

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



**Estudio sobre el uso de la ecuación de Hazen-Williams vs  
la ecuación de Darcy-Weisbach en tuberías de gran  
diámetro (Sistemas Matrices) y en tuberías primarias de  
bombeo.**

**Tesis 2**

**Juan David Uribe Rojas**

## AGRADECIMIENTOS

---

Agradezco a Dios por darme la fortaleza para llevar a feliz término esta investigación. Agradezco a mis padres por todo el apoyo y ánimo que han brindado durante este año de investigación; sin ellos nunca hubiera logrado avanzar tanto en mi vida profesional. También agradezco profundamente al Ingeniero Juan Saldarriaga por asesorarme en mi trabajo de pregrado y durante este año con la Tesis de maestría, ya que fue una fuente de aprendizaje y de asesoramiento única y soy de los pocos afortunados que la tiene. Así mismo le quiero agradecer al Ingeniero Diego Páez por toda su ayuda y recomendaciones durante este año de trabajo. Agradecer a mi jurado externo Rafael Alejandro Flechas por evaluarme y por ser una fuente de información vital al haber trabajado en este tema antes de esta investigación. Finalmente agradecer a mis compañeros de Tesis de Maestría: Daniela Rincón, Gloria Moscote, Diego Copéte y Andrés López pues sus sugerencias y aportes me ayudaron a culminar este proyecto.



---

## CONTENIDO

---

Capítulo 1: Introducción y Objetivos .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General .....	2
1.2.2 Objetivos Específicos .....	2
Capítulo 2 Marco Teórico .....	3
2.1 Ecuaciones y fórmulas utilizadas en los diseños de RDAP.....	3
2.2 Ecuación de Hazen y Williams .....	4
2.3 Ecuación de Darcy-Weisbach .....	5
2.4 Antecedentes Históricos .....	10
2.5 Trabajos de Fabián Bombardelli y Marcelo García.....	15
2.6 Investigaciones Posteriores .....	17
2.7 Programas Utilizados.....	18
Capítulo 3. Metodología .....	21
3.1 Rugosidades Absolutas y Coeficientes de Hazen-Williams .....	21
3.2 Redes trabajadas: .....	24
3.2.1 Red Matriz de Bogotá: .....	24
3.2.2 Red Matriz de Medellín:.....	25
3.2.3 Red Ginebra Longitudes x 100 Caudales demandados x10.....	26
3.2.4 Red Andalucía Caudales x100.....	27
3.2.5 Red Dtown.....	28
3.2.6 Red La Cumbre .....	29
3.3 Procedimiento.....	30
3.3.1 Procedimiento detallado .....	30
3.3.2 Adquisición de la información .....	31
Capítulo 4. Resultados .....	35
4.1 Cálculos matemáticos .....	35
4.1.1 Ecuación de los emisores.....	35
4.1.2 Cálculo del Coeficiente de Hazen-Williams .....	36



---

4.1.3 Cálculo de la diferencias de Presión.....	37
4.2 Patrones de las Redes Trabajadas.....	37
4.2.1 Red Matriz de Bogotá.....	37
4.2.2 Red Matriz de Medellín.....	39
4.2.3 Red Ginebra.....	40
4.2.4 Red Andalucía.....	42
4.3 Analisis de emisores.....	44
4.3.1 Red Matriz de Bogotá.....	44
4.3.2 Red Matriz de Medellín.....	58
4.3.3 Red Ginebra.....	72
4.3.4 Red Andalucía.....	86
4.4 Depositos reales, red de bombeo y análisis de la hidráulica del sistema.....	99
4.4.1 Red Matriz de Bogotá.....	100
4.4.2 Red Matriz de Medellín.....	117
4.4.3 Red Ginebra.....	146
4.4.4 Red Andalucía.....	172
4.4.5 Red de bombeo DTown.....	194
4.4.6 Red La Cumbre.....	209
5. Conclusiones y trabajo futuro.....	216
Bibliografía.....	219
Anexos.....	221
Localización de los emisores.....	221
Emisores Bogotá.....	221
Emisores Ginebra.....	226
Emisores Andalucía.....	233
Emisores Medellín.....	238
Resultados Adicionales.....	243



---

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

---

- **Análisis de la hidráulica:** Consiste en simular la red utilizando alguno de los programas existentes con el fin de estudiar las presiones, números de Reynolds, pérdidas por fricción y el comportamiento general de un sistema.
- **Coefficiente de Hazen-Williams (C):** Coeficiente a dimensional que busca representar la rugosidad interna de las tuberías, entre más alto su valor, se presume que la tubería tiene una pared interna más lisa.
- **Diagrama de Moody:** Diagrama desarrollado con el fin de encontrar el factor de fricción de manera visual sin la necesidad de solucionar la ecuación implícita de Colebrook-White.
- **Ecuación de Colebrook-White:** Ecuación físicamente basada aplicable en todo el rango de flujo turbulento para hallar de manera implícita los factores de fricción que se presentaban en las tuberías.
- **Ecuación de Darcy-Weisbach:** Ecuación física y experimentalmente basada que permite cuantificar las pérdidas por fricción.
- **Ecuación de Hazen-Williams:** Ecuación empírica desarrollada a principios del siglo XX, para cuantificar de manera explícita las pérdidas por fricción en tuberías presurizadas con agua.
- **EPANET:** Programa gratuito desarrollado
- **Emisor:** similar a un nudo, pero con la gran diferencia de que su funcionamiento se basa en que el caudal que sale de él depende de la presión.
- **Factor de Fricción:** valor adimensional que permite relacionar las pérdidas por fricción con el número de Reynolds y la rugosidad absoluta de la tubería.
- **Flujo:** es el movimiento de partículas con respecto a un plano.
- **Flujo Lamina:** Flujo caracterizado por tener números de Reynolds menores a 2000 y en donde no se presentan intercambio de partículas entre las capas del flujo.
- **Flujo Turbulento:** Flujo caracterizado por presentar números de Reynolds superiores a 4000, donde existe un intercambio de partículas entre las diferentes capas de flujo.
- **Flujo Turbulento Hidráulicamente Rugoso (FTHR):** Flujo turbulento donde la subcapa laminar viscosa es 6.1 veces menor a la rugosidad absoluta de la tubería.
- **Flujo Turbulento Hidráulicamente Liso (FTHL):** Flujo turbulento donde la subcapa laminar viscosa es 30% mayor a la rugosidad absoluta de la tubería.
- **Número de Reynolds:** número adimensional que relaciona el diámetro, la velocidad y la viscosidad cinemática. Determina el tipo de flujo que se está presentando en un sistema.
- **Pérdidas por fricción (Hf):** Pérdidas de energía que se generan a causa del contacto entre el fluido y la pared de una estructura hidráulica.
- **REDES:** Programa desarrollado por el centro de investigación en acueducto y alcantarillado de la Universidad de los Andes (CIACUA), con el fin de estudiar redes y tuberías a presión.



- **Redes Matrices:** Redes compuestas por captación, transporte desde y hacia las plantas de tratamiento, tanques de almacenamiento, estaciones de bombeo y tramos de tubería con gran diámetro.
- **Subcapa laminar viscosa ( $\delta$ ):** Componente de la capa límite turbulenta, localizada cerca de la pared de la estructura hidráulica. Dentro de esta capa el flujo se comporta como flujo laminar.
- **Viscosidad cinemática ( $\nu$ ):** Característica del flujo que permite relacionar la densidad del fluido con su viscosidad dinámica.

## INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Ecuación de Bernulli.....	3
Ecuación 2 Ecuación de Hazen-Williams.....	4
Ecuación 3 Ecuación de Chézy.....	5
Ecuación 4 Ecuación de Darcy.....	6
Ecuación 5 Ecuación de Darcy forma 2.....	6
Ecuación 6 Ecuación de Darcy-Weisbach moderna.....	7
Ecuación 7 Ecuación de Hagen-Poiseuille.....	7
Ecuación 8 Ecuación de Blasius.....	8
Ecuación 9 Ecuación de Prandl.....	8
Ecuación 10 Ecuación de Colebrook-White para todo el rango de Flujo Turbulento.....	10
Ecuación 11 Ecuación de Swamee.....	10
Ecuación 12 Ecuación Modificada de Liu.....	11
Ecuación 13 Ecuación que relaciona el coeficiente De Hazen-Williams y El Factor de Fricción.....	11
Ecuación 14 Ecuación final que describe la relación entre f de Darcy y Coeficiente de Hazen-Williams.....	14

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Rugosidades Absolutas (Saldarriaga, 2007).....	21
Ilustración 2 Rugosidades Absolutas de acuerdo al RAS (Ministerio de Desarrollo Económico, 2013).....	22
Ilustración 3 Coeficientes de Hazen-Williams de acuerdo a las normas técnicas de EPM (Empresas Públicas de Medellín, 2006-2009).....	22
Ilustración 4 Coeficientes de Hazen-Williams del libro Hidráulica de Tuberías (Saldarriaga, 2007).....	23
Ilustración 5 Diferentes Coeficientes de Hazen-Williams.....	23
Ilustración 6 Red matriz de Bogotá.....	24
Ilustración 7 Red Matriz de Medellín.....	25



---

Ilustración 8 Red Ginebra.....	26
Ilustración 9 Red Andalucía. ....	27
Ilustración 10 Red de bombeo DTOWN. ....	28
Ilustración 11 Red La Cumbre.....	29
Ilustración 12 Se ejecuta el cálculo hidráulico.....	32
Ilustración 13 Se escoge la Hora en la que se desean obtener los datos de la tubería o los Nudos.....	32
Ilustración 14 Se eligen los parámetros relevantes.....	33
Ilustración 15 Se copian los datos en portapapeles y se pegan en un archivo de Excel.....	34
Ilustración 16 Patrón 1 de Red Bogotá.....	38
Ilustración 17 Patrón 2.....	38
Ilustración 18 Patrón 3.....	39
Ilustración 19 Patrón de la red matriz de Medellín.....	40
Ilustración 20 Patrón Tanque_Viejo.....	41
Ilustración 21 Patrón Tanque_Nuevo.....	41
Ilustración 22 Patrón Promedio. ....	42
Ilustración 23 Patrón finde semana.....	43
Ilustración 24 Patrón días ordinarios. ....	43
Ilustración 25 Patrón todos los días. ....	44
Ilustración 26 Resultados emisor 905.....	45
Ilustración 27 Resultados Emisor 1521.....	45
Ilustración 28 Resultados emisor 2189.....	46
Ilustración 29 Resultados emisor 1036.....	47
Ilustración 30 Resultados emisor 905.....	48
Ilustración 31 Resultados Emisor 2437.....	48
Ilustración 32 Resultados emisor 1702.....	49
Ilustración 33 Resultados emisor TUval.....	50
Ilustración 34 Gráfica de Reynolds vs Caudal emisor en emisor 1702.....	51
Ilustración 35 Gráfica del número de Reynolds vs caudal emisor en emisor TUval.....	51
Ilustración 36 Variación del Coeficiente de Hazen-Williams respecto al número de Reynolds para el caudal medio.....	52
Ilustración 37 Variación del Coeficiente de Hazen-Williams frente al número de Reynolds para el caudal mínimo.....	53
Ilustración 38 Variación del Coeficiente de Hazen-Williams frente al número de Reynolds para el caudal máximo. ....	53
Ilustración 39 Variación del Coeficiente de Hazen-Williams frente a los diámetros de la red para el caudal medio.....	54
Ilustración 40 Variación del coeficiente de Hazen-Williams frente a los diámetros de la red para el caudal Mínimo.....	54
Ilustración 41 Variación del coeficiente de Hazen-Williams frente a los diámetros de la red para el caudal Máximo.....	55
Ilustración 42 Diferencia de presiones para el caudal mínimo. ....	56



---

Ilustración 43 Diferencia de Presiones para el caudal medio.....	57
Ilustración 44 Diferencia de presiones para el caudal máximo.....	57
Ilustración 45 Resultados emisor 225.....	58
Ilustración 46 Resultdos Emisor 46.....	59
Ilustración 47 Resultados emisor 369.....	59
Ilustración 48 Resultados emisor 529.....	60
Ilustración 49 Resultados emisor 540.....	60
Ilustración 50 Resultados emisores 532.....	61
Ilustración 51 Caudal emisor vs número de Reynolds Emisor 529.....	62
Ilustración 52 Caudal emisor vs número de Reynolds Emisor 540.....	62
Ilustración 53 Caudal Emisor vs Número de Reynolds Emisor 532.....	63
Ilustración 54 Resultados Emisor 72.....	64
Ilustración 55 Resultados Emisor 495.....	64
Ilustración 56 Resultados Emisor 663.....	65
Ilustración 57 Variación del Coeficiente de Hazen-Williams frente al número de Reynolds para el caudal mínimo.....	66
Ilustración 58 Variación del Coeficiente de Hazen-Williams frente al número de Reynolds para el caudal Medio.....	66
Ilustración 59 Variación del Coeficiente de Hazen-Williams frente al número de Reynolds para el caudal Máximo.....	67
Ilustración 60 Variación del coeficiente de Hazen-Williams frente a los diámetros de la red para el caudal medio.....	67
Ilustración 61 Variación del coeficiente de Hazen-Williams frente a los diámetros de la red para el caudal Mínimo.....	68
Ilustración 62 Variación del coeficiente de Hazen-Williams frente a los diámetros de la red para el caudal Máximo.....	68
Ilustración 63 Diferencia de presiones con caudales medios.....	70
Ilustración 64 Diferencia de presiones con caudales Mínimos.....	70
Ilustración 65 Diferencia de presiones con caudales Máximos.....	71
Ilustración 66 Resultados Emisor 369.....	72
Ilustración 67 Resultados emisor 365.....	73
Ilustración 68 Resultados emisor 6.....	73
Ilustración 69 Características de los emisores pequeños.....	74
Ilustración 70 Resultados emisor 476.....	74
Ilustración 71 Resultados emisor 411.....	75
Ilustración 72 Rersultados emisor 458.....	75
Ilustración 73 Caudal emisor vs número de Reynolds emisor 476.....	76
Ilustración 74 Caudal emisor vs número de Reynolds emisor 411.....	77
Ilustración 75 Caudal emisor vs número de Reynolds emisor 458.....	77
Ilustración 76 Resultados emisor 392.....	78
Ilustración 77 Resultados emisor 464.....	79
Ilustración 78 Resultados emisor 457.....	79





---

Ilustración 79 Variación del coeficiente de Hazen-Williams vs el número de Reynolds para el caudal medio.....	80
Ilustración 80 Variación del coeficiente de Hazen-Williams vs el número de Reynolds para el caudal mínimo.....	81
Ilustración 81 Variación del coeficiente de Hazen-Williams vs el número de Reynolds para el caudal máximo.....	81
Ilustración 82 Variación del coeficiente de Hazen-Williams vs los diámetros de la red para el caudal medio.....	82
Ilustración 83 Variación del coeficiente de Hazen-Williams vs los diámetros de la red para el caudal mínimo.....	82
Ilustración 84 Variación del coeficiente de Hazen-Williams vs los diámetros de la red para el caudal Máximo.....	83
Ilustración 85 Diferencias de presiones para el caudal mínimo.....	85
Ilustración 86 Diferencias de presión para el caudal máximo.....	85
Ilustración 87 Diferencias de presión para el caudal máximo.....	86
Ilustración 88 Resultados emisor 317.....	87
Ilustración 89 Resultados emisor 13.....	87
Ilustración 90 Resultados emisor 102.....	88
Ilustración 91 Resultados emisor 298.....	89
Ilustración 92 Resultados emisor 279.....	89
Ilustración 93 Resultados emisor 267.....	90
Ilustración 94 Resultados emisor 278.....	91
Ilustración 95 Resultados emisor 269.....	92
Ilustración 96 Caudal emisor vs número de Reynolds emisor 278.....	92
Ilustración 97 Caudal emisor vs número de Reynolds emisor 269.....	93
Ilustración 98 Variación del coeficiente de Hazen-Williams vs número de Reynolds para el caudal medio.....	94
Ilustración 99 Variación del coeficiente de Hazen-Williams vs número de Reynolds para el caudal Mínimo.....	94
Ilustración 100 Variación del coeficiente de Hazen-Williams vs número de Reynolds para el caudal Máximo.....	95
Ilustración 101 Variación del coeficiente de Hazen-Williams vs diámetros de la red para el caudal Medio.....	95
Ilustración 102 Variación del coeficiente de Hazen-Williams vs diámetros de la red para el caudal Mínimo.....	96
Ilustración 103 Variación del coeficiente de Hazen-Williams vs diámetros de la red para el caudal Máximo.....	96
Ilustración 104 Diferencia de presiones para el caudal medio.....	98
Ilustración 105 Diferencia de presiones para el caudal mínimo.....	98
Ilustración 106 Diferencia de presiones para el caudal máximo.....	99
Ilustración 107 Nivel del tanque Cazucá.....	100
Ilustración 108 Nivel tanque NuevoSuba.....	101



---

Ilustración 109 Nivel tanque San Diego.....	101
Ilustración 110 Nivel Tanque Vitelma.....	102
Ilustración 111 Mapa con tramos a la salida de los embalses analizados.....	103
Ilustración 112 Diferencias en el cálculo de las pérdidas por fricción.....	104
Ilustración 113 Diferencias en el número de Reynolds.....	104
Ilustración 114 Diferencias en el cálculo de las pérdidas por fricción.....	105
Ilustración 115 Diferencia en el número de Reynolds.....	105
Ilustración 116 Diferencia en el cálculo de las pérdidas por fricción.....	106
Ilustración 117 Diferencia en el número de Reynolds.....	106
Ilustración 118 Diagrama de Moody para la tubería 3701.....	113
Ilustración 119 Diagrama de Moody para la tubería 4172.....	114
Ilustración 120 Diagrama de Moody para la tubería 75.....	115
Ilustración 121 Ubicación de los Tanques en la red matriz de Medellín.....	118
Ilustración 122 Nivel tanque 691 Medellín.....	119
Ilustración 123 Nivel tanque 692 Medellín.....	119
Ilustración 124 Nivel tanque 689 Medellín.....	120
Ilustración 125 Nivel Tanque 690 Medellín.....	120
Ilustración 126 Nivel tanque 690 red Medellín con 2 tanques.....	121
Ilustración 127 Nivel Tanque 689 red Medellín con 2 tanques.....	122
Ilustración 128 Diferencias en pérdidas por fricción tubería 78 red matriz de Medellín.....	123
Ilustración 129 Diferencia en el número de Reynolds tubería 78 red matriz de Medellín.....	123
Ilustración 130 Diferencias en pérdidas por fricción tubería 395 red matriz de Medellín.....	124
Ilustración 131 Diferencia en el número de Reynolds tubería 395 red matriz de Medellín.....	124
Ilustración 132 Diagrama de Moody 1 red matriz de Medellín Caudal Mínimo.....	134
Ilustración 133 Diagrama de Moody 2 red matriz de Medellín Caudal Mínimo.....	135
Ilustración 134 Diagrama de Moody 1 red matriz de Medellín Caudal Máximo.....	139
Ilustración 135 Diagrama de Moody 2 red matriz de Medellín Caudal Máximo.....	140
Ilustración 136 Diagrama de Moody 3 red matriz de Medellín Caudal Máximo.....	140
Ilustración 137 Diagrama de Moody 1 red matriz de Medellín Caudal Medio.....	144
Ilustración 138 Diagrama de Moody 2 red matriz de Medellín Caudal Medio.....	144
Ilustración 139 Nivel tanque 350 red Ginebra.....	147
Ilustración 140 Nivel tanque 481 red Ginebra.....	147
Ilustración 141 Nivel tanque 359 red Ginebra.....	148
Ilustración 142 Nivel tanque 372 red Ginebra.....	148
Ilustración 143 Nivel tanque 355 red Ginebra con solo 2 depositos.....	149
Ilustración 144 Nivel tanque 359 red Ginebra con solo 2 depositos.....	150
Ilustración 145 Diferencia en las pérdidas por fricción tubería 1.....	151
Ilustración 146 Diferencia en el número de Reynolds tubería 1.....	151
Ilustración 147 Diferencia en las pérdidas por fricción tubería 496.....	152
Ilustración 148 Diferencia en el número de Reynolds tubería 496.....	152
Ilustración 149 Diferencia en las pérdidas por fricción tubería 528.....	153
Ilustración 150 Diferencia en el número de Reynolds tubería 528.....	153



---

Ilustración 151 Diagrama de Moody red Ginebra tramos con Hazen-Williams mayor Caudal Medio.....	162
Ilustración 152 Diagrama de Moody red Ginebra con Darcy-Weisbach mayor y caudal medio.....	163
Ilustración 153 Diagrama de Moody red Ginebra con Hazen-Williams mayor y caudal mínimo.....	165
Ilustración 154 Diagrama de Moody red Ginebra con Darcy-Weisbach mayor y caudal mínimo.....	166
Ilustración 155 Diagrama de Moody red Ginebra con Hazen-Williams mayor y caudal máximo.....	168
Ilustración 156 Diagrama de Moody red Ginebra con Darcy-Weisbach mayor y caudal máximo.....	169
Ilustración 157 Nivel tanque 362 de la red de Andalucía.....	173
Ilustración 158 Nivel tanque 222 de la red de Andalucía.....	173
Ilustración 159 Nivel tanque 343 de la red de Andalucía.....	174
Ilustración 160 Nivel tanque 361 de la red de Andalucía.....	174
Ilustración 161 Nivel tanque 343 de la red de Andalucía con 2 tanques.....	175
Ilustración 162 Nivel tanque 222 de la red de Andalucía con 2 tanques.....	176
Ilustración 163 Diagrama de Moody de la tubería 65 Red de Andalucía.....	177
Ilustración 164 Diagrama de Moody de la tubería 137 Red de Andalucía.....	177
Ilustración 165 Diagrama de Moody de la tubería 78 Red de Andalucía.....	178
Ilustración 166 Diagrama de Moody de red de Andalucía tramos con Hazen-Williams mayor para el caudal mínimo.....	185
Ilustración 167 Diagrama de Moody de red de Andalucía tramos con Hazen-Williams mayor para el caudal medio.....	188
Ilustración 168 Diagrama de Moody de red de Andalucía tramos con Hazen-Williams mayor para el caudal máximo1.....	190
Ilustración 169 Diagrama de Moody de red de Andalucía tramos con Hazen-Williams mayor para el caudal máximo2.....	191
Ilustración 170 Diagrama de Moody de red de Andalucía tramos con Darcy-Weisbach mayor para el caudal máximo.....	191
Ilustración 171 Nivel Tanque 1 red Dtown.....	196
Ilustración 172 Nivel tanque 2 red Dtown.....	196
Ilustración 173 Nivel tanque 3 red Dtown.....	197
Ilustración 174 Nivel tanque 4 red Dtown.....	197
Ilustración 175 Nivel tanque 5 red Dtown.....	198
Ilustración 176 Nivel tanque 6 red Dtown.....	198
Ilustración 177 Nivel tanque 7 red Dtown.....	199
Ilustración 178 Patrones 1 y 5 de la red de Dtown con sus horarios de diferencia hidráulica.....	204
Ilustración 179 Patrones 2 y 3 de la red Dtown con sus horarios de diferencia hidráulica....	204
Ilustración 180 Patrón 4 de la red Dtown con sus horarios de diferencia Hidráulica.....	204



---

Ilustración 181 Diagrama de Moody red Dtown tramos con Hazen-Williams MAYOR para el caudal medio 1.....	205
Ilustración 182 Diagrama de Moody red Dtown tramos con Hazen-Williams MAYOR para el caudal medio 2.....	206
Ilustración 183 Diagrama de Moody red Dtown tramos con Darcy-Weisbach MAYOR para el caudal medio.....	206
Ilustración 184 Localización de los tanques de la red La Cumbre.....	209
Ilustración 185 Diagrama de Moody red La Cumbre tramos con Hazen-Williams MAYOR para el caudal mínimo.....	210
Ilustración 186 Diagrama de Moody red La Cumbre tramos con Darcy-Weisbach MAYOR para el caudal mínimo.....	210
Ilustración 187 Diagrama de Moody red La Cumbre tramos con Hazen-Williams MAYOR para el caudal medio.....	212
Ilustración 188 Diagrama de Moody red La Cumbre tramos con Darcy-Weisbach MAYOR para el caudal medio.....	212
Ilustración 189 Diagrama de Moody red La Cumbre tramos con Hazen-Williams MAYOR para el caudal máximo.....	214
Ilustración 190 Diagrama de Moody red La Cumbre tramos con Darcy-Weisbach MAYOR para el caudal máximo.....	214
Ilustración 191 Emisor 905 red matriz de Bogotá.....	221
Ilustración 192 Emisor 1521 red matriz de Bogotá.....	222
Ilustración 193 Emisor 2437 red matriz de Bogotá.....	222
Ilustración 194 Emisor 3758 red matriz de Bogotá.....	223
Ilustración 195 Emisor 1045 red matriz de Bogotá.....	223
Ilustración 196 Emisor 1036 red matriz de Bogotá.....	224
Ilustración 197 Emisor 2189 red matriz de Bogotá.....	224
Ilustración 198 Emisor TUval red matriz de Bogotá.....	225
Ilustración 199 Emisor 1702 red matriz de Bogotá.....	225
Ilustración 200 Emisor 369 red Ginebra.....	226
Ilustración 201 Emisor 365 red Ginebra.....	227
Ilustración 202 Emisor 6 red Ginebra.....	227
Ilustración 203 Emisor 398 red Ginebra.....	228
Ilustración 204 Emisor 476 red Ginebra.....	228
Ilustración 205 Emisor 455 red Ginebra.....	229
Ilustración 206 Emisor 456 red Ginebra.....	229
Ilustración 207 Emisor 392 red Ginebra.....	230
Ilustración 208 Emisor 458 red Ginebra.....	230
Ilustración 209 Emisor 476 red Ginebra.....	231
Ilustración 210 Emisor 411 red Ginebra.....	231
Ilustración 211 Emisor 464 red Ginebra.....	232
Ilustración 212 Emisor 457 red Ginebra.....	232
Ilustración 213 Emisor 102 red Andalucía.....	233



---

Ilustración 214 Emisor 13 red Andalucía.....	234
Ilustración 215 Emisor 317 red Andalucía.....	234
Ilustración 216 Emisor 278 red Andalucía.....	235
Ilustración 217 Emisor 269 red Andalucía.....	235
Ilustración 218 Emisor 298 red Andalucía.....	236
Ilustración 219 Emisor 279 red Andalucía.....	236
Ilustración 220 Emisor 267 red Andalucía.....	237
Ilustración 221 Emisor 286 red Andalucía.....	237
Ilustración 222 Emisor 225 red matriz de Medellín.....	238
Ilustración 223 Emisor 46 red matriz de Medellín.....	239
Ilustración 224 Emisor 369 red matriz de Medellín.....	239
Ilustración 225 Emisor 529 red matriz de Medellín.....	240
Ilustración 226 Emisor 540 red matriz de Medellín.....	240
Ilustración 227 Emisor 72 red matriz de Medellín.....	241
Ilustración 228 Emisor 663 red matriz de Medellín.....	241
Ilustración 229 Emisor 495 red matriz de Medellín.....	242
Ilustración 230 Emisor 532 red matriz de Medellín.....	242
Ilustración 231 Emisor 3758.....	243
Ilustración 232 Emisor 1045.....	243
Ilustración 233 Emisor 455.....	244
Ilustración 234 Emisor 456.....	244
Ilustración 235 Emisor 398.....	245
Ilustración 236 Reynolds vs Diámetro caudal medio Darcy-Weisbach.....	245
Ilustración 237 Reynolds vs Diámetro caudal medio Hazen-Williams.....	246
Ilustración 238 Reynolds vs Diámetro caudal Máximo Darcy-Weisbach.....	246
Ilustración 239 Reynolds vs Diámetro caudal máximo Hazen-Williams.....	247
Ilustración 240 Reynolds vs Diámetro caudal mínimo Darcy-Weisbach.....	247
Ilustración 241 Reynolds vs Diámetro caudal mínimo Hazen-Williams.....	248
Ilustración 242 Reynolds vs Diámetro caudal Medio Darcy-Weisbach.....	249
Ilustración 243 Reynolds vs Diámetro caudal medio Hazen-Williams.....	250
Ilustración 244 Reynolds vs Diámetro caudal Máximo Darcy-Weisbach.....	250
Ilustración 245 Reynolds vs Diámetro caudal Máximo Hazen-Williams.....	251
Ilustración 246 Reynolds vs Diámetro caudal Mínimo Darcy-Weisbach.....	251
Ilustración 247 Reynolds vs Diámetro caudal Mínimo Hazen-Williams.....	252
Ilustración 248 Reynolds vs Diámetro caudal Medio Darcy-Weisbach.....	252
Ilustración 249 Reynolds vs Diámetro caudal Medio Hazen-Williams.....	253
Ilustración 250 Reynolds vs Diámetro caudal Mínimo Darcy-Weisbach.....	253
Ilustración 251 Reynolds vs Diámetro caudal mínimo Hazen-Williams.....	254
Ilustración 252 Reynolds vs Diámetro caudal Máximo Darcy-Weisbach.....	254
Ilustración 253 Reynolds vs Diámetro caudal máximo Hazen-Williams.....	255
Ilustración 254 Reynolds vs Diámetro caudal Medio Darcy-Weisbach.....	255
Ilustración 255 Reynolds vs Diámetro caudal medio Hazen.....	256



---

Ilustración 256 Reynolds vs Diámetro caudal Máximo Darcy-Weisbach.....	256
Ilustración 257 Reynolds vs Diámetro caudal máximo Hazen-Williams.....	257
Ilustración 258 Reynolds vs Diámetro caudal Mínimo Darcy-Weisbach. ....	258
Ilustración 259 Reynolds vs Diámetro caudal mínimo Hazen-Williams .....	258

## INDICE DE FIGURAS

---

Figura 1 Salida de embalse Tibitoc Caudal Medio.....	108
Figura 2 Salida del Embalse Tibitoc Caudal Máximo. ....	108
Figura 3 Salida del Embalse Tibitoc Caudal Mínimo. ....	109
Figura 4 Salida del embalse de Wiesner caudal medio. ....	109
Figura 5 Salida del embalse de Wiesner caudal máximo. ....	110
Figura 6 Salida del embalse de Wiesner caudal mínimo. ....	110
Figura 7 Entramado interno de la red matriz de Bogotá Caudal Medio.....	111
Figura 8 Entramado interno de la red matriz de Bogotá caudal Máximo. ....	111
Figura 9 Entramado interno red matriz de Bogotá Caudal Mínimo. ....	112
Figura 10 Diferencias Hidráulicas en la red matriz de Medellín (1). ....	126
Figura 11 Diferencias Hidráulicas en la red matriz de Medellín (2). ....	126
Figura 12 Diferencias Hidráulicas en la red matriz de Medellín (3). ....	127
Figura 13 Diferencias Hidráulicas en la red matriz de Medellín (4). ....	128
Figura 14 Diferencias Hidráulicas en la red matriz de Medellín (5). ....	128
Figura 15 Tuberías con Altas diferencias red matriz de Medellín caudal medio. ....	129
Figura 16 Tuberías con Altas diferencias red matriz de Medellín caudal medio (ACERCAMIENTO).....	130
Figura 17 Tuberías con altas diferencias red Matriz de Medellín caudal máximo. ....	130
Figura 18 Tuberías con altas diferencias red Matriz de Medellín caudal máximo (Acercamiento).....	131
Figura 19 Tuberías con altas diferencias red Matriz de Medellín caudal mínimo.....	132
Figura 20 Tuberías con altas diferencias red Matriz de Medellín caudal mínimo (Acercamiento).....	133
Figura 21 Red Ginebra con la localizacion de los depositos y algunas tuberías analizadas. ...	146
Figura 22 Salida del primer embalse red Ginebra. ....	154
Figura 23 Diferencia en algunos tramos de la red Ginebra. ....	155
Figura 24 Salida de los otros embalses de la red Ginebra. ....	155
Figura 25 Diferencias de los entramados internos de la red Ginebra 1.....	156
Figura 26 Diferencias de los entramados internos de la red Ginebra 2.....	156
Figura 27 Diferencias de los entramados internos de la red Ginebra 3.....	157
Figura 28 Diferencias en las ramificaciones de la red Ginebra.....	157
Figura 29 Tramos de la red Ginebra con diferencias significativas en el número de Reynolds con la demanda media del sistema.....	158
Figura 30 Tramos internos de la red Ginebra con diferencias significativas en el número de Reynolds con la demanda media del sistema.....	159



Figura 31 Tramos de la red Ginebra con diferencias significativas en el número de Reynolds con la demanda máxima del sistema.....	159
Figura 32 Tramos internos de la red Ginebra con diferencias significativas en el número de Reynolds con la demanda máxima del sistema.....	160
Figura 33 Tramos de la red Ginebra con diferencias significativas en el número de Reynolds con la demanda mínima del sistema.....	160
Figura 34 Tramos internos de la red Ginebra con diferencias significativas en el número de Reynolds con la demanda mínima del sistema.....	161
Figura 35 Localización de los tanques y de algunos tramos analizados de la red de Andalucía.....	172
Figura 36 Salida del embalse red Andalucía.....	179
Figura 37 Principales tramos a la salida del embalse red Andalucía.....	179
Figura 38 Entramado interno de la red de Andalucía 1.....	180
Figura 39 Entramado interno de la red de Andalucía 2.....	180
Figura 40 Ramificaciones de la red Andalucía.....	181
Figura 41 Ramificaciones con altas diferencias red de andalucía Caudal Medio.....	182
Figura 42 Entramados internos con altas diferencias red Andalucía caudal medio.....	182
Figura 43 Ramificaciones con altas diferencias red Andalucía caudal máximo.....	183
Figura 44 Entramados internos con altas diferencias red Andalucía caudal máximo.....	183
Figura 45 Ramificaciones con altas diferencias red Andalucía caudal mínimo.....	184
Figura 46 Entramados internos con altas diferencias red Andalucía caudal mínimo.....	184
Figura 47 Esquema de la red en la hora de la demanda media de la red Dtown.....	200
Figura 48 Esquema de la red en la hora de la demanda máxima de la red Dtown.....	200
Figura 49 Esquema de la red en la hora de la demanda mínima de la red Dtown.....	201
Figura 50 Tuberías con las diferencias en el número de Reynolds.....	202
Figura 51 Sectores con las principales diferencias hidráulicas en Dtown.....	203

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Rugosidades absolutas de acuerdo a las normas técnicas de EPM (Empresas Públicas de Medellín, 2006-2009).....	22
Tabla 2 Tiempos de los horarios medios, máximos y mínimos.....	39
Tabla 3 Horarios de Caudales mínimo, medio y máximo.....	40
Tabla 4 Horarios de Caudales mínimo, medio y máximo.....	42
Tabla 5 Horarios de caudal mínimo, máximo y medio.....	44
Tabla 6 Características de los emisores pequeños.....	46
Tabla 7 Coeficientes emisores de los nudos.....	47
Tabla 8 Coeficientes de emisores grandes.....	76
Tabla 9 Información de los emisores pequeños.....	88
Tabla 10 Coeficientes de emisión para emisores grandes.....	90
Tabla 11 Resumen de Resultados para tuberías con altas diferencias para el caudal mínimo demandado de la red matriz de Medellín.....	136



---

Tabla 12 Resumen de resultados par Tuberías con altas diferencias para el caudal mínimo demandado de la red matriz de Medellín .....	136
Tabla 13 Tabla resumen de altas diferencias red Matriz Medellín caudal máximo 1.....	141
Tabla 14 Tabla resumen de altas diferencias red Matriz Medellín caudal máximo 2.....	142
Tabla 15 Tabla resumen de altas diferencias red Matriz Medellín caudal máximo 3.....	142
Tabla 16 Tabla resumen de altas diferencias red Matriz Medellín caudal medio 1.....	145
Tabla 17 Tabla resumen de altas diferencias red Matriz Medellín caudal medio 2.....	145
Tabla 18 Resumen de tuberías red Ginebra caudal medio 1.....	164
Tabla 19 Resumen de tuberías red Ginebra caudal medio 2.....	164
Tabla 20 Resumen de tuberías red Ginebra caudal mínimo 1.....	167
Tabla 21 Resumen de tuberías red Ginebra caudal mínimo 2.....	167
Tabla 22 Resumen de tuberías red Ginebra caudal máximo 1.....	170
Tabla 23 Resumen de tuberías red Ginebra caudal máximo 2.....	170
Tabla 24 Resumen de tramos de la red Andalucía para el caudal mínimo.....	186
Tabla 25 Resumen de tramos de la red Andalucía para el caudal medio.....	189
Tabla 26 Resumen de tramos de la red Andalucía para el caudal máximo 1.....	192
Tabla 27 Resumen de tramos de la red Andalucía para el caudal máximo 2.....	192
Tabla 28 Resumen de tramos de la red Andalucía para el caudal máximo 3.....	193
Tabla 29 Tiempos en los que la hidráulica de la red Dtown cambia significativamente.....	203
Tabla 30 Resumen de tramos de la red Dtown para el caudal medio 1.....	207
Tabla 31 Resumen de tramos de la red Dtown para el caudal medio 2.....	207
Tabla 32 Resumen de tramos de la red Dtown para el caudal medio 3.....	207
Tabla 33 Resumen de tramos de la red La Cumbre para el caudal mínimo 1.....	211
Tabla 34 Resumen de tramos de la red La Cumbre para el caudal mínimo 2.....	211
Tabla 35 Resumen de tramos de la red La Cumbre para el caudal medio 1.....	213
Tabla 36 Resumen de tramos de la red La Cumbre para el caudal medio 2.....	213
Tabla 37 Resumen de tramos de la red La Cumbre para el caudal máximo 1.....	215
Tabla 38 Resumen de tramos de la red La Cumbre para el caudal máximo 2.....	215





---

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

---

---

### 1.1 INTRODUCCIÓN

---

Los sistemas de distribución de agua potable se han convertido en una prioridad para los asentamientos urbanos en los últimos años; esto se debe al crecimiento de las grandes urbes, la demanda por agua adecuada para el consumo humano y para el desarrollo económico de las ciudades. Estos se encuentran divididos en sistemas Matrices, que son compuestos por tuberías de gran diámetro y las redes secundarias que son las que distribuyen internamente el agua a los usuarios. Todo lo anterior obliga a generar diseños y condiciones de operaciones adecuadas de tal forma que se logren los mejores estándares hidráulicos y de calidad de agua.

Para todo esto, se han utilizado ecuaciones para representar las pérdidas por fricción. Dentro de estas se encuentran 2 grandes grupos; las ecuaciones físicamente basadas y las ecuaciones empíricas, estas últimas utilizadas ampliamente por su rápida y sencilla solución, pese a contar con limitaciones en su uso debido a su naturaleza. Dentro del grupo de ecuaciones se encuentran la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White (o Hagen-Poiseuille) como máximo representante de las ecuaciones físicamente basadas y la ecuación de Hazen-Williams, siendo la ecuación empírica más utilizada al ser explícita para encontrar las pérdidas por fricción.

Las diferencias conceptuales y de metodología en que se fundamentan estas dos ecuaciones para su uso práctico, constituyen el motivo principal de la presente Tesis, la cual se enfocará en estudiar los efectos hidráulicos que generan utilizar la ecuación de Hazen-Williams en la operación de redes matrices y redes primarias de bombeo frente a los efectos de utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach. La primera parte presentará la introducción a este estudio; la segunda parte expondrá los objetivos tanto general como específicos que se plantearon; la tercera parte contiene el marco teórico de este estudio el cual plantea los fundamentos conceptuales, metodologías y principales aplicaciones derivados del usos de estas dos ecuaciones; la cuarta parte mostrará la metodología utilizada en este trabajo de investigación, la cual incluye el procedimiento, los escenarios trabajados y las rugosidades y coeficientes de Hazen-Williams reportados por fabricantes y por la literatura. En la quinta sección se mostrarán los resultados encontrados en esta primera fase, así como su análisis. Y finalmente en la sexta sección las conclusiones.



---

## 1.2 OBJETIVOS

---

### 1.2.1 OBJETIVO GENERAL

---

Establecer y cuantificar el efecto hidráulico que se presenta al operar redes matrices y redes primarias de bombeo utilizando la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

---

- Analizar el efecto de los diferentes materiales de tuberías comerciales para el diseño de redes matrices y redes primarias de bombeo.
- Establecer la magnitud de la diferencia entre la hidráulica de una red operada utilizando la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach.
- Realizar una aproximación teórica a los trabajos realizados por Bombardelli y García, y a su vez verificar la similitud entre ese estudio y el realizado en este trabajo.
- Establecer si la normativa actual de Colombia es adecuada para los diseñadores y operadores al utilizar las ecuaciones estudiadas durante esta investigación.
- Establecer si los coeficientes de Hazen-Williams reportados en la literatura y en los catálogos de los diferentes fabricantes son adecuados para las diferentes condiciones de operación de redes matrices.

---

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

---

El marco teórico utilizado durante este trabajo fue tomado de la Tesis de pregrado realizada por este mismo autor, ya que es la continuación de una investigación se consideró de la mayor conveniencia y utilidad mantener este marco teórico realizándole solo unas ligeras modificaciones. La tesis de pregrado de la que se tomó este marco Teórico es “*Efecto del uso de ecuaciones empíricas vs físicamente basadas sobre los costos de diseños optimizados en acueductos.*”, desarrollada por Juan David Uribe en el año 2012 y asesorada por Juan Guillermo Saldarriaga. Todo el contenido de este marco Teórico fue extraído de este trabajo y citado en esta Tesis, realizándole ligeras modificaciones teniendo en cuenta que hay variaciones entre los dos estudios (Uribe, 2012).

### 2.1 ECUACIONES Y FÓRMULAS UTILIZADAS EN LOS DISEÑOS DE RDAP.

---

En las tuberías a presión existen pérdidas de energía causadas por la fricción que existe entre el fluido y la tubería, y las pérdidas menores asociadas con cambios de dirección y a la instalación de diferentes accesorios. Estas pérdidas pueden ser calculadas utilizando la ecuación de conservación de la energía de Bernoulli (Uribe, 2012).

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 - HF - Hm = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

ECUACIÓN 1 ECUACIÓN DE BERNOULLI.

donde:

- $p_1$  y  $p_2$  = presiones en los dos puntos.
- $v_1^2$  y  $v_2^2$  = velocidad del flujo.
- $z$  = altura topográfica o con respecto a una cota.
- $g$  = gravedad  $\left(9.81 \frac{m^2}{seg}\right)$
- $\rho$  = densidad del fluido.
- $HF$  = pérdidas de energía entre el tramo 1 y 2.
- $Hm$  = pérdidas de energía causadas por accesorios.

De acuerdo con lo anterior, puede observarse que para el cálculo de las pérdidas por fricción se tienen limitaciones ya que se requeriría de una medición de la velocidad o el caudal y de la presión en la tubería, lo que no es aplicable ya que como es evidente, la tubería aún no está diseñada (Uribe, 2012).

Las anteriores limitaciones exigieron estudiar a fondo la relación que existía entre las características de la tubería (diámetro, material, longitud), las características del fluido (densidad y viscosidad) y las pérdidas por fricción a través de los tramos de tubería. Como resultado de estas investigaciones surgieron diversas ecuaciones para el cálculo de estas pérdidas. Estas ecuaciones se dividen en dos grupos: empíricas y físicamente basadas. De las primeras, la que en la actualidad tiene mayor importancia para los sistemas de acueducto, es la ecuación de Hazen-Williams, desarrollada a principios del siglo XX por Allan Hazen y Gardner Williams, que es la ecuación empírica más utilizada. Finalmente la ecuación más representativa del segundo grupo es la ecuación de Darcy-Weisbach desarrollada por Henry Darcy (1803-1858) y Julius Weisbach (1806 -1871). Ambas ecuaciones han sido ampliamente utilizadas en el diseño de redes de distribución de agua potable; sin embargo, la primera (Hazen-Williams) al ser una ecuación explícita para la velocidad y el caudal, presentaba una solución rápida y sencilla pero con límites de aplicabilidad en contraste con la ecuación de Darcy-Weisbach que es una ecuación implícita y requiere de iteraciones o un método numérico para su solución pero aplicable para cualquier condición de flujo (Uribe, 2012).

## 2.2 ECUACIÓN DE HAZEN Y WILLIAMS

Ecuación empírica desarrollada por Allan Hazen y Gardner Williams a principios de 1900. Esta ecuación tuvo la peculiaridad de no tener en cuenta los análisis hidráulicos de la ecuación de Darcy -Weisbach, ya que se basó en análisis estadísticos de diferentes redes de distribución con materiales que no fueron ni muy lisos, ni muy rugosos. La forma original de la ecuación se muestra a continuación en el sistema internacional de unidades (Uribe, 2012).

$$v = 0.849 * C * R^{0.63} * S^{0.54}$$

ECUACIÓN 2 ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS

donde:

v= Velocidad del flujo

R= Radio hidráulico (Área/ Perímetro mojado de la tubería)

S= Pendiente de la línea de gradiente de energía.

C= Coeficiente de Hazen-Williams (adimensional).

Es importante resaltar que el 0.849 es una constante utilizada y puede ser cambiada a 1.318 para el Sistema Inglés de Unidades (Liou, 1998).

Esta ecuación es de rápida solución y es explícita para la velocidad del flujo, lo que la hacía extremadamente útil para diseñar antes de la llegada de los medios de cálculo computacionales.

---

Estos estudios fueron realizados principalmente para adaptar la ecuación de Chézy a sistemas de distribución en vez de su uso en sistemas basados en canales. La ecuación de Chézy se muestra a continuación.

$$v = C * \sqrt{(R * S)}$$

ECUACIÓN 3 ECUACIÓN DE CHÉZY.

En la ecuación de Chézy, el cálculo del factor de fricción depende del radio hidráulico, rugosidad (Coeficiente de Chézy) y pendiente de fricción del canal. Es importante resaltar que esta ecuación fue la más utilizada para el cálculo de la velocidad en tuberías para el año de 1903 (Uribe, 2012).

En su momento, Gardner Williams y Allan Hazen publicaron una serie de valores de C (coeficiente de Hazen-Williams) para diversos materiales. De tal forma que era posible calcular la velocidad (comprobación de diseño), las pérdidas por fricción (en caso de que se tuviera una tubería con diámetro establecido) o el diámetro con el que se quisiera diseñar la tubería.

Los coeficientes definidos por Hazen-Williams, aplicaban solo para las condiciones “comunes o normales de la práctica” por lo que desde su misma creación, esta ecuación contaba con limitaciones que debían ser tenidas en cuenta a la hora de realizar los diseños de RDAP.

Las limitaciones establecidas por los creadores son:

- Solo es aplicable para agua
- Debe estar en condiciones normales (cercas a 20 grados centígrados)
- Velocidades inferiores a  $3 \frac{m}{s}$
- Diámetros superiores a 75 mm o 3 pulgadas.

Así mismo, resulta necesario resaltar que estos coeficientes no son constantes, ya que como se explica en la literatura y por los mismos Gardner Williams y Allan Hazen, pueden variar por la edad de la tubería (aumento de la rugosidad) o cuando los diámetros de la tubería son demasiado pequeños. Estos coeficientes son representados en la actualidad con valores entre 80 y 150, donde 80 es un material rugoso y 150 para un material especialmente liso (PVC o PEAD) (Uribe, 2012).

---

### 2.3 ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH

---

La ecuación de Darcy-Weisbach es la ecuación físicamente basada más utilizada para diseños de RDAP, redes pluviales y de alcantarillado. Esta ecuación fue inicialmente desarrollada por

Henry Darcy (1803-1858) mediante el uso de experimentos de flujo en tuberías, realizados cerca a París (Saldarriaga, 2007).

Los experimentos se llevaron a cabo utilizando un rango de diámetros que iba desde los 12 mm (0.0122 m) hasta los 500 mm (0.5 m), y los materiales utilizados para la experimentación incluían vidrio, hierro, plomo, hierro recubierto con bitumen, hierro fundido y latón. Para los experimentos se incluyeron tuberías con paredes recién construidas y tuberías con cierto tiempo de ser utilizadas, llevando a resultados con velocidades ente 0.03 y  $6 \frac{m}{s}$ . Los caudales fueron medidos con tanques de aforo y las longitudes de las tuberías siempre fueron superiores a los 100 metros (excepción de vidrio y plomo que tuvieron tramos más cortos). (Saldarriaga, 2007)

A partir de los resultados obtenidos, Henry Darcy concluyó que estos podían ser expresados mediante la siguiente ecuación:

$$R * S_f = a * v + b * v^2$$

ECUACIÓN 4 ECUACIÓN DE DARCY

Donde:

R= Radio Hidráulico de la tubería.

$S_f$ = Pendiente de Fricción.

v= Velocidad media dentro de la tubería.

$a$  y  $b$  = Coeficientes que describen la edad y el material de la tubería.

De sus experimentos y trabajos llego a la siguiente expresión:

$$S_f = \left( 0.00164 + \frac{0.000042}{d} \right) * \frac{Q^2}{d^5}$$

ECUACIÓN 5 ECUACIÓN DE DARCY FORMA 2.

Donde:

Q= caudal

d= diámetro de la tubería.

Esta ecuación fue utilizada posteriormente por Fanning (1837-1911) para combinarla junto con la ecuación desarrollada por Julius Weisbach (1806-1871), formando una ecuación físicamente basada que se ajustaba de gran forma a los diferentes datos experimentales (Saldarriaga, 2007).

---

Julius Weisbach, desarrolló una ecuación que ayudaría a predecir las pérdidas por fricción dentro de las tuberías. Esta ecuación requería estar en función del tipo de fluido, el diámetro, el material de la tubería y la velocidad así como un factor de fricción. Así llegó a la siguiente expresión:

$$h_f = f * \frac{l}{d} * \frac{v^2}{2 * g}$$

ECUACIÓN 6 ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH MODERNA.

donde:

l= Longitud de la tubería.

f= Factor de fricción adimensional.

Esta ecuación incluyó únicamente las pérdidas por fricción con las paredes de la tubería. La ecuación anterior puede ser obtenida, así mismo, mediante análisis dimensional considerando los principales elementos físicos que influyen en el movimiento del fluido en una tubería (Uribe, 2012).

Sin embargo, la obtención del factor de fricción presentaba un problema complejo, en primera instancia por que dependía del tipo de flujo que se podía presentar (flujo laminar o flujo turbulento) y porque en caso de presentarse flujo turbulento se requería de un método implícito para determinarlo, por lo que se desarrollaron diferentes ecuaciones para su obtención. Una de ellas fue la ecuación para el flujo laminar de Hagen-Poiseuille que Julius Weisbach utilizó (Uribe, 2012).

$$f = \frac{64}{Re}$$

ECUACIÓN 7 ECUACIÓN DE HAGEN-POISEUILLE.

donde:

Re= Número de Reynolds en flujo laminar (2000 o menores en tramos de tuberías).

Sin embargo, estas condiciones raramente se presentaban en las RDAP, por lo que se requerían ecuaciones adicionales para hallar el factor de fricción en flujos turbulentos hidráulicamente rugosos y lisos (Uribe, 2012).

En 1911 Blasius, alumno de Prandl von Karman (Saldarriaga, 2007), desarrolló una ecuación mediante experimentos empíricos para hallar el factor de fricción en flujos con números de Reynolds entre (5000-100000). La ecuación a la que llegó fue (Uribe, 2012):

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$$

ECUACIÓN 8 ECUACIÓN DE BLASIUS.

Por su parte, Prandl desarrolló una ecuación para hallar el factor de fricción, pero dada su complejidad de solución, el buen cumplimiento de la ecuación de Blasius y el hecho de que la ecuación de Colebrook-White aplica para todos los flujos, esta ecuación no fue ampliamente utilizada.

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2 * \log_{10} Re * \sqrt{f} - 0.8$$

ECUACIÓN 9 ECUACIÓN DE PRANDL.

Más adelante, se desarrollaron los trabajos de los Ingenieros Johann Nikuradse y de Lewis Moody. El primero de ellos realizó diversos experimentos para diferentes diámetros, con el ánimo de entender la naturaleza del factor de fricción, variando el caudal, de tal forma que incluyera un rango importante de números de Reynolds y abarcara los 4 tipos de flujo (Flujo Laminar, Flujo Transicional, Flujo Turbulento Hidráulicamente Liso (FTHL) y Flujo Turbulento Hidráulicamente Rugoso (FTHR)) (Saldarriaga, 2007).

De los experimentos realizados logró concluir:

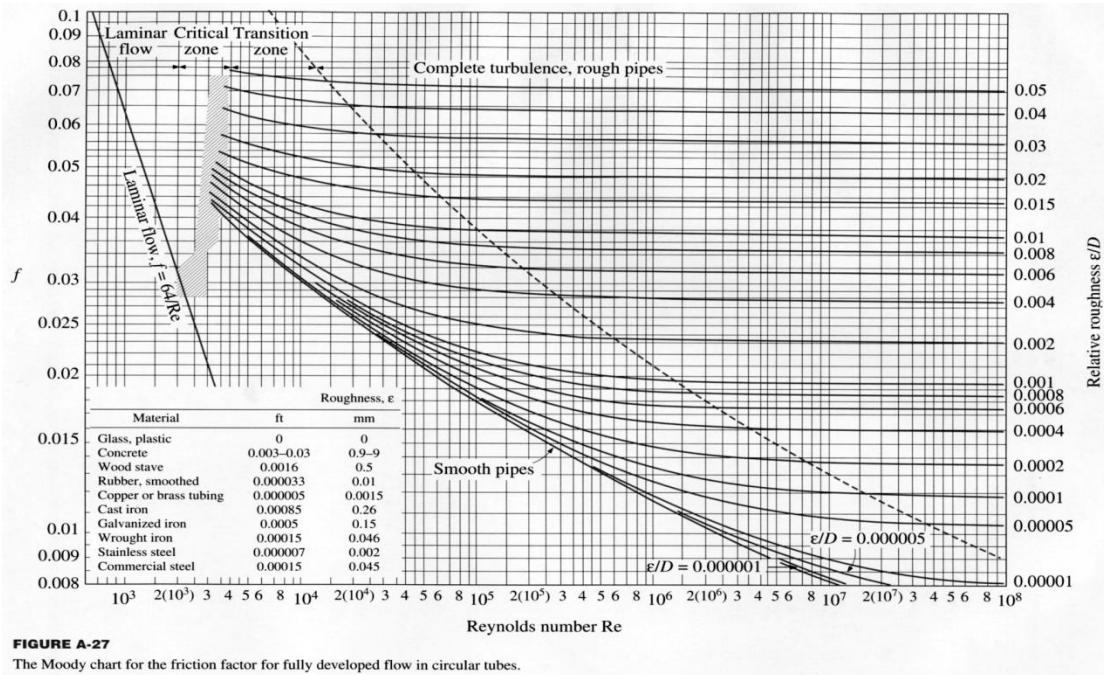
- Cuando el número de Reynolds es inferior a 2000, el factor de fricción es independiente de la rugosidad relativa de la tubería  $\left(\frac{ks}{d}\right)$ .
- Al entrar en el flujo Liso, tanto el número de Reynolds como la rugosidad relativa de la tubería juegan un papel fundamental dentro del cálculo del factor de fricción.
- Finalmente, a medida que se aumentan los números de Reynolds, Nikuradse notó que las curvas en su gráfica se volvían prácticamente horizontales, llevando a que el factor de fricción dejara de ser una función del número de Reynolds y pasara a ser únicamente una función de la rugosidad relativa de la tubería, en otras palabras el numero de Reynolds deja de ser un factor importante para la obtención del factor de fricción.

Prosiguiendo su investigación, Moody en 1940, avanzó en la determinación de las pérdidas por fricción en tuberías con rugosidades reales y no artificiales. Desarrolló un trabajo, combinando el trabajo del ingeniero alemán y de Colebrook (Saldarriaga, 2007). De sus investigaciones, los resultados más destacables son:

- Para el flujo hidráulicamente rugoso, el factor de fricción dependía exclusivamente de la rugosidad relativa de la tubería.



- Con lo anterior Moody, amplió su experimento y mediante la adquisición de tuberías de diferentes materiales y diámetros comerciales el factor de fricción (sólo para FTFR). Con estos resultados encontró la rugosidad relativa y con esta y la gráfica de factor de fricción vs Rugosidad relativa, pudo determinar las diferentes rugosidades absolutas de las tuberías (Saldarriaga, 2007).
- Con esto Moody llegó a la conclusión que para cada tipo de material, había una rugosidad asociada y que esta representaba el comportamiento hidráulico de cada una de las tuberías.
- Con toda la información y la ecuación de Colebrook, Moody pudo desarrollar un diagrama donde se podía ver el tipo de flujo y determinar el factor de fricción para diferentes tuberías comerciales (ver Ilustración 1).



**FIGURE A-27**  
 The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

### GRÁFICA 1 DIAGRAMA DE MOODY.

Esta gráfica fue ampliamente utilizada antes de la aparición de los métodos computacionales ya que como se verá más adelante, encontrar el factor de fricción matemáticamente era de una complejidad importante para la época.

