

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigación en Acueductos y
Alcantarillados
CIACUA



PAVCO



CÁTEDRA PAVCO

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE MANNING DE
TUBERÍA DE ALCANTARILLADO NOVAFORT DE 200
mm DE DIÁMETRO**

Informe Final

Bogotá, Julio de 2008

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	<i>Objetivo General</i>	2
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	2
1.3	CONTENIDO DEL INFORME	2
1.4	EQUIPO DE TRABAJO	3
1.4.1	PAVCO S.A.	3
1.4.2	Universidad de los Andes	3
2	MODELO HIDRÁULICO	5
2.1	MODELO MATEMÁTICO	5
2.1.1	<i>Ecuación de Continuidad</i>	5
2.1.2	<i>Ecuación de Cantidad de Movimiento</i>	6
2.1.3	<i>Ecuación de Energía</i>	6
2.1.4	<i>Ecuación del Flujo Gradualmente Variado (FGV)</i>	6
2.1.5	<i>Leyes de Fricción</i>	7
2.2	MODELO FÍSICO	8
2.2.1	<i>Montaje para las Pruebas</i>	8
2.2.2	<i>Descripción de las Mediciones</i>	13
2.2.2.1	Medición de Caudales.....	14
2.2.2.2	Medición de la Pendiente	14
2.2.2.3	Medición de la Profundidad del Flujo	15
3	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE MANNING.....	17
3.1	METODOLOGÍA	17
3.2	JUSTIFICACIÓN	18
3.3	CALIBRACIÓN DEL COEFICIENTE DE MANNING POR PRUEBA (CONDICIÓN DE CAUDAL Y PENDIENTE)	19
3.3.1	<i>Indicadores de Ajuste</i>	19
3.3.2	<i>Procedimiento para la Calibración</i>	20
3.3.2.1	Alistamiento de Datos Experimentales	20
3.3.2.2	Relaciones Geométricas para la Solución del Modelo Matemático	21
3.3.3	<i>Solución del Modelo Matemático para Flujo Gradualmente Variado (FGV)</i>	22
3.3.3.1	Método del Paso Fijo	22
3.3.3.2	Método de Integración Runge – Kutta	24
3.3.4	<i>Generación de las Triadas (Parámetro, Eficiencia, ECM)</i>	24
3.3.5	<i>Resumen de la Calibración de un Valor de n de Manning Bajo una Condición Caudal – Pendiente</i>	25
3.4	FILTRADO – VERIFICACIÓN DE LOS COEFICIENTES CALCULADOS.....	26
3.4.1	<i>Filtrado Secuencial</i>	27
3.4.1.1	Primera Agregación de los Indicadores de Ajuste para Caudales, en una Pendiente.....	27
3.4.1.2	Primer Filtrado del Coeficiente de Manning Óptimo en una Pendiente.....	29
3.4.1.3	Segunda Agregación de los Indicadores Agregados para Pendientes	32
3.4.2	<i>Filtrado Cruzado</i>	34
3.4.2.1	Verificación Cruzada	35
3.4.2.2	Clasificación de Coeficientes de Manning	35
3.4.2.3	Agregación de Indicadores de Eficiencia	38
3.4.2.4	Filtrado del Coeficiente de Manning Óptimo Final	40

3.5	COEFICIENTE DE MANNING DEFINITIVO.....	42
4	RELACIONES ENTRE CAUDAL, PENDIENTES Y EL COEFICIENTE DE MANNING ENCONTRADAS.....	44
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
5.1	CONCLUSIONES REFERENTES AL VALOR DE COEFICIENTE DE MANNING DETERMINADO DE DISEÑO	46
5.2	RECOMENDACIONES ACERCA DE LA TUBERÍA Y DEL MONTAJE.....	46
5.3	RECOMENDACIONES SOBRE EL MANEJO DE PENDIENTES Y CAUDALES CON EL COEFICIENTE DE MANNING PARA DISEÑO	46
6	REFERENCIAS.....	48

Índice de Figuras

FIGURA 2-1	ESTRUCTURA GENERAL DEL MONTAJE. VISTA LATERAL.....	8
FIGURA 2-2	ESTRUCTURA GENERAL DEL MONTAJE. VISTA EN PLANTA.....	9
FIGURA 2-3	TABLERO DE MEDICIÓN.....	11
FIGURA 2-4	DETALLE PIEZÓMETROS EN EL FONDO DE LA TUBERÍA.....	11
FIGURA 2-5	DETALLE UNIÓN TUBERÍA TANQUE CON NEUMÁTICO.....	12
FIGURA 2-6	DETALLE DE LA CERCHA METÁLICA Y LA DIFERENCIAL DE OPERACIÓN MANUAL.....	12
FIGURA 2-7	DETALLE DEL CANAL DE CONDUCCIÓN Y PANTALLAS DE AQUIETAMIENTO.....	13
FIGURA 2-8	VERTEDERO PARA MEDICIÓN DE CAUDAL.....	14
FIGURA 2-9	ESQUEMA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PENDIENTE EN UN TRAMO DE TUBERÍA.....	15
FIGURA 3-1	DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE MANNING.....	18
FIGURA 3-2	ESQUEMA DE ITERACIONES RECURSIVAS UTILIZADO ENTRE UN TRAMO I Y UN TRAMO $I+1$ PARA LA SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	23
FIGURA 3-3	ESQUEMA GENERAL DE LA CALIBRACIÓN PARA LAS PRUEBAS Y LA GENERACIÓN DE LAS TRIADAS.....	25
FIGURA 3-4	ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE UN VALOR ÓPTIMO DE n DE MANNING DADA UNA CONDICIÓN CAUDAL - PENDIENTE.....	26
FIGURA 3-5	ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO DE FILTRADO SECUENCIAL.....	27
FIGURA 3-6	DISTRIBUCIONES DE LOS INDICADORES DEL PROCESO DE AGREGACIÓN 1. CADA CURVA CORRESPONDE AL PAR COEFICIENTE DE MANNING-ERROR CUADRÁTICO MEDIO AGREGADO PARA CADA PENDIENTE PROBADA.....	29
FIGURA 3-7	INTERVALOS ÓPTIMOS DE COEFICIENTES DE MANNING FILTRO 1. SON CALCULADOS DE LOS PERCENTILES AL 5% Y AL 10% DE LA CURVA ACUMULADA PARA LAS EFICIENCIAS RESPECTIVAS SEGÚN EL ERROR CUADRÁTICO MEDIO. EL ÓPTIMO CORRESPONDE AL COEFICIENTE MANNING DE MAYOR INDICADOR EN SU PENDIENTE.....	31
FIGURA 3-8	DISTRIBUCIÓN DE LOS INDICADORES DEL PROCESO DE AGREGACIÓN 2.....	33
FIGURA 3-9	CURVA ACUMULADA CON LA CUAL SE DEFINE EL INTERVALO CON PERCENTILES 5% Y 95%.....	34
FIGURA 3-10	ESQUEMA DE VERIFICACIÓN CRUZADA PARA LOS COEFICIENTES DE MANNING.....	35
FIGURA 3-11	(A) SE MUESTRA LA UBICACIÓN DE LAS EFICIENCIAS, RESPECTO A LOS RANGOS DE CLASIFICACIÓN, EN EL PLANO CAUDAL-EFICIENCIAS. (B) SE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE LAS EFICIENCIAS, PARA UN n DE MANNING, EN EL PLANO CAUDAL-PENDIENTE (PLANO QUE DESCRIBE EL TOTAL DE EVENTOS). (C) SE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE EFICIENCIAS EN EL PLANO CAUDAL-PENDIENTE, RESPECTO A TODOS LOS EVENTOS POSIBLES A_T. (D) SE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE EFICIENCIAS PARA UN n DE MANNING MUY VERSÁTIL, ES DECIR, CON LA MAYORÍA DE EFICIENCIAS EN CASI TODOS LOS EVENTOS CAUDAL-PENDIENTE.....	37
FIGURA 3-12	ESQUEMA DE VERIFICACIÓN CRUZADA PARA LOS COEFICIENTES DE MANNING.....	38
FIGURA 3-13	RESULTADOS DE LA FILTRACIÓN CRUZADA.....	41
FIGURA 4-1	COEFICIENTES DE MANNING ÓPTIMOS PARA TODAS LAS CONDICIONES DE PENDIENTE Y CAUDAL.....	44
FIGURA 4-2	VARIACIÓN DEL n DE MANNING RESPECTO A LA PENDIENTE.....	45

FIGURA 5-1 RANGOS DE VALIDEZ PARA CAUDALES EN CADA UNA DE LAS 8 PENDIENTES PROBADAS, PARA EL COEFICIENTE DE MANNING ÓPTIMO. SE ESTABLECIERON CON EFICIENCIAS MAYORES AL 85%. 47

Índice de Tablas

TABLA 2-1 LOCALIZACIÓN Y DISTANCIAS ENTRE PIEZÓMETROS. 10
TABLA 3-1. RESULTADOS DE LOS VALORES DE N DE MANNING. 34

1 Introducción

El estudio sobre la determinación de la rugosidad en tuberías de alcantarillado NOVAFORT de la empresa PAVCO S.A., forma parte de los proyectos de investigación que desarrolla el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de los Andes a través de la Cátedra PAVCO, para el período 2007 - 2008.

El presente informe expone los antecedentes de este tipo de investigaciones, explica el modelo físico y matemático utilizado para el cálculo del Coeficiente de Manning y finalmente el análisis de los resultados obtenidos y algunas recomendaciones finales.

1.1 Antecedentes

En respuesta a la gran demanda de tuberías de alcantarillado de grandes diámetros y a las nuevas tecnologías de rehabilitación que ahora se imponen, en estos últimos años el CIACUA ha venido desarrollando investigaciones acerca de la rugosidad de estas nuevas líneas de tuberías, de diferentes materiales y diámetros, para la empresa PAVCO S.A., dentro de las cuales se puede mencionar:

- Anterior al 2001: Dentro de las investigaciones hechas por la cátedra PAVCO, se han hecho las determinaciones de la rugosidad para tuberías de alcantarillado en productos como W-RETEN para diámetros de 6 pulgadas, NOVAFORT para diámetros desde 6 a 16 pulgadas, y para tuberías de gres.
- En el 2001: Se constituye la primera aproximación a la determinación del coeficiente de rugosidad de Manning para tuberías NOVALOC BLANCO de perfil estructural.
- En el 2002: Se determinó el coeficiente de rugosidad de la tubería NOVALOC AMARILLO, la cual difiere básicamente de la tubería anteriormente estudiada en dos aspectos: el primero consiste en un sellamiento más hermético y suavizado entre las cintadas del perfil estructural y el segundo consiste en una nueva unión más hermética y rígida hecha del mismo material de las tuberías.
- En el 2007: Se determinó el coeficiente de Manning de la tubería de alcantarillado ADS fabricada por PAVCO S.A., la cual es una tubería elaborada en Polietileno de Alta Densidad (PEAD) con un perfil estructural corrugado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo de este proyecto es determinar el valor del coeficiente de rugosidad n de Manning, en la tubería de alcantarillado NOVAFORT de 200 milímetros de diámetro nominal exterior, y 182 mm de diámetro interior, fabricada por la empresa PAVCO S.A., mediante modelación física y análisis de los datos obtenidos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar en forma experimental el comportamiento del flujo en una tubería NOVAFORT de pared interna lisa.
- Determinar el n de Manning de una tubería de alcantarillado NOVAFORT – PAVCO S.A., de diámetro nominal de 200 milímetros, la cual tiene 182 milímetros de diámetro interior.
- Obtener los análisis y resultados esperados para la optimización de la capacidad hidráulica de los sistemas de alcantarillado.

1.3 Contenido del Informe

El presente informe contiene los resultados del proyecto “Determinación del Coeficiente de Manning de Tubería de Alcantarillado NOVAFORT de 200 mm”, realizado por la Universidad de los Andes y PAVCO S.A.

En este numeral se describe el contenido particular de cada uno de los capítulos que conforman el informe final de la investigación, en donde cada capítulo se dedica a explicar en forma detallada tanto la metodología como el manejo informático y tecnológico que cada uno de los pasos involucra.

- En el Capítulo 1 se realiza una descripción general del contenido del informe, los antecedentes, y los objetivos de la investigación, así como el personal involucrado durante la misma.
- En el Capítulo 2 se realiza una descripción completa del modelo hidráulico, tanto de la parte matemática como física del mismo. En el modelo matemático se exponen las ecuaciones físicamente basadas que describen el balance hídrico, la cantidad de movimiento, la energía, el flujo gradualmente variado y las leyes de fricción. Y en el modelo físico se describe su funcionamiento y la descripción de las mediciones.

- En el Capítulo 3 se muestra el procedimiento seguido para la determinación del Coeficiente de Manning y los resultados del mismo. Se describe la metodología seguida, su justificación, los procesos de calibración de las pruebas individuales y el filtrado definitivo de los valores del Coeficiente de Manning.
- En el Capítulo 4 se muestran las relaciones entre el caudal, pendientes y el Coeficiente de Manning encontradas en la investigación.
- En el Capítulo 5 se exponen las conclusiones y recomendaciones encontradas durante el desarrollo del proyecto.

1.4 Equipo de Trabajo

El equipo de trabajo del proyecto “Determinación del Coeficiente de Manning de Tubería de Alcantarillado NOVAFORT de 200 mm” estuvo conformado por personal de PAVCO S.A. y un equipo de trabajo de la Universidad de los Andes, los cuales se mencionan a continuación.

1.4.1 PAVCO S.A.

Gerente General PAVCO

Carlos González.

Director Comercial Tubosistemas Amanco

Ernesto Guerrero Molina

Directora Región Andina de Mercadeo Amanco

Diana Patricia Arango.

Gerente Técnico

Enrique Gonzáles.

Gerente de Producto

Inés Elvira Wills.

Asistente de Mercadeo

Zoraida Castro.

1.4.2 Universidad de los Andes

El equipo de trabajo conformado por parte de la Universidad de los Andes estuvo conformado por Ingenieros Civiles, Asistentes Graduados (Ingenieros Estudiantes de Maestría en Ingeniería Civil) y monitores de investigación (estudiantes de pregrado en Ingeniería Civil y en Ingeniería Ambiental).

Director del Proyecto

Ing. Juan G. Saldarriaga.

Investigadores

Ing. Fabio Elías Amador Berrío.

Asistentes Graduados

Ing. Julián Arbeláez Salazar.

Ing. Ángela María Donoso.

Monitores de Investigación

Juan Camilo Rueda.

Asistente de Laboratorio

Edwin Javier Cano.

2 Modelo Hidráulico

El objetivo de este capítulo es presentar el modelo hidráulico utilizado para determinar el coeficiente de rugosidad de Manning. Dicho coeficiente es el parámetro que explica la disipación de la energía en el flujo de canales abiertos.

El modelo matemático relaciona los datos experimentales con leyes físicas que gobiernan el fenómeno. Dichos datos experimentales son obtenidos por medio del modelo físico bajo diferentes condiciones de caudal y pendiente de la tubería.

2.1 Modelo Matemático

Cómo el propósito de este trabajo es la calibración del coeficiente de Manning para la tubería NOVAFORT de 200 mm., fue necesario desarrollar el modelo hidráulico que permita describir tal fenómeno, además de explicar el movimiento del flujo dentro de la tubería con flujo parcialmente lleno. Por lo tanto, a continuación se describe la estructura matemática para la determinación del coeficiente de Manning.

2.1.1 Ecuación de Continuidad

El primer elemento para desarrollar la modelación del flujo en canales abiertos, es el que describe la acumulación de la masa del fluido por cada unidad de longitud. La ecuación de continuidad rige cuánta masa debe moverse en cada unidad de tiempo por unidad de longitud y se establece a continuación en la Ecuación 2-1:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad \text{Ecuación 2-1}$$

donde: Q = Caudal en m^3/s .

A = Área mojada en m^2 .

Para el caso de las pruebas realizadas, no se considera que ocurran variaciones del caudal ni de las profundidades en el tiempo. Por lo tanto, la forma de la ecuación de continuidad es: (Ver la Ecuación 2-2)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad A_i V_i - A_{i+1} V_{i+1} = 0 \quad \text{Ecuación 2-2}$$

donde: A_i = Área mojada en m^2 , en el tramo i .

V_i = Velocidad media del flujo en m/s , en el tramo i .

2.1.2 Ecuación de Cantidad de Movimiento

El elemento que explica la cantidad de movimiento del fluido dentro de la tubería está basado en la segunda Ley de Newton, que simplemente se desarrolla en un balance de cantidad de movimiento tal como se muestra en la Ecuación 2-3:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{Q^2}{A} \right] = (S_o - S_f)g - \frac{\partial Y}{\partial x} g \quad \text{Ecuación 2-3}$$

donde: Q = Caudal.
 A = Área mojada.
 Y = Profundidad de la lámina de agua.
 S_o = Pendiente de fricción.
 S_f = Pendiente del canal.
 g = Aceleración de la gravedad.

