país.

Desde mediados del siglo XX, se han desarrollado una variedad de ecuaciones para estimar la carga de fondo (transporte de fondo). La mayoría de ellas son resultado de investigaciones de laboratorio en condiciones controladas (Johnson, 1939; Vanoni *et al*, 1961; Shulits y Hill, 1968; White *et al*, 1973; Mahmood, 1980; Carson and Griffith, 1987; Zanke, 1987; Gómez y Church, 1989; Chang, 1994; Lopes *et al*, 2001). Son pocos los estudios de campo disponibles para validar estas ecuaciones, a este respecto se sabe que algunas fórmulas funcionan mejor que otras, comparadas contra mediciones de campo. Por lo que la mejor manera de elegir una fórmula adecuada para un estudio fluvial es a partir de validaciones con mediciones de campo y a partir de estas, hacer la selección y modificación de una ecuación de transporte de sedimentos que incluya esta característica y mejore las estimaciones teóricas (Abdel-Fattah *et al*, 2004).

De la misma manera que se han desarrollado varias ecuaciones para estimar el transporte de fondo, también se han desarrollado métodos para estimar la erosión general en un río aluvial ante un aumento del caudal. Se denomina



erosión general al descenso que experimenta el lecho de un río cuando se produce un aumento en el caudal líquido que escurre por el mismo.

La causa de la ocurrencia de la erosión se explica por la mayor capacidad de transporte de material sólido que adquiere la corriente al incrementarse el caudal y por consiguiente la “intensidad del flujo” expresada a través de la tensión de corte sobre el lecho (que es capaz de poner a las partículas en movimiento) y la velocidad media del agua (que mantiene a las mismas en transporte). Este proceso se desarrolla en una escala de tiempo de corto plazo (asociada a una crecida) y su magnitud depende de las características hidrológicas de la cuenca (tamaño y función de respuesta). Si el descenso del lecho fluvial se produce en una escala temporal de largo plazo (años o décadas) el proceso morfológico se denomina “degradación” y como ejemplo puede mencionarse al que ocurre aguas abajo de una presa de embalse, como consecuencia de la retención de sedimentos en el vaso (Farías et al 2008).

La hipótesis fundamental en la que se basan los métodos para estimar la erosión general consiste en que se da la igualdad entre la velocidad media del flujo en una franja vertical (V_r) y la velocidad de equilibrio (U_e) para mantener un transporte sólido generalizado en el lecho, es decir, con un aporte de material desde aguas arriba que compense el volumen removido por la corriente.

Por lo tanto, para aplicar la identidad $V_r = U_e$, se necesitan encontrar expresiones generales tanto para V_r como para U_e . Las relaciones de resistencia al flujo de uso más extendido en el caso de cauces arenosos (en el rango de tamaños de partículas de 0.1 mm a 1.0 mm) y para la velocidad crítica, se pueden reducir a un formato genérico en la forma de un producto de potencias. Mediante el análisis y combinación de las relaciones para la velocidad crítica o de equilibrio con las relaciones para la resistencia al flujo, se ha logrado establecer un criterio generalizado que permite estimar la erosión general en ríos arenosos (Farías et al 2003), como se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$U_e = b_0 d^{b_1} h^{b_2} \quad (1.1)$$



$$V_r = a_0 d^{a_1} h^{a_2} S^{a_3} \quad (1.2)$$

$$h_{si} = \left[\left(\frac{\alpha_M}{b_0} \right) d^{-b_i} h_i^{(a_2+1)} \right]^{\frac{1}{b_2+1}} \quad (1.3)$$

Dónde:

U_e : velocidad de equilibrio para mantener un transporte generalizado, en m/s.

V_r : velocidad de resistencia al flujo, en m/s.

h_{si} : erosión general para cada franja vertical en que se segmenta el cauce, en m.

d : tamaño mediano de las partículas de sedimento (d_{50}), en mm.

h : profundidad del flujo, en m.

S : pendiente longitudinal del cauce, adimensional.

a_i : los valores de estos coeficientes y exponentes ($i = 0, 1, 2, 3$) dependen de cada una de las ecuaciones publicadas en la literatura que se considere, adimensional.

b_i : los valores de estos coeficientes y exponentes ($i = 0, 1, 2$) dependen de cada una de las ecuaciones publicadas en la literatura que se considere, adimensional.

α_M : $Q / [T \cdot h(a_2+1)]$. (Donde Q : caudal, en m^3/s ; T : ancho del cauce, en m; h : profundidad del flujo, en m).

Este criterio se basa en el uso de las ecuaciones generalizadas de velocidad de equilibrio, de resistencia de flujo y de socavación (Ecs. (1.1) a (1.3)). Las cuales, mediante la selección de una determinada ecuación y el empleo del valor numérico de sus coeficientes permiten obtener una aproximación de la socavación sobre una sección transversal del cauce.

Estas ecuaciones y aproximaciones se probaron para estimar la erosión general en un canal presente en un modelo físico del río de la Sierra (estado de Tabasco) y que se encuentra en el laboratorio de Hidráulica y analizar la bondad de los modelos. El objetivo es validar la mejor combinación entre las fórmulas de: a) velocidad crítica y b) resistencia al flujo, utilizadas en las ecuaciones que estiman el transporte de sedimento.

CAPITULO 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza y dentro del campo de la hidráulica son tan complejos que no es sencillo predecir su comportamiento con métodos matemáticos y/o numéricos. Además, de que cada río es único y presenta características propias, lo que obliga a evaluar y en su caso modificar las ecuaciones de transporte de fondo para seleccionar aquella que se ajuste más a las condiciones presentes en el río. En estos casos lo más conveniente es recurrir al empleo de técnicas experimentales. La experimentación sirve como herramienta práctica para la obtención de soluciones ingenieriles a problemas eminentemente tridimensionales, como pueden ser los estudios de estuarios, ríos y obras hidráulicas en general.

Los modelos analíticos, matemáticos o numéricos plantean soluciones con problemas idealizados donde se realizan muchas suposiciones para simplificar el problema.; sin embargo, tales simplificaciones causan efectos que deben ser evaluados mediante ensayos experimentales a través de modelos físicos a escala reducida o de tipo analógicos (Vergara, 1993).

En hidráulica, el término modelo corresponde a un sistema que simula un objeto real llamado prototipo, mediante la entrada de cierta información que se procesa y presenta de forma adecuada para emplearse en el diseño y operación de obras de ingeniería civil.

Un modelo físico a escala reducida, modelo hidráulico, representa a escala al objeto real o prototipo, tal como un fenómeno, una estructura o una máquina, y cumple con ciertas condiciones matemáticas definidas, por lo cual debe satisfacer las leyes de Similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas entre el prototipo y el modelo (Echávez, 1996).

El flujo en canales con fondo móvil usualmente está acompañado del transporte de sedimentos; por ello, es común que se presenten fenómenos de erosión y sedimentación. Adicionalmente, cuando se tienen cambios locales de la geometría del canal y/o de la pendiente de la plantilla, se modifica el campo de velocidades del flujo; esto también contribuye a los fenómenos de erosión.



En este trabajo, se propuso llevar a cabo la evaluación experimental del criterio generalizado para la estimación del fenómeno de erosión general. Los datos medidos de erosión fueron comparados con la erosión estimada a partir de modelos predictivos. Y se analizó cuál combinación de modelo predictivo velocidad crítica-resistencia al flujo era más apropiado para predecir la erosión.

Con esta finalidad, se utilizaron las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica, de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la UJAT.

En esta instalación se dispone de un modelo físico del río de la Sierra que cuenta con un canal derivador sobre el que se construyó un cauce y se rellenó con material característico de los ríos del estado de Tabasco.

Es importante mencionar que se utilizó este canal como prototipo, por lo que tanto el cálculo numérico como las mediciones experimentales se hicieron con base en las características hidráulicas reales del mismo; es decir, no fue necesario hacer correcciones por efectos de escala.

El Laboratorio dispone de una mesa de arena que tiene configurada una curva de un río (Figura 2.1, sección 1 y 2) y un canal derivador (misma figura, sección 3). El modelo es alimentado por sistema de bombeo a través de un tanque elevado de carga constante. El canal derivador está formado de un fondo fijo (concreto) y fondo móvil (arena de río), cuenta con una longitud de 15 m y un ancho de 5 m.

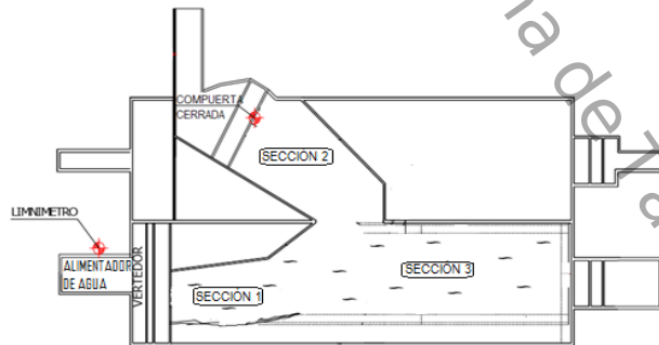


Figura 2.1 Mesa de arena, laboratorio de Hidráulica, UJAT.

Con la finalidad de evaluar la erosión en el canal derivador, sin tomar en cuenta el efecto de la curva, se aplicó el principio de continuidad. Se cerró por medio de una compuerta la salida de agua de la sección 3, con esto, el gasto suministrado de fluido por el sistema de bombeo a la sección 1 aguas arriba, será el mismo gasto de salida por la sección 2 aguas abajo (canal derivador).

Una vez establecida la continuidad del flujo, se llevaron a cabo diversas pruebas de estudio sobre el canal, observándose una tendencia de erosión sobre el lecho del canal. Fue a partir de estas observaciones que se decidió emplear el criterio generalizado para analizar los efectos erosivos que producirá el agua sobre el lecho arenoso del canal derivador (Figura 2.2) y así evaluar la mejor combinación de parámetros.



Figura 2. 2 Canal de estudio, laboratorio de Hidráulica, UJAT

A continuación se describe la metodología seguida en el desarrollo de las pruebas de laboratorio.

3 2.1 INSTRUMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

Uno de los puntos clave de la modelación experimental es contar con buenos equipos de medición e instrumentar adecuadamente el área de estudio. En este caso las condiciones de entrada al modelo fueron los caudales y los niveles del agua presentes en la zona (perfiles hidráulicos); además, de la medición de velocidades en la sección de estudio. Por lo tanto la instrumentación del modelo se centró en un buen control de estas variables. A continuación se describe el proceso de instrumentación de cada uno de ellos.



2.1.1 Medición de Niveles.

Se contó con un Monitor digital de niveles Marca Wallingford (Figura 2.3), equipado con 6 sondas una en cada canal: CH0, CH1, CH3, CH4, CH5, CH6, (el canal CH2 se encuentra deshabilitado). Las sondas consisten en dos barras paralelas de acero inoxidable con una cabeza y pie de plástico. En la cabeza se conectan unos cables largos que a su vez se conectan con el monitor, el cual por diferencia de voltaje permite obtener la medición del nivel del agua en cualquier posición. El principio de operación se basa en la corriente que fluye a través de las barras inmersas y que es proporcional a la profundidad de inmersión. La longitud de las sondas es de 300 mm. El equipo se conecta a una PC (Figura 2.4), que procesa las señales y variaciones de voltaje y las convierte a nivel de la superficie libre del agua. En las Figuras 2.5 a 2.9, se aprecian, las sondas colocadas en el área de estudio.