Para el flujo hidráulicamente rugoso, las investigaciones de Colebrook y White en 1939, utilizando las investigaciones de Prandl, von Karman y Nikuradse, permitieron establecer una ecuación para hallar el factor de fricción para el flujo de transición. Ellos notaron sin embargo, que los resultados encontrados solo representaban los extremos, y decidieron que el comportamiento en tuberías reales debería de estar descrito por una única ecuación (Saldarriaga, 2007), llegando a obtener:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10} \left( \frac{ks}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

ECUACIÓN 10 ECUACIÓN DE COLEBROOK-WHITE PARA TODO EL RANGO DE FLUJO TURBULENTO.

Esta última ecuación aplica para todos los tipos de flujo turbulento (para los laminares se utiliza la Ecuación 2.1.2-3). Sin embargo y como se mencionó anteriormente, esta es una ecuación de difícil solución si no se cuenta con un método computacional o una calculadora, por 2 motivos:

- El logaritmo incluido es de difícil solución manual.
- Es una ecuación implícita para despejar el factor de fricción.

Posteriormente, Swamee y Jain desarrollarían en 1976 otra ecuación para el cálculo del factor de fricción, de tal forma que fuera más simple y fácil de resolver. La ecuación a la que llegaron fue:

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

ECUACIÓN 11 ECUACIÓN DE SWAMEE.

Como se puede observar, esta ecuación es explícita y no requiere de métodos numéricos para su solución. Sin embargo tiene rangos de cumplimiento para rugosidad relativa y números de Reynolds (Liou, 1998).

$$10^{-6} < \frac{\varepsilon}{D} < 10^{-2}$$

$$5 * 10^3 < Reynolds < 10^8$$

La gran ventaja es que sus rangos de cumplimiento solo presenta un error máximo del 5% con respecto a la ecuación de Colebrook-White.

## 2.4 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Varios investigadores han realizado trabajos para estudiar ambas ecuaciones de diseño. En 1998 Chyr Pyng Liou publicó un trabajo en el cual demostró las falencias y rangos de validez de la ecuación de Hazen-Williams, así como la alta variabilidad de su coeficiente respecto al número de Reynolds, su diámetro y su rugosidad relativa (Uribe, 2012).

Liou empezó su trabajo relacionando el coeficiente de Hazen-Williams con la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach. Primero, reorganizó la ecuación de tal forma que la

pendiente del gradiente hidráulico quedara expresada en términos de la altura de velocidad  $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$ . Al realizar esto, dejaba la velocidad expresada en el lado derecho como un denominador elevado a la 0.1841 (Liou, 1998). Luego, al introducir la viscosidad cinemática  $\nu * \nu^{0.1841}$  es combinada con  $\left(\frac{d}{\nu}\right)^{0.1841}$  para formar el número de Reynolds elevado a la 0.1841. Posteriormente, expresó el radio hidráulico como  $\left(\frac{d}{4}\right)$ , combinando esto con  $\left(\frac{d}{\nu}\right)^{0.1841}$ , resultaba en el diámetro elevado a la 1.0185. Luego siendo  $\varepsilon$  la rugosidad absoluta de la tubería, Liou dividió el diámetro encontrado en el paso anterior de tal forma que este quedara  $d$  y  $d^{0.0185}$ , y reescribirlo para obtener la expresión  $\left(\frac{d}{\varepsilon}\right)^{0.0185} \varepsilon^{0.0185}$ . Finalmente, expresando la pendiente como  $\left(\frac{h}{L}\right)$ , manipuló la ecuación expresándola de esta forma (Uribe, 2012):

$$h = \left[ \frac{133.84}{(C^{1.8519} * R^{0.1481})} * \left(\frac{\varepsilon}{d}\right)^{0.0185} * \frac{1}{\varepsilon^{0.0185} * \nu^{0.1481}} \right] * \frac{l}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

ECUACIÓN 12 ECUACIÓN MODIFICADA DE LIU.

Luego, reemplazando el lado derecho de la ecuación de Hazen-Williams con la ecuación de Darcy - Weisbach se obtiene:

$$C = 14.07 f^{-0.54} * R^{0.08} * \left(\frac{\varepsilon}{d}\right)^{0.01} * \varepsilon^{-0.01} * \nu^{-0.08}$$

ECUACIÓN 13 ECUACIÓN QUE RELACIONA EL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS Y EL FACTOR DE FRICCIÓN.

donde:

C: Coeficiente adimensional de Hazen-Williams.

R: Número de Reynolds

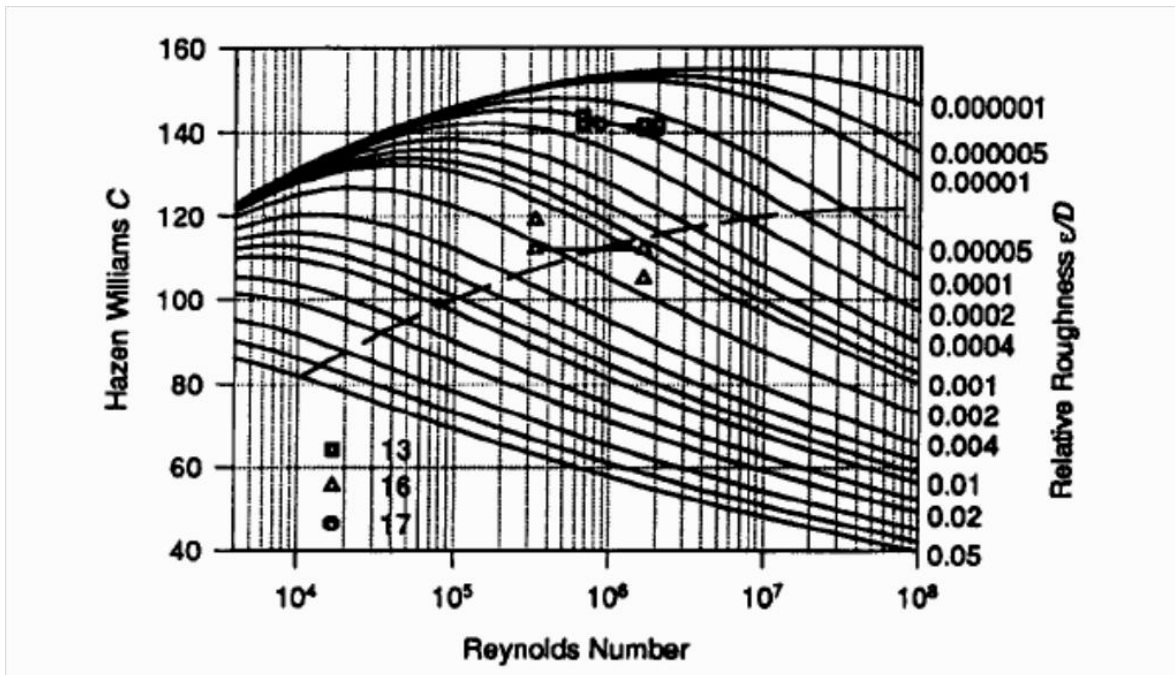
$\varepsilon$ = Rugosidad absoluta del material

$\nu$ = Diámetro de la tubería

$\nu$ = Viscosidad cinemática.

Al llegar a esta expresión Liou pudo concluir que en efecto, el coeficiente de Hazen-Williams es dependiente del número de Reynolds, de la rugosidad relativa de la tubería  $\left(\frac{\varepsilon}{d}\right)$ , de la rugosidad absoluta y de la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) así como del factor de fricción de la ecuación de Darcy, convirtiendo a la ecuación de Hazen-Williams en un caso específico de la ecuación de Darcy-Weisbach.

Posteriormente, Liou varió los números de Reynolds y los diámetros para ver cómo se comportaban los coeficientes de Hazen-Williams, dejando una rugosidad absoluta de 0.0003 m y una viscosidad cinemática de  $1.133 * \frac{10^{-6}m^2}{s}$  (agua a 15.56 grados centígrados) (Liou, 1998). Generó la siguiente gráfica que muestra la variación del coeficiente de Hazen-Williams con respecto al diámetro y al número de Reynolds.



**GRÁFICA 2** VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS CON RESPECTO AL NÚMERO DE REYNOLDS Y EL DIÁMETRO ENCONTRADO POR LIOU (LIOU, 1998).

Como se puede observar, el coeficiente de Hazen y Williams varía relativamente poco en la zona de transición, pero presenta cambios severos fuera de esta (Línea punteada). Esto permitió establecer que la ecuación de Hazen-Williams tiene unos rangos de cumplimiento limitados y fuertemente dependientes del número de Reynolds y del diámetro (Uribe, 2012).

Para finalizar, Liou decidió mostrar los errores que se pueden cometer al calcular el error de la pendiente de gradiente hidráulico con la ecuación de Hazen-Williams y comparándolos con la pendiente calculada con la ecuación de Darcy-Weisbach. Los resultados que obtuvo fueron de gran importancia, no solo debido a que por fuera de la zona de cumplimiento la ecuación de Hazen-Williams presentaba un error de hasta el 40% sino porque su rango de validez se limitaba exclusivamente a la zona de transición en el diagrama de Moody (Uribe, 2012).



Ese mismo año, Hosam El-Din Moghazi (M.Moghazi, 1998), realizó experimentos para determinar el coeficiente de Hazen-Williams para tuberías de Polietileno, encontrando una vez más que el coeficiente de Hazen-Williams presentaba variaciones con respecto a su diámetro y también que al realizar un cálculo entre el factor de fricción medido y el calculado (por el investigador) se encontraba un error no superior al 14%. Sin embargo, al comparar los valores calculados por el autor y los calculados por los valores recomendados, estos presentaron diferencias en el cálculo de las pérdidas por fricción con un máximo del 27% (Uribe, 2012).

En el año 2000, surge una discusión respecto al artículo de Liou (Liou, 1998). Los tres autores participantes concluyen que el uso de la ecuación de Hazen-Williams debe de ser limitado o abandonado. En la primera parte, Christensen concuerda con Liou en el sentido de que se debe dejar de utilizar la ecuación de Hazen-Williams con excepción de la zona dentro del rango de validez (Uribe, 2012).

Christensen plantea que los rangos de validez de la ecuación de Hazen-Williams deben de ser:

$$10^5 < R < 10^8$$

donde:

R es el número de Reynolds.

A su vez, especificó que esta no es la única limitación y que además, la ecuación debe estar regulada igualmente por el diámetro de la tubería, estableciendo que el diámetro mínimo debe estar regulado por  $d = 1.441 * \epsilon$  donde  $\epsilon$  es la rugosidad absoluta de la tubería. Resaltando que es posible que en tuberías de considerable edad, se pueden presentar valores de  $\epsilon$  cercanos a 1 mm, lo que llevaría a que el diámetro mínimo de la tubería fuera de 1.44 m (B.A. Christensen, 2000).

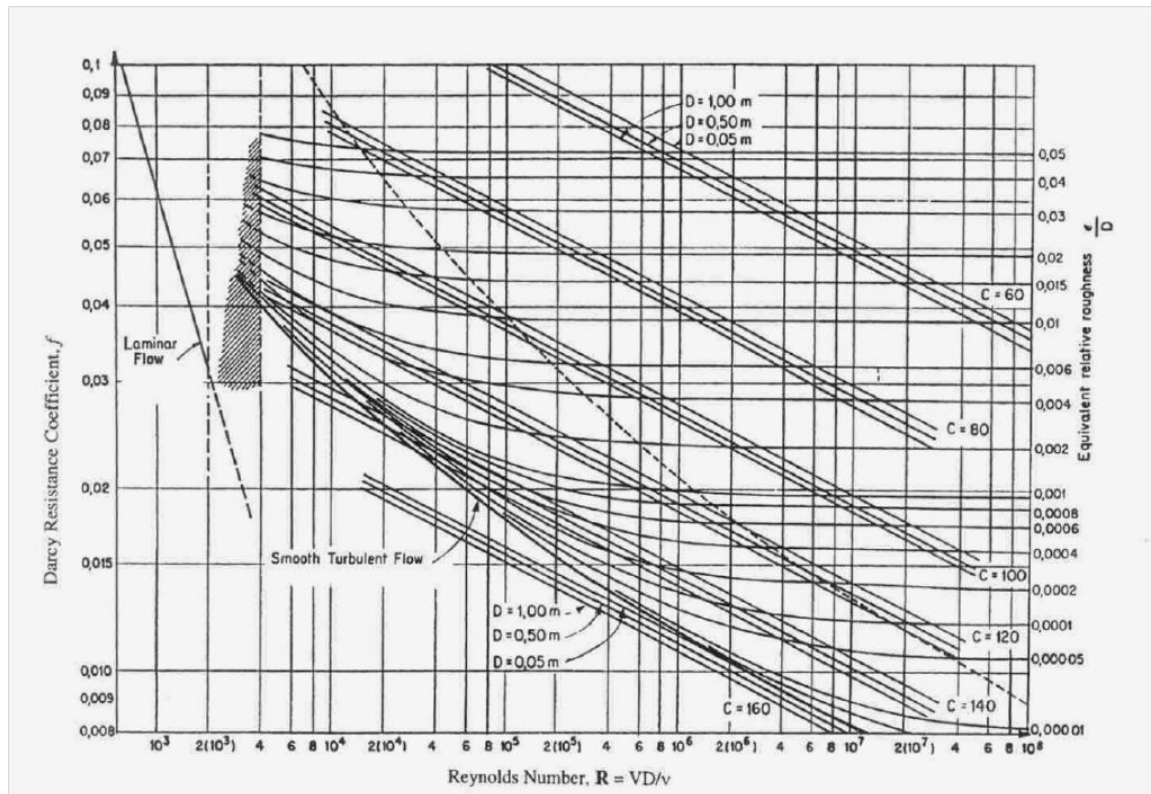
Concluyen y resaltan que en la actualidad muchos ingenieros y diseñadores no tienen en cuenta las restricciones y están diseñando por fuera del número de Reynolds reglamentario y con diámetros muchos menores a los que se deberían utilizar (Uribe, 2012).

El segundo autor Frederick Locher, concuerda con Liou en que el uso de la ecuación de Hazen-Williams debe de ser abandonado o solo aplicado en sus rangos de cumplimiento, pero plantea que Liou a la hora de realizar sus cálculos, no debe de introducir una dependencia de la rugosidad absoluta, ya que esto obscurece la verdadera naturaleza de la ecuación de Hazen-Williams. Resalta Locher que se debe analizar tal y cómo lo realizó Diskin en 1960, que se debe relacionar el factor de fricción, el C de Hazen-Williams, Reynolds y la rugosidad relativa, sin la introducción artificial de la rugosidad absoluta (Uribe, 2012). De tal forma que quede:

$$f = \frac{133.84}{(C^{1.85}) * (R^{0.148}) * (d^{0.0185}) * \nu^{0.1481}}$$

ECUACIÓN 14 ECUACIÓN FINAL QUE DESCRIBE LA RELACIÓN ENTRE F DE DARCY Y COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS.

Y teniendo en cuenta que para la ecuación de Hazen-Williams el único fluido válido es el agua, Locher establece que se puede usar un  $\nu = 1.133 * \frac{10^{-6} m^2}{s}$ , llegando a que para un diámetro establecido y una rugosidad absoluta de material, surge una constante que representa estos dos parámetros. De esta manera, concluye que los coeficientes de Hazen-Williams sean graficados como líneas rectas en el diagrama de Moody (B.A. Christensen, 2000), como se muestra a continuación:



**GRÁFICA 3** DIAGRAMA DE MOODY REALIZADO POR DISKIN 1960 DONDE SE MUESTRAN VARIACIONES Y REPRESENTACIONES DE LOS COEFICIENTES DE HAZEN-WILLIAMS (CHRISTENSEN, LOCHER, & SWAMEE, 2000)

De acuerdo con Locher, el trabajo de Diskin permite llegar a las siguientes conclusiones:

- 1) Los datos estadísticos utilizados para el desarrollo de la ecuación de Hazen-Williams se encontraban en la zona de transición del diagrama de Moody. Esto lleva a que la

---

validez de esta ecuación se encuentre cuando la línea del Coeficiente de Hazen-Williams se encuentre aproximadamente paralela con las curvas de la constante  $\left(\frac{\epsilon}{d}\right)$  en el diagrama de Moody (B.A. Christensen, 2000).

- 2) La ecuación de Hazen-Williams es inválida para materiales demasiado rugosos (Cuando C es menor a 100, la ecuación no se debe utilizar), por lo que al diseñar con valores cercanos o menores a 100 no solo se están encontrando resultados equivocados en las pérdidas por fricción, sino que al suponer que es un valor constante se comete el error de hacer al material más liso de lo que realmente representa (B.A. Christensen, 2000).

Finalmente, Locher concluye que en la actualidad y con métodos computacionales es inapropiado seguir utilizando una ecuación empírica y no una ecuación físicamente basada que puede ser resuelta rápidamente por medios computacionales.

Para finalizar, el tercer autor Swamee, felicita a Liou por mostrar las falencias de la ecuación de Hazen-Williams y considerando irónico que esta sea la ecuación más utilizada, mientras que la ecuación de Darcy-Weisbach, físicamente basada, sea utilizada casi exclusivamente por los académicos.

## 2.5 TRABAJOS DE FABIÁN BOMBARDELLI Y MARCELO GARCÍA

---

En 2003 Fabián A. Bombardelli y Marcelo H. García realizaron un estudio sobre los diseños de redes con tuberías de gran diámetro. El caso de estudio utilizado por los autores fue el de una zona de una metrópolis que a tan solo 5 años de haberse puesto en servicio, era inadecuada para proveer la cantidad de agua necesaria (Uribe, 2012).

El análisis se realizó consultando la literatura con respecto a los límites y validez de la ecuación de Hazen-Williams. Una vez realizada la recopilación bibliográfica, procedieron a revisar la información sobre la red que presentó los problemas (Uribe, 2012).

Lo primero que lograron evidenciar fue que la red fue diseñada con concreto, con un coeficiente de Hazen-Williams de 120, y con una variación de diámetros de hasta 2.29 m. Como se mencionó anteriormente, en este caso se vio que una red de tan solo 5 años de operación presentó problemas en cuanto a requerimientos de presión y al caudal entregado por lo que se realizó un análisis hidráulico utilizando 2 firmas consultoras. Durante este análisis se realizaron mediciones en las velocidades del flujo y las presiones en los nudos para analizar el comportamiento real de la red frente al que se esperaba con el diseño original (Fabián Bombardelli, 2003).

Con base a los resultados obtenidos, se procedió a obtener los valores de los coeficientes de Hazen-Williams para los tramos de estudio. Los resultados que se obtuvieron de la primera firma consultora fueron sorprendidos ya que en las tuberías de 2.29 m de diámetro se encontró que el coeficiente de Hazen-Williams presentaba valores entre 85 y 95. Esto quería decir que



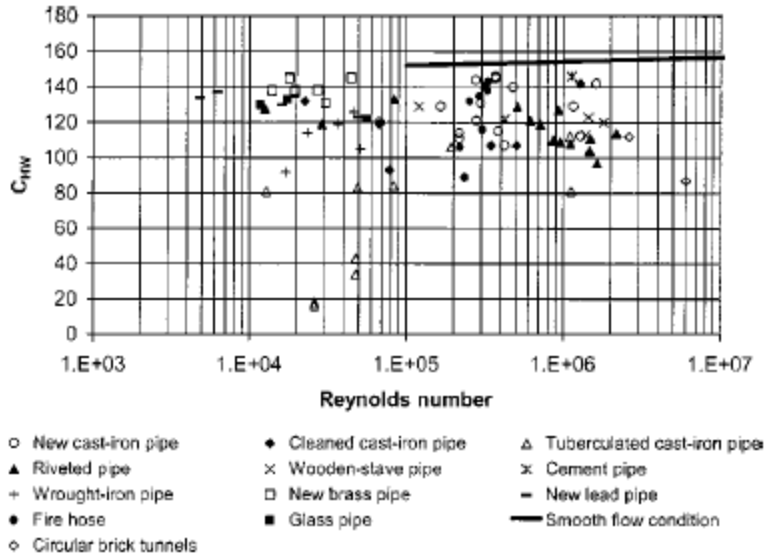
la tubería presentaba una rugosidad mucho mayor a la que se había esperado (se diseñó con un coeficiente de Hazen-Williams de 120), lo que llevaba a que las pérdidas por fricción fueran mucho mayores y que los cálculos realizados con la ecuación de Hazen-Williams subestimaban estas pérdidas. Los autores concluyeron que si estos valores eran correctos, en el futuro la red no podría suplir de forma correcta las crecientes demandas de agua, debido a que las pérdidas por fricción iban a ser mucho mayores con los nuevos coeficientes (Fabián Bombardelli, 2003).

Esta situación causó gran sorpresa en el personal y se plantearon si el problema era de la ecuación de diseño (Hazen-Williams) o si era debido a un incremento real en la rugosidad de la tubería, por lo que la comisión se enfocó en ver si las medidas que se habían tomado presentaban algún tipo de error en la toma de los datos. Para verificar esta situación, se llamó a una segunda firma consultora para tomar una segunda muestra de datos exclusivamente en la tubería de 2.29 m de diámetro. Esta segunda muestra se realizó de forma más cuidadosa, teniendo especial cuidado de registrar mejor las pérdidas y los lugares donde se tomaron las muestras, es decir, el coeficiente de la tubería era menor (y por ende más rugoso) al coeficiente utilizado para el diseño. Estos resultados mostraron resultados similares a los encontrados en la primera toma de datos (Uribe, 2012).

Bombardelli y García, después de realizar sus análisis, llegaron a la conclusión de que tuberías de gran diámetro presentaban un comportamiento bastante peculiar. De una parte, el hecho de ser tuberías de gran tamaño en diámetro estaría más expuesto a flujos turbulentos que estarían más relacionadas con altos números de Reynolds. Pero, de otra parte, dado el gran diámetro, la relación entre  $\left(\frac{\epsilon}{d}\right)$  puede llegar a ser muy pequeña y por ende tener condiciones de trabajo en flujo de transición, lo que llevaría a pensar que se presentan las condiciones ideales para aplicar la ecuación de Hazen-Williams (Fabián Bombardelli, 2003). Sin embargo, un análisis detenido de los datos, permitió identificar que era precisamente el constante aumento de la demanda y por ende de los caudales, los que llevaron al flujo a la zona de Flujo Turbulento, quitándole toda validez al diseño realizado con la ecuación de Hazen-Williams. Con estos resultados se concluyó y recomendó que la mejor y más correcta opción era el uso de la ecuación de Darcy-Weisbach para diseñar las redes de distribución de agua potable (Uribe, 2012).

Lo interesante de esta investigación es que los autores lograron mostrar sus resultados basándose en otras tuberías aisladas de la tubería estudiada en el caso de estudio específico. Debido a que en el caso de estudio descrito por los autores, la tubería si había presentado un cambio importante en su rugosidad debido a un incremento en la calidad del agua por las condiciones de crecimiento de la población a la que era suministrada el servicio. La gráfica en la que se muestran los resultados más significativos de esta investigación se muestra a continuación:





GRÁFICA 4 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS CON RESPECTO AL NÚMERO DE REYNOLDS (FABIÁN A. BOMBARDELLI, 2003).

De la gráfica anterior se puede ver que al igual que en las investigaciones de Liou (Liou, 1998), el coeficiente de Hazen-Williams presenta grandes variaciones al variar el número de Reynolds; así mismo, se puede observar que esta variación puede llegar a ser de hasta una magnitud de 60, lo que llevaría a que se estén subestimando o sobrestimando las pérdidas por fricción en las tuberías. Lo más interesante de esta gráfica es que está en números de Reynolds bastante altos, que suelen estar asociados a tuberías de gran diámetro y estas tuberías suelen transportar la mayor cantidad del caudal (redes matriz); en consecuencia, las redes operadas o diseñadas con la ecuación de Hazen-Williams corren el riesgo de dejar sin abastecimientos a una población o a una gran ciudad.

## 2.6 INVESTIGACIONES POSTERIORES

En 2007 Quentin B. Travis y Larry W. Mays, desarrollaron una investigación en la que reproducían una relación entre el coeficiente de Hazen-Williams y las rugosidades absolutas en la ecuación de Colebrook-White, lo que permitió a los ingenieros sacar fácilmente los valores de rugosidades absolutas y a visualizar de forma rápida y sencilla los límites de aplicabilidad de la ecuación de Hazen-Williams (Quentin B. Travis, 2007).

Posteriores investigaciones como la de John D Valiantzas (2008) permitieron reescribir la ecuación de Darcy-Weisbach de tal forma que fuera explícita en su solución y solo presentando una diferencia con respecto a la ecuación original del 5% (Valiantzas, 2008).

Finalmente, en 2011 David Bennett y Rebecca Glaser publican un artículo donde enfatizan las principales complicaciones que se presentan en los diseños de tuberías con grandes



diámetros, donde incluyen varios fenómenos físicos como sedimentos, efectos biológicos dentro de las tuberías (biopelículas), no tener en cuenta el envejecimiento de las diversas tuberías, mala ubicación de válvulas, mal mantenimiento de las tuberías y finalmente el extensivo y más generalizado uso de la ecuación de Hazen-Williams al ser ampliamente utilizada por fuera de los límites de cumplimiento o con Coeficientes de Hazen-Williams que subestiman las pérdidas y llevan al incumplimiento de las presiones mínimas dentro de las tuberías (Uribe, 2012).

## 2.7 PROGRAMAS UTILIZADOS

### 2.7.1 PROGRAMA REDES

El programa REDES fue desarrollado en la Universidad de los Andes por el grupo de investigación CIACUA (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados) en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Es una herramienta computacional para la simulación de redes de acueducto y tuberías a presión (Saldarriaga, 2007). Este programa ha sido modificado y actualizado desde su nacimiento en 1998 hasta el presente año, por numerosas tesis de pregrado, investigaciones y tesis de magíster, bajo la supervisión del ingeniero Juan Guillermo Saldarriaga. Así mismo, el programa ha sido utilizado en numerosas tesis de grado e investigaciones realizadas dentro del grupo de investigación CIACUA.

Las características que ofrece este programa para el usuario son:

- Permite al usuario utilizar dos (2) ecuaciones de diseño: Ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach.
- Edita o crea redes desde el comienzo, permitiendo al usuario ingresar nudos, bombas, válvulas, tuberías, tanques y embalses. Adicionalmente, le permite al usuario escoger por defecto la viscosidad con la que se desea trabajar, escoger el material de la tubería y si el usuario lo desea, asignar los coeficientes de pérdidas menores y fugas dependiendo del tipo de investigación que se desee (Uribe, 2012).
- Permite el cálculo hidráulico estático: Permite obtener alturas piezométricas, velocidades, caudales, factores de fricción, pérdidas menores, pérdidas por fricción, pérdidas totales y las presiones en cada nudo de la red utilizando el método del gradiente hidráulico.
- Realiza el cálculo hidráulico en período extendido: A diferencia del cálculo estático, esta opción permite evaluar los resultados en una hora deseada del día, lo que permite ver el comportamiento de la red durante el día y ver si cumple con los requerimientos deseados por el usuario (Uribe, 2012).
- Genera el cálculo de calidad del agua
- Permite la calibración de redes de distribución de agua potable.



---

-Diseño Optimizado: En esta sección hay diferentes opciones para diseñar, dentro de las que se encuentran:

1) Diseño Rápido: Una solución rápida teniendo en cuenta un mínimo costo y cumplimiento de la presión mínima.

2) Algoritmos Genéticos: Mediante la utilización de Algoritmos Genéticos, encuentra soluciones óptimas locales para los diseños, cumpliendo los parámetros de costos e hidráulicos establecidos por el usuario.

3) Superficie Óptima: Utiliza una superficie óptima de presiones asociadas con una función, ya sea cuadrática, elipsoidal, catenaria, gaussiana, lineal y recíproca. Estas funciones cuentan con una flecha que permite aproximar el diseño a una curva de LGH óptima. De las funciones nombradas anteriormente, la función cuadrática es la que es comúnmente utilizada con una flecha del 15 % (Criterio de I Pai wu).

4) Metodología SOGH: esta metodología fue utilizada durante la tesis y será explicada más adelante con mayor detalle. Fue implementada en el programa REDES en 2009 por Susana Ochoa en su tesis de Maestría.

5) Búsqueda de armonía.

El programa de REDES es compatible con los archivos .INP generados en el programa de EPANET y con archivos propios .RED. Además de contar con una interfaz gráfica que permite visualizar los resultados en 2D y 3D, y exportar los mismos a portapapeles y posteriormente a Excel.

Los archivos .RED al igual que los archivos generados por el programa de EPANET, permiten su modificación en Excel, de tal forma que el cambio de parámetros se haga de una forma amistosa para el usuario. Esta es una gran ventaja que presentan los dos programas (EPANET y REDES); dicha ventaja se ve reflejada en que es bastante sencillo pasar de un programa a otro con rapidez, facilitando los análisis, los cálculos hidráulicos y las comparaciones de los resultados.

### 2.7.2 PROGRAMA EPANET 2.0

---

El programa de EPANET, es una herramienta computacional desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA). Este programa fue desarrollado para estudiar el comportamiento hidráulico de una red de distribución de agua potable (Saldarriaga, 2007).

El programa, dentro de sus múltiples funciones, incluye realizar el análisis hidráulico utilizando las ecuaciones de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Chezy-Manning. Adicionalmente y al igual que el programa REDES, utiliza de la metodología del gradiente



---

hidráulico para la solución matemática de la red (a diferencia de otros programas que utilizan el método de Hardy-Cross) (Uribe, 2012).

El programa cuenta adicionalmente con un módulo para seguir la calidad de las aguas en una red, permitiendo al usuario seguir el decaimiento o comportamiento de una sustancia en una red (Saldarriaga, 2007). Esto puede ser de gran importancia en el análisis de cloro residual en redes, o el comportamiento de manganeso o hierro en los sistemas de distribución al salir de las plantas de tratamiento. Esto lo realiza utilizando reacciones químicas del agua, o en las paredes de la tubería y de los tanques. Para ello utiliza reacciones de primer orden (Uribe, 2012).

Además, el programa permite visualizar los resultados en tablas y gráficas y los archivos que utiliza son compatibles para su modificación con Excel. Lo que lo convierte en un programa amigable para el usuario (Uribe, 2012).

Al igual que el programa de REDES, EPANET también permite correr la hidráulica en estado estable y en períodos extendidos (Uribe, 2012).

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

En esta sección se presentarán los pasos de la investigación. Esto incluye las rugosidades absolutas y coeficientes de Hazen-Williams utilizados durante la investigación, las redes trabajadas con sus características más relevantes para el estudio. Posteriormente se describirá el procedimiento realizado paso por paso y el enfoque que utilizó la investigación, es decir, cuáles fueron los cálculos realizados para encontrar los resultados.

### 3.1 RUGOSIDADES ABSOLUTAS Y COEFICIENTES DE HAZEN-WILLIAMS

Los coeficientes de Hazen-Williams y rugosidades absolutas fueron consultados utilizando la información de la literatura y de libros de hidráulica. Para la primera parte de este estudio se trabajó esencialmente con Hierro Dúctil y con PVC. En la siguiente tabla se mostrarán las rugosidades y respectivos Coeficientes de Hazen-Williams:

Rugosidad absoluta ( $k_s$ ) para diferentes materiales utilizados en la fabricación de tuberías

Material	$K_s$ (mm)
Vidrio	0.0003
PVC, CPVC	0.0015
Asbesto cemento	0.03
GRP	0.03
Acero	0.046
Hierro forjado	0.06
CCP	0.12
Hierro fundido asfaltado	0.12
Hierro galvanizado	0.15
Arcilla vitrificada	0.15
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil	0.25
Madera cepillada	0.18-0.9
Concreto	0.3-3.0
Acero bridado	0.9-9

ILUSTRACIÓN 1 RUGOSIDADES ABSOLUTAS (SALDARRIAGA, 2007).

RUGOSIDAD ABSOLUTA	
MATERIAL	mm
HIERRO DÚCTIL	0.1
PVC	0.0015

TABLA 1 RUGOSIDADES ABSOLUTAS DE ACUERDO A LAS NORMAS TÉCNICAS DE EPM (EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN, 2006-2009).

### Valores de rugosidad absoluta

Material	Rugosidad absoluta $k_s$ (mm)
Acero brizado	0.9-9
Acero comercial	0.45
Acero galvanizado	0.15
Concreto	0.3-3
Concreto bituminoso	0.25
CCP	0.12
Hierro forjado	0.06
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil (1)	0.25
Hierro galvanizado	0.15
Hierro dulce asfaltado	0.12
GRP	0.030
Polietileno	0.007
PVC	0.0015

ILUSTRACIÓN 2 RUGOSIDADES ABSOLUTAS DE ACUERDO AL RAS (MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, 2013)

Con base en estas tablas se decidió trabajar con una rugosidad absoluta del Hierro dúctil de 0.25 o 0.3 mm; sin embargo, algunos proveedores y el RAS (Reglamento de Agua y Saneamiento) afirman que se debe tomar la rugosidad del recubrimiento de la tubería. Con base en esto muchos proveedores recomiendan para sus productos rugosidad de tubería nueva de 0.1 mm o incluso rugosidades extremadamente lisas como 0.003 mm (Saint-Gobain-PAM).

A continuación se muestran los coeficientes de Hazen-Williams:

COEFICIENTES DE HAZEN-WILLIAMS	
MATERIAL	COEFICIENTE
HIERRO DÚCTIL	140-150
PVC	150

ILUSTRACIÓN 3 COEFICIENTES DE HAZEN-WILLIAMS DE ACUERDO A LAS NORMAS TÉCNICAS DE EPM (EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN, 2006-2009).

COEFICIENTES DE HAZEN-WILLIAMS	
MATERIAL	COEFICIENTE
HIERRO DÚCTIL	130
PVC	150

ILUSTRACIÓN 4 COEFICIENTES DE HAZEN-WILLIAMS DEL LIBRO HIDRÁULICA DE TUBERÍAS (SALDARRIAGA, 2007).

Material	Hazen-Williams Coefficient - C -
ABS - Acrylonite Butadiene Styrene	130
Aluminum	130 - 150
<u>Asbestos Cement</u>	140
Asphalt Lining	130 - 140
Brass	130 - 140
Brick sewer	90 - 100
Cast-Iron - new unlined (CIP)	130
Cast-Iron 10 years old	107 - 113
Cast-Iron 20 years old	89 - 100
Cast-Iron 30 years old	75 - 90
Cast-Iron 40 years old	64-83
Cast-Iron, asphalt coated	100
Cast-Iron, cement lined	140
Cast-Iron, bituminous lined	140
Cast-Iron, sea-coated	120
Cast-Iron, wrought plain	100
Cement lining	130 - 140
Concrete	100 - 140
Concrete lined, steel forms	140
Concrete lined, wooden forms	120
Concrete, old	100 - 110
Copper	130 - 140
<u>Corrugated Metal</u>	60
<u>Ductile Iron Pipe (DIP)</u>	140
Ductile Iron, cement lined	120
Fiber	140
<u>Fiber Glass Pipe - FRP</u>	150
Galvanized iron	120
Glass	130
Lead	130 - 140
<u>Metal Pipes - Very to extremely smooth</u>	130 - 140
Plastic	130 - 150
Polyethylene, PE, PEH	140
Polyvinyl chloride, PVC, CPVC	150

ILUSTRACIÓN 5 DIFERENTES COEFICIENTES DE HAZEN-WILLIAMS.

Con base en estos valores, se decidió trabajar con los valores de PVC de 0.0015 mm para la rugosidad absoluta y un coeficiente de Hazen-Williams de 150. Para el hierro dúctil se decidió trabajar con un valor de 0.1 mm como rugosidad absoluta debido a que, si bien la literatura sugiere valores entre 0.25 y 0.3 mm, los proveedores comerciales están sugiriendo valores ente 0.003 mm y 0.15 mm, por lo que en este estudio se decidió trabajar con un valor de 0.1

mm. Por otro lado el Coeficiente de Hazen-Williams se tomó como 140, que es el valor sugerido por la literatura, sino además porque el rango sugerido por los proveedores para tuberías nuevas coincidía con estos valores (Tata Kubota) (AMIANTIT).

### 3.2 REDES TRABAJADAS:

Durante la tesis se trabajaron 4 redes de estudio. De las redes, dos (2) eran originalmente redes matrices y las otras dos (2) fueron redes adaptadas, de tal forma que se comportaran como redes matrices. Las cuatro redes se muestran a continuación:

#### 3.2.1 RED MATRIZ DE BOGOTÁ:



ILUSTRACIÓN 6 RED MATRIZ DE BOGOTÁ.

La red matriz de Bogotà cuenta con las siguientes características:

- 2601 nudos de demanda
- Demandas ente 1.4 y 400 L/s
- 4 Embalses ( Wiesner, El Dorado, Tibitóc y Tibitóc Alto)
- 15 Tanques distribuidos en la red.
- Elevaciones de la red entre 2540 y 3000 metros.



- Longitud total de la red de 514000 metros de tuberías.
- 4480 tramos de tubería que incluyen valvular de operación.
- Diámetros de las tuberías entre 101 mm y 2000 mm.
- 70 patrones de demanda distribuidos en diferentes sectores de la ciudad.

La red presentó grandes retos debido al gran número de tuberías que poseía así como identificar las horas de caudal medio, máximo y mínimo de la red. Y dada la alta variabilidad de diámetros, y propósitos de algunos tramos de tuberías, convirtió a esta red matriz en el caso más complejo de estudio.

### 3.2.2 RED MATRIZ DE MEDELLÍN:

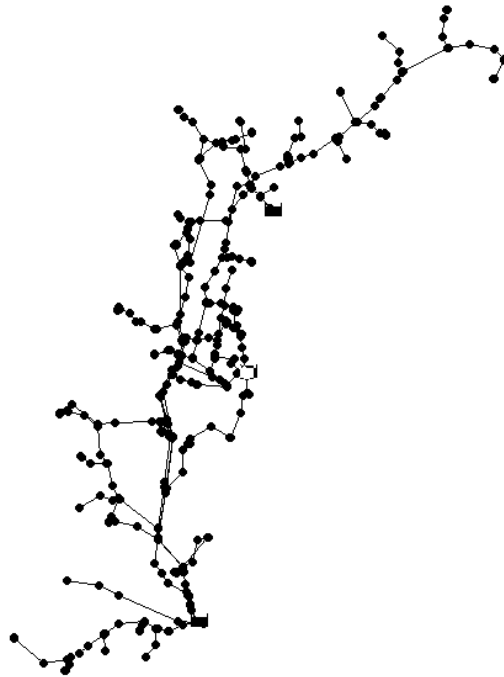


ILUSTRACIÓN 7 RED MATRIZ DE MEDELLÍN.

La red Matriz de Medellín cuenta con las siguientes características:

- 56 nudos de demanda.
- Demandas de los nudos entre 10 y 916 L/s.
- 3 Embalses.
- Elevaciones de la red entre 1350 y 1750 metros.
- Longitud de la red es de 202000 metros de tuberías.
- 736 tramos de tuberías.

- Diámetros de las tuberías entre 152 mm y 1500 mm.
- Para el caso de estudio la red se trabajó con un (1) solo patrón de demanda.

El propósito de tener tan pocos nudos de demandas es que ellos representarán los tanques que distribuyen el agua a la ciudad de Medellín. Más adelante se explicará el por qué esto fue tan importante para esta investigación.

### 3.2.3 RED GINEBRA LONGITUDES X 100 CAUDALES DEMANDADOS X10

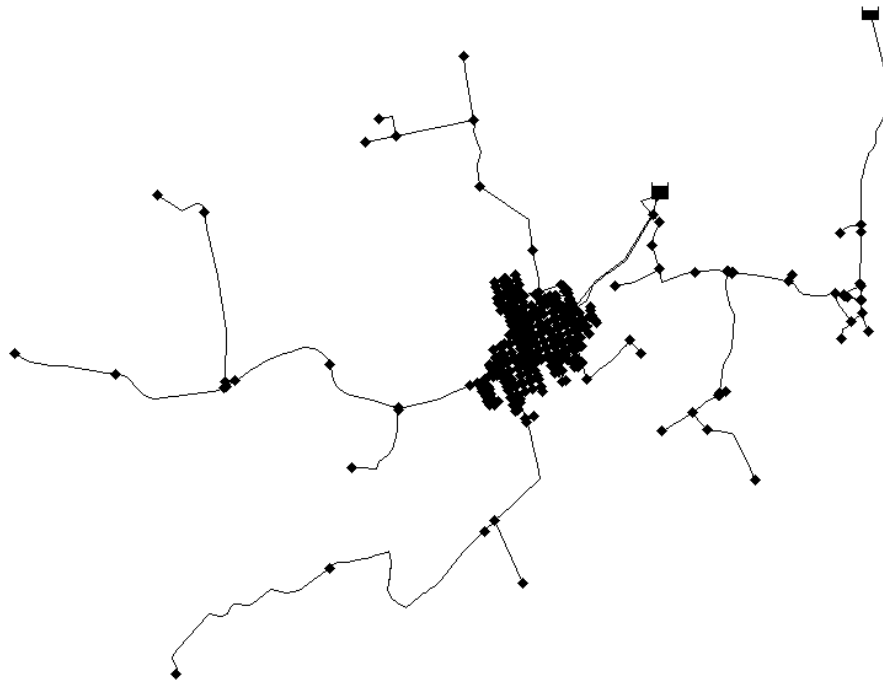


ILUSTRACIÓN 8 RED GINEBRA.

La red de Ginebra incorporó una serie de modificaciones para comportarse como una red matriz; esto se logró modificando las demandas de los nudos y longitudes de las tuberías en el archivo .INP y posteriormente realizando un diseño simple con la ayuda del programa REDES. Cuenta con las siguientes características:

- 368 nudos de demanda.
- Demanda de los nudos entre 0.2 y 78 L/s.
- 3 embalses.
- Las elevaciones de la red se encuentran entre 1026 y 1100 metros.
- La longitud de la red es de 495500 metros de tuberías.
- 545 Tramos de tuberías.
- Los diámetros de la red se encuentran entre 300 mm y 3000 mm.

- La red trabajó con 3 patrones de demanda.

Lo más resaltante de esta red es que la mayoría de los nudos se comportó con 1 solo patrón de demanda, y aun los que no contaban con este patrón, tenían horas muy similares para el cálculo de los caudales mínimos, máximos y medios de la red. Con la modificación de los caudales y las distancias se logró obtener una red que presentaba un comportamiento similar a una red primaria de bombeo o a una red matriz.

### 3.2.4 RED ANDALUCÍA CAUDALES X100

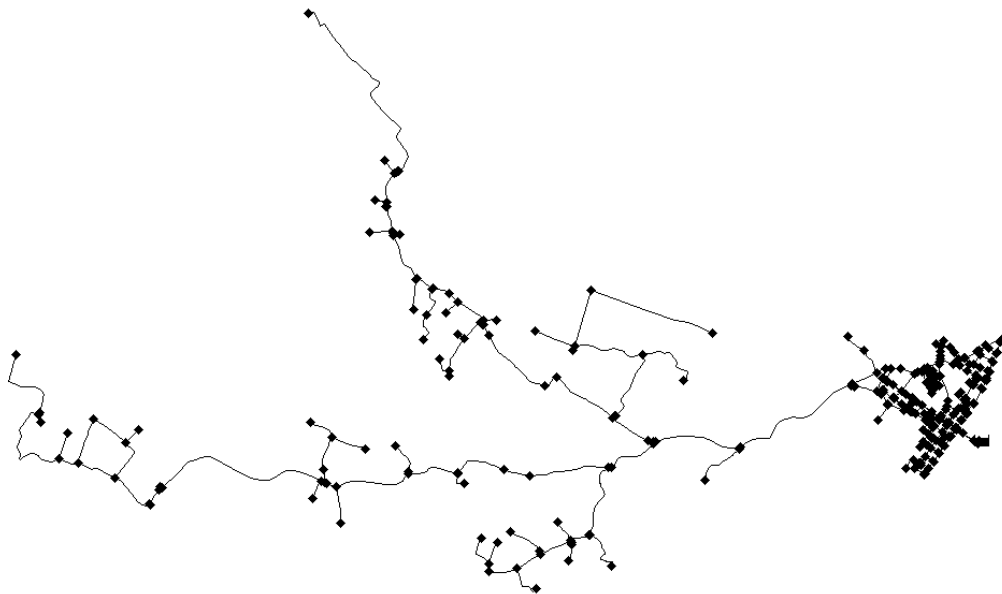


ILUSTRACIÓN 9 RED ANDALUCÍA.

La red de Andalucía también fue modificada de tal forma que presentara un comportamiento similar al comportamiento de una red matriz; el procedimiento fue igual al que se explicó en la red Ginebra con la excepción de que en esta red no fue necesaria la modificación de las longitudes. Las características de esta red son expuestas a continuación:

- 293 nudos de demanda.
- Caudales demandados se encuentran entre 0.12 y 91 L/s.
- 1 embalse.
- elevaciones de la red se encuentran entre 916 y 961 metros.
- La longitud de la red es de 48150 metros de tuberías.
- Cuenta con 394 tramos de tuberías.
- Los diámetros de la red se encuentran entre 300 mm y 3000 mm.
- La red cuenta con 3 patrones de demanda, pero trabaja con un único patrón.

Esta red, pese a no tener tramos extremadamente largos de tuberías, con los caudales demandados y las diferentes cotas de sus puntos, presentó el comportamiento de una red matriz.

### 3.2.5 RED DTOWN

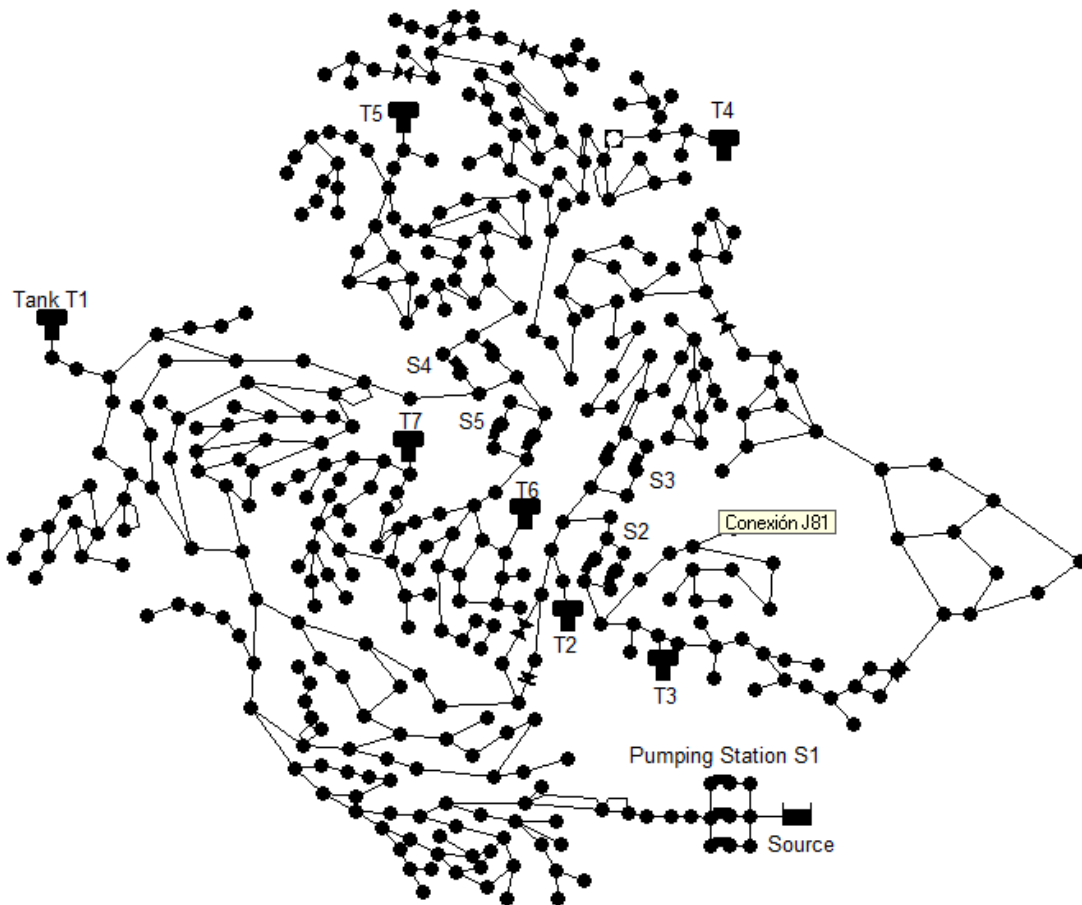


ILUSTRACIÓN 10 RED DE BOMBEO DTOWN.

La red Dtown fue la red escogida para estudiar el efecto hidráulico que genera la ecuación de Hazen-Williams frente a la ecuación de Darcy-Weisbach. La red se escogió basándose en el hecho de que es una red que cuenta con una serie de sectores que funcionan con bombas, adicionalmente posee patrones en cada uno de los sectores y una diversidad importante de tanques. Si bien no es una red que cuente con tuberías de gran diámetro, es una red de gran interés por todas las características anteriormente nombradas. Las características de la red son mostradas a continuación:

- 348 nudos de demanda

- Caudales demandados entre 0.5 L/s y 6.3 L/s
- 1 embalse para alimentar el sistema
- Elevaciones entre 0 y 105 metros.
- La longitud total de la red es de 62316 metros de tuberías.
- Cuenta con 454 tramos de tuberías.
- Diámetros de la red entre 51 mm y 616 mm.
- La red cuenta con 5 patrones, uno para cada sector.
- La red cuenta con 11 bombas con sus respectivas curvas y eficiencias.

Esta red ha sido utilizada mundialmente para investigaciones y eventos internacionales como lo es la “Batalla de Redes”. Esto último es una competencia internacional que busca analizar las formas de optimizar una red existente de tal forma que se encuentre el menor costo y se cumplan con todas las restricciones hidráulicas.

---

### 3.2.6 RED LA CUMBRE

---

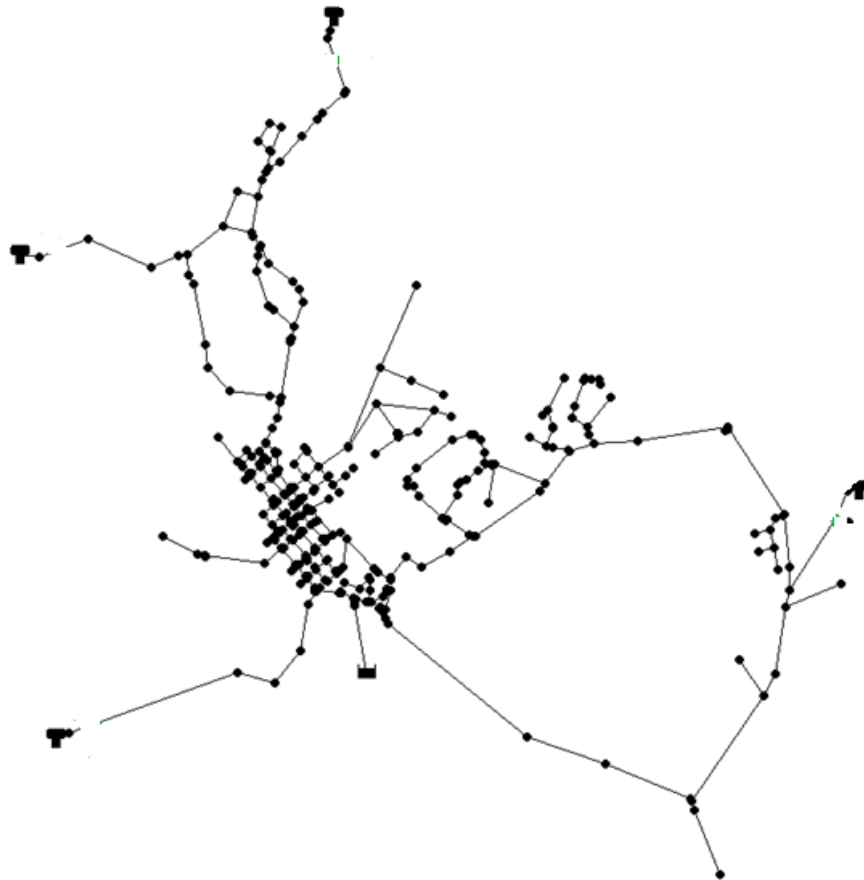


ILUSTRACIÓN 11 RED LA CUMBRE.

---

Esta red fue utilizada con el fin de ver si los resultados hidráulicos encontrados en las redes trabajadas anteriormente se presentaban en esta red o si en la red se encontraba algún tipo de fenómeno nuevo. Los resultados de esta red se enfocaron principalmente en ver los desbalances de masa, factores de fricción de la red y solución de la hidráulica del sistema. Las características de la red se muestran a continuación:

- 338 nudos de demanda.
- Caudales demandados entre 0.3 L/s y 124 L/s (la mayoría de los caudales se encuentran en 45 L/s).
- 1 embalse de alimentación para la red.
- Elevaciones entre 823 y 1033 metros.
- La longitud total de la red es de 266650 metros.
- Cuenta con 378 tramos de tuberías.
- Diámetros de la red entre 300 mm y 1800 mm (donde predominan los diámetros de 300 y 350 mm).
- 1 patrón de demanda para todos los nudos.

---

### 3.3 PROCEDIMIENTO

---

---

#### 3.3.1 PROCEDIMIENTO DETALLADO

---

Esta tesis se enfocó inicialmente en el estudio de emisores que simularan tanques en puntos estratégicos de la red, de tal forma que se pudieran analizar de manera detallada los efectos hidráulicos que se podían presentar al utilizar la ecuación de Hazen-Williams frente a la ecuación de Darcy-Weisbach.

A continuación se muestran los pasos que se realizaron:

1. Recopilación bibliográfica de artículos e información relacionada con la investigación, incluidos diámetros, rugosidades, coeficientes y precedentes de la investigación.
2. Una vez se contaba con la información, se procedió a seleccionar las redes de trabajo, para lo cual en algunos casos se modificaron redes de tal forma que estas presentarían un comportamiento y características de una red primaria de bombeo o red matriz (grandes diámetros).
3. Para el estudio de emisores se escogió el PVC y el Hierro Dúctil como los materiales con los que se realizaría el primer análisis hidráulico, principalmente porque son materiales comunes en el contexto colombiano.
4. Con base en esto, se analizaron los diámetros comerciales disponibles y se decidió que para tuberías con diámetros menores a 14 pulgadas, el material de estas tuberías sería PVC y para mayores, sería Hierro Dúctil.

5. Utilizando los programas de REDES y EPANET 2.0 se analizó la hidráulica en periodo extendido, de tal forma que se obtuvieran los datos hidráulicos necesarios.
6. Una vez realizados estos cambios en las redes, se procedió a realizar una comparación inicial de las presiones de las redes en los 3 momentos claves; cuando se presentaba el caudal mínimo, el caudal medio y el caudal máximo. Para ello fue necesario analizar los patrones de demandas y determinar las horas del día en que se presentaban estos caudales.
7. Se decidió cambiar algunos nudos de la red de tal forma que se comportaran como si fueran tanques o tanques, con la característica de que no se quería que devolvieran el agua en la red. Para ello se utilizaron emisores para simular el comportamiento de un tanque.
8. Se volvió a correr la hidráulica de la red que utilizaba la ecuación de Hazen-Williams y la que utilizaba la ecuación de Darcy-Weisbach, y se adquirían los caudales que arrojaban los emisores en el periodo de análisis. Dado que los patrones de las redes estaban configurados en 24 horas, el tiempo de cálculo hidráulico fue de 24 horas.
9. Se compararon los resultados de los 2 emisores, graficando simultáneamente el comportamiento del emisor y comparando los resultados.
10. Los emisores iniciales se calcularon con base a la presión mínima exigida por el RAS que es de 20 metros de columna de agua y la demanda base del emisor; sin embargo después se decidió estudiar el comportamiento con caudales mayores de emisión por lo que se asignaron altos coeficientes emisores a los diferentes emisores.
11. Así mismo, con las herramientas computacionales de EPANET y REDES se obtuvieron los datos de los números de Reynolds, diámetros de la red, velocidades, factores de fricción y caudales que circulaban por la red.
12. Con base en esto, se explican las diferencias o similitudes entre los resultados, calculando los coeficientes de Hazen-Williams con base a la hidráulica de la ecuación de Darcy-Weissbach. Esta fase de la investigación, será explicada con más detalle en la sección de resultados.
13. Finalmente, se analizaron los resultados de las diferentes redes.

