

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning
utilizando diferentes materiales como fondo en un
canal hidráulico con pendiente variable utilizando
diversos métodos**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autores:

Bryan Daniel Ramos Quiliche
Armando Richard Llori Santiago

Asesor:

Ing. Ferrer Canaza Rojas

Lima, marzo del 2025

DECLARACION JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Yo, **Ferrer Canaza Rojas**, docente de la Facultad de **Ingeniería y Arquitectura** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Civil**, de la Universidad Peruana Unión.

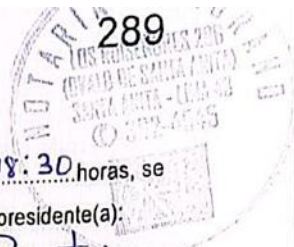
DECLARO:

Que la presente investigación titulada: “**Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning utilizando diferentes materiales como fondo en un canal hidráulico con pendiente variable utilizando diversos métodos**” de los autores **Bryan Daniel Ramos Quiliche** y **Armando Richard Llori Santiago** tiene un índice de similitud de 7% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima a los 12 días del mes de marzo del año 2024.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ferrer Canaza Rojas', with a circular mark around the first part of the name.

Ing. Ferrer Canaza Rojas



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Naña, Villa Unión, a 11 día(s) del mes de marzo del año 2025 siendo las 08:30 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Lima, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Mtra. Fiorella Maira Zapata Antesana el (la) secretario(a): Mg. Juana Beatriz

Aquise Pari y los demás miembros: Mg. Leonel Chahuares

Paucar y el (la) asesor(a) Ing. Ferrer Canaza

Rojas con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: "Determinación del coeficiente de rugosidad de Mannin utilizando diferentes materiales como fondo en un canal hidráulico con pendiente variable utilizando diversos métodos"

del(los) bachiller(es): a) Armando Richard Llori Santiago b) Bryan Daniel Ramos Quiliche c)

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Civil (Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Armando Richard Llori Santiago

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	14	C	Aceptable	Bueno

Bachiller (b): Bryan Daniel Ramos Quiliche

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	15	B-	Bueno	Muy bueno

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente/a

Secretario/a

Asesor/a

Miembro

Miembro

Bachiller (a)

Bachiller (b)

Bachiller (c)

Esta sustentación fue realizada de manera virtual u online sincrónica según conforme al Reglamento General de Grados y Títulos.

INDICE

1. Introducción	7
2. Metodología de estudio	9
3. Método analítico estadístico de la Media	15
4. Resultados	15
4.1 Toma de datos para tirante en canal hidráulico de pendiente variable	15
4.2 Rugosidad de materiales en el canal hidráulico de pendiente variable	17
4.3 Rugosidad de materiales con Cowan, Raudkivi, Simons y Senturk, Petter y Muller	19
4.3.1 Tamizado de material granular	19
4.3.2 Resultados de ecuaciones semiempíricas	20
5. Discusión.....	21
6. Análisis de sensibilidad.....	24
7. Limitaciones del estudio.....	25
8. Recomendaciones.....	26
9. Conclusiones	26
10. Referencias bibliográficas	28
11. ANEXO.....	29
11.1 ANEXO A: Evidencia de presentación a revista indexada	29
11.2 ANEXO B: Tablas de datos	29
11.3 ANEXO C: Evidencia de ensayos realizados.....	31

Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning utilizando diferentes materiales como fondo en un canal hidráulico con pendiente variable utilizando diversos métodos.

Determination of the Manning roughness coefficient using different materials as bottom in a hydraulic channel with variable slope using various methods.

Bryan Daniel Ramos Quiliche

<https://orcid.org/0000-0002-8752-2818>

Armando Richard Llori Santiago

<https://orcid.org/0009-0007-3684-5100>

Ferrer Canaza Rojas

<https://orcid.org/0000-0003-3952-0962>

Resumen:

En el presente estudio se determinó el coeficiente de rugosidad de Manning para materiales de fondo (piedra chancada, canto rodado, grass sintético y metal) en un canal hidráulico de laboratorio, y compararlo con valores obtenidos mediante fórmulas semiempíricas. Para ello, se realizaron pruebas experimentales en un canal de 10 metros de largo con tres pendientes y tres caudales diferentes. Para cada material, se registraron los tirantes de agua en 5 puntos y se calculó el coeficiente. Además, se emplearon las ecuaciones de Cowan, Raudkivi, Simons y Senturk, y Meyer y Muller para obtener valores semiempíricas y compararlos con los experimentales. Los coeficientes de rugosidad experimentales variaron de 0.0074 (metal) a 0.013 (canto rodado). Estos valores fueron inferiores a los obtenidos mediante fórmulas semiempíricas, que oscilaron entre 0.038 y 0.073. Las diferencias se atribuyen al acabado de los materiales y las condiciones del experimento. Se comprobó que las propiedades de los materiales, el método de fijación determinado por el canal usado y las condiciones del flujo influyen en el coeficiente de rugosidad. Se resalta la influencia de ajustar los valores de rugosidad a las condiciones específicas de proyectos hidráulicos y denota la necesidad de estudios semejantes en condiciones naturales.

Palabras clave:

Coeficiente de rugosidad; ecuación de Manning; canal de laboratorio.

Abstract:

In the present study, the Manning roughness coefficient was determined for bed materials (crushed stone, boulder, synthetic grass and metal) in a laboratory hydraulic channel, and compared it with values obtained through semi-empirical formulas. To do this, experimental tests were carried out in a 10 meter long canal with three slopes and three different flow rates. For each material, the water depths were recorded at 5 points and the coefficient was calculated. In addition, the equations of Cowan, Raudkivi, Simons and Senturk, and Meyer and Muller were used to obtain semi-empirical values and compare them with the experimental ones. Experimental roughness coefficients ranged from 0.0074 (metal) to 0.013 (pebble). These values were lower than those obtained through semi-empirical formulas, which ranged between 0.038 and 0.073. The differences are attributed to the finish of the materials and the conditions of the

experiment. It was found that the properties of the materials, the fixing method determined by the channel used and the flow conditions influence the roughness coefficient. The influence of adjusting roughness values to the specific conditions of hydraulic projects is highlighted and denotes the need for similar studies in natural conditions.

Keywords:

Roughness coefficient; Manning equation; laboratory channel.

1. Introducción

El coeficiente de rugosidad de Manning es un parámetro imprescindible en el diseño de canales hidráulicos. El coeficiente permite estimar la resistencia al flujo de agua en función de las características de los materiales y las condiciones del canal. Este coeficiente, desarrollado por Robert Manning durante el siglo XIX, continúa siendo ampliamente usado en la rama de ingeniería hidráulica para canales abiertos y cerrados. Sin embargo, determinar con exactitud el valor del coeficiente de rugosidad presenta dificultades significativas, especialmente en canales artificiales donde las condiciones difieren de los cauces naturales para los cuales se desarrollaron muchas de las fórmulas semiempíricas.

Se han realizado diferentes estudios sobre como estimar el coeficiente de rugosidad de Manning en la hidráulica. De esta manera (Burnham & Davis, 1990) presento un estudio en donde el valor del coeficiente de rugosidad varía por decisión del proyectista, ya que no existe una data base de cada material. Esta decisión depende de la experiencia de este, conllevando a un rango amplio. En este estudio "Effects of data errors on computed steady-flowprofiles" se realiza una encuesta a ochenta profesionales de la rama hidráulica, donde se les pidió asignar un valor de "n" a 10 diferentes tramos. Los resultados mostraron dos grupos de respuestas: el primero con valores entre 0.01 y 0.02, el segundo entre 0.02 y 0.03.