De igual forma se utilizaron fotografías de alta resolución para comparar los niveles obtenidos electrónicamente con los observados en un instante de tiempo (figura 2.10).





Figura 2. 3 Control de ajuste de medidor de niveles



Figura 2. 4 Pc procesador de datos.

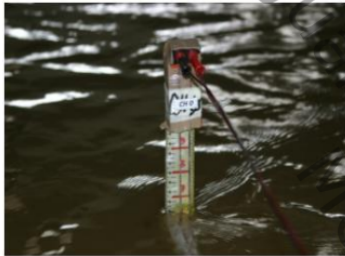


Figura 2. 5 Sonda CH 0



Figura 2. 6 Sonda CH 1



Figura 2. 7 Sonda CH 3



Figura 2. 8 Sonda CH 3



Figura 2. 9 Sonda CH 5



Figura 2. 10 Fotografía a alta resolución

2.1.2 Medición de perfiles topográficos

En este estudio se empleó un perfilador topográfico marca Wallingford. El dispositivo consiste en un soporte de acero, un carro, una probeta y una computadora. Tiene una precisión de $\pm 1\text{mm}$ en las direcciones tanto horizontal como vertical. Detalles del perfilador se muestran en las Figuras 2.11 a 2.13.



Figura 2.11 Perfilador topográfico en operación.



Figura 2.12 Perfilador topográfico conectado a Pc.



Figura 2.13 Detalle del Perfil medido.

De acuerdo a las dimensiones donde se desarrolló el trabajo experimental, el rango de mediciones que se presentaron requieren de grados de exactitud a escala milimétrica, el contar con un equipo de medición topográfico de alta sensibilidad al efectuar sus mediciones, otorga sustento suficiente en la toma de decisiones para elegir el perfil que representa el equilibrio del cauce. En base a las mediciones del perfil topográfico que se obtuvieron de este equipo, se analizó el comportamiento del cauce, en cada una de las pruebas realizadas y se determinó en qué momento se alcanzó el equilibrio.

2.1.3 Aforo de caudal

Para la determinación del caudal que transitaba se emplearon vertedores triangulares, los cuales permiten mayor precisión en la medición comparados contra los vertedores rectangulares. El principio de operación se basa en la carga medida sobre la cresta del vertedor, por lo que se debe ser cuidadoso

en esta medición. El dispositivo empleado fue un limnómetro, equipado con escala digital. Se contó con un limnómetro de marca Mitutoyo, con una precisión de $\pm 0.01\text{mm}$. En las figuras 2.14 a 2.17, se muestran detalles de los dispositivos de aforo.



Figura 2.14 Vertedor triangular.



Figura 2.15 Escala digital mitutoyo

Es importante señalar que el rango de operación del vertedor en cada una de las pruebas se enfocó a ajustar el caudal a un gasto fijo de 68 l/s.

2.1.4 Medición de velocidades

Las velocidades que se puedan presentar en el canal son un dato importante, pues permiten predecir la fuerza que debe resistir el lecho del canal para evitar erosión. En la medición sobre el prototipo se empleó una micropropela marca Nixon No.403, para un rango de velocidades de 5 – 150 cm/s, con un error del 2%. En las figuras 2.16 – 2.17 se aprecian detalles de la micropropela y su control de medición.



Figura 2.16 Monitor de velocidades marca Nixon.



Figura 2.17 Detalle de micropropela de baja velocidad No. 403 marca Nixon.

En la Figura 2.18, se muestra una panorámica de la ubicación de los equipos de medición y el esquema de trabajo en el desarrollo de las pruebas. En general se efectuaron las pruebas con la compuerta aguas abajo abierta, pues de esta manera se tienen las condiciones más críticas en el canal. Las sondas se ubicaron todas sobre una sección transversal como lo muestra el esquema, con el fin de obtener los tirantes de esta sección y al mismo tiempo su perfil topográfico medido por el perfilador, datos que en su momento se utilizarán para comparar con el cálculo numérico.

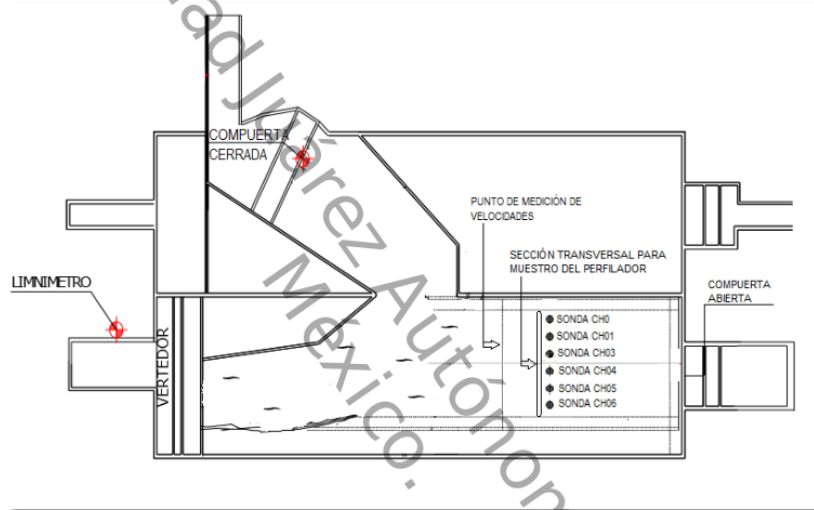


Figura 2. 18 Instrumentación para pruebas en el prototipo.

2.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para la campaña de pruebas y mediciones se escogió una sección transversal previamente identificada como zona de erosión, sobre la cual se instalaron 5 sondas de medición a una separación de 30 cm de longitud, con el propósito de monitorear los niveles de agua, de igual manera se hizo uso del perfilador para obtener el perfil topográfico de esta misma sección al paso de cada prueba realizada.

2.2.1 Mediciones de velocidad.

Las mediciones de velocidades se realizaron con la Micropropela marca Nixon 403. El procedimiento fue dividir la sección transversal del canal de salida en secciones iguales. Cada punto fue marcado como se indicó en la figura 2.18. La micropropela se colocó a 0.5 cm del fondo, tratando siempre de que el agua la cubriera. Tomando en cuenta la turbulencia producida por los tirantes tan pequeños que se presentan en el área de medición (Tirantes desde 1 cm hasta 4cm), se utilizaron valores promediados cada 10s, y se tomaron 10 mediciones por cada punto, los cuales a su vez fueron promediados para obtener una mejor aproximación de la velocidad, y reducir la posibilidad de encontrar valores dispersos arrojados cuando el equipo efectuaba mediciones a cada segundo.

2.2.2 Mediciones del nivel.

Las mediciones de nivel se realizaron con los medidores digitales. Antes de iniciar cada prueba los medidores fueron calibrados sincronizando un nivel conocido de agua y ajustándolos por un factor de equivalencia con los datos arrojados por el software del sistema de medición digital. Durante las mediciones y debido a las fluctuaciones de la superficie libre del agua (SLA), se tomaron promedios con 100 mediciones puntuales, una cada segundo. Estos valores se llevaron a una hoja de cálculo y se promediaron. A partir de estos valores se obtuvo un nivel medio de altura de la SLA, para cada punto de medición. Los puntos de medición fueron los indicados en la figura 2.18.

2.2.3 Mediciones de Perfil topográfico del cauce.

Se realizaron al inicio de cada prueba, mediciones del perfil del fondo del cauce con el perfilador marca Wallingford, lo cual se usaría como base física para decidir si el cauce seguía en proceso de erosión o en estado de equilibrio.



2.3 CAMPAÑA DE PRUEBAS

Las pruebas realizadas se efectuaron con un caudal $Q = 67.5$ l/s, como única condición de frontera. Se decidió hacer pruebas con un mismo caudal, tomando en cuenta la capacidad de bombeo del laboratorio, donde se decidió el utilizar la máxima capacidad de bombeo de este, pues es donde se pueden observar los mayores efectos erosivos, permitiendo tener una mejor representación del fenómeno físico de estudio y observar las condiciones críticas producidas por este. A continuación se enumeran cada una de las pruebas realizadas, con la respectiva descripción del trabajo efectuado en cada una de ellas.

Prueba no. 1. Saturación de zona de estudio y puesta a punto del prototipo.

Descripción: Esta prueba consistió en la puesta a punto del prototipo probando el funcionamiento en general de las adecuaciones de la estructura para el caso de estudio. Con el objetivo de no afectar la configuración del cauce se procedió a saturar de agua el área de estudio previamente compactada con gastos gradualmente pequeños, para posteriormente efectuar la medición del perfil inicial del cauce con el medidor topográfico. En las figuras 2.19 a 2.22, se muestran detalles de este proceso.



Figura 2. 19 Configuración inicial del área de estudio previamente compactada.



Figura 2. 20 Inicio de funcionamiento de la estructura con gastos relativamente bajos.



Figura 2. 21 Proceso de saturación de la zona de estudio.



Figura 2. 22 Comienzo de mediciones del perfil inicial del fondo del cauce.

En la Figura 2.22 se observa la medición del perfil inicial del cauce, cabe mencionar que la configuración de este perfil fue tomado luego de saturar el cauce con agua, proceso por el cual se esperó un día entero para que el suelo de este, se secase y se estabilizara.

Prueba No. 2. Condición $Q= 67.5$ l/s. Medición de parámetros.

Descripción: Esta prueba es el punto de partida para el estudio, se efectuaron las mediciones de los tirantes iniciales en cada uno de los puntos establecidos de sondeo, y se llevó a cabo la medición de las velocidades en la sección transversal.

Tabla 2. 1 Tirantes iniciales medidos con un gasto de 67.5 l/s

SONDA	CADENAMIENTO(m)	TIRANTE (m)
Sonda CH0	0	0.0036
Sonda CH1	0.3	0.014
Sonda CH3	0.6	0.033
Sonda CH4	0.9	0.035
Sonda CH5	1.2	0.0107
Sonda CH6	1.5	0.001

Prueba No. 3 - Prueba No. 36. Condición $Q= 67.5$ l/s. Estado de equilibrio del fondo del cauce.

Descripción: La finalidad de estas pruebas repetitivas consistió en encontrar el estado de equilibrio del cauce, es decir cuando el perfil del fondo no se mueva y/o presente solamente una ligera variación en su perfil al paso del tiempo.

Para lograr esto se pusieron en marcha una serie de pruebas por lapsos de 1 hora cada una, transitando el caudal antes descrito. Un punto importante en cada una de estas pruebas fue el continuo monitoreo del perfil del cauce al término de cada prueba por medio del equipo de medición, con esto se logró tener confianza, de que efectivamente aún existían cambios en la topografía de la sección sobre la cual se realizaban las mediciones.