---

### 3.3.2 ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN

---

En esta sección se mostrará mediante imágenes el procedimiento realizado para la obtención de la información:

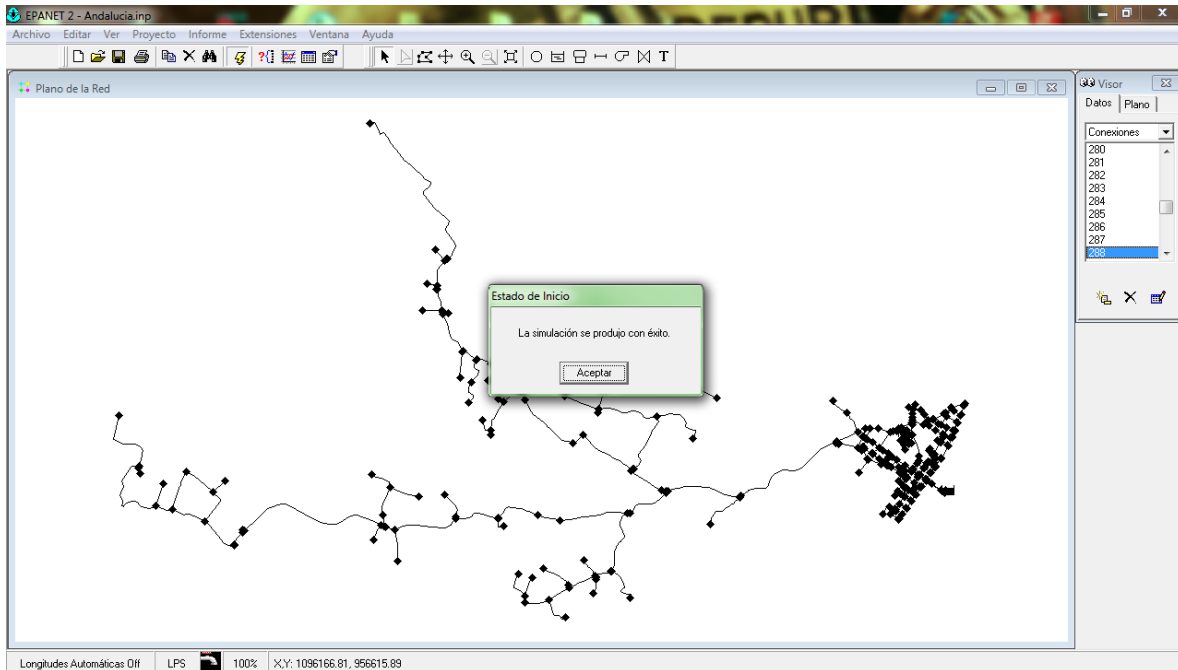


ILUSTRACIÓN 12 SE EJECUTA EL CÁLCULO HIDRÁULICO.

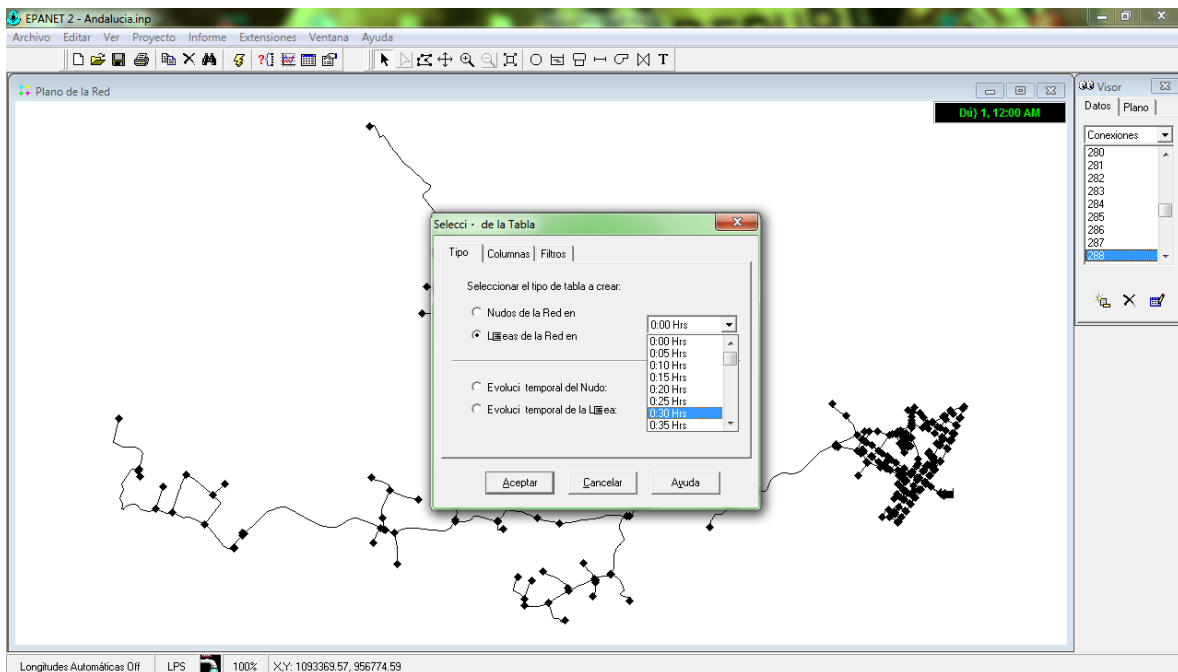


ILUSTRACIÓN 13 SE ESCOGE LA HORA EN LA QUE SE DESEAN OBTENER LOS DATOS DE LA TUBERÍA O LOS NUDOS.



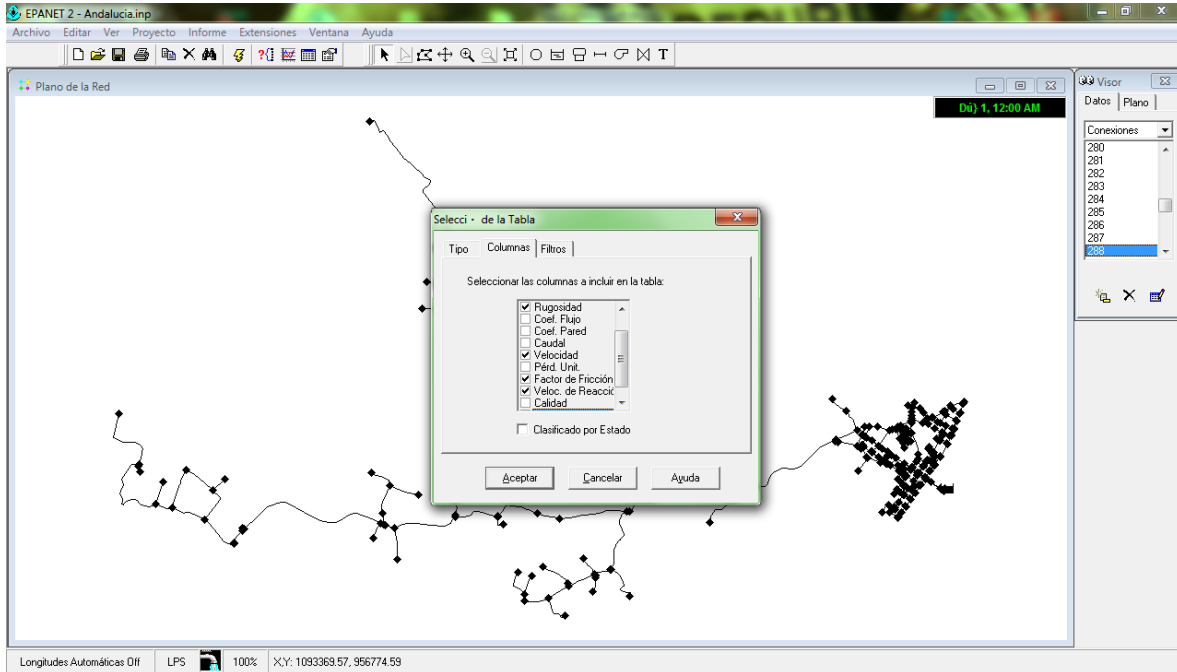


ILUSTRACIÓN 14 SE ELIGEN LOS PARÁMETROS RELEVANTES.

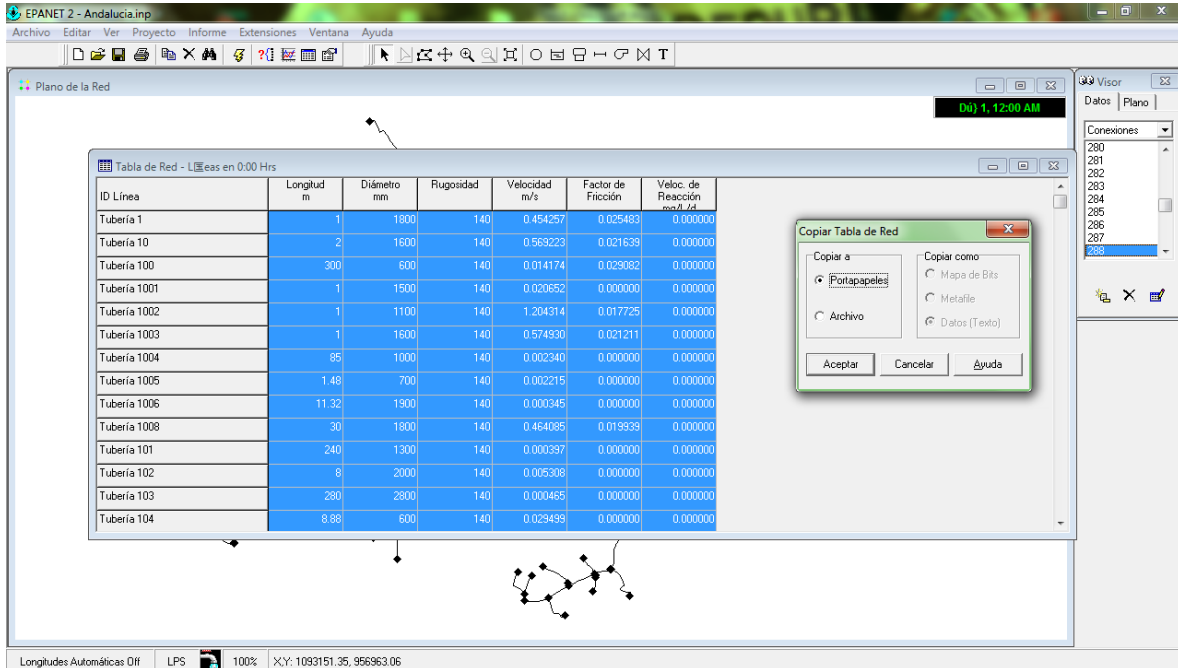


ILUSTRACIÓN 15 SE COPIAN LOS DATOS EN PORTAPAPELES Y SE PEGAN EN UN ARCHIVO DE EXCEL.

Como muestran las ilustraciones anteriores, el procedimiento para la adquisición de los datos es muy sencillo. Lo anterior muestra el procedimiento realizado con EPANET. Se resalta también que la adquisición de los datos, usando el programa REDES, es muy similar. El procesamiento de los datos se realizó utilizando Microsoft EXCEL 2010.



---

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

En esta sección se mostrarán los principales resultados, así como los procedimientos matemáticos que se utilizaron. Así mismo, se mostrarán los principales Patrones con los que se definieron los períodos de caudal mínimo, medio y máximo.

Esta sección se encuentra dividida en 3 sub secciones. La primera presenta los cálculos matemáticos para el procesamiento de la información obtenida utilizando EPANET o REDES. La segunda parte expone los principales patrones en los que el autor se basó para tomar los caudales mínimos, medios y máximos. Y finalmente, la tercera sección detalla los resultados encontrados en esta investigación y realiza los análisis correspondientes.

---

### 4.1 CÁLCULOS MATEMÁTICOS

---

---

#### 4.1.1 ECUACIÓN DE LOS EMISORES

---

Los emisores suelen ser mecanismos en los que se trabaja ya sea una fuga de una tubería o en los que se puede determinar el caudal dejando fija una presión. En otras palabras, el caudal que se emite o se extrae de un nudo es dependiente de la presión (en contraste con el comportamiento de un nudo normal, donde la presión varía por diferentes condiciones y el caudal que le llega es constante).

La ecuación de los emisores se muestra a continuación:

$$Q = k * H^x$$

donde:

Q= Caudal del emisor

k= Coeficiente Emisor

H= Presión del emisor

x=Exponente emisor

Cabe resaltar que este exponente emisor oscila entre 0 y 1, donde 0 es un emisor perfecto, 1 es cuando el flujo se encuentra en régimen laminar y 0.5 cuando se tiene régimen turbulento. Si bien, es posible que en algunos momentos del tiempo se obtenga flujo laminar en redes de distribución de agua potable, dicho caso es bastante raro; por ende en esta tesis se trabajó con un exponente emisor de 0.5.

---

#### 4.1.2 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS

---

El procedimiento seguido para el cálculo del coeficiente de la ecuación de Hazen-Williams a partir de los datos obtenidos corriendo la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach se basó en la combinación de la ecuación de Darcy y la ecuación de Hazen-Williams. Este procedimiento fue muy similar al realizado por Liou en 1998 (Liou, 1998). Dicho proceso se muestra a continuación:

Se tiene la ecuación de Hazen-Williams.

$$v = 0.849 * C * R^{0.63} * S^{0.54}$$

Así mismo se tiene la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$H_f = f * \frac{l}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

Contando con las relaciones:

$$R = \frac{d}{4}$$

$$S = \frac{H_f}{l}$$

es posible expresar la ecuación de Hazen-Williams de la siguiente forma:

$$H_f = 6.2841 * \frac{l}{C^{1.851} * d^{1.167}} * v^{1.851}$$

Ahora ya se puede igualar la ecuación de Hazen-Williams con la ecuación de Darcy-Weisbach y dividiendo por la viscosidad( $v$ ) elevada a la 0.15 se obtiene la siguiente ecuación:

$$f = \frac{133.89}{C^{1.8551} * d^{0.017} * v^{0.15} * Re^{0.15}}$$

Al despejar el coeficiente de Hazen-Williams de esta ecuación se obtiene la ecuación que se utilizó.

$$C = \frac{14.09}{f^{0.54} * d^{0.009} * v^{0.081} * Re^{0.081}}$$

Donde:

f= Factor de fricción adimensional

d=Diámetro de la tubería (m)



$\nu$  = Viscosidad cinemática

Re= Número de Reynolds adimensional.

---

### 4.1.3 CÁLCULO DE LA DIFERENCIAS DE PRESIÓN

---

Para calcular las diferencias de presión entre la red operada con la ecuación de Darcy-Weisbach y la ecuación empírica de Hazen-Williams se utilizó el concepto de error relativo. Es importante mencionar que para resultados donde las presiones eran bajas, los errores relativos magnificaban las diferencias, generando valores porcentualmente muy altos y de difícil interpretación; para estos casos se decidió utilizar el error absoluto.

Teniendo en cuenta que la ecuación que representa de mejor forma la hidráulica, es la ecuación de Darcy-Weisbach, esta fue la que se utilizó para representar los resultados reales. La ecuación por ende queda formulada de la siguiente forma:

$$\text{Diferencia} = \frac{\text{Presión Hw} - \text{Presión Dw}}{\text{Presión Dw}} * 100$$

donde:

Presión Hw= Presión corriendo la hidráulica con la ecuación de Hazen-Williams.

Presión Dw= Presión corriendo la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach.

El numerador de la ecuación el error absoluto de las presiones.

---

## 4.2 PATRONES DE LAS REDES TRABAJADAS

---

---

### 4.2.1 RED MATRIZ DE BOGOTÁ

---

En esta investigación, la red matriz de Bogotá es la que cuenta con mayor cantidad de patrones. A partir del análisis realizados a estos patrones se determinaron los tiempos en que se presentaban los caudales mínimos, medios y máximos.

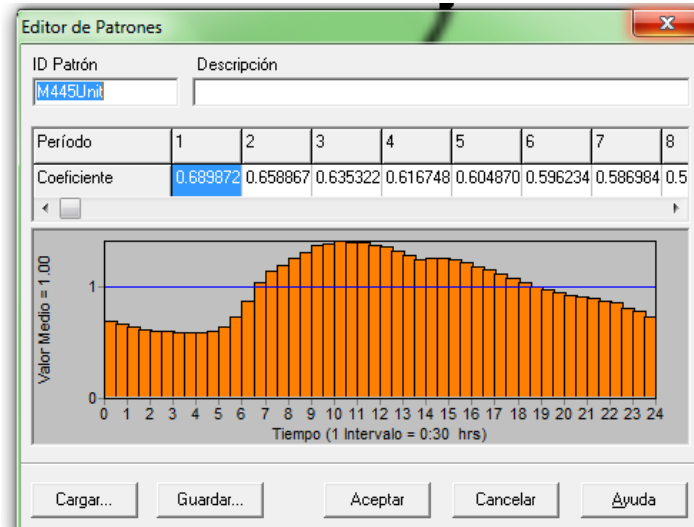


ILUSTRACIÓN 16 PATRÓN 1 DE RED BOGOTÁ.

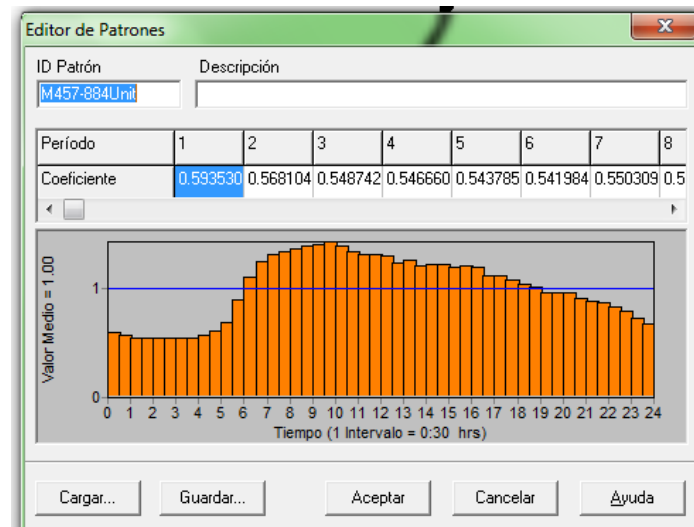


ILUSTRACIÓN 17 PATRÓN 2.

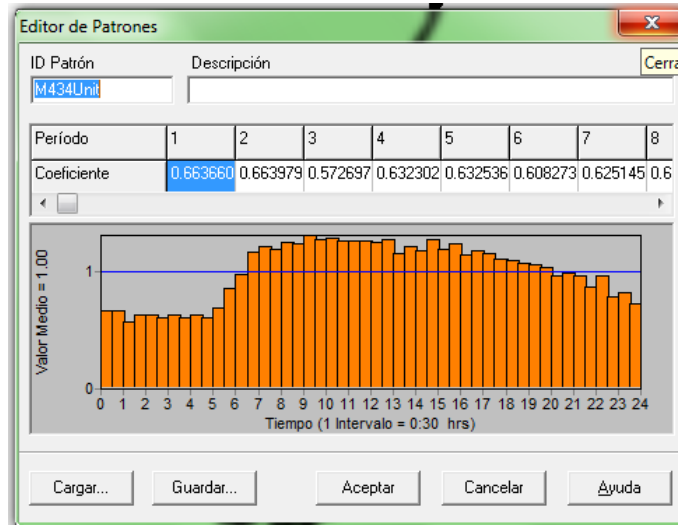


ILUSTRACIÓN 18 PATRÓN 3.

Como se puede observar, los patrones son muy similares. Si bien existen otros patrones con diferencias importantes, la mayoría de los nudos de la ciudad se rige por los patrones anteriores. De esto se determinaron las horas como se muestra en la siguiente tabla:

Q máximo	10:30 am
Q mínimo	4:00 am
Q medio	7:00 pm

TABLA 2 TIEMPOS DE LOS HORARIOS MEDIOS, MÁXIMOS Y MÍNIMOS.

#### 4.2.2 RED MATRIZ DE MEDELLÍN

La red matriz de Medellín fue más sencilla de trabajar pues contaba únicamente con un patrón de demanda y por tanto, cumple con el propósito de trabajar con nudos limitados para el análisis hidráulico. El patrón con el que contaba esta red se muestra a continuación:

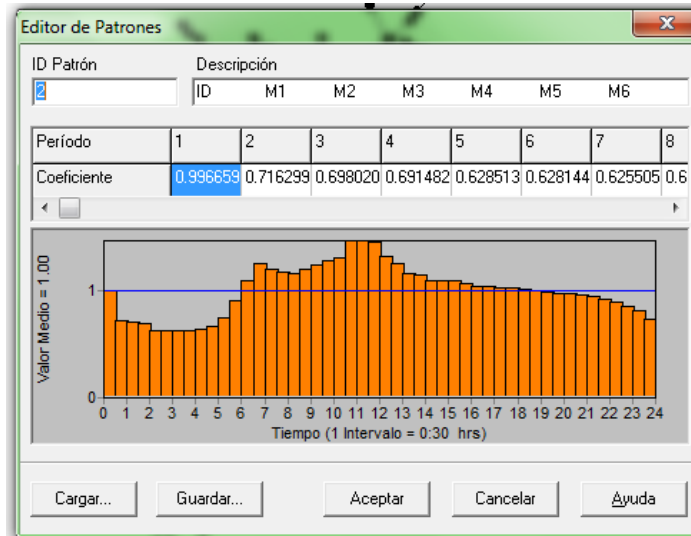


ILUSTRACIÓN 19 PATRÓN DE LA RED MATRIZ DE MEDELLÍN.

Q máximo	11:00 am
Q mínimo	3:30 am
Q medio	7:00 pm

TABLA 3 HORARIOS DE CAUDALES MÍNIMO, MEDIO Y MÁXIMO.

### 4.2.3 RED GINEBRA

La red de Ginebra cuenta con 3 patrones, muy similares entre ellos, por lo que fue relativamente sencillo identificar las horas de los caudales. Los 3 patrones se muestran a continuación:



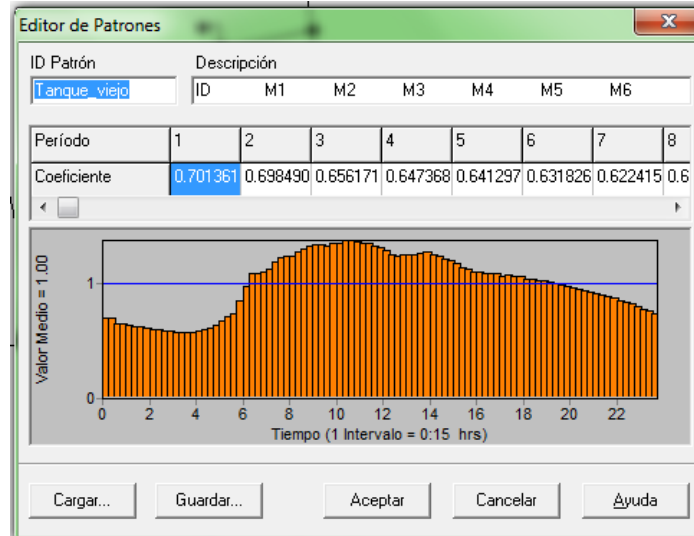


ILUSTRACIÓN 20 PATRÓN TANQUE\_VIEJO.

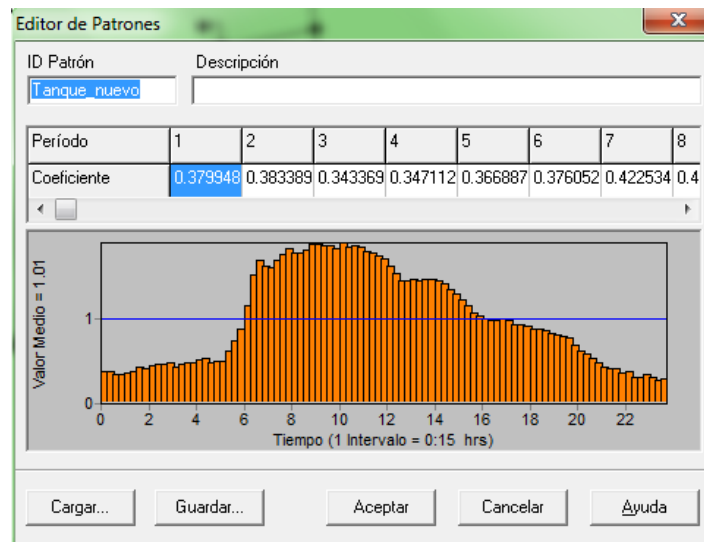


ILUSTRACIÓN 21 PATRÓN TANQUE\_NUEVO.

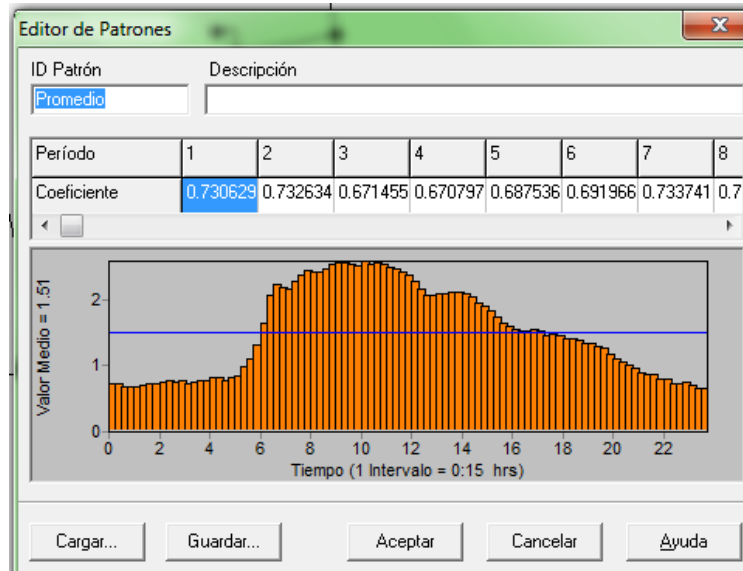


ILUSTRACIÓN 22 PATRÓN PROMEDIO.

De las ilustraciones anteriores es posible ver que si bien existen diferencias entre los 3 patrones, la mayoría de la red trabaja con el patrón de Tanque\_Nuevo seguido por el patrón Promedio. A partir de los resultados que arrojan estos patrones, se determinaron los horarios de los 3 caudales.

La tabla con los tres horarios de caudales se muestra a continuación:

Q máximo	10:15 am
Q mínimo	3:30 am
Q medio	7:15 pm

TABLA 4 HORARIOS DE CAUDALES MÍNIMO, MEDIO Y MÁXIMO.

#### 4.2.4 RED ANDALUCÍA

La red de Andalucía también cuenta con 3 patrones de demanda de caudal; sin embargo, en este caso los tres patrones eran muy similares entre ellos. Adicionalmente, la mayor parte de los nudos de demanda de la red trabajan con el patrón, todos los días. Los patrones nombrados se muestran a continuación:

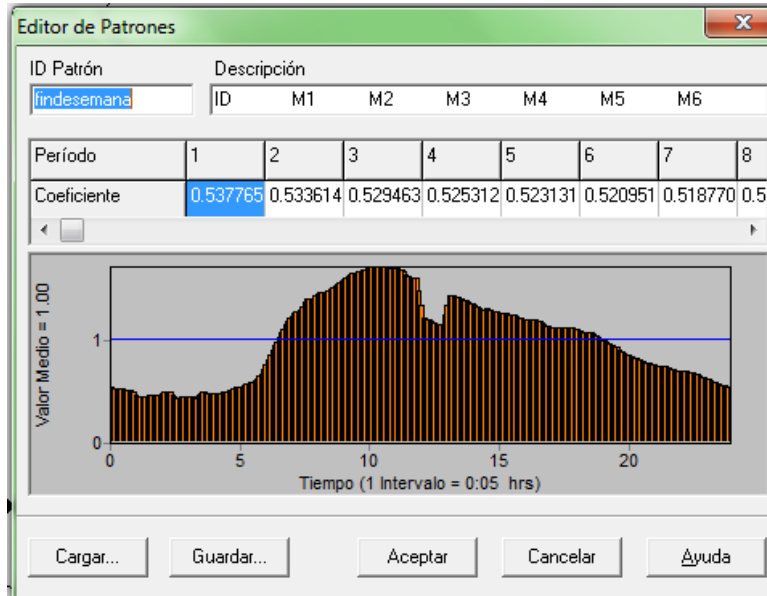


ILUSTRACIÓN 23 PATRÓN FINDESEMANA.

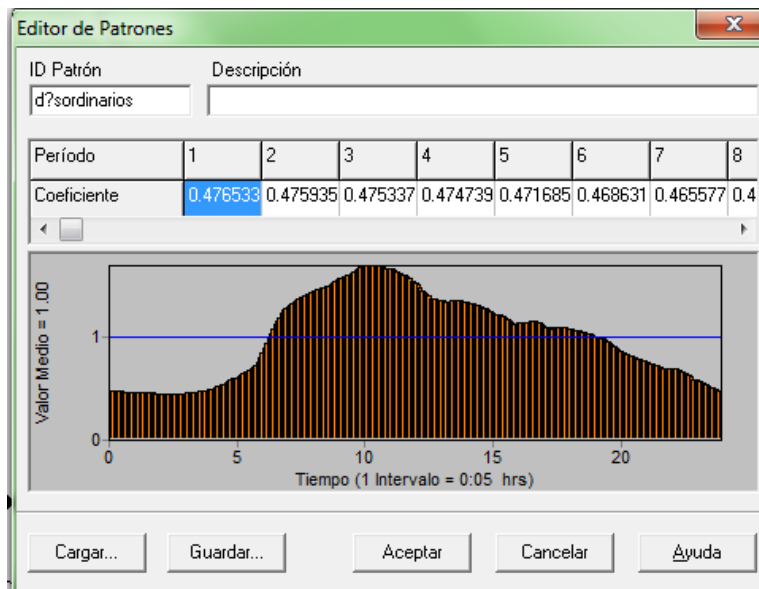


ILUSTRACIÓN 24 PATRÓN DÍAS ORDINARIOS.

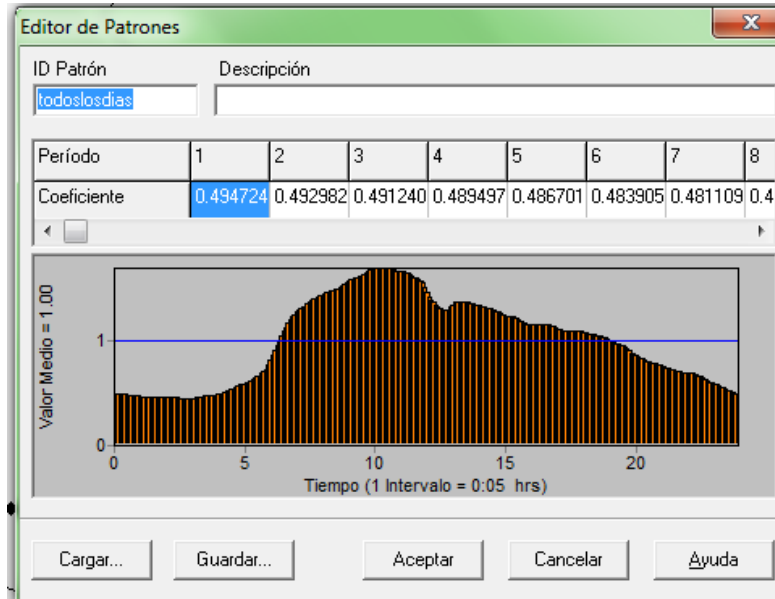


ILUSTRACIÓN 25 PATRÓN TODOS LOS DÍAS.

Con base en esto, se determinaron las horas de caudal mínimo, medio y máximo, estas se muestran en la tabla a continuación:

Q máximo	10:00 am
Q mínimo	2:30 am
Q medio	6:20 pm

TABLA 5 HORARIOS DE CAUDAL MÍNIMO, MÁXIMO Y MEDIO.

### 4.3 ANÁLISIS DE EMISORES

En esta sección se exponen los resultados y su respectivo análisis de los datos recopilados tras correr la red con diferentes emisores. Los resultados se muestran por casos, es decir, están divididos en cada una de las redes; adicionalmente en esta sección se presentan y analizan los resultados más relevantes y que ilustren mejor los objetivos del estudio, los demás resultados pueden ser visualizados si es deseado en la sección de Anexos; esto incluye las imágenes con las localizaciones de los emisores, resultados de las diferencias de los números de Reynolds que se presentaban entre la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach.

#### 4.3.1 RED MATRIZ DE BOGOTÁ

En esta sección se muestran los resultados de la red matriz de Bogotá. El orden será: Primero los emisores pequeños, posteriormente los emisores grandes, las gráficas del caudal del

emisor frente al número de Reynolds, las variaciones del coeficiente de Hazen-Williams frente al número de Reynolds y frente a los diámetros presentes en la red en los 3 momentos del día (Qmax, Qmin y Qmed) y finalmente las presiones de la red en los momentos establecidos.

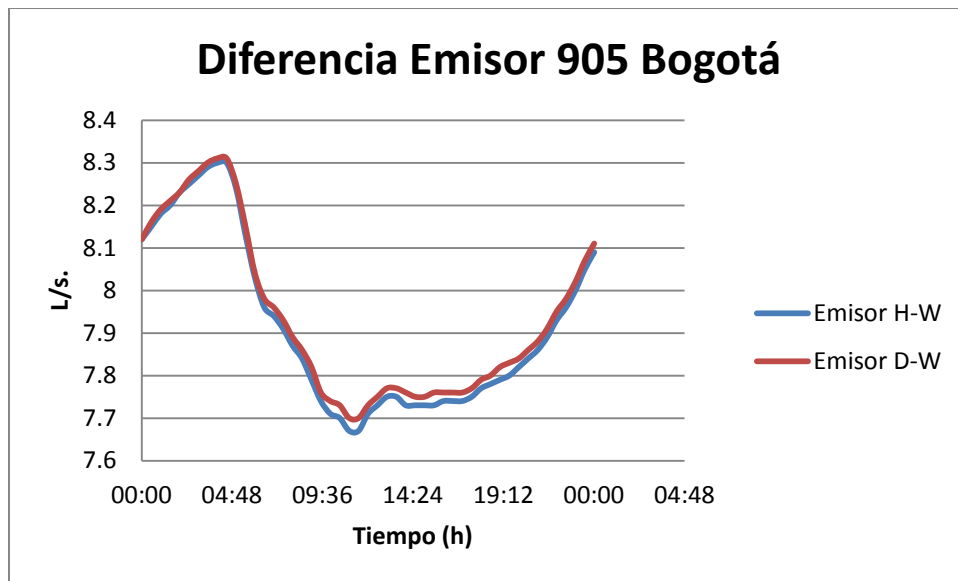


ILUSTRACIÓN 26 RESULTADOS EMISOR 905

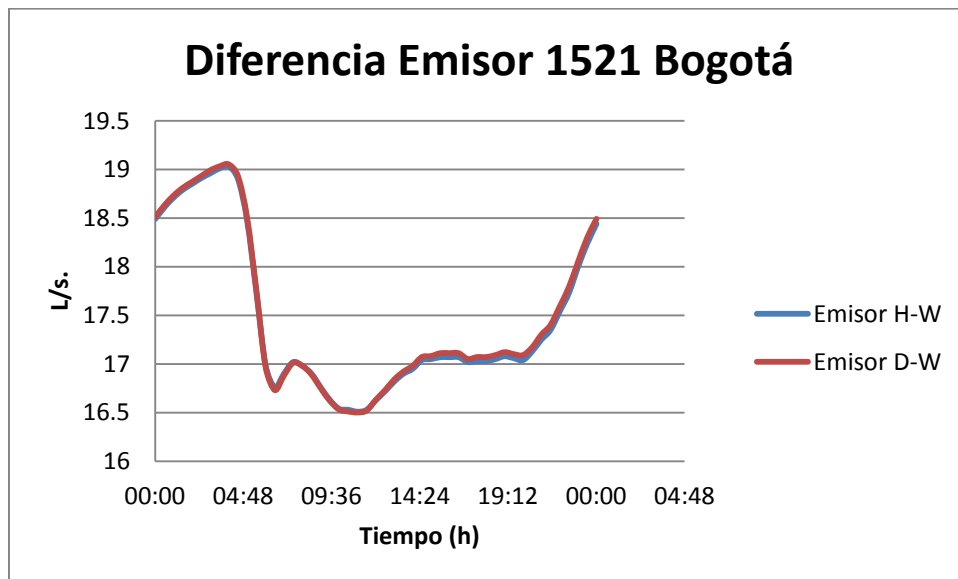


ILUSTRACIÓN 27 RESULTADOS EMISOR 1521

Estos dos resultados representan los emisores pequeños de la red. Una revisión detenida del comportamiento de los datos que arrojan la ecuación de Hazen-Williams como la ecuación de

Darcy-Weisbach indica que su comportamiento es similar y no presenta diferencias evidentes. Las curvas parecen seguir el mismo patrón y no existen diferencias de caudal significativas entre la simulación con la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach.

Las características de estos dos emisores se trabajaron como:

	Emisor 905	Emisor 1521
Presión(m)	20	20
Caudal Base(L/s)	4.5076	11.119
Coefficiente Emisor	1.0079	2.486417

TABLA 6 CARACTERÍSTICAS DE LOS EMISORES PEQUEÑOS.

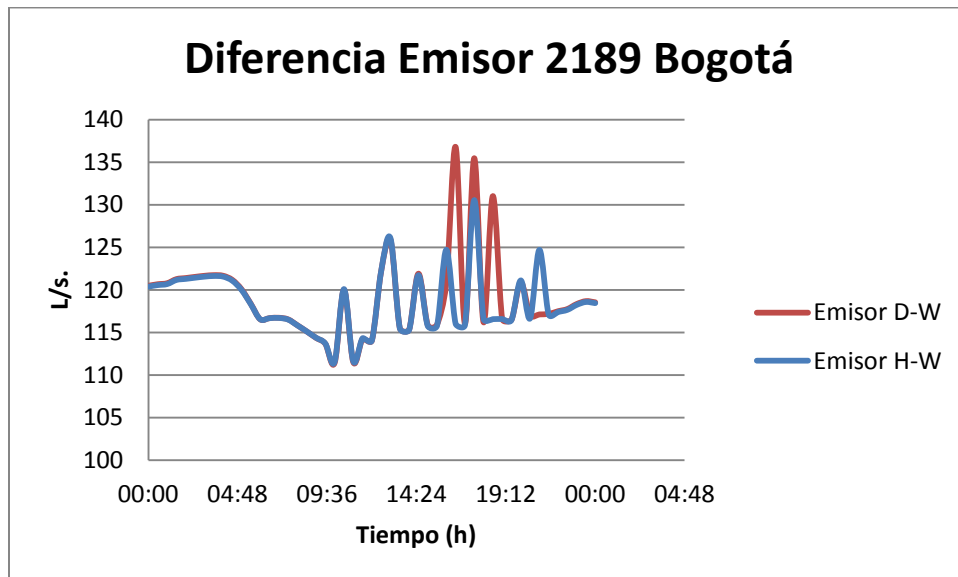


ILUSTRACIÓN 28 RESULTADOS EMISOR 2189

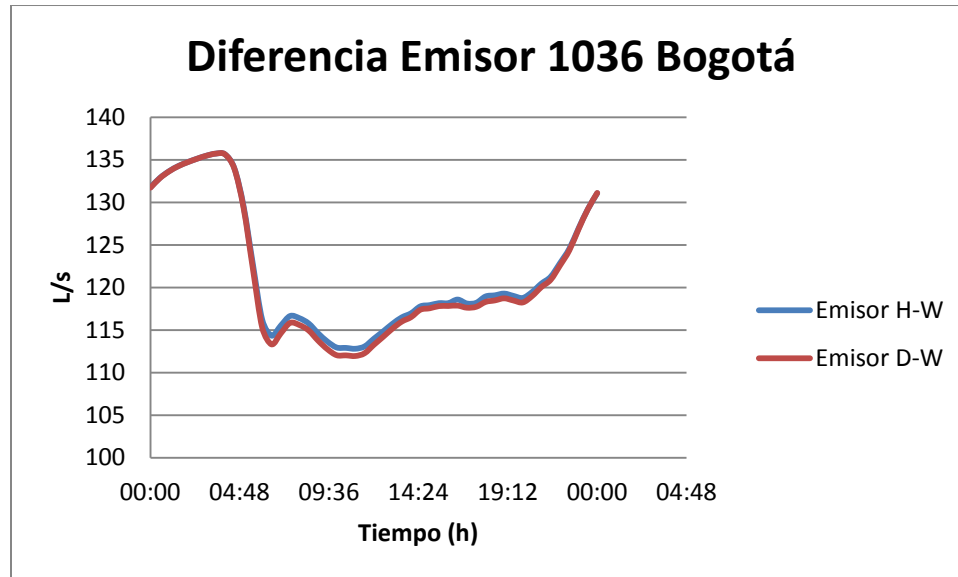


ILUSTRACIÓN 29 RESULTADOS EMISOR 1036.

Por el contrario, cuando se trabaja con emisores mayores fue posible evidenciar diferencias significativas entre los valores que arrojan la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach y la ecuación de Hazen-Williams. Si bien, solo se vio en un caso particular, es importante ver que la ecuación de Hazen-Williams subestima en este caso el caudal del emisor; esta diferencia se encuentra entre 5 y 10 L/s.

En este caso, como se deseaba aumentar los emisores, se modificó directamente el coeficiente emisor de tal forma que se comportara más como un tanque grande que no devolvía el caudal, es decir que funcionara como si se llenara un tanque de gran tamaño.

	Emisor 2189	Emisor 1036
Coficiente Emisor	16.09	18.33

TABLA 7 COEFICIENTES EMISORES DE LOS NUDOS.

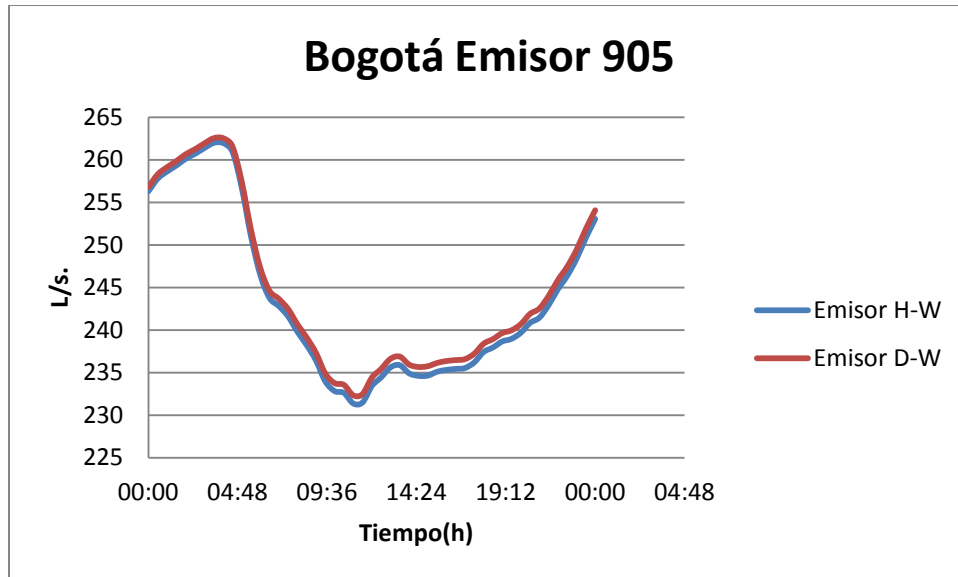


ILUSTRACIÓN 30 RESULTADOS EMISOR 905.

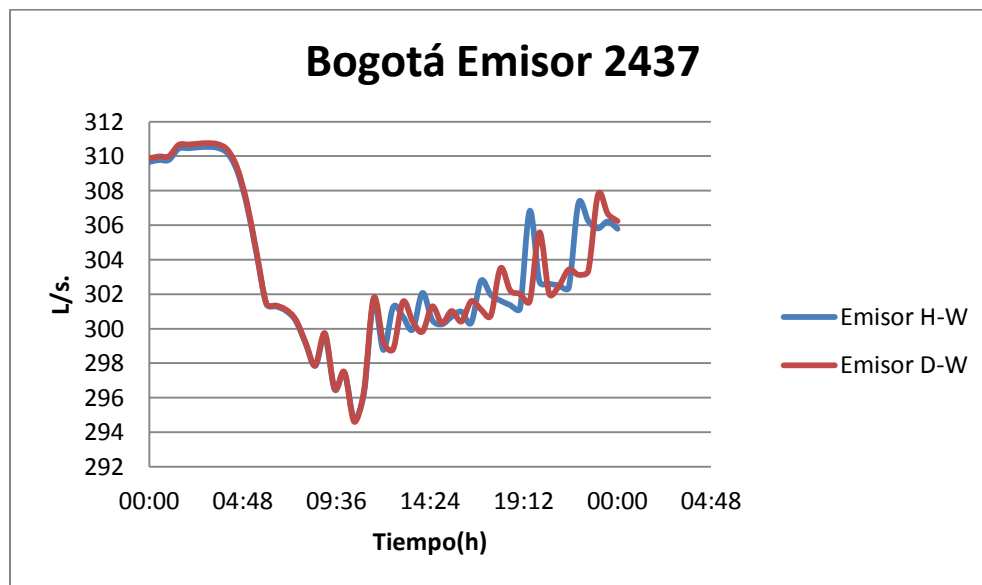


ILUSTRACIÓN 31 RESULTADOS EMISOR 2437.

El proceso prosiguió trabajando con coeficientes emisores aún más grandes. Como se puede ver, no se vieron diferencias importantes en estos emisores, ya que los resultados arrojan diferencias de máximo 2 litros en algunos horarios del día. Se concluye que en esta red se está presentando un comportamiento similar entre las dos ecuaciones, es decir, el comportamiento entre la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach no presentan grandes diferencias, con la sola excepción de las diferencias que se detectaron en



algunos horas del día y que no superan, con los valores de emisores caudales en esta fase de la investigación, los tres litros por segundo.

Sin embargo, se decidió seguir probando escenarios con coeficientes de emisión mayores para ver si se presentaba algún tipo de diferencias entre la hidráulica de las dos ecuaciones. Estos resultados se muestran a continuación:

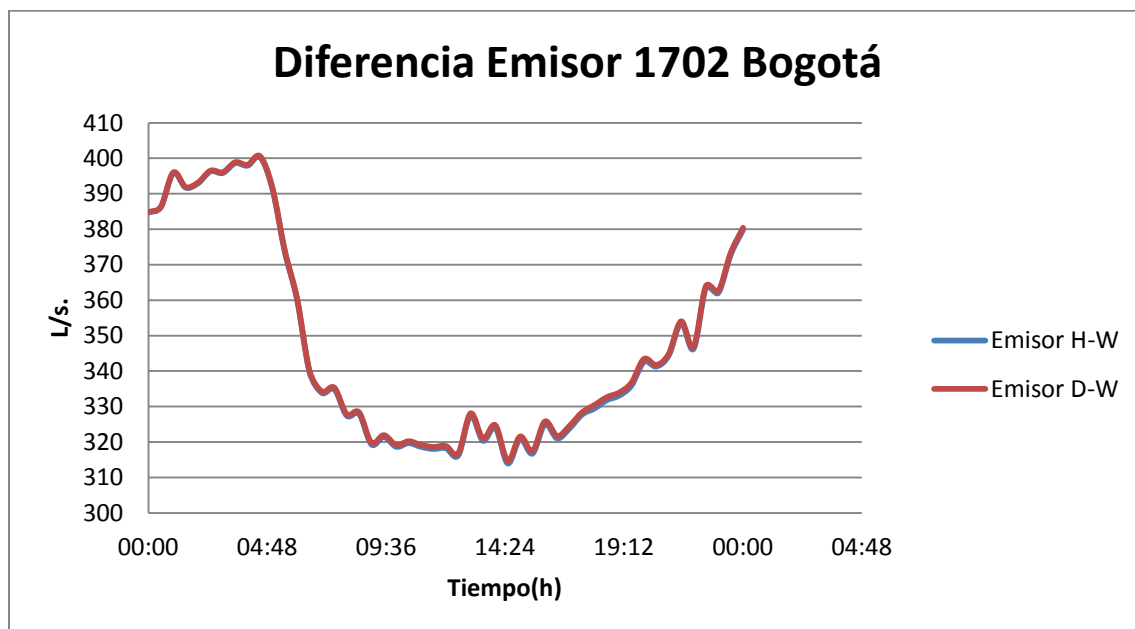


ILUSTRACIÓN 32 RESULTADOS EMISOR 1702.

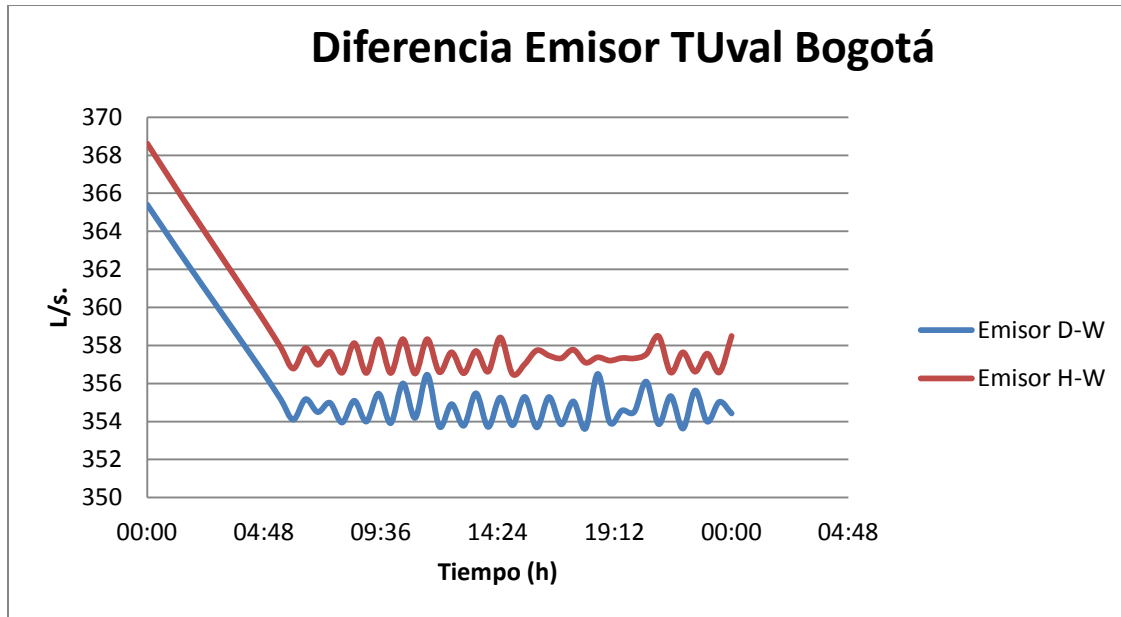


ILUSTRACIÓN 33 RESULTADOS EMISOR TUAL.

Así mismo, se decidió estudiar qué posible relación podía tener el número de Reynolds de llegada frente al caudal emisor: El número de Reynolds utilizado fue el encontrado con la ecuación físicamente basada. Los resultados para estos dos emisores se muestran a continuación:

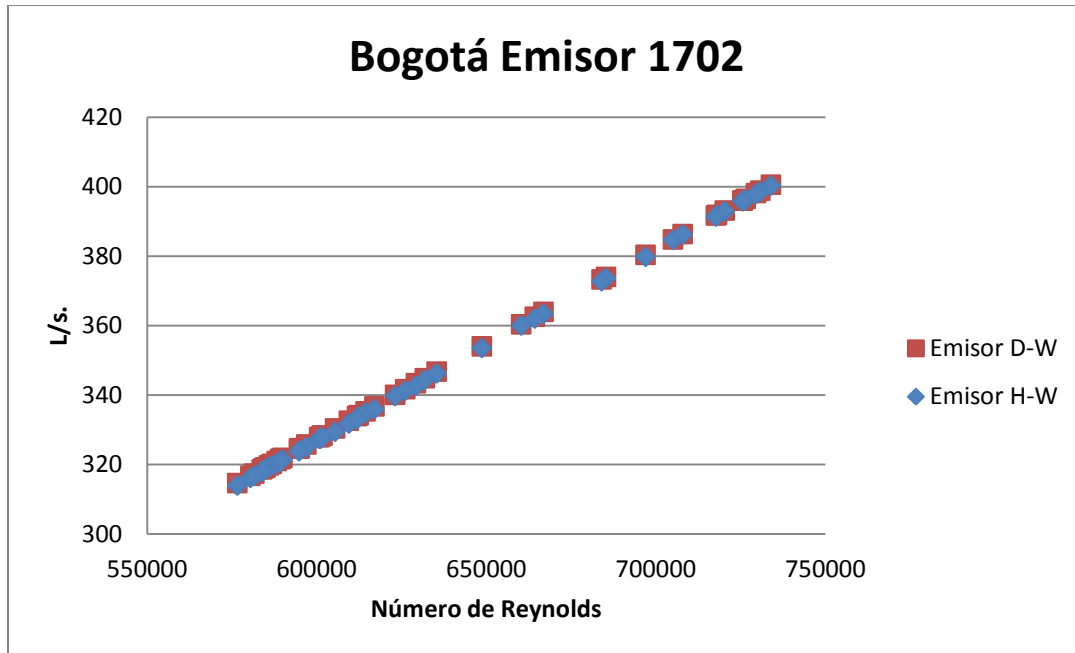


ILUSTRACIÓN 34 GRÁFICA DE REYNOLDS VS CAUDAL EMISOR EN EMISOR 1702.

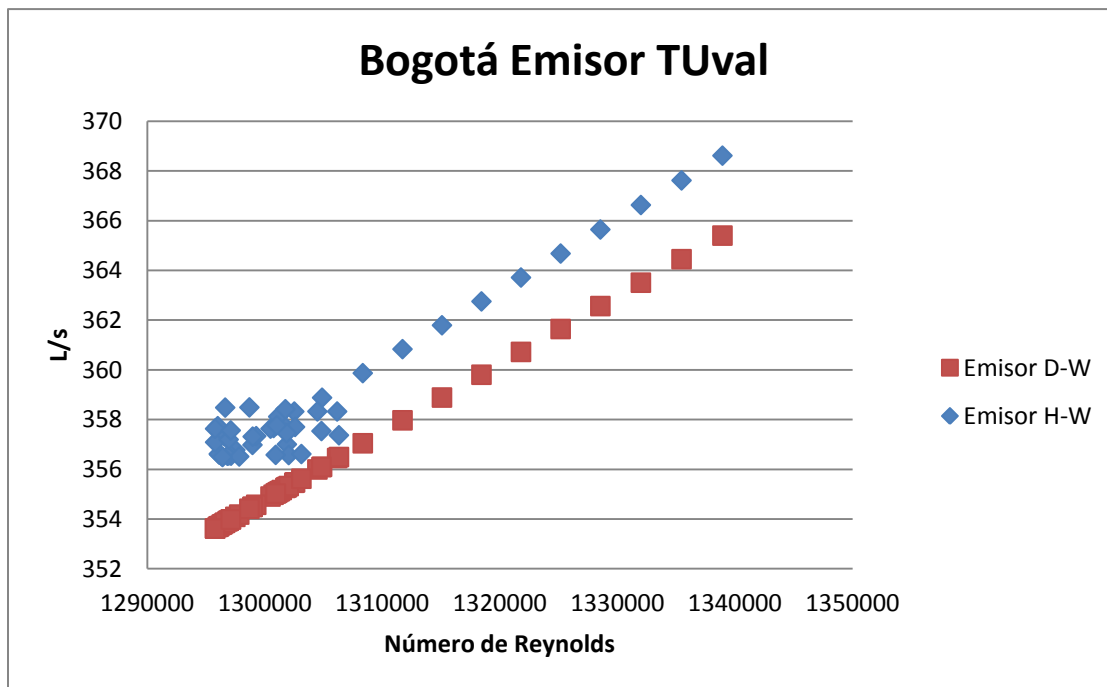


ILUSTRACIÓN 35 GRÁFICA DEL NÚMERO DE REYNOLDS VS CAUDAL EMISOR EN EMISOR TUVAL.

Estos resultados son bastante interesantes ya que si bien en el primer emisor no se presentan diferencias significativas, en el segundo emisor, las diferencias resultan evidentes, especialmente cuando se visualizan los litros por segundo en relación con el número de Reynolds con la red que utiliza la ecuación de Hazen-Williams frente a la ecuación que utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach. Más adelante cuando se muestren los resultados para las otras redes, se verán con más detalle estas diferencias.

