

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



CÁTEDRA PAVCO

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE n DE
MANNING Y LA RUGOSIDAD ABSOLUTA k_s
DE LA TUBERÍA NOVAFORT DE 250 mm**

Informe Final

Bogotá, Agosto de 2009



Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	5
1.1	ANTECEDENTES.....	5
1.2	OBJETIVOS.....	6
1.2.1	<i>Objetivo General.....</i>	6
1.2.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	6
1.3	CONTENIDO DEL INFORME.....	6
1.4	EQUIPO DE TRABAJO.....	7
1.4.1	PAVCO S.A.....	7
1.4.2	Universidad de los Andes.....	8
2	MODELO HIDRÁULICO Y FÍSICO.....	9
2.1	MODELO MATEMÁTICO.....	9
2.1.1	<i>Ecuación de Continuidad.....</i>	9
2.1.2	<i>Ecuación de Cantidad de Movimiento.....</i>	10
2.1.3	<i>Ecuación de Energía.....</i>	10
2.1.4	<i>Ecuación del Flujo Gradualmente Variado (FGV).....</i>	10
2.1.5	<i>Leyes de Fricción.....</i>	12
2.1.5.1	<i>Ley de Fricción para la determinación del n de Manning.....</i>	12
2.1.5.2	<i>Ley de Fricción para la determinación de la rugosidad absoluta k_s.....</i>	13
2.1.5.3	<i>Método Numérico para la solución de la ecuación de Flujo Gradualmente Variado.....</i>	15
2.2	MODELO FÍSICO.....	16
2.2.1	<i>Montaje para las Pruebas.....</i>	16
2.2.2	<i>Descripción de las Mediciones.....</i>	22
2.2.2.1	<i>Medición de Caudales.....</i>	23
2.2.2.2	<i>Medición de la Pendiente.....</i>	23
2.2.2.3	<i>Medición de la Profundidad del Flujo.....</i>	24
3	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE N DE MANNING.....	26
3.1	METODOLOGÍA.....	26
3.2	JUSTIFICACIÓN.....	28
3.3	CALIBRACIÓN DEL COEFICIENTE N DE MANNING POR PRUEBA (CONDICIÓN DE CAUDAL Y PENDIENTE) 28	
3.3.1	<i>Indicadores de Ajuste.....</i>	28
3.3.2	<i>Procedimiento para la Calibración.....</i>	30
3.3.2.1	<i>Alistamiento de Datos Experimentales.....</i>	30
3.3.2.2	<i>Relaciones Geométricas para la Solución del Modelo Matemático.....</i>	30
3.3.3	<i>Solución del Modelo Matemático para Flujo Gradualmente Variado (FGV).....</i>	31
3.3.3.1	<i>Método del Paso Fijo.....</i>	31
3.3.3.2	<i>Método de Integración Runge – Kutta.....</i>	33
3.3.4	<i>Generación de las Triadas (Parámetro, Eficiencia, ECM).....</i>	34
3.3.5	<i>Resumen de la Calibración de un Valor de n de Manning Bajo una Condición Caudal – Pendiente.....</i>	35
3.4	FILTRADO – VERIFICACIÓN DE LOS COEFICIENTES CALCULADOS.....	36
3.4.1	<i>Filtrado Secuencial.....</i>	37
3.4.1.1	<i>Primera Agregación de los Indicadores de Ajuste para Caudales, en una Pendiente.....</i>	37
3.4.1.2	<i>Primer Filtrado del Coeficiente n de Manning Óptimo en una Pendiente.....</i>	38
3.4.1.3	<i>Segunda Agregación de los Indicadores Agregados para Pendientes.....</i>	41
3.4.2	<i>Filtrado Cruzado.....</i>	44
3.4.2.1	<i>Verificación Cruzada.....</i>	44

3.4.2.2	Clasificación de Coeficientes n de Manning	45
3.4.2.3	Agregación de Indicadores de Eficiencia	47
3.4.2.4	Filtrado del Coeficiente n de Manning Óptimo Final.....	49
3.5	COEFICIENTE n DE MANNING DEFINITIVO	51
4	DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD ABSOLUTA K_s	53
4.1.1	<i>Flujo hidráulicamente liso (FHL)</i>	53
5	RELACIONES ENTRE CAUDAL, PENDIENTES Y EL COEFICIENTE n DE MANNING ENCONTRADO	55
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
6.1	CONCLUSIONES REFERENTES AL VALOR DE COEFICIENTE n DE MANNING Y LA RUGOSIDAD ABSOLUTA K_s DETERMINADOS DE DISEÑO	57
6.2	RECOMENDACIONES SOBRE EL MANEJO DE PENDIENTES Y CAUDALES CON EL COEFICIENTE n DE MANNING Y LA RUGOSIDAD ABSOLUTA K_s PARA DISEÑO.....	57
7	BIBLIOGRAFÍA	59
8	ANEXOS	60
8.1	ANEXO 1.....	60

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1.	SECCIÓN EN UNA TUBERÍA CON FLUJO GRADUALMENTE VARIADO (FGV).....	11
FIGURA 2-2.	ESTRUCTURA GENERAL DEL MONTAJE.	17
FIGURA 2-3.	ESTRUCTURA GENERAL DEL MONTAJE. VISTA FRONTAL.....	17
FIGURA 2-4.	PERFILES EN FLUJO GRADUALMENTE VARIADO (FGV).	19
FIGURA 2-5.	TABLERO DE PIEZÓMETROS	20
FIGURA 2-6.	DETALLE PIEZÓMETROS EN EL FONDO DE LA TUBERÍA.	20
FIGURA 2-7.	DETALLE DE LA UNIÓN DE TUBERÍA CON EL TANQUE DE ALIMENTACIÓN.....	21
FIGURA 2-8.	DETALLE DE LA CERCHA METÁLICA Y LA DIFERENCIAL.....	22
FIGURA 2-9.	ESQUEMA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PENDIENTE EN UN TRAMO DE TUBERÍA.	24
FIGURA 3-1	DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE n DE MANNING.....	27
FIGURA 3-2.	ESQUEMA DE ITERACIONES RECURSIVAS UTILIZADO ENTRE UN TRAMO I Y UN TRAMO $I+I$ PARA LA SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.	33
FIGURA 3-3.	ESQUEMA GENERAL DE LA CALIBRACIÓN PARA LAS PRUEBAS Y LA GENERACIÓN DE LAS TRIADAS.	34
FIGURA 3-4.	ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE UN VALOR ÓPTIMO DE n DE MANNING DADA UNA CONDICIÓN CAUDAL - PENDIENTE.....	36
FIGURA 3-5.	ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO DE FILTRADO SECUENCIAL.	37
FIGURA 3-6.	DISTRIBUCIONES DE LOS INDICADORES DEL PROCESO DE AGREGACIÓN 1. CADA CURVA CORRESPONDE AL PAR COEFICIENTE n DE MANNING-ERROR CUADRÁTICO MEDIO AGREGADO PARA CADA PENDIENTE PROBADA. TUBERÍA NOVAFORT PARA ALCANTARILLADO DE 250 MM.	39
FIGURA 3-7.	INTERVALOS ÓPTIMOS DE COEFICIENTES n DE MANNING FILTRO 1. TUBERÍA NOVAFORT PARA ALCANTARILLADO DE 250 MM.	40



FIGURA 3-8. DISTRIBUCIÓN DE LOS INDICADORES DEL PROCESO DE AGREGACIÓN 2. TUBERÍA NOVAFORT PARA ALCANTARILLADO DE 250 MM 42

FIGURA 3-9. CURVA ACUMULADA CON LA CUAL SE DEFINE EL INTERVALO CON PERCENTILES 5% Y 95%. TUBERÍA NOVAFORT PARA ALCANTARILLADO DE 250 MM..... 43

FIGURA 3-10. ESQUEMA DE VERIFICACIÓN CRUZADA PARA LOS COEFICIENTES N DE MANNING. 44

FIGURA 3-11. INDICADOR DE VERSATILIDAD. 46

FIGURA 3-12. ESQUEMA DE VERIFICACIÓN CRUZADA PARA LOS COEFICIENTES N DE MANNING. 47

FIGURA 3-13. RESULTADOS DE LA FILTRACIÓN CRUZADA. TUBERÍA NOVAFORT PARA ALCANTARILLADO DE 250 MM. 50

FIGURA 3-14. EFICIENCIAS NETAS ECM_{ix} PARA TODAS LAS PRUEBAS k HECHAS DEL COEFICIENTE N DE MANNING ÓPTIMO. TUBERÍA NOVAFORT PARA ALCANTARILLADO DE 250 MM..... 52

FIGURA 4-1. RELACIÓN ENTRE LA RUGOSIDAD RELATIVA Y LA SUBCAPA LAMINAR VISCOSA. (SALDARRIAGA, 2007) 54

FIGURA 5-1. COEFICIENTES N DE MANNING ÓPTIMOS PARA TODAS LAS CONDICIONES DE PENDIENTE Y CAUDAL. TUBERÍA NOVAFORT PARA ALCANTARILLADO DE 250 MM..... 55

FIGURA 5-2. VARIACIÓN DEL N DE MANNING RESPECTO A LA PENDIENTE. TUBERÍA NOVAFORT PARA ALCANTARILLADO DE 250 MM 56

FIGURA 6-1. RANGOS DE VALIDEZ PARA CAUDALES EN CADA UNA DE LAS 6 PENDIENTES PROBADAS, PARA EL COEFICIENTE N DE MANNING ÓPTIMO. TUBERÍA NOVAFORT PARA ALCANTARILLADO DE 250 MM..... 58

FIGURA 8-1. PERFIL DE FLUJO PARA LA TUBERÍA NOVAFORT DE 250 MM PARA UNA PENDIENTE DE -0.16% 61

FIGURA 8-2. COEFICIENTE N DE MANNING ÓPTIMO OBTENIDO PARA UNA PENDIENTE DE -0.16%..... 62

FIGURA 8-3. PERFIL DE FLUJO PARA LA TUBERÍA NOVAFORT DE 250 MM PARA UNA PENDIENTE DE -0.47%. 62

FIGURA 8-4. COEFICIENTE N DE MANNING ÓPTIMO OBTENIDO PARA UNA PENDIENTE DE -0.47%..... 63

FIGURA 8-5. PERFIL DE FLUJO PARA LA TUBERÍA NOVAFORT DE 250 MM PARA UNA PENDIENTE DE 2.74 % . 63

FIGURA 8-6. COEFICIENTE N DE MANNING ÓPTIMO OBTENIDO PARA UNA PENDIENTE DE 2.74%..... 64

FIGURA 8-7 PERFIL DE FLUJO PARA LA TUBERÍA NOVAFORT DE 250 MM PARA UNA PENDIENTE DE 2.85%... 64

FIGURA 8-8. COEFICIENTE N DE MANNING ÓPTIMO OBTENIDO PARA UNA PENDIENTE DE 2.85%..... 65

FIGURA 8-9. PERFIL DE FLUJO PARA LA TUBERÍA NOVAFORT DE 250 MM PARA UNA PENDIENTE DE 3.3%.... 65

FIGURA 8-10. COEFICIENTE N DE MANNING ÓPTIMO OBTENIDO PARA UNA PENDIENTE DE 3.3%..... 66

Índice de Tablas

TABLA 2-1. CANTIDAD DE PIEZÓMETROS Y SU POSICIÓN 18

TABLA 3-1. RESULTADOS DE LOS VALORES DE N DE MANNING..... 44

TABLA 4-1. RUGOSIDAD ABSOLUTA k_s OBTENIDO PARA UNA PRUEBA PARTICULAR..... 53



1 INTRODUCCIÓN

El estudio sobre la determinación de la rugosidad en tuberías de alcantarillado NOVAFORT de 250 mm, 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 2009 - 2010.

El presente informe expone los antecedentes de este tipo de investigaciones, explica el modelo físico y matemático utilizado para el cálculo del Coeficiente n de Manning y la rugosidad absoluta k_s , los resultados obtenidos y sus respectivos análisis y finalmente presenta las conclusiones y algunas recomendaciones.

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 año 2001: Dentro de las investigaciones hechas por la cátedra PAVCO, se hicieron 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 año 2001: Se calculó la primera aproximación a la determinación del coeficiente n de Manning para tuberías NOVALOC BLANCO de perfil estructural.
- En el año 2002: Se determinó el coeficiente n de Manning 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 año 2007: Se determinó el coeficiente n de Manning y la rugosidad absoluta k_s , para la tubería ADS (Interior corrugado) de 600 mm. Dicha tubería es fabricada en polietileno de alta densidad.
- En el año 2008: Se determinó el coeficiente n de Manning y la rugosidad absoluta k_s , para la tubería ADS (Interior liso) de 600 mm. Dicha tubería es fabricada en polietileno de alta densidad. Adicionalmente se realizó una investigación bibliográfica sobre el comportamiento estructural de esta tubería instalada, y se



encontraron varias investigaciones realizadas en los Estados Unidos, donde se constataron varias de sus falencias, algunas de las cuales fueron verificadas en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Los Andes.

- En el año 2009: Se determinó el coeficiente n de Manning y la rugosidad absoluta k_s , para la tubería GERFOR de 600 mm. Dicha tubería presenta un perfil con un interior liso, semejando las características de la tubería NOVALOC de 600 mm fabricada por PAVCO S.A.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo de este proyecto es determinar el valor del coeficiente n de Manning y la rugosidad absoluta k_s mediante modelación física y análisis de los datos obtenidos, en la tubería NOVAFORT con 250 milímetros de diámetro externo y 227 milímetros de diámetro real interno, fabricada por la empresa PAVCO S.A.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar el coeficiente n de Manning y la rugosidad absoluta k_s de una tubería de alcantarillado NOVAFORT de 250 milímetros.
- 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 n de Manning y la rugosidad absoluta k_s de la Tubería de Alcantarillado NOVAFORT de 250 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, tal como se muestra a continuación.

- 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 y procedimiento de operación.

- En el Capítulo 3 se muestra el procedimiento seguido para la determinación del Coeficiente n 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 n de Manning.
- En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos para la determinación de la rugosidad absoluta k_s y el procedimiento de obtención del k_s definitivo.
- En el Capítulo 5 se presentan mediante gráficos detallados las relaciones entre el caudal, pendientes, Coeficiente n de Manning y la rugosidad absoluta k_s encontradas en la investigación.
- En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones encontradas durante el desarrollo del proyecto.

1.4 Equipo de Trabajo

El equipo de trabajo del proyecto “Determinación del Coeficiente n de Manning y de la rugosidad absoluta k_s de la Tubería de Alcantarillado NOVAFORT de 250 mm” estuvo conformado por personal de PAVCO S.A. y un equipo de trabajo de la Universidad de los Andes. Las personas vinculadas al proyecto se mencionan a continuación.

1.4.1 PAVCO S.A.

Presidente Tubosistemas AMANCO Colombia

Carlos M. González Vega

Vicepresidente Comercial

Ernesto Guerrero Molina

Gerente Técnico

Enrique Gonzáles.

Gerente Técnico de Infraestructura

Inés Elvira Wills.

Coordinadora de Marca

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 profesores, asistentes graduados (Ingenieros Estudiantes de Maestría en Ingeniería Civil e Ingeniería Ambiental), monitores de investigación (estudiantes de pregrado en Ingeniería Civil y en Ingeniería Ambiental) y auxiliar de laboratorio.

Director del Proyecto

Ing. Juan G. Saldarriaga Valderrama.

Coordinadora de Operaciones

Elizabeth Rodríguez.

Asistentes Graduados

Ing. Francisco Leonardo Mendoza Escobar.

Ing. Juan Alberto Carval Pájaro

Monitores de Investigación

Diana Alejandra Fonseca Uribe.

María Paula López

Auxiliar de Laboratorio

John Adalberto Calvo Ovalle.



2 **MODELO HIDRÁULICO Y FÍSICO**

El objetivo de este capítulo es presentar el modelo hidráulico utilizado para determinar el coeficiente n de Manning y la rugosidad absoluta k_s , los cuales son los parámetros que explican la disipación de la energía por fricción en el flujo en canales abiertos y tuberías de alcantarillado. Dicho modelo está integrado a un modelo matemático, el cual relaciona los datos experimentales con leyes físicas que gobiernan el fenómeno, y un modelo físico, por medio del cual se obtienen los datos experimentales 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 n de Manning y la rugosidad absoluta k_s para la tubería NOVAFORT de 250 mm, fue necesario desarrollar un modelo hidráulico que permita describir tal fenómeno, además de explicar el movimiento del agua dentro de la tubería fluyendo parcialmente llena. Por lo tanto, a continuación se describe la estructura matemática para la determinación del coeficiente n de Manning y la rugosidad absoluta k_s .

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:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

Ecuación 2-1

donde: Q = Caudal en m³/s.

A = Área mojada en m².

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

$$\frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad A_i v_i - A_{i+1} v_{i+1} = 0$$

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 del canal.

S_f = Pendiente de fricción

g = Aceleración de la gravedad.

2.1.3 Ecuación de Energía

Como elemento que describe la conservación del potencial de movimiento y de la disipación de energía 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.