Se observó que al medir el perfil topográfico de la sección, seguidamente del término del tránsito del cauce, arrojaba un margen de error al momento de la medición de este, por las condiciones de saturación en el cauce, provocando que el sensor del perfilador sumergiera al tocar el lecho arenoso (Figura 2.23). Por lo que se optó por esperar un tiempo de secado del lecho de uno a dos

días para efectuar la medición del perfil y seguidamente de esto iniciar la siguiente prueba propuesta (figura 2.24 -2.25)



Figura 2. 23 Detalle de la saturación del lecho.

Figura 2. 24 Vista panorámica de la zona de estudio

Figura 2. 25 Perfilador obteniendo datos del canal.

2.4



propuesto. A continuación se muestra en la Figura 2.27, la representación de los perfiles de las pruebas 5-6, donde se hacen notar la intersección en más de un punto de medición del perfil, demostrando esto que el perfil de la sección presentó mínima variabilidad en cada punto de medición logrando alcanzar el equilibrio del lecho. De la misma manera de estas mediciones se puede deducir la erosión observada en cada punto de medición (Tabla 2.2) y compararla contra

La mayoría de los datos obtenidos en esta parte experimental, no solo sirven como parte comparativa de lo real contra lo estimado numéricamente, son base fundamental para obtener una buena estimación numérica. En el siguiente capítulo a través estos datos obtenidos como lo son el caudal y los distintos tirantes, se obtendrán estimaciones numéricas de la erosión general por medio del criterio propuesto.

Tabla 2. 2 Erosión observada

CADENAMIENTO(m)	TIRANTE (m)	Erosión(m)
0	0.0036	0.02655
0.3	0.014	0.03605
0.6	0.033	0.0406
0.9	0.035	0.0567
1.2	0.0107	0.0353
1.5	0.001	0.0324

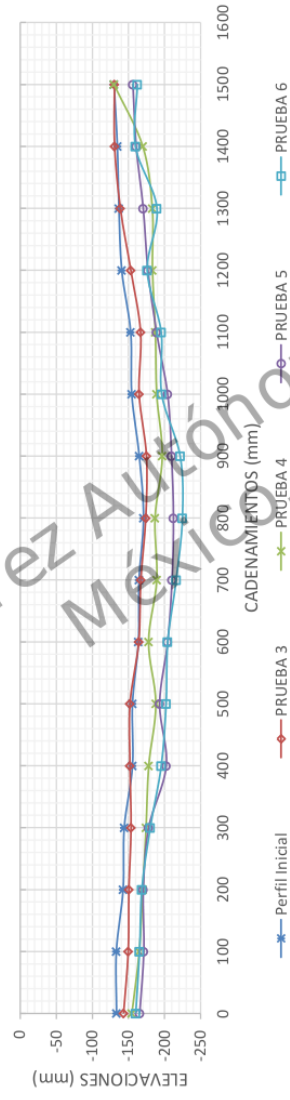


Figura 2. 26 Perfiles de la sección de la zona de estudio.

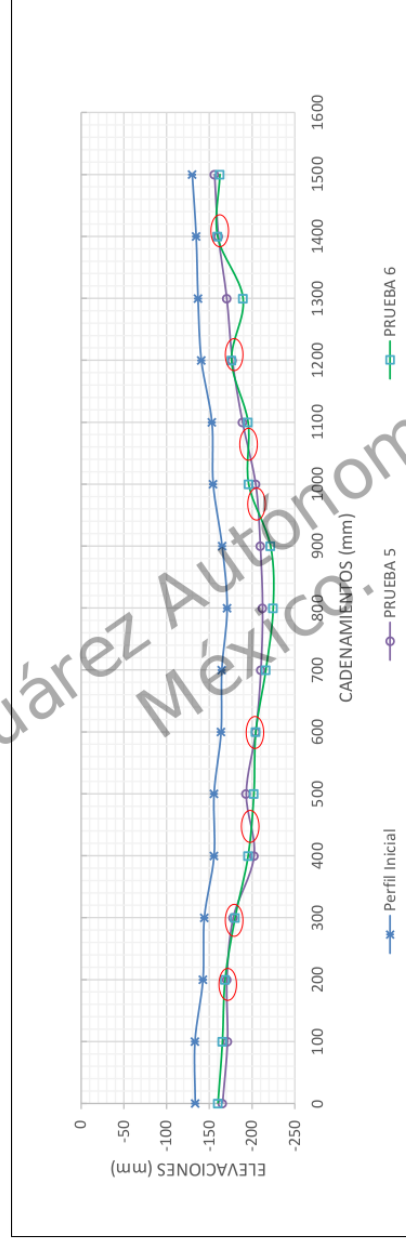


Figura 2.27 Perfil de equilibrio.



CAPITULO 3 IMPLEMENTACION DEL MÉTODO NUMÉRICO

Los métodos de cálculo para la estimación de la erosión general, pueden aplicarse tanto a nivel de la sección transversal global; o bien, segmentando la misma en una serie de franjas verticales y aplicando el procedimiento de cálculo en forma desagregada.

1 Desde el punto de vista conceptual, una de las hipótesis fundamentales en la que se basan varios métodos, reside en igualar la velocidad media del flujo (V_f) en una franja vertical contra la velocidad de equilibrio (U_e), para mantener un transporte sólido generalizado en el lecho; es decir, con un aporte de material desde aguas arriba que compense el volumen removido por la corriente. Por lo tanto, para aplicar la identidad $V_f = U_e$, se necesitan encontrar expresiones generales tanto para V_f como para U_e . A continuación se detallan cada una de estas.

3.1 VELOCIDADES CRÍTICA Y DE EQUILIBRIO

La velocidad crítica (V_c) se define como la velocidad media del flujo, necesaria para poner en movimiento las partículas de sedimentos en la sección de interés (en el caso de que no exista aporte de material sólido desde el segmento de aguas arriba del cauce). La velocidad de equilibrio (U_e) se refiere al caso de transporte generalizado, siendo esta, la velocidad necesaria para mantener un equilibrio entre la masa de sedimento erosionada de la sección y el suministro de sólidos desde aguas arriba.

Para encontrar una expresión de la velocidad crítica de inicio de transporte, se puede combinar la fórmula de fricción de Manning-Strickler con el diagrama de Shields (García & Maza, 1999), del siguiente modo.

Para una franja vertical de flujo, la velocidad media del flujo se expresa como:

$$V = \frac{1}{n} h^{2/3} S^{1/2}, \quad \text{con } n = 26. d^{-1/6} \quad (3.1)$$



Dónde:

V : velocidad media de la corriente, en m/s.

h : profundidad del flujo, en m.

S : pendiente longitudinal del cauce.

n : coeficiente de rugosidad de Manning.

Por su parte para la función de Shields $\tau_{*c} = \phi_{\tau}(d_*)$ se emplea una versión segmentada de curvas potenciales al estilo de las presentadas por Van Rijn (Fariás *et al* 2003), las que en forma genérica se escriben como:

$$\tau_{*c} = k_{\tau} * d_*^x \quad (3.2)$$

$$D_* = \left[\frac{g \Delta}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot d \quad (3.2.1)$$

$$\tau_{*c} = \frac{h \cdot S}{d \cdot \Delta} \quad (3.2.2)$$

Dónde:

τ_{*c} : tensión adimensional de shields.

k_{τ} : altura de los elementos de rugosidad.

d_* : parámetro de partícula.

x : constante Van Rijn

d : tamaño mediano de las partículas de sedimento.

h : profundidad de flujo.

Δ : densidad relativa del sedimento sumergido.

ν : viscosidad cinemática del agua.

g : constante de gravedad.

S : pendiente longitudinal del cauce.

Combinando las expresiones (3.1) y (3.2), y después de una manipulación algebraica, se obtiene para la velocidad crítica:

$$V_c = \left(26 \cdot k_{\tau}^{\frac{1}{2}} \cdot g^{\frac{x}{6}} \cdot \Delta^{\frac{x+3}{6}} \cdot \nu^{-\frac{x}{3}} \right) \cdot d^{(3x+2)/6} \cdot h^{1/6} \quad (3.3)$$



En el caso de arenas medias; es decir, diámetros entre 0.4 mm y 0.8 mm, los valores de las constantes son (Farías *et al* 2003): $k_\tau = 0.04$; $x = -0.10$. Reemplazando estos valores en la ecuación (3.3) y haciendo uso de los valores típicos de g , Δ y v para condiciones normarles, se obtiene:

$$V_c = 6.093 d^{0.2833} h^{0.1667} \quad (3.4)$$

Observando esta ecuación, se aprecia su semejanza con la ecuación propuesta por la FHWA en la circular HEC-1 (U.S. Department of Transportation, 1993), la cual se expresa como:

$$V_c = 6.19 d^{1/3} h^{1/6} \text{ (unidades SI)} \quad (3.5)$$

Análogamente, en países de Europa oriental y los antiguos miembros de la ex Unión Soviética, se utiliza frecuentemente la fórmula de Shamov (Przedwojski *et al.*, 1995), la que se escribe en unidades SI como:

$$V_c = 6 d_{50} h^{1/6}. \quad (3.6)$$

Puede advertirse que, para aquellas ecuaciones de la velocidad crítica basadas en la representación a través de una función potencial de un segmento de la curva de Shields y su combinación con la fórmula de Manning para la resistencia al flujo, la profundidad h aparece siempre elevada a la potencia (1/6), mientras que el tamaño del sedimento aparece elevado a una potencia cercana a 0.3 para el rango de las arenas.

Existen otras ecuaciones de tipo logarítmico, como la fórmula propuesta por Levi (Farías *et al* 2003), para materiales uniformes: $V_c = 1.4(g \cdot d)^{0.5} \ln[R/(7d)]$, la cual es válida para $R/d > 60$.

Entre las fórmulas más recientes, puede incluirse la propuesta por Van Rijn (1984) que está en función del tamaño del sedimento:

$$V_c = 0.19 d_{50}^{0.1} \log[(12R)/(3d_{90})], 0.1\text{mm} < d < 0.5\text{mm} \quad (3.7)$$

$$V_c = 8.50 d_{50}^{0.6} \log[(12R)/(3d_{90})], 0.5\text{mm} < d < 2.0\text{mm} \quad (3.8)$$

Finalmente, se puede incluir en este conjunto a la fórmula de Lischtván & Lebediev para el rango de arenas (Schreider *et al.*, 2001):

$$V_c = 4.7d^{0.28}h^{0.41} \quad (3.9)$$

Con la finalidad de simplificar el análisis, y restringir su aplicación al caso de ríos arenosos, se realizó un ajuste de las ecuaciones logarítmicas a fórmulas potenciales, válidas para los rangos de granos de 0.1 mm a 1.5 mm y de profundidades de 0.5 m a 10.0 m, con errores máximos del orden del 5% (en el caso de las fórmulas de Van Rijn, se supuso que el sedimento es arena fina con distribución granulométrica log-normal, con $\sigma_g=1.5$, $d_{90}=1.68d_{50}$, con lo que resulta la fórmula simplificada:

$$V_c = 0.19d^{0.1}\log[2.4R/d] \quad (3.10)$$

La que a su vez se reduce a un formato potencial.