La investigación avanzó en el análisis del comportamiento del coeficiente de Hazen-Williams en la red que trabajó con la ecuación de Darcy-Weisbach. Los resultados de esto se muestran a continuación:

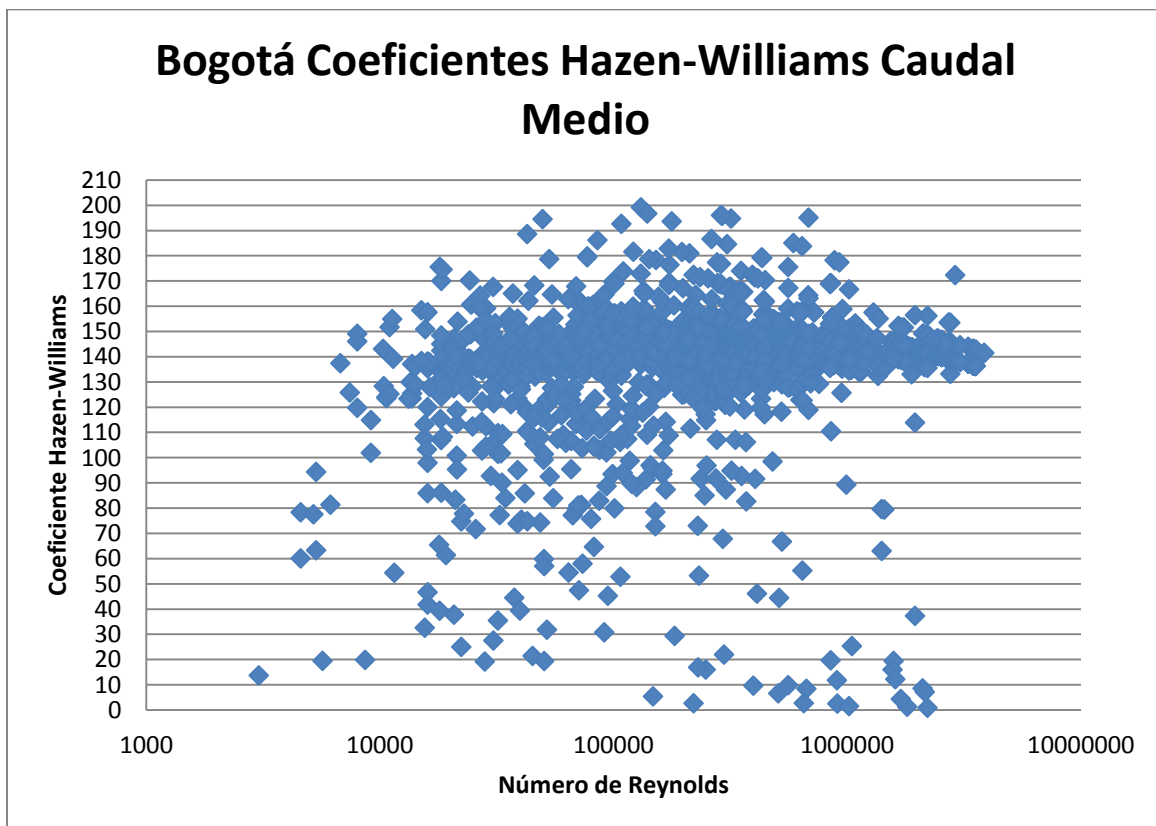


ILUSTRACIÓN 36 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS RESPECTO AL NÚMERO DE REYNOLDS PARA EL CAUDAL MEDIO.

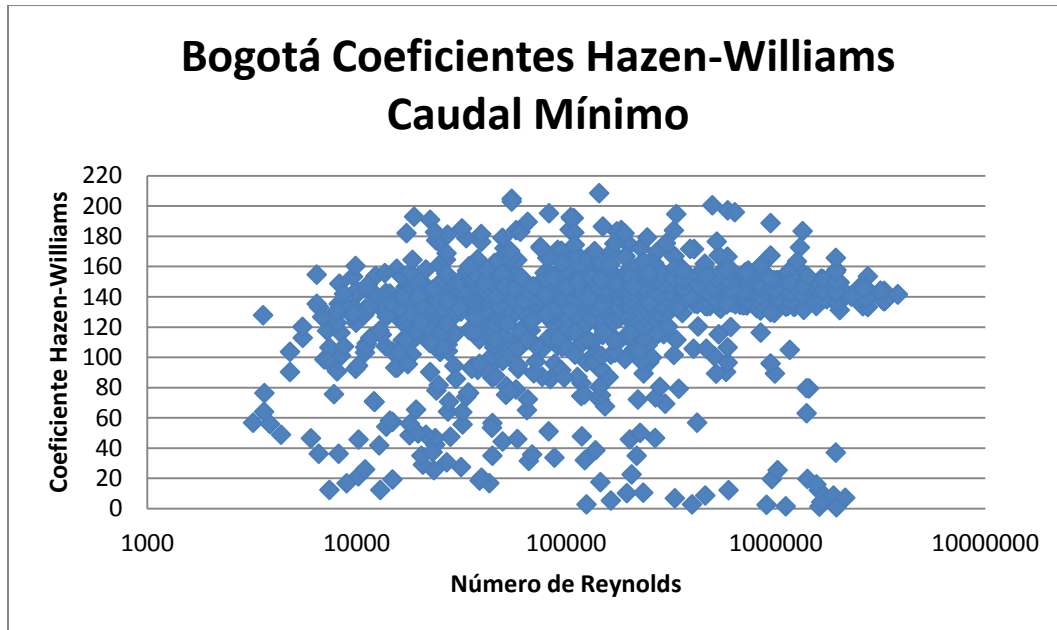


ILUSTRACIÓN 37 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS FRENTE AL NÚMERO DE REYNOLDS PARA EL CAUDAL MÍNIMO.

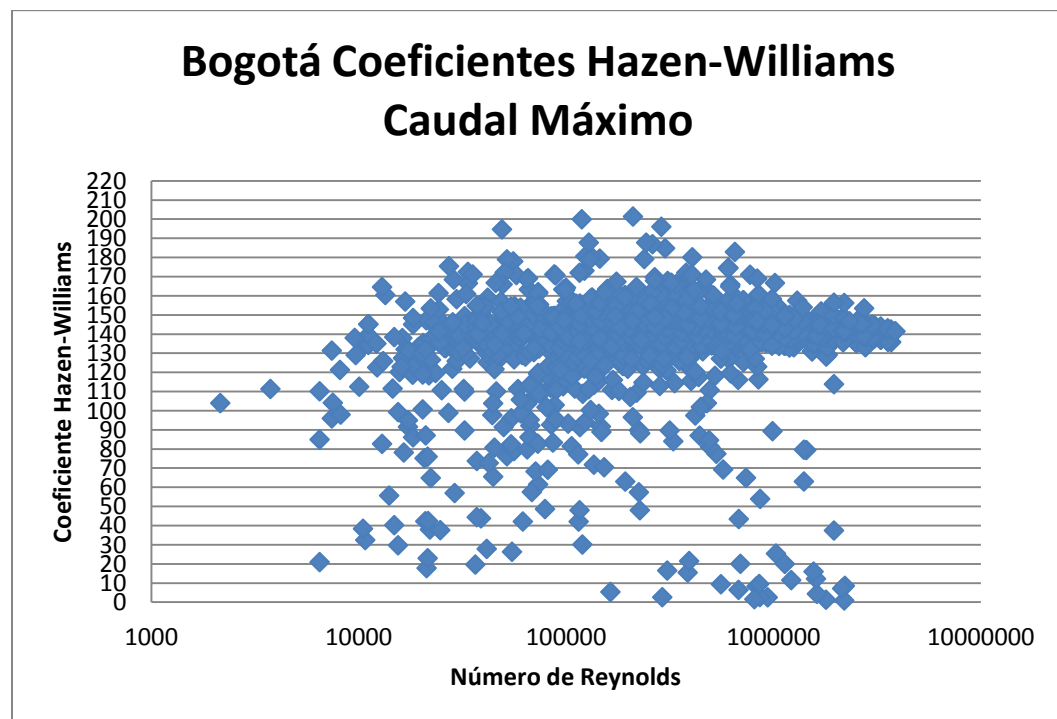


ILUSTRACIÓN 38 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS FRENTE AL NÚMERO DE REYNOLDS PARA EL CAUDAL MÁXIMO.

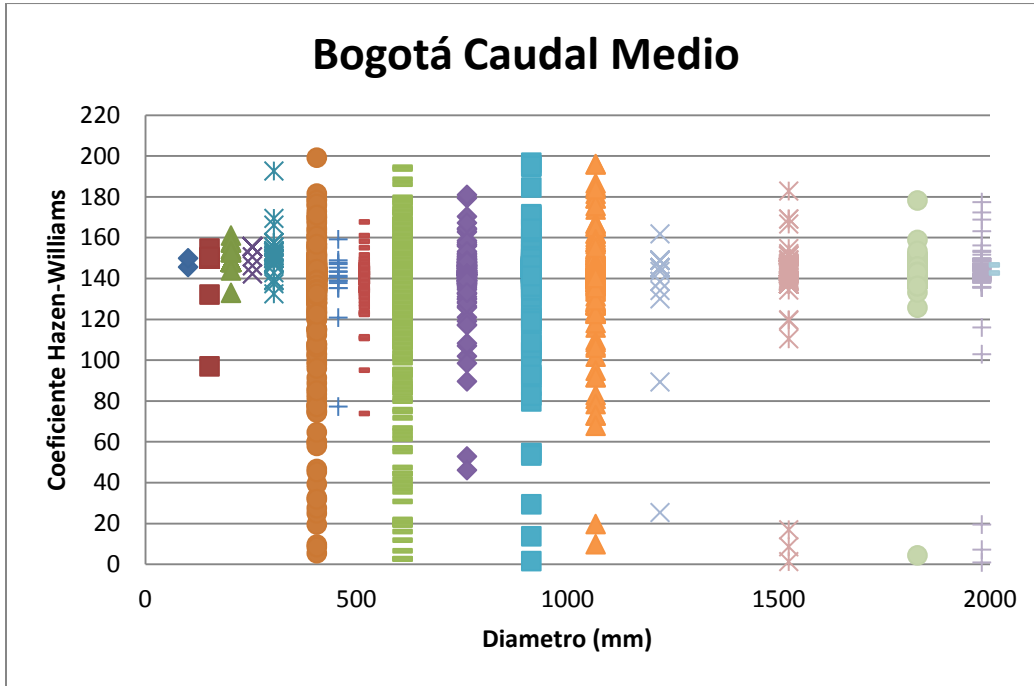


ILUSTRACIÓN 39 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS FRENTE A LOS DIÁMETROS DE LA RED PARA EL CAUDAL MEDIO.

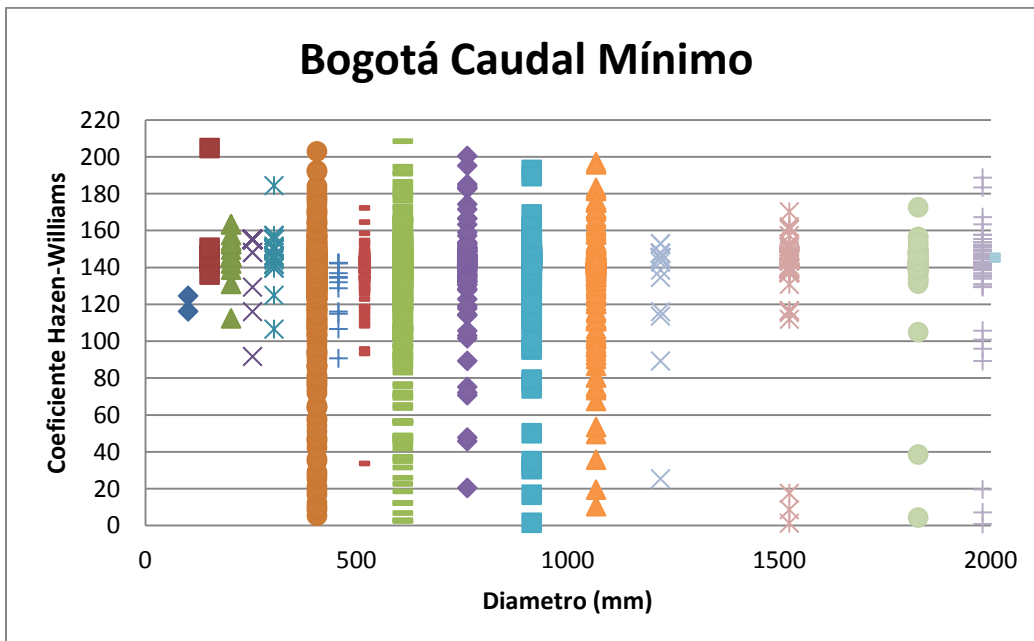


ILUSTRACIÓN 40 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS FRENTE A LOS DIÁMETROS DE LA RED PARA EL CAUDAL MÍNIMO.

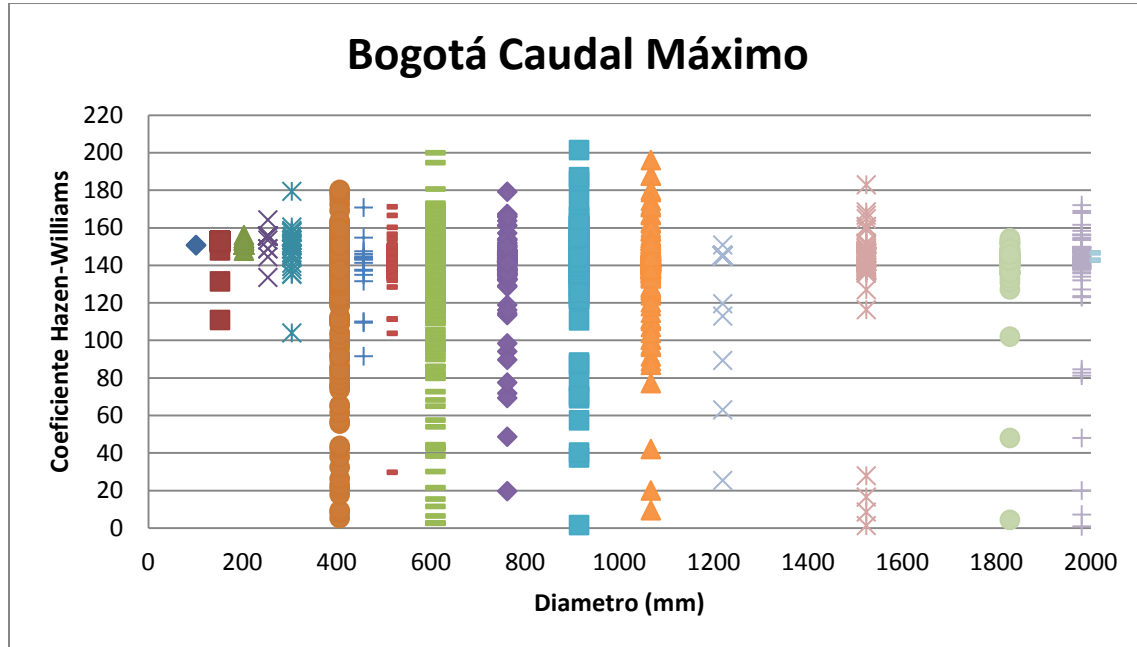


ILUSTRACIÓN 41 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS FRENTE A LOS DIÁMETROS DE LA RED PARA EL CAUDAL MÁXIMO.

De las gráficas anteriores es importante resaltar el hecho de que la red presenta variaciones significativas de los coeficientes de Hazen-Williams. Se destaca que si bien hay resultados muy por encima o muy por debajo de la franja de coeficientes entre 130 y 160, la mayoría de los datos se encuentran entre estos valores. Lo anterior puede ser explicado en virtud a que las tuberías empleadas no tenían como propósito representar las condiciones reales, a lo cual conviene agregar que las pruebas realizadas representan tramos muy cortos que se utilizaron para intentar representar de mejor manera la hidráulica de la red y que pueden llegar a presentar pérdidas por fricción muy pequeñas. Adicionalmente conviene señalar que, en otros casos, se trataba de tramos en los que pasaba muy poco caudal por un diámetro muy grande, lo que reducía notablemente la velocidad que se presentaba y por ende las pérdidas por fricción, llegando incluso a presentarse flujo laminar, cambiando de manera significativa el comportamiento del coeficiente de Hazen-Williams.

Los resultados de las gráficas constituyen que la red se está comportando de una forma relativamente parecida a los coeficientes teóricos establecidos que son de 140 y 150. Retomando la franja principal donde se encuentran los coeficientes, es posible decir que la diferencia entre los emisores es muy baja debido a que la red operada con la ecuación de Hazen-Williams se está comportando de manera muy similar a la red operada con la ecuación de Darcy-Weisbach. Esto se concluye al analizar las diferencias de presión en la red como se mostrara más adelante y con base a que los coeficientes de Hazen-Williams teóricos se comportaron de manera similar a los hallados a partir de la red que estaba siendo operada con la ecuación de Darcy-Weisbach (lo que implica números de Reynolds similares al igual

que factores de fricción similares en los tramos de interés); por otro lado también se estudiaron diferentes condiciones de los emisores (mayor y menor caudal emisor) y no existió una diferencia significativa. Así mismo, cabe resaltar que si bien en la mayoría de los casos se presentó un comportamiento similar, también se presentaron casos donde se presentaban diferencias; si bien estas se encontraban entre un rango de 5 y 15 L/s, son diferencias que deben ser tenidas en cuenta a la hora de operar redes matrices, ya que como se señaló atrás, la ecuación de Hazen-Williams puede llegar a dar un falso sentido de alerta y como se verá más adelante, puede considerar un excesivo sentido de seguridad al operario.

A continuación se muestran los resultados encontrados para las diferencias de presión en la red.

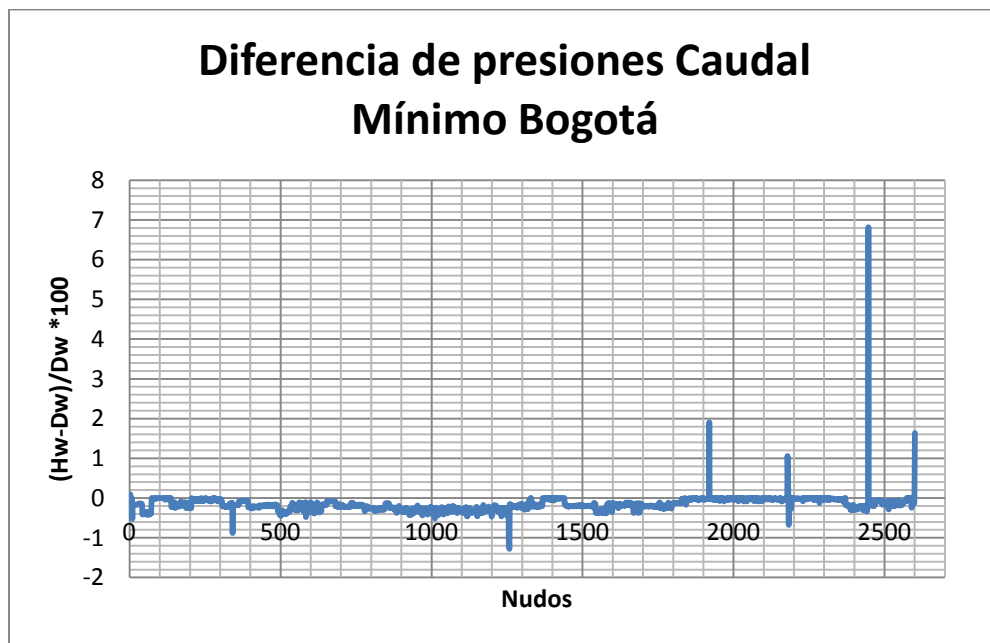


ILUSTRACIÓN 42 DIFERENCIA DE PRESIONES PARA EL CAUDAL MÍNIMO.



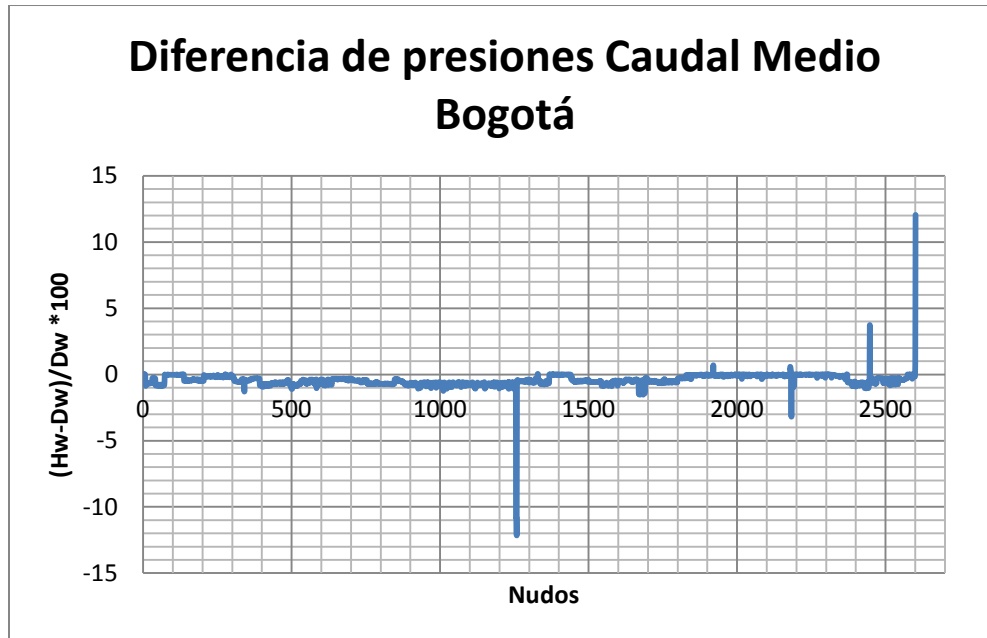


ILUSTRACIÓN 43 DIFERENCIA DE PRESIONES PARA EL CAUDAL MEDIO.

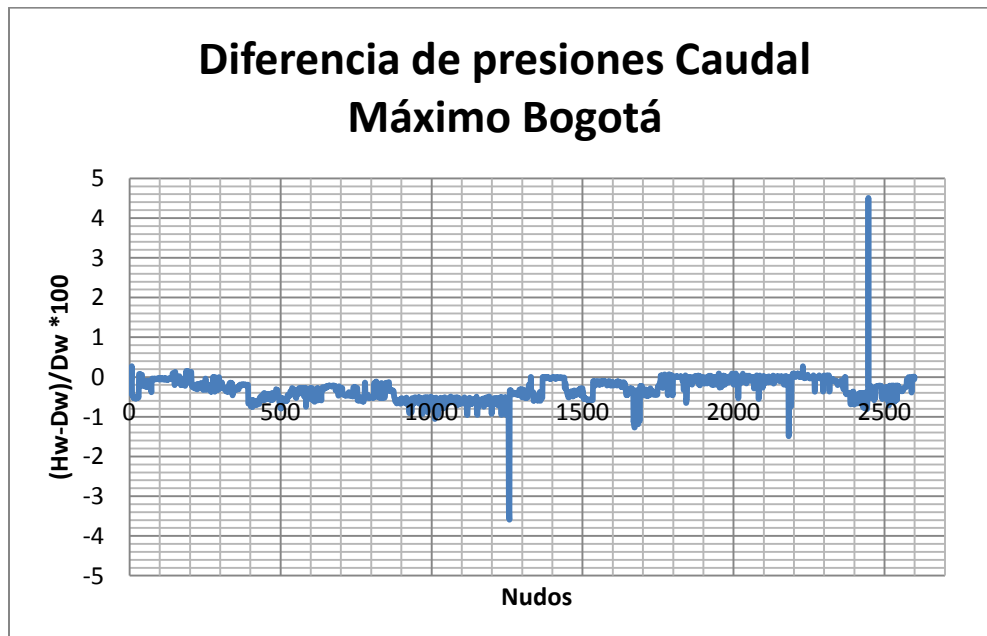


ILUSTRACIÓN 44 DIFERENCIA DE PRESIONES PARA EL CAUDAL MÁXIMO.

Estos resultados concuerdan con lo analizado anteriormente, y es que en términos generales los valores de presión que arrojan las dos ecuaciones son relativamente similares. Sin obviar

el hecho de que si se están presentando diferencias que pueden llegar a un máximo diferencial del 12% entre las presiones; dicha situación sin embargo, se presenta en muy pocos nudos de la red. Todo esto indica que el cálculo de las pérdidas por fricción en la red matriz de Bogotá usando la ecuación de Hazen-Williams no presenta diferencias considerables frente al cálculo realizado utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach y que las diferencias presentadas, que son de máximo el 12%, se presentan sólo en algunos nudos de la red.

### 4.3.2 RED MATRIZ DE MEDELLÍN

A continuación se mostrarán de los resultados de la red matriz de Medellín. La diferencia entre esta red y la mostrada previamente es que en este caso no se mostrarán los resultados para emisores bajos, esto se debió a que en el momento de realizar estos cálculos la red tenía mal establecidas las unidades de los caudales demandados en los nudos (estaban en L/s y no en  $\frac{m^3}{s}$ ) y por ende no estaba representando de manera verídica la hidráulica de la red. Por lo que se procedió a corregir esto y se empezó a trabajar con los caudales reales de la red y con emisores de gran tamaño en diferentes puntos de la red.

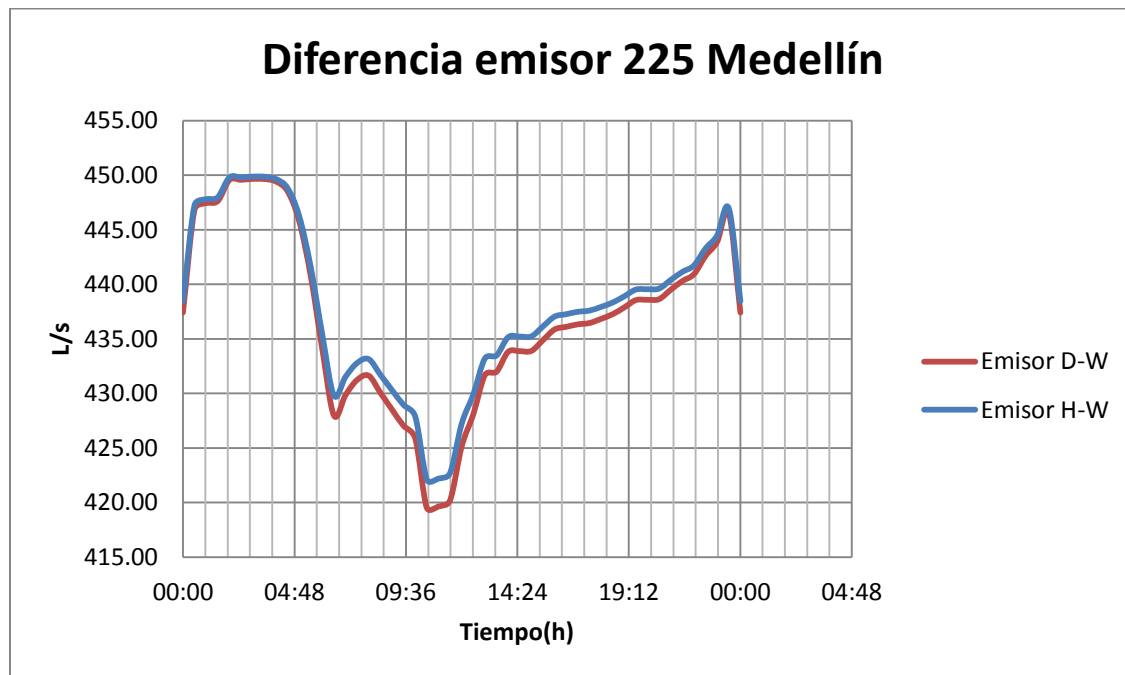


ILUSTRACIÓN 45 RESULTADOS EMISOR 225.

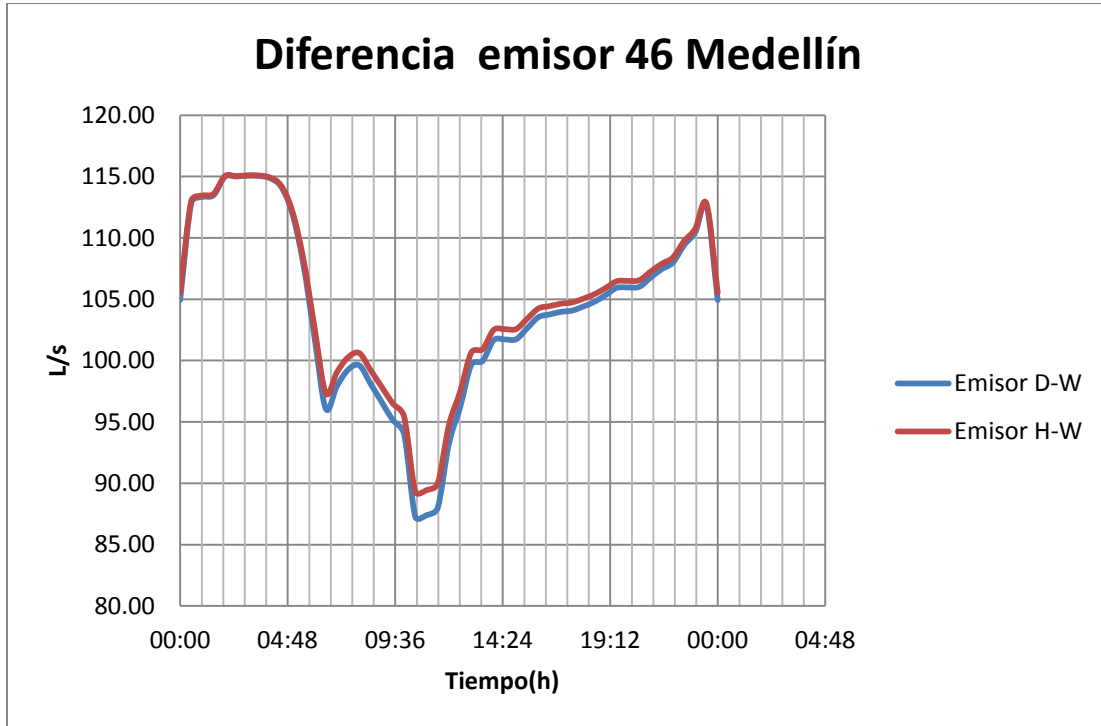


ILUSTRACIÓN 46 RESULTDOS EMISOR 46

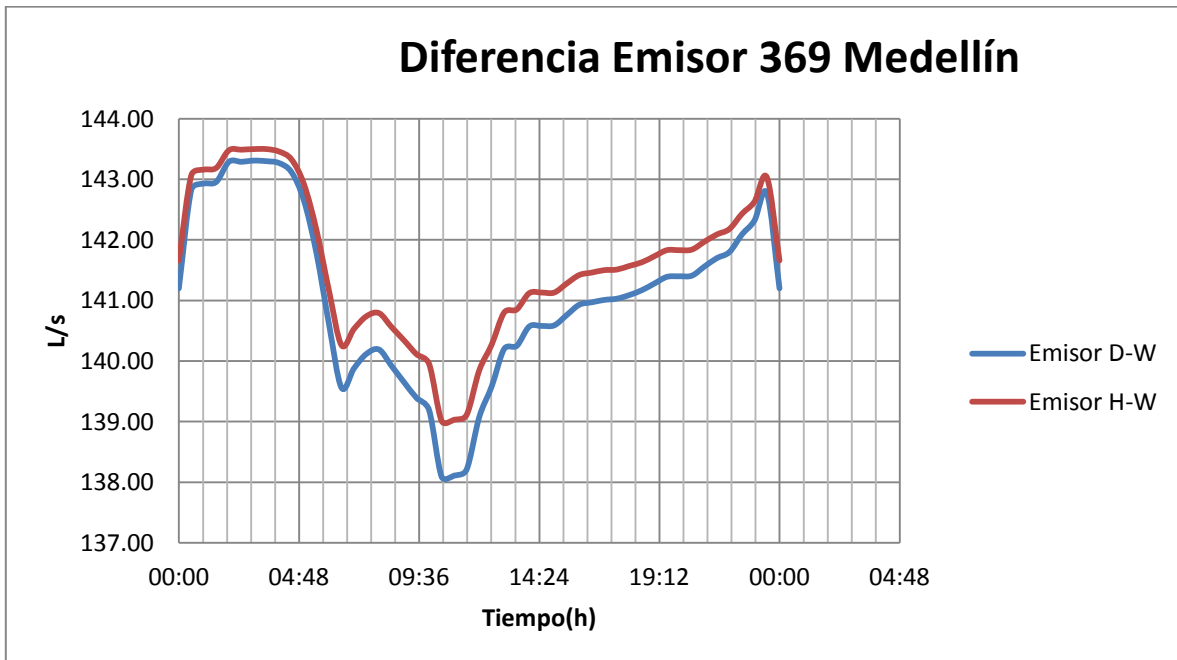


ILUSTRACIÓN 47 RESULTADOS EMISOR 369.

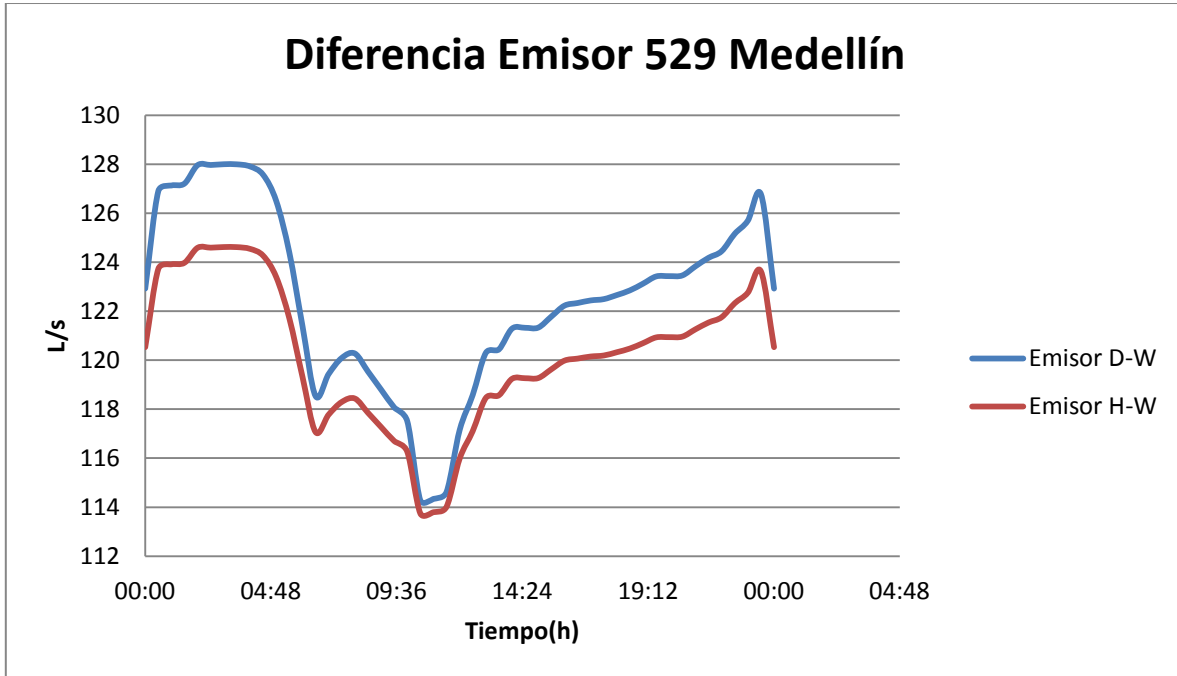


ILUSTRACIÓN 48 RESULTADOS EMISOR 529.

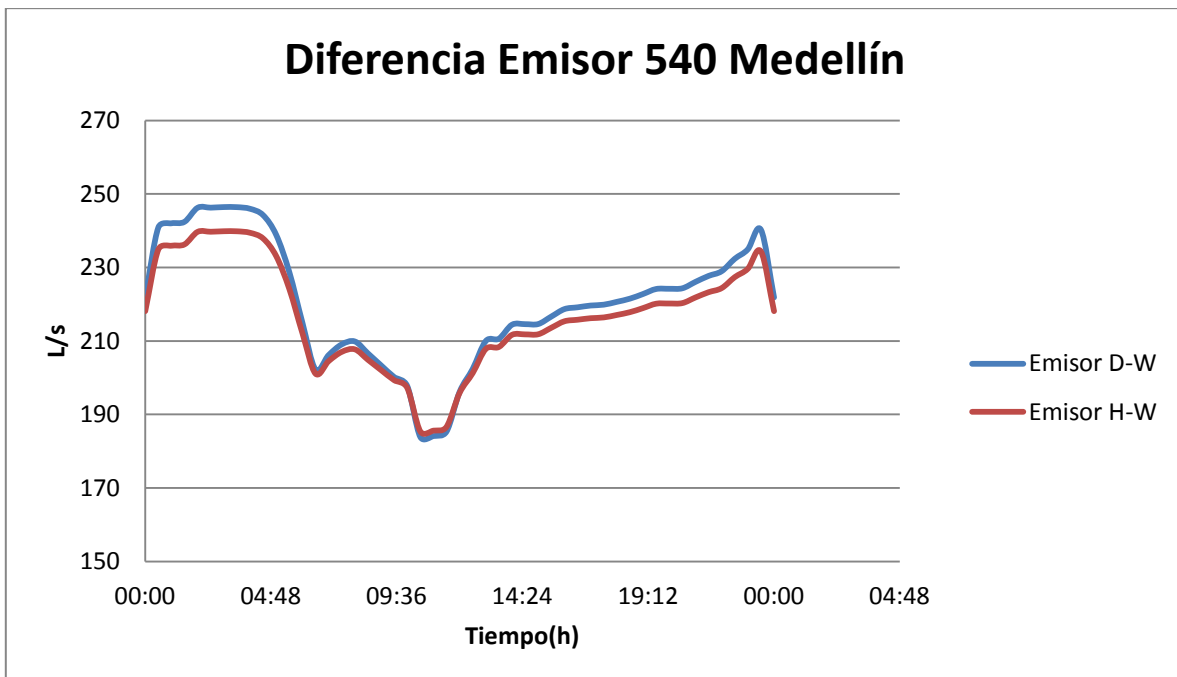


ILUSTRACIÓN 49 RESULTADOS EMISOR 540.

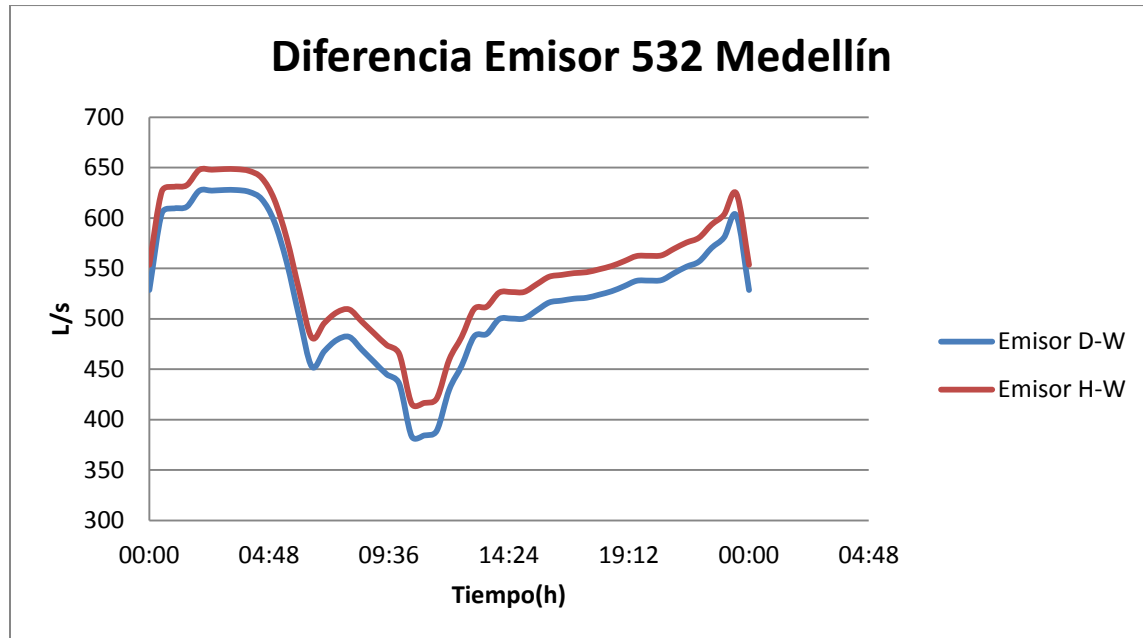


ILUSTRACIÓN 50 RESULTADOS EMISORES 532.

Se pueden evidenciar diferencias importantes entre los emisores usando la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach. Para empezar, se puede ver que cuando la hora de máximo caudal (alrededor de las 10 am) se está aproximando, estas diferencias se ven acrecentadas sustancialmente, como es el caso en los emisores 369 y 332 donde se llegan a presentar diferencias de hasta 30 L/s. Es decir, en este caso la ecuación de Hazen-Williams está entregando un caudal de emisor 30 litros mayor al que entrega la ecuación físicamente basada, lo que implica que en el caso de la red que utiliza la ecuación de Hazen-Williams está dando un falso sentido de la seguridad pues el operador observa que el tanque contiene un volumen de agua mayor al que realmente puede llegar a tener. Lo anterior representa una condición preocupante, ya que estas diferencias no se presentan en todos los emisores, lo cual puede conducir a los operarios de la red a confundirse y cometer errores de estimación del caudal emisor, al suponer que los valores que arroja la ecuación de Hazen-Williams está representando de forma verídica la hidráulica de la red.

Con base en esto, se decidió analizar qué diferencias podían ocurrir con respecto al número de Reynolds de llegada y el caudal emisor. Los resultados de esto se muestran a continuación:

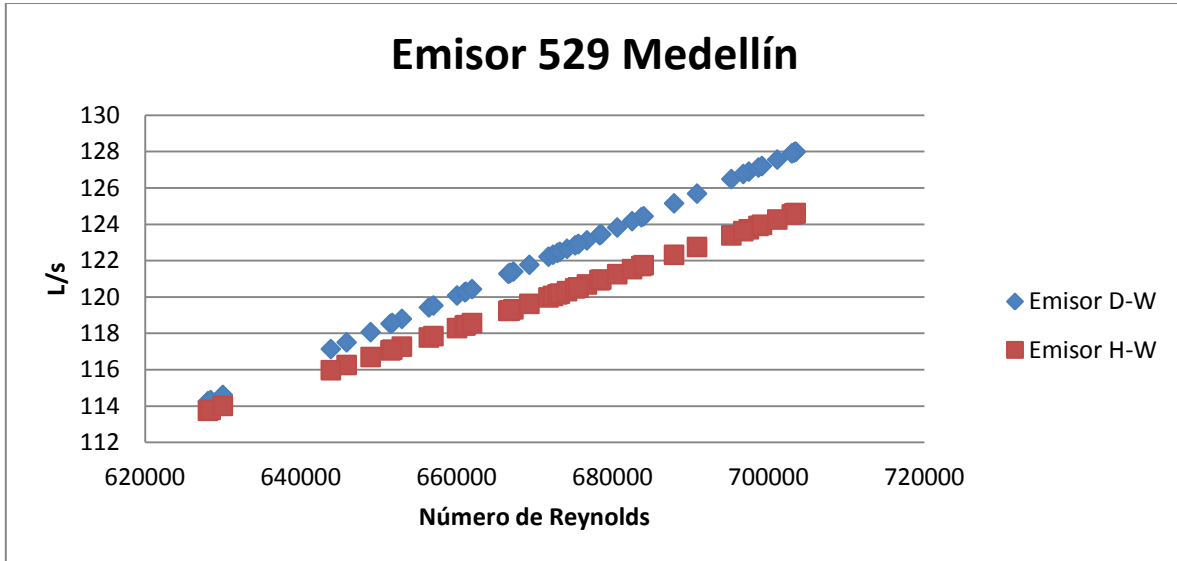


ILUSTRACIÓN 51 CAUDAL EMISOR VS NÚMERO DE REYNOLDS EMISOR 529.

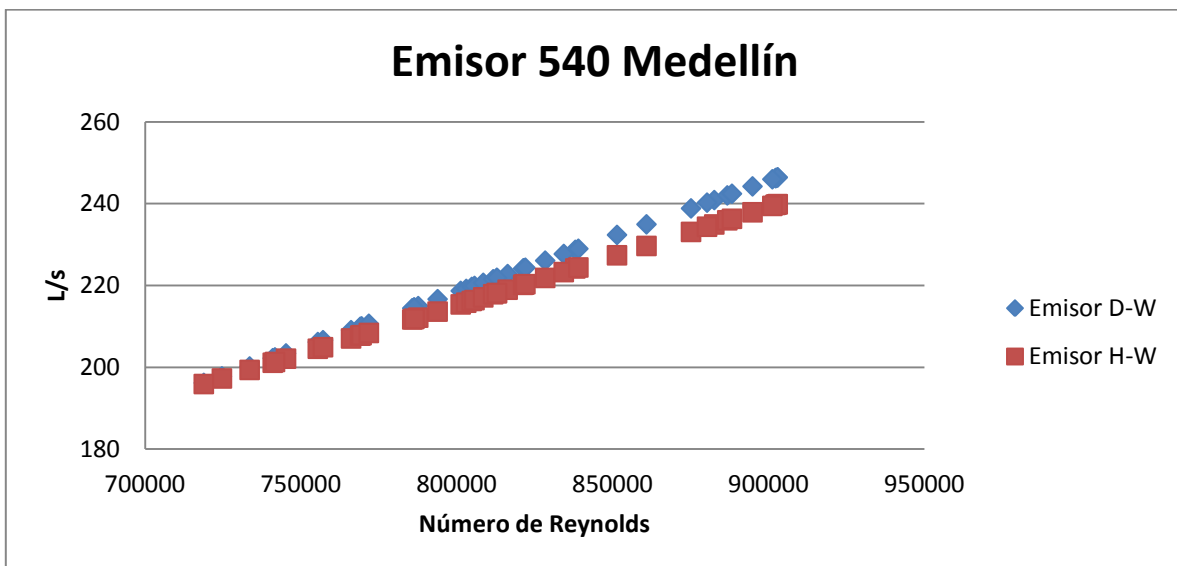


ILUSTRACIÓN 52 CAUDAL EMISOR VS NÚMERO DE REYNOLDS EMISOR 540.

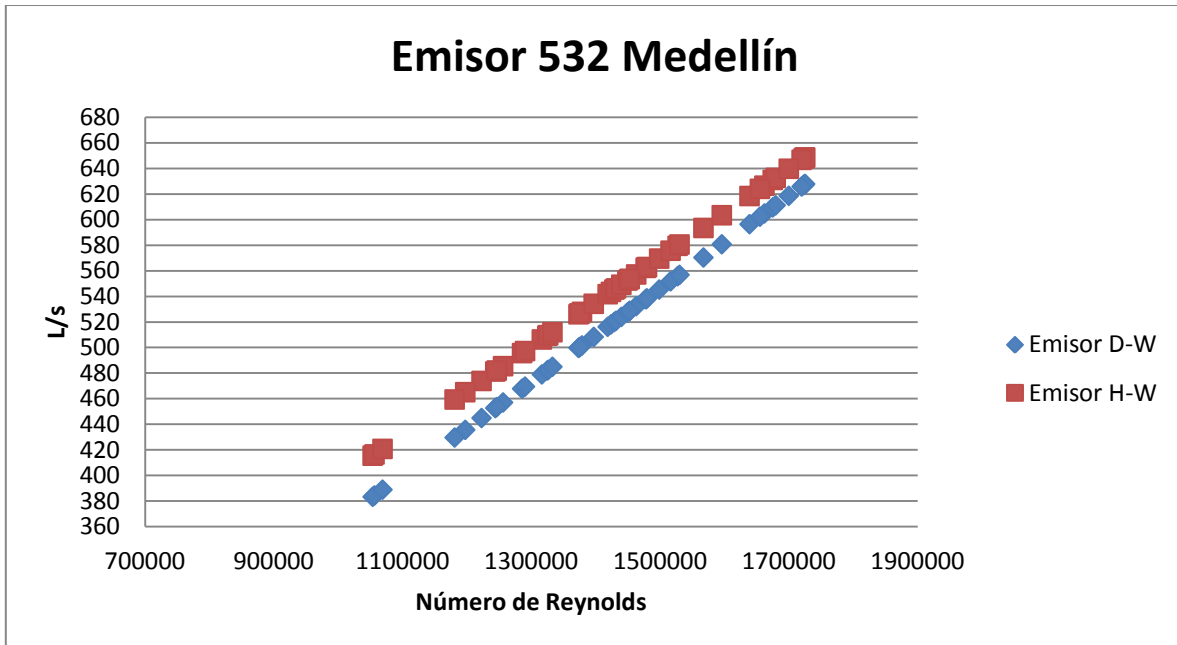


ILUSTRACIÓN 53 CAUDAL EMISOR VS NÚMERO DE REYNOLDS EMISOR 532.

Estas gráficas muestran un comportamiento hidráulicamente interesante; esto puede observar el comportamiento de la red cuando se analiza el número de Reynolds. Esto último se puede ver cuando el caudal emisor con un mismo número de Reynolds es diferente para las dos ecuaciones. Otro resultado importante es que las diferencias parecen ser menos significativas cuando el número de Reynolds es menor, según se aprecia en las ilustraciones 52, 53 y 54. Lo anterior parece soportar lo que se analizó anteriormente y es que utilizar la ecuación de Hazen-Williams para la operación de redes implica un riesgo importante, en especial si se utilizan coeficientes constantes para la ecuación, ya que lo que genera el emisor utilizando la ecuación de Hazen-Williams es mayor a lo que se presenta en la realidad; lo anterior tiene dos implicaciones importantes. La primera, en caso de que se esté simulando un tanque, este está presentando una tasa de llenado mayor a la que se presenta en la realidad. Segundo, en el caso en que se desee trabajar redes con emisores que representen las fugas de un sistema, se corre el grave riesgo de estar subestimando o sobrestimando los valores de las fugas, generando problemas como la instalación inadecuada de válvulas, o controles erróneos de los sistemas de bombeo.

A continuación se presentaran más resultados de emisores junto con las variaciones del coeficiente de Hazen-Williams:

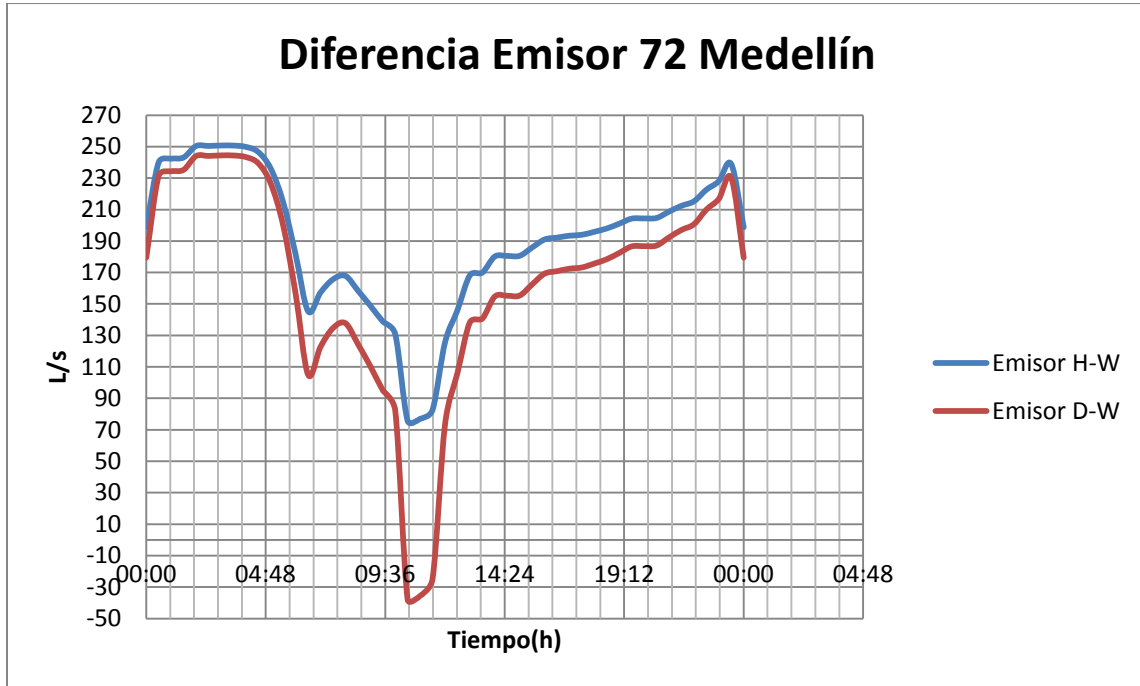


ILUSTRACIÓN 54 RESULTADOS EMISOR 72

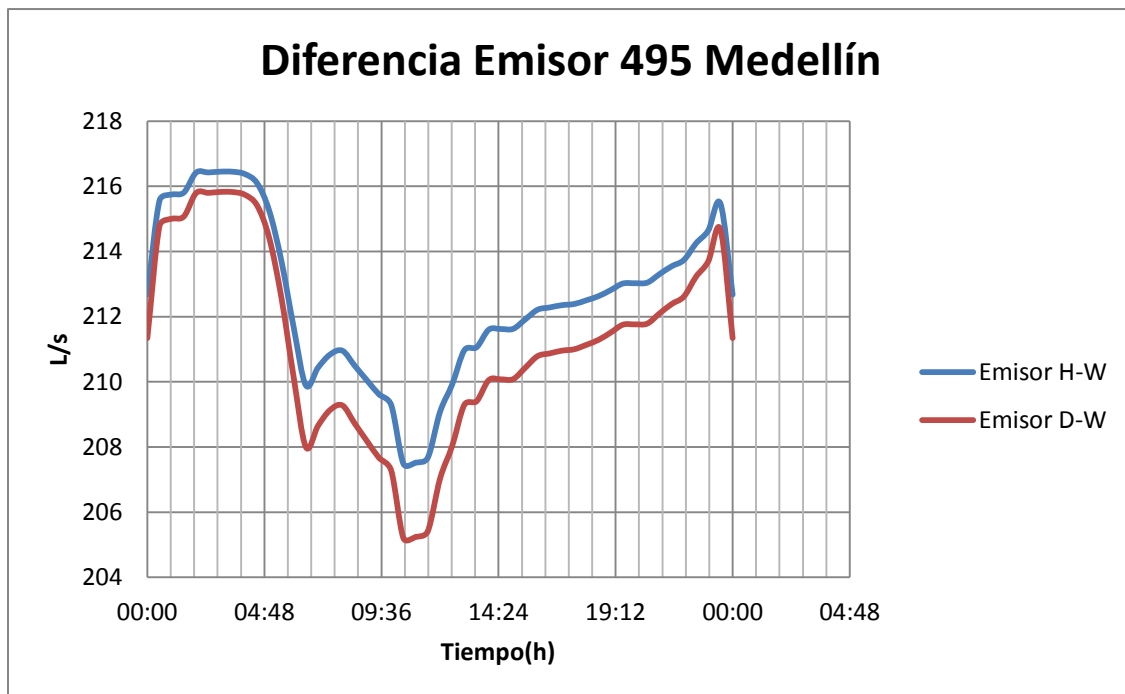


ILUSTRACIÓN 55 RESULTADOS EMISOR 495



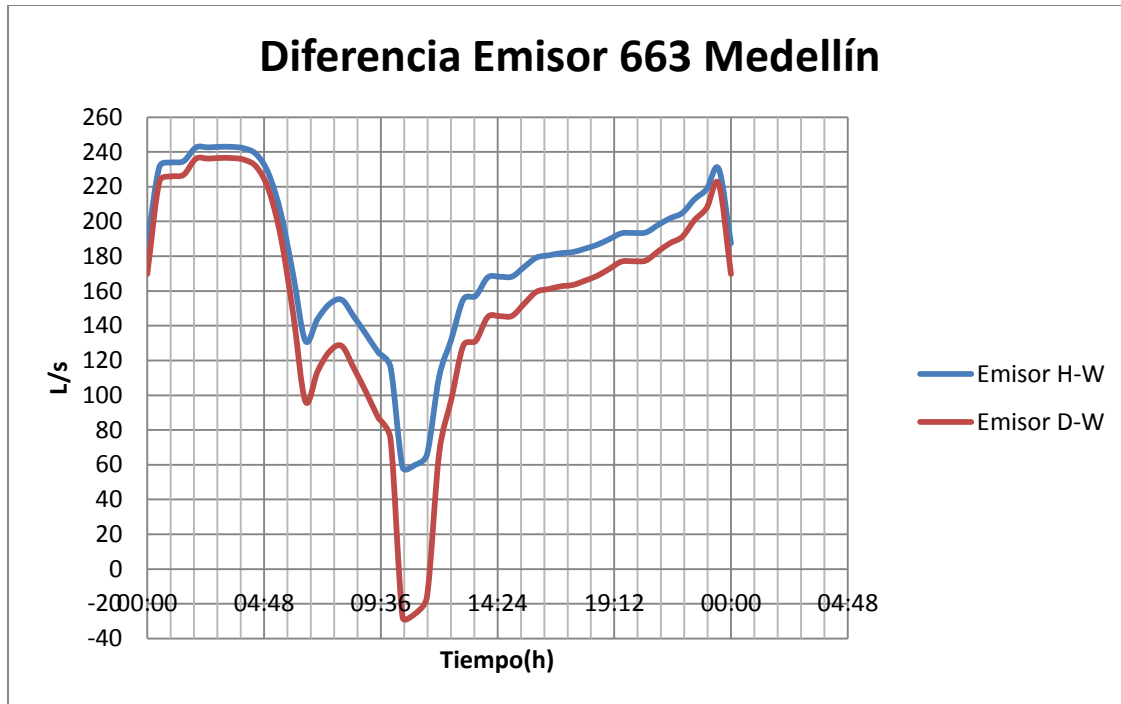


ILUSTRACIÓN 56 RESULTADOS EMISOR 663.