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)

A continuación se presenta la demostración de la ecuación que describe los perfiles de flujo gradualmente variado. La Ecuación 2-5 representa la energía para cada sección de la tubería (Ver Figura 2-1) y está expresada como:

$$\frac{1}{dy} \left(\frac{Q^2}{A^2 2g} \right) = - \frac{Q^2}{A^3 g} \frac{dA}{dy}$$

Como el término $\frac{dA}{dy} = T$, es el ancho superficial, se tiene que:

$$- \frac{Q^2}{A^3 g} \frac{dA}{dy} = F_r^2 = \frac{Q^2}{A^2 g \frac{A}{T}}$$

Teniendo también que $\frac{dH}{dx} = -S_f$,

Se resuelve que:

$$-S_f = S_o + \frac{dy}{dx} (1 - F_r^2)$$

Finalmente se concluye que la Ecuación 2-6 describe los perfiles de flujo gradualmente variado.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 - F_r^2} \quad \text{Ecuación 2-6}$$

2.1.5 Leyes de Fricción

2.1.5.1 Ley de Fricción para la determinación del n de Manning

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)

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

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

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



Por tanto de las expresiones presentadas anteriormente y de los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio se puede obtener de manera acertada el coeficiente n de Manning.

2.1.5.2 Ley de Fricción para la determinación de la rugosidad absoluta k_s

Para la explicación del término S_f en la ecuación de Flujo Gradualmente Variado, en la determinación de la rugosidad absoluta k_s , se utiliza la Ley de Fricción de Darcy-Weisbach, que es una ecuación físicamente basada.

El término S_f se deriva de la ecuación de pérdida de energía (Ecuación 2-9) que está en función del coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach, la longitud del tramo, el diámetro de la tubería a flujo lleno y la altura de energía.

$$h_f = f \frac{L v^2}{d 2g} \quad \text{Ecuación 2-9}$$

donde,

h_f es la pérdida de energía en un tramo de longitud L (m)

f es el coeficiente de fricción de Darcy

L es la longitud del tramo (m)

d es el diámetro de la tubería a flujo lleno (m). También puede expresarse como cuatro veces el radio hidráulico $d = 4R$ para tuberías que fluyen parcialmente llenas.

$\frac{v^2}{2g}$ es la altura de velocidad (m)

Al trasladar el término de la longitud del tramo (L) hacia la izquierda, se obtiene el gradiente de fricción S_f (Ecuación 2-10).

$$\frac{h_f}{L} = f \frac{v^2}{2gd} \quad \text{Ecuación 2-10}$$

Ahora, teniendo en cuenta que para tuberías fluyendo parcialmente llenas, el diámetro es equivalente a cuatro veces el radio hidráulico (Ver Ecuación 2-11).

$$R = \frac{\pi \frac{d^2}{4}}{\pi d} = \frac{d}{4} \quad d = 4R \quad \text{Ecuación 2-11}$$



se obtiene que el gradiente de fricción está expresado como sigue:

$$S_f = f \frac{v^2}{2g(4R)} \quad \text{Ecuación 2-12}$$

Como dentro de la ecuación del gradiente de fricción S_f , se encuentra el coeficiente de fricción f , es necesario calcular a priori este término con la ecuación de Colebrook-White (Ecuación 2-13), la cual debe ser solucionada por métodos numéricos iterativos.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación 2-13}$$

donde

f es el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach.

k_s es la rugosidad absoluta (m)

d es el diámetro de la tubería a flujo lleno (m). También puede expresarse como cuatro veces el radio hidráulico $d = 4R$ para tuberías fluyendo parcialmente llenas.

Re es el número de Reynolds (Adimensional).

Para esta ecuación, los términos que se encuentran dentro del logaritmo, representa dos fenómenos importantes. El primer término $\frac{k_s}{3.7d}$ representa el Flujo Turbulento Hidráulicamente Rugoso (FTHR), el cual se caracteriza por ser un flujo donde la rugosidad absoluta tiene un efecto importante en la hidráulica y el número de Reynolds es lo suficientemente grande (Flujo turbulento) para hacer al segundo término numéricamente despreciable.

El segundo término $\left[\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right]$ representa el Flujo Turbulento Hidráulicamente Liso

(FTHL), donde la rugosidad absoluta no tiene un efecto significativo sobre la hidráulica y el número de Reynolds es lo suficientemente bajo como para hacer despreciable al primer término con relación al segundo.

Con el fin de representar implícitamente el término del número de Reynolds dentro de la Ecuación 2-13, éste se expresa como la relación entre las fuerzas inerciales del flujo y las



fuerzas viscosas del fluido, dada en la Ecuación 2-14 . De igual manera se reemplaza el diámetro d por cuatro veces el radio hidráulico ($4R$).

$$R_e = \frac{vd}{\nu} \quad \text{Ecuación 2-14}$$

donde,

R_e es el número de Reynolds (Adimensional).

v es la velocidad del flujo (m/s)

d es el diámetro a tubo lleno (m)

ν es la viscosidad cinemática (m^2/s). Tomado como $1.14 \times 10^{-6} m^2/s$ para una temperatura de $15^\circ C$.

Luego la ecuación de Colebrook-White se expresa como:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{3.7(4R)} + \frac{2.51\nu}{v(4R)\sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación 2-15}$$

Ahora, para determinar el término f de la Ecuación 2-15, se aplica un método iterativo pues la ecuación es implícita. Finalmente, se determina el gradiente de fricción S_f necesario para describir el Flujo Gradualmente Variado.

2.1.5.3 Método Numérico para la solución de la ecuación de Flujo Gradualmente Variado.

La solución de un perfil de flujo gradualmente variado consiste en la aplicación de un esquema explícito en diferencias finitas, 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:

$$Y_{i+1} = Y_i + \frac{1}{6} [K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4] \Delta x_{i,i+1} \quad \text{Ecuación 2-16}$$

Donde,

$$K_1 = F(Y_i), \quad K_2 = F(Y_i + K_1 \Delta x_{i,i+1}), \quad K_3 = F(Y_i + K_2 \Delta x_{i,i+1}), \quad K_4 = F(Y_i + K_3 \Delta x_{i,i+1})$$

son valores de refinación de la aproximación por diferencias finitas y

$$K(Y) = \frac{S_o - S_f(n, Q, Y)}{1 - F_r^2(n, Q, Y)} \quad \text{Ecuación 2-17}$$

es la variación de la profundidad en el Flujo Gradualmente Variado, para un valor dado de Coeficiente de Rugosidad Absoluta, k_s ; un Caudal Q y un valor de profundidad Y .

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, bajo distintas combinaciones de caudal y pendiente. El montaje consta de los siguientes elementos:

- Tubería NOVAFORT de aproximadamente 6 metros de largo, con diámetro externo de 250 milímetros y diámetro real interno de 227 milímetros.
- Circuito cerrado de flujo, constituido por un tanque de almacenamiento y un canal de sección rectangular.
- Tablero de lectura de piezómetros para la medición de los niveles en diferentes puntos de la tubería.
- Vertedero triangular contraído calibrado con su respectivo limnómetro para la medición de caudal.
- Nivel de precisión para la lectura de la pendiente.
- Diferencial (polea) con una capacidad de 3.2 toneladas para la modificación de las pendientes.
- Cercha metálica como soporte de la tubería.
- Neumático para sellar la salida de la tubería del tanque aguas arriba.
- Pantalla de aquietamiento aguas abajo.

El esquema del montaje completo, se muestra en la Figura 2-2 donde se pueden ver los componentes que constituyen este modelo físico.



Figura 2-2. Estructura general del montaje.

La vista frontal del modelo físico se muestra en la Figura 2-3, en la cual se puede ver el vertedero triangular, el limnómetro, y la pantalla de aquietamiento.



Figura 2-3. Estructura general del montaje. Vista frontal.

En la tubería se perforaron 57 orificios para colocar los piezómetros perfectamente alineados y ubicados con un espaciado menor en la boca del tubo y a la entrada de la tubería y con mayor distancia entre ellos en el resto de la tubería. En la Tabla 2-1 se detalla el espaciado exacto y su identificación.

Piezómetro		ΔX (m)	$X_1 - X_N$ (m)
	0	0.000	0.000
0	1	0.015	0.015
1	2	0.075	0.090
2	3	0.026	0.116
3	4	0.051	0.167
4	5	0.050	0.217
5	6	0.051	0.268
6	7	0.050	0.318
7	8	0.051	0.369
8	9	0.050	0.419
9	10	0.051	0.470
10	11	0.024	0.494
11	12	0.026	0.520
12	13	0.025	0.545
13	14	0.024	0.569
14	15	0.025	0.594
15	16	0.051	0.645
16	17	0.051	0.696
17	18	0.048	0.744
18	19	0.053	0.797
19	20	0.050	0.847
20	21	0.101	0.948
21	22	0.051	0.999
22	23	0.050	1.049
23	24	0.050	1.099
24	25	0.051	1.150
25	26	0.050	1.200
26	27	0.100	1.300
27	28	0.101	1.401
28	29	0.102	1.503
29	30	0.101	1.604
30	31	0.101	1.705
31	32	0.099	1.804
32	33	0.102	1.906
33	34	0.101	2.007
34	35	0.101	2.108
35	36	0.202	2.310
36	37	0.202	2.512
37	38	0.205	2.717
38	39	0.202	2.919
39	40	0.201	3.120
40	41	0.202	3.322
41	42	0.203	3.525
42	43	0.201	3.726
43	44	0.203	3.929
44	45	0.101	4.030
45	46	0.101	4.131
46	47	0.101	4.232
47	48	0.102	4.334
48	49	0.100	4.434
49	50	0.101	4.535
50	51	0.101	4.636
51	52	0.102	4.738
52	53	0.102	4.840
53	54	0.100	4.940
54	55	0.203	5.143
55	56	0.101	5.244
56	57	0.103	5.347

Tabla 2-1. Cantidad de piezómetros y su posición

Debido a los perfiles de flujo gradualmente variado (Ver Figura 2-4) que se esperan encontrar en la tubería, los cuales son el M2 para pendientes suaves, el S2 para pendientes empinadas, el A2 para pendientes adversas y el H2 para pendientes horizontales; se ubicaron mayor cantidad de orificios (y con menos distancia entre ellos) al inicio y al final de la tubería. El objetivo es reproducir con más detalle el perfil de flujo esperado en el tablero de piezómetros y contar con un perfil experimental mucho mejor.

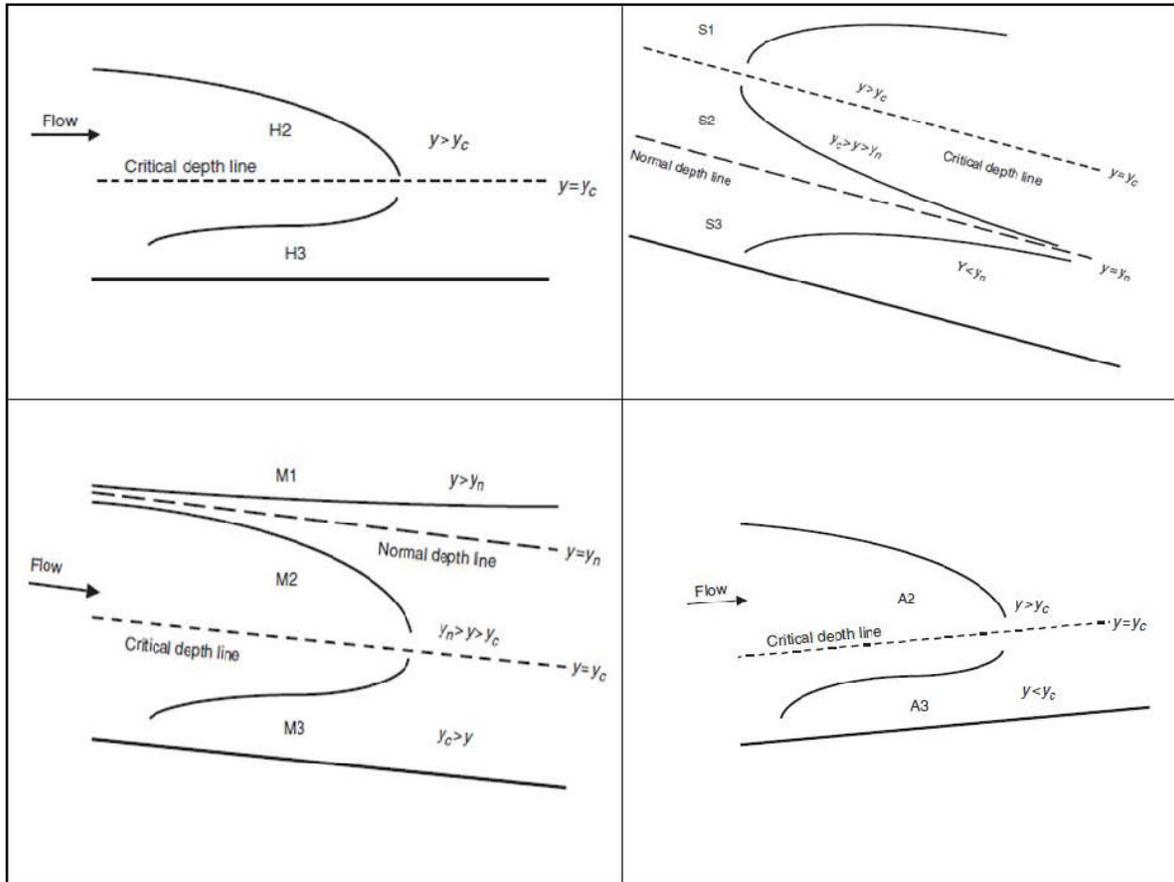


Figura 2-4. Perfiles en Flujo Gradualmente Variado (FGV).

En estos orificios, se acoplaron mangueras transparentes de 4.7 mm de diámetro que funcionaron como piezómetros, los cuales se encuentran sujetos para la toma de su lectura en un tablero de medición milimetrado tal como se presenta en la Figura 2-5 y en la Figura 2-6.



Figura 2-5. Tablero de piezómetros



Figura 2-6. 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 la boca del tanque, se realizó mediante un neumático con el cual se obtuvo la hermeticidad en la transición (Ver la Figura 2-7).

De otro lado la pendiente de la tubería se modificaba mediante una diferencial de 3.2 Ton la cual estaba ubicada en el centro de la tubería (Ver la Figura 2-8).



Vista exterior



Vista interior

Figura 2-7. Detalle de la unión de tubería con el tanque de alimentación.

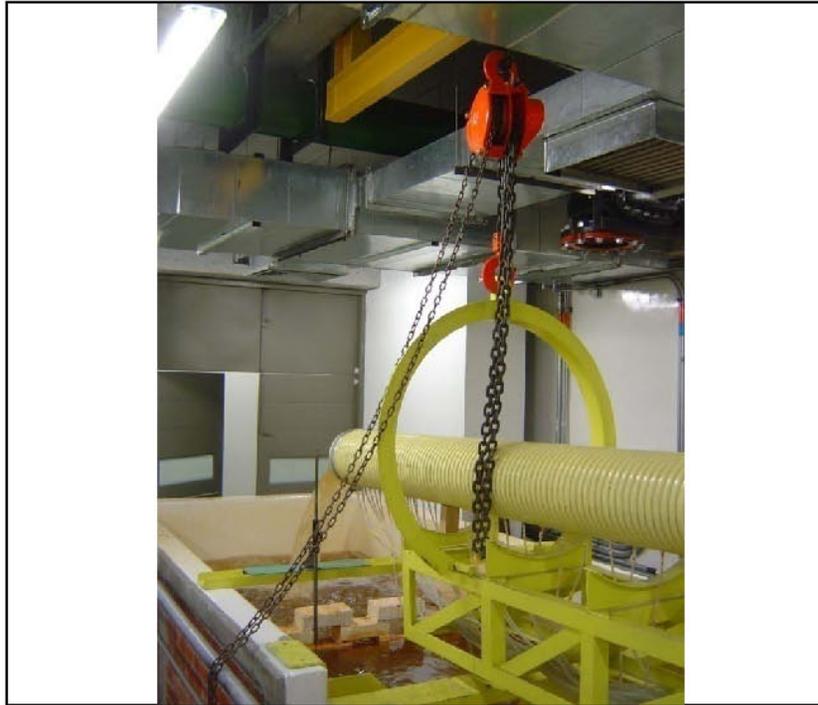


Figura 2-8. Detalle de la cercha metálica y la diferencial.

El caudal necesario fue suministrado por uno de los sistemas de bombeo del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes. La impulsión es generada por una bomba centrífuga de 10 HP la cual toma el agua del canal y la almacena en un tanque con capacidad de 2 m³, el cual está conectado directamente a la tubería, después de que el agua fluye por la tubería NOVAFORT hay una caída que retorna el agua al canal cerrando el circuito (Ver Figura 2.2).

2.2.2 Descripción de las Mediciones

De manera general, la prueba consiste en determinar el valor del coeficiente n de Manning y la rugosidad absoluta k_s 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 (50) caudales, entre 0.003 m³/s y 0.036 m³/s distribuidos lo más uniformemente posible mediante la válvula de regulación. Para cada combinación de caudal y pendiente, medida con limnómetro y el nivel de precisión respectivamente, 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 de la lámina de agua.



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, empinado, adverso y horizontal. Las pendientes ensayadas fueron de 2.74%, 2.85%, 3.3%, -0.47%, -0.16% y 0%. El análisis para el cálculo del coeficiente n de Manning y la rugosidad absoluta k_s se realizó comenzando desde el piezómetro en el cual se espera una profundidad crítica; esto debido a que, en el caso de pendientes adversas el perfil esperado es un A1, en pendientes horizontales (0%) el perfil esperado es un H1 y en pendientes empinadas el perfil esperado es un S2.