2.1.3 Ecuación de Energía

Como elemento que describe la conservación del potencial de movimiento y de las disipaciones por fricción, se tiene la ecuación de energía entre tramos consecutivos:

$$\frac{V_{i+1}^2}{2g} - \frac{V_i^2}{2g} = (S_o - S_f) \Delta x - (Y_{i+1} - Y_i) \quad \text{Ecuación 2-4}$$

donde: Y_i y Y_{i+1} = Profundidades de la lámina de agua en tramos consecutivos.
 V_i y V_{i+1} = Velocidades medias respectivas en tales tramos.
 S_o, S_f = Pendientes del canal y de fricción respectivamente.

Nótese como la Ecuación 2-4 es una versión en diferencias finitas de la Ecuación 2-3.

2.1.4 Ecuación del Flujo Gradualmente Variado (FGV)

Al desarrollar los términos de la Ecuación 2-3, se configura la ecuación que describe la variación de la profundidad de la lámina de agua en Flujo Gradualmente Variado (FGV). El razonamiento es el siguiente:

El término de flujo neto de cantidad de movimiento (aceleración convectiva) se expresa en la Ecuación 2-5:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{Q^2}{gA} \right] = \frac{Q^2}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{gA} \right] = -\frac{Q^2}{gA} \frac{1}{A^2} \frac{\partial A}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial x} = -\frac{Q^2 T}{gA^3} \frac{\partial Y}{\partial x} = -Fr^2 \frac{\partial Y}{\partial x} \quad \text{Ecuación 2-5}$$

Este término relaciona el número de Froude (Fr), con la variación de la profundidad de la lámina de agua. Ahora, al reorganizar los términos de la Ecuación 2-3 para formar una ecuación explícita sobre la variación de la profundidad de la lámina de agua en el Flujo Gradualmente Variado, se llega a la Ecuación 2-6:

$$\frac{\partial Y}{\partial x} = \frac{S_o - S_f}{1 - Fr^2} \quad \text{Ecuación 2-6}$$

donde S_f y Fr son función del coeficiente de rugosidad (n de Manning o C de Chézy), el caudal y la pendiente.

2.1.5 Leyes de Fricción

Para la explicación del término S_f en la ecuación de Flujo Gradualmente Variado se tienen dos alternativas: La Ley de Fricción de Manning cuyo coeficiente es el n de Manning, de origen empírico, y la Ley de Fricción de Darcy-Weisbach, físicamente basada, que puede relacionarse directamente con la ecuación de Chézy.

La ecuación de Manning conocida es: (Ver la Ecuación 2-7)

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad \text{Ecuación 2-7}$$

La cual, al reorganizarse, toma la siguiente forma para el término de fricción (donde S ahora es S_f):

$$S_f = n^2 \frac{V^2}{R^{4/3}} \quad \text{Ecuación 2-8}$$

Así, de la ecuación de Darcy-Weisbach se tiene la siguiente forma del término de fricción, como se puede ver en la Ecuación 2-9:

$$S_f = f \frac{1}{4R} \frac{V^2}{2g} \quad \text{o} \quad S_f = C \frac{V^2}{R} \quad \text{Ecuación 2-9}$$

En este trabajo se usa La Ley de Fricción de Manning, pues el interés recae en determinar el respectivo coeficiente de rugosidad.

2.2 Modelo Físico

2.2.1 Montaje para las Pruebas

Para la ejecución de las pruebas, se utilizó un montaje a escala real en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes para simular el comportamiento hidráulico de la tubería de alcantarillado NOVAFORT de 200 mm., bajo distintas combinaciones de caudal y pendiente. El montaje consta de los siguientes elementos:

- Tubería de NOVAFORT de 6 metros de largo, con diámetro externo de 200 milímetros y diámetro interno de 182 milímetros.
- Circuito cerrado de flujo, constituido por dos tanques, uno de almacenamiento y otro de cabeza hidráulica constante para el almacenamiento temporal aguas arriba.
- Tablero de lectura de piezómetros para la medición de los niveles en diferentes puntos de la tubería.
- Vertedero triangular y limnómetro para la medición de caudal.
- Cercha metálica para el soporte de la tubería.
- Neumático para sellar la salida de la tubería del tanque de cabeza constante.
- Pantalla de aquietamiento aguas abajo.

El esquema del montaje completo, se muestra a continuación en la Figura 2-1, donde se pueden observar la mayoría de componentes que constituyen este montaje físico.



Figura 2-1 Estructura general del montaje. Vista lateral.

La vista en planta del montaje del modelo físico se muestra a continuación en la Figura 2-2. En esta se puede ver el tanque de almacenamiento temporal, la diferencial para cambio de pendiente y la tubería NOVAFORT de 200 milímetros.



Figura 2-2 Estructura general del montaje. Vista en planta.

En el tramo de la tubería, se perforaron 57 orificios perfectamente alineados, separados a una menor distancia en la boca del tubo y con mayor separación entre ellos, a medida que se acercan al tanque de almacenamiento aguas arriba. En la Tabla 2-1 se detalla el espaciamiento exacto y su identificación.

Tabla 2-1 Localización y distancias entre piezómetros.

Piezo.		ΔX (m)	X1-XN (m)
	0	0.000	0.000
0	1	0.055	0.055
1	2	0.042	0.097
2	3	0.042	0.139
3	4	0.040	0.179
4	5	0.041	0.220
5	6	0.040	0.260
6	7	0.040	0.300
7	8	0.040	0.340
8	9	0.042	0.382
9	10	0.040	0.422
10	11	0.040	0.462
11	12	0.042	0.504
12	13	0.040	0.544
13	14	0.040	0.584
14	15	0.044	0.628
15	16	0.043	0.671
16	17	0.043	0.714
17	18	0.044	0.758
18	19	0.039	0.797
19	20	0.043	0.840
20	21	0.080	0.920
21	22	0.040	0.960
22	23	0.040	1.000
23	24	0.040	1.040
24	25	0.040	1.080
25	26	0.040	1.120
26	27	0.040	1.160
27	28	0.040	1.200
28	29	0.043	1.243
29	30	0.039	1.282
30	31	0.040	1.322
31	32	0.040	1.362
32	33	0.082	1.444
33	34	0.043	1.487
34	35	0.118	1.605
35	36	0.142	1.747
36	37	0.143	1.890
37	38	0.265	2.155
38	39	0.140	2.295
39	40	0.142	2.437
40	41	0.142	2.579
41	42	0.123	2.702
42	43	0.265	2.967
43	44	0.143	3.110
44	45	0.144	3.254
45	46	0.145	3.399
46	47	0.143	3.542
47	48	0.224	3.766
48	49	0.223	3.989
49	50	0.221	4.210
50	51	0.225	4.435
51	52	0.225	4.660
52	53	0.225	4.885
53	54	0.225	5.110
54	55	0.225	5.335
55	56	0.200	5.535
56	57	0.225	5.760

En estos orificios, se acoplan mangueras transparentes de 4.7 mm de diámetro que funcionan como piezómetros, los cuales se sujetan a un tablero de medición para su lectura. El tablero de medición se muestra en la Figura 2-3, en la Figura 2-4 se muestra la instalación de los piezómetros en la tubería.



Figura 2-3 Tablero de medición.



Figura 2-4 Detalle piezómetros en el fondo de la tubería.

La tubería NOVAFORT fue colocada sobre una cercha metálica con el fin de asegurar su estabilidad y la uniformidad en la pendiente. El acople entre la tubería y el tanque, se realizó mediante un neumático con el cual se obtuvo la hermeticidad en la transición (ver la Figura 2-5); la pendiente de la tubería se modificaba en el extremo aguas abajo de la tubería mediante una diferencial de operación manual (ver la Figura 2-6).



Figura 2-5 Detalle unión tubería tanque con neumático.



Figura 2-6 Detalle de la cercha metálica y la diferencial de operación manual.

El caudal fue suministrado por el sistema de bombeo del Laboratorio de sistemas de alcantarillado de la Universidad de los Andes. Este sistema está compuesto aguas arriba por una bomba de 15 HP, un tanque de almacenamiento de cabeza constante, el cual se conecta por medio de una tubería de 6 pulgadas de diámetro al tanque de alimentación (ver la Figura 2-2). Aguas abajo de la tubería se encuentra un canal de conducción con pantallas de aquietamiento, con el fin de disminuir la turbulencia del flujo (como se puede ver en la Figura 2-7), y un vertedero triangular (mostrado en la Figura 2-8).

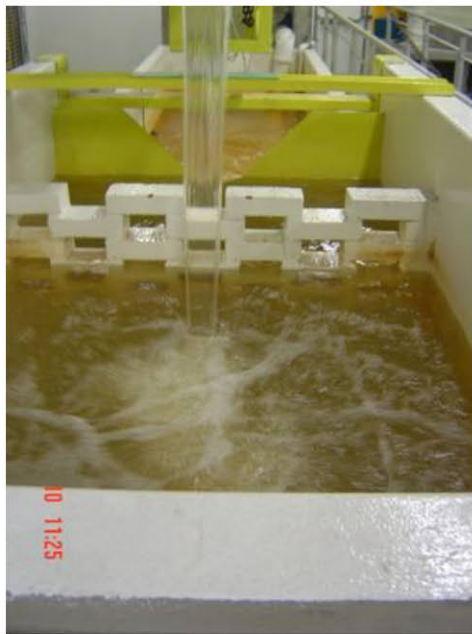


Figura 2-7 Detalle del canal de conducción y pantallas de aquietamiento.

2.2.2 Descripción de las Mediciones

De manera general, la prueba consiste en determinar el valor del coeficiente de rugosidad de Manning que permita el mejor ajuste sobre el perfil de flujo formado en toda la tubería dado un caudal y una pendiente específica. Para cada pendiente se probaron cincuenta caudales, entre $0.0011 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.022 \text{ m}^3/\text{s}$ distribuidos lo más uniforme posible mediante la válvula de regulación. Para cada combinación de caudal y pendiente, se leen en el tablero de medición las alturas en cada piezómetro conectado a la tubería, teniendo en cuenta la cota inferior interna de la misma con el fin de determinar la profundidad exacta.

Finalmente, se grafica el perfil experimental de cada prueba y se simula un rango de valores de coeficiente de rugosidad para determinar el perfil teórico que mejor se ajuste, de acuerdo con los criterios que se detallarán en el Capítulo 3.

Se realizaron pruebas con perfiles suave, adverso y horizontal. Las pendientes ensayadas fueron de -0.20% , -0.10% , 0.0% , 0.05% , 0.11% y 0.15% . El análisis para el cálculo del

coeficiente de rugosidad de Manning se realizó generalmente desde el piezómetro No. 11, con el fin de no incluir el efecto de la turbulencia que se genera en la boca del tubo, ya que se presentan alturas de piezómetros no estables y generando un perfil del agua no muy claro.

2.2.2.1 Medición de Caudales

Para medir el caudal en cada prueba, se cuenta con un vertedero triangular calibrado con la siguiente ecuación.

$$Q = 0.0147 * H^{2.5481} \quad \text{Ecuación 2-10}$$

donde: Q = Caudal en l/s.

H = Profundidad de la lámina del agua en centímetros medida en el limnómetro.

H_0 = El cero del limnómetro es 4.70 centímetros, que corresponde a la medición en el borde del vertedero.

En la Figura 2-8 Se muestra el detalle del vertedero triangular.

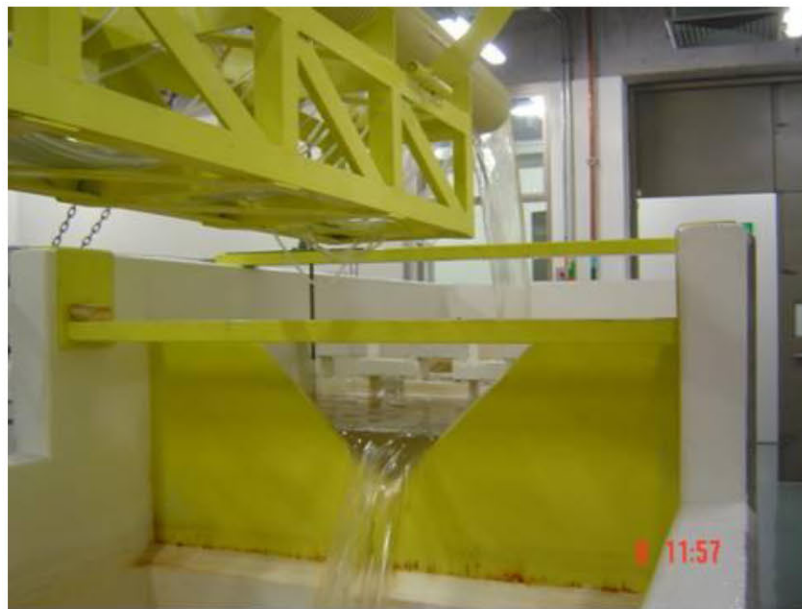


Figura 2-8 Vertedero para medición de caudal

2.2.2.2 Medición de la Pendiente

Para medir la pendiente, se tomaron lecturas de cotas con un nivel de precisión (aproximada de 0.5 mm) sobre las reglas H_1 y H_2 , estas reglas se encuentran localizadas

sobre las tuberías en puntos intermedios del tramo con una distancia entre ellas de 5.433 metros. Las reglas H_0 y $H_{tablero}$ están localizadas en la boca y entrada al tubo respectivamente y sirven para nivelar la boca del tubo con el tablero de los piezómetros. En la Figura 2-9 mostrada a continuación se puede observar el esquema para la determinación de la pendiente de la tubería.

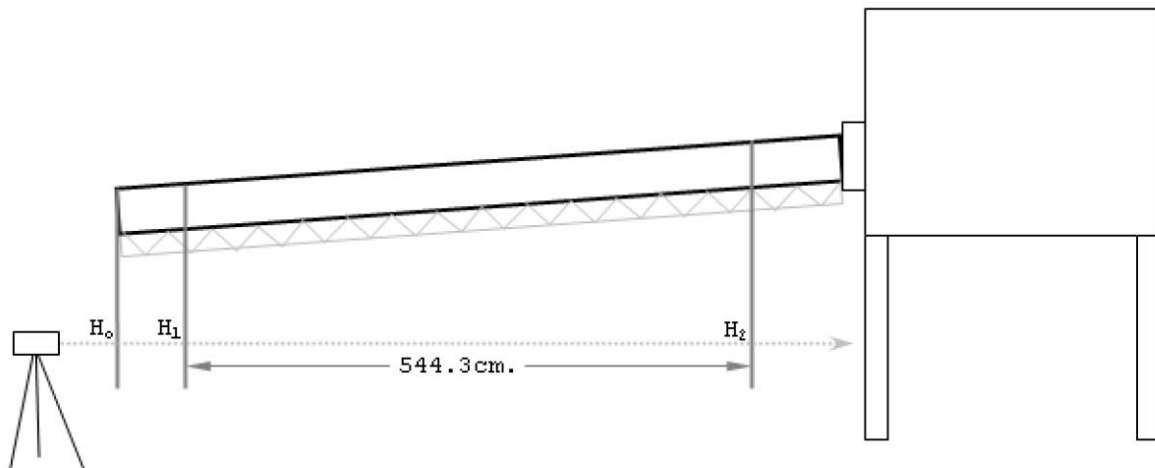


Figura 2-9 Esquema para la determinación de la pendiente en un tramo de tubería.

Para el cálculo de la pendiente de la tubería, se tienen dos sitios de medición de cotas sobre la base en la que reside la tubería, separadas una distancia L , las mediciones para cada pendiente son H_1 y H_2 , así la pendiente entre esos dos sitios se puede deducir del anterior esquema del montaje.

De esta forma, la pendiente se relaciona con las mediciones de cota de acuerdo con la Ecuación 2-11:

$$S_o = \frac{H_1 - H_2}{L} \quad \text{Ecuación 2-11}$$

donde: H_1 y H_2 = son las mediciones de cota.

S_o = es la pendiente calculada.

L = es la distancia entre reglas (5,443 metros).

2.2.2.3 Medición de la Profundidad del Flujo

El tablero de piezómetros, con una precisión de 1.0 mm y marcado cada 1.0 cm, se acondicionó con 57 piezómetros conectados a la parte inferior de la tubería, distribuidos

como se mencionó en el numeral 2.2.1 y las distancias entre estos son las encontradas en la Tabla 2-1. La lectura de los piezómetros permite determinar la profundidad de la lámina de agua en el interior de la tubería, teniendo en cuenta la referencia de la cota inferior interna (Datum o cota cero).

Los datos de los piezómetros se registran respecto al tablero de referencia; así a dichas mediciones P_i se debe sustraer el respectivo valor de la cota del fondo de la tubería Z_i para determinar la profundidad en el piezómetro i , como se muestra en la Ecuación 2-12.

$$\text{Profundidad Piezómetro } i = Y_i = P_i - Z_i \quad \text{Ecuación 2-12}$$

Dada la pendiente de la tubería y la cota del fondo de la salida del tubo referenciada al tablero de medición de los piezómetros, el cálculo de las cotas del fondo de la tubería para los piezómetros i , se halla con la siguiente relación: (Ver la Ecuación 2-13)

$$Z_{i+1} = Z_i + \Delta x_{i,i+1} \frac{S_o}{\sqrt{1 + S_o}} \quad \text{Ecuación 2-13}$$

donde: Z_i = es la cota del fondo de la tubería para el piezómetro i .