Desde el punto de vista práctico, la aplicación de uno u otro caso está asociada al tipo de curso fluvial de que se trate. En la Tabla 3.1 se presentan siete fórmulas extraídas de la literatura, reducidas al formato general y las cuales son utilizadas en el presente estudio:

$$V_c = b_0d^{b_1}h^{b_2} \quad (3.11)$$

Tabla 3. 1 Fórmulas para la velocidad crítica. (Fuente: Fariás et al., 2003)

Formula	b_0	b_1	b_2
Shamov	6	0.333	0.167
DoT-FHWA-HEC18	6.19	0.333	0.167
Maza & Echavarría.	3.62	0.2	0.275
Levi (aprox. pot)	8.29	0.357	0.156
Van Rijn (aprox. pot.)	0.34	0.004	0.1
Lischtván-Lebediev	4.7	0.28	0.41
Shields-Manning	6.093	0.283	0.167



3.2 RESISTENCIA AL FLUJO.

A su vez, existe en la literatura un gran número de ecuaciones para estimar las características friccionales de cauces aluviales. Las relaciones de resistencia de uso más extendido en el caso de cauces arenosos (en el rango de tamaños de partículas de 0.1 mm a 1.0 mm) pueden reducirse a un formato genérico en la forma de un producto de potencias (Farias & Pilán, 2000), tal como el siguiente:

$$V_r = a_0 d^{a_1} h^{a_2} S^{a_3} \quad (3.12)$$

1 donde los valores de los coeficientes y exponentes a_i ($i = 0, 1, 2, 3$) dependen de cada una de las ecuaciones publicadas en la literatura que se considere.

Los valores de las constantes numéricas para varias fórmulas se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Fórmulas de resistencia de flujo. (Fuente: Farias *et al.*, 2008)

Formula	a_0	a_1	a_2	a_3
Manning-Strickler	21.10	-0.167	0.667	0.500
Maza-Cruickshank	495.85	0.340	0.637	0.456
1 Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389
Peterson-Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276
Karim-Kennedy	18.19	-0.103	0.603	0.497
Farias-Pilan	4.78	0.026	0.499	0.213

3.3 FORMULACIÓN GENERALIZADA.

1 Las relaciones para U_e (o V_c) y V_r se combinan para producir un criterio generalizado que permite estimar la erosión general en ríos arenosos escogiendo el par de fórmulas (a partir de las Tablas 1 y 2) que se considere apropiado.



Considerando las relaciones genéricas

$$U_e = b_0 d^{b_1} h^{b_2} \quad \text{y} \quad V_r = a_0 d^{a_1} h^{a_2} S^{a_3}$$

Concentrando algunos de los parámetros, se puede escribir:

$$\alpha_M = a_0 d^{a_1} S^{a_3}$$

con lo que la velocidad media puede expresarse como:

$$V_{r(i)} = \alpha_M h_i^{a_2}$$

Asimismo, por continuidad, se tiene: $\alpha_M = Q / [T \cdot h_i^{(a_2+1)}]$

Finalmente

$$h_{s_i} = \left[(\alpha_M / b_0) d^{-b_1} h_i^{(a_2+1)} \right]^{\frac{1}{b_2+1}} \quad (3.13)$$

La expresión resultante, se aplica a cada franja vertical en la que se segmentó el cauce y con esto es posible estimarla erosión general. Este método se ha aplicado a grandes ríos de llanura, encontrándose resultados satisfactorios para predecir la erosión general en el rango de profundidades de 2 m a 25 m (Farias & Pilán, 2000).

3.4 CASO DE APLICACIÓN: CANAL DE LABORATORIO

La profundidad de la socavación es una función de los datos básicos (caudal de diseño, tamaño del sedimento, sección inicial del cauce, etc.) y de las constantes a_i y b_j que dependen del par de ecuaciones adoptadas para la velocidad media del flujo y la velocidad de equilibrio. Más aún, para un río dado, la profundidad en una vertical de una sección erosionada resulta una función potencial del tirante inicial, lo que se muestra en la siguiente expresión reescrita, que resulta de agrupar algebraicamente las variables descritas anteriormente en la Ec.3.13, asignándoles literales a cada agrupación :



$$h_{sf} = k_0 h_1^{k_1} \quad (3.14)$$

$$k_0 = m_0 d^{m_1} \quad (3.14.1)$$

$$k_1 = (a_2 + 1)/(b_2 + 1) \quad (3.14.2)$$

$$m_0 = [\alpha_M/b_0]^{1/(b_2+1)} \quad (3.14.3)$$

$$m_1 = -b_1/(b_2 + 1) \quad (3.14.4)$$

Con las ecuaciones anteriores, y el uso los datos básicos obtenidos en las pruebas experimentales, tales como el caudal, tamaño del sedimento, tirantes iniciales sobre la sección escogida sobre el área de estudio, se logró encontrar numéricamente una estimación de la erosión del canal, para efectos de cálculo numérico, se elaboró una hoja de cálculo en el programa Excel, facilitando los cálculos y la manipulación de los resultados obtenidos (Figura. 3.1).

FORMULA	Variable	Valor	Unidad
Q	0.01	m³/s	
d	0.001	m	
h _{sf}	0.001	m	
h ₁	0.001	m	
h ₂	0.001	m	
h ₃	0.001	m	
h ₄	0.001	m	
h ₅	0.001	m	
h ₆	0.001	m	
h ₇	0.001	m	
h ₈	0.001	m	
h ₉	0.001	m	
h ₁₀	0.001	m	
h ₁₁	0.001	m	
h ₁₂	0.001	m	
h ₁₃	0.001	m	
h ₁₄	0.001	m	
h ₁₅	0.001	m	
h ₁₆	0.001	m	
h ₁₇	0.001	m	
h ₁₈	0.001	m	
h ₁₉	0.001	m	
h ₂₀	0.001	m	
h ₂₁	0.001	m	
h ₂₂	0.001	m	
h ₂₃	0.001	m	
h ₂₄	0.001	m	
h ₂₅	0.001	m	
h ₂₆	0.001	m	
h ₂₇	0.001	m	
h ₂₈	0.001	m	
h ₂₉	0.001	m	
h ₃₀	0.001	m	
h ₃₁	0.001	m	
h ₃₂	0.001	m	
h ₃₃	0.001	m	
h ₃₄	0.001	m	
h ₃₅	0.001	m	
h ₃₆	0.001	m	
h ₃₇	0.001	m	
h ₃₈	0.001	m	
h ₃₉	0.001	m	
h ₄₀	0.001	m	
h ₄₁	0.001	m	
h ₄₂	0.001	m	
h ₄₃	0.001	m	
h ₄₄	0.001	m	
h ₄₅	0.001	m	
h ₄₆	0.001	m	
h ₄₇	0.001	m	
h ₄₈	0.001	m	
h ₄₉	0.001	m	
h ₅₀	0.001	m	
h ₅₁	0.001	m	
h ₅₂	0.001	m	
h ₅₃	0.001	m	
h ₅₄	0.001	m	
h ₅₅	0.001	m	
h ₅₆	0.001	m	
h ₅₇	0.001	m	
h ₅₈	0.001	m	
h ₅₉	0.001	m	
h ₆₀	0.001	m	
h ₆₁	0.001	m	
h ₆₂	0.001	m	
h ₆₃	0.001	m	
h ₆₄	0.001	m	
h ₆₅	0.001	m	
h ₆₆	0.001	m	
h ₆₇	0.001	m	
h ₆₈	0.001	m	
h ₆₉	0.001	m	
h ₇₀	0.001	m	
h ₇₁	0.001	m	
h ₇₂	0.001	m	
h ₇₃	0.001	m	
h ₇₄	0.001	m	
h ₇₅	0.001	m	
h ₇₆	0.001	m	
h ₇₇	0.001	m	
h ₇₈	0.001	m	
h ₇₉	0.001	m	
h ₈₀	0.001	m	
h ₈₁	0.001	m	
h ₈₂	0.001	m	
h ₈₃	0.001	m	
h ₈₄	0.001	m	
h ₈₅	0.001	m	
h ₈₆	0.001	m	
h ₈₇	0.001	m	
h ₈₈	0.001	m	
h ₈₉	0.001	m	
h ₉₀	0.001	m	
h ₉₁	0.001	m	
h ₉₂	0.001	m	
h ₉₃	0.001	m	
h ₉₄	0.001	m	
h ₉₅	0.001	m	
h ₉₆	0.001	m	
h ₉₇	0.001	m	
h ₉₈	0.001	m	
h ₉₉	0.001	m	
h ₁₀₀	0.001	m	

Figura 3. 1 Hoja de cálculo utilizada en el método numérico.

Los cálculos se hicieron para cada tirante inicial medido (Tabla 2.1) en la sección transversal establecida sobre el área de estudio, de igual manera se implementaron todas las posibles combinaciones de ecuaciones establecidas por el criterio generalizado (Tabla 3.1 y 3.2) para obtener diversas estimaciones de profundidades de erosión por cada punto donde se midieron los tirantes iniciales, los resultados se muestran en las Tablas 3.3 A 3.8.

1 Tabla 3.3 Resultados de la aplicación del método generalizado para varias combinaciones de fórmulas de fricción y de velocidad crítica. En este caso se analizó una franja con tirante inicial de 0.0936m. [Datos: $Q=0.0675 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=5\text{m}$, $d=0.2546\text{mm}$, $h_m=0.03\text{m}$].