Todos estos perfiles se forman por encima de la profundidad crítica exceptuando el perfil S2 que es un perfil en donde el régimen de flujo es supercrítico, para este caso el perfil se desarrolla por debajo de la profundidad crítica y por encima de la profundidad normal.

Dado lo anterior los perfiles A1 y H1 deben ser calculados desde aguas abajo y el perfil S2 debe ser calculado desde aguas arriba, todos los perfiles tienen como control hidráulico la profundidad crítica.

2.2.2.1 Medición de Caudales

Para medir el caudal en cada prueba, se cuenta con un vertedero triangular calibrado y equipado como se muestra en la Figura 2-2 con la siguiente ecuación.

$$Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = \frac{0.0147 \cdot (H - H_0)^{2.5481}}{1000} \quad \text{Ecuación 2-18}$$

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

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

H_0 = El cero del limnómetro es 4.7 centímetros, que corresponde a la medición en el borde del vertedero.

2.2.2.2 Medición de la Pendiente

Para medir la pendiente (Ver Figura 2-9), 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 de cada tramo con una distancia entre ellas de 5.15 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.

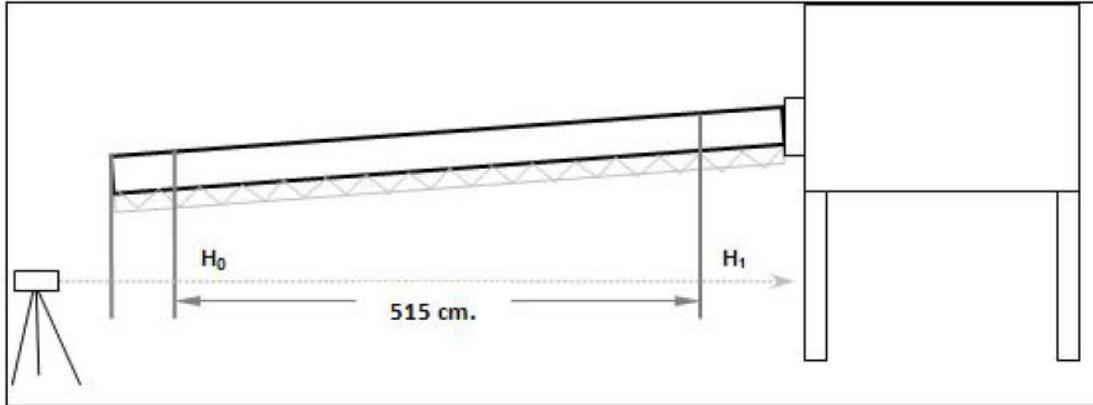


Figura 2-9. Esquema para la determinación de la pendiente en un tramo de tubería.

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 2-19 :

$$S_o = \frac{H_1 - H_2}{L} \quad \text{Ecuación 2-19}$$

donde: H_1 y H_2 = son las mediciones de cota

S_o = es la pendiente calculada.

L = es la distancia entre reglas (5.15 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 2-20.

$$\text{Profundidad Piezómetro } i = Y_i = P_i - Z_i \quad \text{Ecuación 2-20}$$

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 2-21)

$$Z_{i+1} = Z_i + \Delta x_{i,i+1} \cdot S_o \quad \text{Ecuación 2-21}$$

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 N DE MANNING

En este capítulo se explicará el procedimiento utilizado para la determinación del Coeficiente n 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: Un primer proceso de calibración del Coeficiente n 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 n 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 n 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 n 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 300 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 Coeficiente n de Manning. El segundo método es un filtro cruzado donde se agregan las eficiencias de cada Coeficiente n de Manning para todas las pruebas hechas, se clasifican los coeficientes n 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 n de Manning. (Ver la Figura 3-1)

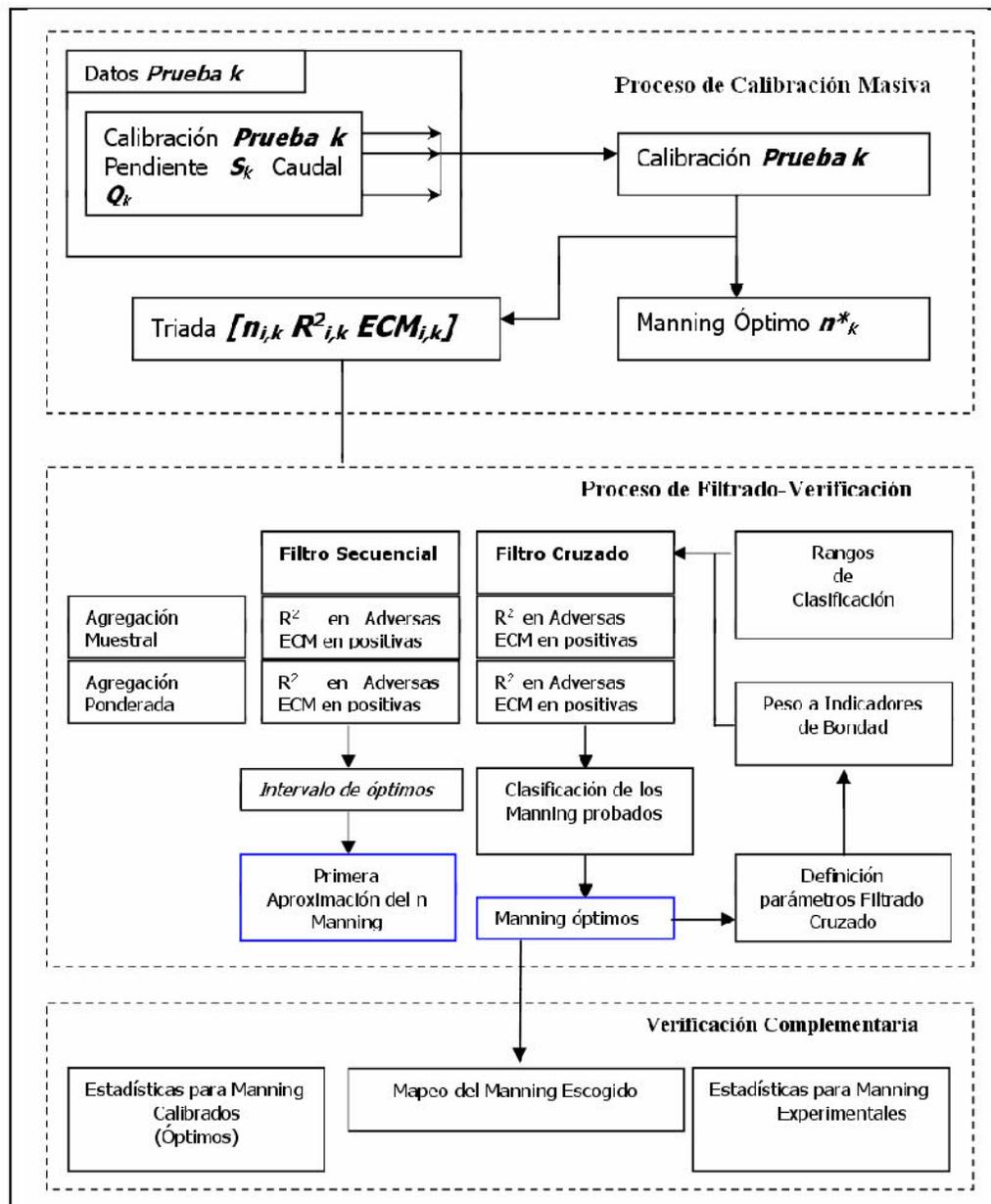


Figura 3-1 Diagrama de flujo para la determinación del Coeficiente n de Manning.

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



3.2 Justificación

La metodología adoptada es el resultado de la búsqueda de un mecanismo que permita reconocer el comportamiento del Coeficiente n 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 n 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 n 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 n 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.

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

La calibración del Coeficiente n 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 . En el ANEXO 1 se presentan algunos ejemplos de los resultados obtenidos para cada una de las seis pendientes. Cabe resaltar que por cada pendiente analizada se generan 50 valores de coeficiente n de Manning para un total de 300 valores.

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:

Max R^2 (Min ECM)

$$\frac{dY}{dx} = \frac{S_0 - S_f(n, Q, Y)}{1 - Fr^2(n, Q, Y)} \quad \text{Ecuación 3-3}$$

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

El rango del Coeficiente 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_0 , Q y variable de decisión (parámetro) el Coeficiente n de Manning.

3.3.2 Procedimiento para la Calibración

3.3.2.1 Alistamiento de Datos Experimentales

Para hallar el valor óptimo del Coeficiente n 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 de la tubería en metros.

- **Área:**

$$A(Y) = \frac{1}{8} (\theta - \text{sen}\theta) d_0^2 \quad \text{Ecuación 3-6}$$

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

d_0 = es el diámetro de la tubería en metros.

- **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:**

$$R(Y) = \frac{A}{P} = \frac{1/8 (\theta - \text{Sen}\theta) d_0^2}{1/2 \theta d_0} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{\text{Sen}\theta}{\theta} \right) d_0 \quad \text{Ecuación 3-8}$$

- **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 numeral, se explicarán los métodos usados para la solución de dicha ecuación para la generación de las series de profundidades simuladas dado un Coeficiente n de Manning.

3.3.3.1 Método del Paso Fijo

El método del Paso Directo, es una solución numérica implícita de la ecuación de Flujo Gradualmente Variado, que usa la ecuación de energía desarrollada en el Numeral 2.1.4. Para su solución, 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:

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

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

Dx = Distancia entre tramos.

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

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

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

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^i 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 $Y_{o,i+1}$ y se itera recursivamente hasta el valor Y_{i+1}^* .

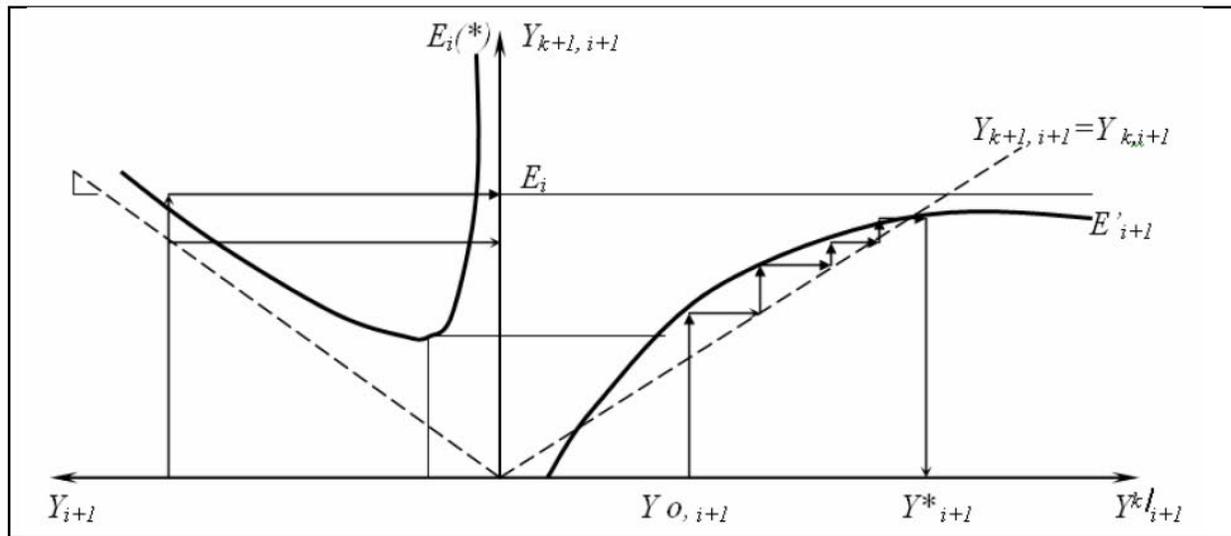


Figura 3-2. Esquema de iteraciones recursivas utilizado entre un tramo i y un tramo $i+1$ para la solución del modelo matemático.

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 Directo, 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:

$$F(Y) = \frac{S_0 - S_f(n, Q, Y)}{1 - Fr^2(n, Q, Y)}$$

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

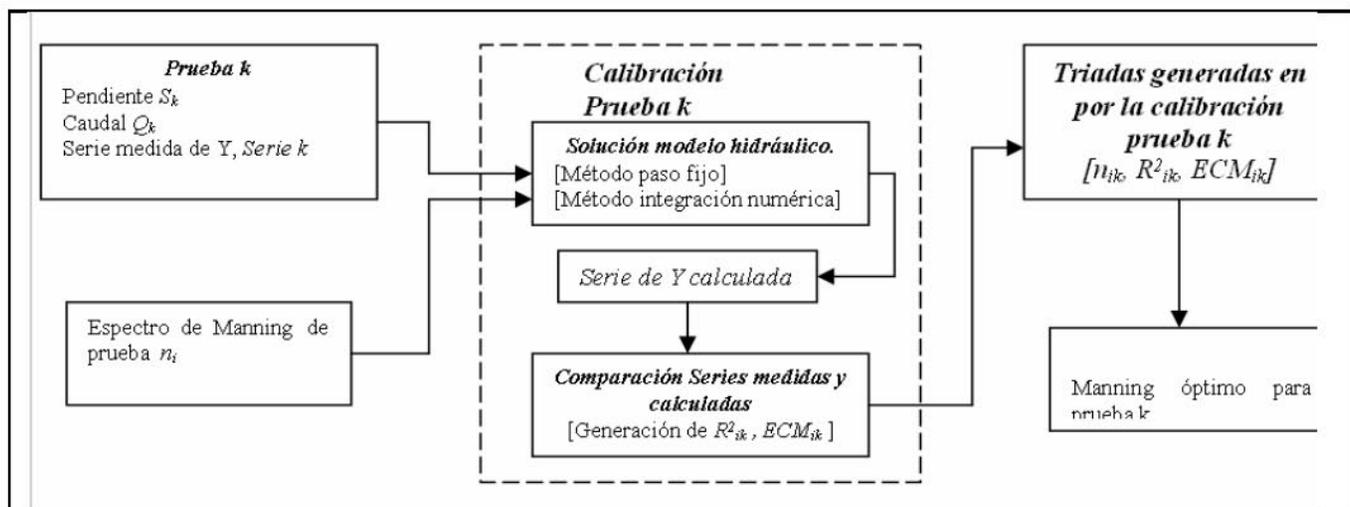


Figura 3-3. Esquema general de la calibración para las pruebas y la generación de las triadas.

Así, para cada prueba se genera una lista con tres números en cada fila, el Coeficiente n 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 Coeficiente 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.

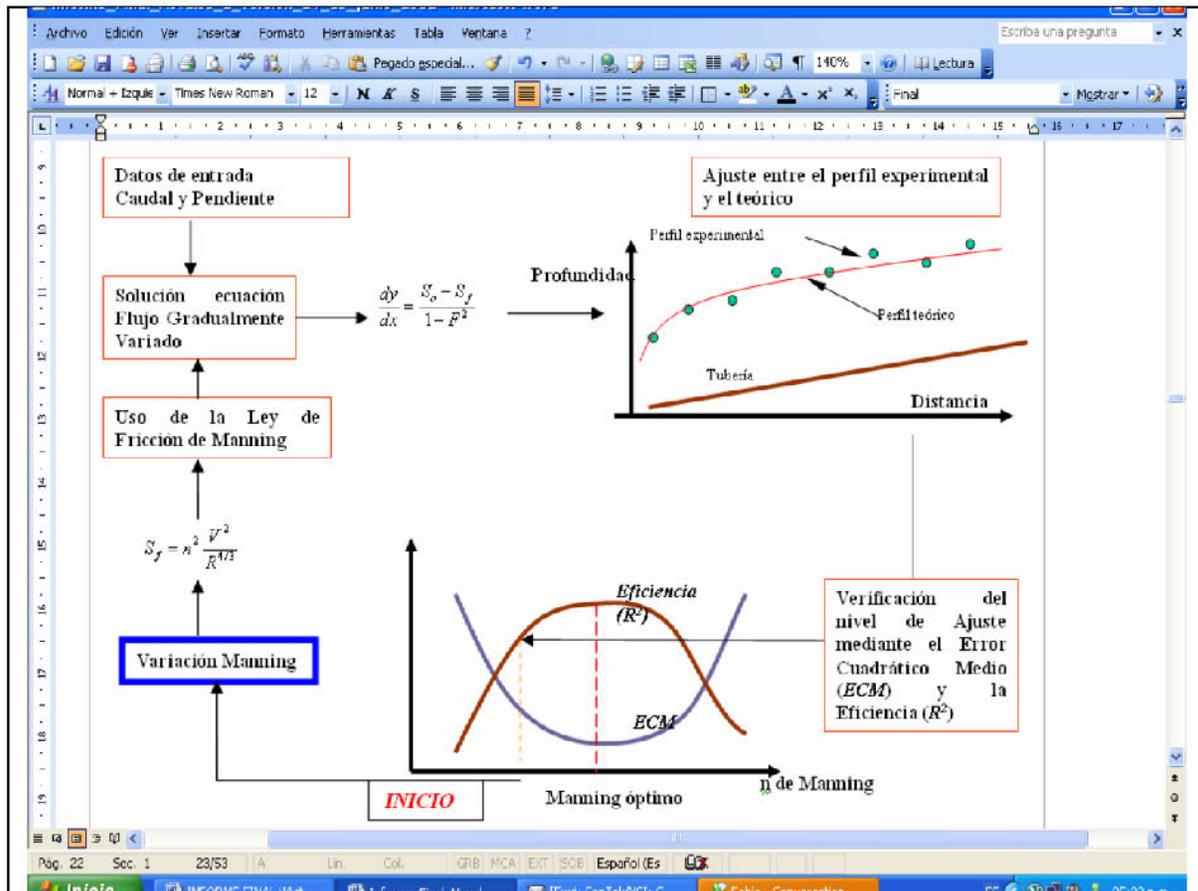


Figura 3-4. Esquema de la metodología para la determinación de un valor óptimo de n de Manning dada una condición Caudal - Pendiente.