En la investigación "Validación del coeficiente de rugosidad de Manning en un canal a flujo libre bajo condición de flujo uniforme" se realizó un estudio en un canal revestido.

Se emplearon mediciones en un tramo de 10.5 m bajo condiciones de flujo uniforme, utilizando el modelo hidráulico HEC-RAS. Para las mediciones de velocidad y caudal, se utilizó un molinete OTT y se registraron diez estaciones separadas por 1.5 m. Los coeficientes de rugosidad de Manning y Bazin fueron determinados a partir de ecuaciones de flujo uniforme y comparados con valores reportados en la literatura. Obtuvo como resultado un coeficiente promedio de rugosidad de Manning obtenido fue de 0.0436, superior a los valores típicos para canales nuevos con revestimientos similares (0.013-0.02). La investigación resalta la importancia de ajustar los valores asumidos para considerar condiciones reales de operación. Así mismo, el modelo HEC-RAS nos permite recrear y ratificar la respuesta del flujo en condiciones específicas, definiendo un marco metodológico para estudios similares.

Así también, Calero & Calero (2019), realizó una investigación que se desarrolló en el canal hidráulico CA-FIIC-2017 del Laboratorio de Hidráulica. Con un metodología teórica y experimental. Se utilizaron modelos estadísticos de regresión para correlacionar el coeficiente de Manning (" n "), con el tirante (Y) y caudal (Q) como variables hidrodinámicas. Los datos experimentales, se componen de 600 registros validados, que fueron analizados bajo regímenes de flujo subcrítico-turbulento. Además, se implementaron modelos adimensionales para ajustar la relación entre " n " y los parámetros del flujo. Se concluyó que el coeficiente de Manning no es constante y no depende solo del material del canal, sino que el valor está en función tanto del material como las características dinámicas del flujo, lo que demuestra la importancia de metodologías que integren estos factores. La investigación ofrece un marco analítico y experimental para la determinación del coeficiente " n " de Manning teniendo en cuenta las variables hidrodinámicas del flujo. Además, presenta el concepto de coeficientes de ajuste (Kn) como herramienta para mejorar la precisión en el diseño hidráulico, con repercusiones positivas técnicas y económicas para proyectos de infraestructura hidráulica.

Dentro de este marco, esta investigación se planteó determinar experimentalmente el coeficiente de rugosidad de Manning para cuatro materiales (piedra chancada, canto rodado, grass sintético y metal) empleando un canal hidráulico de laboratorio con

pendiente variable. Los resultados obtenidos mediante el canal hidráulico se compararon con valores calculados mediante fórmulas semiempíricas y con valores teóricos de la literatura, con el objetivo de analizar la variación de los valores y su aplicación en diseños de infraestructura hidráulica.

2. Metodología de estudio

En esta investigación, se utilizó un canal de pendiente variable en laboratorio, con las siguientes características: una longitud de 10 metros, un ancho de 0.20 metros y una altura de 0.34 metros. Las paredes son de vidrio y la base del canal este hecho de metal. Se realizaron los ensayos con tres pendientes: 0° , 0.5° y 1° , como se muestra en la Figura 1. Se determino el coeficiente de rugosidad de cuatro materiales: piedra chancada, canto rodado, metal y grass sintético.

Para los materiales de piedra chancada y canto rodado, se halló la curva granulométrica a través del experimento de tamizado. Esta valoración es importante para calcular con exactitud la rugosidad, ya que el tamaño de las partículas de estos materiales puede influir en el coeficiente de rugosidad "n". Es importante recalcar que, en este experimento, no se definieron los valores de los flujos y las pendientes con anterioridad, sino que se llevaron a cabo mediciones para diferentes condiciones de flujo. Pese a eso, se consideró que el resultado de la rugosidad no sería afectado por otras variables que no sean el material, ya que los otros aspectos del canal permanecieron constantes.



Figura 1 Canal hidráulico de pendiente variable (Fuente: Elaboración propia)

Los materiales fueron acondicionados de forma precisa en la base del canal antes de cada ensayo. Para el caso de la piedra chancada y el canto rodado, estos fueron fijados sobre una base de microporoso de 1.50 metros, utilizando silicona, con el objetivo que las partículas no se desplazaran con el flujo de agua. Por otra parte, el grass sintético se fijó sobre una base de madera de la misma longitud, con un revestimiento de aproximadamente 5 cm de grosor, lo que permitió que el material no tuviera ni el más mínimo desplazamiento.



Figura 2 Adaptación de materiales en base de microporoso para el canal (Fuente: Elaboración propia)

Para obtener una mejor precisión de las medidas del tirante de agua, se decidió elegir cinco puntos de referencia distribuidos de forma homogénea en la base del canal, como se muestra en la Figura 2. Esto permitió obtener datos representativos del comportamiento del flujo en diferentes secciones del canal.

Dado que el canal cuenta con pernos de sujeción, esto permitió que los materiales estuvieran adecuadamente sujetos, impidiendo el desplazamiento no deseado o el despegue de los materiales durante los ensayos. Esta característica de la base fue de gran importancia para mantener condiciones estables en cada ensayo y garantizar la validez de los resultados.

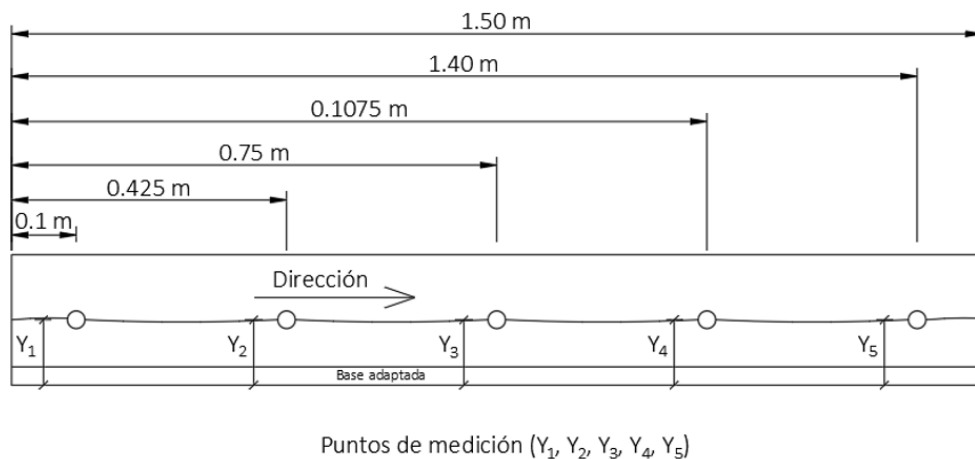


Figura 3 Puntos de medida para los tirantes (Fuente: Elaboración propia)

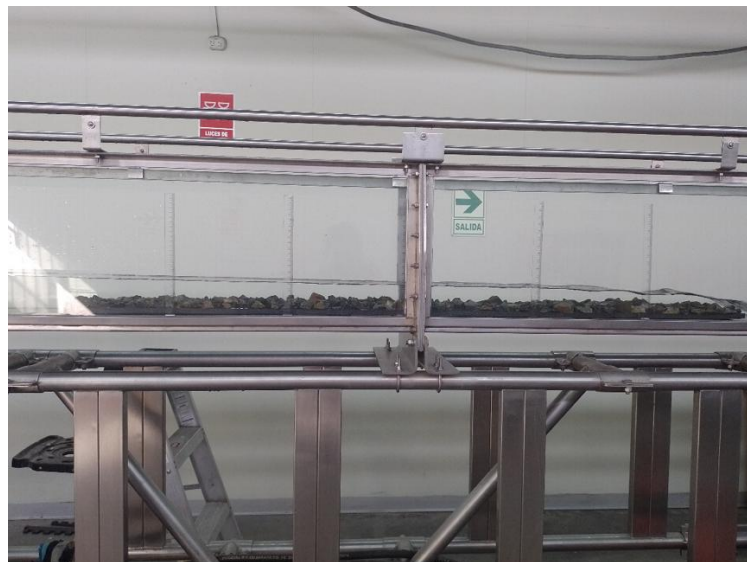


Figura 4 Puntos de medida para los tirantes en el canal (Fuente: Elaboración propia)

Los materiales fueron evaluados bajo tres caudales de distinta magnitud y tres pendientes (0° , 0.5° y 1°), lo que dio un resultado de 9 ensayos por cada material. En total, se realizaron 36 ensayos, distribuidos entre los cuatro materiales (piedra chancada, canto rodado, metal y grass sintético), lo que permitió analizar el comportamiento de los materiales bajo diferentes condiciones de flujo.