FORMULA Vc	a0	a1	a2	a3	b0	b1	b2	am	m0	m1	k0	k1	hs(m)
Manning- Strickler	21.1	-0.167	0.667	0.5	6	0.333	0.167	4.6663	0.8062	-0.29	8.551	1.43	0.00271
Manning- Strickler	21.1	-0.167	0.667	0.5	6.19	0.333	0.167	4.6663	0.785	-0.29	8.326	1.43	0.002637
Manning- Strickler	21.1	-0.167	0.667	0.5	3.62	0.2	0.275	4.6663	1.2203	-0.16	4.47	1.31	0.002801
Manning- Strickler	21.1	-0.167	0.667	0.5	8.29	0.357	0.156	4.6663	0.6083	-0.31	7.835	1.44	0.002298
Manning- Strickler	21.1	-0.167	0.667	0.5	0.34	0.004	0.1	4.6663	10.816	-0	11.15	1.52	0.002161
Manning- Strickler	21.1	-0.167	0.667	0.5	4.7	0.28	0.41	4.6663	0.9949	-0.2	5.147	1.18	0.006535
Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	6	0.333	0.167	2.8762	0.5326	-0.29	5.649	1.31	0.003485
Dot- FHWA-HEC 18	13.29	-0.029	0.529	0.389	6.19	0.333	0.167	2.8762	0.5185	-0.29	5.5	1.31	0.003394
Maza & Echavarría	13.29	-0.029	0.529	0.389	3.62	0.2	0.275	2.8762	0.8349	-0.16	3.058	1.2	0.003529
Levi	13.29	-0.029	0.529	0.389	8.29	0.357	0.156	2.8762	0.4002	-0.31	5.155	1.32	0.002965
Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	0.34	0.004	0.1	2.8762	6.9668	-0	7.18	1.39	0.002824
Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	4.7	0.28	0.41	2.8762	0.7059	-0.2	3.651	1.08	0.008053
Lichtvan- Lebediev	13.29	-0.029	0.529	0.389	6	0.333	0.167	3.7283	0.6652	-0.29	7.055	1.37	0.003044
Shamov	18.19	-0.103	0.603	0.497	6	0.333	0.167	3.7283	0.6476	-0.29	6.869	1.37	0.002964
Dot- FHWA-HEC 18	18.19	-0.103	0.603	0.497	6.19	0.333	0.167	3.7283	1.0234	-0.16	3.748	1.26	0.003118
Maza & Echavarría	18.19	-0.103	0.603	0.497	3.62	0.2	0.275	3.7283	0.5009	-0.31	6.453	1.39	0.002586
Levi	18.19	-0.103	0.603	0.497	8.29	0.357	0.156	3.7283	8.8203	-0	9.09	1.46	0.002447
Van Rijn	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.34	0.004	0.1	3.7283	8.8203	-0	9.09	1.46	0.002447
Lichtvan- Lebediev	18.19	-0.103	0.603	0.497	4.7	0.28	0.41	3.7283	0.8485	-0.2	4.389	1.14	0.007199
Peterson & Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276	6	0.333	0.167	2.0831	0.4039	-0.29	4.284	1.23	0.004124
Shamov	7.546	0.017	0.437	0.276	6.19	0.333	0.167	2.0831	0.3933	-0.29	4.171	1.23	0.004015
Dot- FHWA-HEC 18	7.546	0.017	0.437	0.276	3.62	0.2	0.275	2.0831	0.6483	-0.16	2.374	1.13	0.004116
Maza & Echavarría	7.546	0.017	0.437	0.276	8.29	0.357	0.156	2.0831	0.3028	-0.31	3.9	1.24	0.003514
Levi	7.546	0.017	0.437	0.276	0.34	0.004	0.1	2.0831	5.196	-0	5.355	1.31	0.003376
Van Rijn	7.546	0.017	0.437	0.276	4.7	0.28	0.41	2.0831	0.5615	-0.2	2.905	1.02	0.009256
Lichtvan- Lebediev	7.546	0.017	0.437	0.276	6	0.333	0.167	2.589	0.4866	-0.29	5.162	1.28	0.003682
Shamov	4.78	0.026	0.499	0.213	6	0.333	0.167	2.589	0.4738	-0.29	5.026	1.28	0.003585
Dot- FHWA-HEC 18	4.78	0.026	0.499	0.213	6.19	0.333	0.167	2.589	0.7688	-0.16	2.816	1.18	0.003711
Maza & Echavarría	4.78	0.026	0.499	0.213	3.62	0.2	0.275	2.589	0.3654	-0.31	4.707	1.3	0.003134
Levi	4.78	0.026	0.499	0.213	8.29	0.357	0.156	2.589	6.3314	-0	6.525	1.36	0.002994
Van Rijn	4.78	0.026	0.499	0.213	0.34	0.004	0.1	2.589	6.3314	-0	6.525	1.36	0.002994
Lichtvan- Lebediev	4.78	0.026	0.499	0.213	4.7	0.28	0.41	2.589	0.6551	-0.2	3.389	1.06	0.008427

Tabla 3. 4 Resultados de la aplicación del método generalizado para varias combinaciones de fórmulas de fricción y de velocidad crítica. En este caso se ha analizado una franja con tirante inicial de 0.0142m. [Da 1: $Q=0.0675 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=5\text{m}$, $d=0.2546\text{mm}$, $\rho_{\text{lim}}=0.03\text{m}$].

FORMULA Vc		a0	a1	a2	a3	b0	b1	b2	am	m0	m1	k0	k1	hs(m)
Manning- Strickler	Formula Ue	21.1	-0.167	0.667	0.5	6	0.333	0.167	4.663	0.802	-0.29	8.551	1.43	0.01952
Manning- Strickler	Shamov	21.1	-0.167	0.667	0.5	6	0.333	0.167	4.663	0.802	-0.29	8.551	1.43	0.01952
Manning- Strickler	Dot- FHWA-HEC 18	21.1	-0.167	0.667	0.5	6	0.333	0.167	4.663	0.802	-0.29	8.551	1.43	0.01952
Manning- Strickler	Maza & Echavarría	21.1	-0.167	0.667	0.5	3.62	0.2	0.275	4.663	1.2203	-0.16	4.47	1.31	0.0170794
Manning- Strickler	Levi	21.1	-0.167	0.667	0.5	8.29	0.357	0.156	4.663	0.6083	-0.31	7.835	1.44	0.0168798
Manning- Strickler	Van Rijn	21.1	-0.167	0.667	0.5	0.34	0.004	0.1	4.663	10.816	-0	11.15	1.52	0.0175675
Manning- Strickler	Lischtnan- Lebediev	21.1	-0.167	0.667	0.5	4.7	0.28	0.41	4.663	0.9949	-0.2	5.147	1.18	0.0335127
Manning- Strickler	Shamov	13.29	-0.029	0.529	0.389	6	0.333	0.167	2.8762	0.5326	-0.29	5.649	1.31	0.0213337
Manning- Strickler	Dot- FHWA-HEC 18	13.29	-0.029	0.529	0.389	6	0.333	0.167	2.8762	0.5326	-0.29	5.649	1.31	0.0213337
Manning- Strickler	Maza & Echavarría	13.29	-0.029	0.529	0.389	3.62	0.2	0.275	2.8762	0.8349	-0.16	3.058	1.2	0.0185267
Manning- Strickler	Levi	13.29	-0.029	0.529	0.389	8.29	0.357	0.156	2.8762	0.4002	-0.31	5.155	1.32	0.0184641
Manning- Strickler	Van Rijn	13.29	-0.029	0.529	0.389	0.34	0.004	0.1	2.8762	6.9668	-0	7.18	1.39	0.0193043
Manning- Strickler	Lischtnan- Lebediev	13.29	-0.029	0.529	0.389	4.7	0.28	0.41	2.8762	0.7059	-0.2	3.651	1.08	0.0360705
Manning- Strickler	Shamov	18.19	-0.103	0.603	0.497	6	0.333	0.167	3.7283	0.6652	-0.29	7.055	1.37	0.0203409
Manning- Strickler	Dot- FHWA-HEC 18	18.19	-0.103	0.603	0.497	6	0.333	0.167	3.7283	0.6652	-0.29	7.055	1.37	0.0203409
Manning- Strickler	Maza & Echavarría	18.19	-0.103	0.603	0.497	3.62	0.2	0.275	3.7283	1.0234	-0.16	3.748	1.26	0.017736
Manning- Strickler	Levi	18.19	-0.103	0.603	0.497	8.29	0.357	0.156	3.7283	0.5009	-0.31	6.453	1.39	0.0175969
Manning- Strickler	Van Rijn	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.34	0.004	0.1	3.7283	8.8203	-0	9.09	1.46	0.0183526
Manning- Strickler	Lischtnan- Lebediev	18.19	-0.103	0.603	0.497	4.7	0.28	0.41	3.7283	0.8485	-0.2	4.389	1.14	0.0346755
Manning- Strickler	Shamov	7.546	0.017	0.437	0.276	6	0.333	0.167	2.0831	0.4039	-0.29	4.284	1.23	0.0226357
Manning- Strickler	Dot- FHWA-HEC 18	7.546	0.017	0.437	0.276	6	0.333	0.167	2.0831	0.4039	-0.29	4.284	1.23	0.0226357
Manning- Strickler	Maza & Echavarría	7.546	0.017	0.437	0.276	3.62	0.2	0.275	2.0831	0.6483	-0.16	2.374	1.13	0.019559
Manning- Strickler	Levi	7.546	0.017	0.437	0.276	8.29	0.357	0.156	2.0831	0.3028	-0.31	3.9	1.24	0.0196021
Manning- Strickler	Van Rijn	7.546	0.017	0.437	0.276	0.34	0.004	0.1	2.0831	5.196	-0	5.355	1.31	0.0205565
Manning- Strickler	Lischtnan- Lebediev	7.546	0.017	0.437	0.276	4.7	0.28	0.41	2.0831	0.5615	-0.2	2.905	1.02	0.0378832
Manning- Strickler	Shamov	4.78	0.026	0.499	0.213	6	0.333	0.167	2.589	0.4866	-0.29	5.162	1.28	0.0217498
Manning- Strickler	Dot- FHWA-HEC 18	4.78	0.026	0.499	0.213	6	0.333	0.167	2.589	0.4866	-0.29	5.162	1.28	0.0217498
Manning- Strickler	Maza & Echavarría	4.78	0.026	0.499	0.213	3.62	0.2	0.275	2.589	0.7688	-0.16	2.816	1.18	0.0188572
Manning- Strickler	Levi	4.78	0.026	0.499	0.213	8.29	0.357	0.156	2.589	0.3654	-0.31	4.707	1.3	0.0188277
Manning- Strickler	Van Rijn	4.78	0.026	0.499	0.213	0.34	0.004	0.1	2.589	6.3314	-0	6.525	1.36	0.019704
Manning- Strickler	Lischtnan- Lebediev	4.78	0.026	0.499	0.213	4.7	0.28	0.41	2.589	0.6551	-0.2	3.389	1.06	0.0366518

Tabla 3.5 Resultados de la aplicación del método generalizado para varias combinaciones de fórmulas de fricción y de velocidad crítica. En este caso se ha analizado una franja con tirante inicial de 0.033m. Datos: $Q=0.0675 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=5\text{m}$, $d=0.2546\text{mm}$, $h_m=0.03\text{m}$.