3.4 Filtrado – Verificación de los Coeficientes Calculados

Para la escogencia del Coeficiente n de Manning, se usó una filtración completa de los valores obtenidos del proceso de calibración masiva. En este numeral se va a explicar cómo se desarrolló esta metodología y que resultados se lograron hasta la determinación definitiva del valor más adecuado del Coeficiente n 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 n de Manning. Y otro cruzado, en el cual se clasifican todos los valores del Coeficiente 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 en la Figura 3-5, muestra las etapas del proceso:

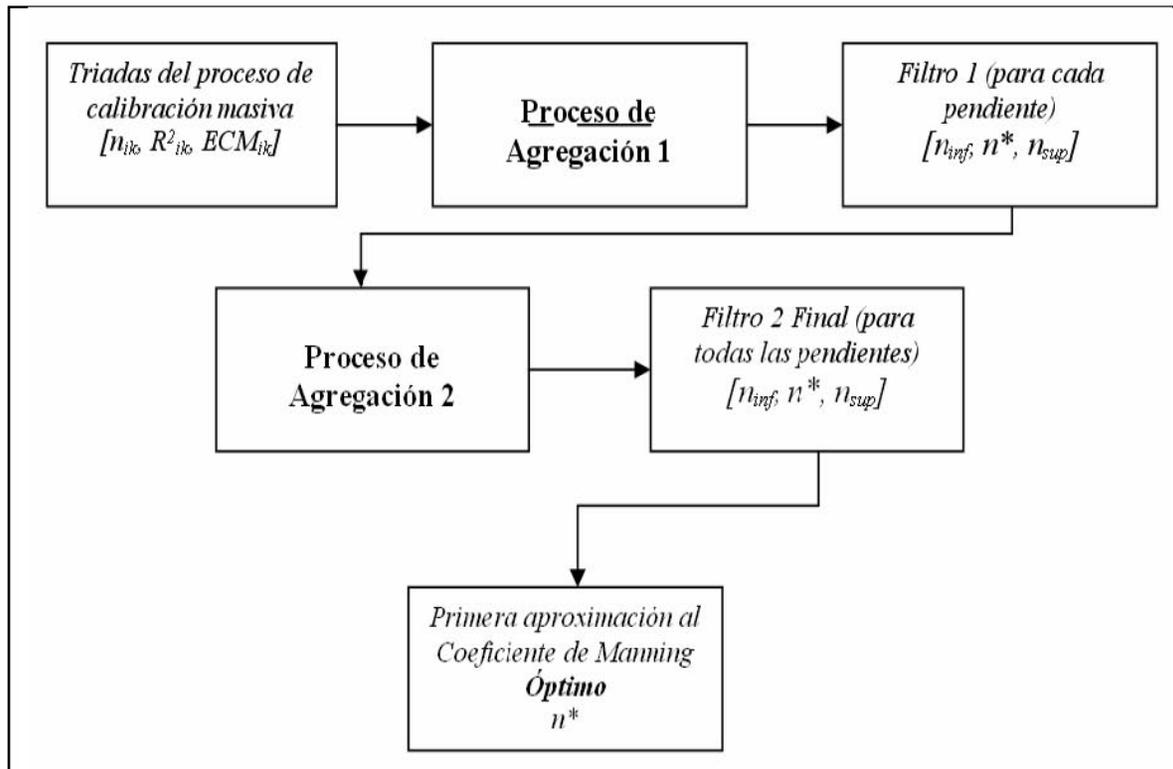


Figura 3-5. Esquema general del proceso de Filtrado Secuencial.

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 n de Manning que refleje su comportamiento en esa pendiente determinada.

La expresión para el Indicador Agregado en una pendiente, para cada valor de Coeficiente n 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.

$$\overline{ECM}_i = \sum_{k=1}^{N_Q} ECM_k \lambda_k \quad \lambda_k = \frac{ECM_k}{\sum_{k=1}^{N_Q} ECM_k} \quad \text{Ecuación 3-18}$$

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

ECM_k = son los N_q indicadores de ajuste del Coeficiente n 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 n 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 n de Manning dentro de un intervalo de confianza entre el 5% y el 95% (Figura 3-6).

3.4.1.2 Primer Filtrado del Coeficiente n de Manning Óptimo en una Pendiente

Después de hacer la agregación inicial de indicadores, se filtran los mejores coeficientes n 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 n de Manning para todas las pendientes.

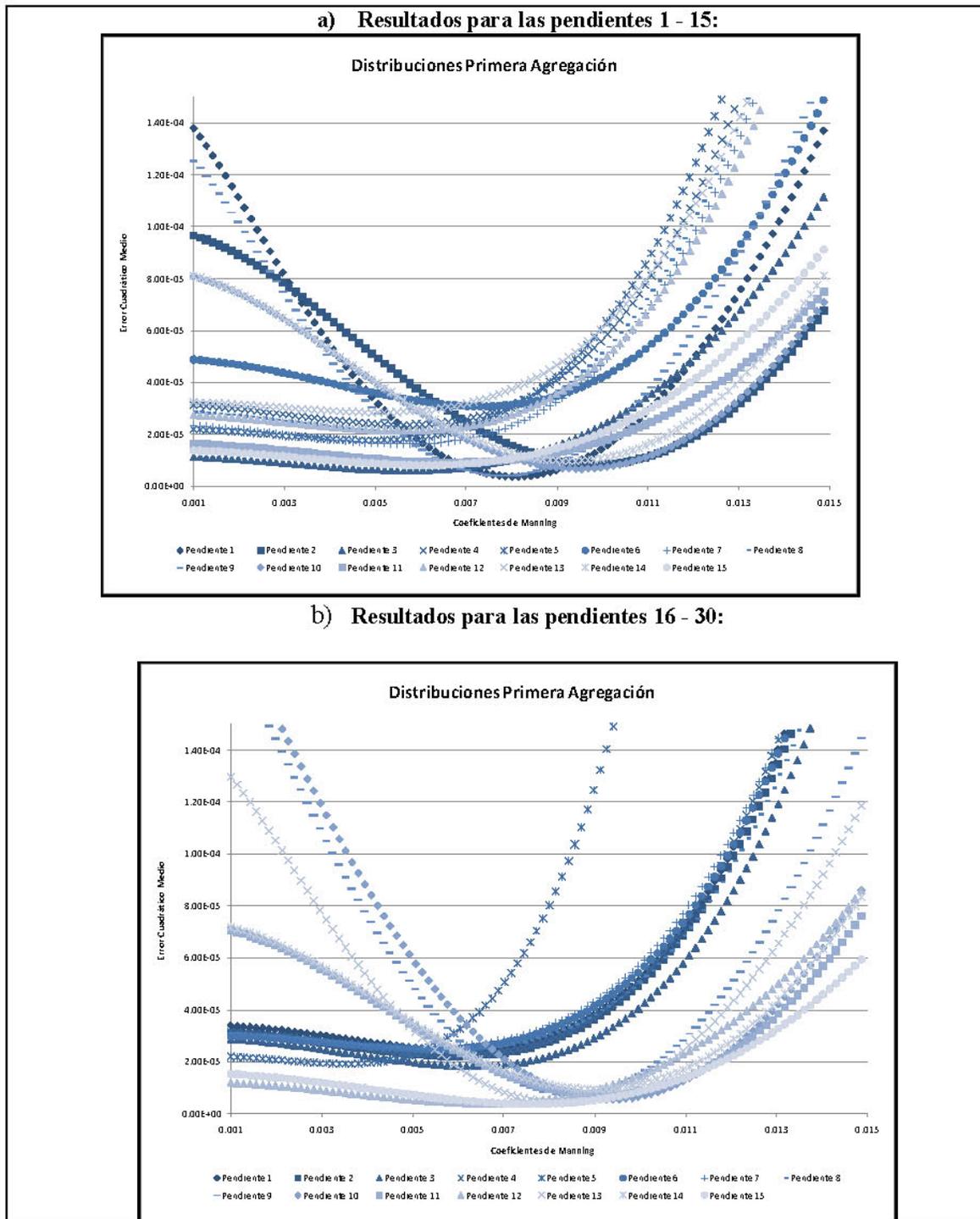


Figura 3-6. Distribuciones de los indicadores del proceso de agregación 1. Cada curva corresponde al par Coeficiente n de Manning-Error cuadrático medio agregado para cada pendiente probada. Tubería NOVAFORT para alcantarillado de 250 mm.

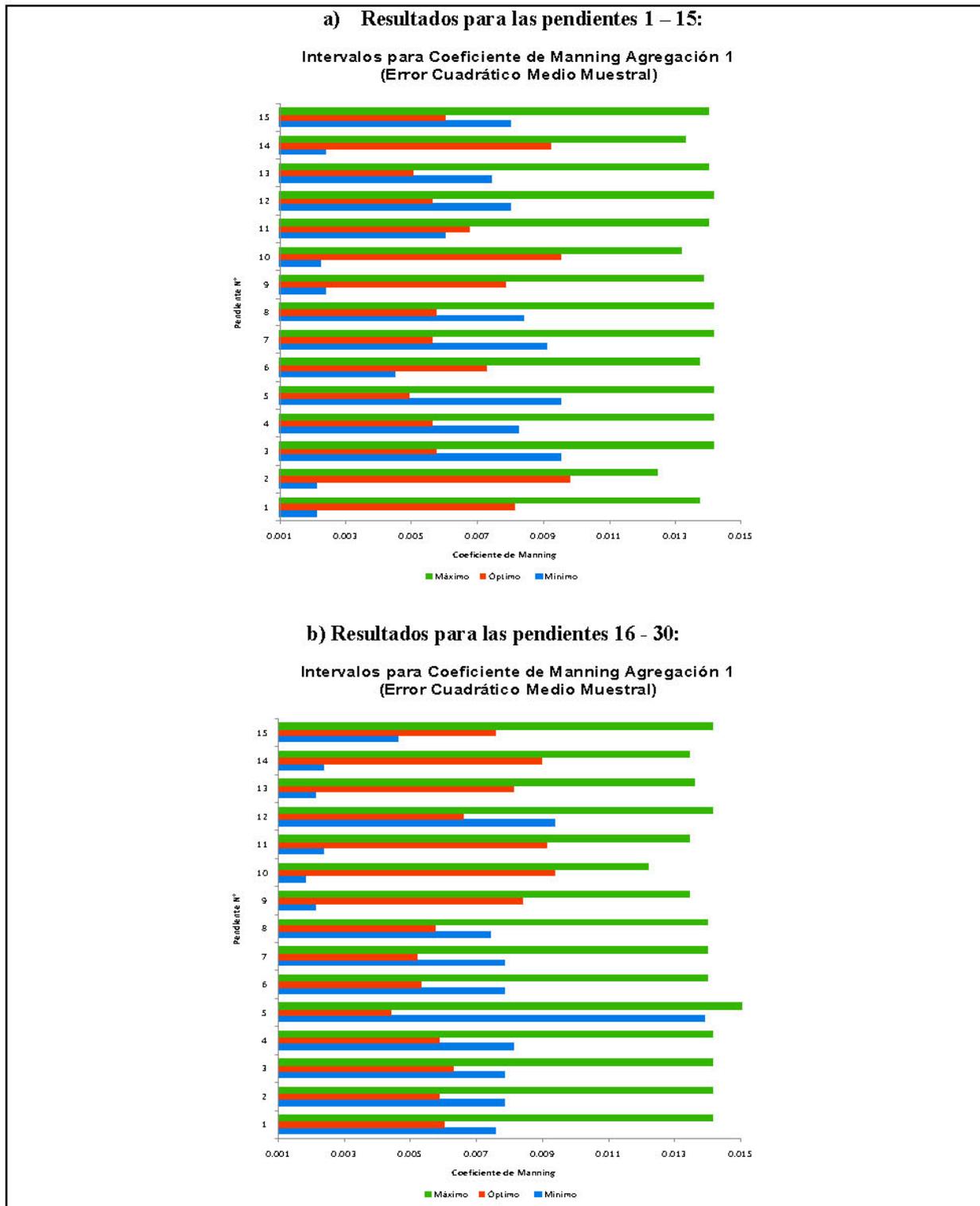


Figura 3-7. Intervalos Óptimos de coeficientes n de Manning Filtro 1. Tubería NOVAFORT para alcantarillado de 250 mm.

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 n de Manning probado.

Los indicadores finales agregados son:

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

$$ECM_i^* = \frac{1}{N_S} \sum_{k=1}^{N_S} \overline{ECM}_k \quad \text{Ecuación 3-19}$$

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

$$ECM_i^* = \sum_{k=1}^{N_S} \overline{ECM}_k \lambda_k \quad \lambda_k = \frac{\overline{ECM}_k}{\sum_{k=1}^{N_S} \overline{ECM}_k} \quad \text{Ecuación 3-20}$$

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

En la Figura 3-8 se muestran las distribuciones de los indicadores finales encontrados para los coeficientes n de Manning probados en la segunda agregación y en la Figura 3-9 se presenta la función de distribución acumulada para los indicadores finales:

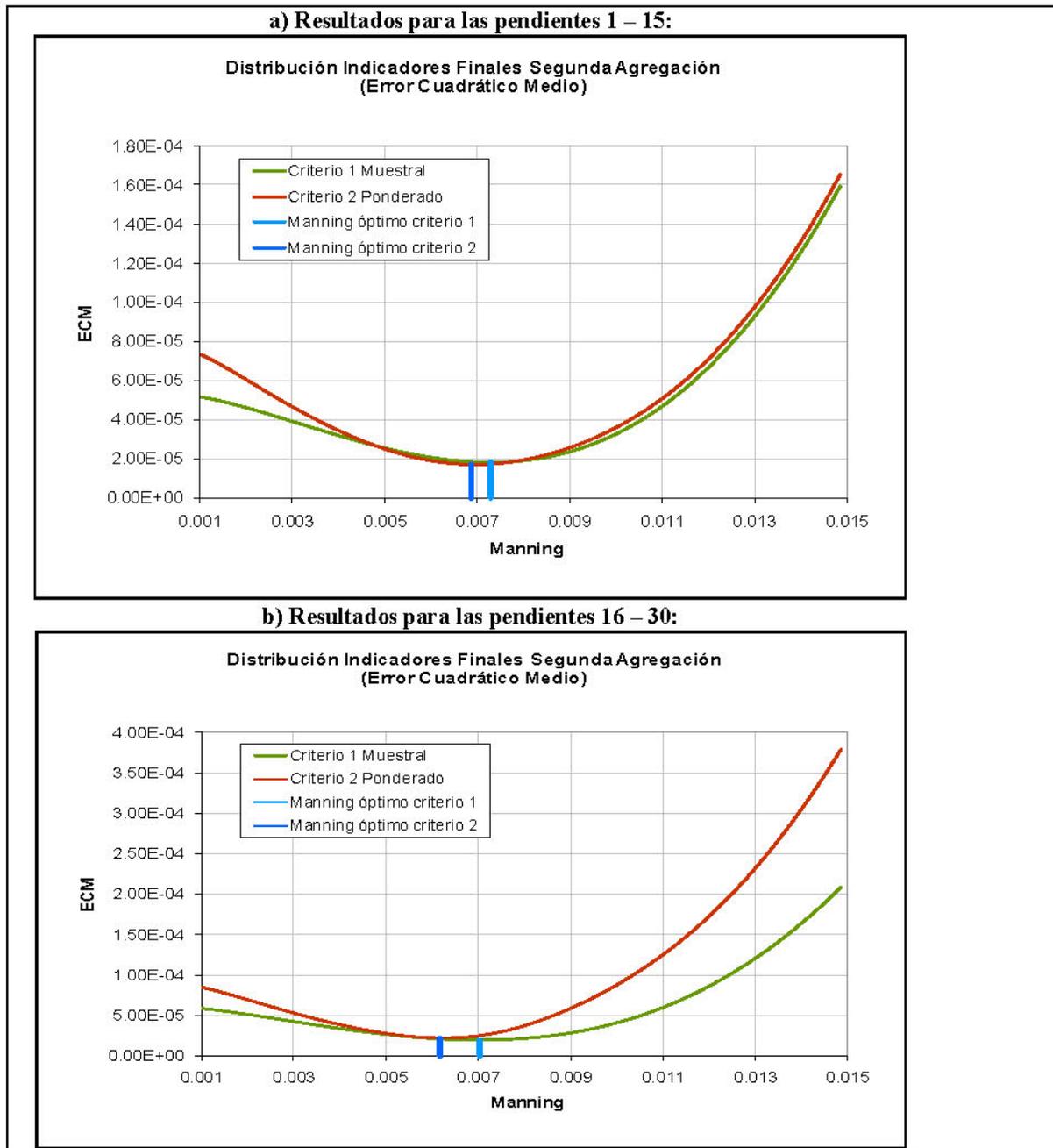


Figura 3-8. Distribución de los indicadores del proceso de agregación 2. Tubería NOVAFORT para alcantarillado de 250 mm.