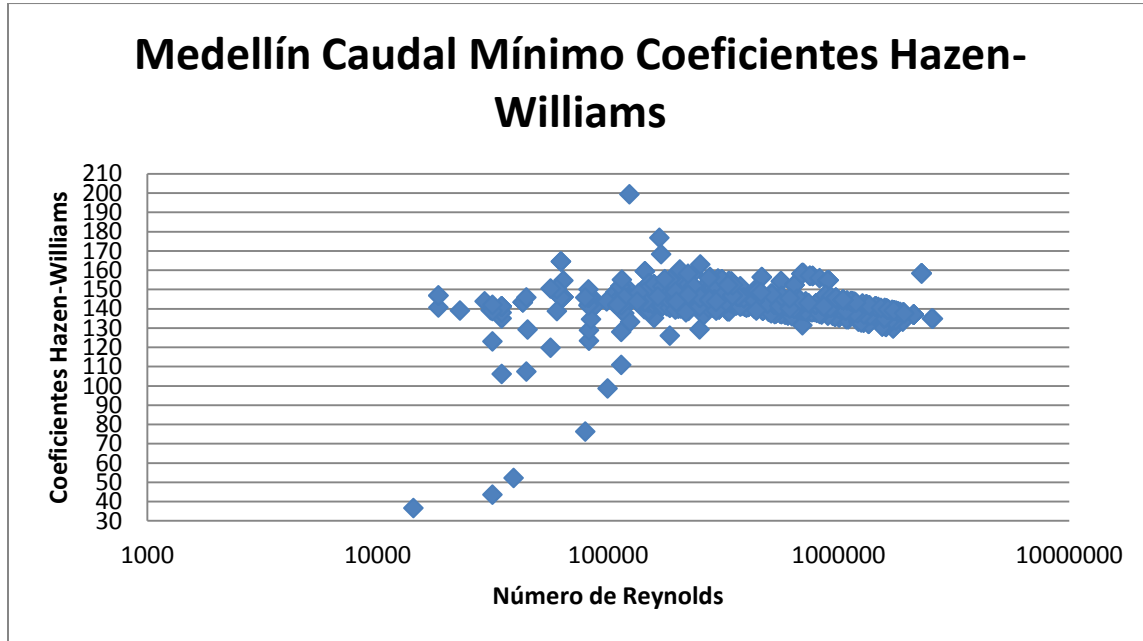


ILUSTRACIÓN 57 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS FRENTE AL NÚMERO DE REYNOLDS PARA EL CAUDAL MÍNIMO.

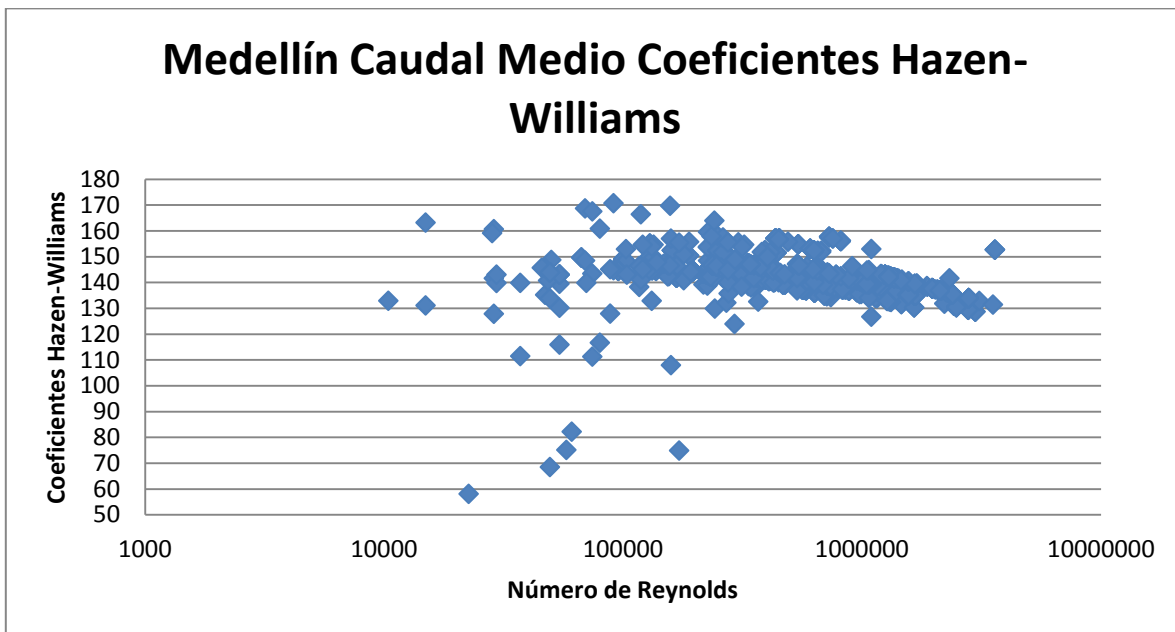


ILUSTRACIÓN 58 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS FRENTE AL NÚMERO DE REYNOLDS PARA EL CAUDAL MEDIO.

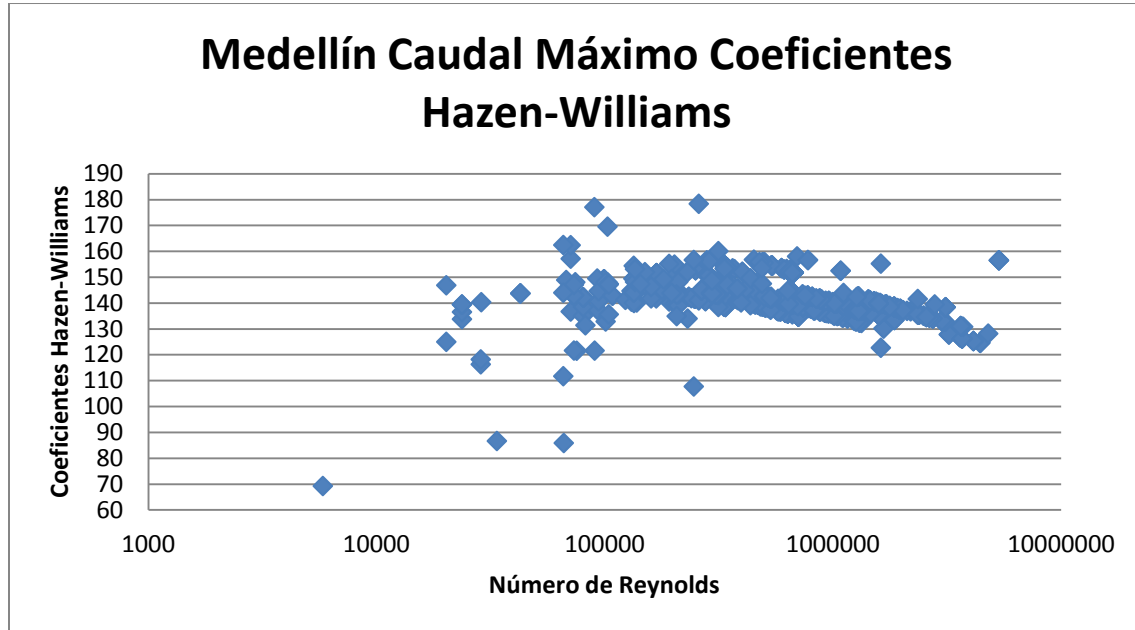


ILUSTRACIÓN 59 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS FRENTE AL NÚMERO DE REYNOLDS PARA EL CAUDAL MÁXIMO.

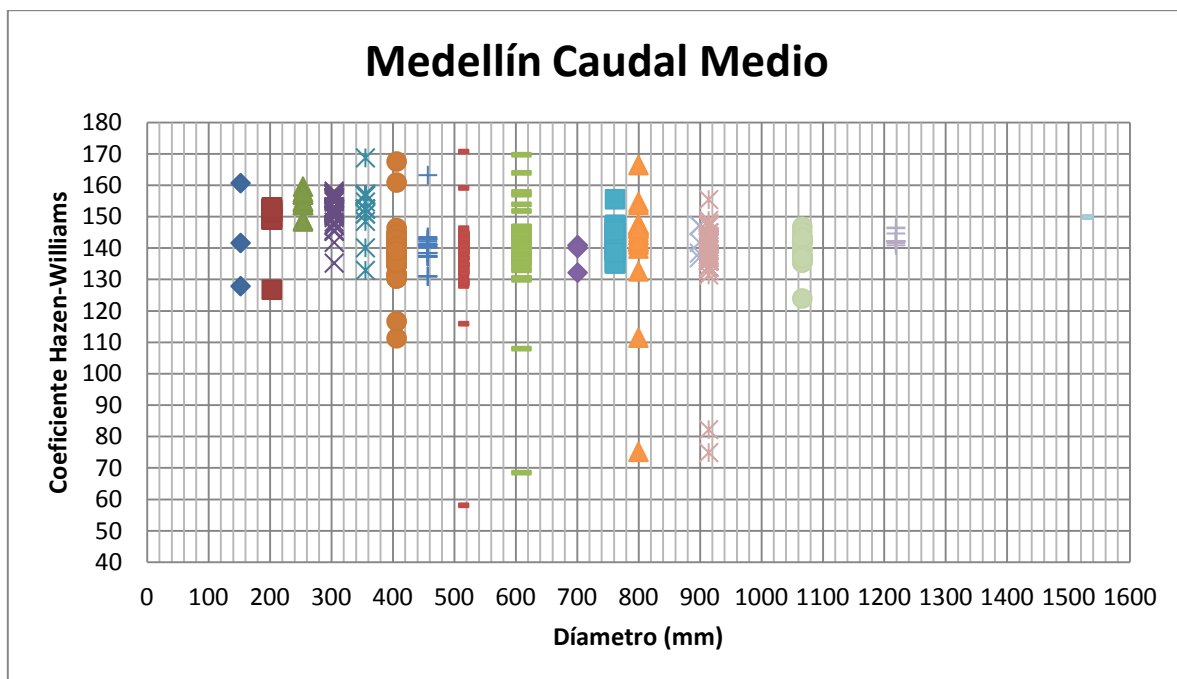


ILUSTRACIÓN 60 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS FRENTE A LOS DIÁMETROS DE LA RED PARA EL CAUDAL MEDIO.

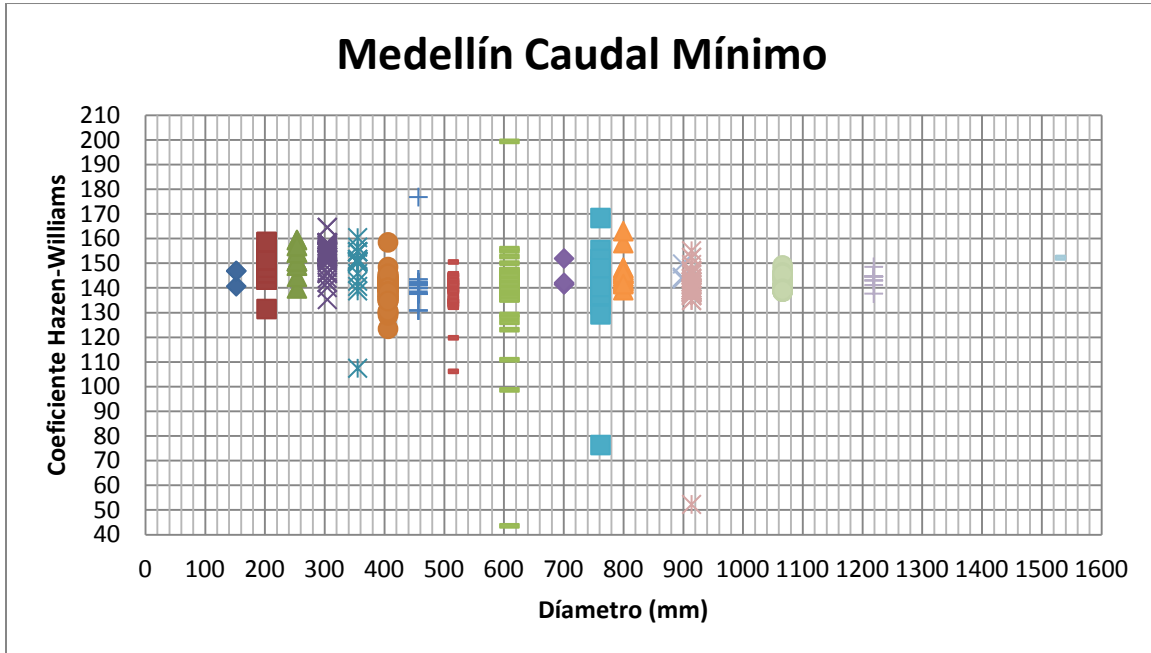


ILUSTRACIÓN 61 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS FRENTE A LOS DIÁMETROS DE LA RED PARA EL CAUDAL MÍNIMO.

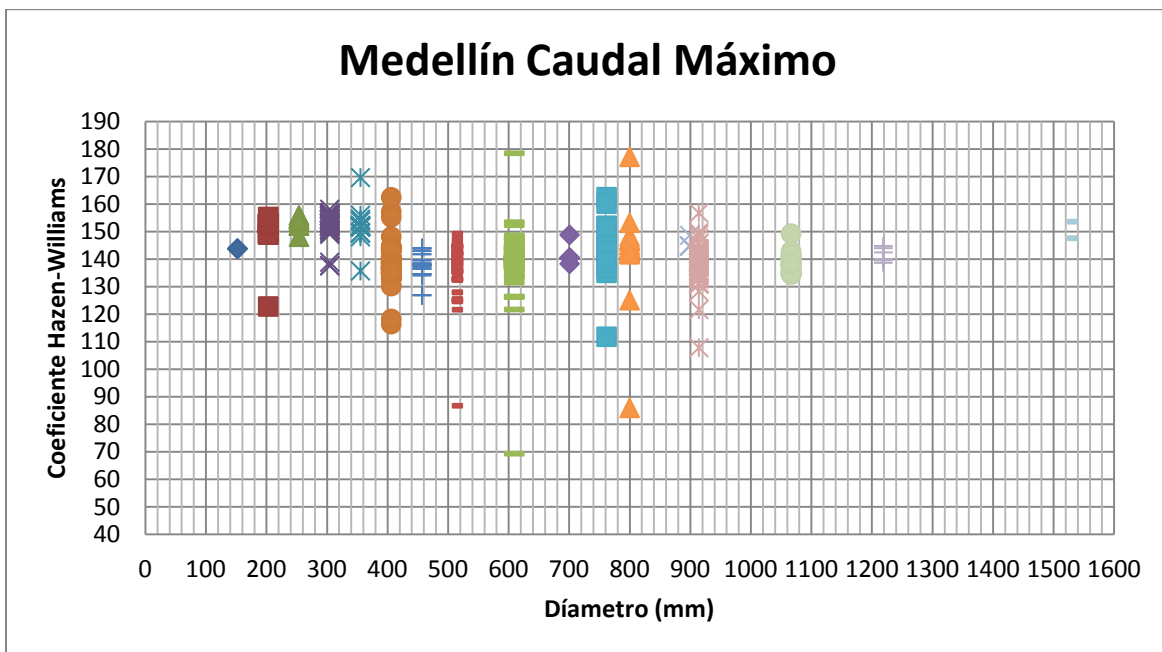


ILUSTRACIÓN 62 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS FRENTE A LOS DIÁMETROS DE LA RED PARA EL CAUDAL MÁXIMO.



Las ilustraciones anteriores muestran resultados relevantes debido a que las diferencias en los emisores son aun más importantes. Conviene señalar que algunos resultados arrojan caudales con valores negativos, lo cual teóricamente no tiene mucho sentido, pero evidencia en la práctica la condición de algunos emisores localizados en sitios críticos de la red, que se ven sometidos en ciertos momentos del día a presentar presiones negativas, que coinciden con los períodos donde el caudal es máximo.

Lo interesante de esto último es que existen casos en los cuales mientras la ecuación de Darcy-Weisbach arroja caudales negativos (en la realidad el caudal emisor sería 0 o si es un tanque empezaría a vaciarse) causado por que el nudo emisor tiene altas demandas y presenta presiones negativas; en contraparte el emisor que utiliza la ecuación de Hazen-Williams sigue arrojando valores positivos. Esto puede ser un problema de gran magnitud para una empresa que desee controlar de forma eficiente la distribución de agua en una ciudad, ya que estos resultados le dan un falso sentido de seguridad al operario. En este caso, el operario observará con la ecuación de Hazen-Williams que el tanque se está llenando con un caudal relativamente bajo pero se está llenando, mientras que la realidad es que el tanque está presentando una salida importante de caudal y está disminuyendo su nivel de agua, así mismo si se esta analizando el problema desde un punto de vista de fugas, el operario estará viendo que con la ecuación de Hazen-Williams se está presentando un alto índice de fugas que realmente no existen o no se encuentran en la magnitud que observa. Las consecuencias de estos dos problemas pueden llegar a tener implicaciones catastróficas; disminuyendo las presiones de un sector o lo que es aún peor, dejando sin abastecimiento a un sector de la ciudad. Puede ser de tal magnitud la diferencia presentada, que en el caso de esta investigación se encontraron diferencias entre los caudales de los emisores de hasta 120 L/s.

Pasando a las gráficas de variación de los coeficientes de Hazen-Williams, se ve que la red se está comportando hidráulicamente entre valores de 130 y 140. Si bien la red está trabajando con un coeficiente de 140 para tuberías mayores a 14 pulgadas (350 mm), no hay que obviar el hecho de que la red también tiene un conjunto importante de tuberías que trabajan con un coeficiente de 150, lo que lleva a pensar que la red se está comportando con mayores pérdidas por fricción que las simuladas con la ecuación de Hazen-Williams; adicionalmente si se ve la variación del coeficiente de Hazen-Williams para diámetros mayores a 14 pulgadas se ve que hay tuberías donde se llega a comportar con valores de hasta 80. Por otro lado, las tuberías de diámetros menores parecen comportarse de manera adecuada para los 3 momentos claves del estudio.

Cabe resaltar de estos resultados que para los horarios en que se presentan los caudales medios y caudales mínimos, las diferencias de los emisores no parecen ser tan grandes, mientras que a medida que se acerca la hora de máximo consumo de la red, las diferencias de los emisores parecen volverse mayores, en especial si el emisor se encuentra localizado en un punto crítico de la red como se puede observar en las gráficas de los diferentes emisores.

A continuación presentaremos finalmente las presiones encontradas en los tres horarios claves de la red matriz de Medellín:

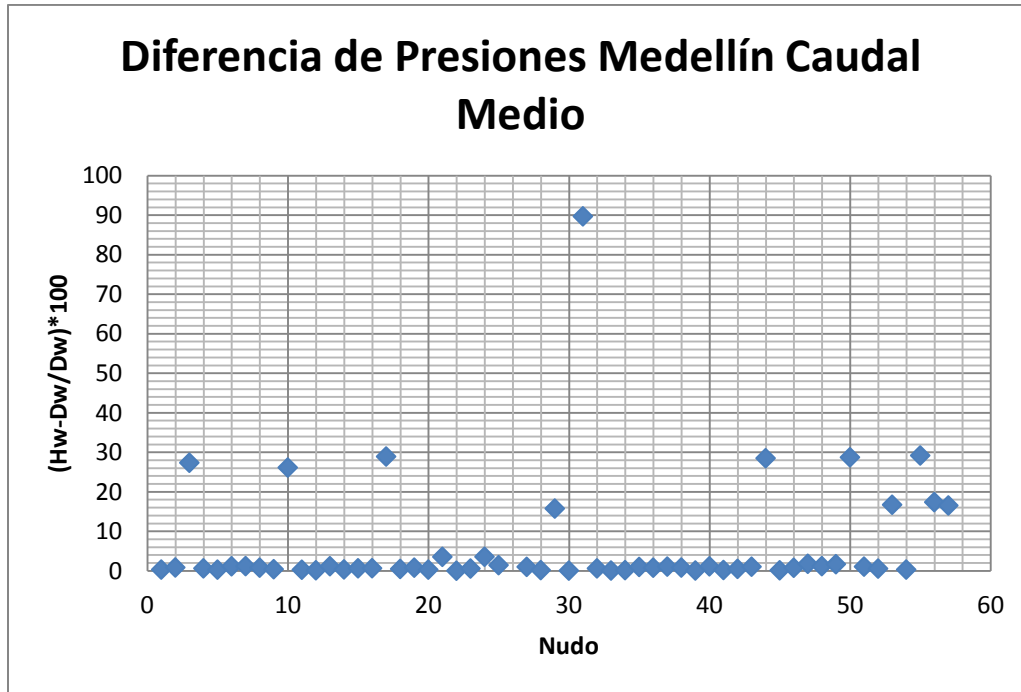


ILUSTRACIÓN 63 DIFERENCIA DE PRESIONES CON CAUDALES MEDIOS.

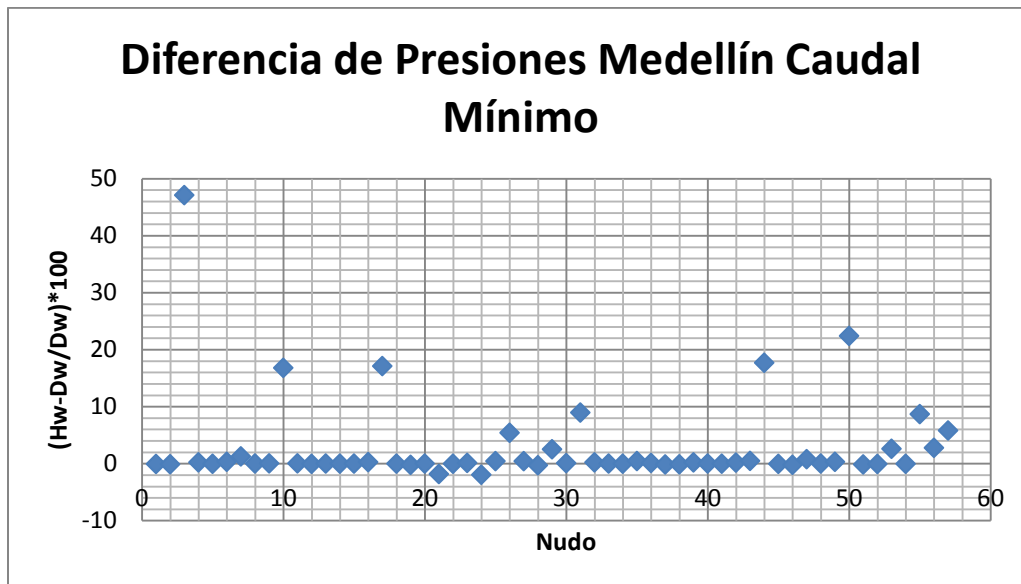


ILUSTRACIÓN 64 DIFERENCIA DE PRESIONES CON CAUDALES MÍNIMOS.

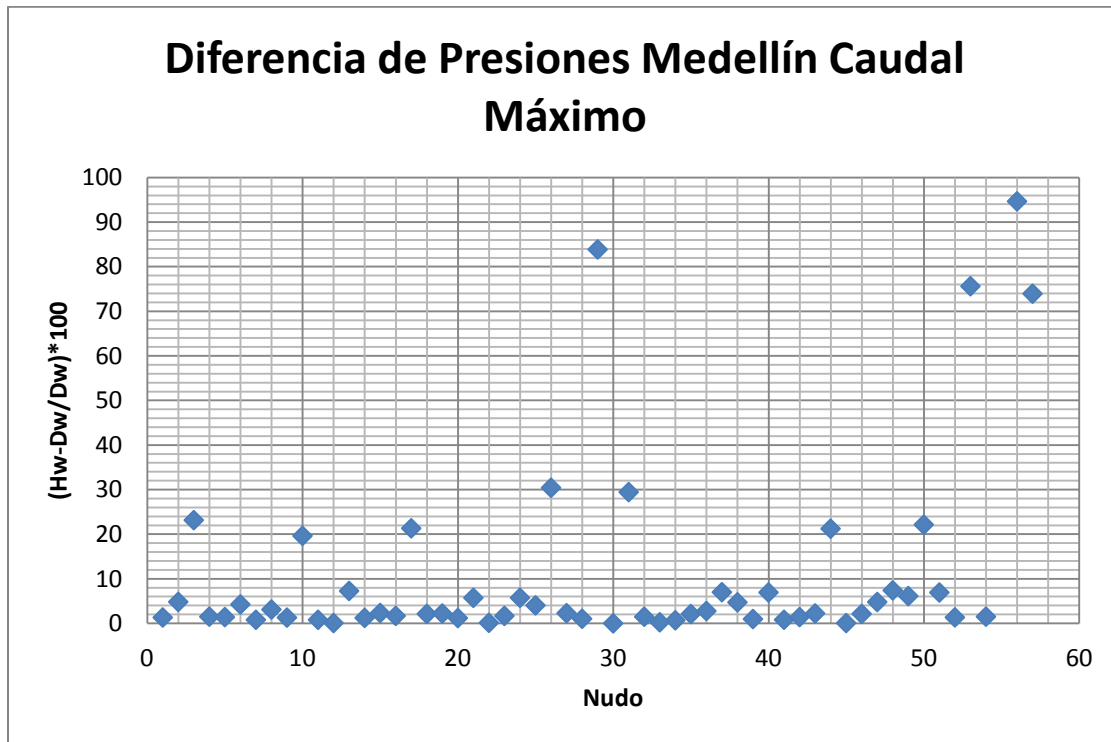


ILUSTRACIÓN 65 DIFERENCIA DE PRESIONES CON CAUDALES MÁXIMOS.

Los resultados son consistentes con lo encontrado en el análisis de los emisores y en la variación de coeficiente de Hazen-Williams. Si bien existen diferencias en las presiones cuando se tiene el caudal mínimo y el caudal medio, los valores más amplios y de por sí más relevantes se pueden observar cuando se tiene la hora de máximo consumo. Las diferencias observables en algunos casos alcanzan diferencias superiores al 90%, esto se debe a que en algunos escenarios las presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach son inferiores a uno, o muy cercanas a cero elevando considerablemente el error relativo. Este es un error común cuando se realizan análisis con valores de presión tan bajos. Sin embargo, lo más importante de estos resultados es que queda una vez más demostrado que la ecuación de Hazen-Williams es una ecuación que puede presentar grandes divergencias con respecto a los resultados de la ecuación de Darcy-Weisbach que es físicamente basada y considera todos los parámetros físicos relevantes para el cálculo de las pérdidas por fricción. Lo anterior también implica que en la red operada con la ecuación de Hazen-Williams está sobrestimando y/o subestimando la pérdidas por fricción que se presentan en la red. En la próxima sección se va a mostrar con más claridad que parte de estos efectos es causado por un desbalance de masa en la red a causa de tanques o emisores y a que la solución hidráulica entre las dos ecuaciones es diferente (caudal que pasa por cada una de las tuberías de la red).

### 4.3.3 RED GINEBRA

Al igual que en el caso de la red matriz de Bogotá, la red Ginebra se analizó con emisores pequeños y grandes. Cabe resaltar que el comportamiento de esta red fue excepcional debido a que el comportamiento de esta al utilizar la ecuación de Hazen-Williams fue prácticamente igual al comportamiento hidráulico utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach en algunos de los escenarios; sin obviar el hecho de que más adelante se muestran los resultados con tanques y de que algunos emisores si presentaron diferencias significativas. Los resultados de los emisores pequeños se muestran a continuación.

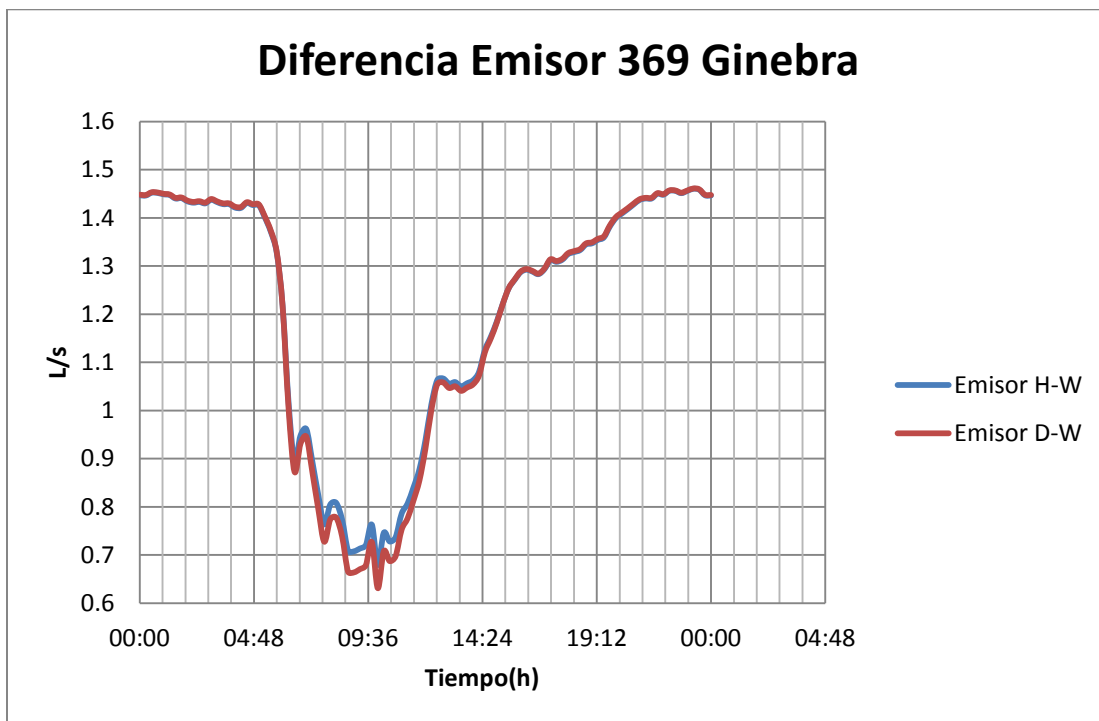


ILUSTRACIÓN 66 RESULTADOS EMISOR 369.



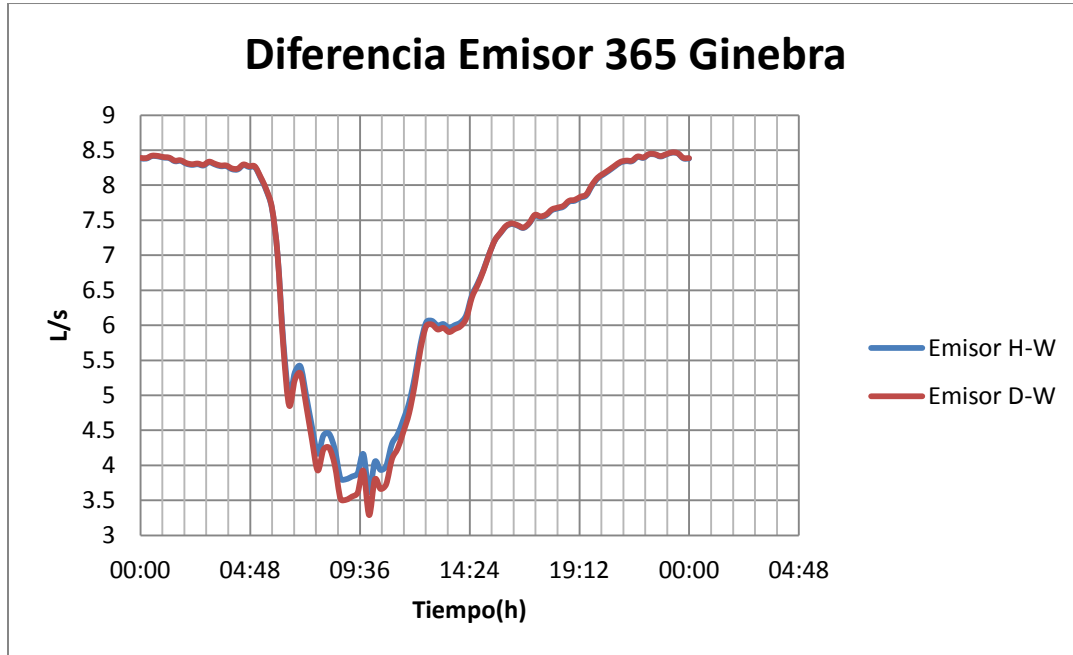


ILUSTRACIÓN 67 RESULTADOS EMISOR 365.

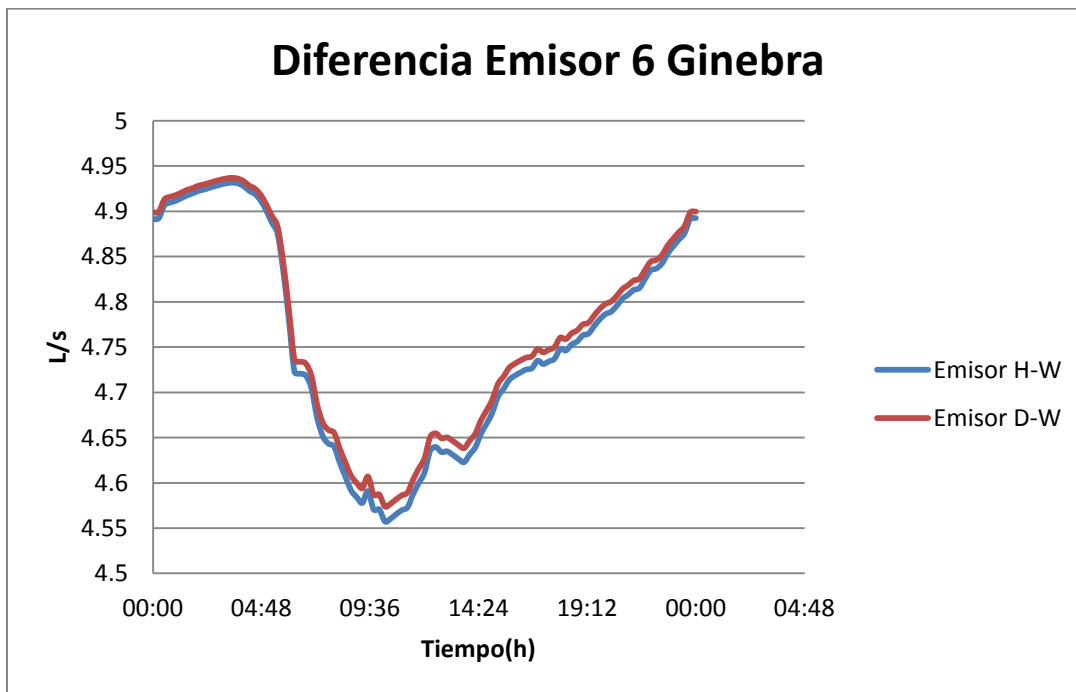


ILUSTRACIÓN 68 RESULTADOS EMISOR 6.

	Emisor 369	Emisor 365	Emisor 6
Presión(m)	20	20	20
Caudal Base(L/s)	0.7704	4.522	2.4049
Coefficiente Emisor	0.1722	1.011	0.5377

ILUSTRACIÓN 69 CARACTERÍSTICAS DE LOS EMISORES PEQUEÑOS.

Al igual que en el caso de la red matriz de Bogotá, es posible ver en las gráficas anteriores que la diferencia entre la red simulada con la ecuación empírica y la ecuación físicamente basada es muy poca. Más adelante se mostrarán los resultados con emisores más grandes; si bien los resultados fueron muy similares y no presentaron grandes diferencias, si se empezó a ver que el caudal emisor iba en aumento y existían puntos con diferencias importantes.

Prosiguiendo con los emisores, a continuación se muestran los emisores con coeficientes de emisión mayores:

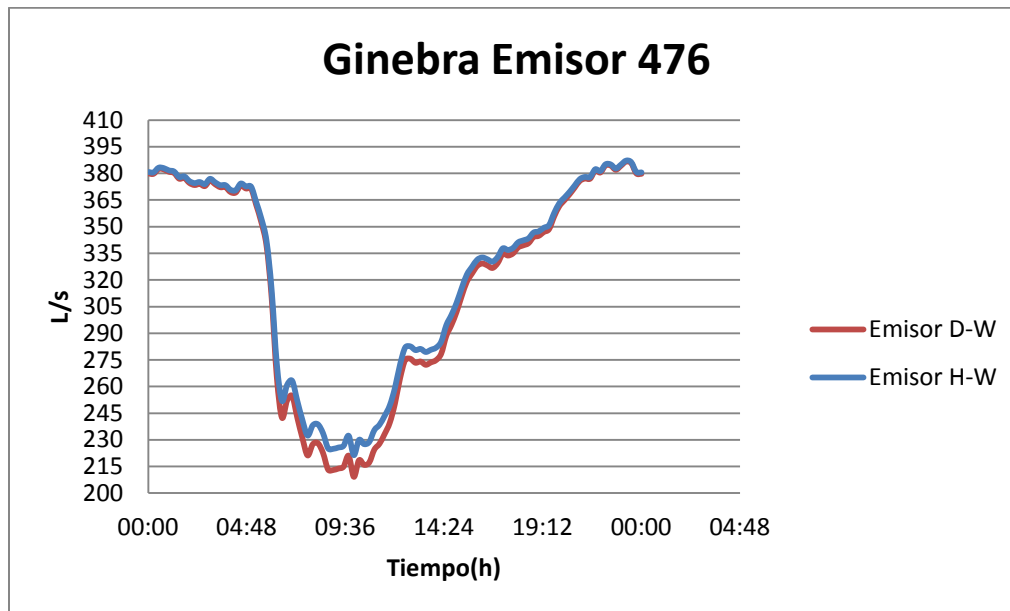


ILUSTRACIÓN 70 RESULTADOS EMISOR 476.

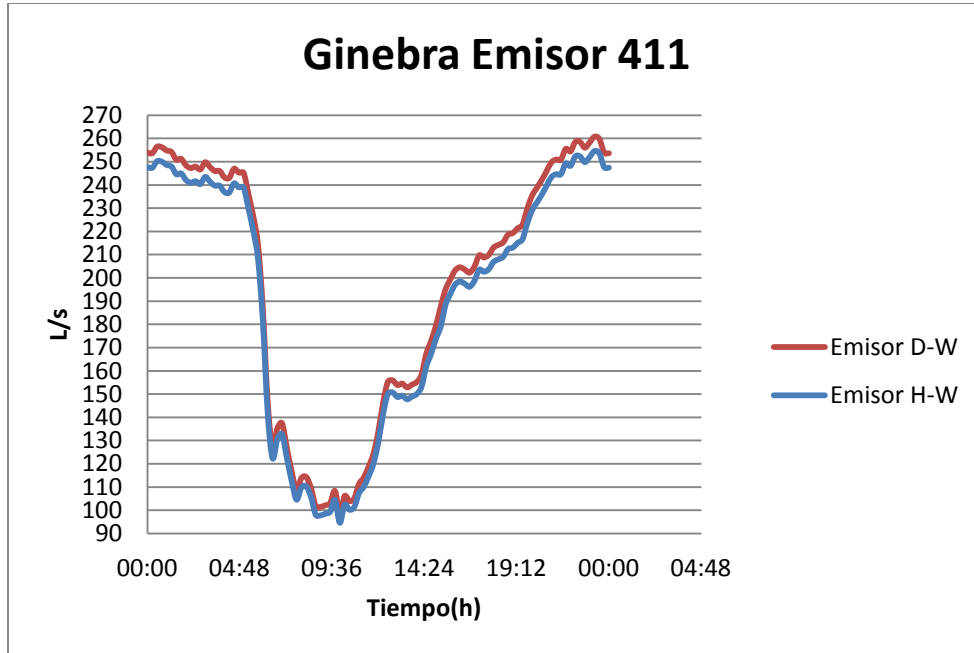


ILUSTRACIÓN 71 RESULTADOS EMISOR 411.

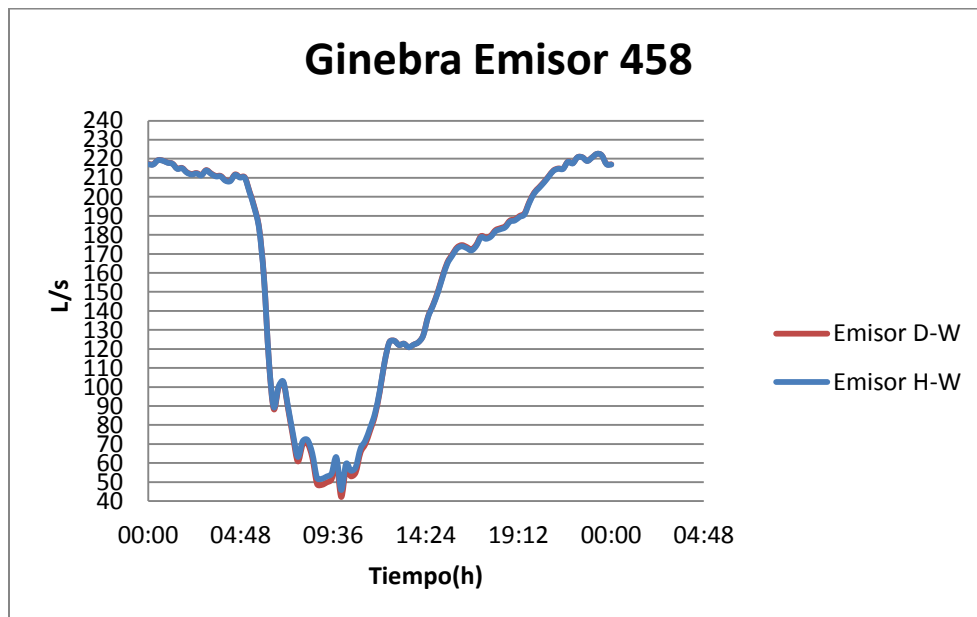


ILUSTRACIÓN 72 RESULTADOS EMISOR 458.

	Emisor 458	Emisor 411	Emisor 476
Coefficiente Emisor	12.74	14.53	11.18

TABLA 8 COEFICIENTES DE EMISORES GRANDES.

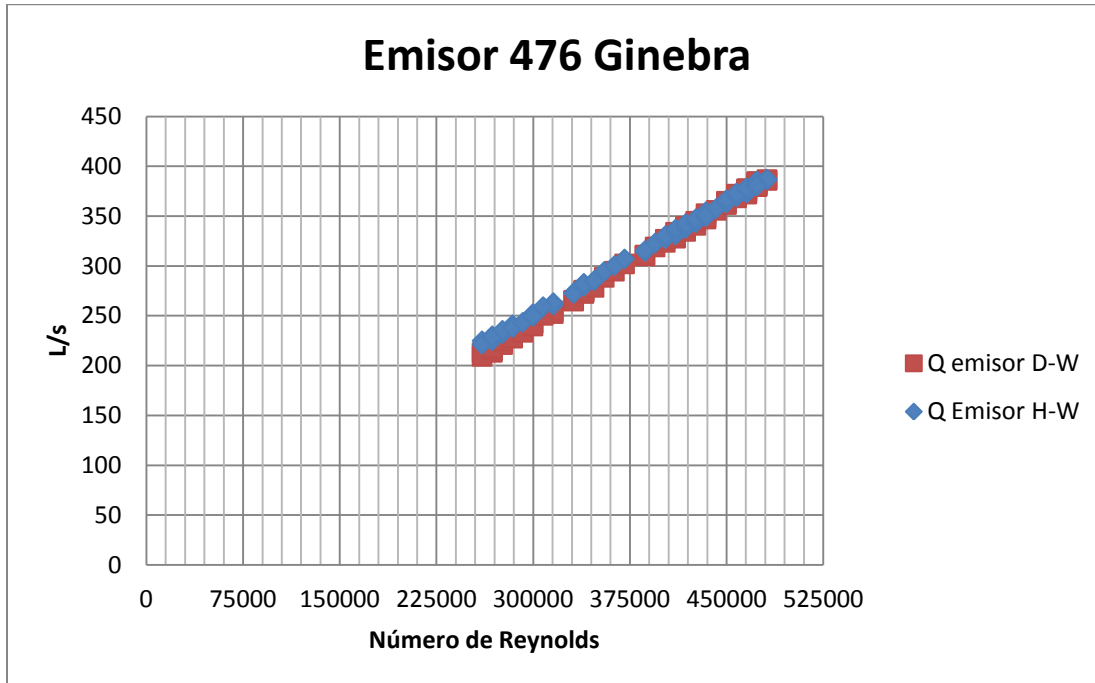


ILUSTRACIÓN 73 CAUDAL EMISOR VS NÚMERO DE REYNOLDS EMISOR 476.

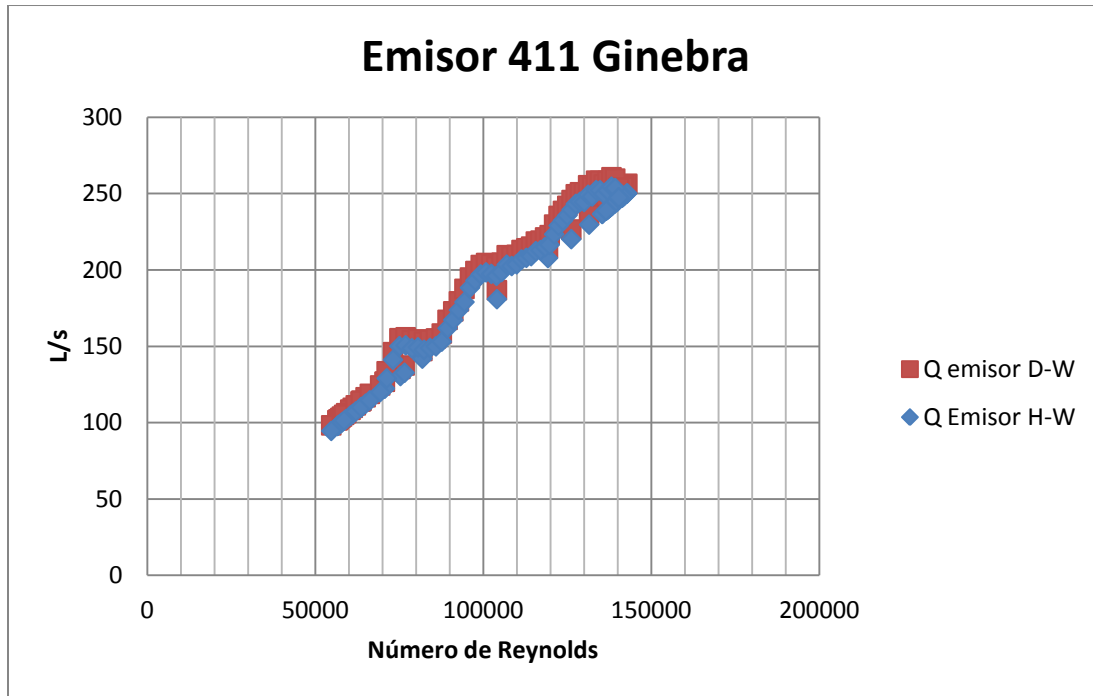


ILUSTRACIÓN 74 CAUDAL EMISOR VS NÚMERO DE REYNOLDS EMISOR 411.

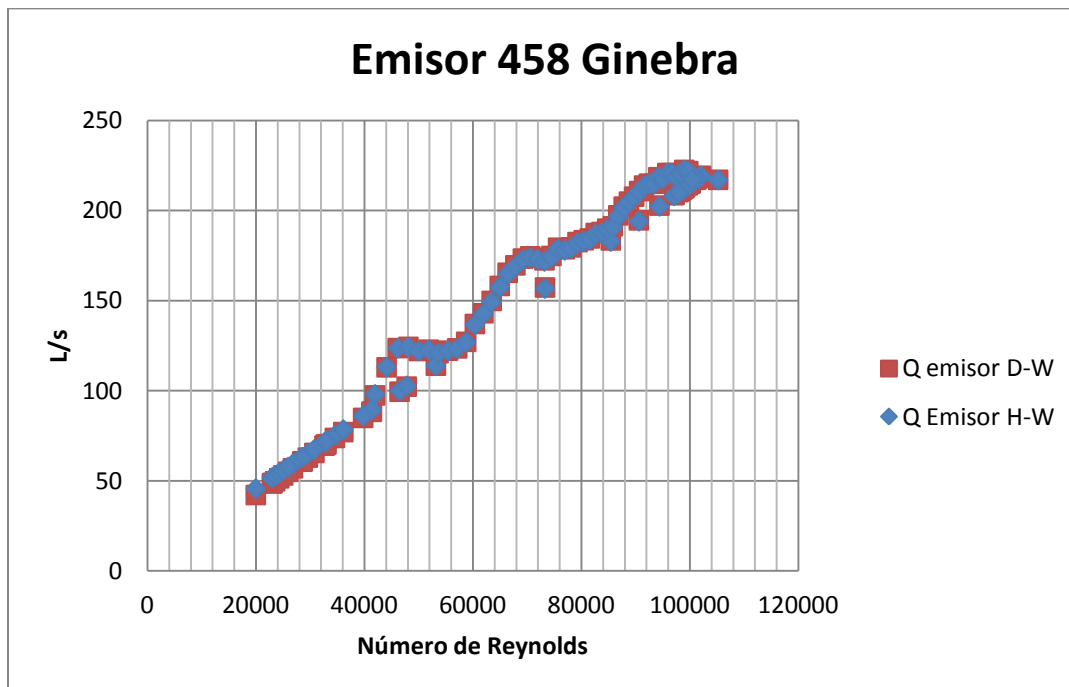


ILUSTRACIÓN 75 CAUDAL EMISOR VS NÚMERO DE REYNOLDS EMISOR 458.

Los resultados con emisores grandes dieron tendencias similares a las encontradas con los emisores pequeños; es decir la diferencia de los caudales de los emisores no fue muy diferente. Este efecto es interesante teniendo en cuenta que no se usaron los mismos emisores en cada una de las pruebas y dentro del análisis; algunos de estos emisores estaban localizados en puntos críticos de la red (donde se presentaban las presiones más pequeñas). Por otro lado, si se ven las gráficas de caudal emisor vs número de Reynolds, se confirma una vez más lo que se logra observar en las gráficas de los 2 emisores, y es que el comportamiento entre las dos ecuaciones es casi idéntico, con diferencias mínimas, no superiores a 2 L/s.

La investigación avanzó en la obtención de información corriendo las ecuaciones mediante el uso de emisores grandes. Los resultados se muestran a continuación:

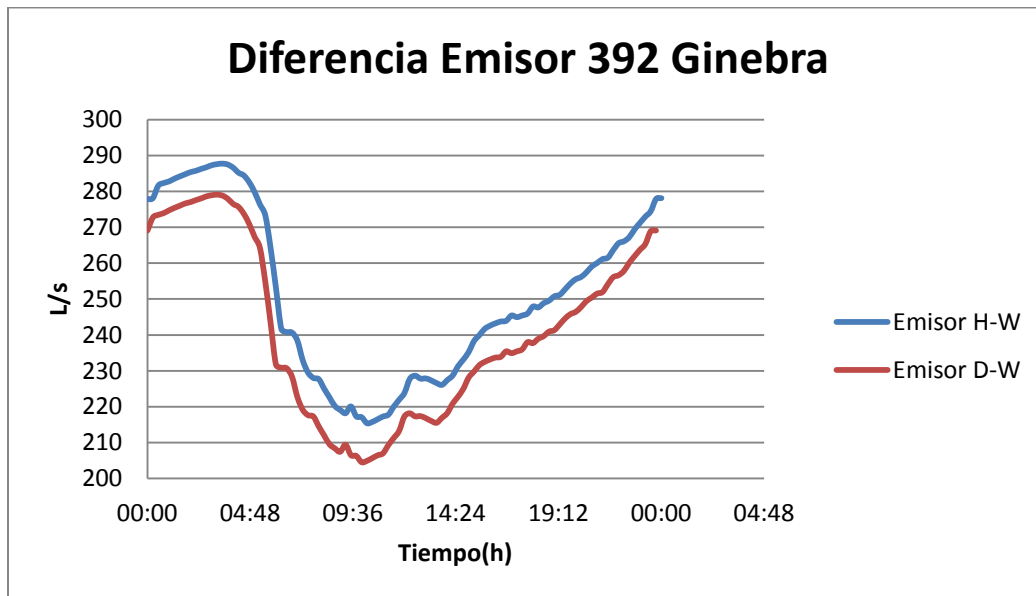


ILUSTRACIÓN 76 RESULTADOS EMISOR 392.

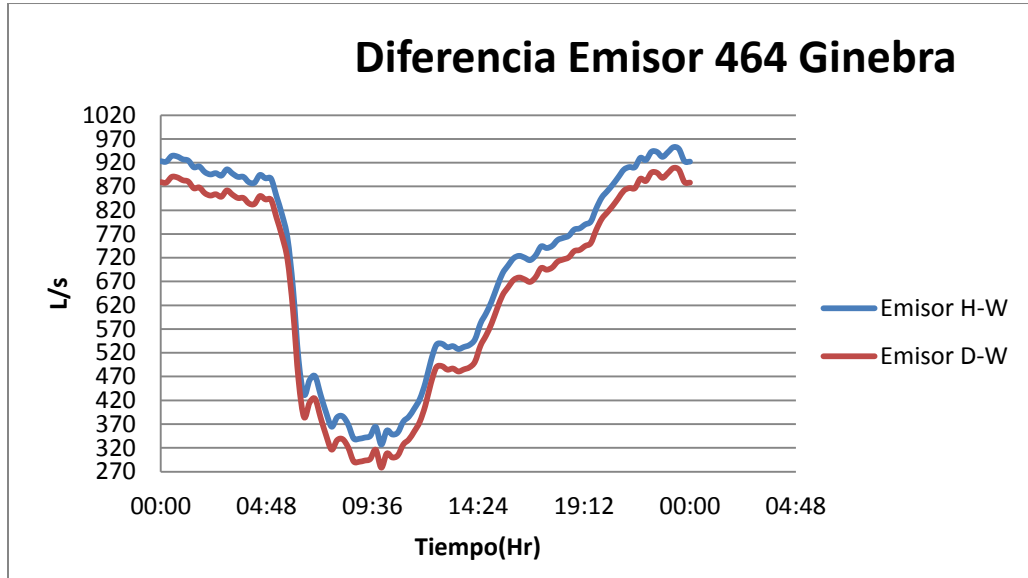


ILUSTRACIÓN 77 RESULTADOS EMISOR 464

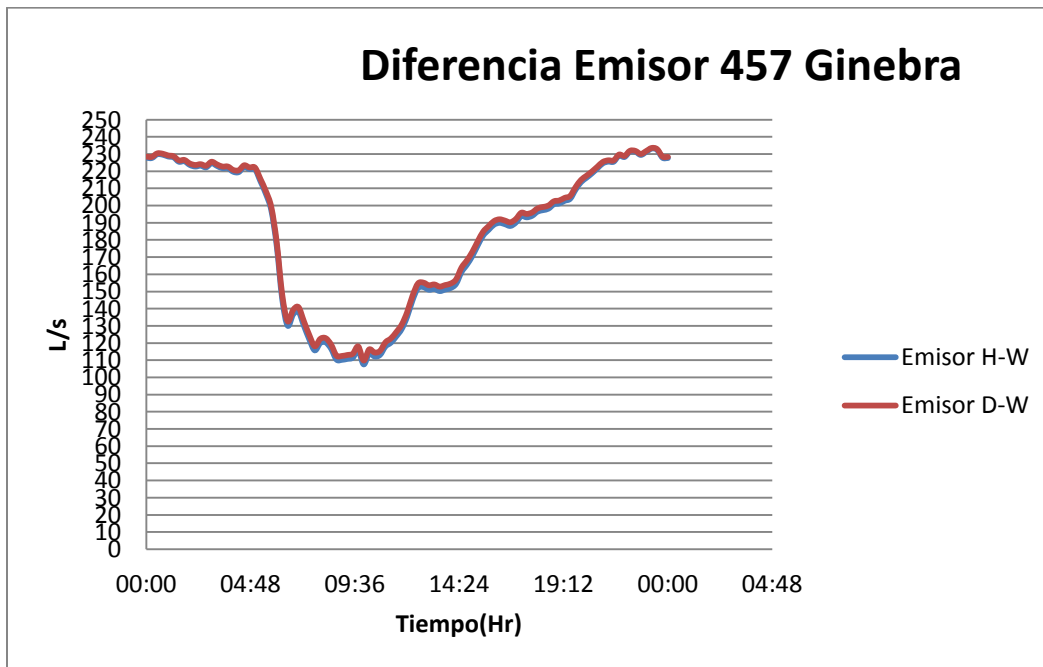


ILUSTRACIÓN 78 RESULTADOS EMISOR 457.