FORMULA Vc		a0	a1	a2	a3	b0	b1	b2	am	m0	m1	k0	k1	hs(m)
Manning- Strickler	Shamov	21.1	-0.167	0.667	0.5	6	0.333	0.167	4.663	0.8062	-0.29	8.551	1.43	0.06771
Manning- Strickler	Dot- FHWA-HEC 18	21.1	-0.167	0.667	0.5	6.19	0.333	0.167	4.663	0.785	-0.29	8.326	1.43	0.065925
Manning- Strickler	Maza & Echavarria	21.1	-0.167	0.667	0.5	3.62	0.2	0.275	4.663	1.2203	-0.16	4.47	1.31	0.053321
Manning- Strickler	Levi	21.1	-0.167	0.667	0.5	8.29	0.357	0.156	4.663	0.6083	-0.31	7.835	1.44	0.05925
Manning- Strickler	Van Rijn	21.1	-0.167	0.667	0.5	0.34	0.004	0.1	4.663	10.816	-0	11.15	1.52	0.065735
Manning- Strickler	Lichtvan- Lebediev	21.1	-0.167	0.667	0.5	4.7	0.28	0.41	4.663	0.9949	-0.2	5.147	1.18	0.09382
Brownlie	Shamov	13.29	-0.029	0.529	0.389	6	0.333	0.167	2.8762	0.5326	-0.29	5.649	1.31	0.066762
Dot- FHWA-HEC 18	Shamov	13.29	-0.029	0.529	0.389	6.19	0.333	0.167	2.8762	0.5185	-0.29	5.5	1.31	0.065002
Brownlie	Maza & Echavarria	13.29	-0.029	0.529	0.389	3.62	0.2	0.275	2.8762	0.8349	-0.16	3.058	1.2	0.052637
Brownlie	Levi	13.29	-0.029	0.529	0.389	8.29	0.357	0.156	2.8762	0.4002	-0.31	5.155	1.32	0.058413
Brownlie	Van Rijn	13.29	-0.029	0.529	0.389	0.34	0.004	0.1	2.8762	6.9668	-0	7.18	1.39	0.064759
Brownlie	Lichtvan- Lebediev	13.29	-0.029	0.529	0.389	4.7	0.28	0.41	2.8762	0.7059	-0.2	3.651	1.08	0.092732
Karim & Kenedy	Shamov	18.19	-0.103	0.603	0.497	6	0.333	0.167	3.7283	0.6652	-0.29	7.055	1.37	0.067269
Karim & Kenedy	Dot- FHWA-HEC 18	18.19	-0.103	0.603	0.497	6.19	0.333	0.167	3.7283	0.6476	-0.29	6.869	1.37	0.065496
Karim & Kenedy	Maza & Echavarria	18.19	-0.103	0.603	0.497	3.62	0.2	0.275	3.7283	1.0234	-0.16	3.748	1.26	0.053003
Karim & Kenedy	Levi	18.19	-0.103	0.603	0.497	8.29	0.357	0.156	3.7283	0.5009	-0.31	6.453	1.39	0.05886
Karim & Kenedy	Van Rijn	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.34	0.004	0.1	3.7283	8.8203	-0	9.09	1.46	0.06528
Karim & Kenedy	Lichtvan- Lebediev	18.19	-0.103	0.603	0.497	4.7	0.28	0.41	3.7283	0.8485	-0.2	4.389	1.14	0.093314
Peterson & Peterson	Shamov	7.546	0.017	0.437	0.276	6	0.333	0.167	2.0831	0.4039	-0.29	4.284	1.23	0.066137
Peterson & Peterson	Dot- FHWA-HEC 18	7.546	0.017	0.437	0.276	6.19	0.333	0.167	2.0831	0.3933	-0.29	4.171	1.23	0.064394
Peterson & Peterson	Maza & Echavarria	7.546	0.017	0.437	0.276	3.62	0.2	0.275	2.0831	0.6483	-0.16	2.374	1.13	0.052186
Peterson & Peterson	Levi	7.546	0.017	0.437	0.276	8.29	0.357	0.156	2.0831	0.3028	-0.31	3.9	1.24	0.057861
Peterson & Peterson	Van Rijn	7.546	0.017	0.437	0.276	0.34	0.004	0.1	2.0831	5.196	-0	5.355	1.31	0.064116
Peterson & Peterson	Lichtvan- Lebediev	7.546	0.017	0.437	0.276	4.7	0.28	0.41	2.0831	0.5615	-0.2	2.905	1.02	0.092013
Farias & Pilan	Shamov	4.78	0.026	0.499	0.213	6	0.333	0.167	2.589	0.4866	-0.29	5.162	1.28	0.066558
Farias & Pilan	Dot- FHWA-HEC 18	4.78	0.026	0.499	0.213	6.19	0.333	0.167	2.589	0.4738	-0.29	5.026	1.28	0.064803
Farias & Pilan	Maza & Echavarria	4.78	0.026	0.499	0.213	3.62	0.2	0.275	2.589	0.7688	-0.16	2.816	1.18	0.05249
Farias & Pilan	Levi	4.78	0.026	0.499	0.213	8.29	0.357	0.156	2.589	0.3654	-0.31	4.707	1.3	0.058232
Farias & Pilan	Van Rijn	4.78	0.026	0.499	0.213	0.34	0.004	0.1	2.589	6.3314	-0	6.525	1.36	0.064548
Farias & Pilan	Lichtvan- Lebediev	4.78	0.026	0.499	0.213	4.7	0.28	0.41	2.589	0.6551	-0.2	3.389	1.06	0.092497

1 Tabla 3. 6 Resultados de la aplicación del método generalizado para varias combinaciones de fórmulas de fricción y de velocidad crítica. En este caso se analizó una franja con tirante inicial de 0.035 m. (Datos: $Q=0.0675 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=5 \text{ m}$, $d=0.2546 \text{ mm}$, $h_m=0.03 \text{ m}$).

FORMULA Vc	a0	a1	a2	a3	b0	b1	b2	dm	m0	m1	k0	k1	hs(m)
Manning- Strickler	21.1	-0.167	0.667	0.5	6	0.333	0.167	4.6663	0.8062	-0.29	8.551	1.43	0.07117
Manning- Strickler	21.1	-0.167	0.667	0.5	6.19	0.333	0.167	4.6663	0.785	-0.29	8.326	1.43	0.06929
Manning- Strickler	21.1	-0.167	0.667	0.5	3.62	0.2	0.275	4.6663	1.2203	-0.16	4.47	1.31	0.05581
Manning- Strickler	21.1	-0.167	0.667	0.5	8.29	0.357	0.156	4.6663	0.6083	-0.31	7.835	1.44	0.06231
Manning- Strickler	21.1	-0.167	0.667	0.5	0.34	0.004	0.1	4.6663	10.816	-0	11.15	1.52	0.0693
Manning- Strickler	21.1	-0.167	0.667	0.5	4.7	0.28	0.41	4.6663	0.9949	-0.2	5.147	1.18	0.09777
Manning- Strickler	13.29	-0.029	0.529	0.389	6	0.333	0.167	2.8762	0.5326	-0.29	5.649	1.31	0.06988
Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	6.19	0.333	0.167	2.8762	0.5185	-0.29	5.5	1.31	0.06804
Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	3.62	0.2	0.275	2.8762	0.8349	-0.16	3.058	1.2	0.05489
Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	8.29	0.357	0.156	2.8762	0.4002	-0.31	5.155	1.32	0.06117
Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	0.34	0.004	0.1	2.8762	6.9668	-0	7.18	1.39	0.06798
Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	4.7	0.28	0.41	2.8762	0.7059	-0.2	3.651	1.08	0.09631
Karim & Kenedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	6	0.333	0.167	3.7283	0.6652	-0.29	7.055	1.37	0.07057
Karim & Kenedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	6.19	0.333	0.167	3.7283	0.6476	-0.29	6.869	1.37	0.06871
Karim & Kenedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	3.62	0.2	0.275	3.7283	1.0234	-0.16	3.748	1.26	0.05538
Karim & Kenedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	8.29	0.357	0.156	3.7283	0.5009	-0.31	6.453	1.39	0.06178
Karim & Kenedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.34	0.004	0.1	3.7283	8.8203	-0	9.09	1.46	0.06868
Karim & Kenedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	4.7	0.28	0.41	3.7283	0.8485	-0.2	4.389	1.14	0.09709
Peterson & Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276	6	0.333	0.167	2.0831	0.4039	-0.29	4.284	1.23	0.06904
Peterson & Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276	6.19	0.333	0.167	2.0831	0.3933	-0.29	4.171	1.23	0.06722
Peterson & Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276	3.62	0.2	0.275	2.0831	0.6483	-0.16	2.374	1.13	0.05428
Peterson & Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276	8.29	0.357	0.156	2.0831	0.3028	-0.31	3.9	1.24	0.06043
Peterson & Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276	0.34	0.004	0.1	2.0831	5.196	-0	5.355	1.31	0.06711
Peterson & Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276	4.7	0.28	0.41	2.0831	0.5615	-0.2	2.905	1.02	0.09534
Farias & Pilan	4.78	0.026	0.499	0.213	6	0.333	0.167	2.589	0.4866	-0.29	5.162	1.28	0.06961
Farias & Pilan	4.78	0.026	0.499	0.213	6.19	0.333	0.167	2.589	0.4738	-0.29	5.026	1.28	0.06777
Farias & Pilan	4.78	0.026	0.499	0.213	3.62	0.2	0.275	2.589	0.7688	-0.16	2.816	1.18	0.05469
Farias & Pilan	4.78	0.026	0.499	0.213	8.29	0.357	0.156	2.589	0.3654	-0.31	4.707	1.3	0.06093
Farias & Pilan	4.78	0.026	0.499	0.213	0.34	0.004	0.1	2.589	6.3314	-0	6.525	1.36	0.06769
Farias & Pilan	4.78	0.026	0.499	0.213	4.7	0.28	0.41	2.589	0.6951	-0.2	3.389	1.06	0.09599

1 Tabla 3.7 Resultados de la aplicación del método generalizado para varias combinaciones de fórmulas de fricción y de velocidad crítica. En este caso se ha analizado una franja con tirante inicial de 0.0107m **1** [Datos: $Q=0.0675 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=5\text{m}$, $d=0.2540\text{mm}$, $h_m=0.03\text{m}$].