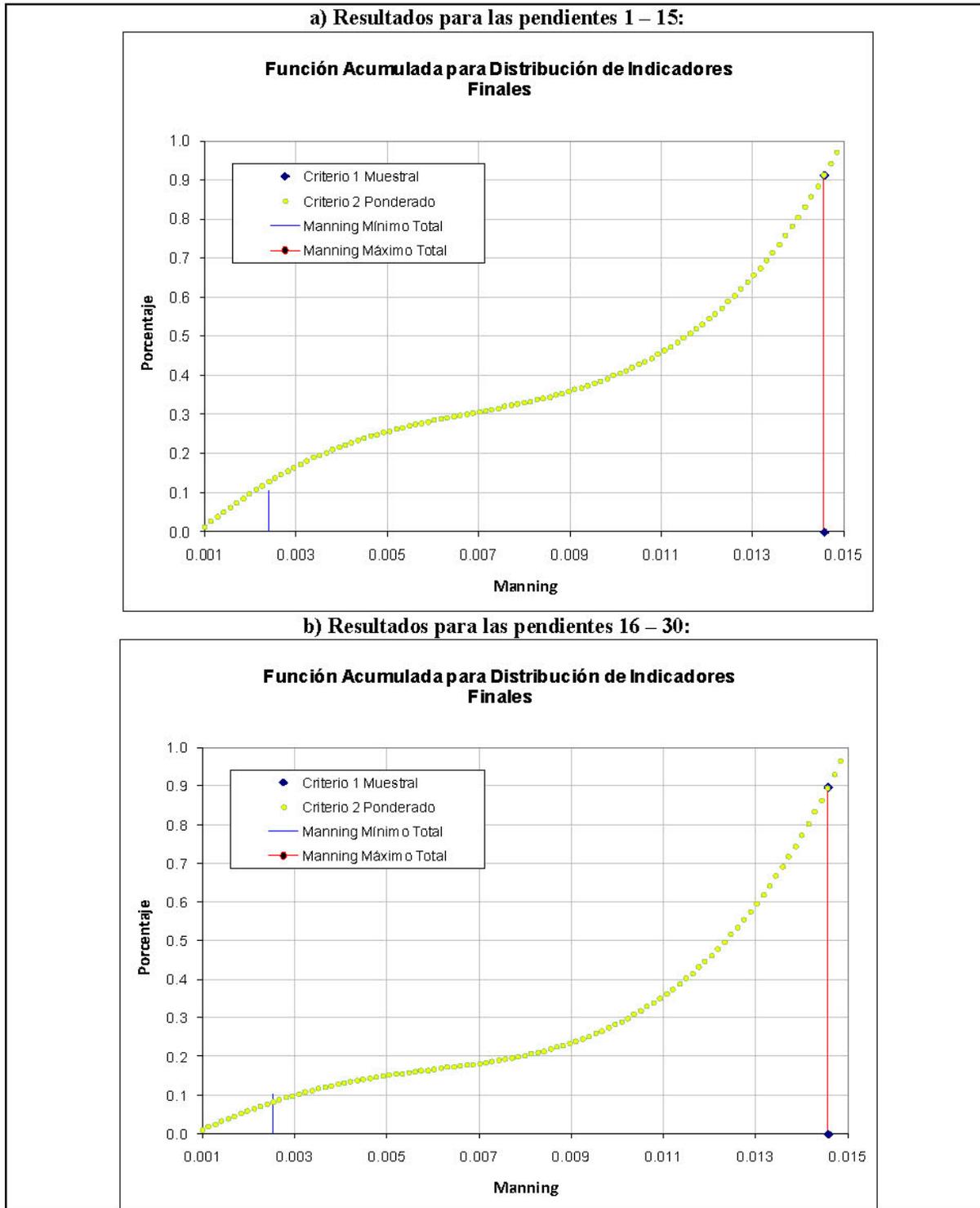


Figura 3-9. Curva acumulada con la cual se define el intervalo con percentiles 5% y 95%. Tubería NOVAFORT para alcantarillado de 250 mm.

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.

Coefficiente n de Manning	Pendientes 1 - 15	Pendientes 16 – 30
Óptimo Criterio 1	0.0069	0.0062
Óptimo Criterio 2	0.0073	0.0071

El mejor valor del Coeficiente n 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 n 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 n de Manning en todos los eventos realizados de caudal y pendiente, para evaluar después su relevancia como posible valor de rugosidad. La Figura 3-10 muestra la estructura del procedimiento de verificación cruzada.

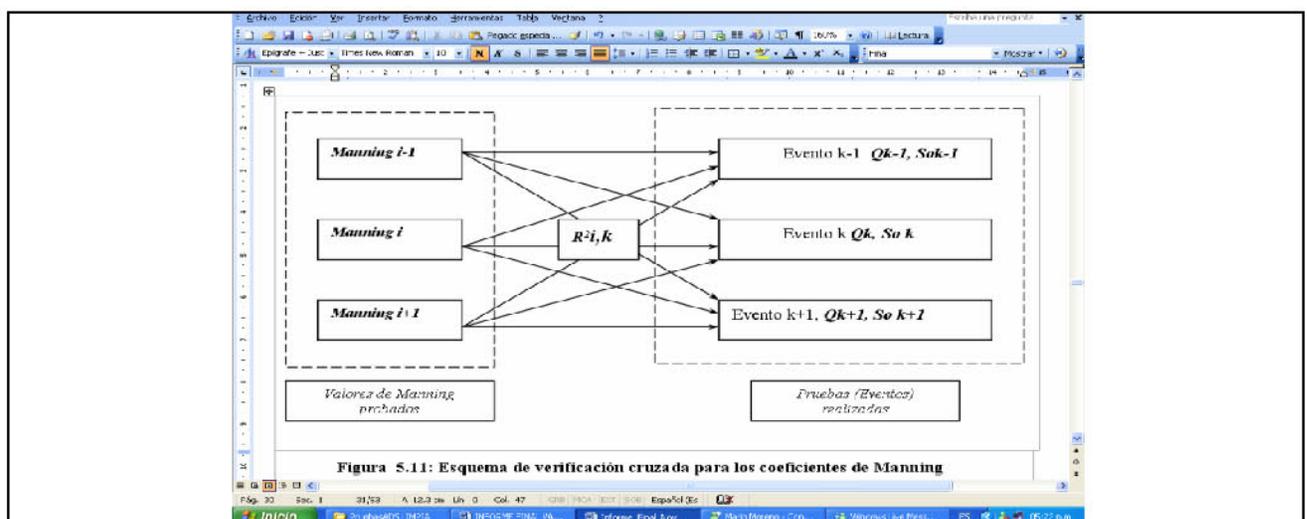


Figura 3-10. Esquema de verificación cruzada para los coeficientes n de Manning.



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 n de Manning probados para todos los eventos.

3.4.2.2 Clasificación de Coeficientes n de Manning

Como primer paso para la evaluación cruzada de todos los coeficientes n 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 n de Manning:

- **Primero:** Para la clasificación se seleccionan tres rangos de Eficiencias posibles. Un rango para coeficientes n de Manning no deseables Tipo I, con eficiencias bajas; un rango para coeficientes n de Manning aceptables Tipo II y un rango con eficiencias altas para coeficientes n de Manning deseables Tipo III.
- **Segundo:** Evaluación de cada uno de los valores de eficiencias del Coeficiente n 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 n 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 n 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 n 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 n 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 donde: (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 Coeficiente 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 Coeficiente n de Manning muy versátil, es decir, con la mayoría de eficiencias en casi todos los eventos caudal-pendiente.

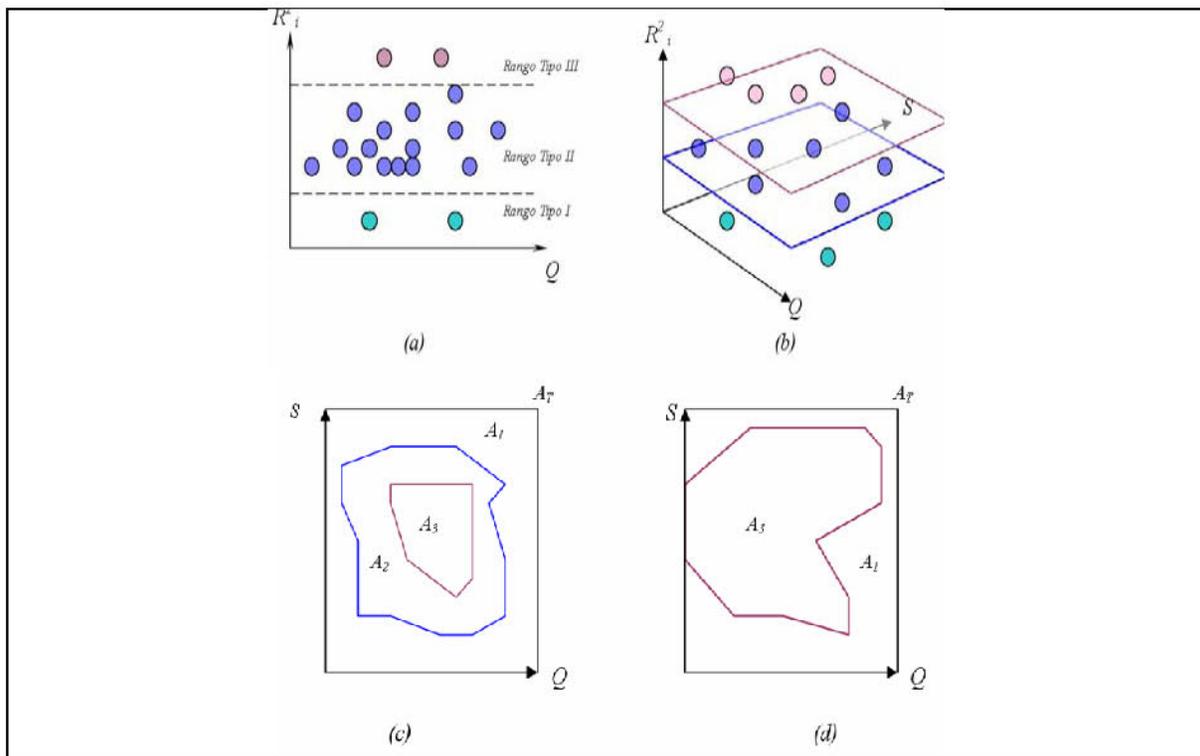


Figura 3-11. Indicador de Versatilidad.

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

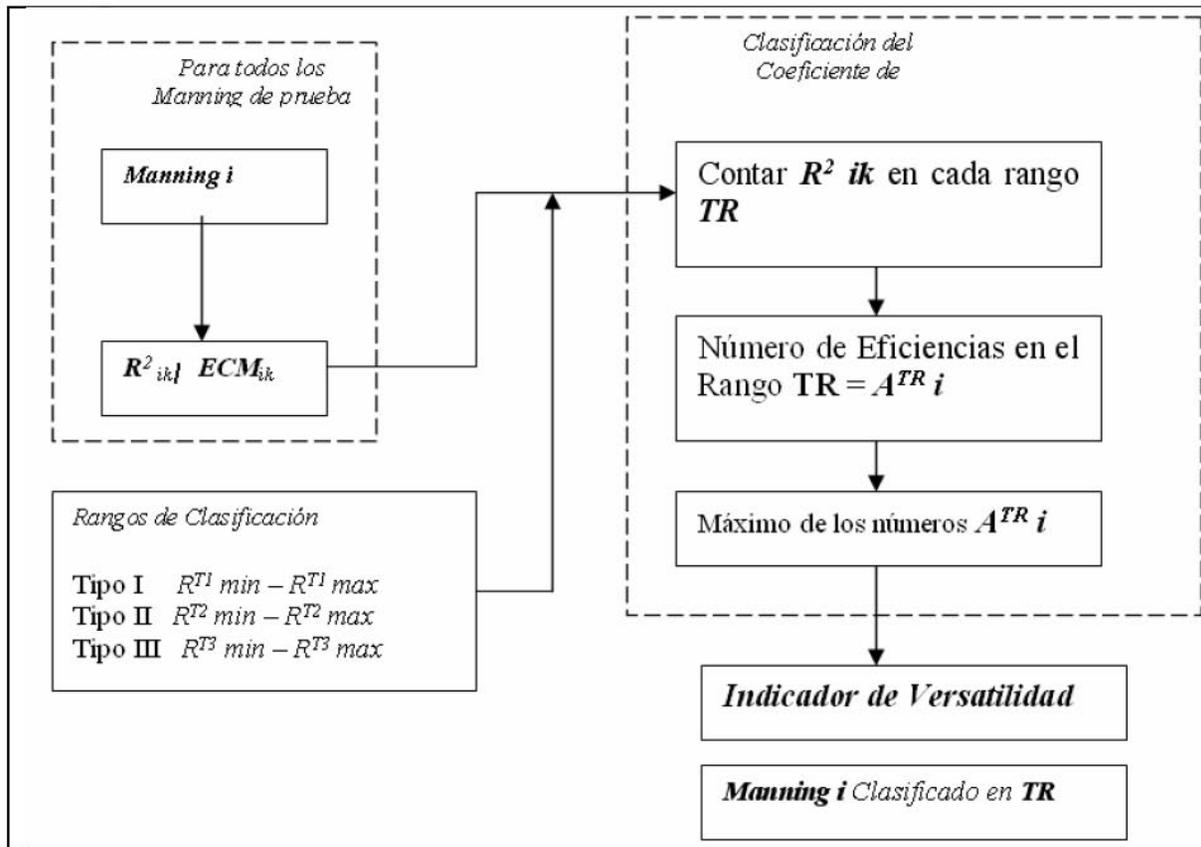


Figura 3-12. Esquema de verificación cruzada para los coeficientes n de Manning.

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 n 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)

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

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)

$$R_i^{*2} = \sum_{p=1}^{N_S} \sum_{q=1}^{N_Q} R_{pq}^2 \lambda_{pq} \quad \text{Ecuación 3-23}$$

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 n 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:

$$R_{i,k}^2 = 1 - \frac{ECM_{i,k}}{ECM_{max}} \quad \text{Ecuación 3-24}$$

donde: $R_{i,k}^2 =$ es la eficiencia explicada del Coeficiente n 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 n de Manning Óptimo Final

El valor del Coeficiente n 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 n 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 n de Manning muy versátil pero menos eficiente, ó un Coeficiente n 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 Coeficiente 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 n de Manning Óptimo general para todas las pruebas. Por lo tanto, para las condiciones detalladas de este filtrado es de 0.007 con una bondad total de 99.16 %.
- La línea azul con ordenada a la derecha muestra el tipo de Coeficiente n de Manning según los rangos impuestos para el filtrado; por lo tanto barre los rangos de Coeficientes n 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.

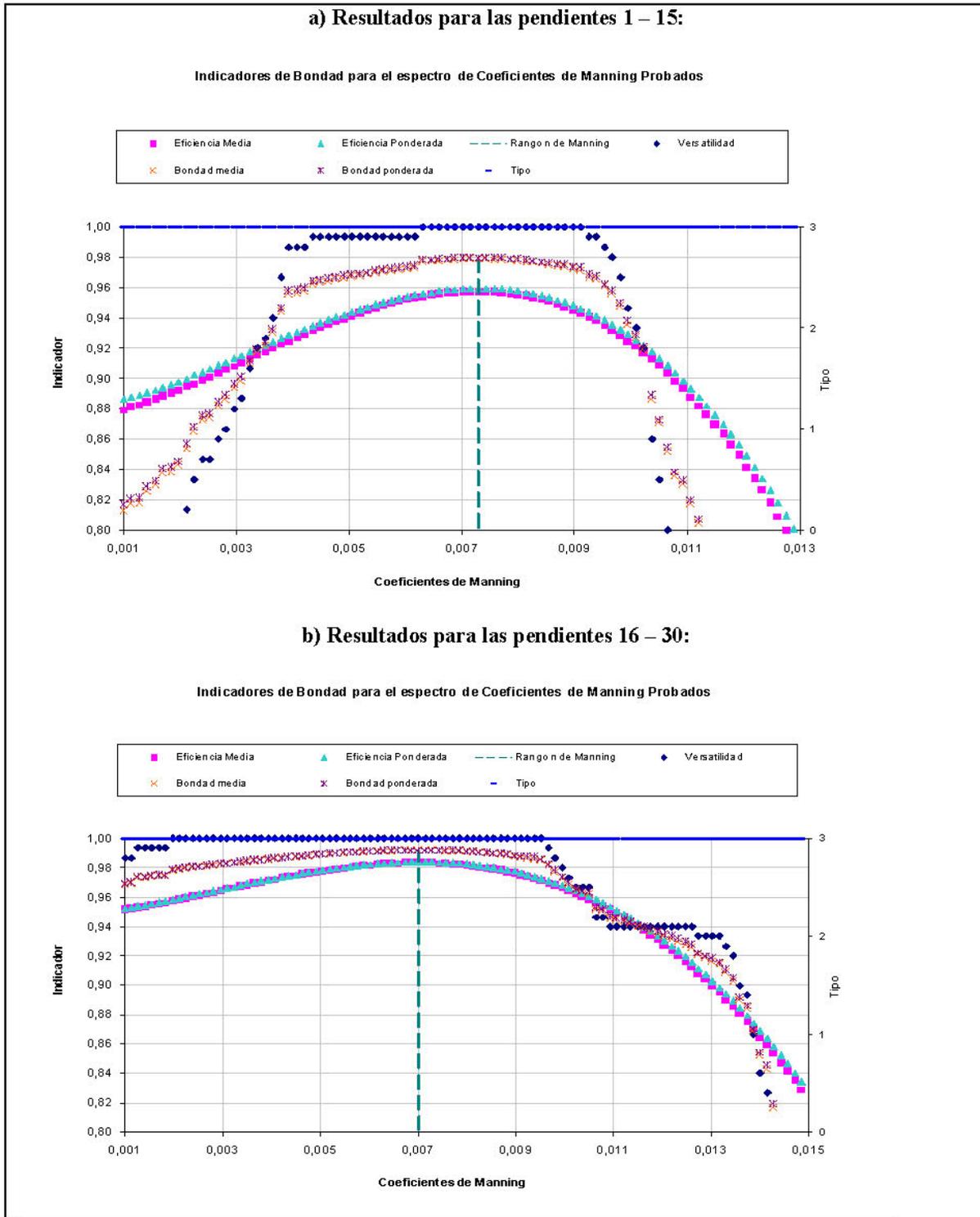


Figura 3-13. Resultados de la filtración cruzada. Tubería NOVAFORT para alcantarillado de 250 mm.