$\Delta x_{i,i+1}$ = es la distancia entre piezómetros i , $i+1$ medida en el fondo de la tubería.

S_o = es la pendiente de la tubería calculada anteriormente.

3 Determinación del Coeficiente de Manning

En este capítulo se explicará el procedimiento utilizado para la determinación del coeficiente de Manning. El objeto de la metodología desarrollada, es determinar el n de Manning que permita describir, de forma adecuada, la mayor cantidad de condiciones de caudal y pendiente posibles, con una buena capacidad de explicación de las profundidades.

3.1 Metodología

La metodología se compone de dos procesos: El primero de calibración del Coeficiente de Manning para cada una de las pruebas que se refieren a condiciones de caudal y pendientes específicos. Un segundo proceso de Filtrado y Verificación, en el cual se cuantifica la habilidad de los coeficientes de Manning, calibrados en el primer proceso, para explicar la mayor cantidad de eventos con una adecuada eficiencia.

En el proceso de calibración masiva, se tiene para cada prueba k (condición de pendiente S y caudal Q) una serie medida de profundidades Serie k , una pendiente medida S_k , un caudal medido Q_k y un espectro factible de coeficientes de Manning $N_{i,k}$, para el cual se generan valores de Eficiencia y de Error Cuadrático Medio, $R^2_{i,k}$ y $ECM_{i,k}$ respectivamente y un valor óptimo de Coeficiente de Manning de la prueba k N^*_k . Así, el resultado del proceso de calibración es un conjunto de M pruebas (condiciones experimentales que corresponden a 320 caudales diferentes en 6 condiciones de pendientes) cada uno con una tríada definida así: $[n_{i,k} R^2_{i,k} ECM_{i,k}]$ de tamaño fijado por el espectro de coeficientes probados para dicho evento.

Para el proceso de filtrado-verificación se siguieron dos métodos y dos criterios de agregación de los indicadores de bondad de ajuste (Eficiencias y Error Cuadrático Medio). El primer método es un filtrado secuencial, en el cual se agregan las eficiencias para todos los caudales de una misma pendiente y luego se agregan las eficiencias resultantes para todas las pendientes; así se obtiene la primera aproximación al n de Manning.

El segundo método es un filtro cruzado donde se agregan las eficiencias de cada Coeficiente de Manning para todas las pruebas hechas, se clasifican los coeficientes de Manning probados y se obtiene el óptimo como el de mayor indicador de bondad de ajuste.

Los criterios de agregación son el promedio muestral de los indicadores y el promedio ponderado de los respectivos indicadores.

El siguiente diagrama de flujo muestra el esquema general seguido para la determinación del Coeficiente de Manning. (Ver la Figura 3-1)

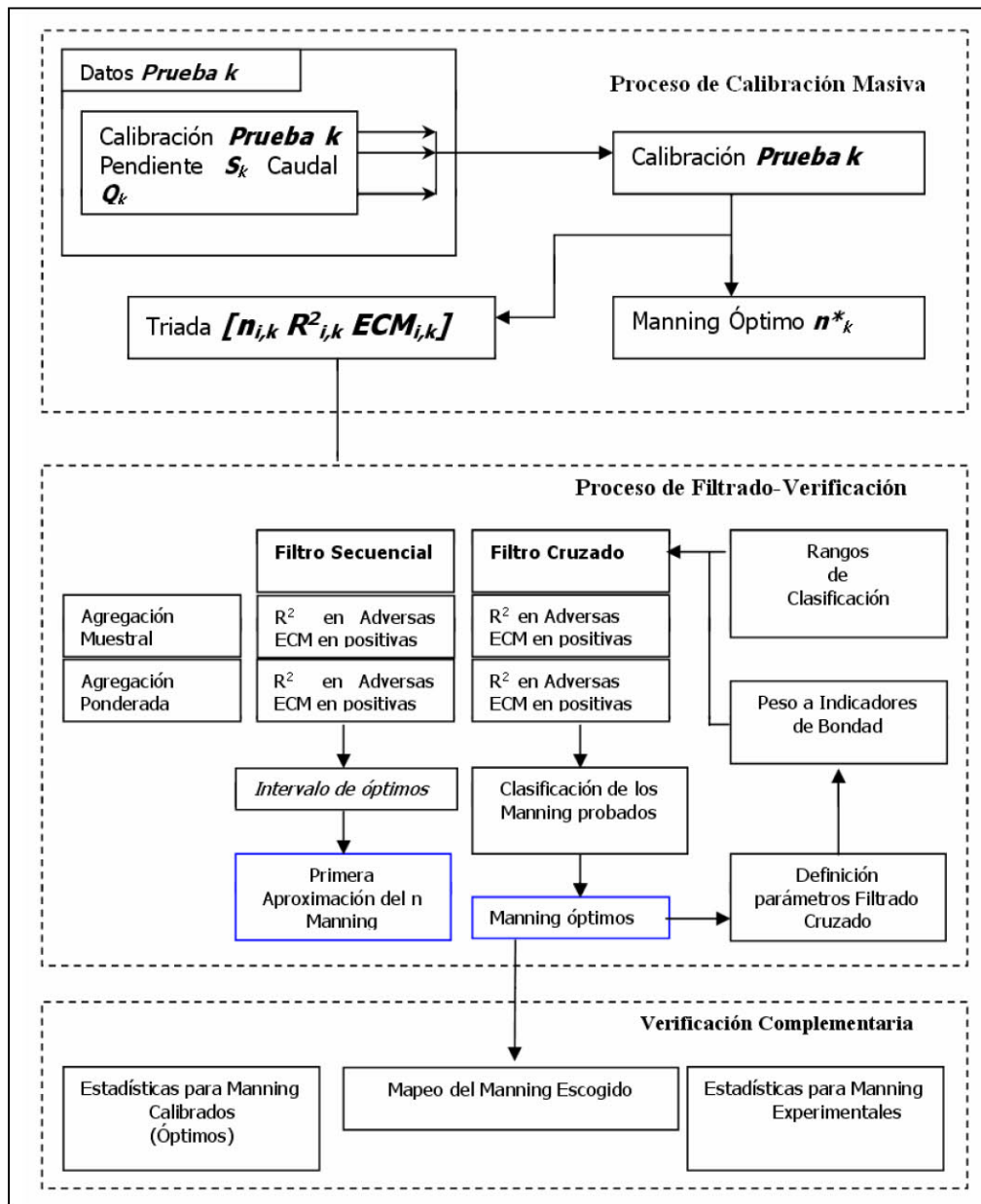


Figura 3-1 Diagrama de flujo para la determinación del Coeficiente de Manning.

El esquema muestra el paso por los procedimientos de calibración para cada prueba, y las dos metodologías de filtrado usadas, cuyos resultados son rangos óptimos de coeficientes de Manning y un valor óptimo de Coeficiente de Manning.

3.2 Justificación

La metodología adoptada es el resultado de la búsqueda de un mecanismo que permita reconocer el comportamiento del Coeficiente de Manning para varios escenarios y tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- La calibración para cada prueba (condición independiente de caudal y pendiente) genera un valor óptimo de Coeficiente de Manning válido sólo para dicha prueba, lo cual requiere la verificación de su capacidad explicativa del perfil para otros posibles eventos de caudal y pendiente.
- Experimentos hechos por Camp en 1950, demostraron la variabilidad del Coeficiente de Manning con el caudal; por lo tanto es necesario determinar un sólo valor del coeficiente que sea el más adecuado para el diseño hidráulico en alcantarillados.
- Dado que no se han desarrollado indicadores del efecto de la incertidumbre en las mediciones sobre la calibración del Coeficiente de Manning para este tipo de pruebas, se estableció la necesidad de confrontar la validez de los indicadores de ajuste de cada coeficiente con todos los eventos posibles.
- La característica principal de la tubería NOVAFORT, es su construcción de pared estructural, fabricada en un proceso de doble extrusión de PVC cuya pared exterior es corrugada y la interior es lisa.

3.3 Calibración del Coeficiente de Manning por Prueba (Condición de Caudal y Pendiente)

La calibración del Coeficiente de Manning para cada prueba consiste en hallar el parámetro de máximo indicador de ajuste para el perfil de dicha prueba, es decir, el valor que reproduzca con mayor exactitud, mediante el modelo matemático de Flujo Gradualmente Variado, el perfil del flujo medido.

Por lo tanto, se utilizaron los siguientes indicadores de ajuste: Eficiencia R^2 , y Error Cuadrático Medio ECM .

3.3.1 Indicadores de Ajuste

Error Cuadrático Medio: Es una medida media de la diferencia entre los valores calculados y los valores observados. Su formulación se muestra en la Ecuación 3-1:

$$ECM_k = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad \text{Ecuación 3-1}$$

donde: Y_i = es la profundidad observada en el piezómetro i de la prueba k .

\hat{Y}_i = es la profundidad calculada en el piezómetro i de la prueba k .

P = es el total de piezómetros utilizados en la prueba k .

Eficiencia: Es la medida del porcentaje de explicación del parámetro sobre los datos observados, es una versión normalizada del Error Cuadrático Medio, se define como: (Ver la Ecuación 3-2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^P (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^P (Y_i - Y_i^*)^2} \quad \text{Ecuación 3-2}$$

donde: Y_i = es la profundidad observada en el piezómetro i de la prueba k .
 \hat{Y}_i = es la profundidad calculada en el piezómetro i de la prueba k .
 Y_i^* = es la profundidad promedio de los datos experimentales de la prueba k .
 P = es el total de piezómetros utilizados en la prueba k .

Así, el problema de la calibración se formula como sigue:

$$\text{Max } R^2 \text{ (Min ECM)}$$

$$\frac{dY}{dx} = \frac{S_o - S_f(n, Q, Y)}{1 - F^2(n, Q, Y)} \quad \text{Ecuación 3-3}$$

$$F^2 > 1.2, \quad F^2 < 0.8 \quad \text{Ecuación 3-4}$$

El rango del n de Manning tiene en cuenta los efectos generados por las pendientes empinadas en las cuales el coeficiente tiende a tomar valores pequeños, y en el caso de las pendientes adversas donde el coeficiente tiende a aumentar. Así el problema de calibración de la condición k tiene como parámetros S_o , Q y variable de decisión (parámetro) el Coeficiente de Manning n .

3.3.2 Procedimiento para la Calibración

3.3.2.1 Alistamiento de Datos Experimentales

Para hallar el valor óptimo del Coeficiente de Manning, se requiere que los datos observados de los piezómetros sean transformados en profundidades medidas, y que los datos de medición de pendiente y caudal sean procesados para hallar dichos parámetros.

También se requiere determinar la profundidad crítica y profundidad normal para cada evento de caudal y pendiente.

3.3.2.2 Relaciones Geométricas para la Solución del Modelo Matemático

A partir de las profundidades calculadas o experimentales, se deben calcular las relaciones geométricas necesarias para la calibración, tales como:

- **Relación ángulo – profundidad:**

$$\theta = \pi + 2 \arcsen \left[\frac{2Y - D_0}{D_0} \right] \quad \text{Ecuación 3-5}$$

donde: θ = es el ángulo subtendido mayor por la lámina de agua en radianes.

Y = es la profundidad de la lámina de agua en metros.

D_0 = es el diámetro interior de la tubería en metros.

- **Área:**

$$A(Y) = \frac{1}{8} (\theta - \text{Sen} \theta) D_0^2 \quad \text{Ecuación 3-6}$$

- **Perímetro Mojado:**

$$P(Y) = \frac{1}{2} \theta D_0 \quad \text{Ecuación 3-7}$$

La Ecuación 3-7 sirve para hallar el radio hidráulico: (Ver la Ecuación 3-8)

- **Radio Hidráulico:**

$$R(Y) = \frac{A}{P} = \frac{\frac{1}{8} (\theta - \text{Sen} \theta) D_0^2}{\frac{1}{2} \theta D_0} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{\text{Sen} \theta}{\theta} \right) D_0 \quad \text{Ecuación 3-8}$$

- **Ancho Superficial:**

$$T(Y) = \left(\frac{1}{2} \text{Sen} \theta \right) D_0 \quad \text{Ecuación 3-9}$$

Las anteriores ecuaciones son utilizadas para determinar el flujo crítico y el normal (junto con la ecuación de Manning) para cada prueba.

3.3.3 Solución del Modelo Matemático para Flujo Gradualmente Variado (FGV)

Tal como se desarrolló en el capítulo 2, la ecuación gobernante para el Flujo Gradualmente Variado describe la variación de la profundidad de la lámina de agua a lo largo de la longitud del canal. En este apartado, se explicarán los métodos usados para la solución de dicha ecuación para la generación de las series de profundidades simuladas dado un Coeficiente de Manning.

3.3.3.1 Método del Paso Fijo

El método del paso fijo, es una solución numérica implícita de la ecuación de Flujo Gradualmente Variado, que usa la ecuación de energía desarrollada en el capítulo 2.1.4. Para su solución, en donde se usa una versión recursiva, en la cual, dada una profundidad para un tramo i , se halla la profundidad para el tramo $i+1$ con iteraciones sucesivas.

La versión recursiva de la ecuación de energía se muestra a continuación en la Ecuación 3-10:

$$Y_{i+1}^{k+1} = E_i(Q, S_o, n, Y_i, \Delta x) - E_{i+1}^*(Q, S_o, n, Y_{i+1}^k, \Delta x) \quad \text{Ecuación 3-10}$$

De acuerdo con la definición de la energía específica, se llega a la Ecuación 3-11:

$$E_i(Q, S_o, n, Y_i, \Delta x) = Y_i + \frac{V_i^2}{2g} + S_o \Delta x - \frac{1}{2} S_f \Delta x \quad \text{Ecuación 3-11}$$

donde: E_i = es el término de energía en el tramo i .

Y_i = es la profundidad de flujo.

V_i = es la velocidad del flujo.

S_o, S_f = Pendientes del canal y de fricción

Δx = Distancia entre tramos.

Nótese que la Ecuación 3-11 se compone de los términos profundidad, cabeza de velocidad, cabeza de posición relativa entre tramos y el término de fricción explicado por el Coeficiente de Manning, respectivamente.

La Ecuación 3-12 corresponde a la energía para el siguiente tramo $i+1$. Aquí también se tienen los términos de profundidad, cabeza de velocidad y fricción, respectivamente.

$$E_{i+1}^*(Q, S_o, n, Y_{i+1}^k, \Delta x) = \frac{V_{i,k+1}^2}{2g} - \frac{1}{2} S_{f,i+1}^k \Delta x \quad \text{Ecuación 3-12}$$

En la Ecuación 3-13 aparecen las definiciones para el término de fricción (Ley de Manning), velocidad media del flujo en el tramo i , y radio hidráulico para el tramo i respectivamente. Q es el caudal [m^3/seg], y Y_i es la profundidad de la lámina de agua en el tramo i [m].

$$Sf_i = n \frac{V_i^2}{R_i^{4/3}}, \quad V_i = \frac{Q}{A_i(Y_i)}, \quad R_i = \frac{A_i(Y_i)}{P_i(Y_i)} \quad \text{Ecuación 3-13}$$

Así, para un tramo dado i y una profundidad Y_i ; el valor de la profundidad Y_{i+1} es aquel que cumpla $Y_{i+1}^{k+1} = Y_{i+1}^k = Y_{i+1}^*$, con una semilla inicial Y_{i+1}^0 , dada.

En la Figura 3-2 se muestra el proceso de iteración sucesiva para la obtención de la profundidad Y_{i+1} dada la profundidad Y_i . Para el cálculo de un perfil completo, se toma una profundidad inicial Y_0 , que debe ser menor a la crítica para perfiles supercríticos y mayor a la crítica para perfiles subcríticos. Luego, se hallan las profundidades Y_{i+1} (para $i=1, 2, 3...$) hasta completar los puntos a lo largo del desarrollo del perfil.