Para determinar el coeficiente de rugosidad, se utilizó la ecuación de Manning, que es ampliamente empleada en el cálculo de flujos en canales abiertos. En este estudio, el coeficiente de rugosidad n fue despejado de la ecuación, ya que era la única variable de interés, y el resto de las variables (como el área de flujo, el radio

hidráulico y la pendiente) fueron determinadas a partir de las características físicas del canal y los caudales medidos.

$$n = \frac{1}{V} * \left(\frac{b * y}{b + 2y} \right)^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \dots \text{Ecuación 1}$$

Donde:

n : coeficiente de rugosidad de Manning

V : velocidad (m/s)

b : base del canal (m)

y : tirante (m)

S : pendiente

Para obtener el coeficiente rugosidad del material se usó el promedio aritmético de los 9 coeficientes de rugosidad obtenidos. Dando como resultado una tabla de rugosidades – materiales. (Ver tabla 1, tabla 2, tabla 3 y tabla 4).

Posteriormente se calculó la rugosidad por los métodos de Cowan, de Raudkivi, de Simons y Senturk, Meyer-Peter y Muller.

Método de Cowan:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5 \dots \text{Ecuación 2}$$

Donde, los valores de n_0 , n_1 , n_2 , n_3 , n_4 y m_5 están en función del perímetro, irregularidades, variación de la sección transversal, efecto de las obstrucciones, vegetación y meandros.

Método de Raudkivi:

$$n = 0.0411 * d_{65}^{\frac{1}{6}} \dots \text{Ecuación 3}$$

Método de Simons y Senturk:

$$n = 0.065 * d_{50}^{\frac{1}{6}} \dots \text{Ecuación 4}$$

Método de Meyer-Peter y Muller:

$$n = 0.0380 * d_{90}^{\frac{1}{6}} \dots \text{Ecuación 5}$$

Donde, d_{50} , d_{65} y d_{90} es el diámetro (m) del material del lecho, tal que el 50%, 65% y 90% en peso es menor.

Estas fórmulas semiempíricas toman en cuenta las características del tramo en estudio y diámetro del material, el cual depende del autor.

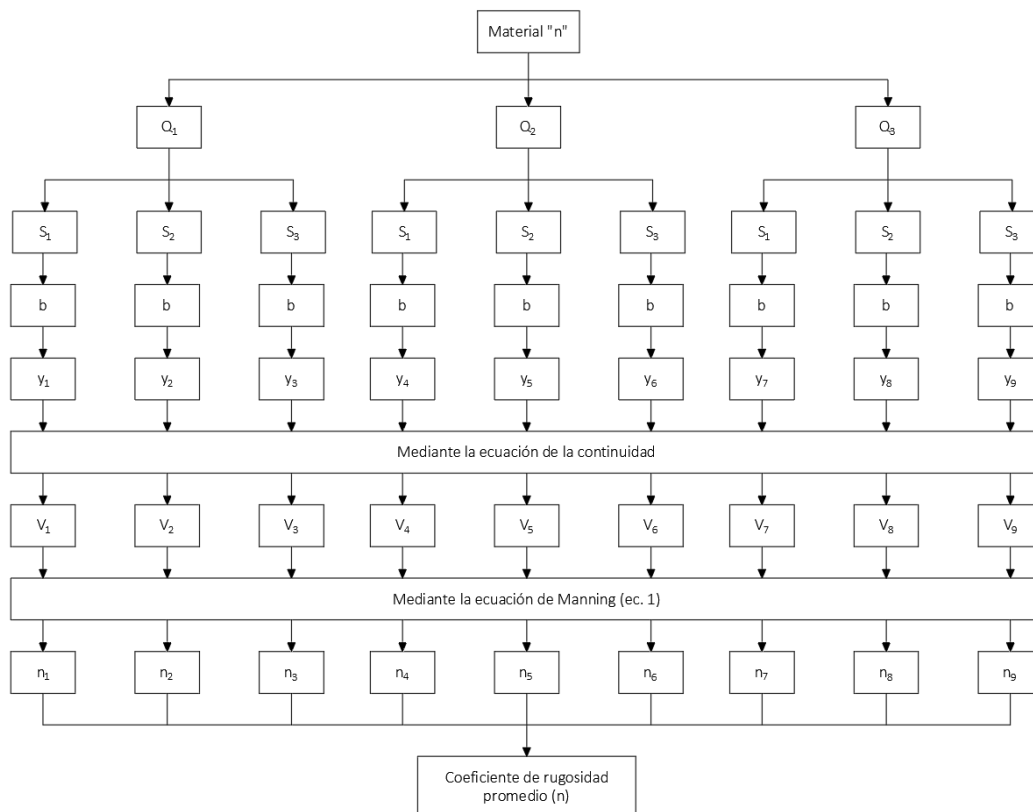


Figura 5 Procedimiento de cálculo de la rugosidad de un material en laboratorio (Fuente: Elaboración propia)

3. Método analítico estadístico de la Media

El método estadístico descriptivo de la media es esencial en estudios de investigación, ya que facilita obtener un número significativo promedio de un conjunto de datos para su interpretación y comparación. Al obtener la media, se toma en cuenta cada detalle dentro del conjunto, obteniendo una medida que refleja la conducta nuclear de los datos. Esta perspectiva es eficiente en investigaciones donde se desea reducir grandes cantidades de información, para una mejor comprensión.

Sumado a eso, la media favorece la detección de patrones y tendencias generales, lo que la vuelve en una alternativa ideal para establecer principios comparativos entre conjuntos o variables. La ventaja sobre otras evaluaciones de tendencia central, como la mediana o la moda, se basa en el poder para cubrir todos los datos, dando una visión más amplia de las peculiaridades del fenómeno examinado. No obstante, es importante recalcar que la media puede verse afectada por valores extremos, lo que resalta la importancia de complementarla con otras medidas como la desviación estándar para un análisis más consistente. En consecuencia, la aplicación de la media en análisis descriptivos propone una elección evidente y aceptada en investigaciones de tesis con el objetivo de comprender el comportamiento total de una variable en análisis.

4. Resultados

4.1 Toma de datos para tirante en canal hidráulico de pendiente variable

Se llevaron a cabo mediciones del tirante de agua en los cinco puntos de referencia determinados, como se ilustra en la Figura 3. Sin embargo, se notó que en el punto Y5, para los materiales de canto rodado, piedra chancada y grass sintético, los valores del tirante mostraron una disminución significativa del valor, tal como se muestra en las Figuras 6 a 8, y en el Anexo 1. Esta disminución del tirante se debe a una modificación en la realidad de la base en esa área determinada del canal.