Finalmente, el resultado del filtrado con rangos de Eficiencias sobre el Error Cuadrático Medio arroja un valor de Coeficiente n de Manning con un valor cercano al **0.00730** para las pendientes 1 – 15 y cercano al **0.00702** para las pendientes 16 - 30, con una precisión de [0.001].

3.5 Coeficiente n de Manning Definitivo

Al determinar los mejores valores de coeficientes n de Manning mediante los métodos de filtrado, se recomienda usar el siguiente valor de Coeficiente n de Manning con los respectivos valores mínimos y máximos admisibles, para la Tubería NOVAFORT de 250 mm:

Coeficiente n de Manning 0.00716 con precisión de [+/- 0.0001]

El Coeficiente n de Manning recomendado tiene una habilidad de explicación del 100% de posibles eventos de caudal y pendiente, con eficiencias mayores o iguales al 95.75 % y una eficiencia media calculada en laboratorio de 97.86%.

Según los datos experimentales y los análisis desarrollados, este valor del Coeficiente n de Manning sólo es válido para valores superiores a 3.6 L/s y fueron válidos hasta caudales de 36.5 L/s. El rango del Coeficiente n de Manning utilizado para los análisis presentados en este capítulo fue de 0.001 a 0.015. En la Figura 3-14 se muestran los Errores Cuadráticos Medios determinados con el valor del Coeficiente n de Manning óptimo para las combinaciones de Caudal y Pendiente analizadas.

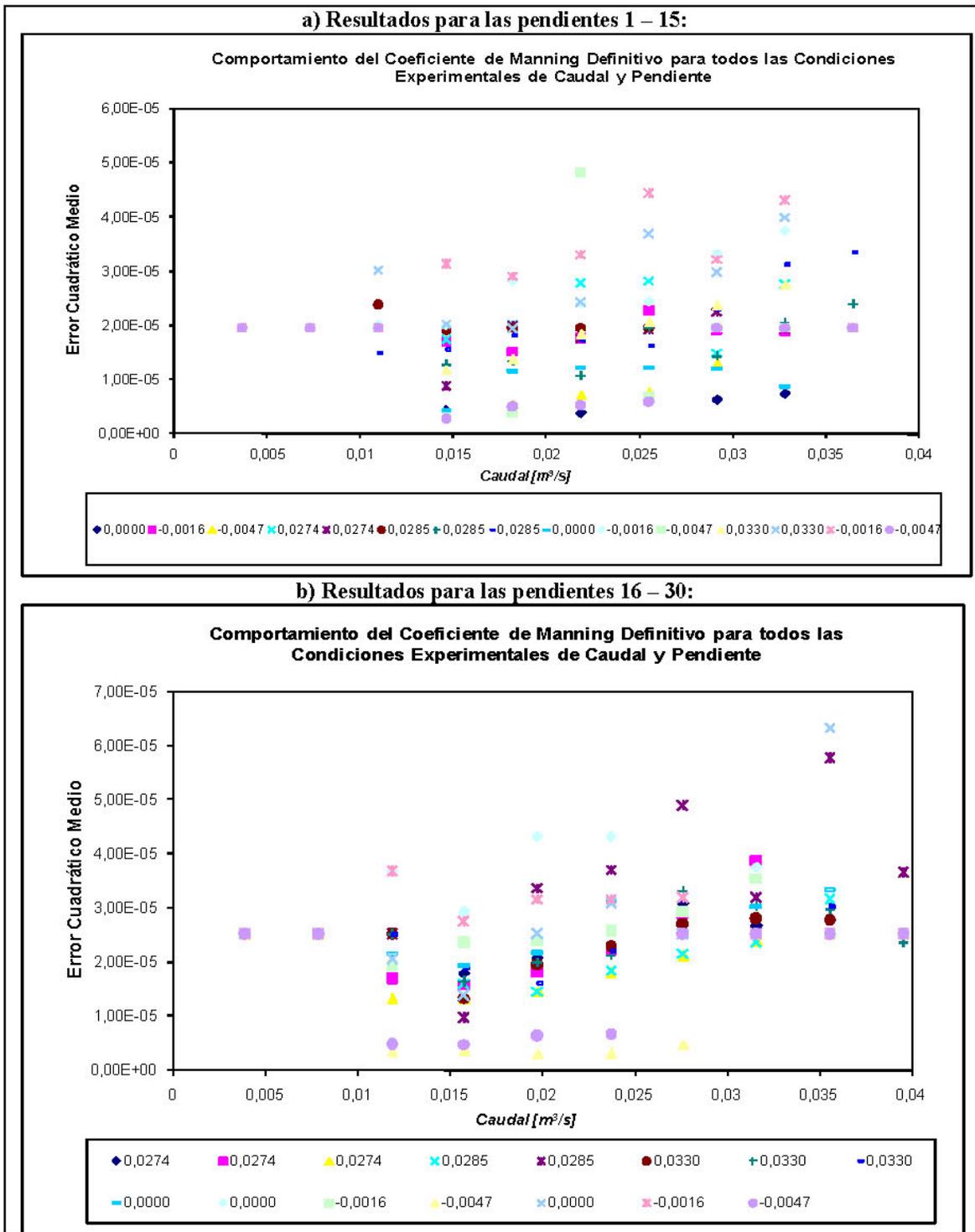


Figura 3-14. Eficiencias netas $ECM_{i,k}$ para todas las pruebas k hechas del Coeficiente n de Manning Óptimo. Tubería NOVAFORT para alcantarillado de 250 mm.

4 DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD ABSOLUTA

K_s

La metodología para la determinación de la rugosidad absoluta k_s , se describió ampliamente en el numeral 2.

Para el caso de la tubería NOVAFORT de 250 mm, se encontró que no se pudo obtener ningún valor de rugosidad absoluta k_s . En la Tabla 4-1 se muestran los resultados obtenidos para una prueba. Como se puede observar el valor de k_s obtenido para los 10 caudales probados es cero.

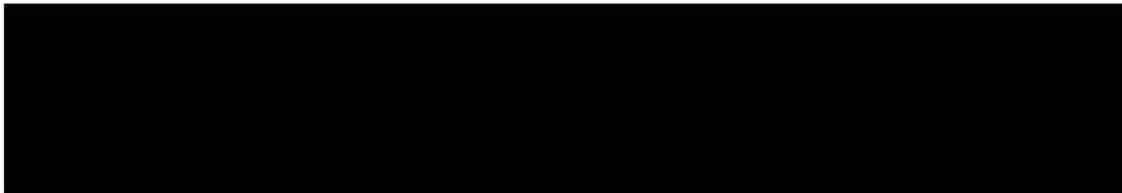


Tabla 4-1. rugosidad absoluta k_s obtenido para una prueba particular.

El hecho de que el valor obtenido para el k_s sea cero no significa que la tubería no presente rugosidad. Por el contrario lo que quiere decir es que el flujo es hidráulicamente liso (FHL). Como se explicará a continuación en este tipo de flujo la rugosidad de la tubería (que es mínima) no genera ningún efecto sobre el flujo, es por esta razón que en el modelo matemático usado, el valor obtenido de k_s es cero.

4.1.1 Flujo hidráulicamente liso (FHL)

Cuando el flujo interactúa con la pared de la tubería, se genera una zona en donde el flujo es laminar y priman las fuerzas viscosas del fluido sobre las fuerzas inerciales. Esta zona se conoce con el nombre de subcapa laminar viscosa o δ' . La relación existente entre δ' y el tamaño medio de la rugosidad de las paredes de la tubería (k_s) establece la diferencia entre los flujos hidráulicamente lisos y los hidráulicamente rugosos como se muestra en la Figura 4-1. Cuando el espesor de la subcapa laminar viscosa es mayor que el tamaño medio de la rugosidad, el flujo se comporta como si la rugosidad de la tubería no existiera, es decir, como flujo hidráulicamente liso.

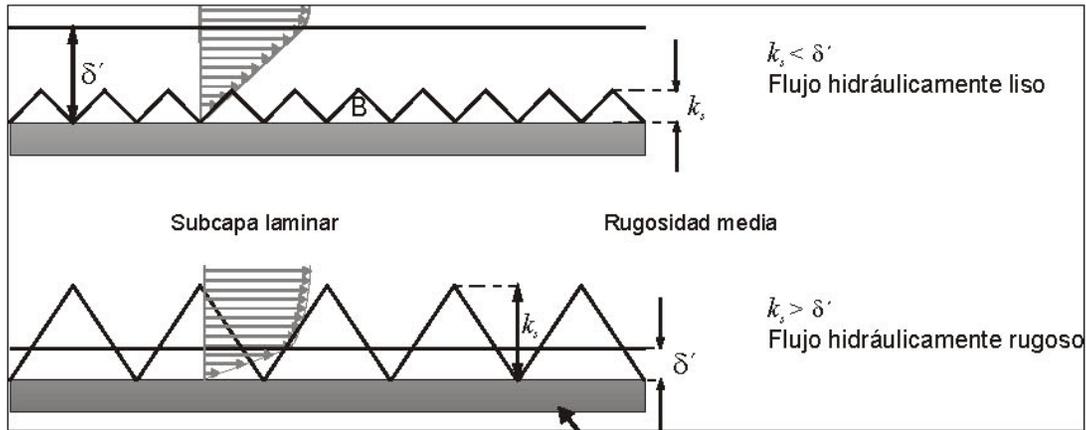


Figura 4-1. Relación entre la rugosidad relativa y la subcapa laminar viscosa. (Saldarriaga, 2007)

Entre las dos condiciones extremas mostradas en la Figura 4-1, existe una zona de transición donde el flujo deja de ser laminar para convertirse en turbulento. Bajo esta condición, tanto la rugosidad de la pared como la velocidad del flujo aportan a las pérdidas de energía que se generan, como se expresa en la ecuación de Colebrook – White: $f(k_s/d, Re)$.

Los límites que definen qué tipo de flujo se presenta en un caso particular, se encuentran definidos por los trabajos realizados por Colebrook – White. De acuerdo con sus experimentos, el flujo en transición ocurre cuando:

$$0.305\delta' < k_s \leq 0.610\delta' \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Esto es, cuando la rugosidad absoluta de la tubería se encuentra localizada entre el 30.5 % del espesor de la subcapa laminar viscosa y el 61% de la misma. Es de esperarse que cuando la rugosidad sea menor que el 30.5% de la subcapa laminar, el flujo sea hidráulicamente liso como se muestra en la parte superior de la Figura 4-1. Cuando la rugosidad es muy grande, como el caso de la parte inferior de la Figura 4-1, el flujo es hidráulicamente rugoso si supera el límite de 0.61 veces el espesor de la subcapa laminar viscosa.

5 RELACIONES ENTRE CAUDAL, PENDIENTES Y EL COEFICIENTE n DE MANNING ENCONTRADO

En la Figura 5 -1 se muestran los valores del coeficiente de rugosidad óptimos para cada condición de pendiente y caudal (extraídos del proceso de calibración masiva). Se aprecia la dispersión y amplio rango de los valores del Coeficiente n de Manning. Se puede observar que la mayoría de los datos obtenidos se encuentran entre valores del Coeficiente n de Manning de 0.002 y 0.011. En general para la pendiente de 2.85% se obtuvieron los valores más bajos de rugosidad y para la pendiente adversa de -0.16% se obtuvieron los valores mayores.

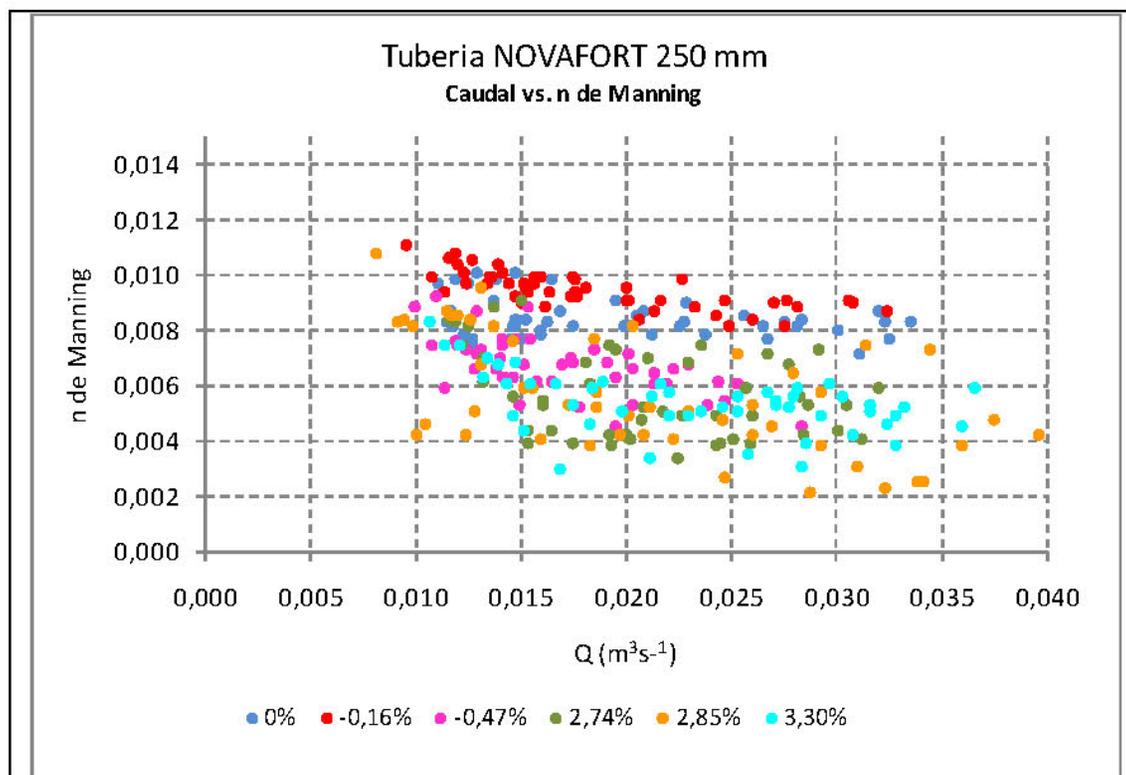


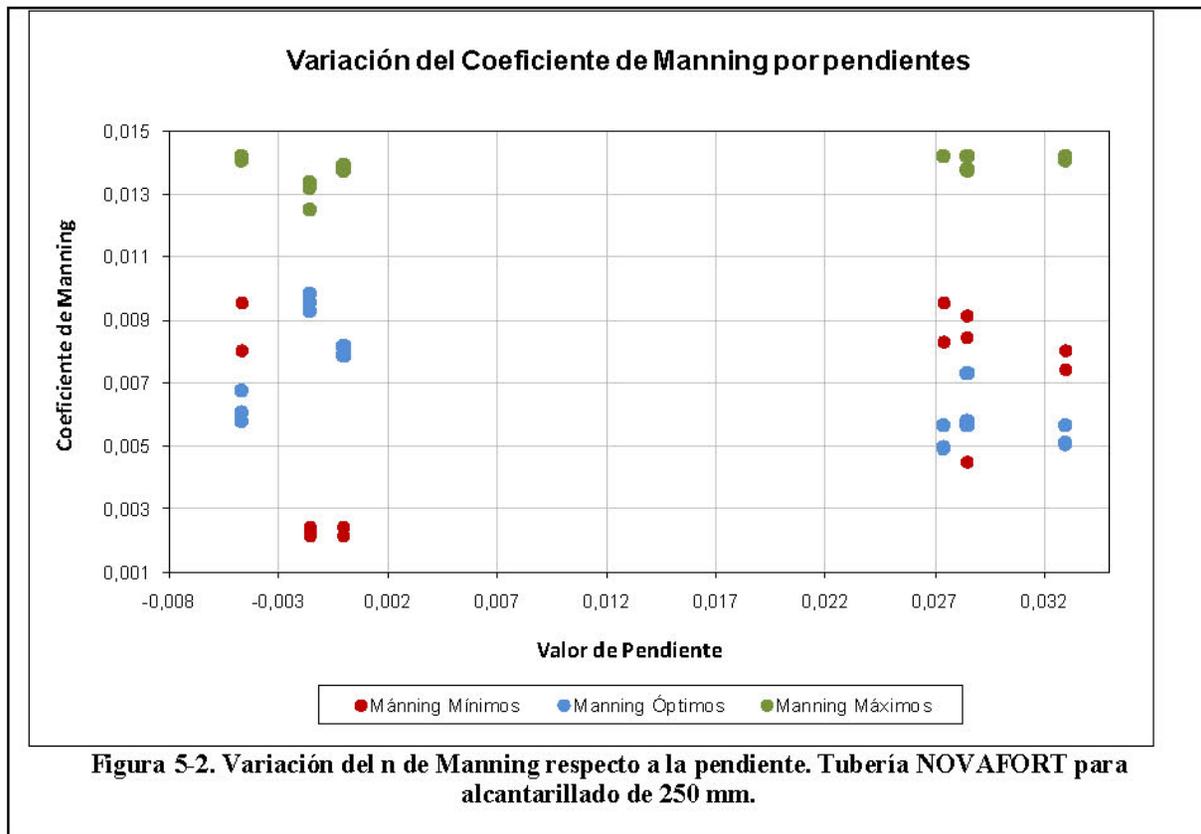
Figura 5-1. Coeficientes n de Manning óptimos para todas las condiciones de pendiente y caudal. Tubería NOVAFORT para alcantarillado de 250 mm.