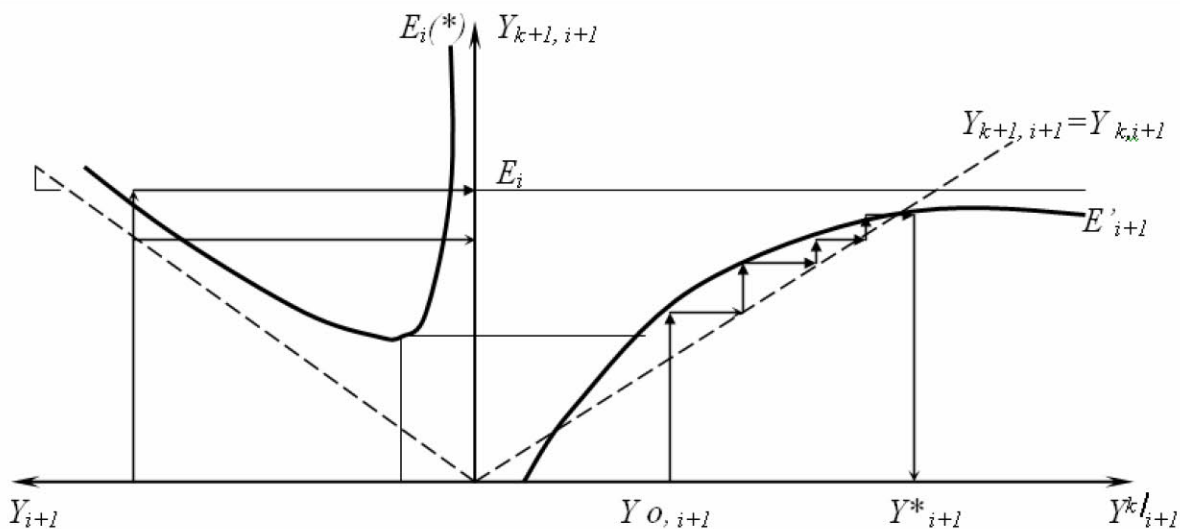


Figura 3-2 Esquema de iteraciones recursivas utilizado entre un tramo i y un tramo $i+1$ para la solución del modelo matemático.

En la Figura 3-2 se muestra la iteración para la obtención de una profundidad siguiente Y_{i+1} , dada una profundidad inicial Y_i . La iteración comienza con la curva de Energía Específica $E_i(*)$ para Y conocido. Se encuentra el valor respectivo de E_i con el cual se tiene la asíntota para la curva E'_{i+1} que configura la función recursiva $Y_{k+1,i+1}, Y_{k,i+1}$. En el segundo cuadrante dada la curva de la función recursiva se supone un valor de profundidad final $Y_{0,i+1}$ y se itera recursivamente hasta el valor Y_{i+1}^* .

3.3.3.2 Método de Integración Runge – Kutta

Como método alternativo de solución del modelo hidráulico y como forma de verificación de las soluciones calculadas por el método del paso fijo, se estimó conveniente desarrollar una integración numérica a la ecuación de Flujo Gradualmente Variado (Ecuación 2-6).

La solución de un perfil consiste en la aplicación de un esquema explícito en diferencias finitas para la ecuación de Flujo Gradualmente Variado, usando la metodología de Runge-Kutta, que permite reducir los errores de precisión en la aproximación numérica.

De esta forma la ecuación en diferencias finitas para un perfil, que se aplica también recursivamente, es la siguiente: (Ver la Ecuación 3-14)

$$Y_{i+1} = Y_i + \frac{1}{6}[f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4]\Delta x_{i,i+1} \quad \text{Ecuación 3-14}$$

Los factores f_i de la Ecuación 3-14 se definen a continuación en la Ecuación 3-15.

$$\begin{aligned} f_1 &= F(Y_i), & f_2 &= F(Y_i + f_1 \Delta x_{i,i+1}) \\ f_3 &= F(Y_i + f_2 \Delta x_{i,i+1}), & f_4 &= F(Y_i + f_3 \Delta x_{i,i+1}) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 3-15}$$

Estos factores f_i , son valores de refinación de la aproximación por diferencias finitas y el $F(Y)$ se define como:

$$F(Y) = \frac{S_0 - Sf(n, Q, Y)}{1 - F^2(n, Q, Y)} \quad \text{Ecuación 3-16}$$

La Ecuación 3-16 corresponde a la variación de la profundidad en el Flujo Gradualmente Variado, para un valor dado de Coeficiente de Manning, n ; un Caudal Q y un valor de profundidad Y .

3.3.4 Generación de las Triadas (Parámetro, Eficiencia, ECM)

Para cada prueba k (condición de Caudal Q_k y pendiente S_o^k), al solucionar el modelo hidráulico y hacer la comparación con los datos observados, se estiman los indicadores de ajuste Eficiencia R^2_i y Error Cuadrático Medio ECM_i para cada valor del Coeficiente de Manning probado. Por lo tanto, se genera el siguiente conjunto de valores (en una prueba k) para ser utilizado en el proceso de filtrado:

- Una lista de coeficientes de Manning probados n_{ik} .
- Una lista de valores de Eficiencia para cada Coeficiente de Manning probado $R^2_{i,k}$.

- Una lista de valores de Error Cuadrático Medio para cada Coeficiente de Manning probado $ECM_{i,k}$.

En el siguiente esquema (Figura 3-3), se muestra el proceso de generación de las triadas para cada prueba (evento de caudal y pendiente).

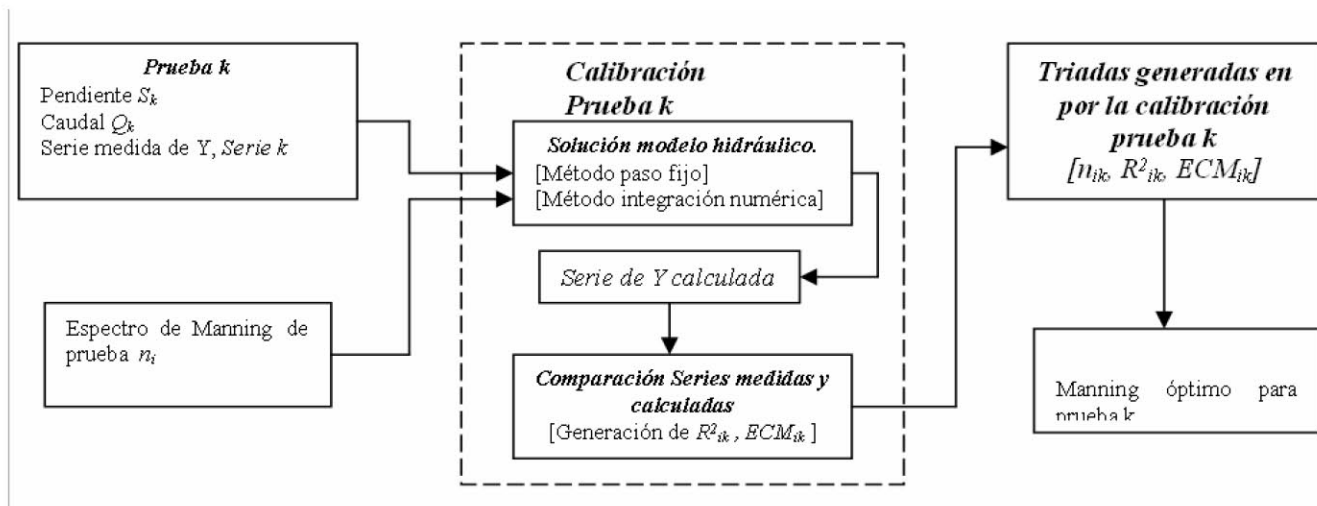


Figura 3-3 Esquema general de la calibración para las pruebas y la generación de las triadas.

Así, para cada prueba se genera una lista con tres números en cada fila, el Coeficiente de Manning probado, su eficiencia y su error cuadrático medio respecto al perfil experimental de dicha prueba. Por lo tanto, uno de esos coeficientes es el óptimo para dicha prueba.

3.3.5 Resumen de la Calibración de un Valor de n de Manning Bajo una Condición Caudal – Pendiente

La metodología para la determinación del valor óptimo del n de Manning por prueba (Prueba: Combinación Caudal – Pendiente), se resume de la siguiente manera:

- **Obtención de datos experimentales:** En este primer paso se registran los datos de caudal, pendiente y lectura de profundidad de agua en los piezómetros que determinarán el perfil experimental.
- **Cálculo del perfil teórico:** Calcular el perfil teórico para la tubería con un método de solución para Flujo Gradualmente Variado, bajo los parámetros de caudal y pendiente determinados experimentalmente y un rango de 100 valores de n de Manning. Cada combinación de Caudal – Pendiente – n de Manning, describe un perfil; entonces se tiene para cada prueba 100 perfiles teóricos.

- **Comparación de valores simulados y medidos:** Comparar cada perfil teórico con el perfil experimental, teniendo como indicadores de ajuste el Error cuadrático medio (ECM) y la Eficiencia media (R^2).
- **Escogencia del n de Manning:** Se escoge el n de Manning que genere el mejor ajuste entre el perfil teórico y el experimental.

En la Figura 3-4 se ilustra el procedimiento general para la obtención de un valor óptimo de n de Manning para una condición Caudal – Pendiente dada.

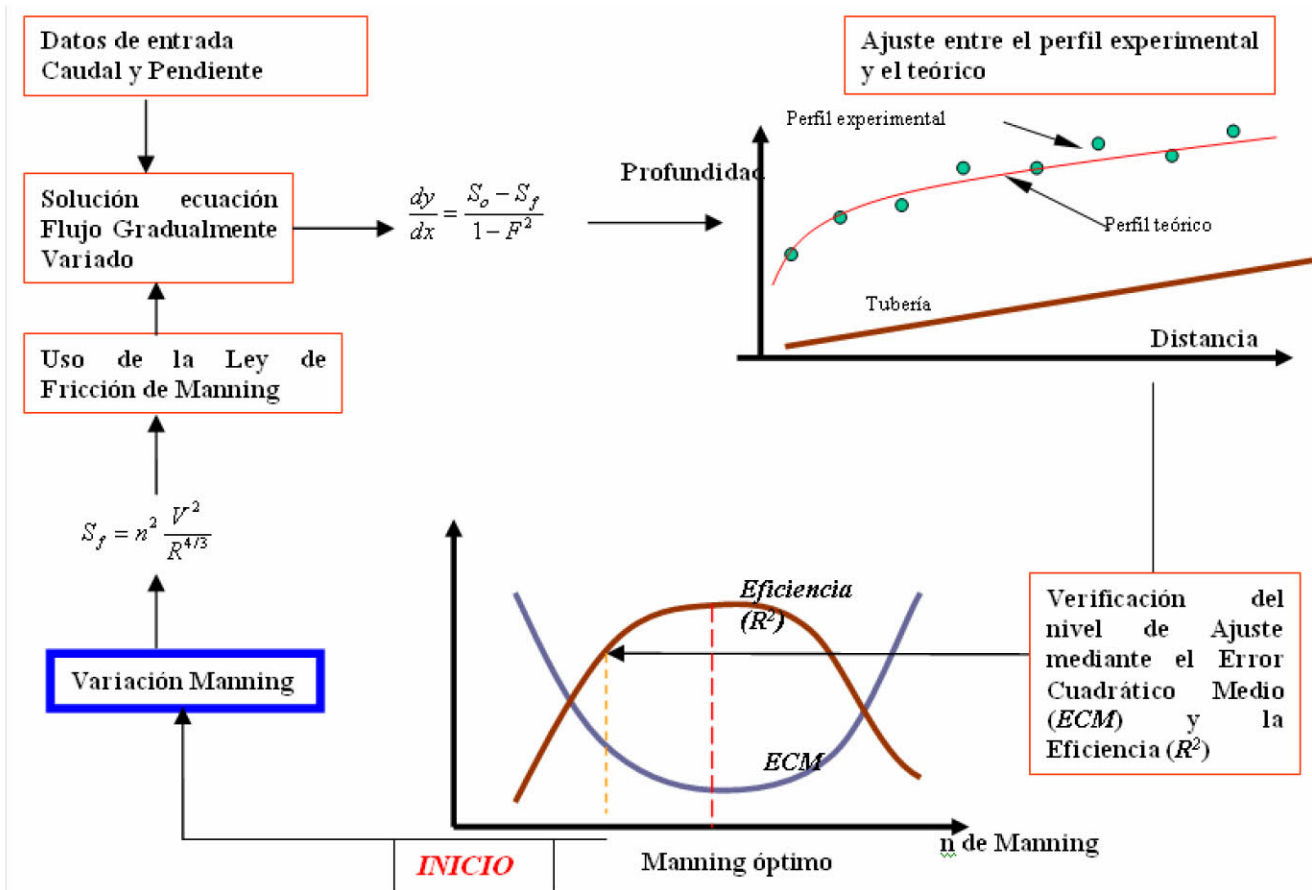


Figura 3-4 Esquema de la metodología para la determinación de un valor óptimo de n de Manning dada una condición Caudal - Pendiente.

3.4 Filtrado – Verificación de los Coeficientes Calculados

Para la escogencia del Coeficiente de Manning, se usó una filtración completa de los valores obtenidos del proceso de calibración masiva. En este apartado explica como se desarrolló esta metodología y que resultados se lograron hasta la determinación definitiva del valor más adecuado del Coeficiente de Manning.

Se utilizaron dos tipos de filtrado: Uno secuencial en el cual se agregan los indicadores de ajuste del proceso de calibración y se filtra un valor de Coeficiente de Manning. Y otro cruzado, en el cual se clasifican todos los valores de n de Manning respecto a sus indicadores para todas las pruebas y finalmente se arman unos indicadores agregados que permiten filtrar en un solo paso el más conveniente.

El alcance de esta metodología es la garantía de que el valor escogido tiene, por lo menos, el mejor comportamiento medio sobre todas las condiciones posibles de caudal y pendiente.

3.4.1 Filtrado Secuencial

El filtro secuencial se lleva en cuatro pasos; el esquema expuesto a continuación en la Figura 3-5, muestra las etapas del proceso:

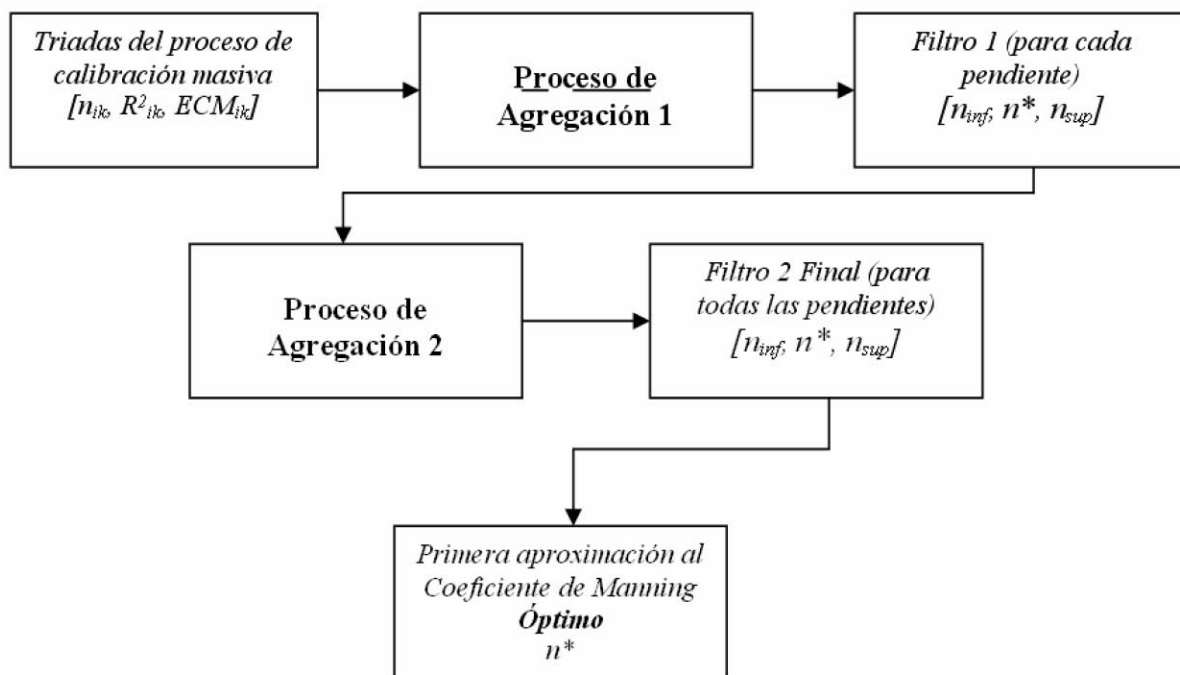


Figura 3-5 Esquema general del proceso de Filtrado Secuencial.

3.4.1.1 Primera Agregación de los Indicadores de Ajuste para Caudales, en una Pendiente

Para todas las pruebas de una pendiente S_0 , se hizo la agregación de los indicadores para generar un sólo valor de ajuste para cada Coeficiente de Manning que refleje su comportamiento en esa pendiente determinada.