Es crucial destacar que, en los otros cuatro puntos de medición, el flujo se mantuvo constante, lo que indica que la irregularidad detectada en el punto Y5 no es útil para la conducta global del flujo. Así pues, este valor se encuentra fuera del límite previsto y se descartó en la determinación del promedio de los tirantes.

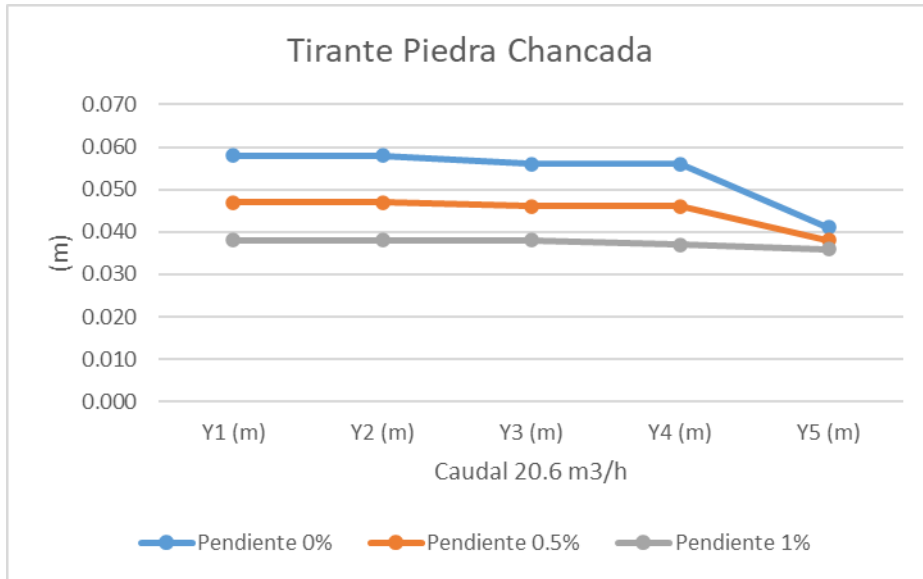


Figura 6 Mediciones de tirantes para Piedra Chancada (Fuente: Elaboración propia)

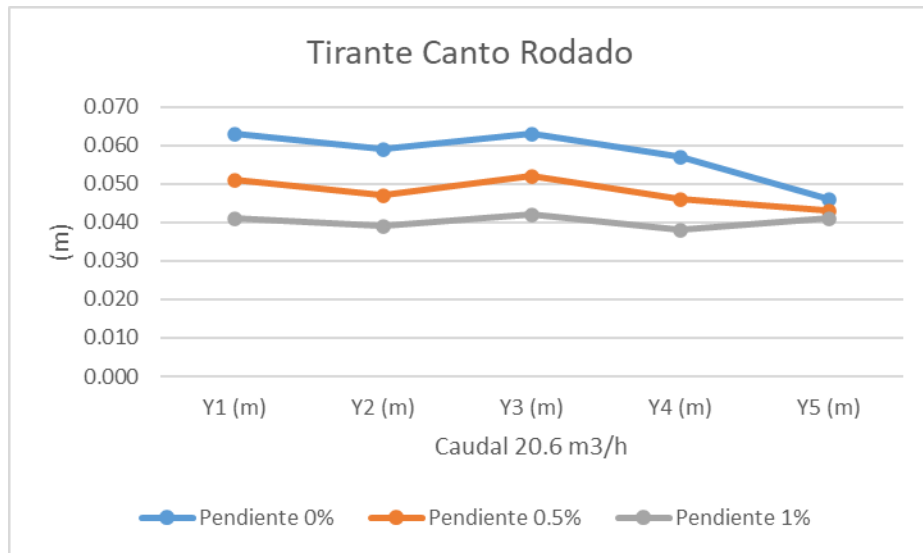


Figura 7 Mediciones de tirantes para canto rodado (Fuente: Elaboración propia)

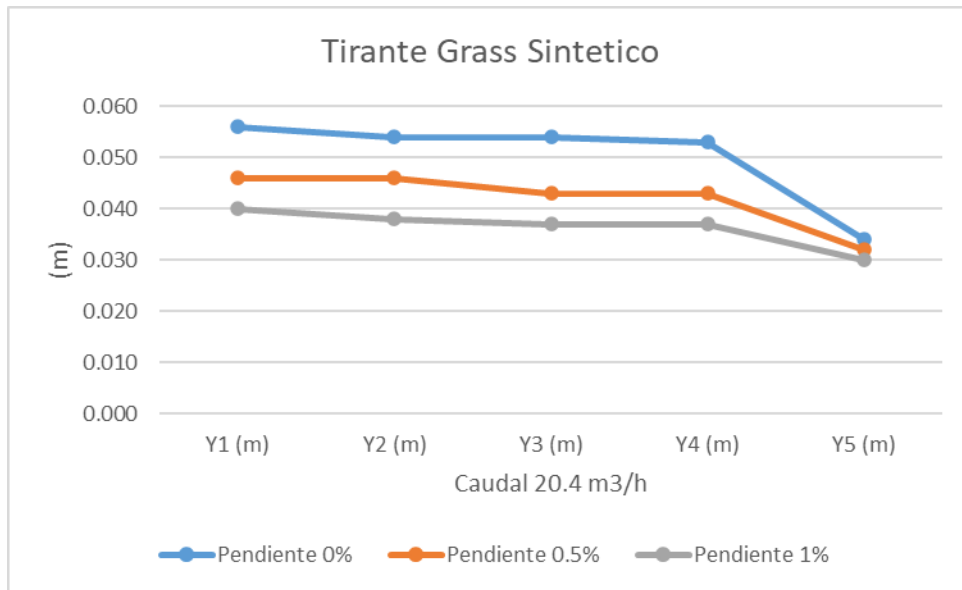


Figura 8 Mediciones de tirantes para Grass Sintético (Fuente: Elaboración propia)

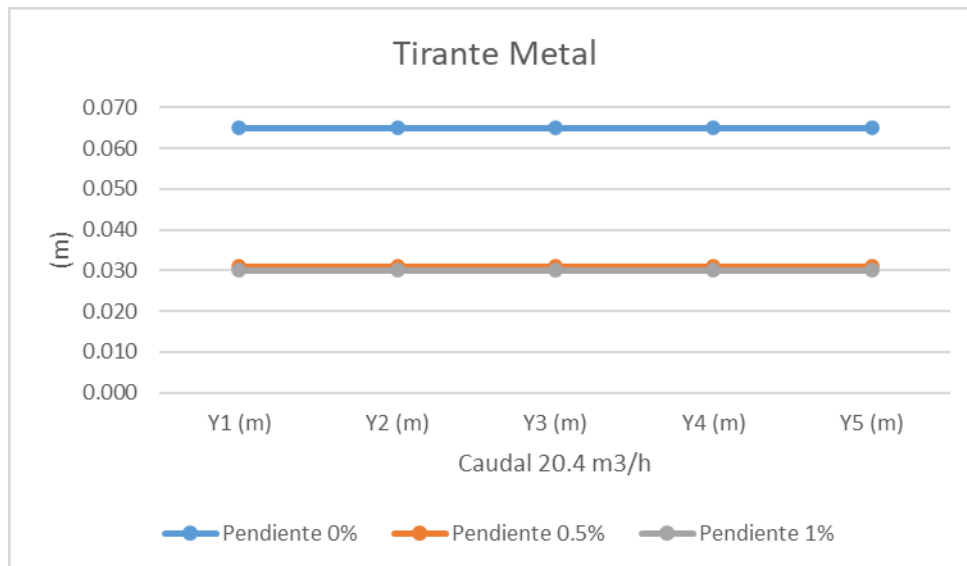


Figura 9 Mediciones de tirantes para Metal (Fuente: Elaboración propia)