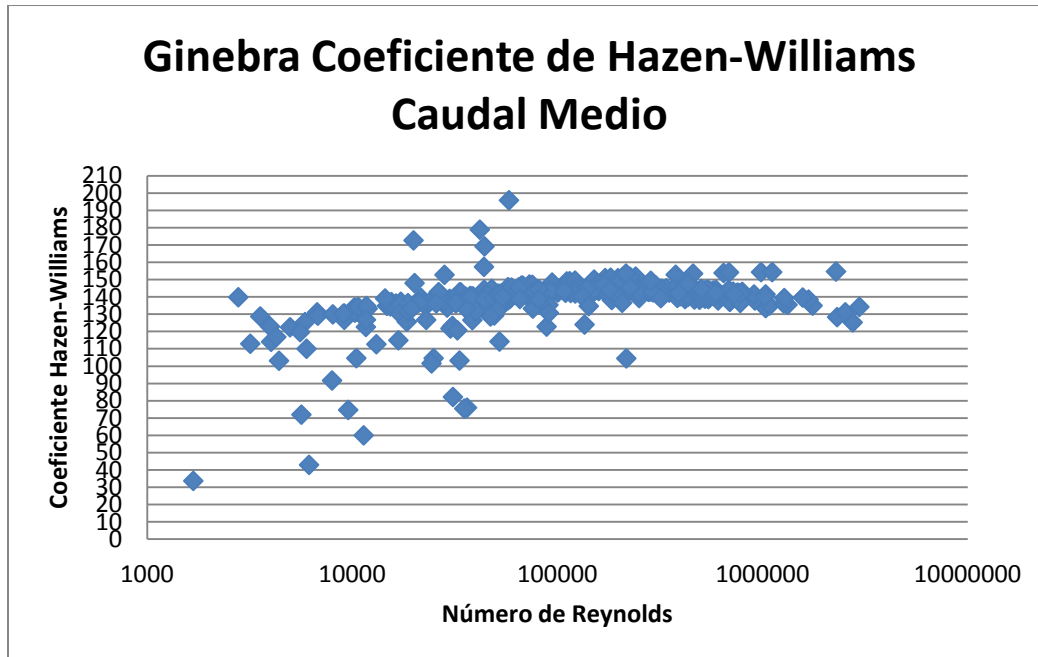


ILUSTRACIÓN 79 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS VS EL NÚMERO DE REYNOLDS PARA EL CAUDAL MEDIO.



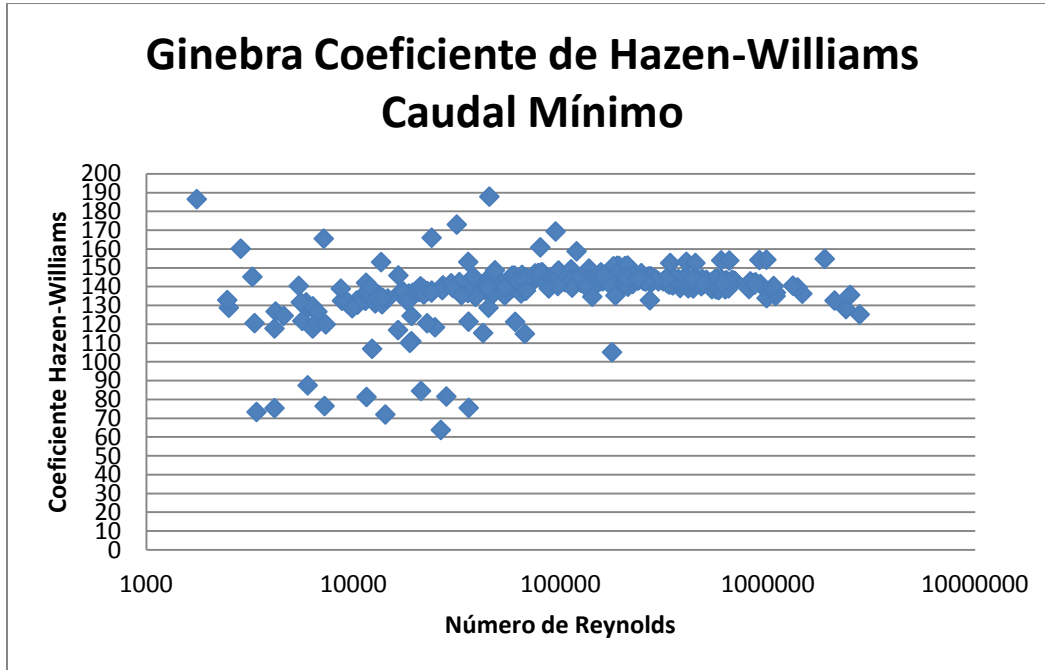


ILUSTRACIÓN 80 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS VS EL NÚMERO DE REYNOLDS PARA EL CAUDAL MÍNIMO.

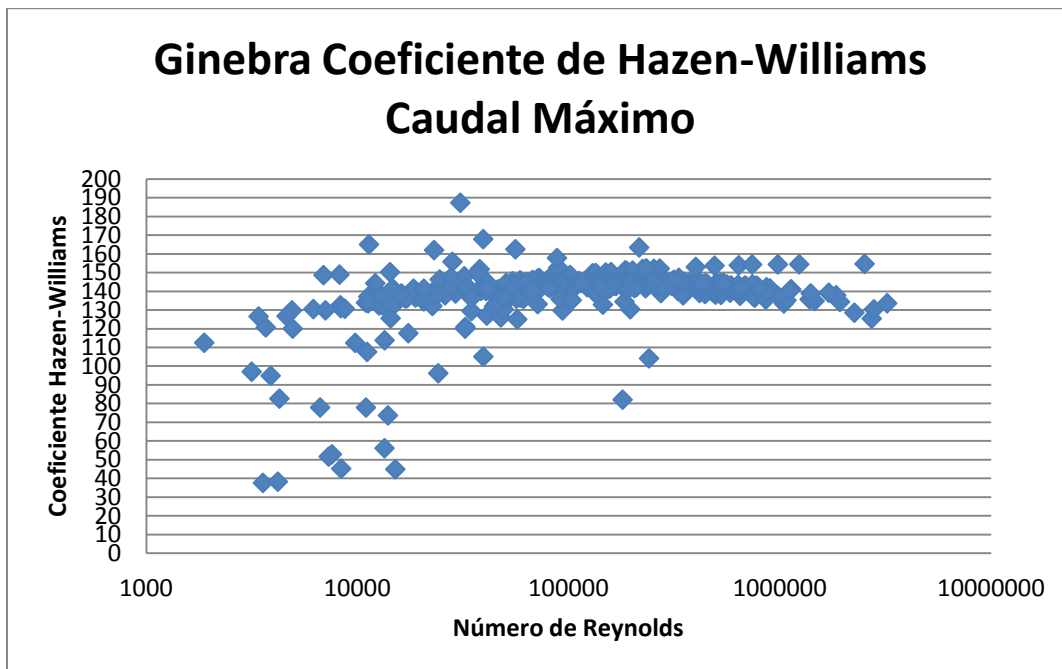


ILUSTRACIÓN 81 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS VS EL NÚMERO DE REYNOLDS PARA EL CAUDAL MÁXIMO.

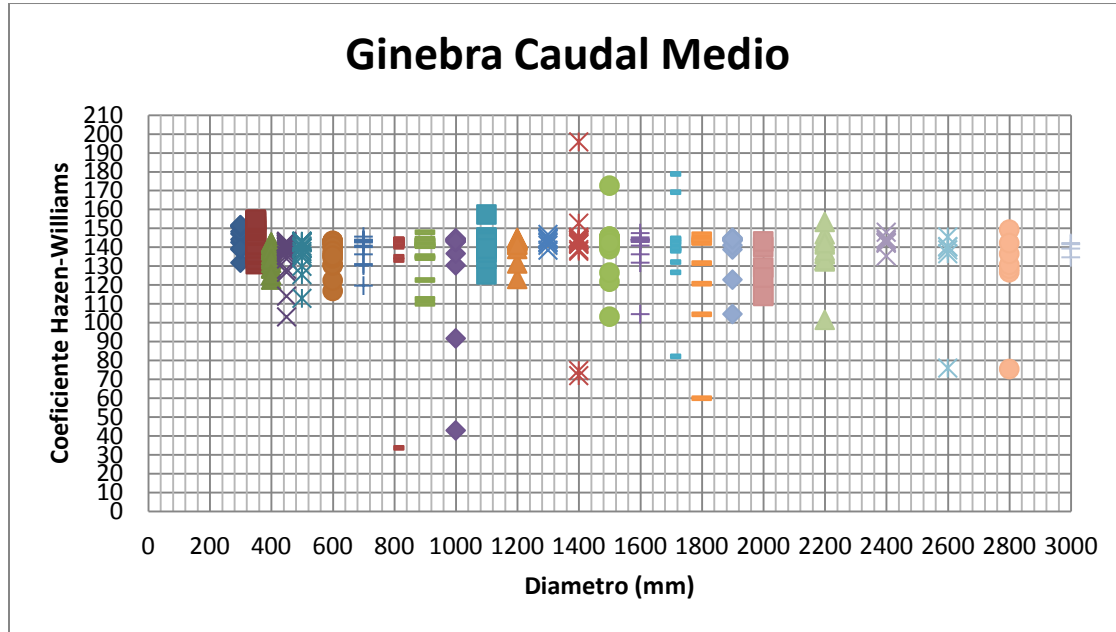


ILUSTRACIÓN 82 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS VS LOS DIÁMETROS DE LA RED PARA EL CAUDAL MEDIO.

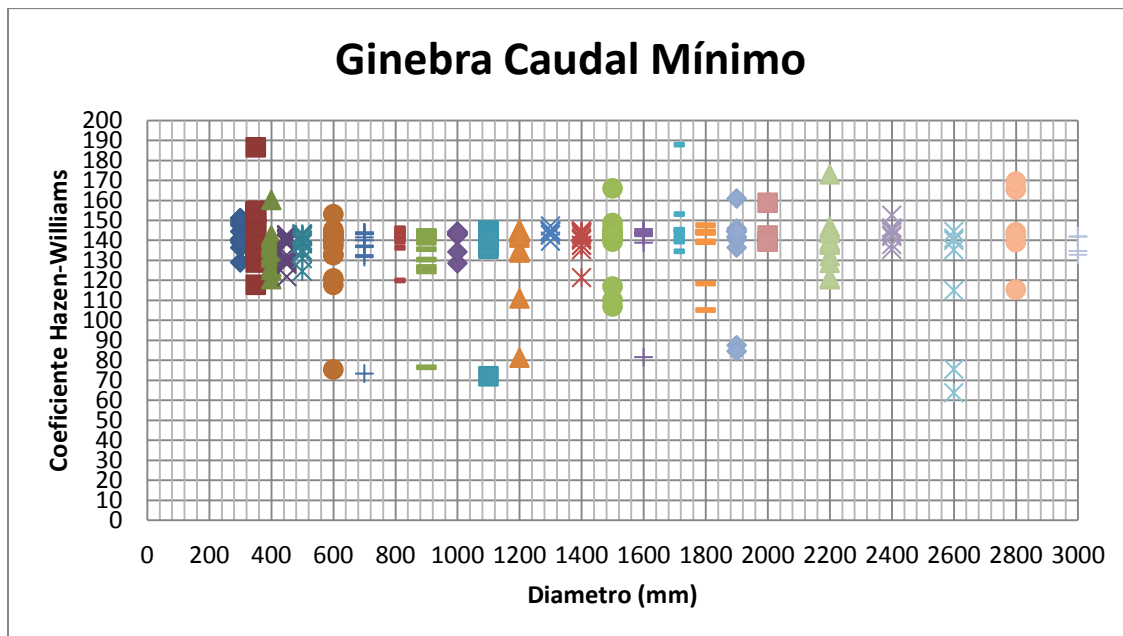


ILUSTRACIÓN 83 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS VS LOS DIÁMETROS DE LA RED PARA EL CAUDAL MÍNIMO.

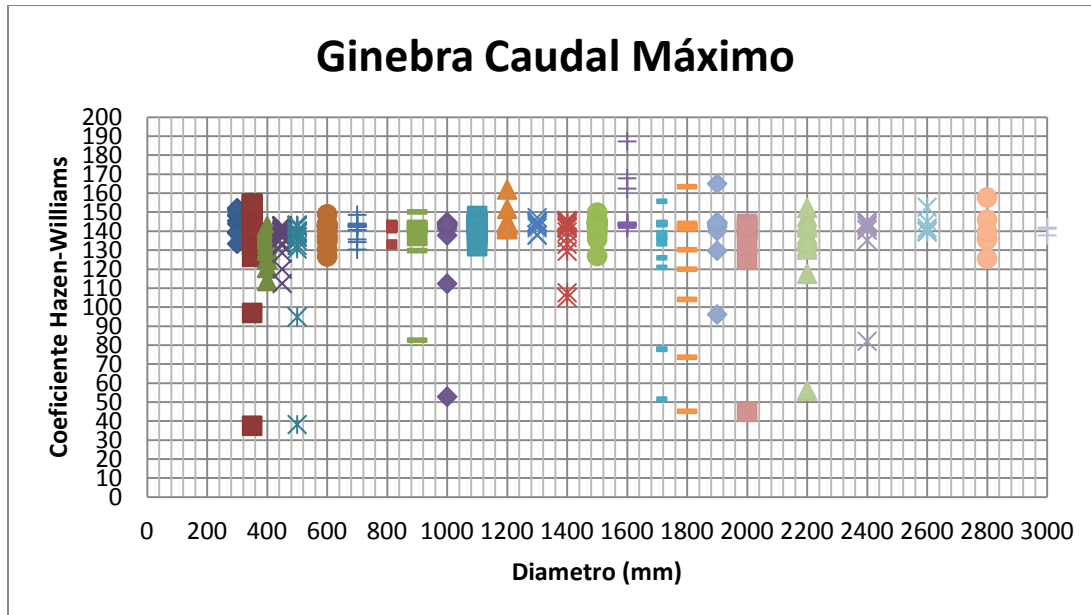


ILUSTRACIÓN 84 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS VS LOS DIÁMETROS DE LA RED PARA EL CAUDAL MÁXIMO.

Estos últimos resultados muestran una tendencia interesante; el hecho de que se presenten diferencias entre los emisores utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach y la ecuación de Hazen-Williams, demuestra lo analizado en la red de Medellín, y es que el hecho de que en algunos emisores la ecuación de Hazen-Williams cumpla o se comporte similar que el emisor con la ecuación físicamente basada, no implica que el comportamiento de toda la red sea igual a lo largo de los nudos. Si bien las diferencias con respecto a los caudales emitidos parecen relativamente pequeñas, 10 L/s entre un máximo de 300 L/s demandados, existen otros casos en que llega a ser de hasta 80 L/s; estas diferencias siguen representando una cantidad importante de agua, y demuestra una vez más que existen diferencias importantes entre la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach. Por otro lado, cabe resaltar que estas diferencias repiten la tendencia vista en la red matriz de Medellín, en el sentido que tienden a presentarse presiones negativas cuando llegan las horas de máximos caudales demandados (ver 4.2 Patrones de las Redes Trabajadas); esto puede ser una complicación importante, especialmente cuando se considera que en estos momentos algunos puntos de la red pueden llegar a presentar escasos de agua o presiones inferiores a la exigida por la normativa ("RAS Título B: Sistemas de Acueducto," 2012). Considerando lo anterior, es importante mencionar que esta fue la red que menores diferencias presentó entre las dos ecuaciones. Si se observan los emisores con respecto a las otras redes, se puede evidenciar que las diferencias fueron mínimas y se presentaron exclusivamente en un par de emisores. Lo anterior es consistente con lo que se puede observar en las gráficas de variación del coeficiente de Hazen-Williams vs el número de Reynolds. En estas gráficas se puede ver que la gran mayoría de los coeficientes de Hazen-Williams se encuentran entre 135 y 150. Esto en



comparación con los valores teóricos de la red que fueron tomados como 140 y 150, se puede decir que la red se está comportando relativamente bien con respecto a los valores supuestos del coeficiente de Hazen-Williams. Así mismo cuando se analizan las gráficas de variación del coeficiente de Hazen-Williams vs los diámetros de las redes, se puede ver que la mayoría de estos se encuentran en los rangos ya nombrados anteriormente, en especial los diámetros analizados en este estudio (tuberías de más de 900 mm).

A pesar de lo anterior, es importante notar que si bien la red se comporta muy bien, existen un conjunto de tuberías que presentan coeficientes de Hazen-Williams bajos (valores de 70 y 60), y otros bastante altos (considerando que un coeficiente de 150 es alto y por ende muy liso). Quizás estas tuberías que presentan estos comportamientos tan diferentes puedan influir de alguna manera en la hidráulica general de la red y estén generando que las caudales emitidos por el emisor, diverjan entre las dos ecuaciones. Este caso también se observó en la red matriz de Medellín, donde existían diferencias importantes entre los coeficientes de Hazen-Williams y estas se vieron claramente reflejadas en el comportamiento de los emisores de la ecuación físicamente basada frente a la ecuación empírica. Lo anterior se verificó y más adelante, cuando se muestren los resultados de tanques, se va a evidenciar que el comportamiento de la red se ve afectado por un desbalance de masa en las tuberías causado por el uso de la ecuación de Hazen-Williams; adicionalmente se va a mostrar que la hidráulica de la red se soluciona de manera diferente entre las dos ecuaciones (caudales que pasan por las tuberías) causando que las pérdidas por fricción y números de Reynolds entre tramos de tuberías iguales sean distintos, generando 2 efectos importantes: 1) Los Coeficientes de Hazen-Williams calculados a partir de los resultados de la ecuación de Darcy-Weisbach van a ser diferentes a los trabajados teóricamente ya que estos dependen del flujo, 2) La hidráulica de la red va a cambiar radicalmente al existir diferencias importantes en las pérdidas por fricción que existen en todas las tuberías del sistema (unas en mayor magnitud que otras).

Todo esto parece confirmar lo que se ha encontrado en las redes anteriores, y es que a pesar de que la red se comporte relativamente bien en cuanto a coeficientes de Hazen-Williams teóricos y calculados, las pequeñas diferencias pueden llevar a que se presenten diferencias en los caudales que simulan los tanques (emisores), llevando a un operador a tener una falsa sensación de confianza (al ver que el tanque se está llenando más rápidamente de lo que realmente está ocurriendo).

En cuanto a los resultados de diferencias de presión de la red, no se presentaron grandes diferencias; los resultados de estas presiones se muestran a continuación, para los 3 tiempos establecidos:

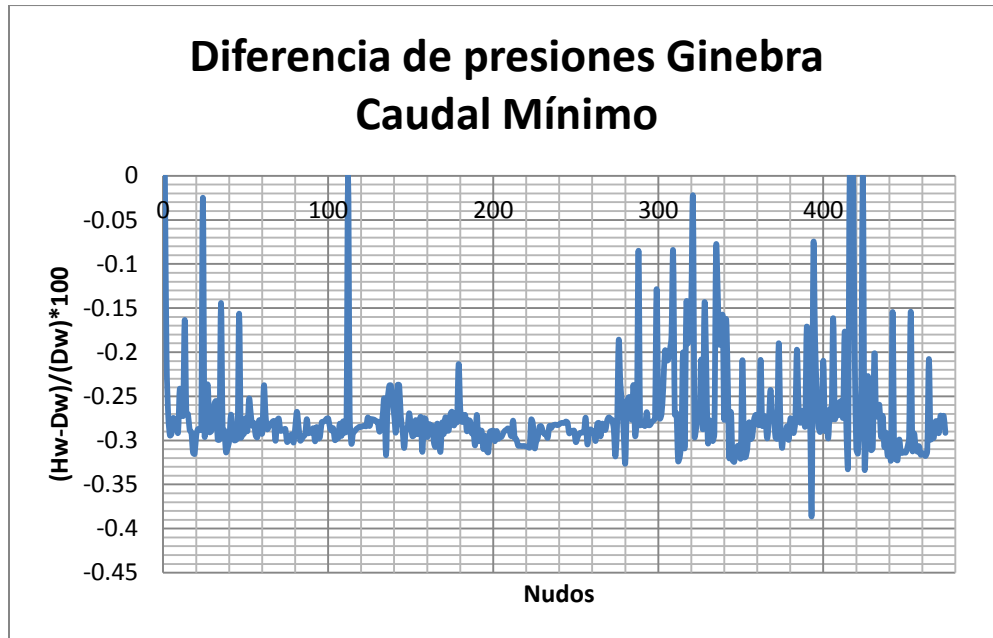


ILUSTRACIÓN 85 DIFERENCIAS DE PRESIONES PARA EL CAUDAL MÍNIMO.

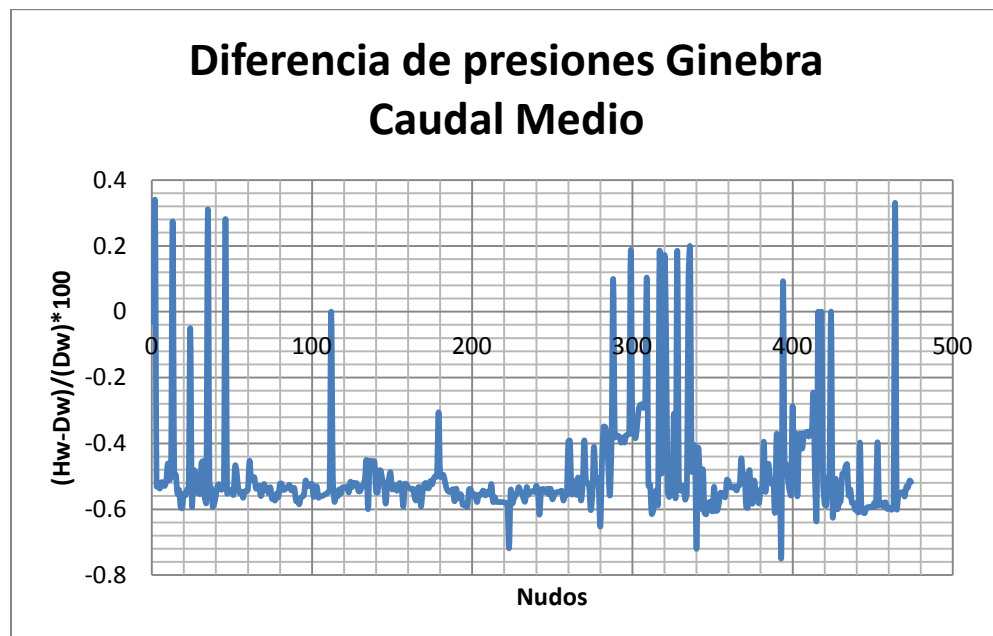


ILUSTRACIÓN 86 DIFERENCIAS DE PRESIÓN PARA EL CAUDAL MEDIO.

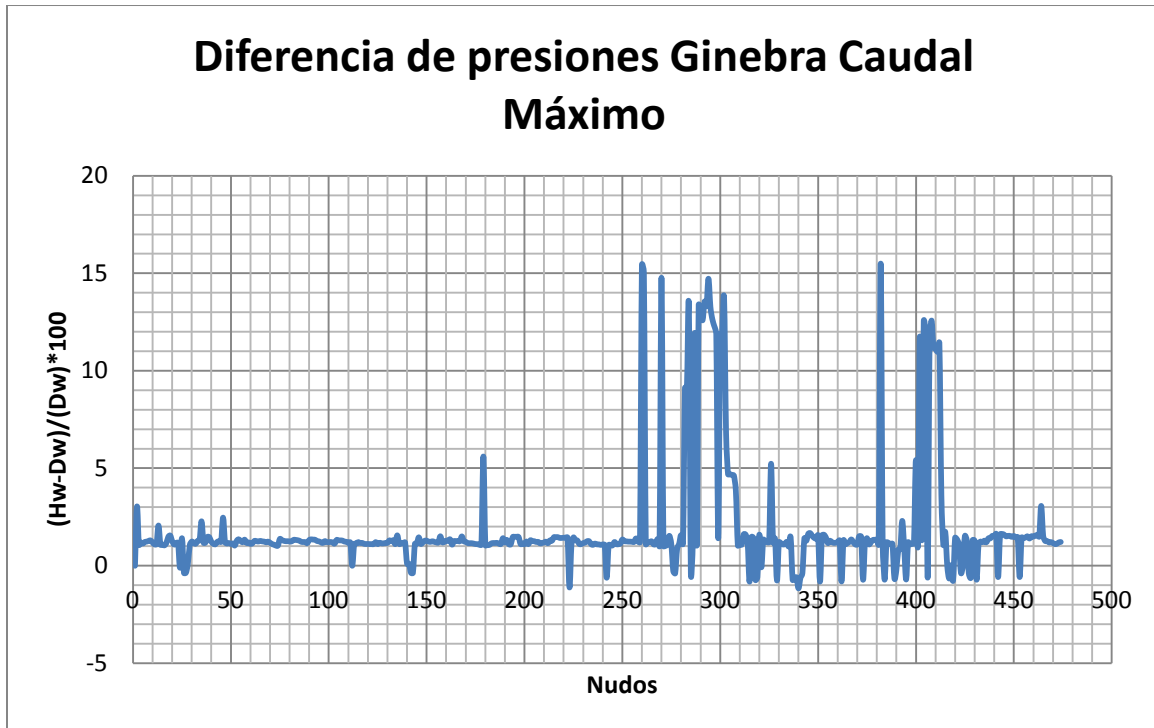


ILUSTRACIÓN 87 DIFERENCIAS DE PRESIÓN PARA EL CAUDAL MÁXIMO.

Las gráficas muestran que para caudales medios y mínimos las diferencias de presión entre la red simulada con la ecuación de Hazen-Williams frente a la red simulada con la ecuación de Darcy-Weisbach presentan diferencias mínimas. Sin embargo para el caudal máximo, se llegan a presentar diferencias importantes en algunos de los nudos de la red; si bien estas diferencias son relativamente bajas (máximo 15%) con respecto a los errores encontrados en la red matriz de Medellín y la red de Andalucía que será mostrada posteriormente, estos errores son considerables teniendo en cuenta que una diferencia de las presiones del 15% puede dejar generar una insuficiencia y desabastecimiento de la red en ciertos nodos críticos, afectando la disponibilidad de agua por la población, además que se está incumpliendo la normativa de presiones mínimas.

#### 4.3.4 RED ANDALUCÍA

Finalmente, se mostrarán los resultados de la red de Andalucía; esta red presentó diferencias bastante importantes en aspectos de presiones y en el comportamiento de los emisores. Los resultados de emisores pequeños se muestran a continuación:

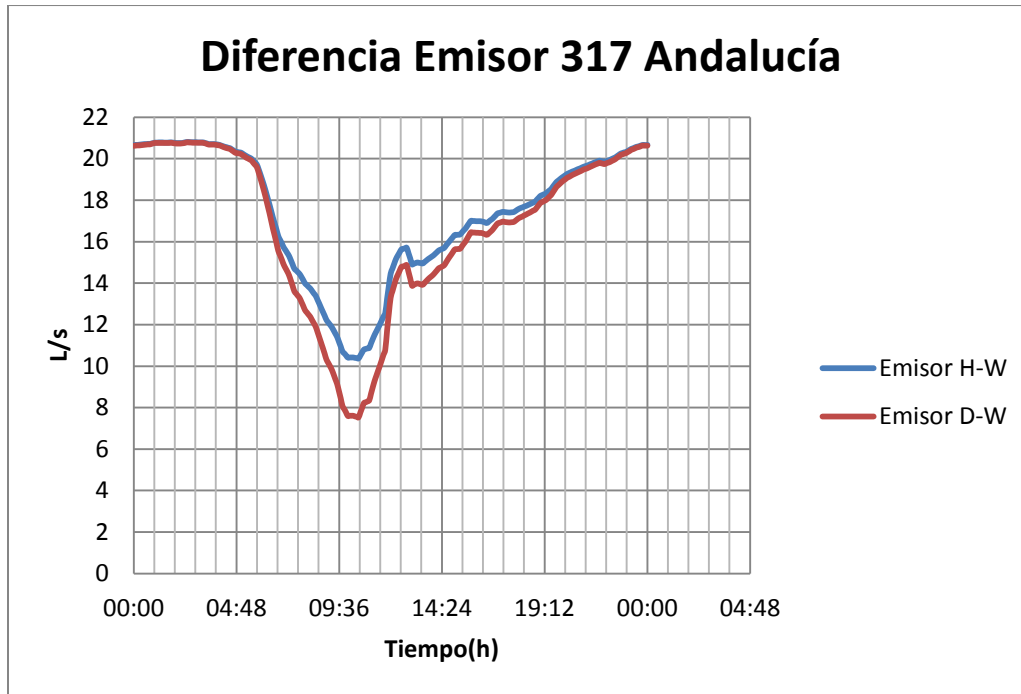


ILUSTRACIÓN 88 RESULTADOS EMISOR 317.

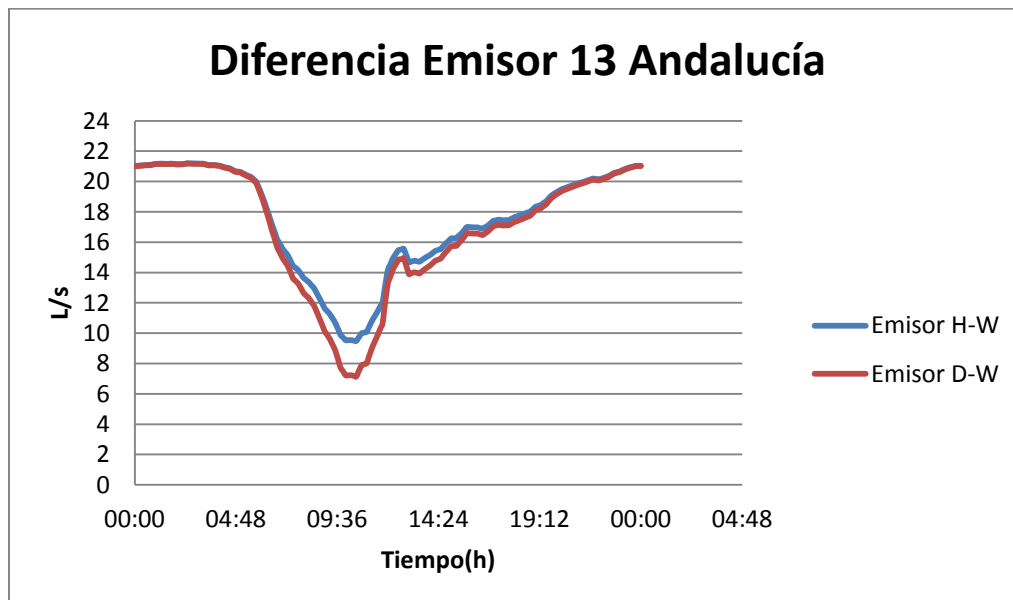


ILUSTRACIÓN 89 RESULTADOS EMISOR 13.

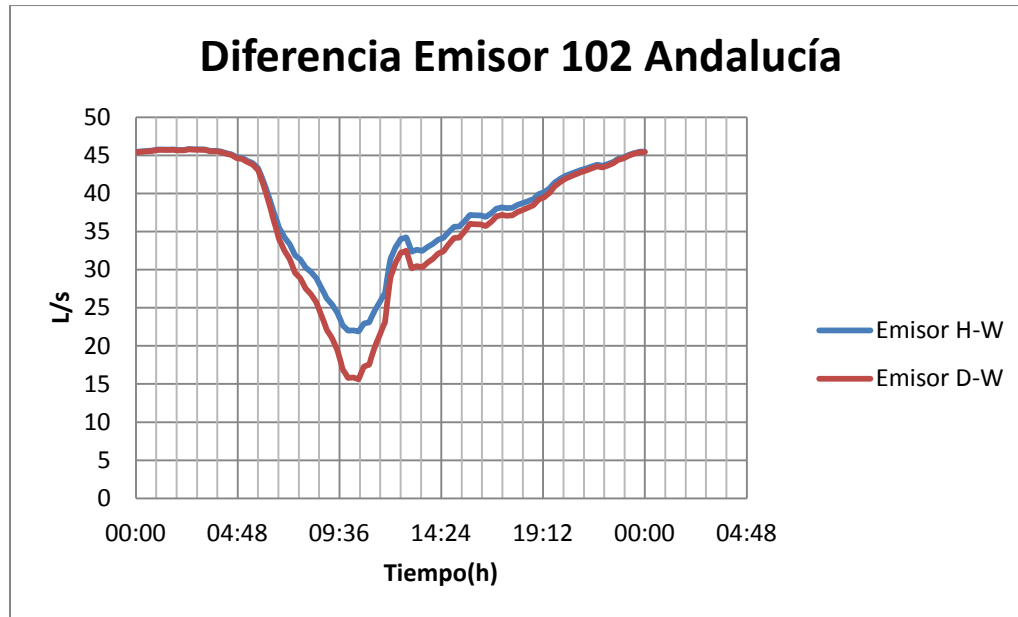


ILUSTRACIÓN 90 RESULTADOS EMISOR 102.

	Emisor 102	Emisor 13	Emisor 317
Presión(m)	20	20	20
Caudal Base(L/s)	31.08	12.34	14.93
Coefficiente Emisor	6.95	2.76	3.33

TABLA 9 INFORMACIÓN DE LOS EMISORES PEQUEÑOS.

Los resultados que aquí se presentan, muestran un comportamiento hidráulicamente interesante, como se puede evidenciar en las 3 gráficas de los emisores, donde se aprecian diferencias entre los dos emisores. Si bien las diferencias son de bajos caudales (ente 5 y 10 L/s), hay que considerar que los caudales máximos que se pueden presentar en estos 3 emisores alcanzan un máximo de 45 L/s (en el caso del tercer emisor), lo que representaría diferencias de hasta el 20% entre el cálculo de las dos ecuaciones. Estas diferencias de caudales pueden ser bastante importantes cuando se aumentan los exponentes de emisión. Adicionalmente, es importante notar que estas diferencias se presentan en las horas de máximo consumo, es decir cuando el patrón de consumo alcanza las 10 de la mañana.

A continuación se muestran los resultados para emisores de mayor tamaño, donde se vieron de mejor forma las diferencias de la red.



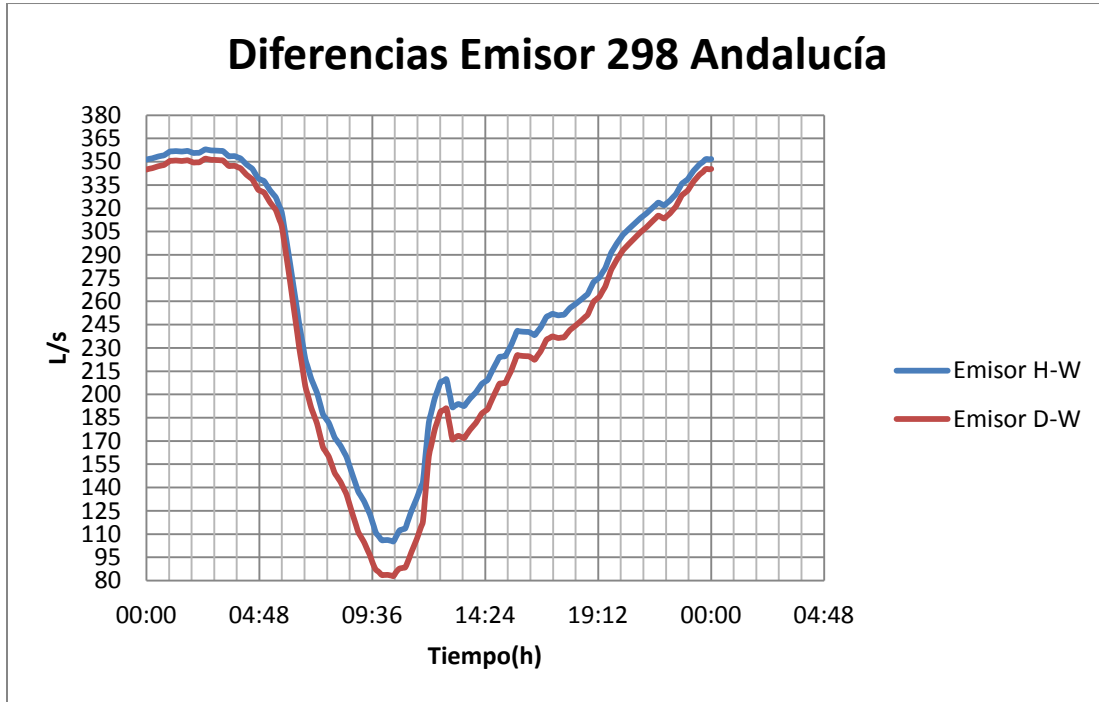


ILUSTRACIÓN 91 RESULTADOS EMISOR 298.

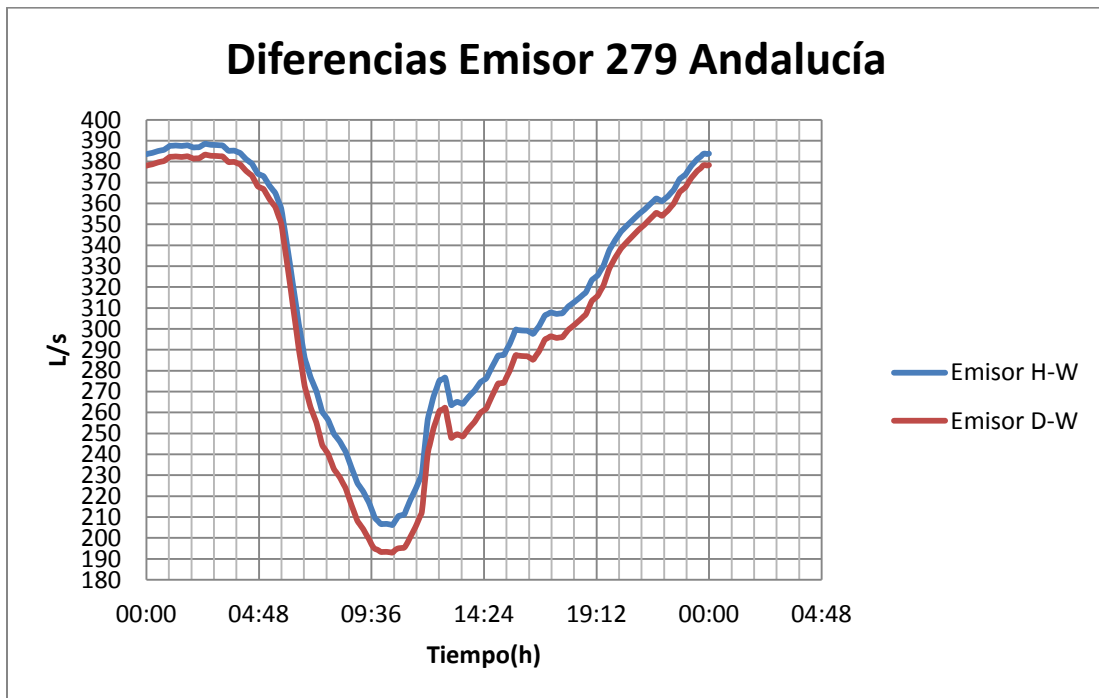


ILUSTRACIÓN 92 RESULTADOS EMISOR 279.

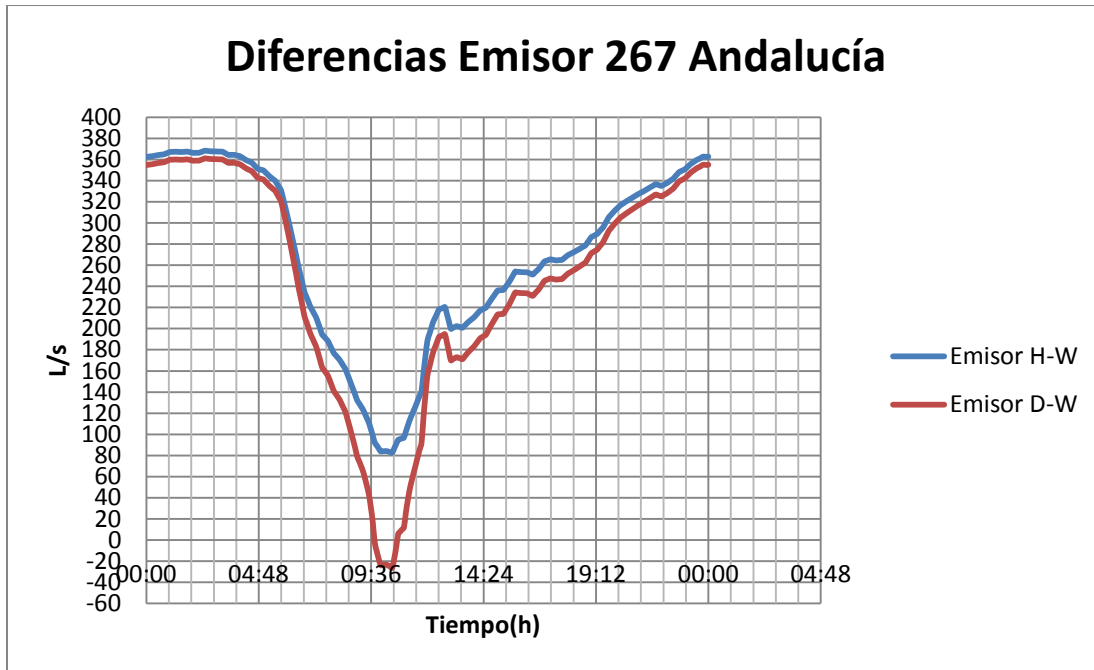


ILUSTRACIÓN 93 RESULTADOS EMISOR 267.

	Emisor 267	Emisor 279	Emisor 298
Coeficiente Emisor	72	65	62

TABLA 10 COEFICIENTES DE EMISIÓN PARA EMISORES GRANDES.

Los resultados coinciden con lo encontrado con los emisores pequeños, es decir, se puede observar en las ilustraciones anteriores que las diferencias entre los emisores son bastante grandes; en algunos casos pueden llegar a presentar diferencias de 100 L/s como se presenta en el caso del emisor 267 (que ocurre un fenómeno similar al que se presentó en emisores de la red de Medellín, es decir es un nudo en el que se presentan presiones negativas al utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach). Así mismo se presentan diferencias importantes en los otros dos emisores (de 20 L/s para el emisor 279 y de cerca de 50 L/s para el emisor 298). También es interesante observar que después de la hora máxima de caudales, el comportamiento de los emisores presenta una tendencia paralela, es decir, después de alcanzar su máxima diferencia, las dos curvas de los emisores parecieran comportarse como si fueran una función paralela y siguiendo una misma tendencia.

En cuanto a cómo afecta esto una situación de operación real, está claro que el operario que está trabajando con la ecuación de Hazen-Williams está subestimando las pérdidas por fricción que se presentan en la red, y está encontrando que el emisor que simula el tanque

está extrayendo caudal mayor al que se presenta en la realidad (es decir el encontrado con la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach); estas diferencias, como ya se mencionó en las redes pasadas, pueden significar un problema de entrega de presiones insuficientes ( a la hora de operar los tanques) o incluso de dejar desabastecido un sector de la población por la insuficiencia de caudales.

El análisis prosiguió con otros emisores, y se analizó detalladamente la variación de los coeficientes de Hazen-Williams en los períodos más relevantes del día. Los resultados de esto se muestran a continuación:

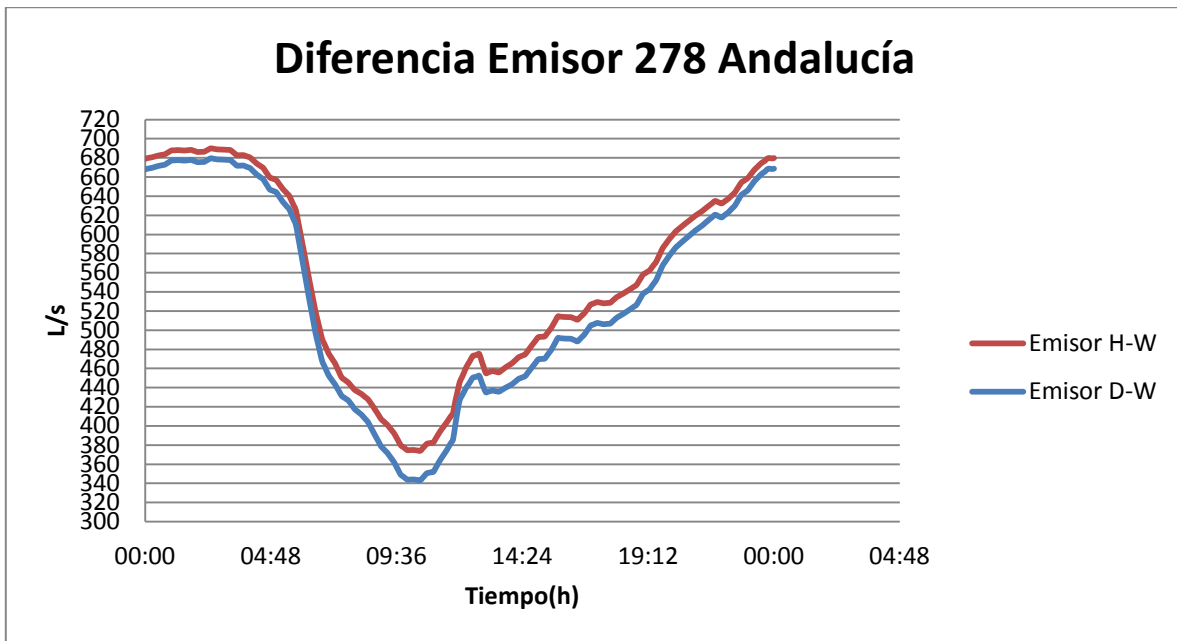


ILUSTRACIÓN 94 RESULTADOS EMISOR 278.

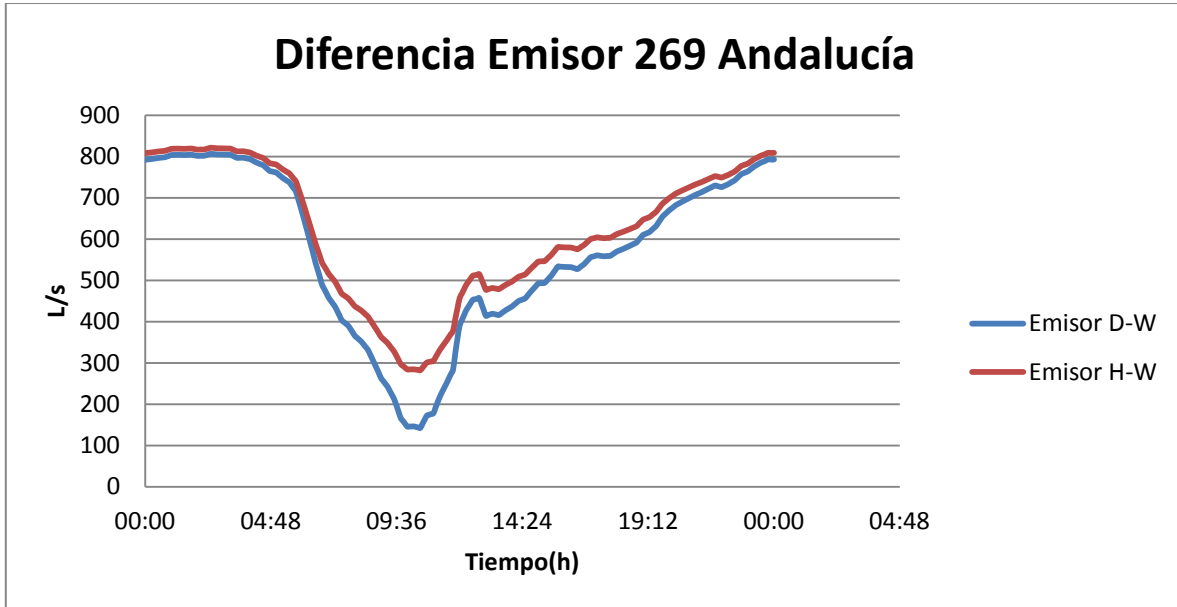


ILUSTRACIÓN 95 RESULTADOS EMISOR 269.

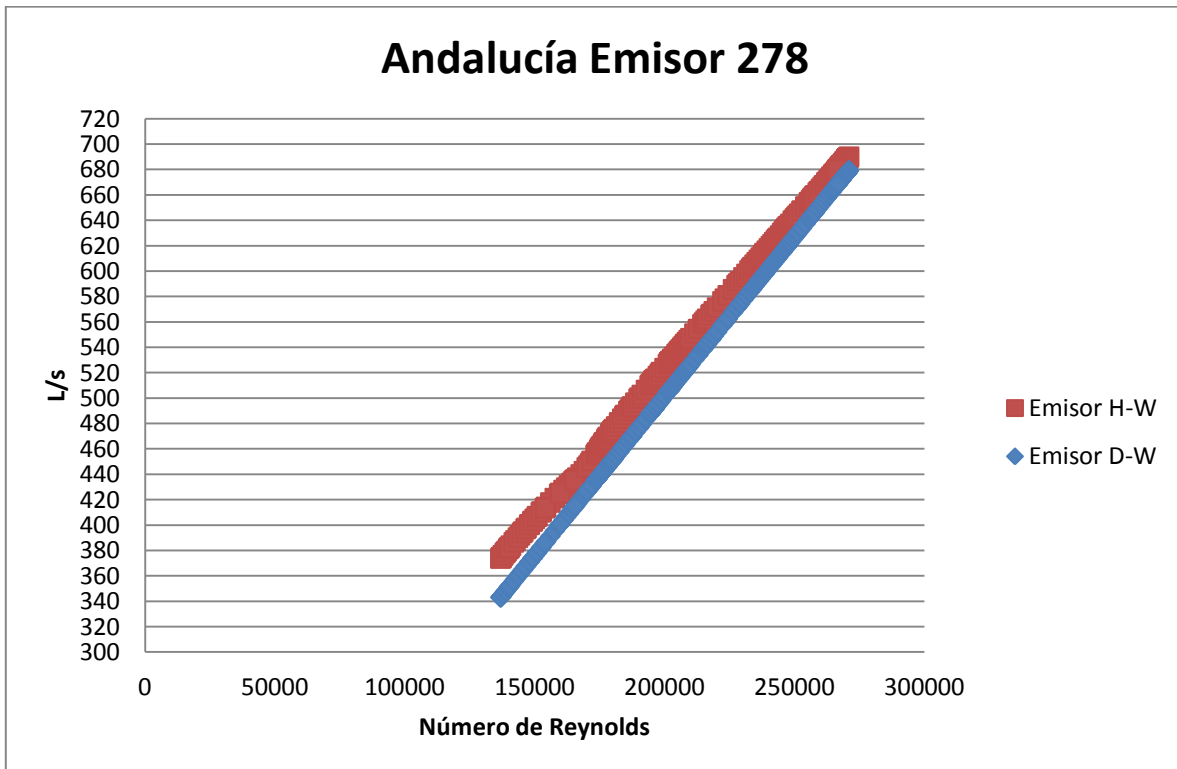


ILUSTRACIÓN 96 CAUDAL EMISOR VS NÚMERO DE REYNOLDS EMISOR 278.

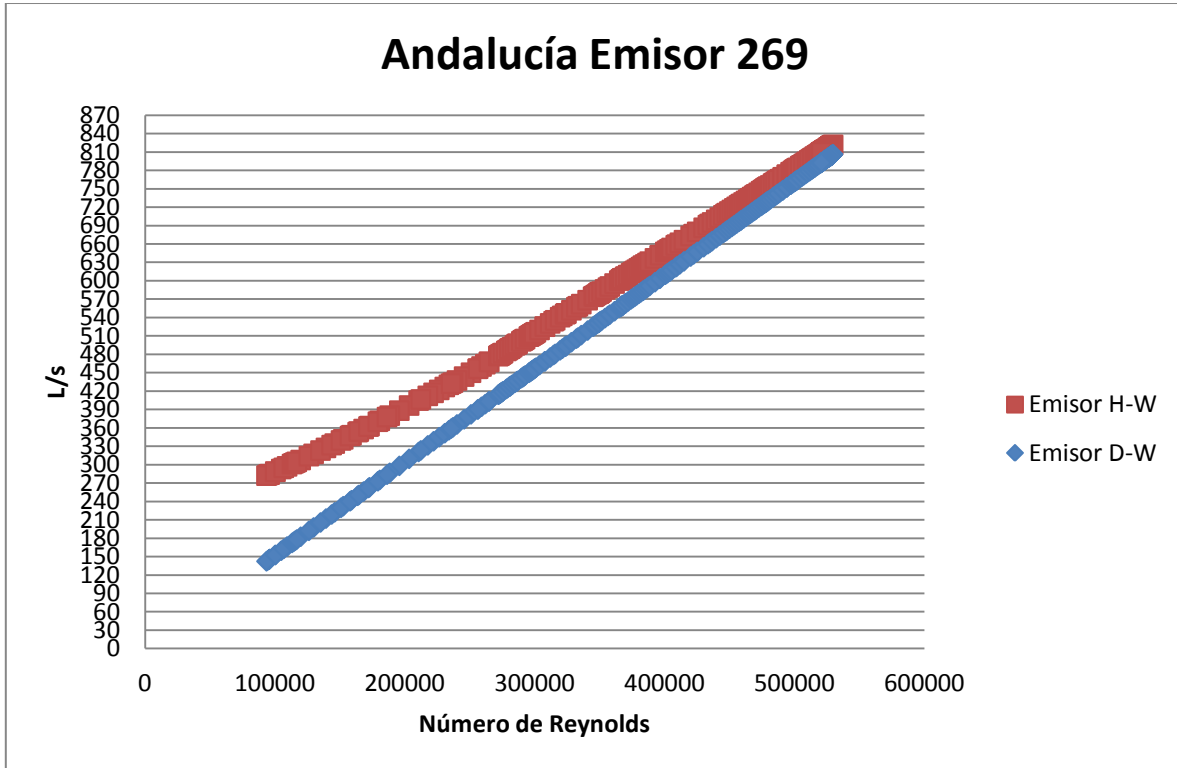


ILUSTRACIÓN 97 CAUDAL EMISOR VS NÚMERO DE REYNOLDS EMISOR 269.

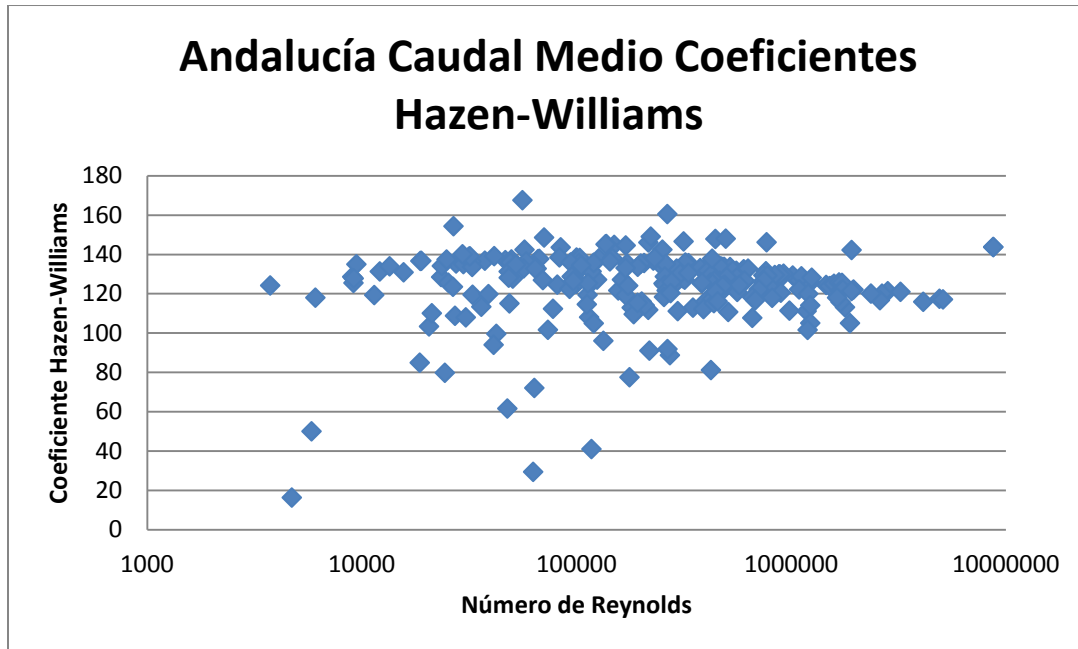


ILUSTRACIÓN 98 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS VS NÚMERO DE REYNOLDS PARA EL CAUDAL MEDIO.

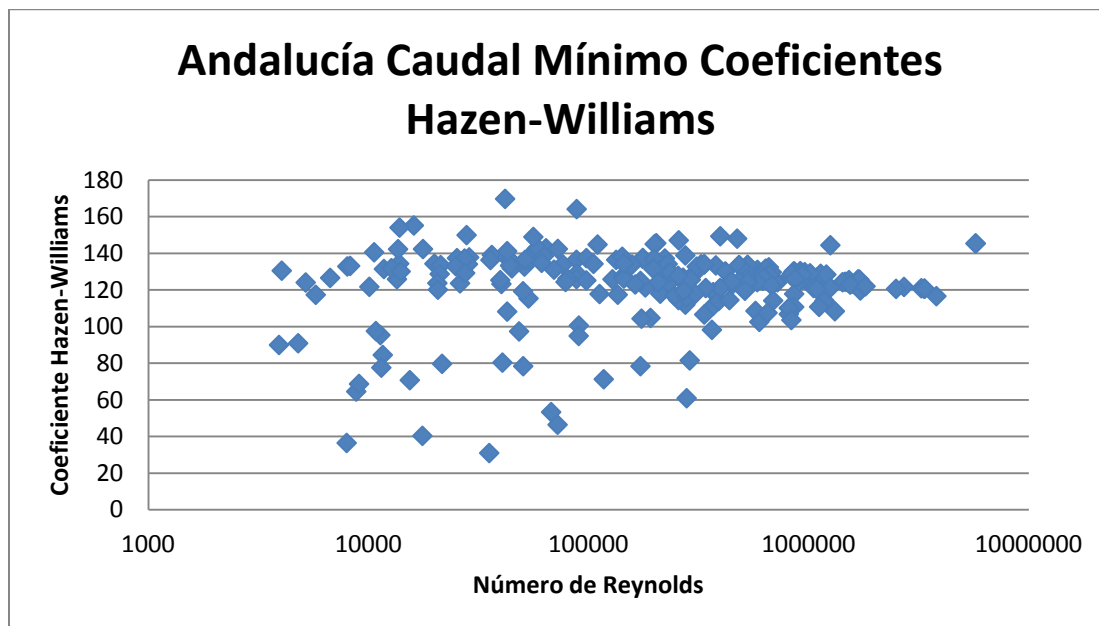


ILUSTRACIÓN 99 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS VS NÚMERO DE REYNOLDS PARA EL CAUDAL MÍNIMO.