La expresión para el Indicador Agregado en una pendiente, para cada valor de Coeficiente de Manning probado es la siguiente:

- Agregación con promedio muestral.

$$\overline{ECM}_i = \frac{1}{N_Q} \sum_{k=1}^{N_Q} ECM_k$$

Ecuación 3-17

- Agregación con promedio ponderado.

$$\overline{ECM}_i = \sum_{k=1}^{N_Q} ECM_k \lambda_k \quad \lambda_k = \frac{ECM_k}{\sum_{k=1}^{N_Q} ECM_k}$$

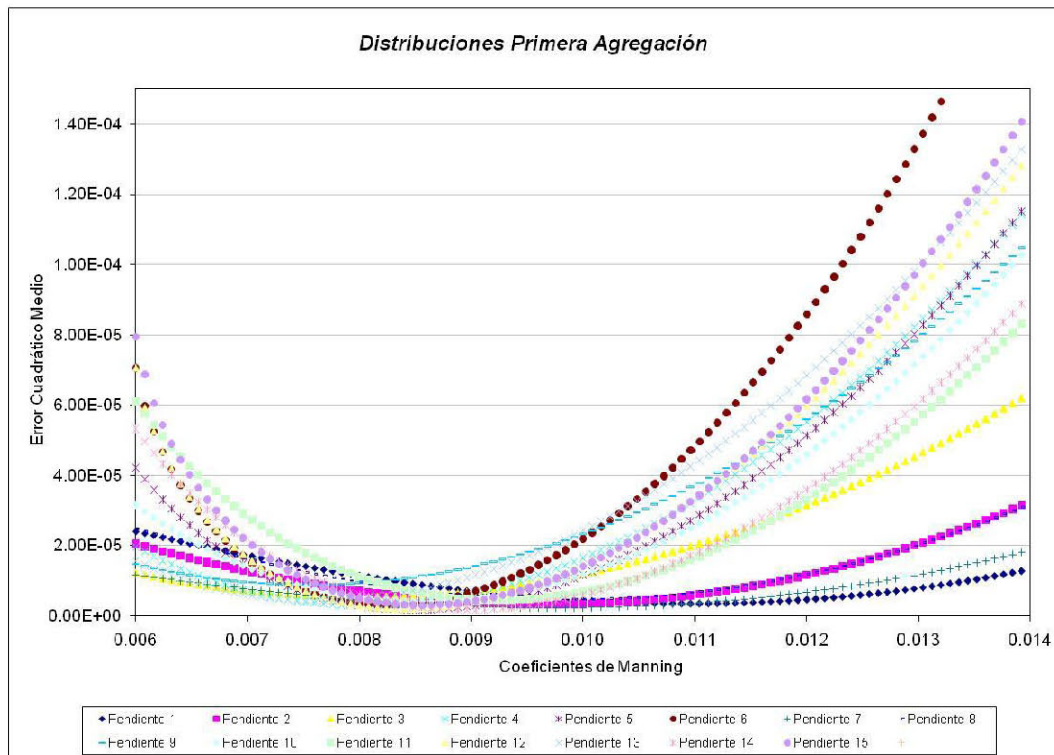
Ecuación 3-18

donde: ECM_i = es el Error Cuadrático Medio para el Coeficiente Manning i de la pendiente respectiva S_o .

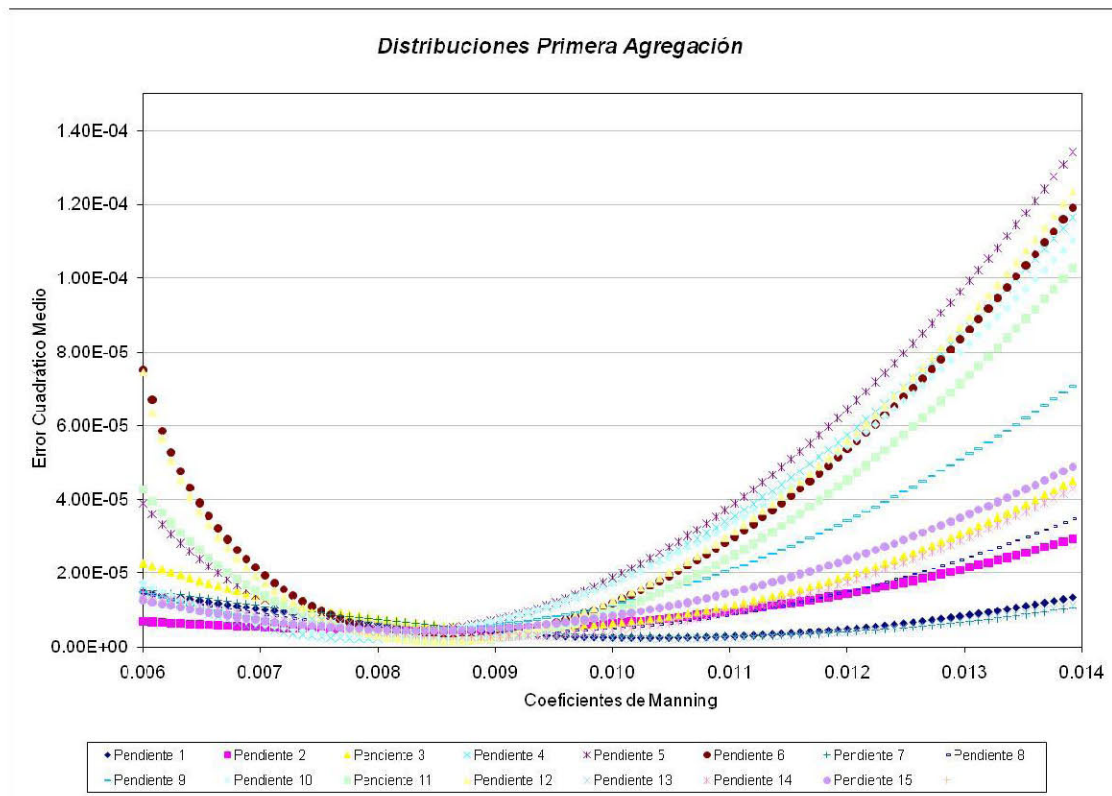
ECM_k = son los N_Q indicadores de ajuste del Coeficiente de Manning i para todos los caudales en la pendiente S_o .

A continuación se muestra la distribución del ECM para las pendientes positivas después del proceso de agregación por caudales:

Para hallar el nivel de identificabilidad del Coeficiente de Manning de cada pendiente se utilizó la metodología desarrollada por Lees & Camacho (2000) en la cual, se construye una curva acumulada de probabilidad con los valores de los indicadores agregados. Así, esta curva fue utilizada para hallar los coeficientes de Manning dentro de un intervalo de confianza entre el 5% y el 95%.



a) Resultados para las pendientes 1 - 15



b) Resultados para las pendientes 16 - 30

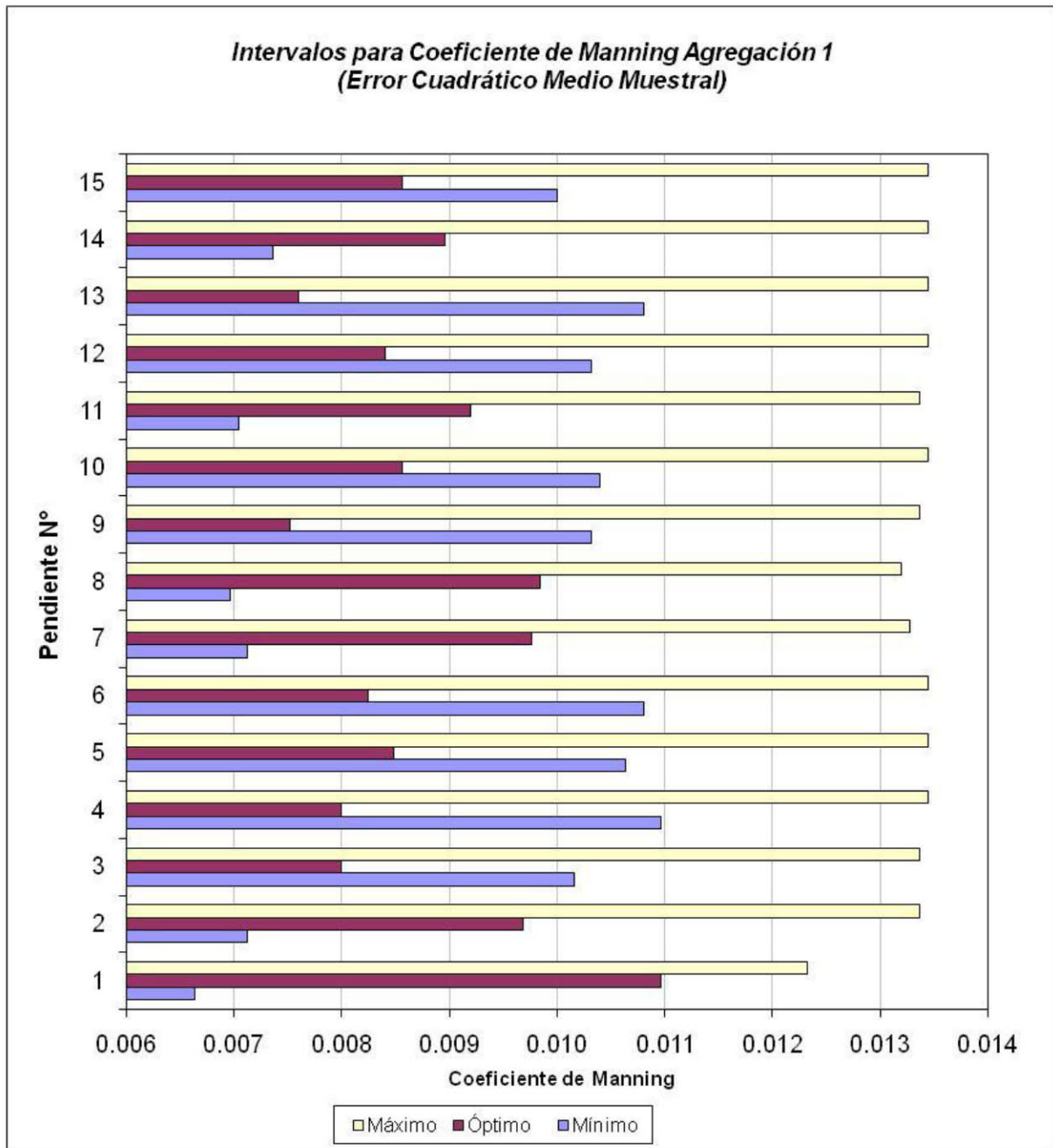
Figura 3-6 Distribuciones de los indicadores del proceso de agregación 1. Cada curva corresponde al par Coeficiente de Manning-Error cuadrático medio agregado para cada pendiente probada.

3.4.1.2 Primer Filtrado del Coeficiente de Manning Óptimo en una Pendiente

Después de hacer la agregación inicial de indicadores, se filtran los mejores coeficientes de Manning por su mejor indicador en una pendiente: Menor Error Cuadrático Medio *ECM*.

En la Figura 3-7 se muestra el resumen de los intervalos óptimos y de los valores óptimos de coeficientes de Manning para todas las pendientes.

a) Resultados para las pendientes 1 – 15:



b) Resultados para las pendientes 16 - 30:

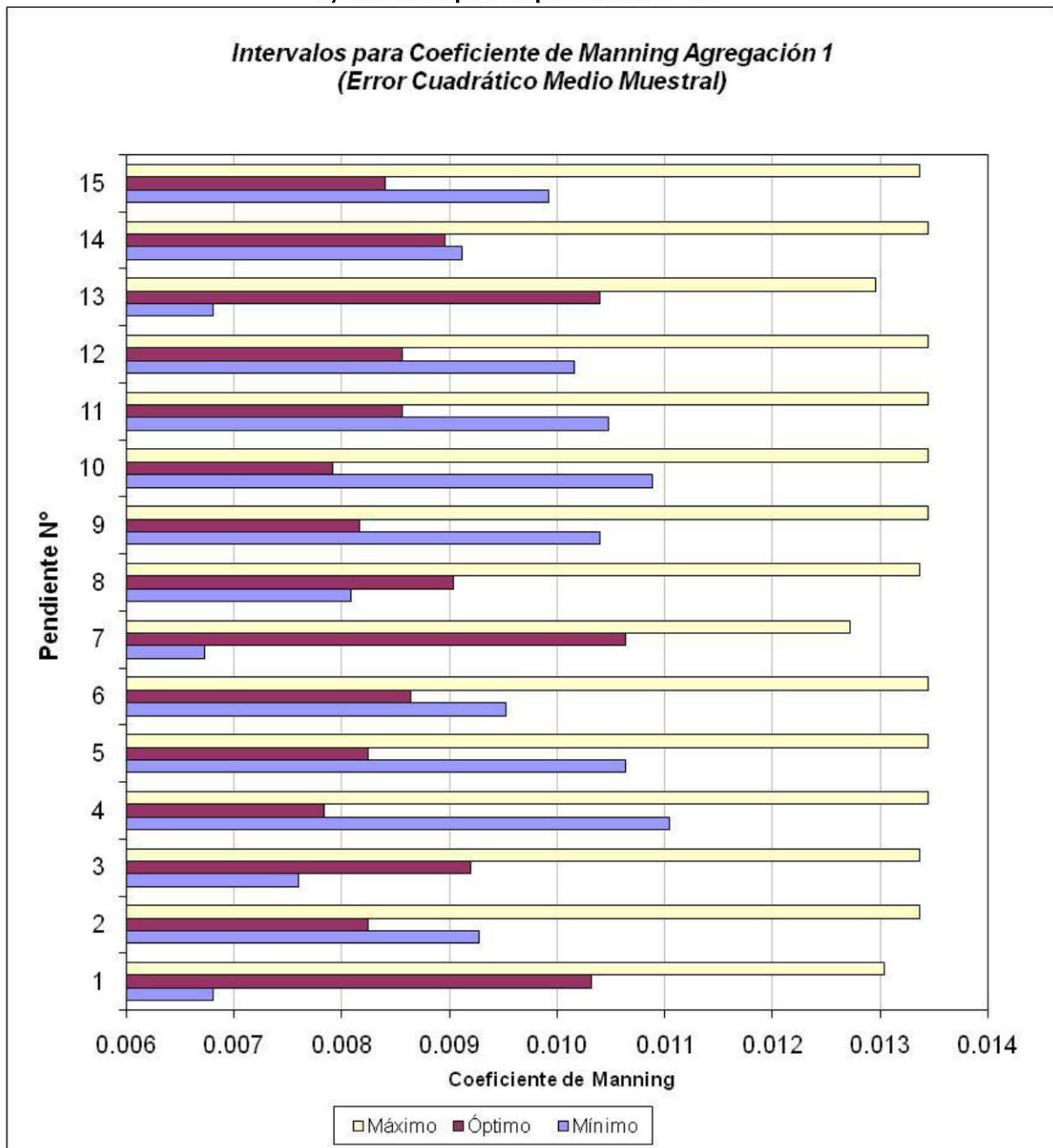


Figura 3-7 Intervalos Óptimos de coeficientes de Manning Filtro 1. Son calculados de los percentiles al 5% y al 10% de la curva acumulada para las eficiencias respectivas según el Error Cuadrático Medio. El óptimo corresponde al Coeficiente Manning de mayor indicador en su pendiente.

Estos resultados muestran los coeficientes más adecuados para cada evento posible de caudal y pendiente.

3.4.1.3 Segunda Agregación de los Indicadores Agregados para Pendientes

En este paso se consolida el filtro secuencial mediante una nueva agregación; con los indicadores agregados anteriores se hallan valores únicos de la capacidad de explicación de los perfiles, para cada Coeficiente de Manning probado.

Los indicadores finales agregados son:

- **Criterio 1:** Agregación con promedio muestral:

$$ECM_i^* = \frac{1}{N_S} \sum_{k=1}^{N_S} \overline{ECM}_k$$

Ecuación 3-19

- **Criterio 2:** Agregación con promedio ponderado:

$$ECM_i^* = \sum_{k=1}^{N_S} \overline{ECM}_k \lambda_k \quad \lambda_k = \frac{\overline{ECM}_k}{\sum_{k=1}^{N_S} \overline{ECM}_k}$$

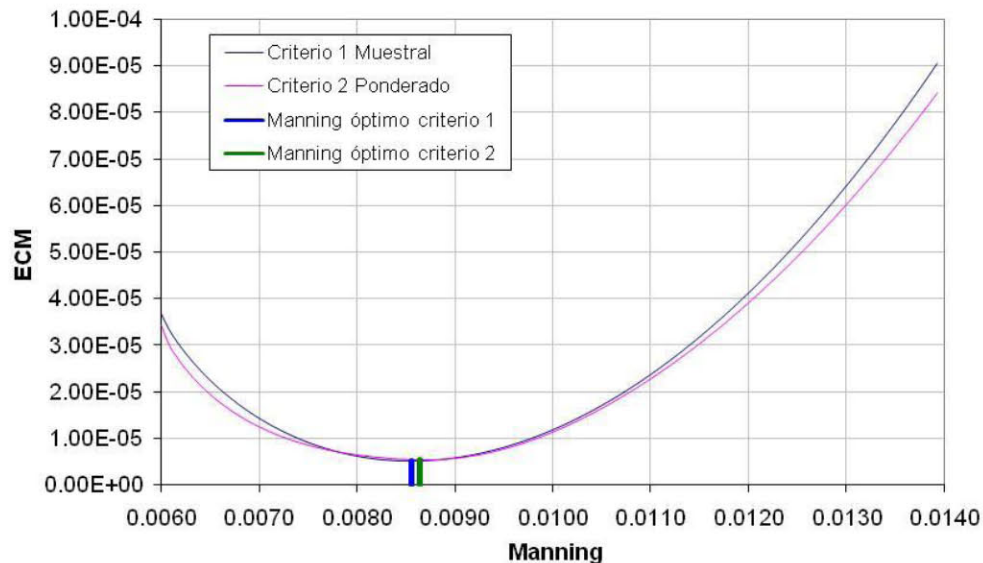
Ecuación 3-20

donde: ECM_i^* = es el Error Cuadrático Medio agregado general para el Coeficiente de Manning i desde todas las pendientes con N_S pendientes.