4.2 Rugosidad de materiales en el canal hidráulico de pendiente variable

Una vez finalizada la recopilación de los datos experimentales en el laboratorio, se procedió con el trabajo de gabinete, en el cual se calcularon los valores de rugosidad correspondientes a cada uno de los 9 ensayos realizados. A partir de estos cálculos, se obtuvo la siguiente información:

Tabla 1 Rugosidad para piedra chancada (Unidades en SI) (Fuente: Elaboración propia)

PIEDRA CHANCADA

Variable / Ensayos	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉
Caudal (m ³ /s)	0.0028	0.0028	0.0028	0.0043	0.0043	0.0043	0.0057	0.0057	0.0057
Tirante (m)	0.0373	0.0275	0.0233	0.0500	0.0368	0.0308	0.0570	0.0465	0.0378
Pendiente %	0.0000	0.0050	0.0100	0.0000	0.0050	0.0100	0.0000	0.0050	0.0100
Area mojada (m ²)	0.0075	0.0055	0.0047	0.0100	0.0074	0.0062	0.0114	0.0093	0.0076
Velocidad (m/s)	0.3803	0.5152	0.6094	0.4250	0.5783	0.6911	0.5020	0.6153	0.7580
Perímetro mojado (m)	0.2745	0.2550	0.2465	0.3000	0.2735	0.2615	0.3140	0.2930	0.2755
Radio hidráulico (m)	0.0271	0.0216	0.0189	0.0333	0.0269	0.0235	0.0363	0.0317	0.0274
"n" de Manning	0.0000	0.0106	0.0116	0.0000	0.0110	0.0119	0.0000	0.0115	0.0120

Tabla 2 Rugosidades para grass sintético (Unidades en SI) (Fuente: Elaboración propia)

MATERIAL GRASS SINTÉTICO

Variable / Ensayos	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉
Caudal (m ³ /s)	0.0029	0.0029	0.0029	0.0042	0.0042	0.0042	0.0057	0.0057	0.0057
Tirante (m)	0.0348	0.0255	0.0208	0.0455	0.0328	0.0288	0.0543	0.0445	0.0380
Pendiente %	0.0000	0.0050	0.0100	0.0000	0.0050	0.0100	0.0000	0.0050	0.0100
Area mojada (m ²)	0.0070	0.0051	0.0042	0.0091	0.0066	0.0058	0.0109	0.0089	0.0076
Velocidad (m/s)	0.4117	0.5610	0.6895	0.4640	0.6447	0.7344	0.5223	0.6368	0.7457
Perímetro mojado (m)	0.2695	0.2510	0.2415	0.2910	0.2655	0.2575	0.3085	0.2890	0.2760
Radio hidráulico (m)	0.0258	0.0203	0.0172	0.0313	0.0247	0.0223	0.0352	0.0308	0.0275
"n" de Manning	0.0000	0.0094	0.0097	0.0000	0.0093	0.0108	0.0000	0.0109	0.0122

Tabla 3 Rugosidades para canto rodado (Unidades en SI) (Fuente: Elaboración propia)

MATERIAL CANTO RODADO

Variable / Ensayos	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉
Caudal (m ³ /s)	0.0029	0.0029	0.0029	0.0043	0.0043	0.0043	0.0057	0.0057	0.0057
Tirante (m)	0.0410	0.0330	0.0260	0.0488	0.0395	0.0320	0.0605	0.0490	0.0400
Pendiente %	0.0000	0.0050	0.0100	0.0000	0.0050	0.0100	0.0000	0.0050	0.0100
Area mojada (m ²)	0.0082	0.0066	0.0052	0.0098	0.0079	0.0064	0.0121	0.0098	0.0080
Velocidad (m/s)	0.3523	0.4377	0.5556	0.4445	0.5486	0.6771	0.4729	0.5839	0.7153
Perímetro mojado (m)	0.2820	0.2660	0.2520	0.2975	0.2790	0.2640	0.3210	0.2980	0.2800
Radio hidráulico (m)	0.0291	0.0248	0.0206	0.0328	0.0283	0.0242	0.0377	0.0329	0.0286
"n" de Manning	0.0000	0.0137	0.0135	0.0000	0.0120	0.0124	0.0000	0.0124	0.0131

Tabla 4 Rugosidades para metal (Unidades en SI) (Fuente: Elaboración propia)

MATERIAL METAL

Variable / Ensayos	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉
Caudal (m ³ /s)	0.0028	0.0028	0.0028	0.0043	0.0043	0.0043	0.0057	0.0057	0.0057
Tirante (m)	0.0460	0.0210	0.0180	0.0550	0.0260	0.0240	0.0650	0.0310	0.0300
Pendiente %	0.0000	0.0050	0.0100	0.0000	0.0050	0.0100	0.0000	0.0050	0.0100
Area mojada (m ²)	0.0092	0.0042	0.0036	0.0110	0.0052	0.0048	0.0130	0.0062	0.0060
Velocidad (m/s)	0.3086	0.6760	0.7886	0.3889	0.8227	0.8913	0.4359	0.9141	0.9445
Perímetro mojado (m)	0.2920	0.2420	0.2360	0.3100	0.2520	0.2480	0.3300	0.2620	0.2600
Radio hidráulico (m)	0.0315	0.0174	0.0153	0.0355	0.0206	0.0194	0.0394	0.0237	0.0231
"n" de Manning	0.0000	0.0070	0.0078	0.0000	0.0065	0.0081	0.0000	0.0064	0.0086

Con los 9 coeficientes de rugosidad obtenidos, se descartaron aquellos correspondientes a la pendiente cero (0°), ya que no representaban de manera adecuada las condiciones de flujo a pendiente variable. Posteriormente, se calculó el promedio aritmético de los valores restantes para cada material, con el fin de obtener un único valor representativo para los materiales ensayados.

4.3 Rugosidad de materiales con Cowan, Raudkivi, Simons y Senturk, Petter y Muller

4.3.1 Tamizado de material granular

Para la aplicación de las ecuaciones semiempíricas, fue necesario conocer la granulometría de los materiales piedra chancada y canto rodado. Las ecuaciones semiempíricas se derivan a partir de los tamaños de corte D90, D65 y D50, los cuales representan los diámetros de partícula correspondientes a los percentiles 90%, 65% y 50% de la distribución granulométrica, respectivamente. Los valores obtenidos para estos tamaños de corte se presentan en las Tablas 5 y 6.

Tabla 5 Análisis granulométrico de piedra chancada (Fuente: Elaboración propia)

N°Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1 1/2"	38.100	0.00	0.00 %	0.00 %	100.00%
1"	25.400	8261.00	62.15 %	62.15 %	37.85%
3/4"	19.050	3624.00	27.26 %	89.41 %	10.59%
1/2"	12.700	1407.00	10.59 %	100.00 %	0.00%
3/8"	9.525	0.00	0.00 %	0.00 %	0.00 %
N°4	4.760	0.00	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Fondo	0.000	0.00	0.00 %	0.00 %	0.00 %
TOTAL		13292.00	100.00 %		

Tabla 6 Análisis granulométrico de canto rodado (Fuente: Elaboración propia)

N°Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1 1/2"	38.100	0.00	0.00 %	0.00 %	100.00%
1"	25.400	2314.00	16.20 %	16.20 %	83.80%
3/4"	19.050	5300.00	37.11 %	53.32 %	46.68%
1/2"	12.700	6667.00	46.68 %	100.00 %	0.00%
3/8"	9.525	0.00	0.00 %	0.00 %	0.00 %
N°4	4.760	0.00	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Fondo	0.000	0.00	0.00 %	0.00 %	0.00 %
TOTAL		14281.00	100.00 %		

4.3.2 Resultados de ecuaciones semiempíricas

Se resolvieron las ecuaciones semiempíricas para contrastar los resultados obtenidos con la rugosidad de la piedra chancada y el canto rodado. En el caso del grass sintético y el metal, no es posible calcular los diámetros de corte correspondientes, ya que estos materiales no pueden someterse a un análisis granulométrico debido a sus características físicas, que no permiten la clasificación por tamaños de partícula.