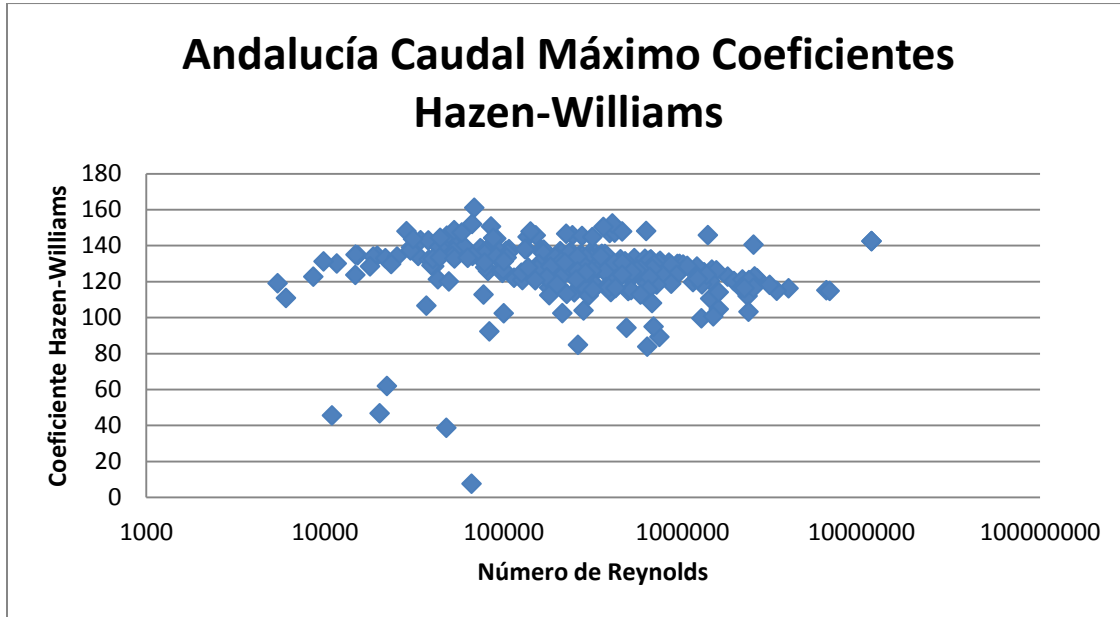


ILUSTRACIÓN 100 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS VS NÚMERO DE REYNOLDS PARA EL CAUDAL MÁXIMO.

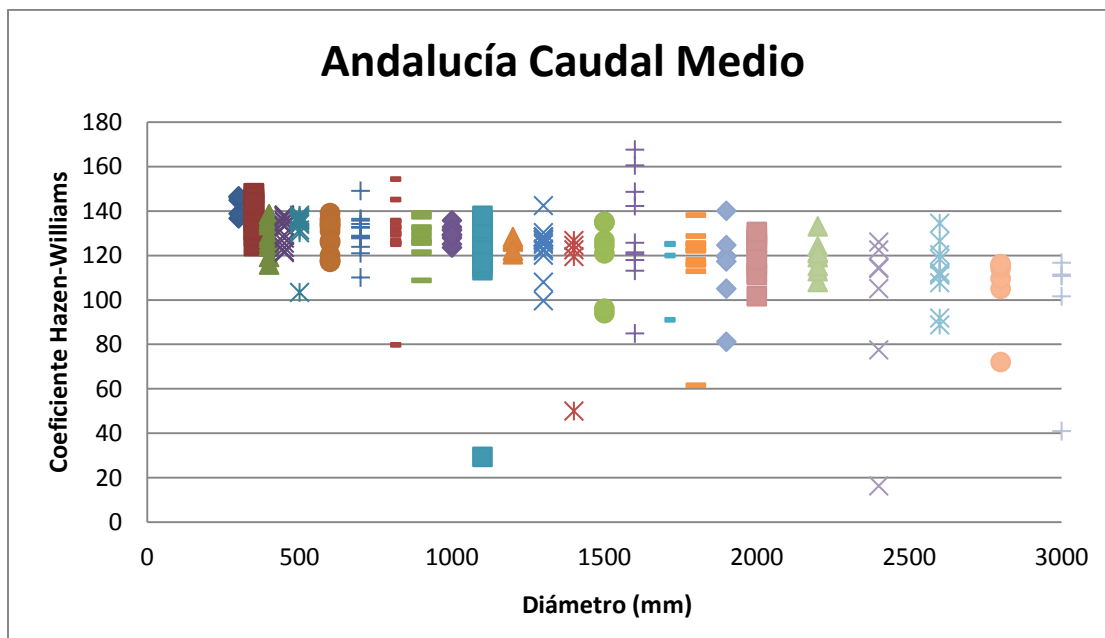


ILUSTRACIÓN 101 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS VS DIÁMETROS DE LA RED PARA EL CAUDAL MEDIO.

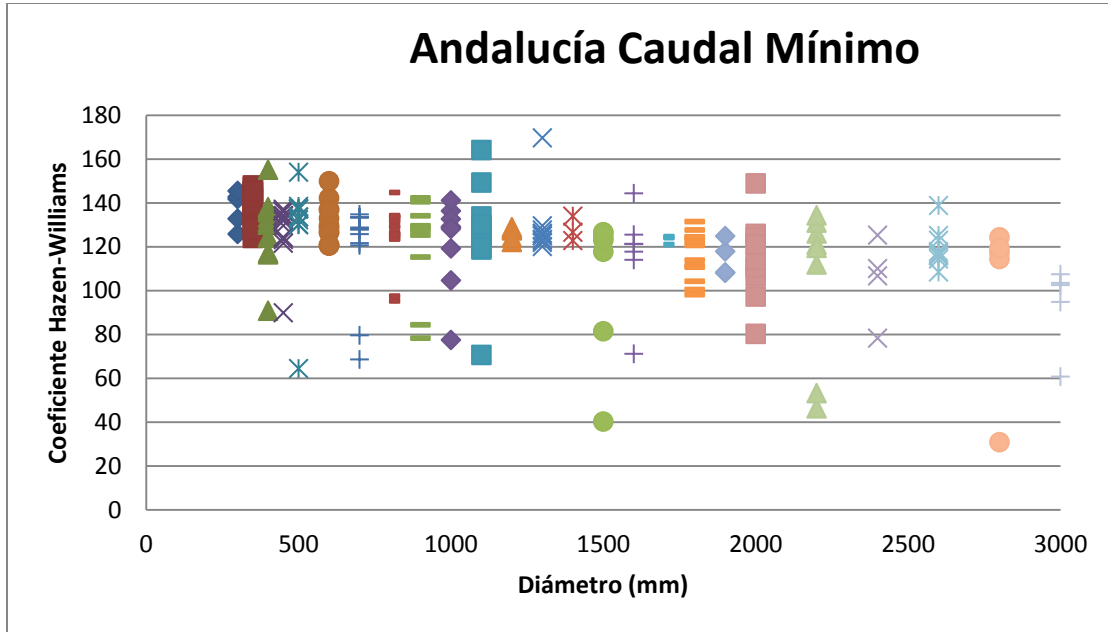


ILUSTRACIÓN 102 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS VS DIÁMETROS DE LA RED PARA EL CAUDAL MÍNIMO.

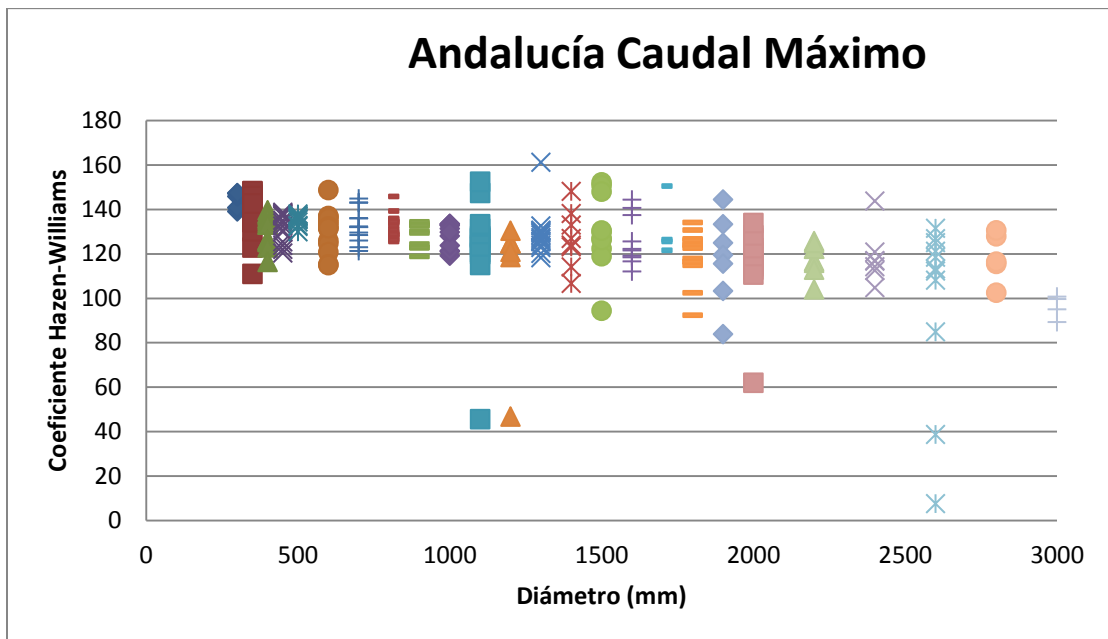


ILUSTRACIÓN 103 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS VS DIÁMETROS DE LA RED PARA EL CAUDAL MÁXIMO.





Los resultados de estos últimos emisores mantienen la tendencia presentada en esta red y en general con muchos emisores de esta tesis, es decir, existen grandes diferencias entre los caudales del emisor utilizando la ecuación empírica y la ecuación físicamente basada. Para el emisor 278 se llegaron a presentar diferencias de hasta 40 L/s y para el emisor 269 se presentaron diferencias de gran importancia, siendo la máxima de 150 L/s. Estas diferencias se vienen analizando a lo largo de este trabajo en las otras redes, pero es especialmente relevante en este caso ya que es la primera vez que se presentan diferencias entre las dos ecuaciones con esta magnitud de error.

Por otro lado, revisando los datos del caudal emisor frente al número de Reynolds de la tubería de llegada se puede apreciar que para números de Reynolds menores, las diferencias suelen ser mucho mayores. Esta es una observación interesante, considerando que para otros casos ocurría lo opuesto, es decir, las diferencias entre los emisores ocurrían cuando el número de Reynolds era más alto. Esto lleva a pensar a que la ecuación de Hazen-Williams puede llegar a presentar diferencias en los caudales de los emisores para diferentes rangos de números de Reynolds, ya sea para rangos muy altos o para rangos relativamente bajos.

Continuando con el análisis de los resultados es importante mostrar, para este caso particular, la variación del coeficiente de Hazen-Williams con respecto a los diámetros y con respecto al número de Reynolds. Se puede observar que los coeficientes de la red se están comportando en un rango de 100 y 120 en contraste con los rangos teóricos de 140 y 150. Esto implica que la red de Andalucía se está comportando en la realidad como una red mucho más rugosa de lo que realmente representa y por ende la ecuación de Hazen-Williams está subestimando en gran medida las pérdidas por fricción que se presenta en la misma. Todo esto es consistente con los resultados encontrados en los emisores, que al subestimar las pérdidas de la red, los caudales que arroja el emisor son mucho mayores a los que se presentan en la realidad (es decir con la ecuación de Darcy-Weisbach).

Así mismo, cuando se analizan los resultados de la variación del coeficiente de Hazen-Williams vs los diámetros de la red, se puede ver que en tuberías de gran diámetro que juegan un papel fundamental en la hidráulica de la red, la variación del coeficiente puede llegar a tener valores de hasta 60, frente al coeficiente teórico de 140 para tuberías mayores a 350 mm. Estas consecuencias se verán más adelante cuando se analizan las presiones de la red, pues las diferencias fueron bastante importantes. Adicionalmente conviene señalar que que la red incluso llega a presentar diferencias en el número de Reynolds de la ecuación de Hazen-Williams frente a la ecuación de Darcy-Weisbach, como se aprecia en los anexos y que esta condición no es exclusiva de la Red Andalucía sino que se evidencia en la mayoría de redes trabajadas. Estos resultados son una señal de alerta y una situación extremadamente preocupante por el hecho de que la ecuación empírica está entregando, de manera errada, los caudales que realmente están circulando en la red, que evidentemente cambiará de acuerdo con el comportamiento de los emisores, las presiones y la hidráulica en general.

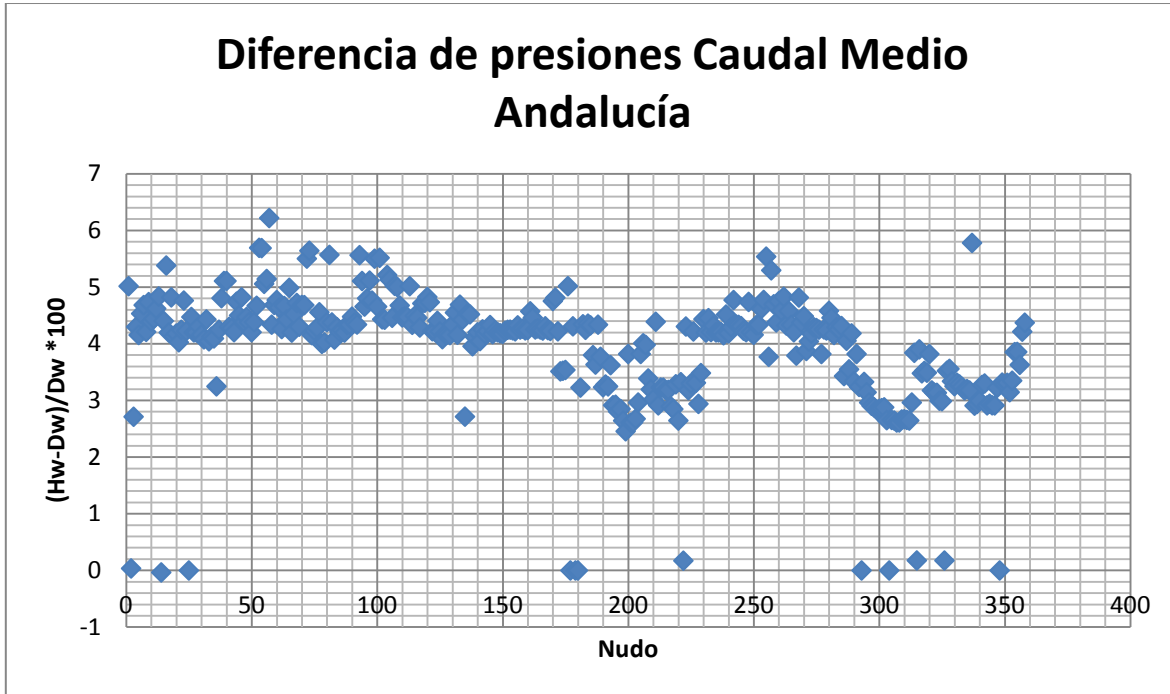


ILUSTRACIÓN 104 DIFERENCIA DE PRESIONES PARA EL CAUDAL MEDIO.

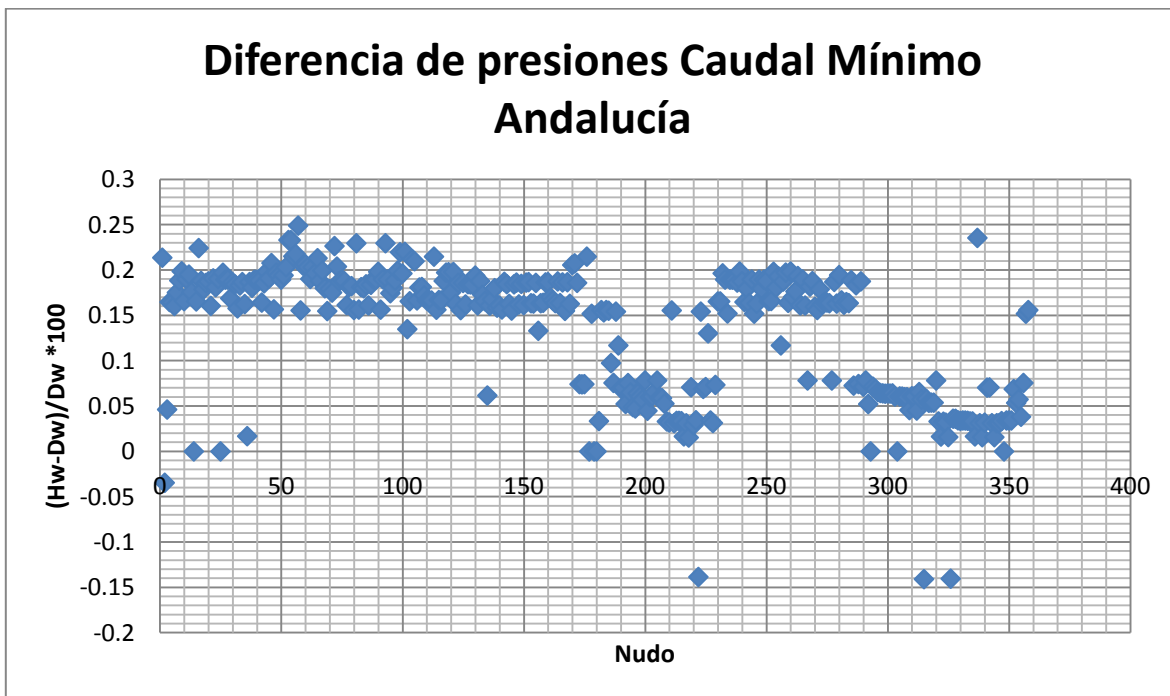


ILUSTRACIÓN 105 DIFERENCIA DE PRESIONES PARA EL CAUDAL MÍNIMO.

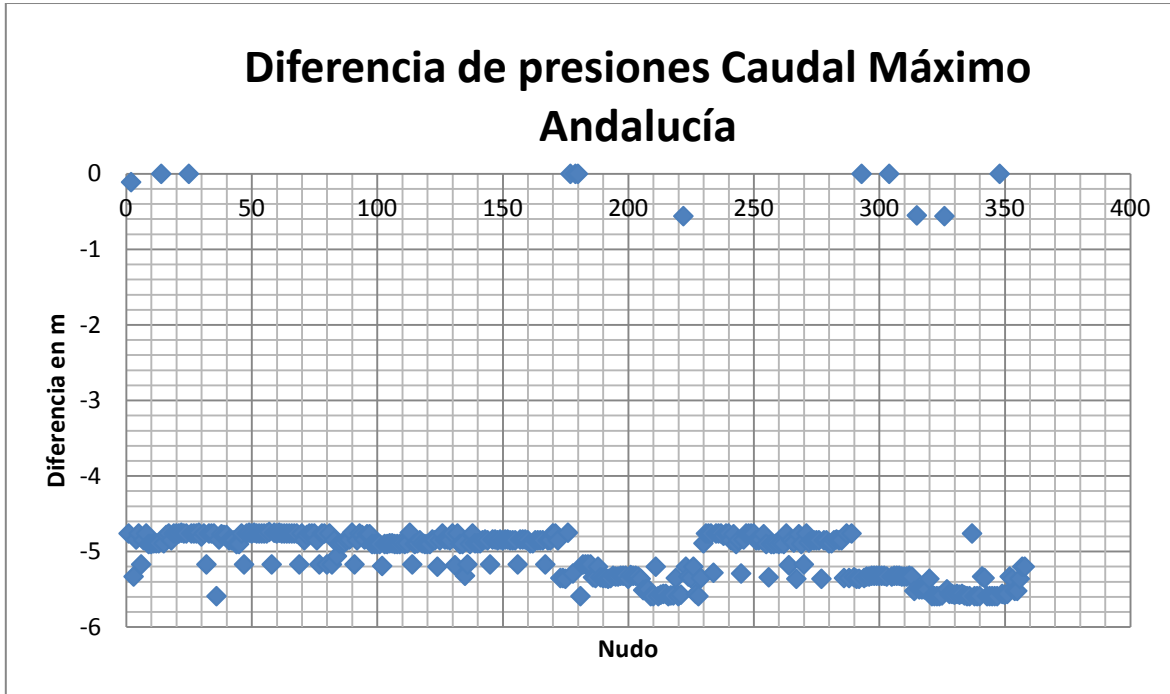


ILUSTRACIÓN 106 DIFERENCIA DE PRESIONES PARA EL CAUDAL MÁXIMO.

Como se mencionó anteriormente, se puede ver que las diferencias que se presentan entre la red simulada con la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach son importantes. Si bien en caudales mínimos las diferencias son despreciables, para el caudal medio ya se presentan errores en la mayoría de los nudos del 5% y diferencias mucho más grandes con el caudal máximo, que exigió plasmarlas con diferencias de presiones y no con el error relativo. Esto último se pudo observar en la Ilustración 106, donde se presentan diferencias de hasta 6 metros. Para ponerlo en contexto, si en un nudo que trabaja con la ecuación de Hazen-Williams se tiene una presión de 20 metros, en la realidad se puede estar presentando una presión de 14 metros, y el caso alarmante es cuando hay presiones cercanas a 2 o 3 metros con la ecuación de Hazen-Williams y en la realidad se puedan llegar a presentar presiones negativas que significan un mayor y más rápido vaciado del tanque, que se puede traducir en desabastecimiento del sector, afectando enormemente a la población usuaria del servicio de agua.

#### 4.4 TANQUES REALES, RED DE BOMBEO Y ANÁLISIS DE LA HIDRÁULICA DEL SISTEMA

En esta sección se van a mostrar los resultados más relevantes de cada una de las redes trabajadas; esto incluye los niveles de los tanques, diagramas de Moody con los factores de fricción de toda la red y los tramos que presentaron las diferencias más significativas entre la

ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach. Así mismo, se realizó un análisis comparativo con base a los resultados de las investigaciones de Bombardelli y García (Fabián Bombardelli, 2003) y se analizaron los rangos de números de Reynolds de ambas investigaciones.

#### 4.4.1 RED MATRIZ DE BOGOTÁ

El estudio con tanques reales continuó con la red matriz de Bogotá, que a diferencia de las otras redes estudiadas, estaba compuesta por una gran cantidad de circuitos, la llegada a los tanques de almacenamiento estaban conectados a 2 o más tuberías y en raras ocasiones terminaban en ramificaciones. Lo anterior es bastante importante ya que como se mencionó en los análisis anteriores, esta red fue la que presentó menores diferencias en comparación con los otros casos de estudio. A continuación se muestran los resultados encontrados para los niveles de los tanques en la red matriz de Bogotá:

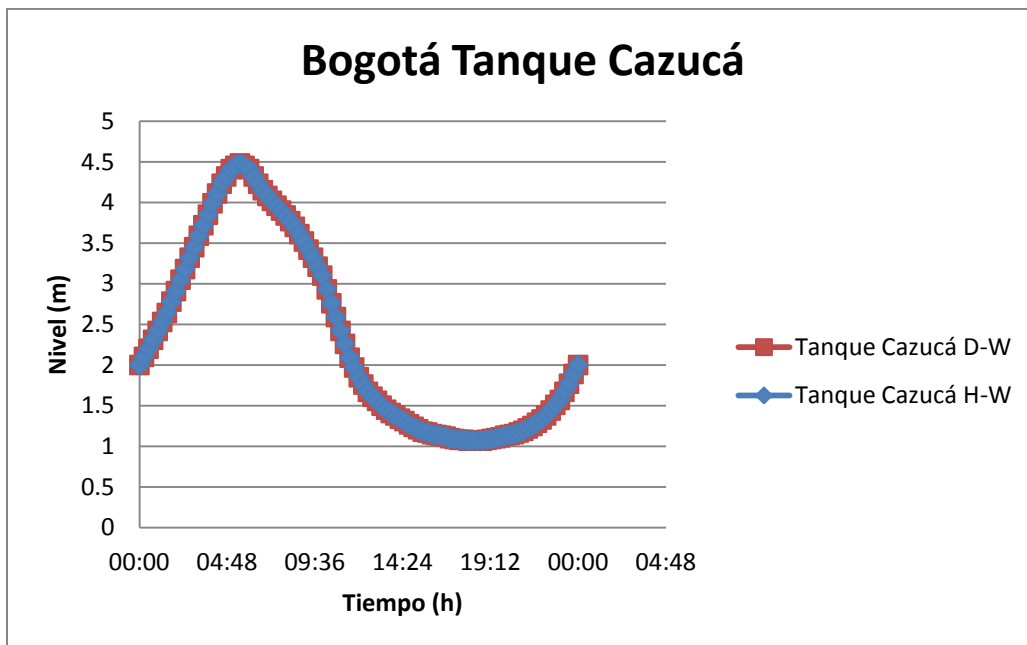


ILUSTRACIÓN 107 NIVEL DEL TANQUE CAZUCÁ.

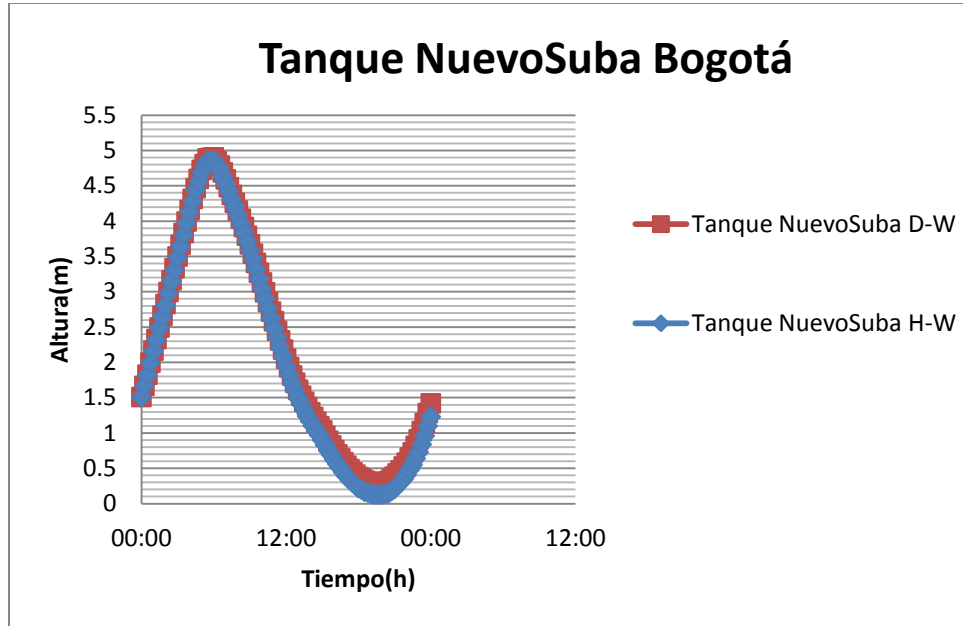


ILUSTRACIÓN 108 NIVEL TANQUE NUEVOSUBA.

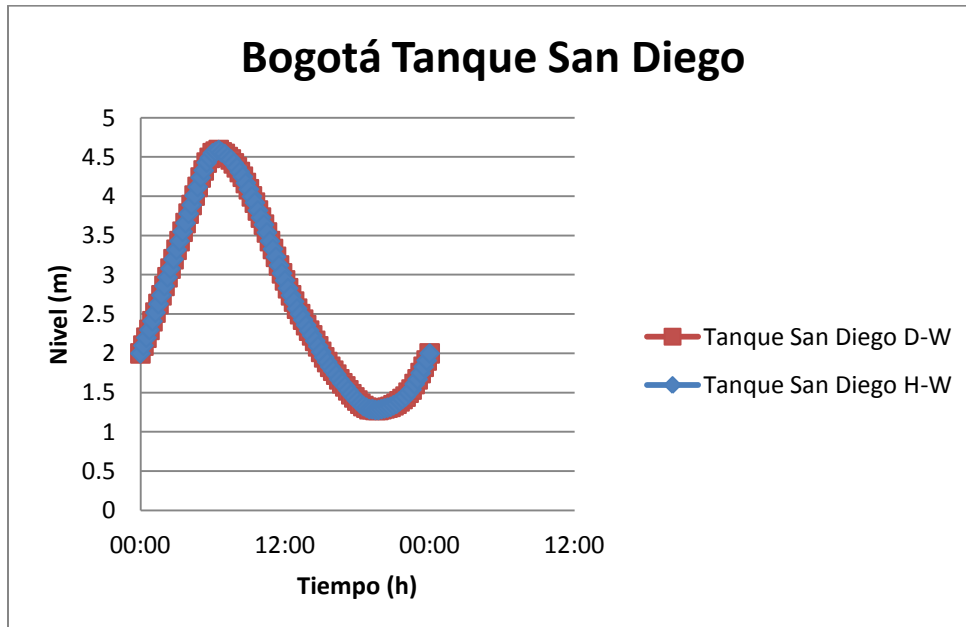


ILUSTRACIÓN 109 NIVEL TANQUE SAN DIEGO.

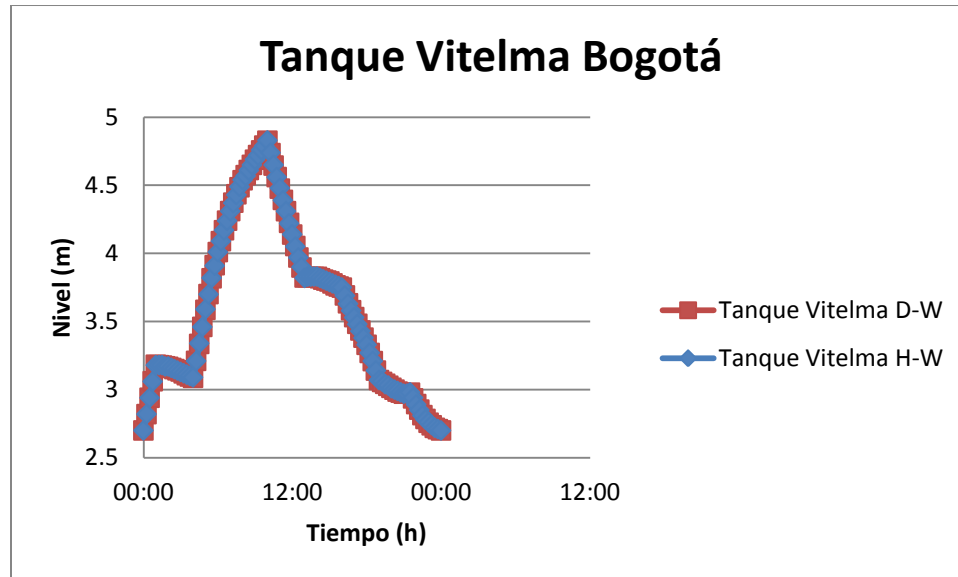


ILUSTRACIÓN 110 NIVEL TANQUE VITELMA.

Las ilustraciones mostradas anteriormente representan los niveles de los tanques en la red matriz de Bogotá. Como se puede observar, las diferencias en los niveles de los tanques son bastante bajas y si bien en la Ilustración 108 existe una pequeña diferencia a la hora del vaciado del tanque, esta es una diferencia poco significativa. Esto es coherente con lo encontrado en los análisis realizados anteriormente; en el sentido que la red matriz de Bogotá parece estar representando, de manera similar, la hidráulica cuando se utiliza la ecuación empírica de Hazen-Williams en comparación con la hidráulica evaluada con la ecuación de Darcy-Weisbach.

El análisis siguiente tuvo como objetivo observar si las redes llegaban a presentar algún tipo de diferencias en otros aspectos hidráulicos, los cuales se muestran a continuación:

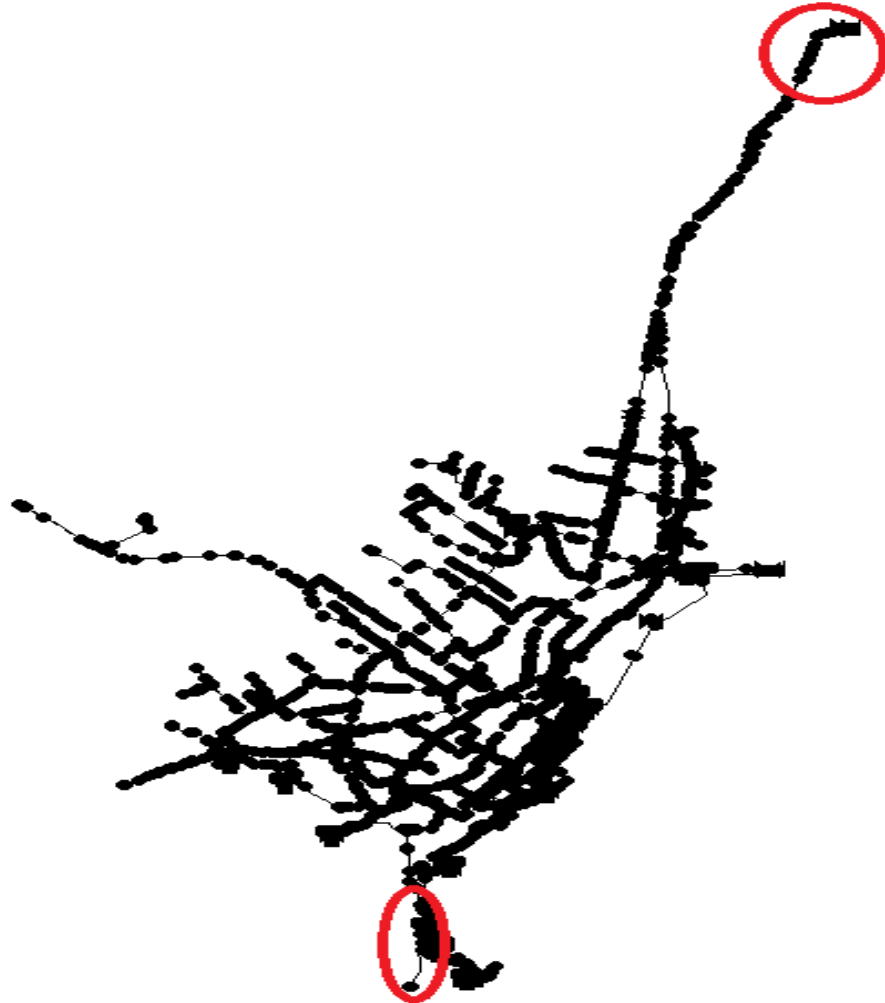


ILUSTRACIÓN 111 MAPA CON TRAMOS A LA SALIDA DE LOS EMBALSES ANALIZADOS.

El análisis se decidió enfocar en las tuberías de gran diámetro y en las tuberías que estaban transportando la mayor cantidad del caudal en la red. Este análisis incluyó buscar diferencias en los números de Reynolds y pérdidas por fricción asociadas con las tuberías nombradas. A continuación se van a mostrar los resultados:

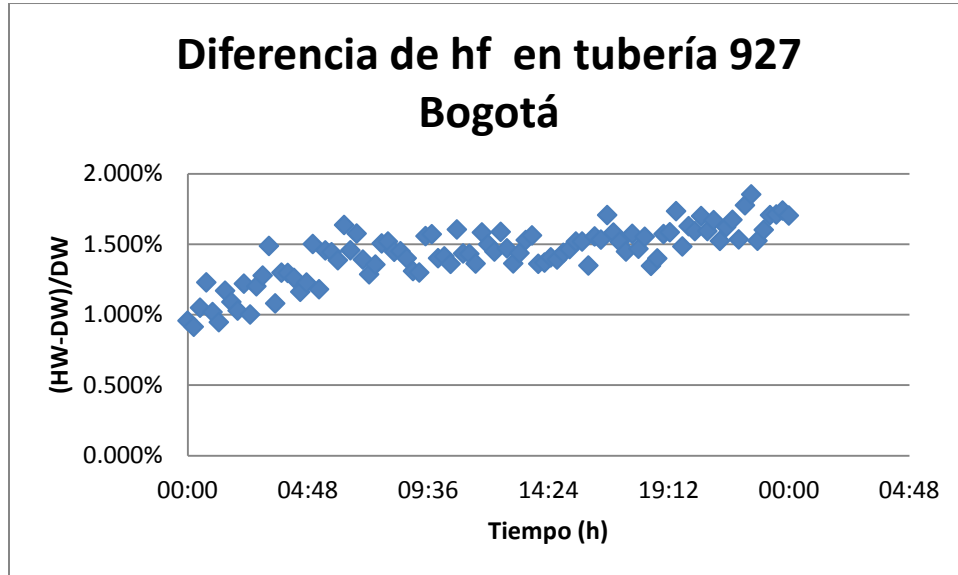


ILUSTRACIÓN 112 DIFERENCIAS EN EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR FRICCIÓN.

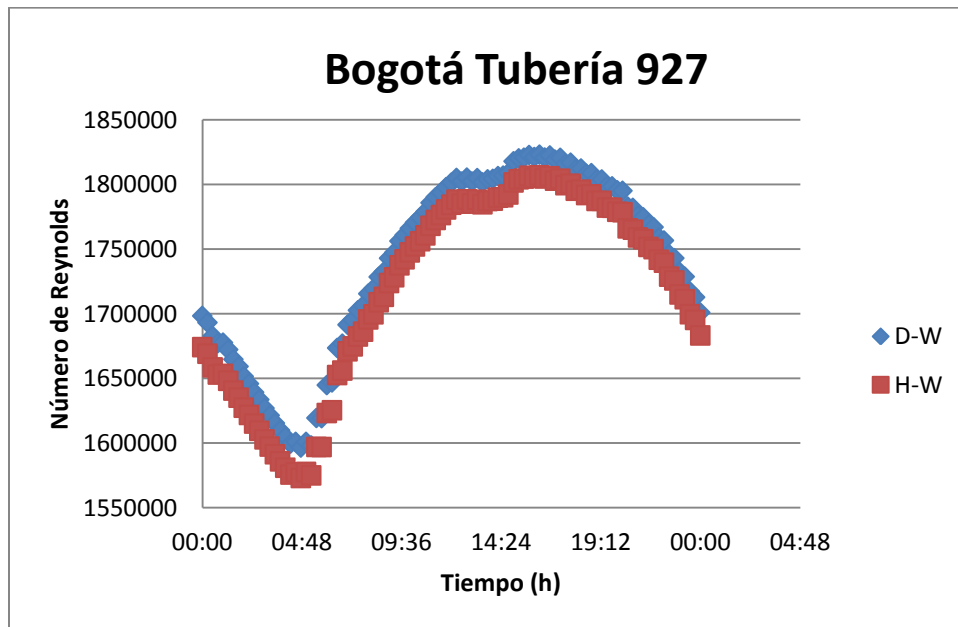


ILUSTRACIÓN 113 DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS.



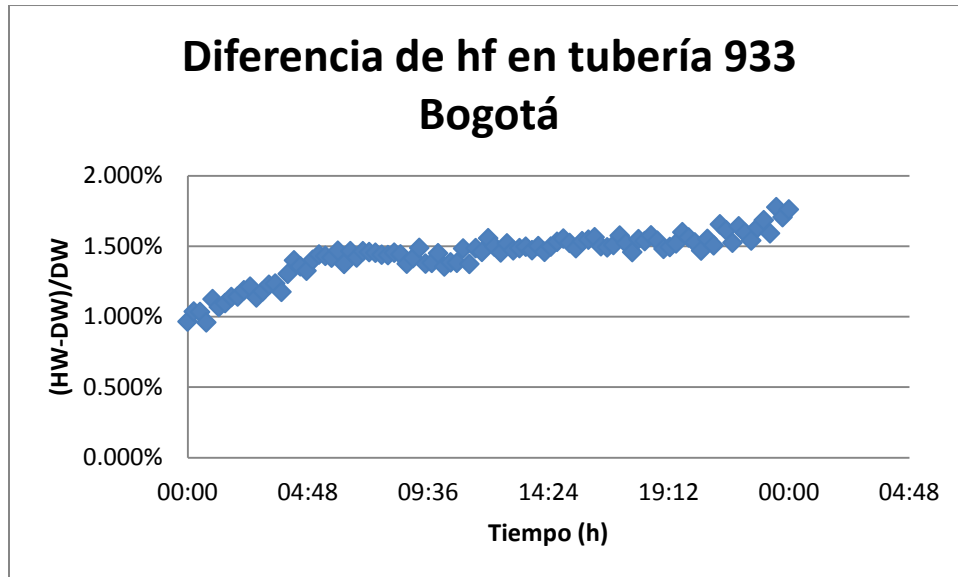


ILUSTRACIÓN 114 DIFERENCIAS EN EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR FRICCIÓN.

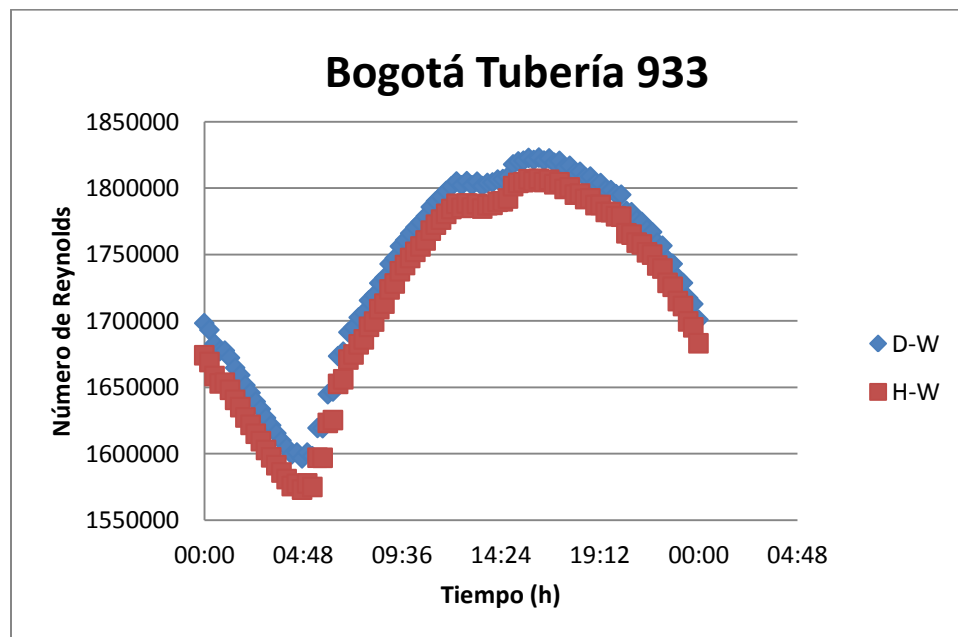


ILUSTRACIÓN 115 DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS.

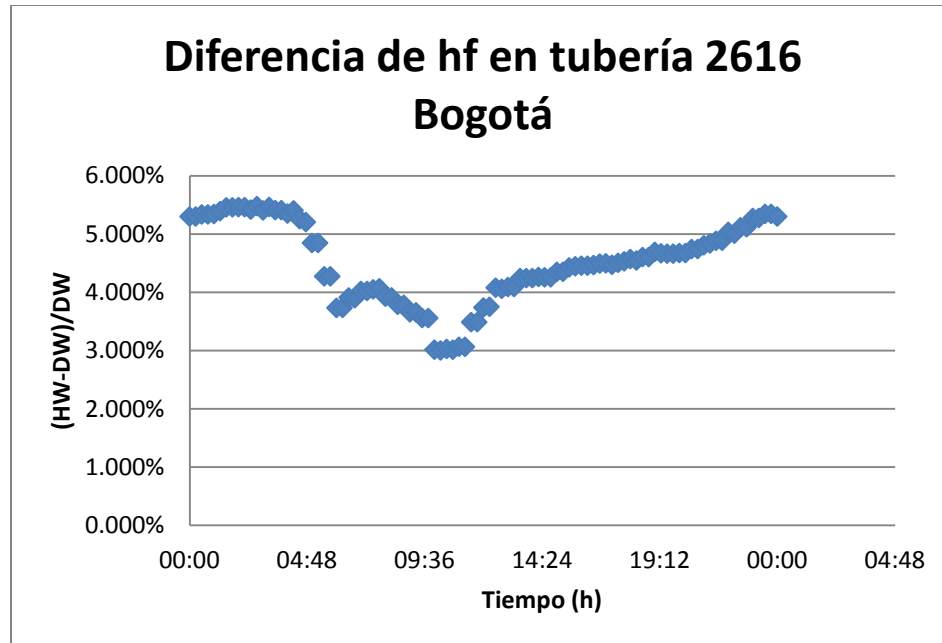


ILUSTRACIÓN 116 DIFERENCIAS EN EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR FRICCIÓN.

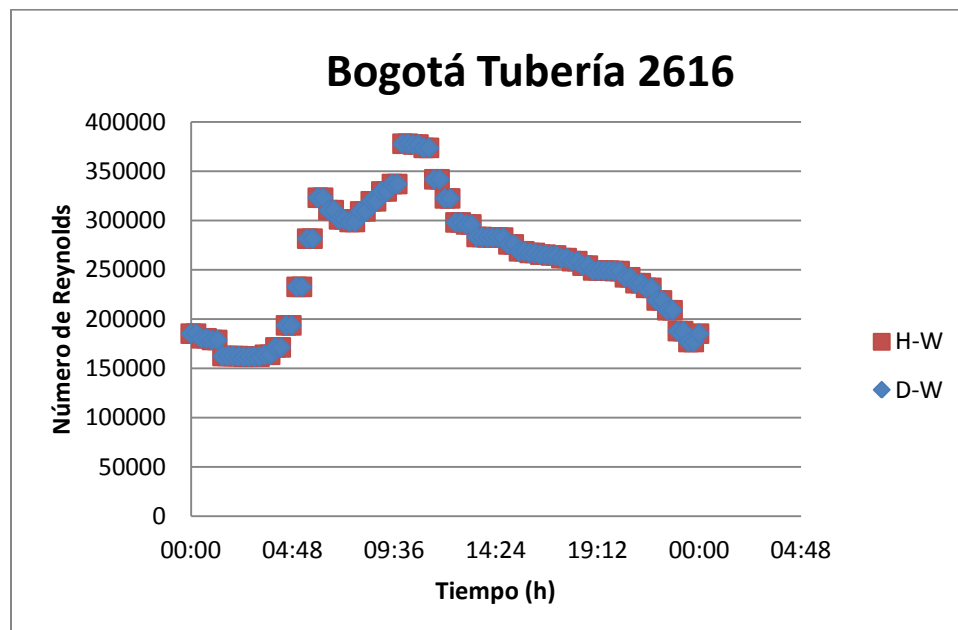


ILUSTRACIÓN 117 DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS.

Los resultados anteriores muestran que si bien existen diferencias en los números de Reynolds en las tuberías, estas diferencias suelen ser muy bajas (aunque no despreciables). Así mismo al analizar las ilustración es se puede observar que las diferencias en el cálculo de



---

las pérdidas por fricción en ningún momento exceden el 7%; se puede concluir que en términos generales la red que está siendo operada con la ecuación de Hazen-Williams está funcionando de manera muy similar a lo que se esperaría en la realidad.

Sin embargo, no hay que obviar el hecho que la diferencia en los números de Reynolds, en especial en estas tuberías que salen de los embalses implica que la red operada con la ecuación de Hazen-Williams está sobrestimando en algunos casos y en otros subestimando, la cantidad de masa o de agua que está saliendo de los embalses. Tal efecto genera como consecuencia que la hidráulica de toda la red esté cambiando (pérdidas por fricción, factores de fricción, presiones de la red, llenado de los tanques); y aunque en este caso las diferencias sean bastante bajas, este efecto va a tener consecuencias importantes a la hora de operar redes primarias de bombeo o redes matrices, como se mostrará más adelante.

Una vez identificados estos efectos, se procedió a generar los diagramas de Moody y construir un mapa con las diferentes redes, identificando en qué tuberías era mayor el número de Reynolds al utilizar la ecuación de Hazen-Williams, en qué tuberías era mayor con la ecuación de Darcy-Weisbach y en qué escenarios eran iguales. El análisis se realizó en los momentos del día donde se presentaba la demanda de caudal promedio, mínima y máxima.

Con el fin de entender los resultados que se muestran a continuación es necesario aclarar que en aquellos tramos donde la tubería presenta color VERDE, el número de Reynolds es mayor al utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach, el color ROJO para las tuberías en las que el número de Reynolds es mayor con la ecuación de Hazen-Williams y finalmente, en AMARILLO, las tuberías en las que no existe ninguna diferencia entre las dos ecuaciones.

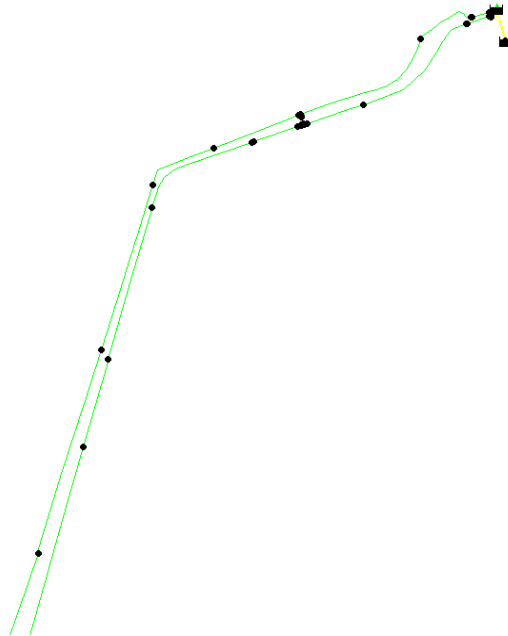


FIGURA 1 SALIDA DE EMBALSE TIBITOC CAUDAL MEDIO.

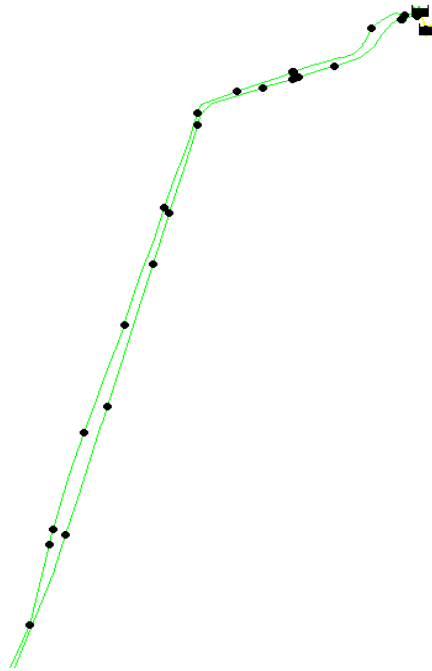


FIGURA 2 SALIDA DEL EMBALSE TIBITOC CAUDAL MÁXIMO.

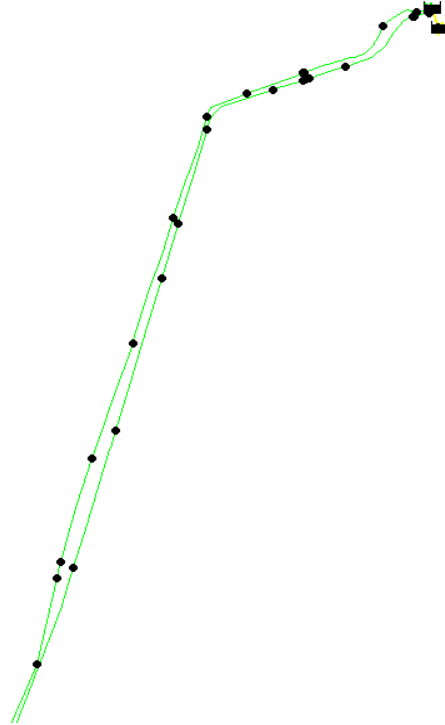


FIGURA 3 SALIDA DEL EMBALSE TIBITOC CAUDAL MÍNIMO.



FIGURA 4 SALIDA DEL EMBALSE DE WIESNER CAUDAL MEDIO.

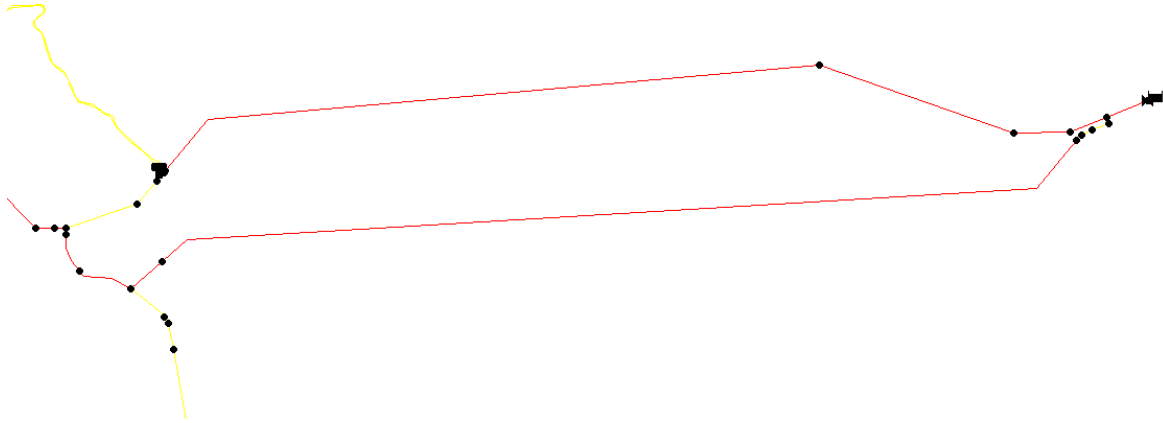


FIGURA 5 SALIDA DEL EMBALSE DE WIESNER CAUDAL MÁXIMO.

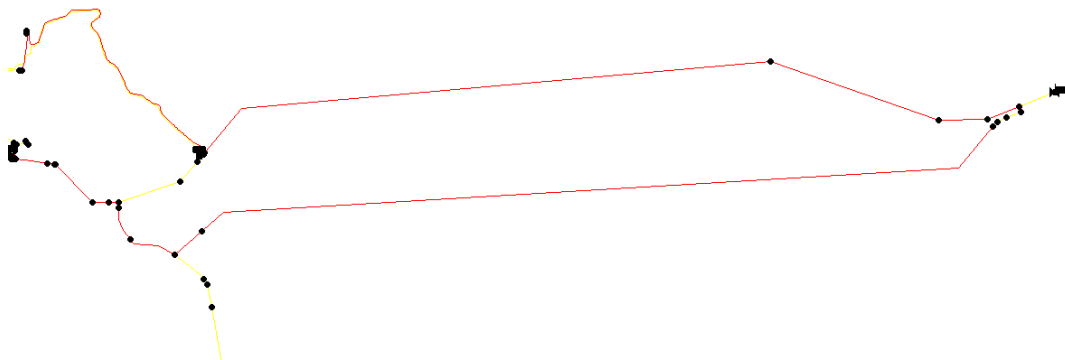


FIGURA 6 SALIDA DEL EMBALSE DE WIESNER CAUDAL MÍNIMO.

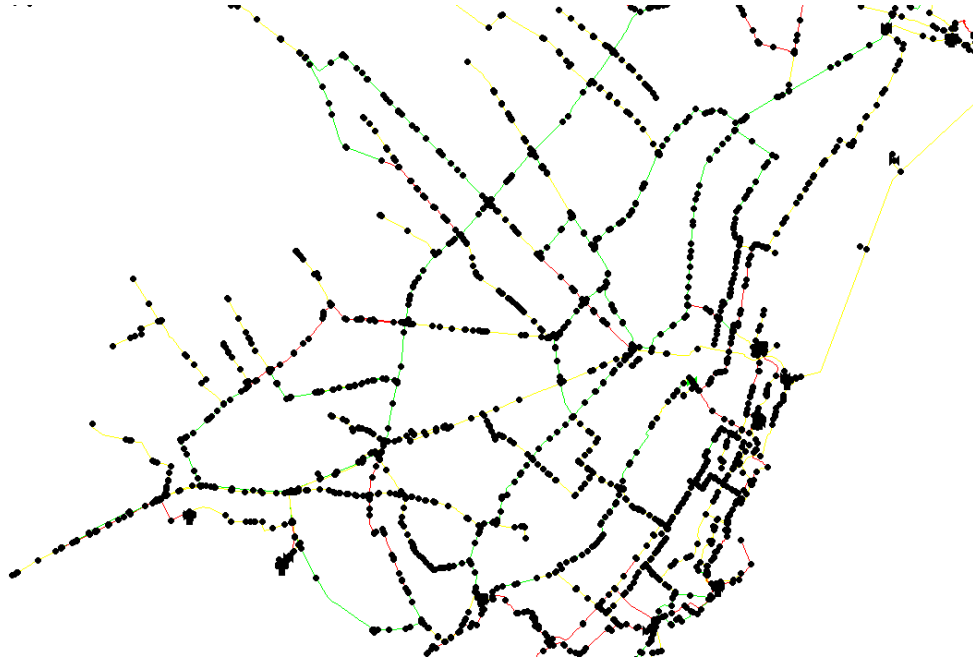


FIGURA 7 ENTRAMADO INTERNO DE LA RED MATRIZ DE BOGOTÁ CAUDAL MEDIO.