En las siguientes gráficas se muestran las distribuciones de los indicadores generales encontrados para los coeficientes de Manning probados:

a) Resultados para las pendientes 1 – 15:

**Distribución Indicadores Finales Segunda Agregación
(Error Cuadrático Medio)**



b) Resultados para las pendientes 16 – 30:

*Distribución Indicadores Finales Segunda Agregación
 (Error Cuadrático Medio)*

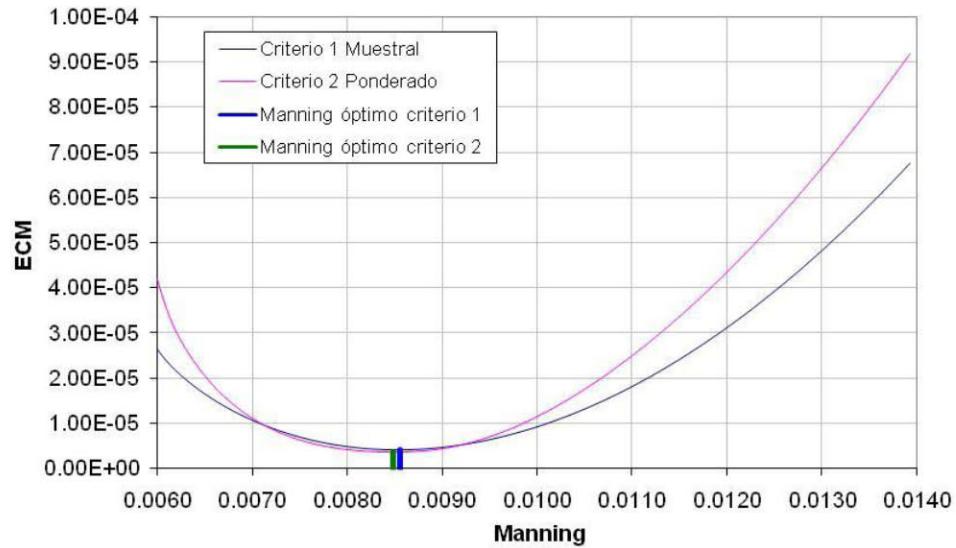
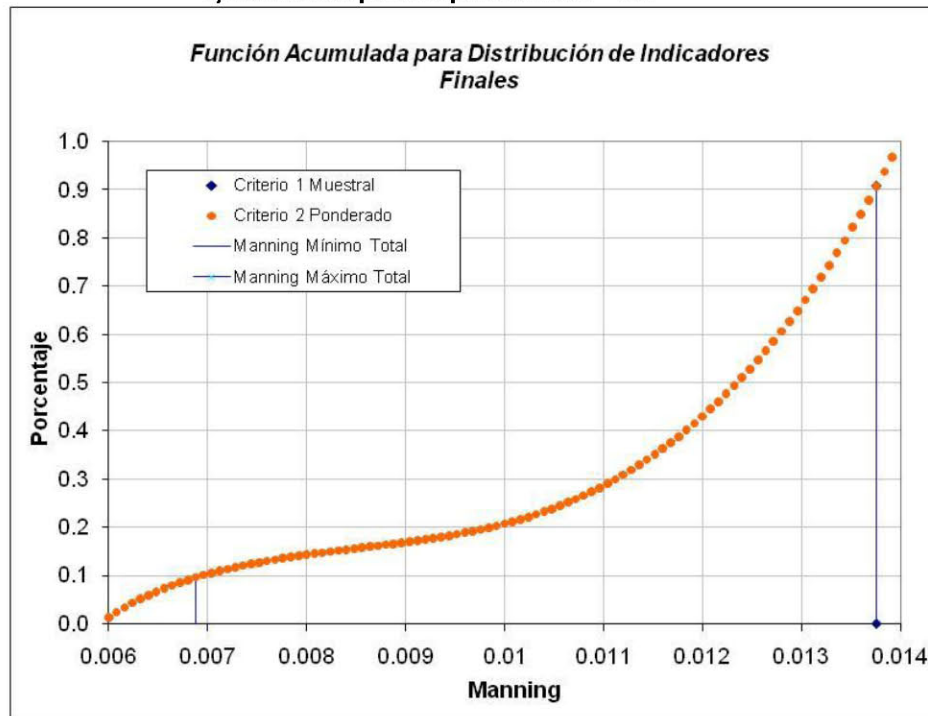


Figura 3-8 Distribución de los indicadores del proceso de agregación 2.

a) Resultados para las pendientes 1 – 15:

Función Acumulada para Distribución de Indicadores Finales



b) Resultados para las pendientes 16 – 30:

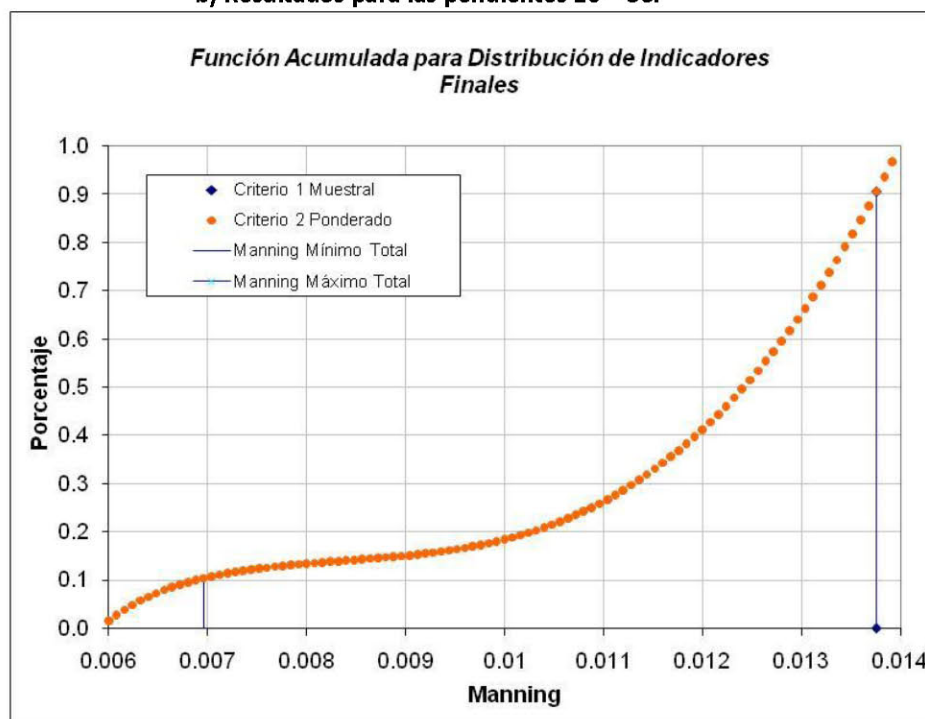


Figura 3-9 Curva acumulada con la cual se define el intervalo con percentiles 5% y 95%.

Los resultados de la Segunda Agregación de los Indicadores Agregados para Pendientes se muestran a continuación:

Tabla 3-1. Resultados de los valores de n de Manning.

Coeficiente de Manning	Pendientes 1 - 15	Pendientes 16 - 30
<i>Óptimo Criterio 1</i>	0.0086	0.0086
<i>Óptimo Criterio 2</i>	0.0086	0.0085

El mejor valor del Coeficiente de Manning obtenido mediante este método de filtrado es la primera aproximación al valor óptimo; que será confrontado con el siguiente método que es más robusto y define completamente el Coeficiente de Manning. La gran utilidad de este método es la de encontrar los coeficientes de mejor comportamiento para cada condición de caudal y pendiente, aspecto que el siguiente método lo obvia por la agregación tan fuerte.

3.4.2 Filtrado Cruzado

El filtrado cruzado se realizó en cuatro etapas, como sigue:

3.4.2.1 Verificación Cruzada

La verificación consiste en hallar el comportamiento de un Coeficiente de Manning en todos los eventos realizados de caudal y pendiente, para evaluar después su relevancia como posible valor de rugosidad. En el esquema siguiente se muestra la estructura del procedimiento de verificación cruzada.

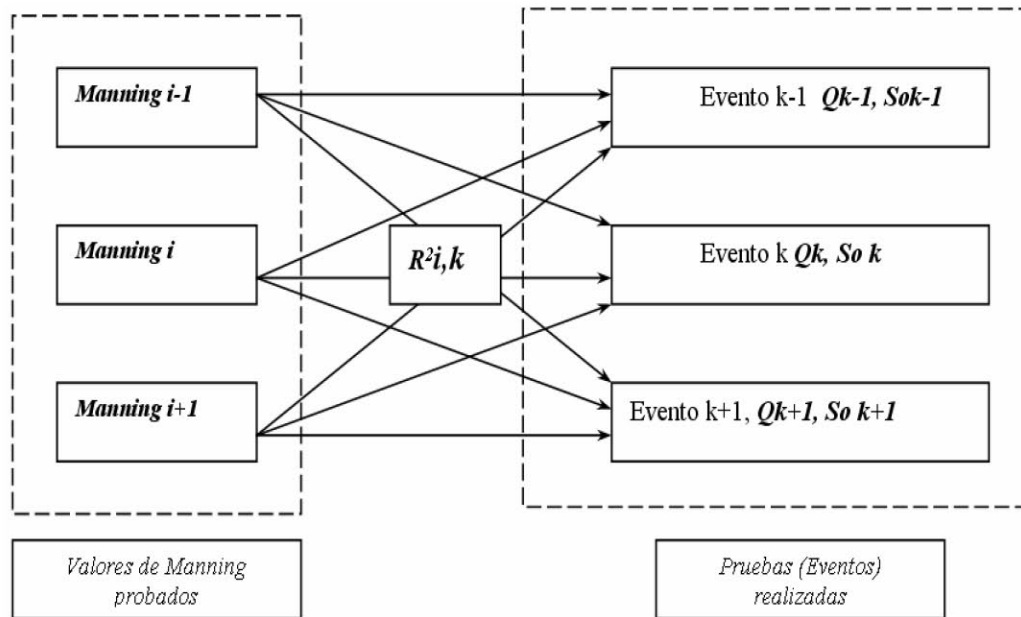


Figura 3-10 Esquema de verificación cruzada para los coeficientes de Manning.

De esta forma, la verificación cruzada ya viene incluida en los listados de triadas generados en el proceso de calibración masiva para todas la pruebas, pues son los valores que describen el comportamiento de los coeficientes de Manning probados para todos los eventos.

3.4.2.2 Clasificación de Coeficientes de Manning

Como primer paso para la evaluación cruzada de todos los coeficientes de Manning probados, se clasificaron según el nivel de explicación de perfil para todas las pruebas. Esto se realiza mediante los siguientes pasos para cada Coeficiente de Manning:

- **Primero:** Para la clasificación se seleccionan tres rangos de Eficiencias posibles. Un rango para coeficientes de Manning no deseables Tipo I, con eficiencias bajas; un rango para coeficientes de Manning aceptables Tipo II y un rango con eficiencias altas para coeficientes de Manning deseables Tipo III.

- **Segundo:** Evaluación de cada uno de los valores de eficiencias del Coeficiente de Manning que ejerce sobre todas las pruebas, contando cuantos valores quedan ubicados en cada uno de los rangos definidos anteriormente.
- **Tercero:** Al determinar el número de eficiencias que queda, en cada uno de los rangos, el mayor número de éstos define la calidad del Coeficiente de Manning. Por lo tanto, si su mayor número de eficiencias está dentro del rango Tipo I, es un coeficiente no deseable; ó si su mayor número de eficiencias está dentro del rango Tipo III es un coeficiente deseable.
- **Cuarto:** Determinación de la Versatilidad. Dados los números de eficiencias contadas en cada uno de los rangos de clasificación, el mayor número de estos define el porcentaje de eventos respectivos con una explicación mínima. Así la Versatilidad es el porcentaje de estos eventos del total de eventos realizados. Este indicador explica cual es la habilidad del Coeficiente de Manning para describir, por lo menos con un mínimo de eficiencia, todos los eventos posibles de caudal y pendiente. Este indicador se define como:

$$\text{Indicador de Versatilidad} = \frac{\text{Max}(A_{\text{rango-}i})}{A_{\text{total}}} \quad \text{Ecuación 3-21}$$

donde: $A_{\text{Rango } i}$ = es el valor de eficiencias contadas en el rango i para el Coeficiente de Manning evaluado.

A_{Total} = es el número total de pruebas realizadas (eventos de caudal y pendiente).

Por lo tanto, el indicador es número entre 0 y 1 donde el Coeficiente de Manning más versátil es aquel cuyo mayor número de eventos explicados, con un mínimo de eficiencia, tiende a ser el total de eventos realizados en el laboratorio.

Como explicación gráfica del significado del Indicador de Versatilidad, a continuación se muestra un esquema descriptivo en la Figura 3-11.

En la Figura 3-12 se muestra el proceso de clasificación de los coeficientes de Manning probados y el respectivo cálculo de sus indicadores de Versatilidad.

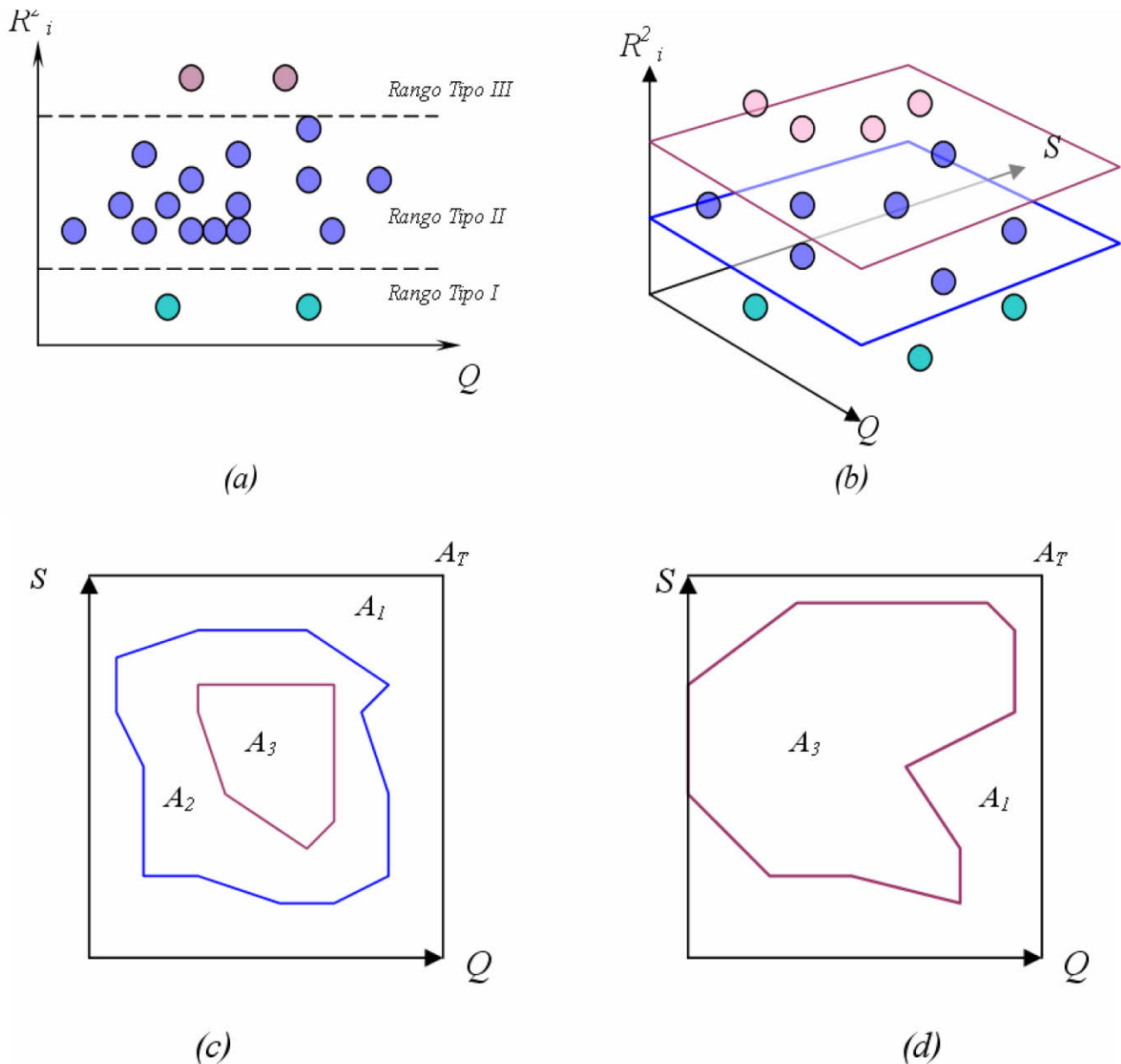


Figura 3-11 (a) Se muestra la ubicación de las eficiencias, respecto a los rangos de clasificación, en el plano caudal-eficiencias. (b) Se muestra la distribución de las eficiencias, para un n de Manning, en el plano caudal-pendiente (plano que describe el total de eventos). (c) Se muestra la distribución de eficiencias en el plano caudal-pendiente, respecto a todos los eventos posibles A_T . (d) Se muestra la distribución de eficiencias para un n de Manning muy versátil, es decir, con la mayoría de eficiencias en casi todos los eventos caudal-pendiente.