Tabla 7 Resultados de fórmulas semiempíricas (Fuente: Elaboración propia)

Material / Rugosidad	M. Cowan	M. Raudkivi	M. Simons y Senturk	M. Meyer y Muller
Piedra chancada	0.038	0.022	0.034	0.021
Canto rodado	0.038	0.023	0.036	0.022

5. Discusión

El estudio comparó los valores del coeficiente de rugosidad de Manning obtenidos experimentalmente para los materiales piedra chancada, canto rodado, grass sintético y metal, con los resultados obtenidos mediante las fórmulas semiempíricas de Cowan, Raudkivi, Simons y Senturk, y Meyer y Muller. Además, se consideraron los valores teóricos del libro Hidráulica de Canales Abiertos de Ven Te Chow (1959).

Piedra Chancada: El coeficiente promedio experimental en el estudio fue de 0.011, considerablemente menor a los valores obtenidos a través de las fórmulas semiempíricas, que variaron entre 0.011 y 0.038. La variación puede deberse a que las fórmulas semiempíricas están ideadas para canales naturales con irregularidades más notables en el área transversal y alteraciones de flujo que no se pueden repetir en un canal artificial. De todas maneras, se obtuvo un valor que está por debajo de los coeficientes teóricos de Ven Te Chow para "piedra partida cementada" (0.017). La diferencia podría deberse al acabado más liso del material empleado en este estudio, gracias al empleo de silicona para adherirlo a la superficie del canal.

Canto Rodado: El coeficiente promedio experimental para el canto rodado fue de 0.013, lo que también es inferior a los valores teóricos y semiempíricos, que fluctúan entre 0.013 y 0.038. Valores parecidos a la piedra chancada, el acabado liso producido por la aplicación con silicona disminuyó la resistencia al flujo, lo que justifica los valores más bajos.

La cifra mínima de 0.030 para el "canto rodado en canal natural" no es comparable debido a las diferencias entre las condiciones de un canal natural y uno artificial.

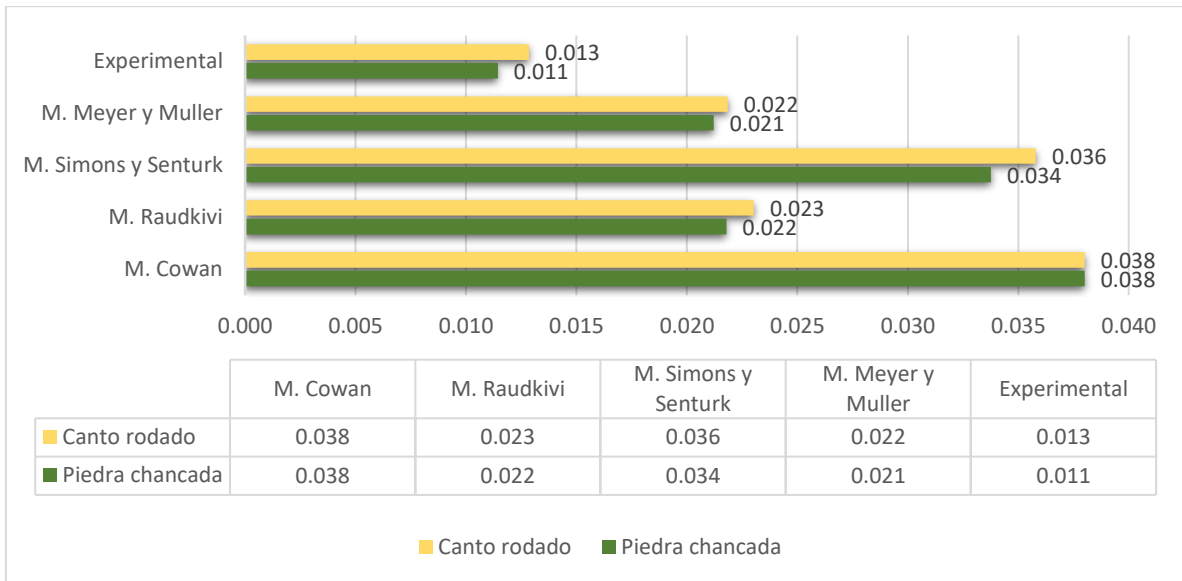


Figura 10 Cuadro comparativo entre resultados de laboratorio y formulas semiempíricas (Fuente: Elaboración propia)

Grass Sintético: El coeficiente promedio experimental registró 0.010, a diferencia del valor hallado en la investigación de González et al. (2019) de 0.021 para un material parecido. Esta variación se debe a elementos como la altura del grass (36 mm en este estudio) y su condición (nueva) así como su densidad. Además, al representar una formación vegetal, no se garantiza que los resultados sean idénticos debido a su composición.

Metal: El coeficiente promedio experimental del metal fue de 0.0074, inferior al valor mínimo teórico de 0.011 reportado por Ven Te Chow. Esto podría deberse a un mejor acabado de la superficie empleada en esta investigación, lo que reduce la resistencia al flujo. Este hallazgo corrobora la hipótesis de que las características superficiales influyen e impactan de manera considerable en el coeficiente de rugosidad.

Tabla 8 Coeficientes de Rugosidad Teóricos (Fuente: Hidráulica de canales Abiertos-Ven te chow 1959, pag:109)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
B. Canales revestidos o desarmables			
B-1. Metal			
a. Superficie lisa de acero			
1.Sin pintar	0.011	0.012	0.014
2.Pintada	0.012	0.013	0.017
b.Corrugado	0.021	0.025	0.030
B-2. No Metal			
a.Cemento			
1.Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
2.Mortero	0.011	0.013	0.015
b.Madera			
1.Cepillada, sin tratar	0.010	0.012	0.014
2.Cepillada, creosotada	0.011	0.012	0.015
3.Sin cepillar	0.011	0.013	0.015
4.Láminas con listones	0.012	0.015	0.018
5.Forrada con papel impermeabilizante	0.010	0.014	0.017
c.Concreto			
1.Terminado con lana metálica (palustre)	0.011	0.013	0.015
2.Terminado con lana de madera	0.013	0.015	0.016
3.Pulido, con gravas en el fondo	0.015	0.017	0.020
4.Sin pulir	0.014	0.017	0.020
5.Lanzado, sección buena	0.016	0.019	0.023
6.Lanzado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
7.Sobre roca bien excavada	0.017	0.020	
8.Sobre roca irregularmente excavada	0.022	0.027	
d.Fondo de concreto terminado con lana de madera y con lados de			
1.Piedra labrada, en mortero	0.015	0.017	0.020
2.Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.017	0.020	0.024
3.Mampostería de piedra cementada, recubierta	0.016	0.020	0.024
4.Mampostería de piedra cementada	0.020	0.025	0.030
4.Piedra suelta o <i>riprap</i>	0.020	0.030	0.035
e.Fondo de gravas con lados de			
1.Concreto encofrado	0.017	0.020	0.025
2.Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.020	0.023	0.026
3.Piedra suelta o <i>riprap</i>	0.023	0.033	0.036
f.Ladrillo			
1.Barnizado o lacado	0.011	0.013	0.015
2.En mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
g.Mampostería			
1.Piedra partida cementada	0.017	0.025	0.030
2.Piedra suelta	0.023	0.032	0.035
h.Bloques de piedra labrados	0.013	0.015	0.017
i. Asfalto			
1.Liso	0.013	0.013	
2.Rugoso	0.016	0.016	
j. Revestimiento vegetal	0.030	0.500