FORMULA Vc		a0	a1	a2	a3	b0	b1	b2	am	m0	m1	k0	k1	hs(m)
Manning- Strickler	Shamov	21.1	-0.167	0.667	0.5	6	0.333	0.167	4.6663	0.8062	-0.29	8.551	1.43	0.01309
Manning- Strickler	Dot- FHWA-HEC 18	21.1	-0.167	0.667	0.5	6.19	0.333	0.167	4.6663	0.785	-0.29	8.326	1.43	0.0127496
Manning- Strickler	Maza & Echavarria	21.1	-0.167	0.667	0.5	3.62	0.2	0.275	4.6663	1.2203	-0.16	4.47	1.31	0.0118518
Manning- Strickler	Levi	21.1	-0.167	0.667	0.5	8.29	0.357	0.156	4.6663	0.6083	-0.31	7.835	1.44	0.0112809
Manning- Strickler	Van Rijn	21.1	-0.167	0.667	0.5	0.34	0.004	0.1	4.6663	10.816	-0	11.15	1.52	0.0115021
Manning- Strickler	Lichtvan- Lebediev	21.1	-0.167	0.667	0.5	4.7	0.28	0.41	4.6663	0.9949	-0.2	5.147	1.18	0.0240832
Brownlie	Shamov	13.29	-0.029	0.529	0.389	6	0.333	0.167	2.8762	0.5326	-0.29	5.649	1.31	0.0147926
Brownlie	Dot- FHWA-HEC 18	13.29	-0.029	0.529	0.389	6.19	0.333	0.167	2.8762	0.5185	-0.29	5.5	1.31	0.0144026
Brownlie	Maza & Echavarria	13.29	-0.029	0.529	0.389	3.62	0.2	0.275	2.8762	0.8349	-0.16	3.058	1.2	0.0132509
Brownlie	Levi	13.29	-0.029	0.529	0.389	8.29	0.357	0.156	2.8762	0.4002	-0.31	5.155	1.32	0.0127583
Brownlie	Van Rijn	13.29	-0.029	0.529	0.389	0.34	0.004	0.1	2.8762	6.9668	-0	7.18	1.39	0.0130902
Brownlie	Lichtvan- Lebediev	13.29	-0.029	0.529	0.389	4.7	0.28	0.41	2.8762	0.7059	-0.2	3.651	1.08	0.0266401
Karim & Kenedy	Shamov	18.19	-0.103	0.603	0.497	6	0.333	0.167	3.7283	0.6652	-0.29	7.055	1.37	0.0138565
Karim & Kenedy	Dot- FHWA-HEC 18	18.19	-0.103	0.603	0.497	6.19	0.333	0.167	3.7283	0.6476	-0.29	6.869	1.37	0.0134912
Karim & Kenedy	Maza & Echavarria	18.19	-0.103	0.603	0.497	3.62	0.2	0.275	3.7283	1.0234	-0.16	3.748	1.26	0.0124813
Karim & Kenedy	Levi	18.19	-0.103	0.603	0.497	8.29	0.357	0.156	3.7283	0.5009	-0.31	6.453	1.39	0.0119435
Karim & Kenedy	Van Rijn	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.34	0.004	0.1	3.7283	8.8203	-0	9.09	1.46	0.0122131
Karim & Kenedy	Lichtvan- Lebediev	18.19	-0.103	0.603	0.497	4.7	0.28	0.41	3.7283	0.8485	-0.2	4.389	1.14	0.025237
Peterson & Peterson	Shamov	7.546	0.017	0.437	0.276	6	0.333	0.167	2.0831	0.4039	-0.29	4.284	1.23	0.016045
Peterson & Peterson	Dot- FHWA-HEC 18	7.546	0.017	0.437	0.276	6.19	0.333	0.167	2.0831	0.3933	-0.29	4.171	1.23	0.0156221
Peterson & Peterson	Maza & Echavarria	7.546	0.017	0.437	0.276	3.62	0.2	0.275	2.0831	0.6483	-0.16	2.374	1.13	0.0142742
Peterson & Peterson	Levi	7.546	0.017	0.437	0.276	8.29	0.357	0.156	2.0831	0.3028	-0.31	3.9	1.24	0.0138493
Peterson & Peterson	Van Rijn	7.546	0.017	0.437	0.276	0.34	0.004	0.1	2.0831	5.196	-0	5.355	1.31	0.014269
Peterson & Peterson	Lichtvan- Lebediev	7.546	0.017	0.437	0.276	4.7	0.28	0.41	2.0831	0.5615	-0.2	2.905	1.02	0.0284937
Farias & Pilan	Shamov	4.78	0.026	0.499	0.213	6	0.333	0.167	2.589	0.4866	-0.29	5.162	1.28	0.0151899
Farias & Pilan	Dot- FHWA-HEC 18	4.78	0.026	0.499	0.213	6.19	0.333	0.167	2.589	0.4738	-0.29	5.026	1.28	0.0147894
Farias & Pilan	Maza & Echavarria	4.78	0.026	0.499	0.213	3.62	0.2	0.275	2.589	0.7688	-0.16	2.816	1.18	0.0135763
Farias & Pilan	Levi	4.78	0.026	0.499	0.213	8.29	0.357	0.156	2.589	0.3654	-0.31	4.707	1.3	0.0131043
Farias & Pilan	Van Rijn	4.78	0.026	0.499	0.213	0.34	0.004	0.1	2.589	6.3314	-0	6.525	1.36	0.0134635
Farias & Pilan	Lichtvan- Lebediev	4.78	0.026	0.499	0.213	4.7	0.28	0.41	2.589	0.6551	-0.2	3.389	1.06	0.0272309

1 Tabla 3. 8 Resultados de la aplicación del método generalizado para varias combinaciones de fórmulas de fricción y de velocidad crítica. En este caso se ha analizado una franja con tirante inicial de 0.091m. Datos: $Q=0.0675 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=5\text{m}$, $d=0.2546\text{mm}$, $h_w=0.001\text{m}$.

FORMULA Vc		a0	a1	a2	a3	b0	b1	b2	am	m0	m1	k0	k1	hs(m)
Manning- Strickler	Shamov	21.1	-0.167	0.667	0.5	6	0.333	0.167	4.6663	0.8062	-0.29	8.551	1.43	0.00044
Dot- FHWA-HEC 18		21.1	-0.167	0.667	0.5	6.19	0.333	0.167	4.6663	0.785	-0.29	8.326	1.43	0.000432
Manning- Strickler	Maza & Echavarria	21.1	-0.167	0.667	0.5	3.62	0.2	0.275	4.6663	1.2203	-0.16	4.47	1.31	0.000534
Manning- Strickler	Levi	21.1	-0.167	0.667	0.5	8.29	0.357	0.156	4.6663	0.6083	-0.31	7.835	1.44	0.00037
Manning- Strickler	Van Rijn	21.1	-0.167	0.667	0.5	0.34	0.004	0.1	4.6663	10.816	-0	11.15	1.52	0.000317
Manning- Strickler	Lichtvan- Lebediev	21.1	-0.167	0.667	0.5	4.7	0.28	0.41	4.6663	0.9949	-0.2	5.147	1.18	0.001461
Shamov		13.29	-0.029	0.529	0.389	6	0.333	0.167	2.8762	0.5326	-0.29	5.649	1.31	0.000663
Dot- FHWA-HEC 18		13.29	-0.029	0.529	0.389	6.19	0.333	0.167	2.8762	0.5185	-0.29	5.5	1.31	0.000645
Maza & Echavarria		13.29	-0.029	0.529	0.389	3.62	0.2	0.275	2.8762	0.8349	-0.16	3.058	1.2	0.000772
Levi		13.29	-0.029	0.529	0.389	8.29	0.357	0.156	2.8762	0.4002	-0.31	5.155	1.32	0.000555
Van Rijn		13.29	-0.029	0.529	0.389	0.34	0.004	0.1	2.8762	6.9668	-0	7.18	1.39	0.000485
Lichtvan- Lebediev		13.29	-0.029	0.529	0.389	4.7	0.28	0.41	2.8762	0.7059	-0.2	3.651	1.08	0.002038
Shamov		18.19	-0.103	0.603	0.497	6	0.333	0.167	3.7283	0.6652	-0.29	7.055	1.37	0.000534
Dot- FHWA-HEC 18		18.19	-0.103	0.603	0.497	6.19	0.333	0.167	3.7283	0.6476	-0.29	6.869	1.37	0.00052
Maza & Echavarria		18.19	-0.103	0.603	0.497	3.62	0.2	0.275	3.7283	1.0234	-0.16	3.748	1.26	0.000634
Levi		18.19	-0.103	0.603	0.497	8.29	0.357	0.156	3.7283	0.5009	-0.31	6.453	1.39	0.000446
Van Rijn		18.19	-0.103	0.603	0.497	0.34	0.004	0.1	3.7283	8.8203	-0	9.09	1.46	0.000386
Lichtvan- Lebediev		18.19	-0.103	0.603	0.497	4.7	0.28	0.41	3.7283	0.8485	-0.2	4.389	1.14	0.001705
Shamov		7.546	0.017	0.437	0.276	6	0.333	0.167	2.0831	0.4039	-0.29	4.284	1.23	0.000867
Dot- FHWA-HEC 18		7.546	0.017	0.437	0.276	6.19	0.333	0.167	2.0831	0.3933	-0.29	4.171	1.23	0.000844
Maza & Echavarria		7.546	0.017	0.437	0.276	3.62	0.2	0.275	2.0831	0.6483	-0.16	2.374	1.13	0.000987
Levi		7.546	0.017	0.437	0.276	8.29	0.357	0.156	2.0831	0.3028	-0.31	3.9	1.24	0.000727
Van Rijn		7.546	0.017	0.437	0.276	0.34	0.004	0.1	2.0831	5.196	-0	5.355	1.31	0.000645
Lichtvan- Lebediev		7.546	0.017	0.437	0.276	4.7	0.28	0.41	2.0831	0.5615	-0.2	2.905	1.02	0.002545
Shamov		4.78	0.026	0.499	0.213	6	0.333	0.167	2.589	0.4866	-0.29	5.162	1.28	0.000723
Dot- FHWA-HEC 18		4.78	0.026	0.499	0.213	6.19	0.333	0.167	2.589	0.4738	-0.29	5.026	1.28	0.000704
Maza & Echavarria		4.78	0.026	0.499	0.213	3.62	0.2	0.275	2.589	0.7688	-0.16	2.816	1.18	0.000837
Levi		4.78	0.026	0.499	0.213	8.29	0.357	0.156	2.589	0.3654	-0.31	4.707	1.3	0.000606
Van Rijn		4.78	0.026	0.499	0.213	0.34	0.004	0.1	2.589	6.3314	-0	6.525	1.36	0.000533
Lichtvan- Lebediev		4.78	0.026	0.499	0.213	4.7	0.28	0.41	2.589	0.6551	-0.2	3.389	1.06	0.002191

En base a la Tabla 2.2 que marca la erosión observada de las mediciones realizadas, se comparó la erosión máxima observada contra la erosión máxima estimada (hs) en la franja de la sección transversal donde ocurrió esta erosión (tabla 3.6). Se tomó como base este punto, debido a que la erosión máxima observada sería el peor escenario posible que ocurriría en un fenómeno de erosión, lo que hace conveniente realizar las comparaciones tomando a esta como referencia. Bajo esta perspectiva se presentan en la Tabla 3.9 la comparación de erosiones observadas y estimadas.

Tabla 3.9 Comparativa de erosión observada vs erosión estimada

FORMULA Vc	Fórmula Ue	hs(m)	hobs(m)	ERROR ABS	ERROR %
Manning- Strickler	Shamov	0.07117	0.0567	0.01447	25.5202822
Manning- Strickler	Dot- FHWA-HEC 18	0.06929	0.0567	0.01259	22.2045855
Manning- Strickler	Maza & Echavarria	0.05581	0.0567	0.00089	1.5696649
Manning- Strickler	Levi	0.06231	0.0567	0.00561	9.89417989
Manning- Strickler	Van Rijn	0.0693	0.0567	0.0126	22.2222222
Manning- Strickler	Lischtván- Lebediev	0.09777	0.0567	0.04107	72.4338624
Brownlie	Shamov	0.06988	0.0567	0.01318	23.2451499
Brownlie	Dot- FHWA-HEC 18	0.06804	0.0567	0.01134	20
Brownlie	Maza & Echavarria	0.05489	0.0567	0.00181	3.19223986
Brownlie	Levi	0.06117	0.0567	0.00447	7.88359788
Brownlie	Van Rijn	0.06798	0.0567	0.01128	19.8941799
Brownlie	Lischtván- Lebediev	0.09631	0.0567	0.03961	69.8589065
Karim & Kenedy	Shamov	0.07057	0.0567	0.01387	24.4620811
Karim & Kenedy	Dot- FHWA-HEC 18	0.06871	0.0567	0.01201	21.1816578
Karim & Kenedy	Maza & Echavarria	0.05538	0.0567	0.00132	2.32804233
Karim & Kenedy	Levi	0.06178	0.0567	0.00508	8.95943563
Karim & Kenedy	Van Rijn	0.06868	0.0567	0.01198	21.1287478
Karim & Kenedy	Lischtván- Lebediev	0.09709	0.0567	0.04039	71.2345679
Peterson & Peterson	Shamov	0.06904	0.0567	0.01234	21.7636684
Peterson & Peterson	Dot- FHWA-HEC 18	0.06722	0.0567	0.01052	18.5537919
Peterson & Peterson	Maza & Echavarria	0.05428	0.0567	0.00242	4.2680776
Peterson & Peterson	Levi	0.06043	0.0567	0.00373	6.57848325
Peterson & Peterson	Van Rijn	0.06711	0.0567	0.01041	18.3597884
Peterson & Peterson	Lischtván- Lebediev	0.09534	0.0567	0.03864	68.1481481
Farias & Pilán	Shamov	0.06961	0.0567	0.01291	22.7689594
Farias & Pilán	Dot- FHWA-HEC 18	0.06777	0.0567	0.01107	19.5238095
Farias & Pilán	Maza & Echavarria	0.05469	0.0567	0.00201	3.54497354
Farias & Pilán	Levi	0.06093	0.0567	0.00423	7.46031746
Farias & Pilán	Van Rijn	0.06769	0.0567	0.01099	19.382716
Farias & Pilán	Lischtván- Lebediev	0.09599	0.0567	0.03929	69.2945326

Las combinaciones enmarcadas de color en la tabla 3.9, que obedecen a un porcentaje de error menor al 5%, prediciendo como mayor exactitud el fenómeno de estudio. Esto se hace más evidente en la Figura. 3.2. sobre la cual se plasma una gráfica comparativa entre el perfil observado contra los perfiles de erosión resultantes del grupo de combinaciones aplicadas con Maza A.- Echavarría, encontrando pocas diferencias entre cada una de estas.