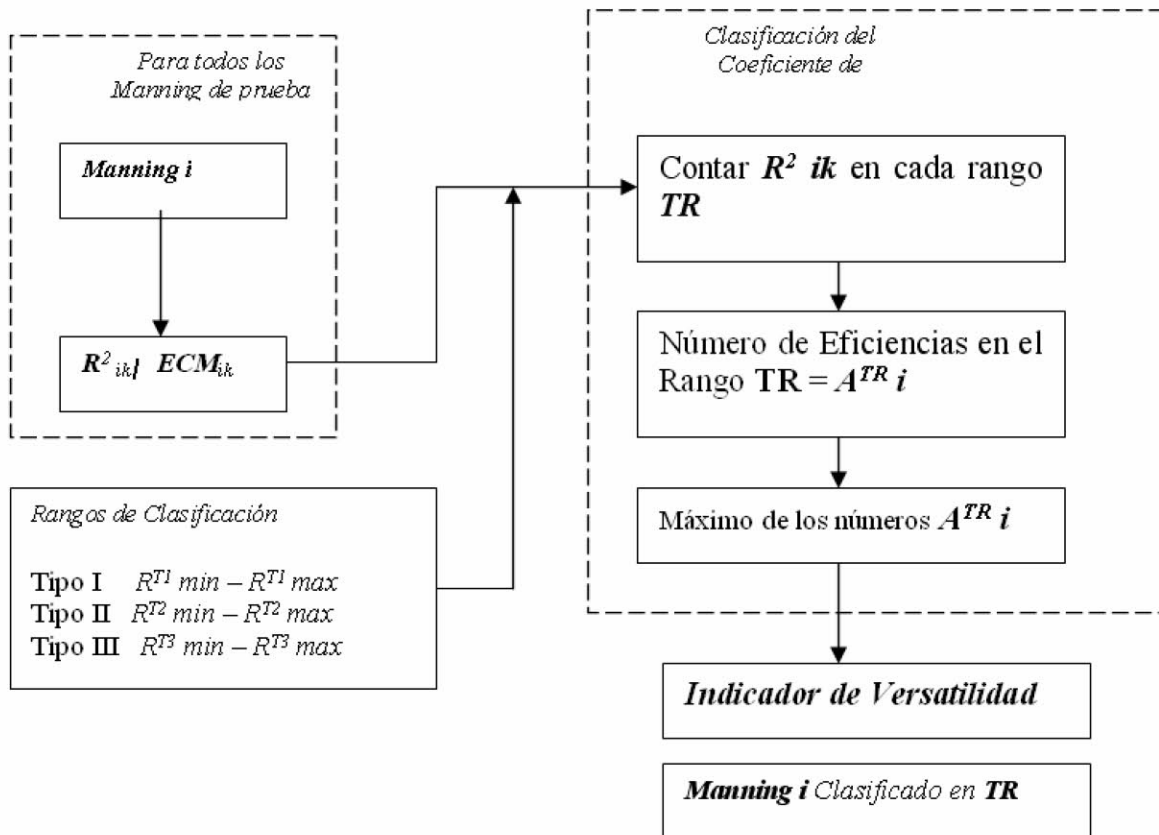


Figura 3-12 Esquema de verificación cruzada para los coeficientes de Manning.

3.4.2.3 Agregación de Indicadores de Eficiencia

Dado el anterior indicador de capacidad de explicación para todos los eventos, la Versatilidad, se requiere otro indicador que muestre el nivel de explicación media total sobre todos los eventos, para así tener los dos indicadores de comportamiento de todos los coeficientes de Manning probados: Uno que muestre qué cantidad de eventos es capaz de explicar con un nivel mínimo aceptable (Versatilidad) y otro que muestre el nivel de explicación media para todos los eventos (Eficiencia media total).

Los indicadores agregados de eficiencia media total se definen así:

- **Agregación con promedio muestral:** (Criterio 1)

$$R_i^{*2} = \frac{1}{M} \sum_{p=1}^{N_s} \sum_{q=1}^{N_Q} R_{pq}^2$$

Ecuación 3-22

donde: M = es el total pruebas realizadas definido así: $M = \sum_{S=1}^{N_S} N_Q^S$ pues para cada pendiente se tienen distintos números de caudales medidos.

- **Agregación con promedio ponderado:** (Criterio 2)

$$R_i^{*2} = \sum_{p=1}^{N_S} \sum_{q=1}^{N_Q} R_{pq}^2 \lambda_{pq}$$

Ecuación 3-23

donde:

$$\lambda_{pq} = \frac{1/2(\overline{R_p} + \overline{R_q})}{\sum_{p=1}^{N_S} \sum_{q=1}^{N_Q} R_{pq}^2}$$

es el factor de ponderación con:

$$\overline{R_p} = \frac{1}{N_Q} \sum_{q=1}^{N_Q} R_{pq}^2$$

y

$$\overline{R_q} = \frac{1}{N_S} \sum_{p=1}^{N_S} R_{pq}^2$$

que son los promedios en pendientes y caudales respectivamente.

R_i^{*2} es la Eficiencia agregada total para el Coeficiente de Manning i para todos los eventos realizados, con N_Q caudales y N_S pendientes.

Como el indicador de ajuste para estas pendientes es el ECM , se definió un valor de eficiencia así:

$$R_{i,k}^2 = 1 - \frac{ECM_{i,k}}{ECM_{\max}}$$

Ecuación 3-24

donde: $R_{i,k}^2$ = es la eficiencia explicada del Coeficiente de Manning i para el evento o prueba k .

$ECM_{i,k}$ = es el valor del Error Cuadrático Medio respectivo.

ECM_{max} = es el error cuadrático medio máximo registrado en todas las verificaciones cruzadas.

Los Indicadores de Eficiencia agregados son los mismos citados en el apartado anterior. Hay que anotar que para el caso de los indicadores ponderados se construyeron matrices donde cada celda correspondía a un valor de caudal y pendiente respectivamente, de tal forma que se agrupaban las pruebas según rangos de caudales especificados.

3.4.2.4 Filtrado del Coeficiente de Manning Óptimo Final

El valor del Coeficiente de Manning más adecuado es aquel que posea la mayor Versatilidad y la mayor Eficiencia, por lo tanto se define el siguiente Índice de Bondad de Ajuste general para todos los coeficientes de Manning probados:

$$\text{Índice de Bondad de Ajuste} = \Phi \text{ Indicador de Versatilidad} + (1-\Phi) \text{ Indicador de Eficiencia} \quad \text{Ecuación 3-25}$$

donde: Los indicadores de Versatilidad y Eficiencia son los explicados en el apartado anterior.

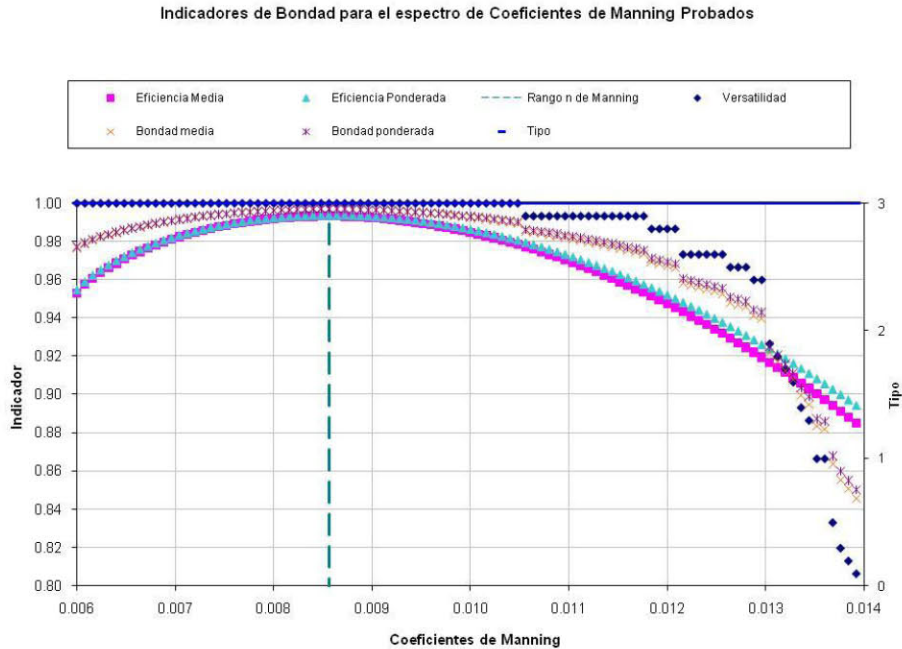
Φ = es el valor de peso de ponderación que se da a cada uno de los indicadores (se tomó el valor de 0.5, es decir la versatilidad y la eficiencia tienen el mismo peso), si se quiere un Coeficiente de Manning muy versátil pero menos eficiente, ó un Coeficiente de Manning muy eficiente pero poco versátil.

En la Figura 3-13 se resumen el proceso de filtrado cruzado. Contienen la siguiente información:

- Las curvas parabólicas son las eficiencias agregadas (promediadas muestral y ponderada), determinadas según la Ecuación 3-22 y la Ecuación 3-23.
- Las curvas discontinuas más bajas (azul) corresponden al Indicador de Versatilidad para el espectro del n de Manning probado.(Ecuación 3-22)
- Las curvas discontinuas intermedias (café y roja) son las correspondientes al Indicador de Bondad Total que se define según la Ecuación 3-25 y que muestra el Coeficiente de Manning Óptimo general para todas las pruebas. Por lo tanto, para las condiciones detalladas de este filtrado es de 0.013 con una bondad total de 86 %.
- La línea azul con ordenada a la derecha muestra el tipo de Coeficiente de Manning según los rangos impuestos para el filtrado; por lo tanto barre los rangos de coeficientes de Manning con una clasificación específica (Tipo I, Tipo II o Tipo III).

A continuación se muestran los resultados resumidos del proceso de filtrado cruzado.

a) Resultados para las pendientes 1 – 15:



b) Resultados para las pendientes 16 – 30:

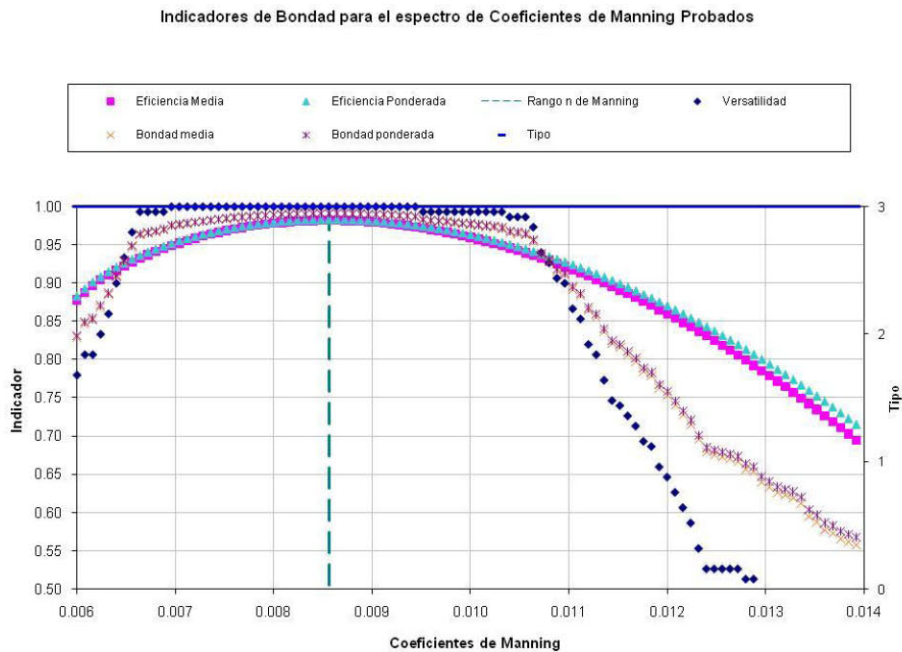


Figura 3-13 Resultados de la filtración cruzada.

Finalmente, el resultado del filtrado con rangos de Eficiencias sobre el Error Cuadrático Medio arrojan un valor de Coeficiente de Manning con un valor cercano a **0.0086** para todas las pendientes, con una precisión de [0.001].

3.5 Coeficiente de Manning Definitivo

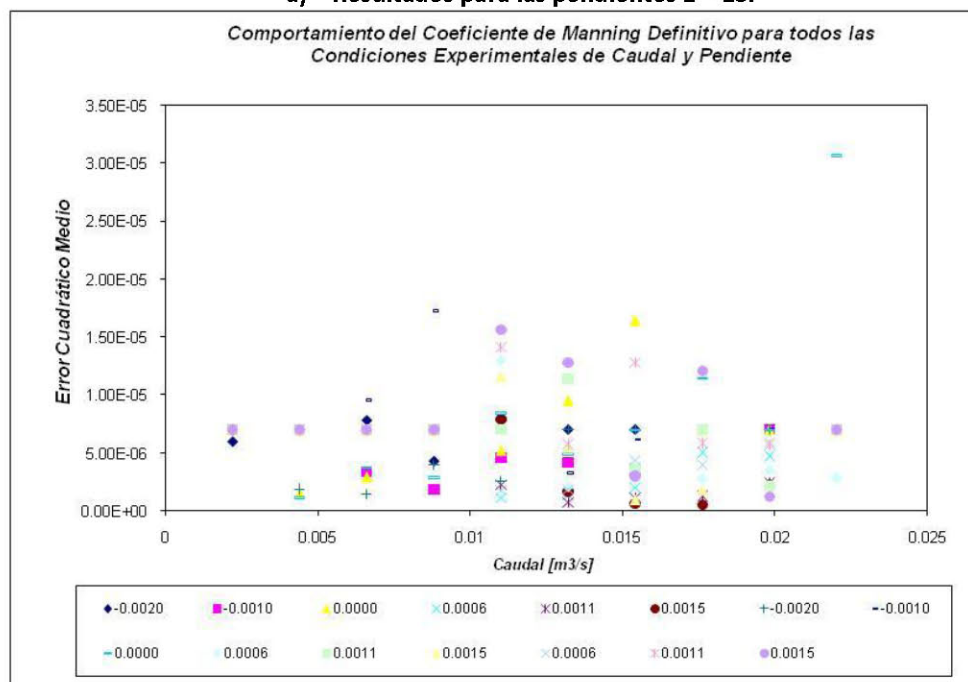
Al determinar los mejores valores de coeficientes de Manning mediante los métodos de filtrado, se recomienda usar el siguiente valor de Coeficiente de Manning con los respectivos valores mínimos y máximos admisibles, para la Tubería de Alcantarillado NOVAFORT de 200mm:

Coeficiente de Manning 0.0086 con precisión de [+/- 0.0001]

El Coeficiente de Manning recomendado tiene una habilidad de explicación del 100% de posibles eventos de caudal y pendiente, con eficiencias mayores o iguales al 99.35% y una eficiencia media calculada en laboratorio de 99.4%.

Según los datos experimentales y los análisis desarrollados, este valor del Coeficiente de Manning sólo es valido para valores superiores a 1.5 L/s y fueron válidos hasta caudales de 21 L/s. El rango del Coeficiente de Manning utilizado para los análisis presentados en este capítulo fue de 0.006 a 0.014. En la Figura 3-14 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los Errores Cuadráticos Medios determinados con el valor de n de Manning óptimo para las combinaciones de Caudal y Pendiente analizadas.

a) Resultados para las pendientes 1 – 15:



b) Resultados para las pendientes 16 – 30:

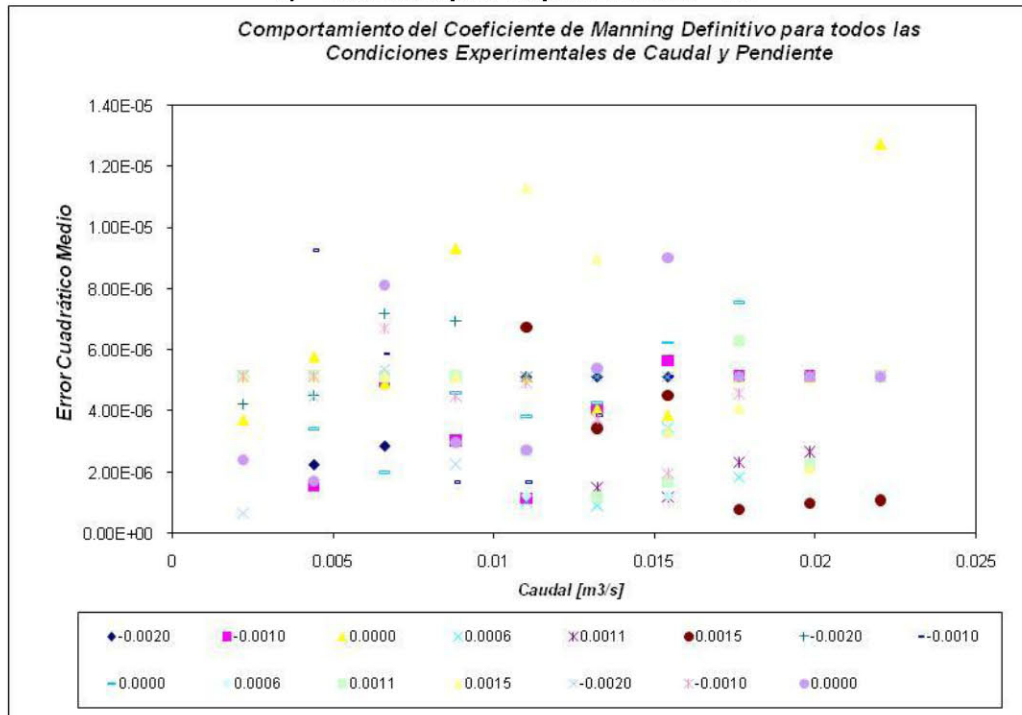


Figura 3-14 Eficiencias netas $ECM_{i,k}$ para todas las pruebas k hechas del Coeficiente de Manning Óptimo.