Tabla 9 Coeficientes de Rugosidad Teóricos (Fuente: Hidráulica de canales Abiertos-Ven te chow 1959, pag:110)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
C. Excavado o dragado			
a.En tierra, recto y uniforme			
1.Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
2.Limpio, después de exposición a la interperie	0.018	0.022	0.025
3.Con gravas, sección uniforme, limpio	0.022	0.025	0.030
4.Con pastos cortos, algunas malezas	0.022	0.027	0.033
b.En tierra, serpenteante y lento			
1.Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2.Pastos, algunas malezas	0.025	0.030	0.033
3.Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
4.Fondo en tierra con lados en piedra	0.028	0.030	0.035
5.Fondo pedregoso y bancas con malezas	0.025	0.035	0.040
6.Fondo en cantos rodados y lados limpios	0.030	0.040	0.050
c.Excavado con pala o dragado			
1.Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2.Matorrales ligeros en las bancas	0.035	0.050	0.060
d.Cotes en roca			
1.Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
2.Afilados e irregulares	0.035	0.040	0.050
e.Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar			
1.Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo	0.050	0.080	0.120
2.Fondo limpio, matorrales en los lados	0.040	0.050	0.080
3.Igual, nivel máximo de flujo	0.045	0.070	0.110
4.Matorrales densos, nivel alto	0.080	0.100	0.140

6. Análisis de sensibilidad

La irregularidad de los coeficientes de Manning obtenidos en esta investigación se distingue con investigaciones anteriores, en los que se muestra que las características del canal (Burnham & Davis, 1990) y las propiedades del material (Calero & Calero, 2019) influyen significativamente en los valores de rugosidad.

Los valores resultantes son muy susceptibles a la granulometría y a la configuración del material. Esto repercute especialmente a la piedra chancada y el canto rodado, donde la diferencia de los tamaños de las partículas tiene un efecto en los resultados de las fórmulas semiempíricas. Por otro lado, en los materiales como metal y césped artificial, las condiciones del montaje estuvieron influyendo de manera más notable en los valores obtenidos.

En este estudio se ha omitido tanto la viscosidad como la temperatura, ya que para el cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning está influenciado por el tipo de acabado, superficie y estructura del material. La viscosidad del agua puede verse afectada por la temperatura teniendo un comportamiento viscoso, afectando al flujo de agua, sin embargo, al realizar el estudio en un laboratorio bajo situaciones controladas ha permitido que no afecte a los resultados.

Cuando se realizó el pegado del canto rodado y la piedra changada se buscó tener una superficie lo más homogénea posible para evitar estos cambios abruptos de flujos. Por ello, los datos obtenidos en la investigación son teóricos debido a que se ha buscado de alguna manera evitar eventos hidráulicos sobre la sección adaptada en el canal. En la construcción de canales hidráulicos con estos materiales no se busca dicha regularidad en la base lo que genera cambios de flujos.

7. Limitaciones del estudio

A continuación, se muestran algunas limitaciones que deben considerarse para usar los valores obtenidos en futuras investigaciones:

- Elementos de fijación. La silicona usada puede afectar el valor real de la rugosidad del fondo. Esto pudo ocurrir, aunque se ha trabajado con cuidado para que la silicona no sea evidente en la superficie.
- En caso de que se quiera utilizar la rugosidad adquirida de los materiales como canto rodado y piedra chancada en este estudio, existe la limitante debido a su granulometría.
- Las condiciones del canal artificial utilizado en el estudio no recrean con exactitud las de un canal natural, lo que implica una limitante para la aplicación de las fórmulas semiempíricas.
- En este estudio se ha omitido tanto la viscosidad como la temperatura ya que el estudio fue realizado bajo condiciones controladas en la ciudad de Lima. Estos valores pueden verse afectados por la zona en la que se hagan los estudios.

8. Recomendaciones

Para futuras investigaciones se debe considerar ampliar el estudio para canales naturales y así validar los resultados obtenidos en condiciones reales. Así mismo, se puede evaluar el impacto de otros métodos de adhesión para los materiales u considerar adaptar las paredes del canal para obtener un flujo que represente uno de un canal natural. Esto también dependerá del canal donde se hará la evaluación, la que deberá contar con sistemas de fijación laterales para un acondicionamiento total.

Se recomienda que para futuras investigaciones se tome en consideración los efectos de viscosidad y temperatura del agua para visualizar la variación en los resultados del coeficiente de rugosidad.

9. Conclusiones

Los descubrimientos conseguidos en el estudio han usado fórmulas semiempíricas y las pruebas de laboratorio no coinciden entre ellos. Para los materiales de piedra chanca y el canto rodado, se colocaron de forma homogénea para llenar todos los espacios posibles y prevenir la aparición del microporoso. No obstante, esta configuración provoca una variación en conexión a las fórmulas semiempíricas, ya que estas están vinculadas con una curva granulométrica particular.

Los datos varían según las características y propiedades de los materiales, por lo que los resultados obtenidos no siempre se ajustan con los valores registrados en la literatura, aunque sí se mantienen cercanos a estos. Según French (1985), Yen (1992) y López (2002), el análisis de la rugosidad en canales es un área extensa, y no hay investigaciones de comparación que incluyan los resultados logrados en canales de laboratorio y canales naturales. A pesar de que las fórmulas semiempíricas disponibles son efectivas para los materiales analizados, los resultados obtenidos no corresponden, debido a que las fórmulas se adecuan a casos de canales naturales, cuyas características no pueden ser replicadas de la misma forma en condiciones controladas en un laboratorio.

Respecto al metal, se esperaba que los valores obtenidos se mantendrían en el mismo margen que los conocidos en la literatura, gracias a su superficie lisa y la falta de

elementos que pudieran influir en su rugosidad. No obstante, el resultado obtenido (0.0074) fue menor al valor de 0.011 especificado en la documentación bibliográfica. Esta diferencia podría atribuirse a una mejor formación del material, lo que confirma la hipótesis inicial.

En la prueba de laboratorio, se notó una transición del régimen de flujo subcrítico a flujo supercrítico, esto a causa del cambio de material, lo que causó una disminución del tirante Y5. Como solución, se sugiere colocar el material por toda la base del canal y no únicamente en un segmento, con el objetivo de impedir este fenómeno.

La investigación tuvo como propósito optimizar los diseños de canales abiertos y cerrados, ya que el valor de la rugosidad repercute en los valores de caudal y velocidad cuando se diseñan canales. Además del conocimiento y valores numéricos obtenidos de los materiales ensayados que otorgan data a la Ingeniería Hidráulica, se ha buscado la reducción de errores en los modelos. Las fórmulas semiempíricas han sido diseñadas para condiciones reales como cauces naturales y al evaluar en un laboratorio con condiciones controladas permite determinar y ajustar mejor los valores para diferentes tipos de materiales.