Debido a que no es posible identificar un valor único del coeficiente n 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 cuando al ajuste del perfil del

flujo. El método de filtrado y escogencia del Coeficiente n de Manning óptimo para la tubería NOVAFORT de 250 mm se mostró previamente en el Capítulo 3.

Dado que el caudal y de la geometría no alcanzan a describir el correspondiente aumento de la fricción, éste debe recaer en el Coeficiente n de Manning.

Para las pendientes experimentadas se determinó un rango del Coeficiente 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 5-1 se puede observar la tendencia del valor del coeficiente de rugosidad a medida que la pendiente es más empinada.



La Figura 5-2 muestra que el rango de los valores del Coeficiente n de Manning no depende de la pendiente con que fluye el agua en la tubería NOVAFORT de alcantarillado. Los análisis realizados para identificar el valor que mejor represente la rugosidad del sistema, determinaron el rango de Coeficientes n de Manning por pendientes donde en general, el comportamiento del Coeficiente n Manning presentó los valores óptimos más bajos en la pendiente positiva.



6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones referentes al valor de Coeficiente n de Manning y la rugosidad absoluta k_s determinados de diseño

Del análisis hecho, se estableció que el valor más adecuado del Coeficiente n de Manning para diseño es **0.00716**. Según los datos experimentales y los análisis realizados, este valor del Coeficiente n de Manning es válido para valores superiores a 3.6 L/s y fueron comprobados para caudales de hasta 36.5 L/s (Figura 6-1). El rango del Coeficiente n de Manning utilizado para los análisis presentados fue de 0.001 a 0.015.

Adicionalmente se encontró que en la tubería NOVAFORT de 250 mm el flujo se comporta como *hidráulicamente liso*. Como consecuencia de esto se encontró que el modelo matemático usado no permitió determinar la rugosidad absoluta k_s de la tubería, ya que en el FHL el flujo se comporta como si la rugosidad de la tubería no existiera. En el capítulo 4 se explicó detalladamente este tipo de flujo.

6.2 Recomendaciones sobre el manejo de pendientes y caudales con el Coeficiente n de Manning y la rugosidad absoluta K_s para diseño

Se observó que el perfil de flujo se comportaba mejor para pendientes adversas y para pendientes positivas suaves. Para pendientes empinadas se observó que el flujo era supercrítico. En ningún caso se presentaron resaltos hidráulicos ni ondas de diamante.

Es de vital importancia tomar con la mayor precisión posible la medida de la pendiente y de la cota de batea de la tubería en la descarga. Cualquier error en la medición de esta cota altera fuertemente el valor de la rugosidad, ya que si se subestima, la rugosidad obtenida será mucho mayor y si se sobreestima, las rugosidades obtenidas serán menores.

Finalmente se recomienda realizar una investigación detallada sobre las ecuaciones que describen la hidráulica de flujos turbulentos hidráulicamente lisos (Ecuación de Colebrook-White). Aunque estas ecuaciones son físicamente basadas, fueron desarrolladas en un contexto histórico en el cual los materiales y las tecnologías usadas para fabricar las tuberías eran muy distintos a los métodos actuales.

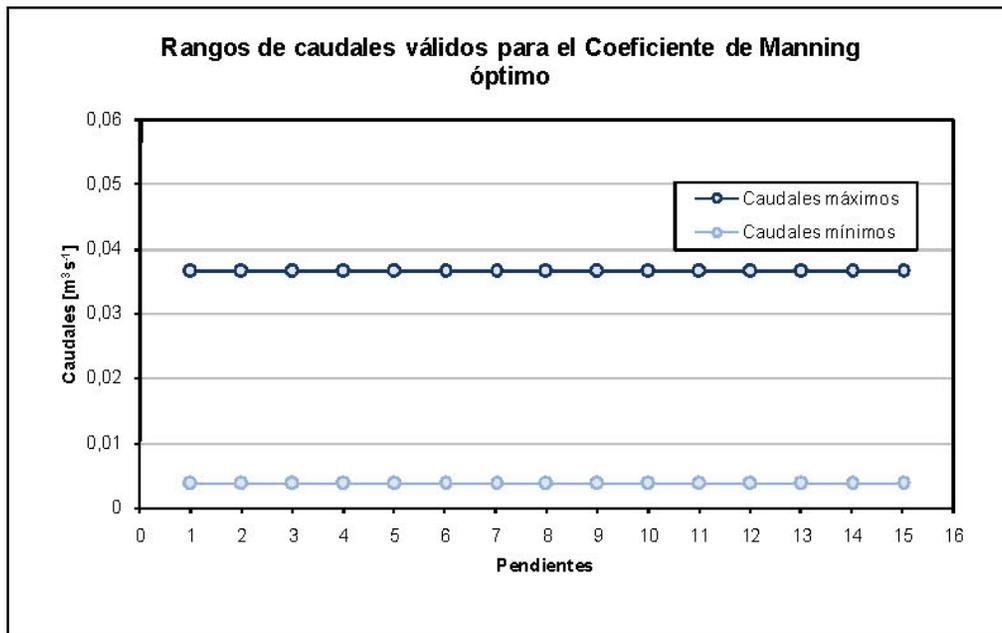


Figura 6-1. Rangos de validez para caudales en cada una de las 6 pendientes probadas, para el Coeficiente n de Manning óptimo. Tubería NOVAFORT para alcantarillado de 250 mm.



7 BIBLIOGRAFÍA

ACPA. (2005). *Evaluation of HDPE Pipe Performance on Kentucky DOT and Ohio DOT Construction Projects*. Kentucky.

ACPA. (2002). *Installation Anomalies? You Be The Judge*.

CHOW, V. T. (1956). *Open Channel Hydraulics*. Mc Graw Hill.

HENDERSON. (1966). *Open Flow Channel*. New York: McMillan Publishing Co.

JINETE, L. (1995). *Determinación de la Rugosidad en Tuberías de Alcantarillado de PVC y Gres*. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil. .

LEURO, S. (1996). *Determinación de la Rugosidad en Tuberías de Alcantarillado de PVC*. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.

SALDARRIAGA, J. (2002). *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.

SALDARRIAGA, J. (2002). *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.

Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de Tuberías. Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos*. Bogota: Alfaomega.

STROGATZ, S. (1994). *Nonlinear Dynamics and Chaos with Applications to Physics, Biology, Chemistry and Engineering*. USA: Addison-Wesley Publishing Co.

THOERSTEN, & LEES. (2001). *Montecarlo Analysis Toolbox User Manual. Civil and Environmental Engineering Department*. Imperial College School of Science Technology and Medicine.

UNGER, M., & HERNANDEZ, O. (1996). *Determinación de la Rugosidad en Tuberías de Alcantarillado de PVC Novafort de 10"*. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería.

WISS, J. E. (2002). *Condition Investigations of HDPE Pipe In-Service In the United States (Six States)*. Irving, Texas: The American Concrete Pipe Association.

8 ANEXOS

8.1 ANEXO 1

En la Figura 8-1 se presenta el perfil de flujo que presentó el mejor ajuste para una prueba particular con una pendiente de 0%. Por otro lado en la Figura 8-2 se presenta para la misma prueba el Coeficiente n de Manning óptimo que como se describió en el capítulo 3 es el que presentó mayor R^2 y menor error cuadrático medio (ECM). De la misma forma se presentan los resultados para las demás pendientes: -0.16%, -0.47%, 2.74%, 2.85% y 3.30%

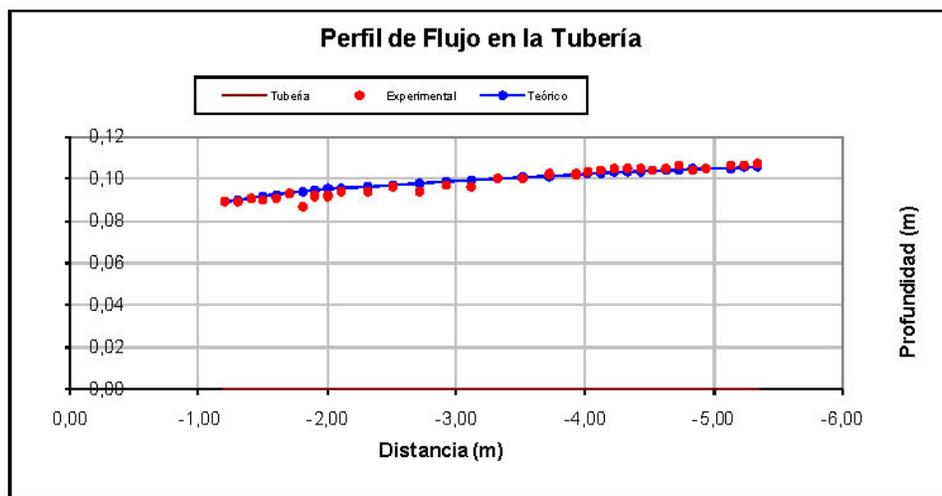


Figura 8-1. Perfil de flujo para la tubería NOVAFORT de 250 mm para una pendiente de 0%

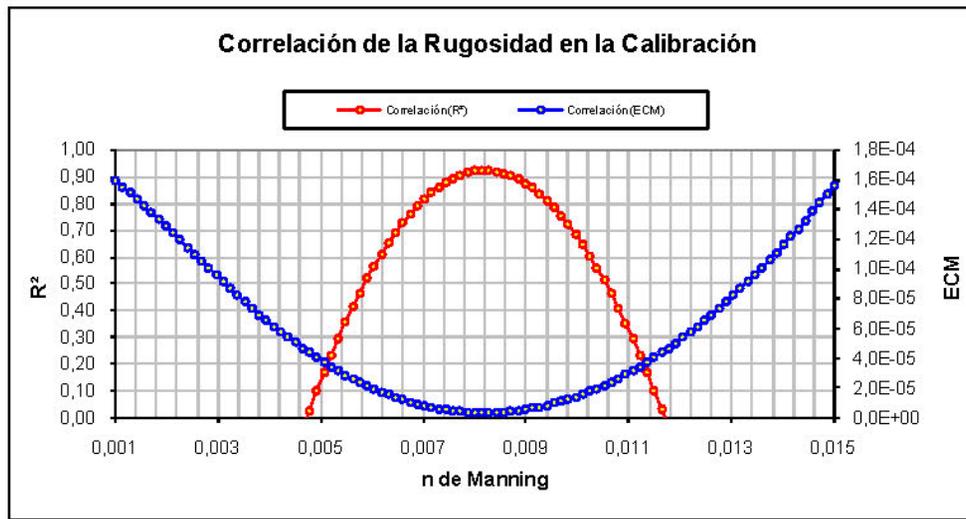


Figura 8-2. Coeficiente n de Manning óptimo obtenido para una pendiente de 0%

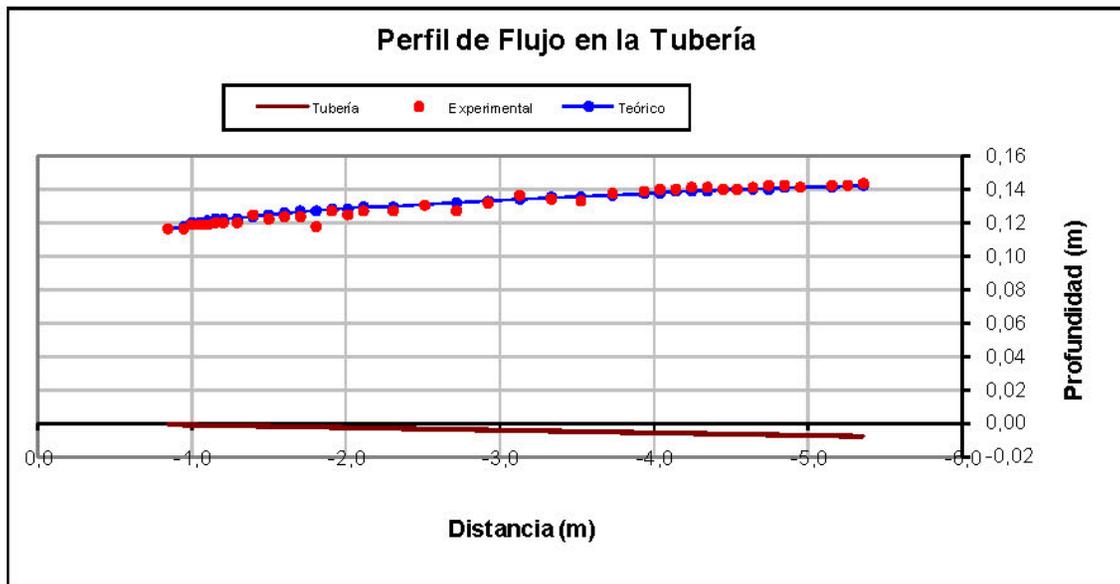


Figura 8-1. Perfil de flujo para la tubería NOVAFORT de 250 mm para una pendiente de -0.16%

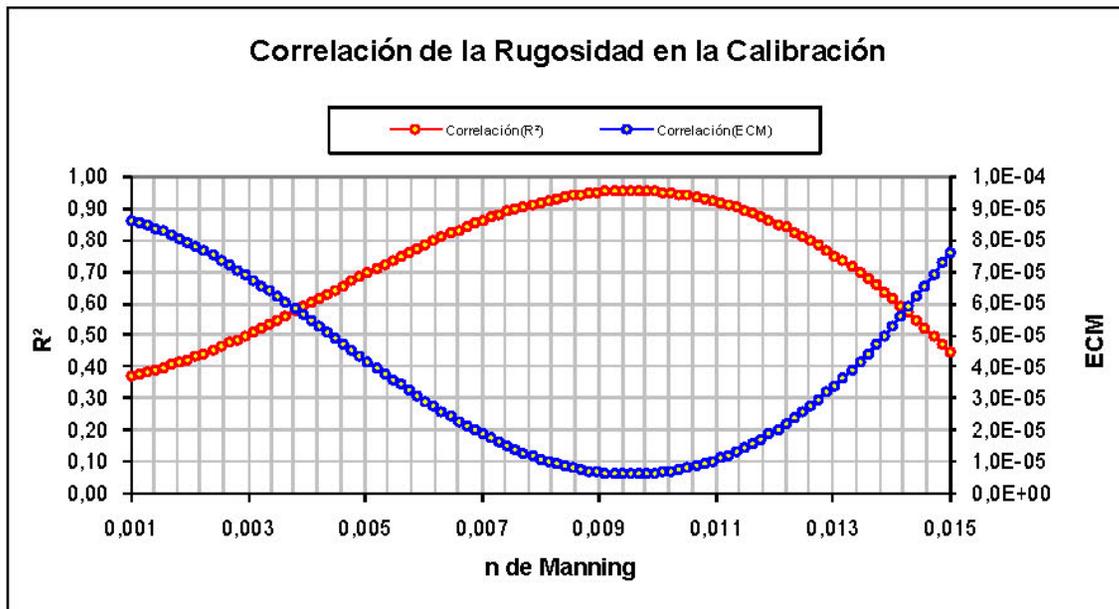


Figura 8-2. Coeficiente n de Manning óptimo obtenido para una pendiente de $-0,16\%$