4 Relaciones entre Caudal, Pendientes y el Coeficiente de Manning Encontradas

En la Figura 4-1 se muestran los valores del coeficiente de rugosidad óptimos para cada pendiente y caudal (extraídos del proceso de calibración masiva). Se aprecia la dispersión y amplio rango de los valores de n de Manning, teniendo una tendencia incremental a medida que el caudal disminuye, especialmente para valores menores a 6 L/s. Para valores mayores a 12 L/s, el coeficiente de Manning tiende a estabilizarse alrededor de un valor cercano a 0.008 para todas las pendientes.

Analizando la gráfica **Figura 4-1**, se puede observar que en las pruebas de pendiente adversa se obtienen valores del coeficiente de Manning más altos que en las otras condiciones, esto se podría justificar en el hecho de que en estas pruebas se utilizaron caudales y velocidades de menor magnitud para evitar la presurización de la tubería. Según Waslki et al. (2006) “para flujo hidráulicamente liso en todos los diámetros de tuberías, el n de Manning decrece con el incremento de la velocidad. (Al menos teóricamente, n debe ser independiente de la velocidad en tuberías rugosas; que es, la zona plana del diagrama de Moody). En tuberías rugosas, el n es esencialmente constante para velocidades que varían de (0.3 a 4.0 m/s). Sin embargo, para tuberías lisas, n decrece de 0.010 a 0.0080 en el mismo rango de velocidad”. En general se observa una disminución en la dispersión de los datos con el aumento del caudal, principalmente para caudales mayores a 12 l/s.

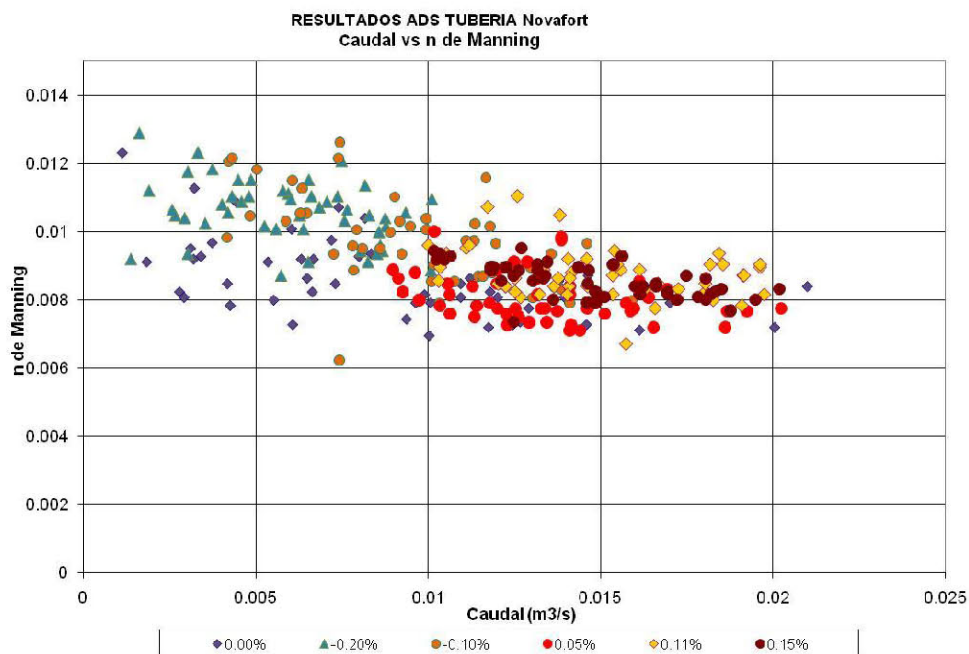


Figura 4-1 Coeficientes de Manning óptimos para todas las condiciones de pendiente y caudal.

Debido a que no es posible identificar un valor único del coeficiente de Manning, ya que es un parámetro que no sólo depende de la rugosidad de la tubería sino también del flujo (o de la hidráulica) que pasa por esta, es necesario el filtrado de todos los valores posibles para la obtención de un coeficiente de rugosidad que represente el comportamiento hidráulico de la mayoría de los casos, brindando una buena eficiencia en cuanto al ajuste del perfil del flujo. El método de filtrado y escogencia del n de Manning óptimo para la tubería NOVAFORT de 200mm se mostró previamente en el capítulo 3.

Para las pendientes experimentadas se determinó un rango de n de Manning basado en el indicador de ajuste (ECM error cuadrático medio) con el objeto de incluir la incertidumbre de un valor único, teniendo valores 5% y 95% de percentil con respecto al óptimo. Adicionalmente, en la Figura 4-2 se puede observar la tendencia del valor del coeficiente de rugosidad a medida que la pendiente es más empinada.

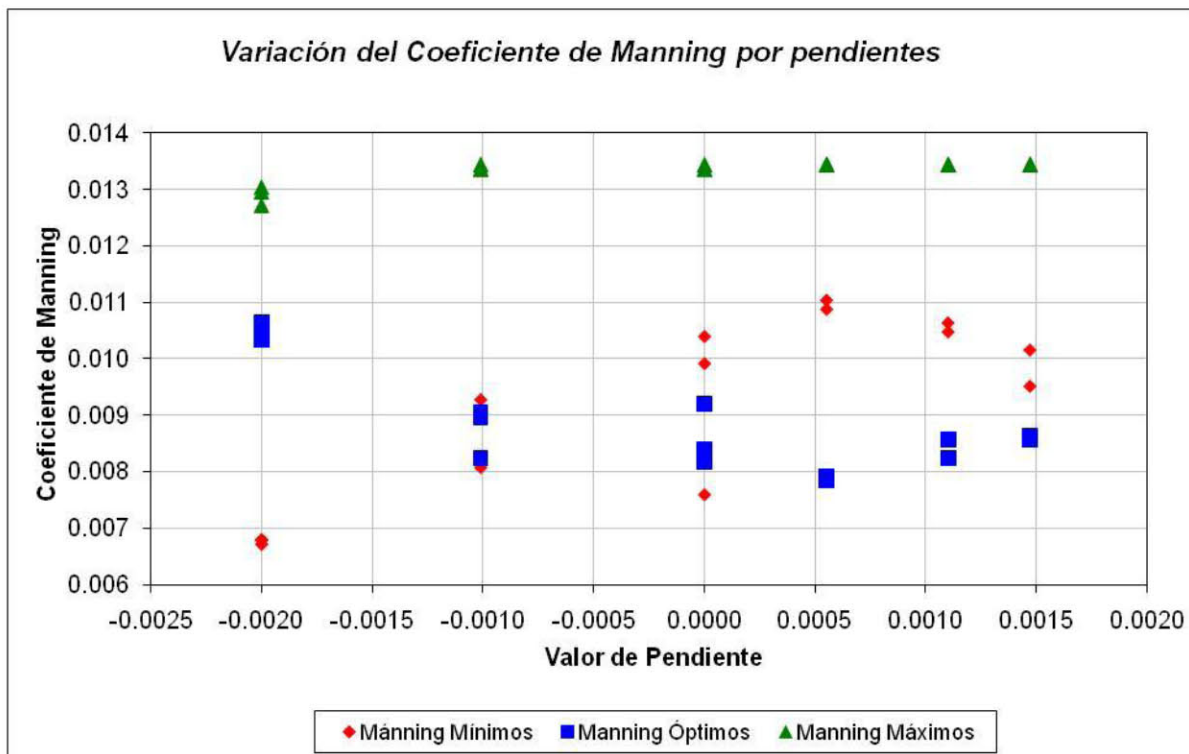


Figura 4-2 Variación del n de Manning respecto a la pendiente.

La Figura 4-2 muestra que el rango de los valores del Coeficiente de Manning no depende de la pendiente con que fluye el agua en la tubería alcantarillado. Los análisis realizados para identificar el valor que mejor represente la rugosidad del sistema, determinaron el rango de Coeficientes de Manning por pendientes.

5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones referentes al valor de Coeficiente de Manning determinado de diseño

Del análisis hecho, se estableció que el valor más adecuado del Coeficiente de Manning para diseño es **0.0086**. Según los datos experimentales y los análisis realizados, este valor del Coeficiente de Manning es válido para valores superiores a 1.15 L/s y fueron comprobados para caudales de hasta 21 L/s. El rango del Coeficiente de Manning utilizado para los análisis presentados fue de 0.006 a 0.014.

5.2 Recomendaciones acerca de la tubería y del montaje

De las experiencias adquiridas con la tubería NOVAFORT de 200mm para sistemas de alcantarillado, se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La tubería requiere de un soporte continuo para evitar deflexiones que afecten los resultados experimentales. En el montaje físico construido en las instalaciones de la Universidad de los Andes en conjunto con PAVCO S.A., se tiene una cercha metálica que soporta la tubería sólo en unos cuantos puntos a lo largo de su longitud. Por el peso del agua la tubería sufrió de deflexiones entre los puntos de apoyo. Esto generó problemas por no contar con una pendiente uniforme a lo largo de la tubería, donde se trató de uniformizar con las herramientas que se tenían disponibles.
- Se recomienda utilizar una pantalla de aquietamiento o algún otro sistema, que permita que la lámina de agua en el tanque aguas arriba sea más uniforme y permita una entrada del flujo a la tubería más suave, y de esta manera lograr un mejor desarrollo de los perfiles en la tubería.

5.3 Recomendaciones sobre el manejo de pendientes y caudales con el Coeficiente de Manning para diseño

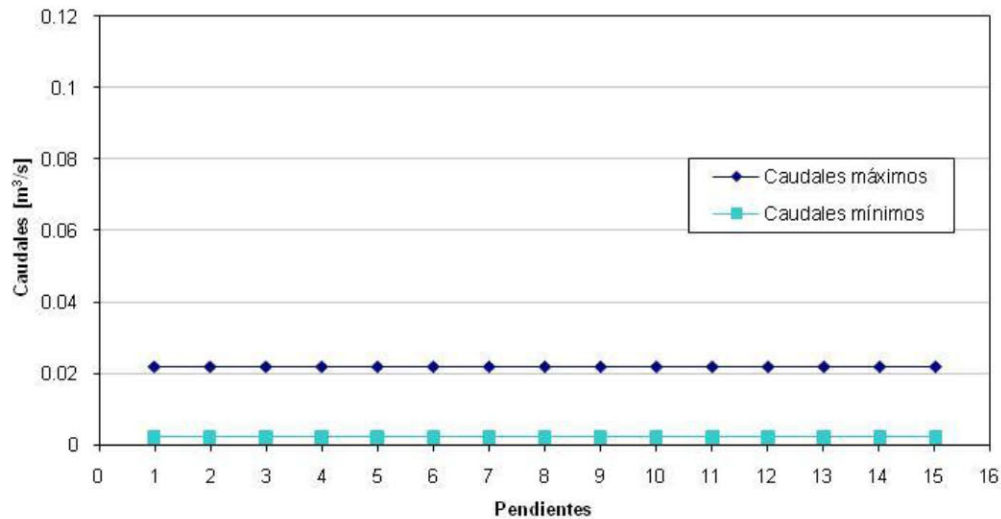
Para diseño, dado que se tiene un aumento considerable del Coeficiente de Manning cuando el caudal es menor a 6 L/s y sólo se tiene un Coeficiente de Manning óptimo, se hace necesario tener en cuenta para qué caudales y pendientes este coeficiente se comporta en una forma permisible, es decir, permite una descripción buena de los perfiles y por lo tanto del caudal de flujo uniforme.

Para determinar las condiciones de caudal-pendiente válidas, se establecieron los caudales para los cuales las eficiencias eran mayores a un nivel permisible en cada pendiente experimental. Así, se tienen los siguientes intervalos de caudal válidos para el

Coefficiente de Manning óptimo en cada una de las pendientes experimentales, que fueron determinados para eficiencias mayores al 85%.

a) Resultados para las pendientes 1 – 15:

Rangos de caudales válidos para el Coeficiente de Manning óptimo de diseño con agua residual



b) Resultados para las pendientes 16 – 30:

Rangos de caudales válidos para el Coeficiente de Manning óptimo de diseño con agua residual

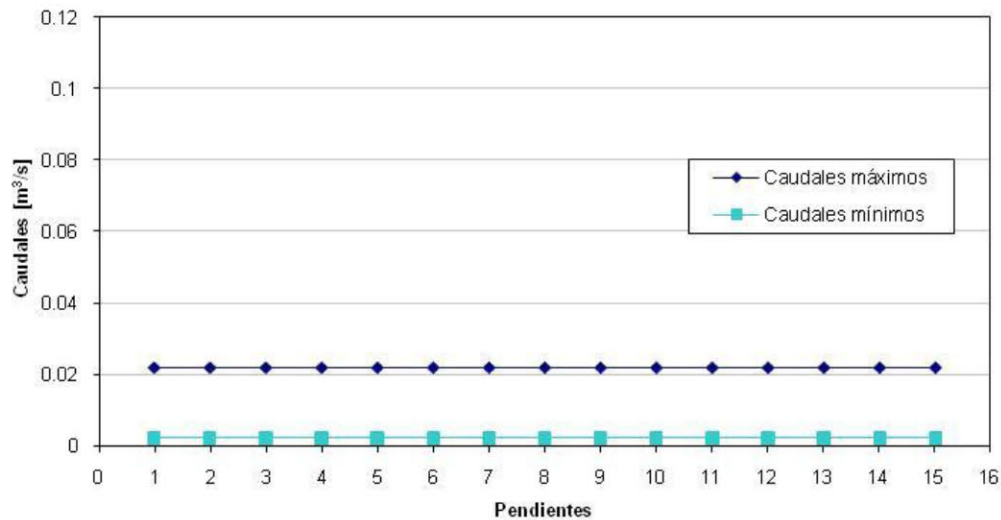


Figura 5-1 Rangos de validez para caudales en cada una de las 8 pendientes probadas, para el Coeficiente de Manning óptimo. Se establecieron con eficiencias mayores al 85%.

6 Referencias

- CHOW, Ven Te. Open Channel Hydraulics. Mc Graw Hill. 1956.
- HENDERSON, Open Flow Channel. McMillan Publishing Co. New York. 1966.
- JINETE, L.A. Determinación de la Rugosidad en Tuberías de Alcantarillado de PVC y Gres. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil. 1995
- LEURO, Sandra. Determinación de la Rugosidad en Tuberías de Alcantarillado de PVC. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil. 1996
- SALDARRIAGA, J. Determinación del Coeficiente de Manning Tubería de Alcantarillado NOVALOC Tubería Definitiva (Color Amarillo Crema). Proyecto Cátedra PAVCO. Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA. Universidad de los Andes. 2002.
- SALDARRIAGA, J. Determinación del Coeficiente de Manning Tubería de Alcantarillado NOVALOC Tubería Inicial (Color Blanco). Proyecto Cátedra PAVCO. Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA. Universidad de los Andes. 2002.
- STROGATZ, Steve. Nonlinear Dynamics and Chaos with Applications to Physics, Biology, Chemistry and Engineering. Addison-Wesley Publishing Co. USA. 1994.
- THOERSTEN, and LEES. Montecarlo Analysis Toolbox User Manual. Civil and Environmental Engineering Department. Imperial College School of Science Technology and Medicine. 2001.
- UNGER, Michelle y HERNANDEZ, Oscar. Determinación de la Rugosidad en Tuberías de Alcantarillado de PVC Novafort de 10". Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil. 1996.
- Walski, Thomas. Barnard, Thomas. Harold, Eric. Merritt, LaVere. Walker, Noah. Whitman, Brian. *“Wastewater Collection System Modeling and Design”*. Bentley Institute Press. 2006.