10. Referencias bibliográficas

- Burnham, M., & Davis, D. (1990). *Effects of data errors on computed steady-flow profiles*. 116(7), 914–929.
- Calero, M., & Calero, L. (2019). *Modelación del Coeficiente de Resistencia al Flujo para Diseño de Canales*. 2, 153–161.
- Chow, V. Te. (2004). *HIDRAULICA DE CANALES*.
- Fernández, J. (2022). *Modelo para el cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la altura del material del fondo del cauce del río*. 17(1), 22–28.
- González, R., Santiago, C., Muñoz, A., & Arevalo, K. (2019). *Estudio de rugosidad para diferentes materiales de fondo en canales rectangulares G2*. August.
- Gutierrez, J. D. (2009). *Cálculo del coeficiente de rugosidad de manining utilizando gravilla, arena, piedra pegada y tierra como fondo mediante un canal a escala como modelo físico*.
- Gutierrez, L. (2021). *Mejoramiento hidráulico de un canal de riego aplicando revestimiento de concreto, Cospán, Cajamar, 2021*. Universidad César Vallejo.
- Villón, M. (2007). *Hidráulica de Canales*.
- Wibowo, H., Robert Kodoatie, S., & RiverBalai, I. (2015). *Comparing the Calculation Method of the Manning Roughness Coefficient in Open Channels*. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), 4(6), 1278–1285.
- Yépez, M. G. O., Valencia, F. F., Edilberto, V., & Cartaya, H. (2000). *Cálculo del Coeficiente de Rugosidad “n” de Manning en los Grandes Ríos de Venezuela*. Ingeniería UC, 7(2), 12.
- Sandoval, M. V., Solano, N. M., Sánchez, J. D., & Jones, M. A. (2020). *Validación del coeficiente de rugosidad de Manning en un canal a flujo libre bajo condición de flujo uniforme*. Revista Agunkuyâa, 10(2), 1–13.

11. ANEXO

11.1 ANEXO A: Evidencia de presentación a revista indexada

11.2 ANEXO B: Tablas de datos

Tabla 10 Tirantes obtenidos de Piedra Chancada (Fuente: Elaboración Propia)

	PIEDRA CHANCADA					
	Caudal:	10.20 m3/h				
	Y1 (m)	Y2 (m)	Y3 (m)	Y4 (m)	Y5 (m)	Yprom (m)
PENDIENTE 0%	0.039	0.037	0.037	0.036	0.031	0.037
PENDIENTE 0.5%	0.028	0.028	0.028	0.026	0.023	0.028
PENDIENTE 1%	0.025	0.024	0.022	0.022	0.018	0.023

	15.30 m3/h					
	Caudal:	15.30 m3/h				
	Y1 (m)	Y2 (m)	Y3 (m)	Y4 (m)	Y5 (m)	Yprom (m)
PENDIENTE 0%	0.051	0.050	0.050	0.049	0.043	0.050
PENDIENTE 0.5%	0.037	0.037	0.038	0.035	0.033	0.037
PENDIENTE 1%	0.032	0.031	0.031	0.029	0.025	0.031

	20.60 m3/h					
	Caudal:	20.60 m3/h				
	Y1 (m)	Y2 (m)	Y3 (m)	Y4 (m)	Y5 (m)	Yprom (m)
PENDIENTE 0%	0.058	0.058	0.056	0.056	0.041	0.057
PENDIENTE 0.5%	0.047	0.047	0.046	0.046	0.038	0.047
PENDIENTE 1%	0.038	0.038	0.038	0.037	0.036	0.038

Tabla 11 Tirantes obtenidos de Canto Rodado (Fuente: Elaboración Propia)

	CANTO RODADO					
	Caudal:	10.40 m3/h				
	Y1 (m)	Y2 (m)	Y3 (m)	Y4 (m)	Y5 (m)	Yprom (m)
PENDIENTE 0%	0.042	0.040	0.044	0.038	0.038	0.041
PENDIENTE 0.5%	0.032	0.029	0.038	0.033	0.028	0.033
PENDIENTE 1%	0.026	0.025	0.029	0.024	0.020	0.026

	15.60 m3/h					
	Caudal:	15.60 m3/h				
	Y1 (m)	Y2 (m)	Y3 (m)	Y4 (m)	Y5 (m)	Yprom (m)
PENDIENTE 0%	0.054	0.049	0.047	0.045	0.045	0.049
PENDIENTE 0.5%	0.042	0.040	0.038	0.038	0.035	0.040
PENDIENTE 1%	0.035	0.033	0.030	0.030	0.026	0.032

	20.60 m3/h					
	Caudal:	20.60 m3/h				
	Y1 (m)	Y2 (m)	Y3 (m)	Y4 (m)	Y5 (m)	Yprom (m)
PENDIENTE 0%	0.063	0.059	0.063	0.057	0.046	0.061
PENDIENTE 0.5%	0.051	0.047	0.052	0.046	0.043	0.049
PENDIENTE 1%	0.041	0.039	0.042	0.038	0.041	0.040

11.3 ANEXO C: Evidencia de ensayos realizados



Figura 11 Materiales utilizados: Pistola de silicona, regla, microporoso y cúter (Fuente: Elaboración propia)



Figura 12 Bases de microporoso y canto rodado (Fuente: Elaboración propia)

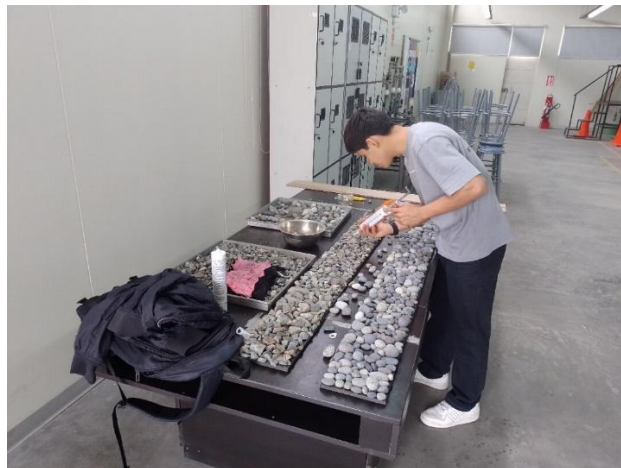


Figura 13 Colocación piedra chancada y canto rodado en base de microporoso (Fuente: Elaboración propia)



Figura 14 Habilitación de base de grass sobre base de madera (Fuente: Elaboración propia)



Figura 15 Instalación de base de canto rodado en canal de pendiente variable (Fuente: Elaboración propia)



Figura 16 Instalación de base de grass sintético en canal de pendiente variable (Fuente: Elaboración propia)



Figura 17 Recopilación de caudal en laboratorio (Fuente: Elaboración propia)



Figura 18 Toma de tirantes de agua para piedra chancada (Fuente: Elaboración propia)

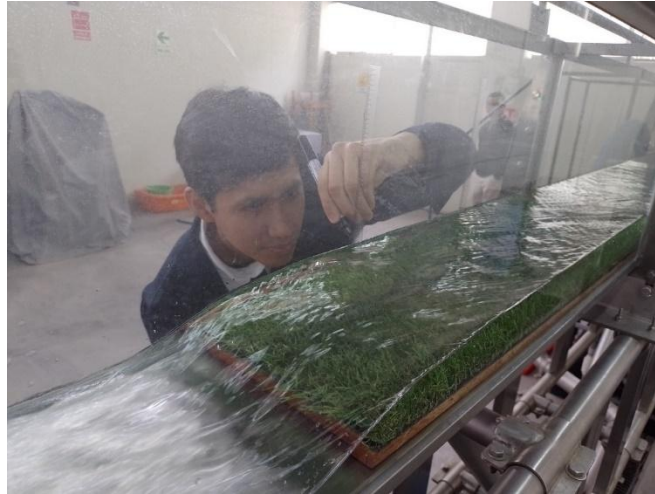


Figura 19 Recopilación de tirante de agua para grass sintético (Fuente: Elaboración propia)