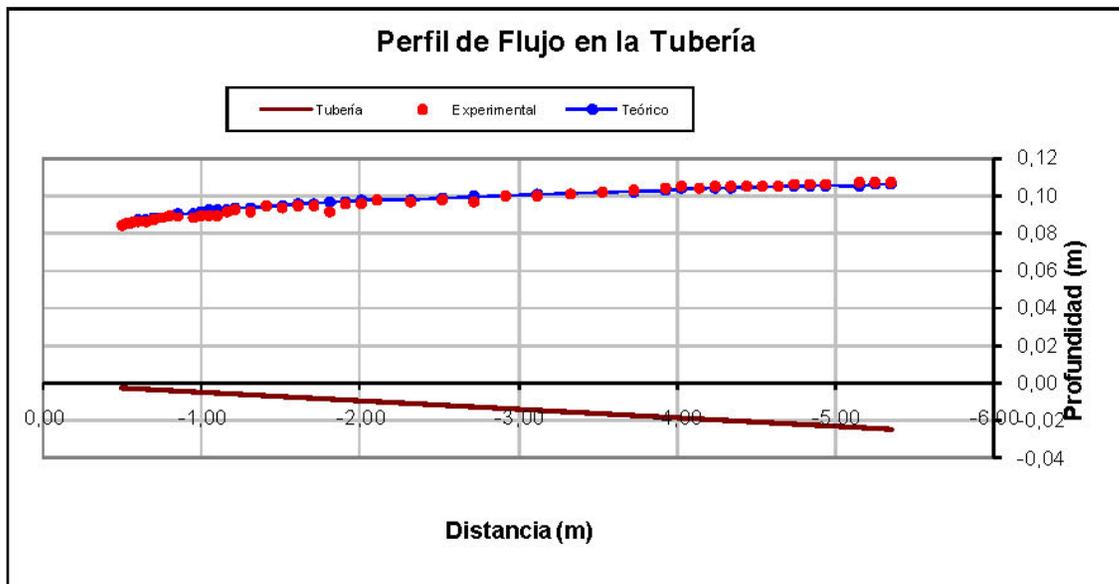


Figura 8-3. Perfil de flujo para la tubería NOVAFORT de 250 mm para una pendiente de $-0,47\%$

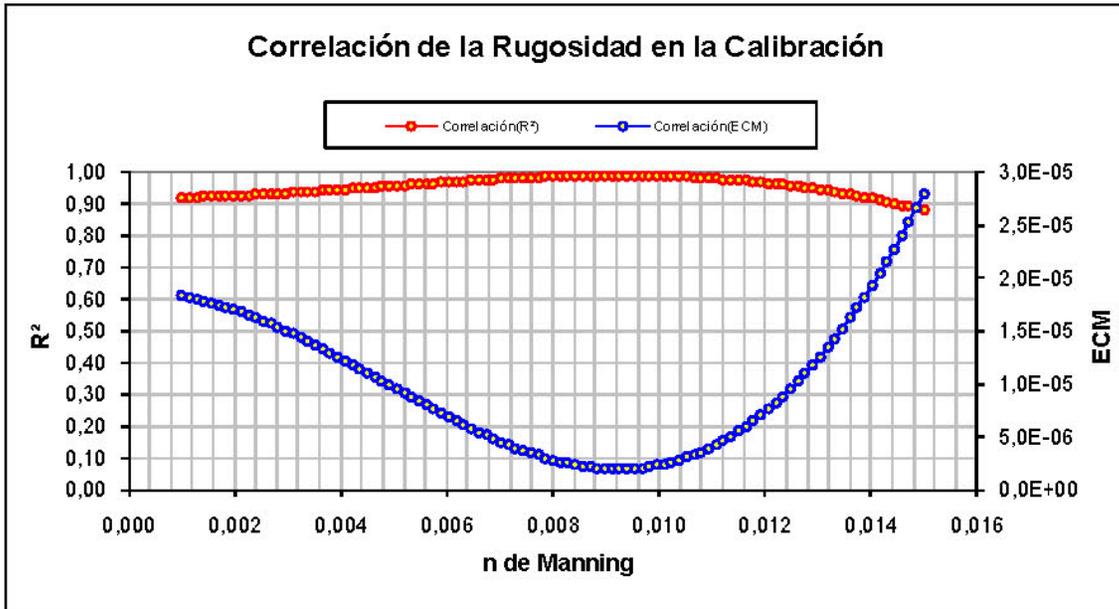


Figura 8-4. Coeficiente n de Manning óptimo obtenido para una pendiente de -0.47%

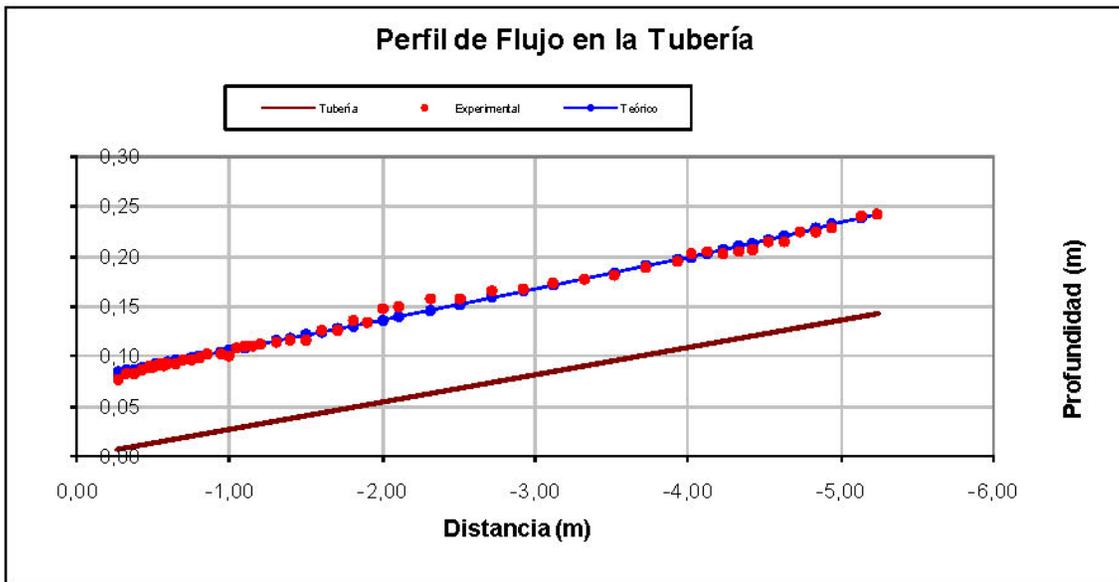


Figura 8-5. Perfil de flujo para la tubería NOVAFORT de 250 mm para una pendiente de 2.74 %

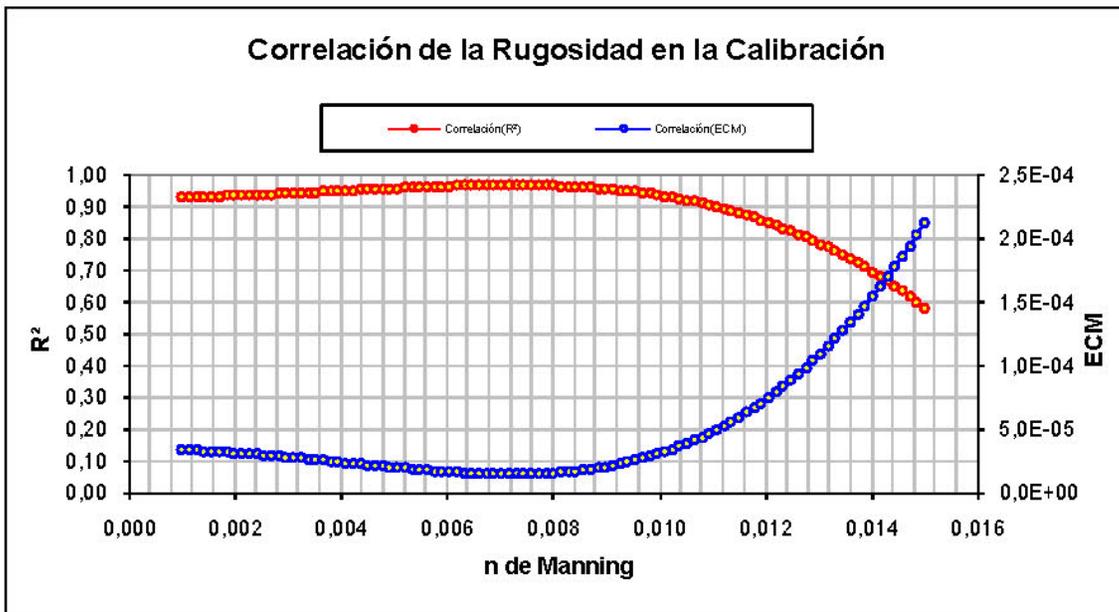


Figura 8-6. Coeficiente n de Manning óptimo obtenido para una pendiente de 2.74%

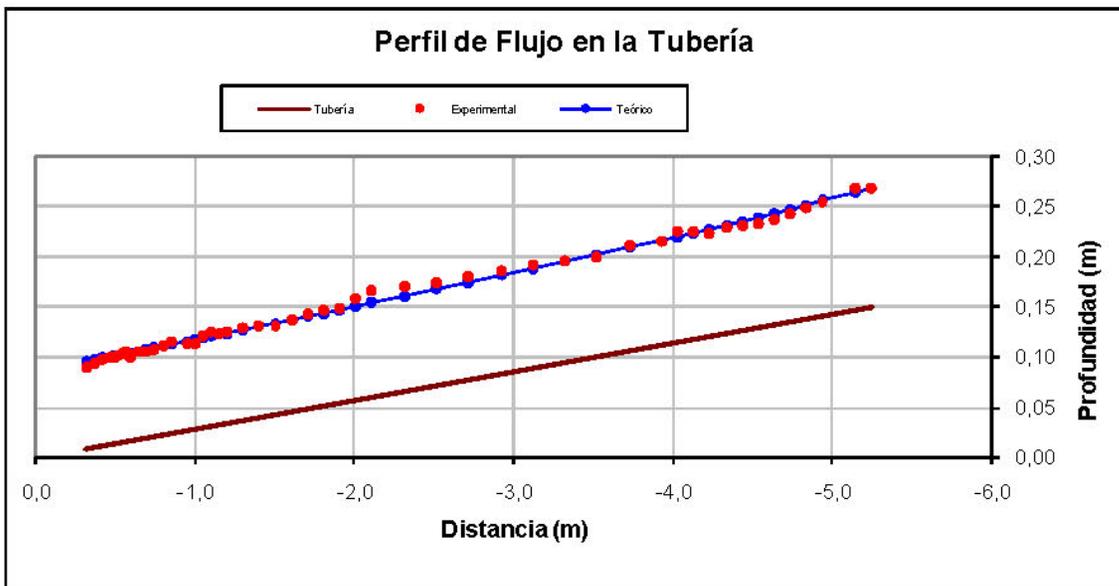


Figura 8-7 Perfil de flujo para la tubería NOVAFORT de 250 mm para una pendiente de 2.85%

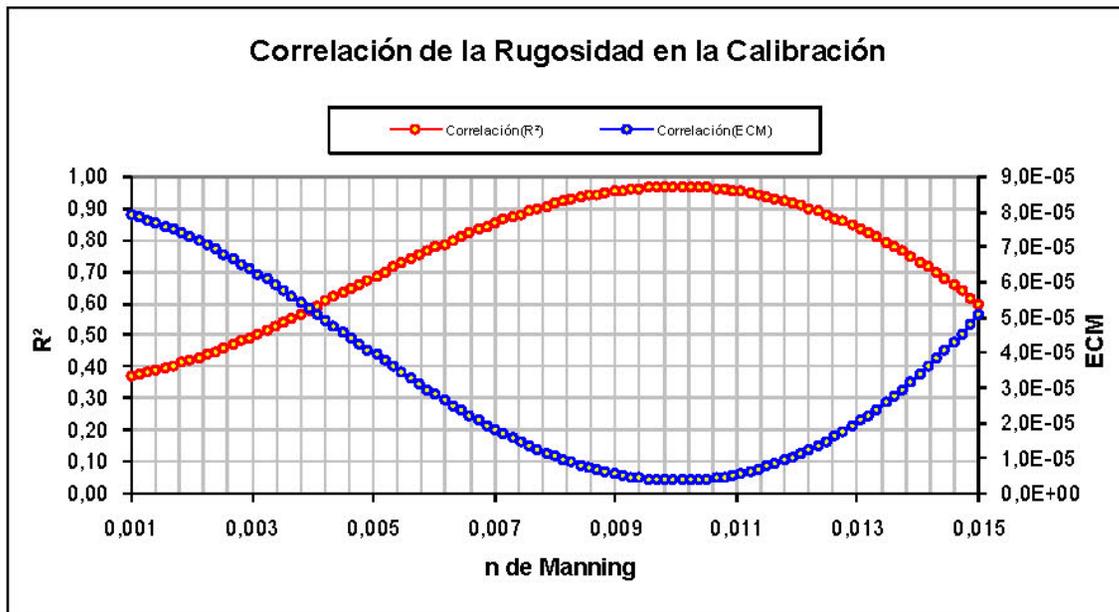


Figura 8-8. Coeficiente n de Manning óptimo obtenido para una pendiente de 2.85%

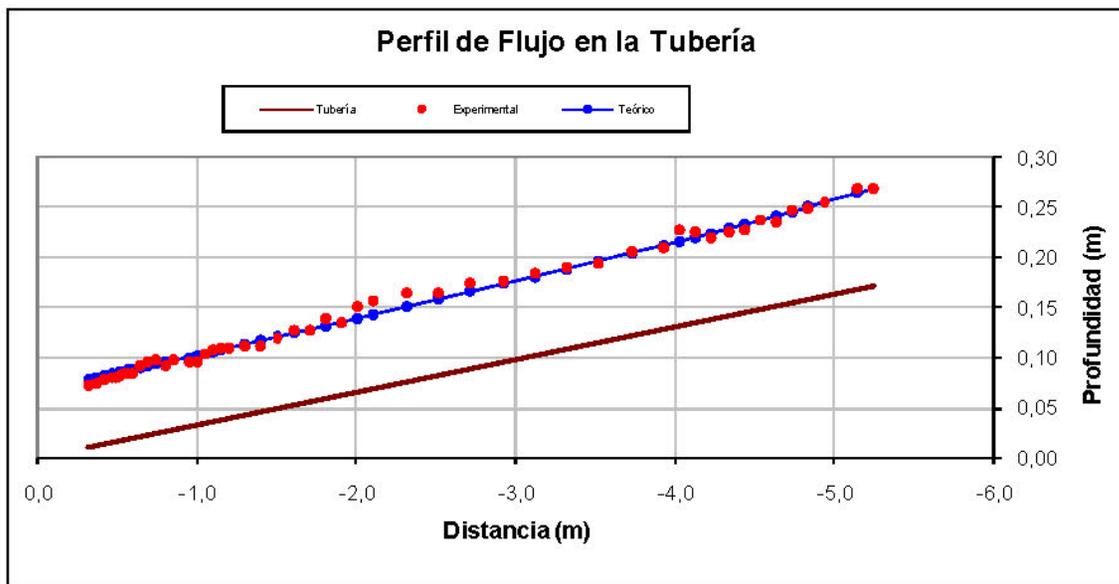


Figura 8-9. Perfil de flujo para la tubería NOVAFORT de 250 mm para una pendiente de 3.3%

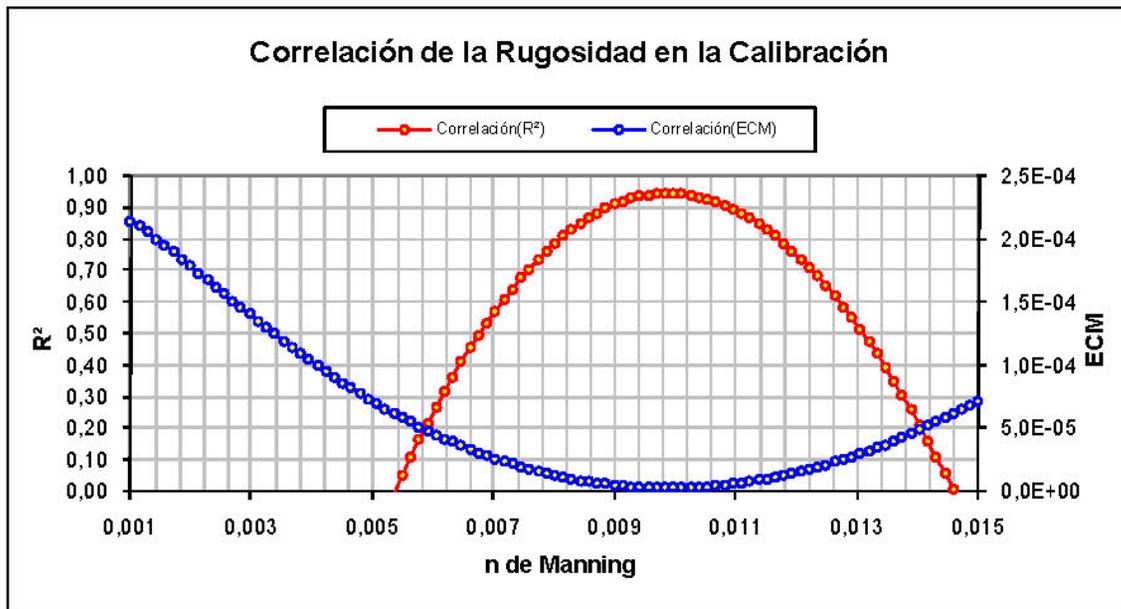


Figura 8-10. Coeficiente n de Manning óptimo obtenido para una pendiente de 3.3%