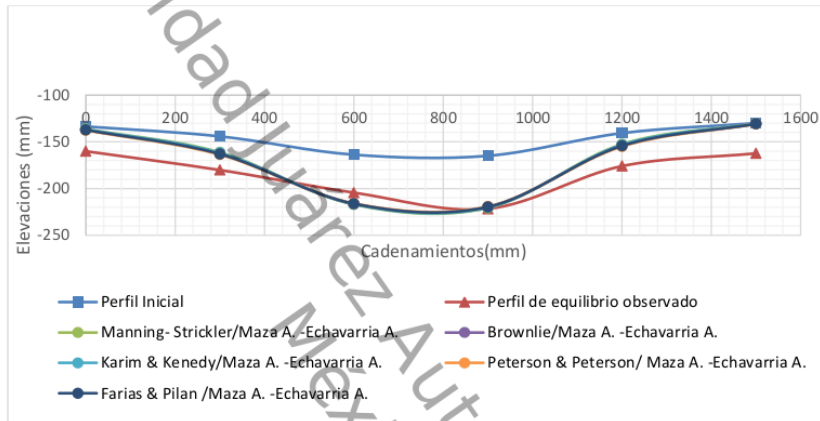


Figura 3.2 Comparación del perfil observado después de la erosión con los perfiles calculado numéricamente.

De igual manera, es posible deducir que el comportamiento en particular de este grupo de combinaciones actúa prediciendo muy bien los procesos que ocurren al centro del cauce, sin embargo estas predicciones se quedan muy cortas al predecir los procesos de erosión que suceden a las orillas del cauce. No obstante, al analizar nuevamente la Tabla 2.2, encontramos que para el grupo de combinaciones relacionadas con Lischtván- Lebediev , arrojan errores disparados en comparación a la erosión observada al centro del cauce , por otro lado al graficar los perfiles que este grupo forman, comparándolos contra el grupo de Maza & Echavarría , se nota que mantienen una buena predicción de la erosión sobre las orillas del cauce, Figura 3.3.

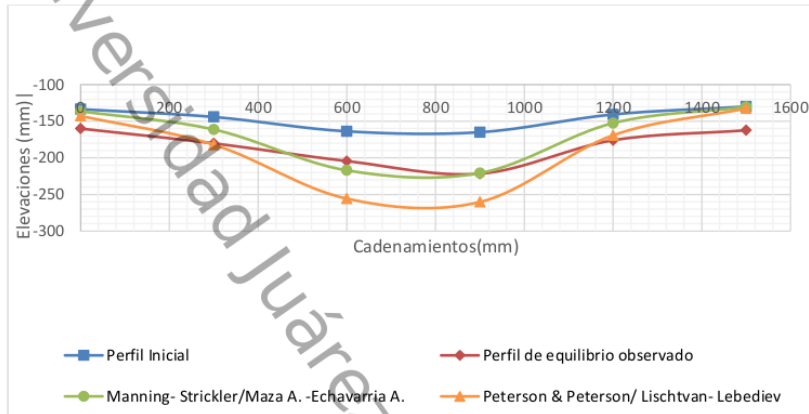


Figura 3.3 Comparación del perfil observado después de la erosión con los perfiles calculado numéricamente.

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se exploró el uso del criterio generalizado para la estimación de la erosión, la bondad que mostró en su uso en este tipo de fenómenos experimentales, fue de muy buena respuesta. Ya que de las combinaciones de ecuaciones utilizadas en este método se encontró que las que mejores predicen la erosión máxima son aquellas que se combinan con la Ecuación de Maza A. – Echavarría A, y la más desfavorable fueron las resultantes en combinación con la ecuación de Lischtván- Lebediev, que en su contraparte estas presentan buenas predicciones de erosión a las orillas del cauce, de acuerdo a los datos obtenidos.

La literatura señala que para estos estudios, se había encontrado que los mejores resultados en cuanto a la obtención de la erosión máxima, se hallaban utilizando la combinación de Lischtván- Lebediev, a pesar de ello en este trabajo se encontró una mejor respuesta ante este fenómeno utilizando el grupo de combinaciones con Maza & Echavarría, suponiendo de alguna manera que esto esté relacionado con el hecho que esta ecuación se halla desarrollado con Ríos Mexicanos.

Es importante mencionar que para un trabajo de este tipo se debe iniciar con la caracterización del material – para tener certeza en los resultados y así evitar datos estándares, y por otro lado en caso de no contar con datos medidos es muy importante explorar los rangos de aplicación de cada ecuación, sin embargo si se cuenta con características similares a nuestro caso recomendamos el uso de la ecuación Maza & Echeverría.

Por último sería interesante, extender este trabajo evaluando la posibilidad de modificar los coeficientes experimentales para cada Ecuación que se utilizó en esta investigación, recomendado efectuar un número suficiente de pruebas y con escenarios de condiciones físicas distintas pero controlables en el laboratorio, que nos permita desarrollar un análisis estadístico de sensibilidad para cada combinación posible entre la ecuaciones y lograr proponer modificaciones a estas, de tal manera que a futuro estas puedan ecuaciones generalizadas sirvan de base para estudios en campo en Ríos Mexicanos.



REFERENCIAS

- Carson, M. A., and Griffith, G. S. "Bed load transport in gravel channels." *J. Hydrol.*, 26-1, 1987
- Chang, H. H. "Selection of gravel-transport formula for stream modeling." *J. Hydraul. Eng.*, 120-5, 646-651. 1994
- Di Silvio G, Basile P.A., Marion A and Peviani M. "Overgradation and flooding in Mountain Basins: Prevention and Control", XXV Congress IAHR, Tokyo, Japan Pp 493-500, 1993
- Echávez Aldape G. "Introducción a los modelos Hidráulicos de Fondo Fijo y a la Ingeniería Experimental, UNAM, 1996. Pp. 155
- Farías, H. D. y Pilán, M. T. (2000). "Análisis de Fórmulas de Fricción Aplicables a Canales Arenosos en Régimen". XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina. Tomo I, pp. 511-520.
- Farías, H.D., Pilán, M.T., Pece, F.J., Olmos, L.A. (2003) "Erosión General en ríos con lechos arenosos", primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Buenos Aires, noviembre 2003.
- García-Flores M & Maza-Alvarez J.A (1999), *Manual de Ingeniería de Ríos*, Capítulo 8. Inicio de Movimiento y Acorazamiento, México.
- Gomez, B., and Church, M. "Assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers." *Water Resour. Res.*, 25-6, 1161-1186 1989.
- Habersack Helmut M and Laronne Jonathan B. "Evaluation and improvement of bed load discharge formulas based on Helley-Smith sampling in an Alpine Gravel Bed River", *Journal of Hydraulics Engineering*, Pp 484-499. May 2002.
- Johnson, J. W. "Discussion of laboratory investigation of flume traction and transportation." Y. L. Chang, *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 104, 1247-1313. 1939
- Lopes, V. L., Osterkamp, W. R., and Bravo-Espinoasa, M. "Evaluation of selected bed load equations under transport-and supply-limited conditions." *Proc., 7th Int. Agency Sedimentation Conf., Reno, Nev., 1192-1197. 2001.*



Mahmood, K. "Verification of sediment transport functions—Missouri River." *Missouri River iv. sediment Ser. Rep. No. 19*, U.S.Army Corps of Engineers, Omaha, Neb. 1980

Przedwojski, B., Blazejewski, R., Pilarczyk, K.W. (1995). *River Training Techniques: Fundamentals, techniques and applications*. A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.

Raven PJ, Holmes NTH, Vaughan IP, Dawson FH, Scarlett P. 2010. *Benchmarking Habitat Quality: Observations Using River Habitat Survey on Near- Natural Streams and Rivers in Northern and Western Europe*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 20: S13 – S30.

Rivera-Trejo, Fabian , Soto-Cortés, Gabriel and Méndez-Antonio, Baldemar, "The 2007 flood in Tabasco, Mexico: an integral analysis of a devastating phenomenon", *International Journal of River Basin Management*, First published on: 15 September 2010.

S. Abdel-Fattah¹; A. Amin²; and L. C. Van Rijn³, "Sand Transport in Nile River, Egypt" *JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING* © ASCE / JUNE 2004

Shulits, S., and Hill, R. D. "Bed load formulas." *Rep. No. ARSSCW-1*, Agricultural Research Services, SDA, Washington, D.C. 1968

U.S. Department of Transportation (1993). *Evaluating Scour at Bridges*. Hydraulic Engineering Circular No. 18, report FHWA-IP-90-017, Federal Highway Administration. Washington, DC, USA.

Vanoni, V. A., Brooks, N. H., and Kennedy, J. F. "Sediment transportation and channel stability." *Rep. No. KH-R-1*, W. M. Keck Hydraulics and Water Resources Laboratory, Calif. Inst. Technol., Pasadena, Calif. (1961).

Vergara Sánchez M. (1993), *Técnicas de modelación en hidráulica*, Ed. Alfa Y Omega. Pp. 297.

White, W. and Day, T. "Transport of graded gravel bed materials, Gravel-Bed Rivers" Ed. Bathurst and Thorne, John Wiley and Sons. NY. Pp. 181-213, 1982

Zanke, U. "Comparison of bed load transport formulas", *Univ. Hannover*, 64, 327-364



ANALISIS DEL CRITERIO GENERALIZADO DE ESTIMACION DE EROSION APLICADO EN UN CANAL DE LABORATORIO

ORIGINALITY REPORT

18%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	irh-fce.unse.edu.ar Internet	1904 words — 14%
2	transparencia.tabasco.gob.mx Internet	192 words — 1%
3	www.gob.mx Internet	192 words — 1%
4	www.scribd.com Internet	59 words — < 1%
5	watermark.silverchair.com Internet	27 words — < 1%
6	documents.mx Internet	20 words — < 1%

EXCLUDE QUOTES ON
EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON

EXCLUDE SOURCES OFF
EXCLUDE MATCHES < 20 WORDS