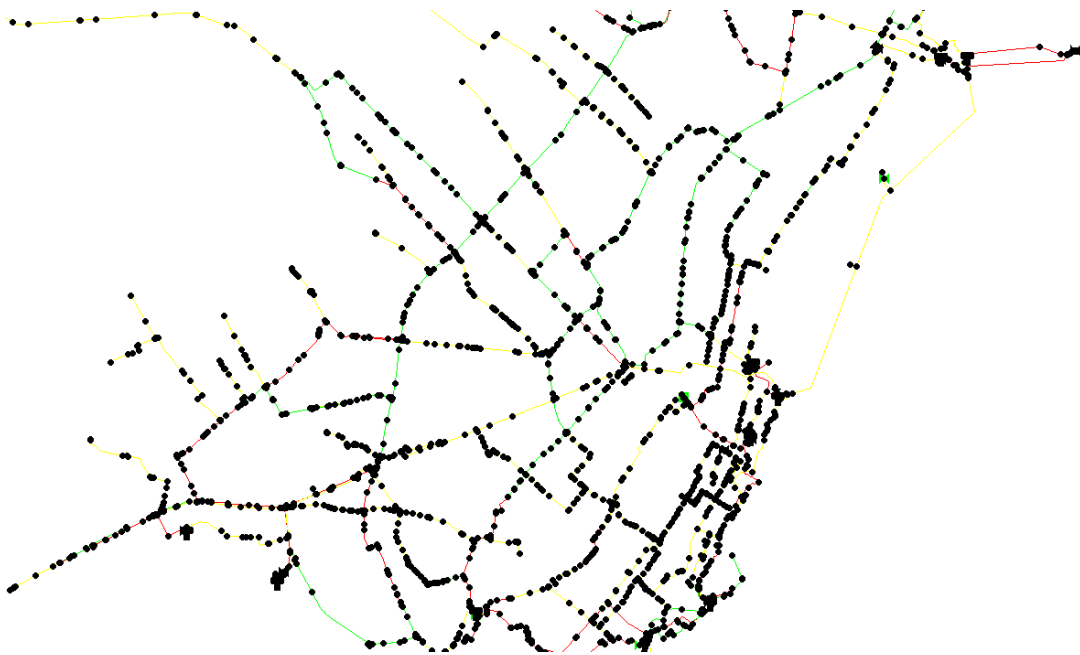


FIGURA 8 ENTRAMADO INTERNO DE LA RED MATRIZ DE BOGOTÁ CAUDAL MÁXIMO.

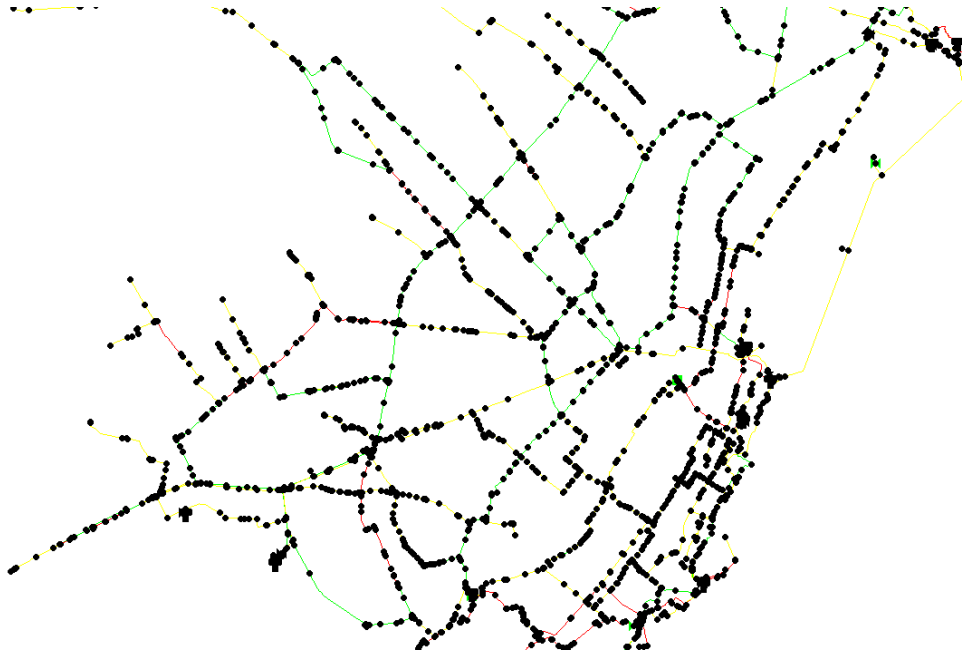


FIGURA 9 ENTRAMADO INTERNO RED MATRIZ DE BOGOTÁ CAUDAL MÍNIMO.

Las figuras anteriores muestran que en efecto las diferencias en la solución hidráulica de la red son bastante evidentes. Está claro que desde el inicio de los embalses, el caudal que está saliendo de los mismos es diferente entre las dos ecuaciones, llevando a que no sólo por la naturaleza empírica de la ecuación se estén subestimando y/o sobrestimando las pérdidas por fricción, sino que por causa de esta ecuación (empírica) la red está transportando una cantidad de masa diferente a la que se simula utilizando la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach. Los resultados de estos análisis mostraron que las diferencias máximas que se llegaron a presentar en la red fueron de números de Reynolds de 40000, entre un número de Reynolds de la red máximo de  $5 * 10^6$ , lo que no es una diferencia significativa y que por consiguiente no cambiaba de manera radical la hidráulica de la red. Para confirmar estos análisis se decidió hacer diagramas de Moody de algunas tuberías con el fin de ver que ocurría con ellas al aplicar las dos ecuaciones y si de alguna forma se podía ver alguna tendencia de lo que estaba pasando con el flujo. Estos resultados de se muestran a continuación:



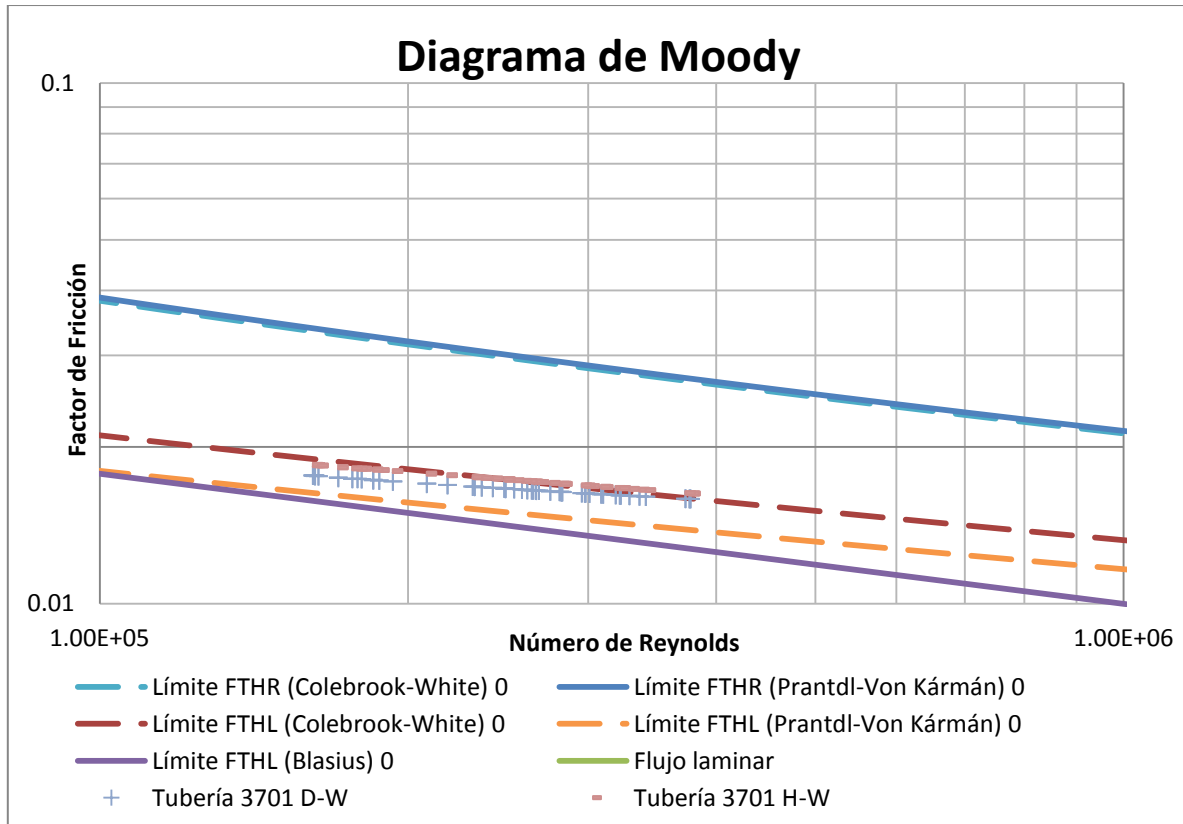


ILUSTRACIÓN 118 DIAGRAMA DE MOODY PARA LA TUBERÍA 3701 CON DIÁMETRO DE 508 MM Y CAUDAL MEDIO DE 37 L/S.

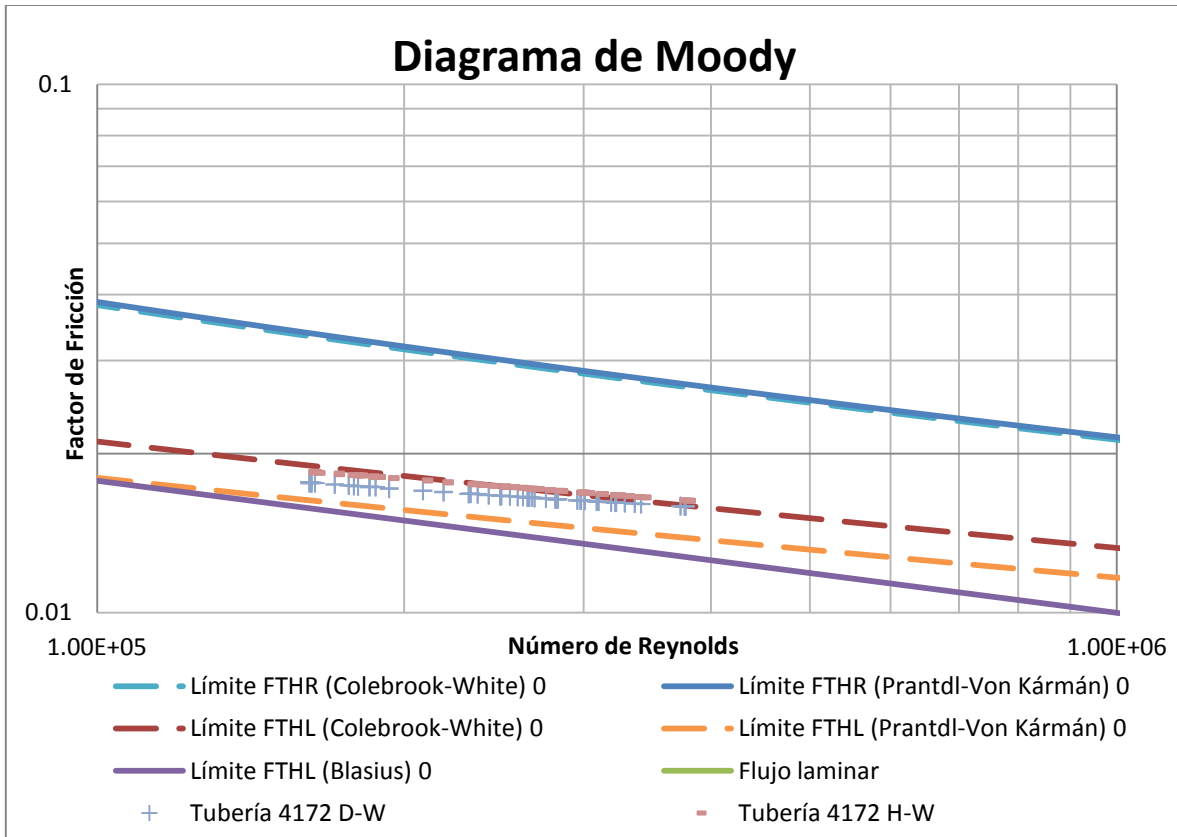


ILUSTRACIÓN 119 DIAGRAMA DE MOODY PARA LA TUBERÍA 4172 CON DIÁMETRO DE 508 MM Y CAUDAL MEDIO DE 37 L/S.

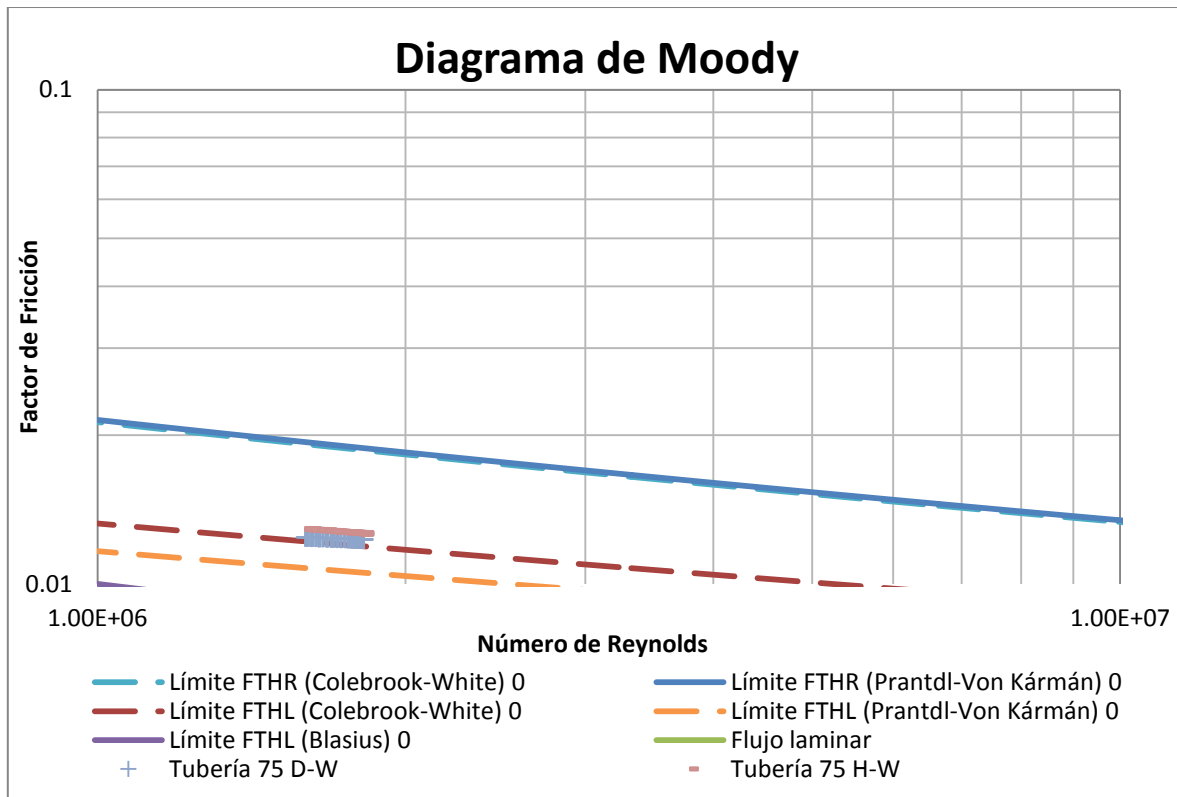


ILUSTRACIÓN 120 DIAGRAMA DE MOODY PARA LA TUBERÍA 75 CON DIÁMETRO DE 1524 MM Y CAUDAL MEDIO DE 700 L/S.

Como se puede ver en los Diagramas de Moody, las diferencias entre las dos ecuaciones son bastante pequeñas, si bien en algunos casos parece que existiera un desfase en el número de Reynolds y valores mayores en el factor de fricción cuando se calcula con la ecuación de Hazen-Williams. Estos resultados son coherentes teniendo en cuenta que hay 2 causas: La primera se relaciona con el hecho que la ecuación de Hazen-Williams suele subestimar o sobrestimar las pérdidas por fricción en las tuberías (e intrínsecamente los factores de fricción que se encuentran en las redes), según lo reporta la literatura y se ha confirmado en esta tesis. La segunda causa que se evidenció de manera más clara en esta investigación es la subestimación o sobrestimación de la masa de agua que está circulando en la red, lo que en efecto está causando que toda la hidráulica de la red esté cambiando.

Otro análisis importante de resaltar en la red matriz de Bogotá es que al comparar las gráficas que muestran la variación del coeficiente de Hazen-Williams con respecto al número de Reynolds (Ilustraciones 36, 37 y 38) en la Sección 4.3.1 Red Matriz de Bogotá con las gráficas generadas a partir de la investigación de Fabián Bombardelli y Marcelo García (Gráfica 4) (Fabián Bombardelli, 2003), se observa que las tendencias son bastante similares lo que significa que el coeficiente de Hazen-Williams presenta variaciones importantes en un



espectro amplio de números de Reynolds . Sin embargo se puede ver que para la red Bogotá, la media del coeficiente de Hazen-Williams se encontró muy cercana al valor de 140, que fue el valor teórico con el que se trabajó, concluyendo de manera preliminar que la red efectivamente se está comportando de manera muy similar a lo que se presenta en la realidad.

Por otro lado, al comparar estos resultados con los que arrojan la investigación de Liou (Liou, 1998), se observa una tendencia muy similar que se aprecian mejor en las ilustraciones anteriores y los datos de la Gráfica 2. Esto ratifica el hecho que el trabajar con un coeficiente constante de Hazen-Williams puede llegar a ser peligroso dada la alta variabilidad presentada, en especial entre números de Reynolds entre  $1 * 10^4$  y  $5 * 10^6$ . Esto significa que si bien la hidráulica de la red se está comportando de manera similar con las dos ecuaciones y muestran pocas diferencias, existen sectores específicos en que la variación del coeficiente presenta diferencias a tener en cuenta que si bien no tienen un impacto relevante en la hidráulica de esta red en particular, no implica que esto sea un problema menor o que pueda ser obviado, especialmente porque los rangos de números de Reynolds anteriormente nombrados son típicos de redes matrices y redes primarias de bombeo, es decir, redes que suministran los caudales a poblaciones.

Por su parte, los resultados encontrados con tanques y emisores, parecen indicar que el riesgo en que se incurre al utilizar la ecuación empírica no se limita a una diferencia de presiones de la red; también puede llegar a estar vinculado en la operación inadecuada de tanques, que afectaría la calidad del agua que se está entregando en la red por los tiempos de permanencia del agua en estos. Así mismo, las consecuencias de sobrestimar o subestimar caudales de la red, puede llegar a afectar la toma de decisiones a la hora de asignar válvulas para el control de fugas, sin mencionar los efectos negativos que se pueden llegar a tener al analizar de manera errónea la distribución de caudales con la ecuación de Hazen-Williams, dado el comportamiento divergente con respecto a la ecuación de Darcy-Weisbach que puede presentarse en determinados tramos de la red.

Para finalizar, es importante mencionar que si bien los resultados de la red Matriz de Bogotá no arrojan diferencias significativas en los indicadores hidráulicos considerados en esta investigación (salvo en algunos puntos y en muy baja magnitud), esto no implica que la ecuación de Hazen-Williams sea adecuada para operar las redes de distribución de agua potable. Lo que sí parece ser un factor relevante, es que esta red es bastante redundante, presenta múltiples entradas a los tanques de almacenamiento y rara vez se encontraron ramificaciones. Esas características parecieron ejercer un efecto de amortiguación en los indicadores hidráulicos generados al correr la ecuación empírica de Hazen-Williams; esto se ve en las bajas diferencias en presiones, pérdidas por fricción y números de Reynolds, todo lo cual influye en los coeficientes teóricos de Hazen-Williams que se aproximaron relativamente bien a los que se hallaron simulando la red con la ecuación de Darcy-Weisbach. Esto último es muy importante, ya que como se verá más adelante, cuando se probaron redes con otras características, se presentaron resultados significativamente diferentes. Así mismo, cuando se probó una red con bombeo que presentaba características similares, los resultados



---

arrojaron iguales resultados en algunos momentos del tiempo pero otros radicalmente divergentes en tiempos específicos del día.

---

#### 4.4.2 RED MATRIZ DE MEDELLÍN

---

Los resultados de la red matriz de Medellín serán mostrados y analizados de manera similar a lo expuesto en la red matriz de Bogotá.

A diferencia de la red mostrada anteriormente, la red matriz de Medellín presentó diferencias hidráulicas bastante más significativas por lo que el análisis y los resultados que se encontraron fueron más extensos y con un análisis más profundo, según se aprecia a continuación.

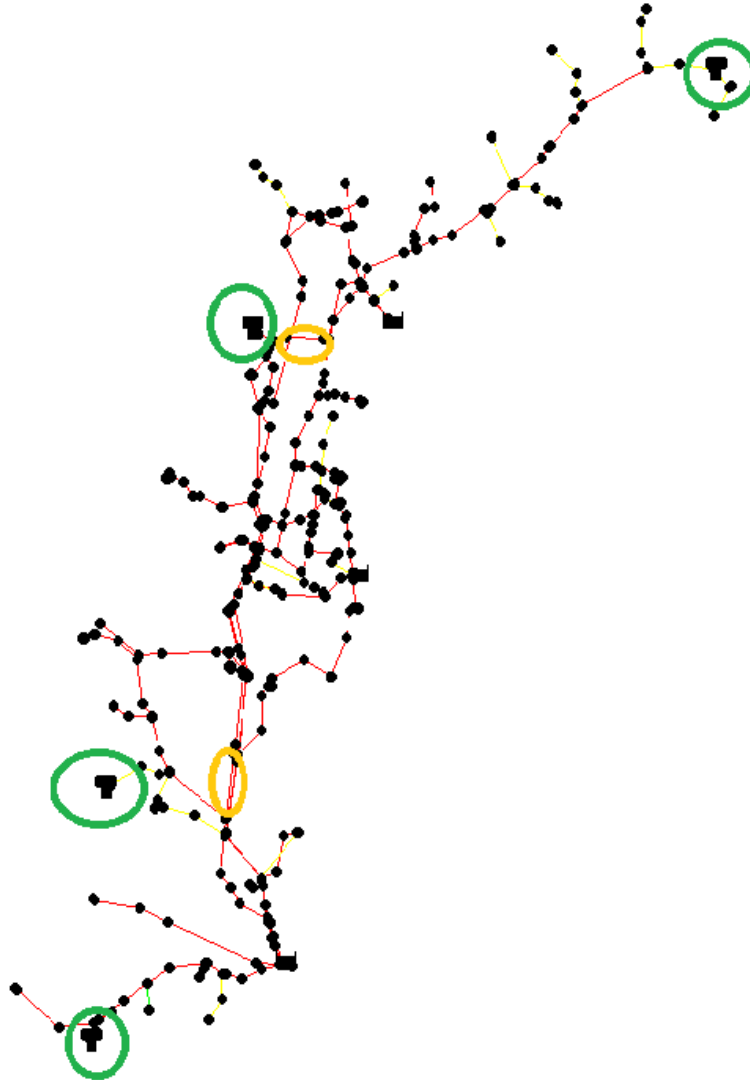


ILUSTRACIÓN 121 UBICACIÓN DE LOS TANQUES EN LA RED MATRIZ DE MEDELLÍN.

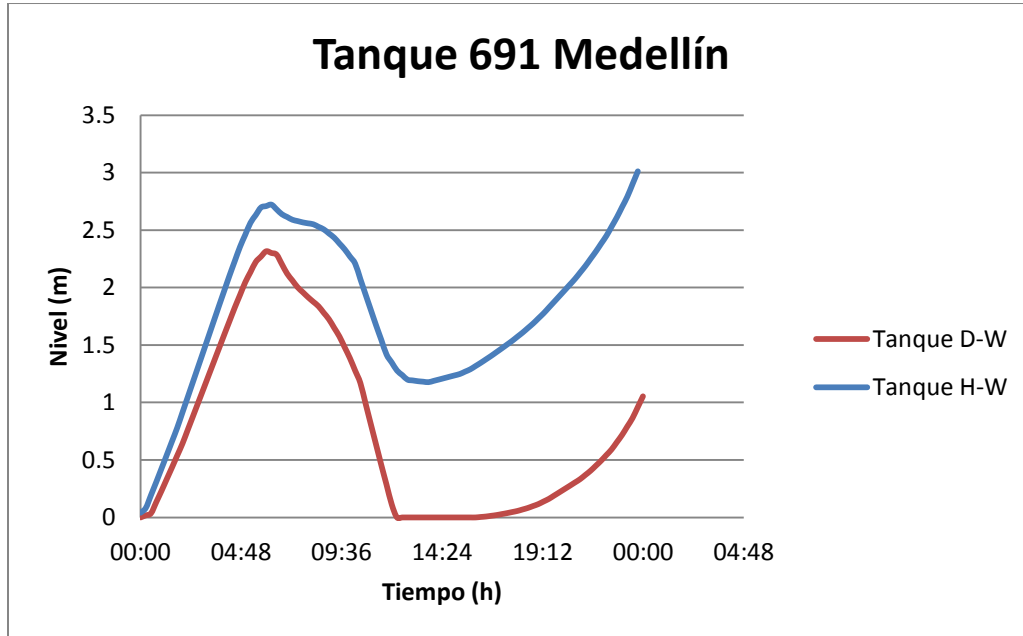


ILUSTRACIÓN 122 NIVEL TANQUE 691 MEDELLÍN.

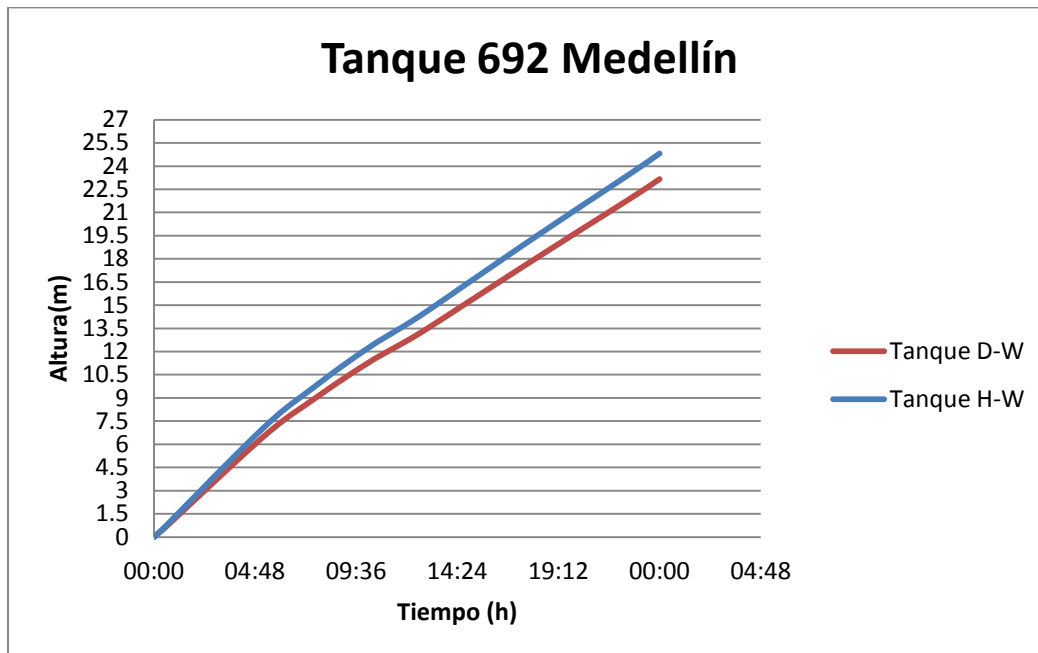


ILUSTRACIÓN 123 NIVEL TANQUE 692 MEDELLÍN.

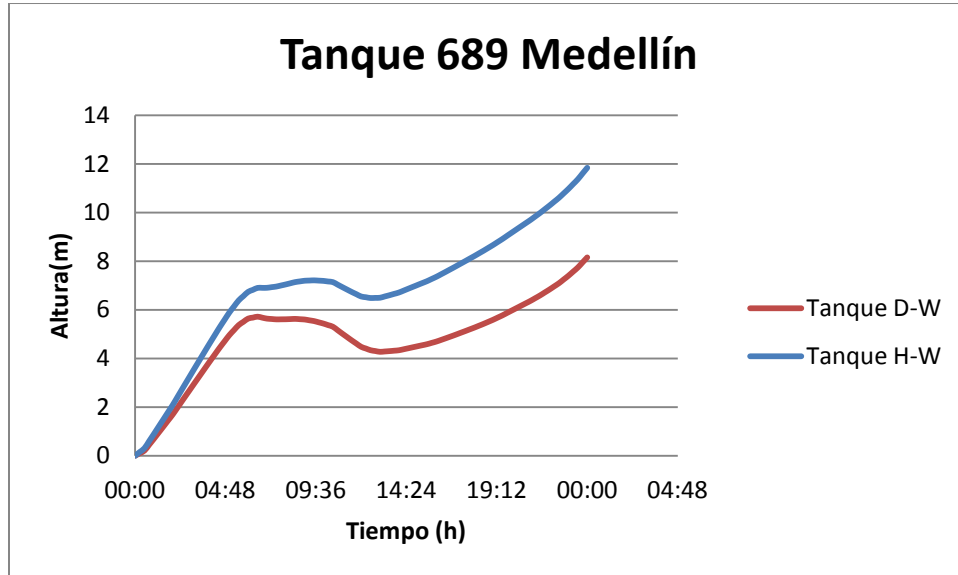


ILUSTRACIÓN 124 NIVEL TANQUE 689 MEDELLÍN.

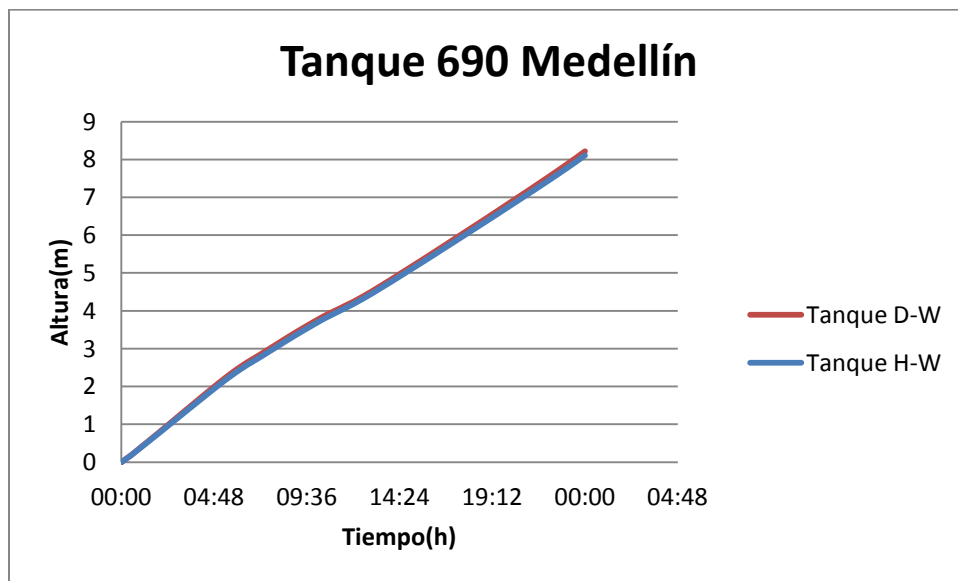


ILUSTRACIÓN 125 NIVEL TANQUE 690 MEDELLÍN.

Las ilustraciones anteriores muestran unos efectos hidráulicos importantes debido a que los patrones de llenado de los tanques en la red matriz de Medellín presentan altas diferencias entre las dos ecuaciones. Algo que se observó durante esta investigación es que el efecto de que sea una red con tuberías grandes, con tanques localizados en terminaciones altamente ramificadas y con altos caudales demandados, pareciera magnificar las diferencias hidráulicas entre la ecuación físicamente basada y la ecuación empírica.



Las consecuencias de estos efectos, son que de acuerdo con la ecuación de Hazen-Williams, los tanques 689, 691 y 692 tienen más cantidad de agua en el tiempo, siendo menor cuando la simulación se realiza con la ecuación de Darcy-Weisbach. Esto revalida lo que se observó y analizó en el análisis de emisores; es decir, el operario que está trabajando con la ecuación de Hazen-Williams creerá que el nivel del tanque puede ser suficiente para satisfacer las necesidades de un sector de la ciudad, cuando en la realidad el tanque puede no tener el nivel suficiente o estar completamente vacío.

Así mismo, el hecho de que los patrones de llenado de los tanques registren tantas diferencias entre las dos ecuaciones, implica que la hidráulica del sistema presenta un serio desbalance de masa en la red, que conlleva a que las presiones de la misma se vean afectadas; más adelante se mostrará una serie de resultados encontrados que soportan la afirmación acá mencionada.

Con el fin de evaluar si este efecto se repetía en escenarios diferentes, se probó a su vez, la red Matriz de Medellín pero con la presencia de solo 2 tanques y no 4 como se vio anteriormente. Los resultados se muestran a continuación:

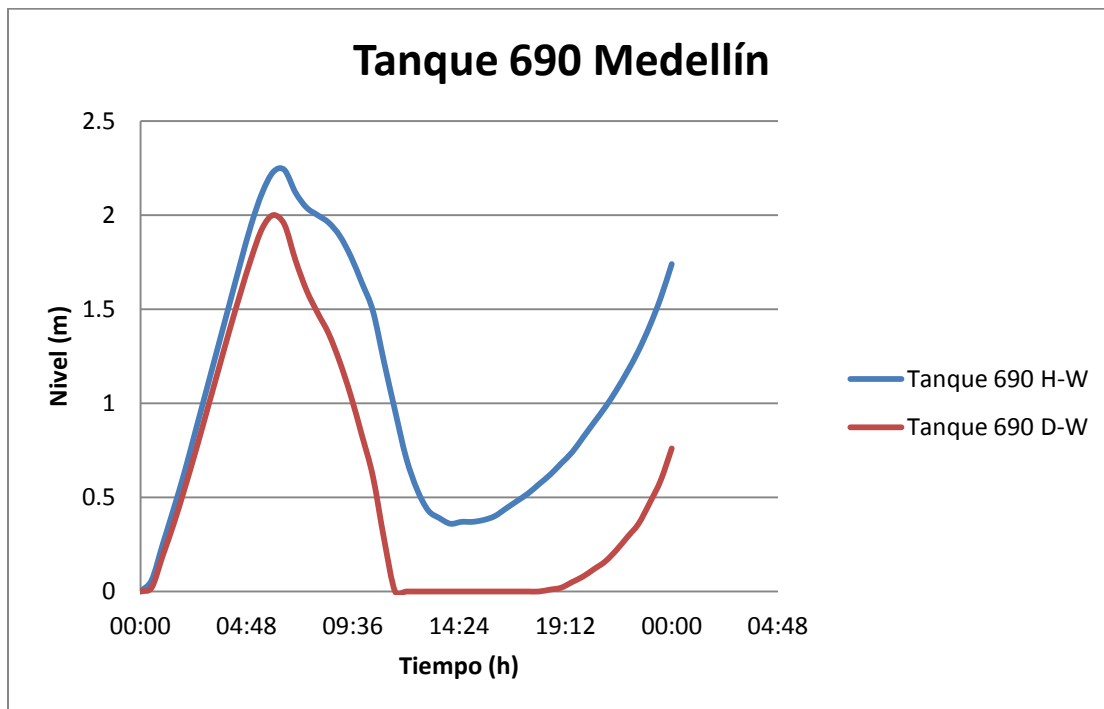


ILUSTRACIÓN 126 NIVEL TANQUE 690 RED MEDELLÍN CON 2 TANQUES

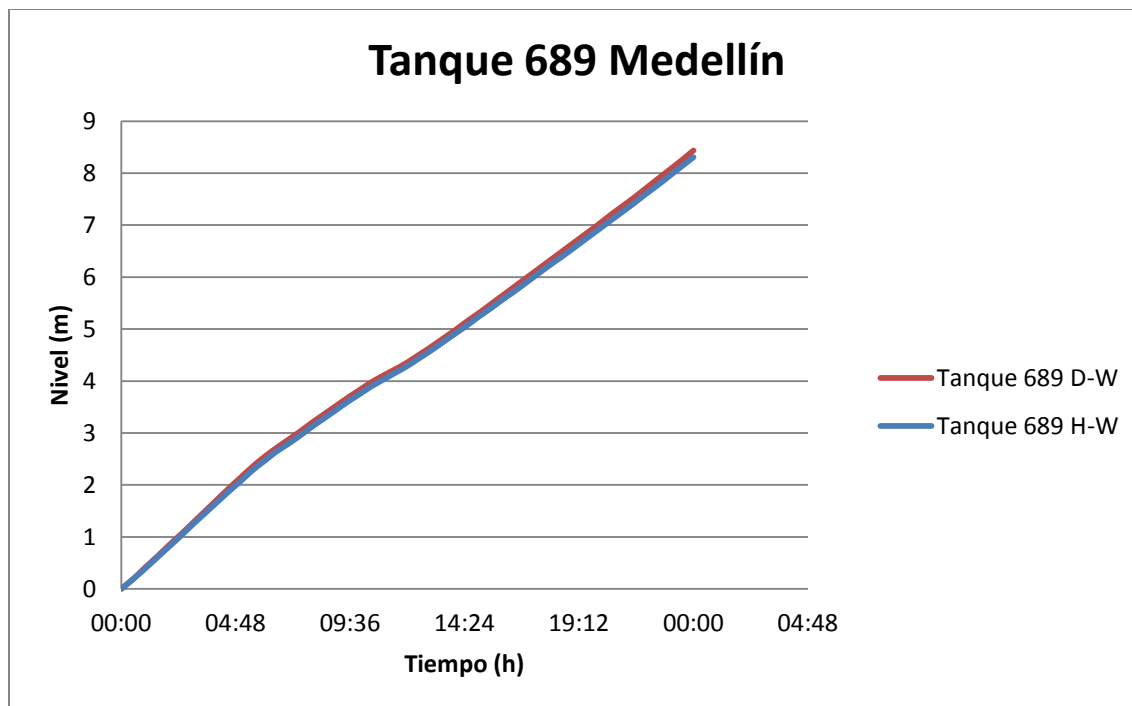


ILUSTRACIÓN 127 NIVEL TANQUE 689 RED MEDELLÍN CON 2 TANQUES.

Los resultados son bastante interesantes debido a que en uno de los tanques se presentó una diferencia importante, mientras que en el otro, las dos ecuaciones se comportaron de manera similar. Lo anterior era un resultado esperado teniendo en cuenta el análisis de emisores que se realizó anteriormente y el hecho de que en algunos puntos de la ciudad, las dos ecuaciones se están comportando de manera similar. Así mismo es revelador observar que el desbalance de masa en la red con 4 tanques y la red con sólo 2 parece afectar de manera similar a los tanques, con lo cual las tasas de llenado resultan ser mayores al utilizar la ecuación de Hazen-Williams. A partir de estos resultados, se decidió realizar un análisis de algunos tramos de interés de la red con el fin de analizar qué es lo que estaba ocurriendo con la hidráulica (número de Reynolds y pérdidas por fricción).

A continuación se muestran los resultados para algunas de las tuberías probadas:

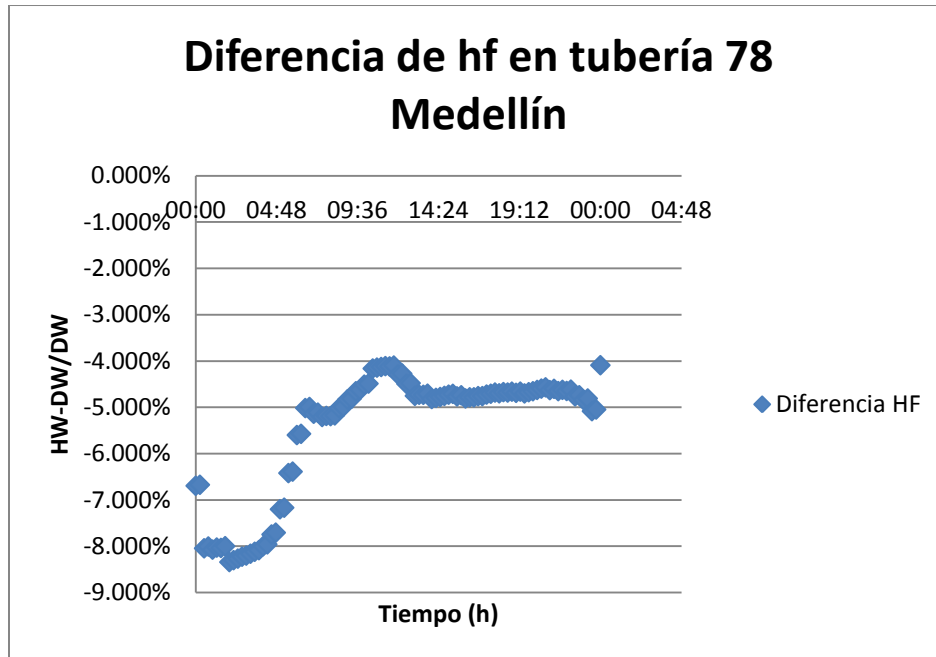


ILUSTRACIÓN 128 DIFERENCIAS EN PÉRDIDAS POR FRICCIÓN TUBERÍA 78 RED MATRIZ DE MEDELLÍN CON DIÁMETRO DE 1066 MM Y CAUDAL MEDIO DE 600 L/S.

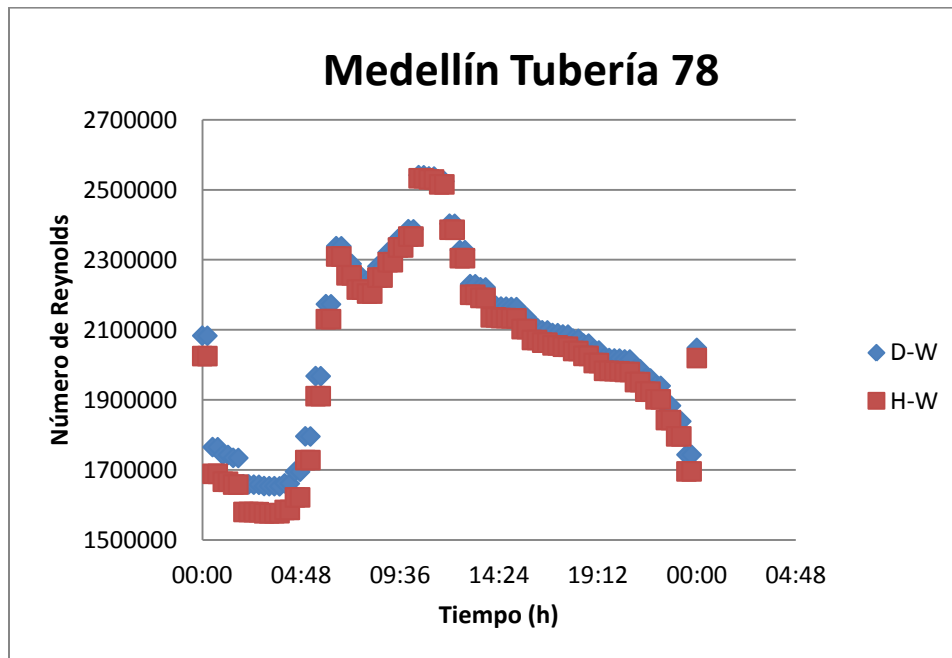


ILUSTRACIÓN 129 DIFERENCIA EN EL NÚMERO DE REYNOLDS TUBERÍA 78 RED MATRIZ DE MEDELLÍN CON DIÁMETRO DE 1066 MM Y CAUDAL MEDIO DE 600 L/S.

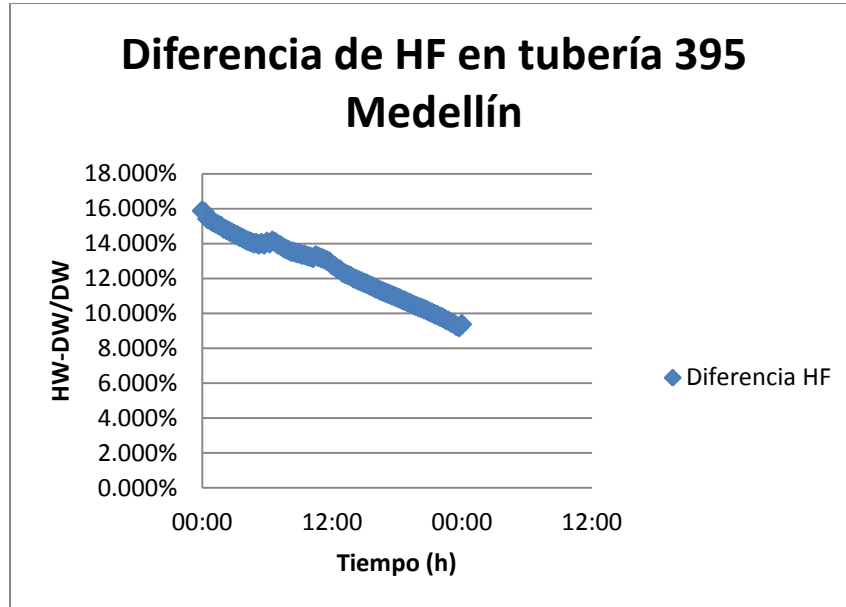


ILUSTRACIÓN 130 DIFERENCIAS EN PÉRDIDAS POR FRICCIÓN TUBERÍA 395 RED MATRIZ DE MEDELLÍN CON DIÁMETRO DE 914 MM Y CAUDAL MEDIO DE 390 L/S.

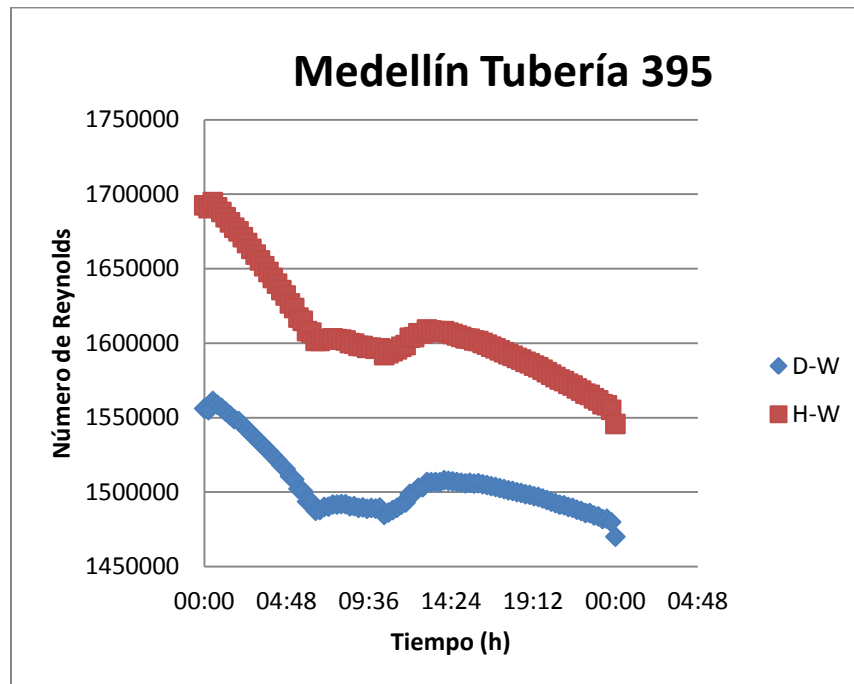


ILUSTRACIÓN 131 DIFERENCIA EN EL NÚMERO DE REYNOLDS TUBERÍA 395 RED MATRIZ DE MEDELLÍN CON DIÁMETRO DE 914 MM Y CAUDAL MEDIO DE 390 L/S.



En el desarrollo de esta investigación se simularon varios escenarios para toda la red y para diferentes tramos de tubería. Las 4 gráficas anteriores muestran los resultados que resultan más relevantes en tanto representan bien lo que está ocurriendo internamente en la red. Se aprecia claramente que las pérdidas por fricción entre las dos ecuaciones pueden alcanzar diferencias de hasta 16% lo que es coherente con el estudio de Rafael Flechas (Flechas, 2011). Como se verá más adelante, estas diferencias resultan ser mayores en otras redes. Así mismo, se puede ver que los números de Reynolds que arrojan las simulaciones presentan grandes diferencias, al punto que el número de Reynolds que arroja una tubería simulada con la ecuación empírica se vuelve una paralela casi perfecta comparándola con la misma tubería simulada con la ecuación físicamente basada, lo anterior implica que pese a que su comportamiento es similar, existe un desfase considerable en el caudal que está transportando la tubería.

Así mismo, cuando se utiliza la ecuación de Darcy Weisbach, resulta revelador que la diferencia en el número de Reynolds que se aprecia en la ilustración 130 esté decayendo de manera casi lineal; éste fenómeno probablemente esté causado porque el caudal que está circulando por la tubería es menor, y por ende la magnitud de los errores que se presentan en la misma esté decayendo. Este mismo resultado se presentó en varias de las tuberías de la red.

A continuación, la investigación avanzó tratando identificar las diferencias en la hidráulica de la red entre las dos ecuaciones, por lo que se procedió a ver cuáles tuberías presentaban mayores números de Reynolds al utilizar la ecuación de Hazen-Williams, cuales tuberías con la ecuación de Darcy-Weisbach y finalmente que tuberías no presentaban ninguna diferencia. Los resultados se muestran empleando las mismas convenciones de colores utilizados en la red matriz de Bogotá, es decir, ROJO las tuberías que tienen números de Reynolds mayores al utilizar la ecuación de Hazen-Williams, VERDE las tuberías que tienen mayor número de Reynolds con la ecuación de Darcy-Weisbach y finalmente en AMARILLO los tramos con hidráulica igual entre las dos ecuaciones.

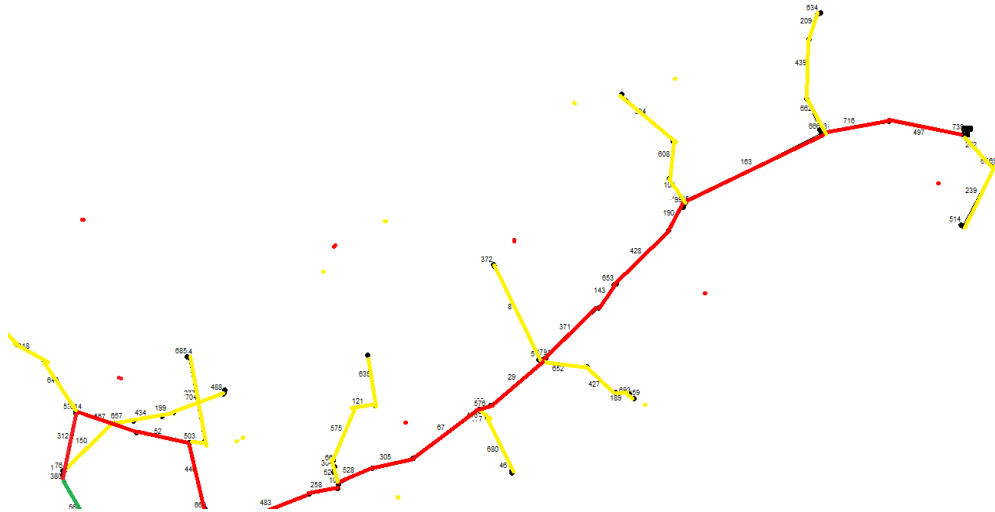


FIGURA 10 DIFERENCIAS HIDRÁULICAS EN LA RED MATRIZ DE MEDELLÍN (1).

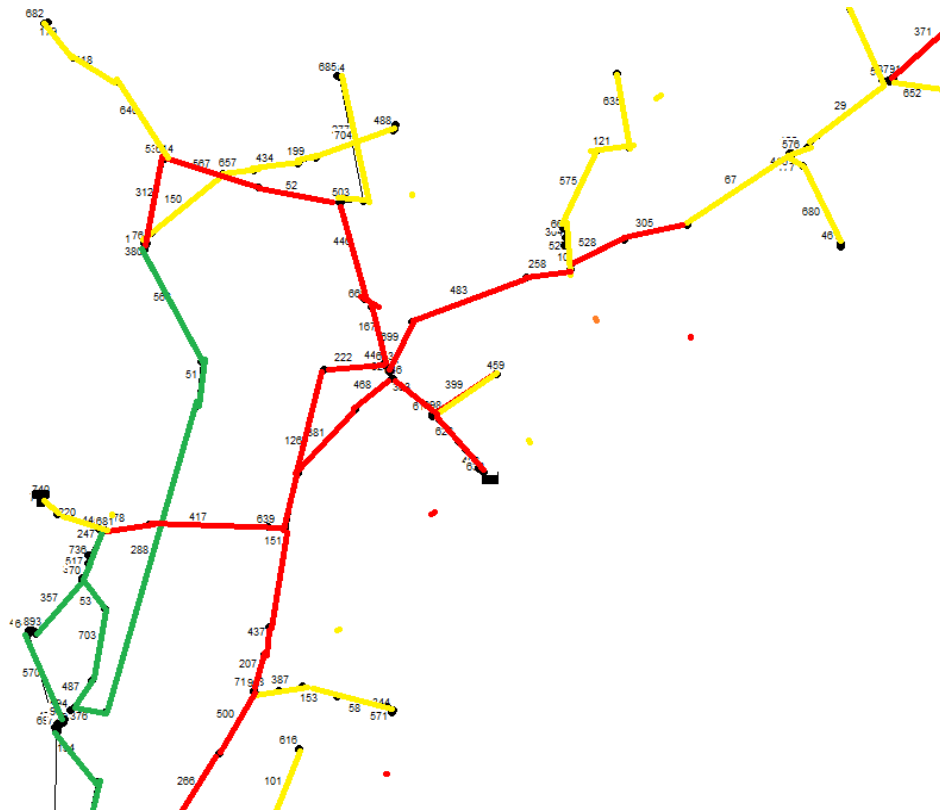


FIGURA 11 DIFERENCIAS HIDRÁULICAS EN LA RED MATRIZ DE MEDELLÍN (2).

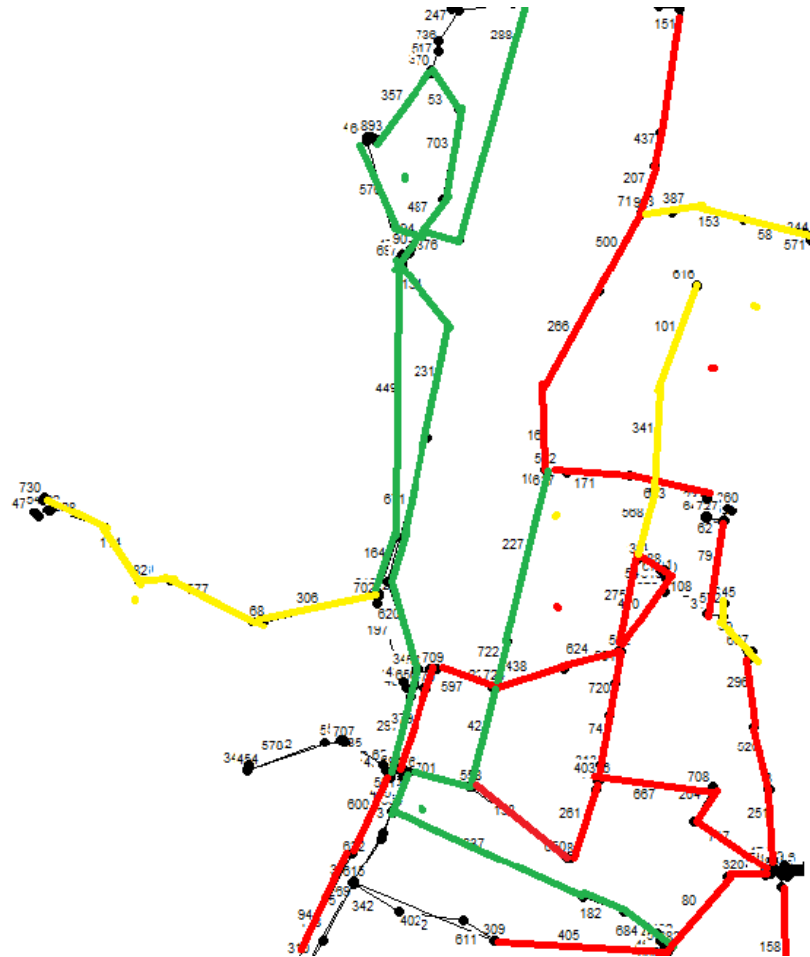


FIGURA 12 DIFERENCIAS HIDRÁULICAS EN LA RED MATRIZ DE MEDELLÍN (3).

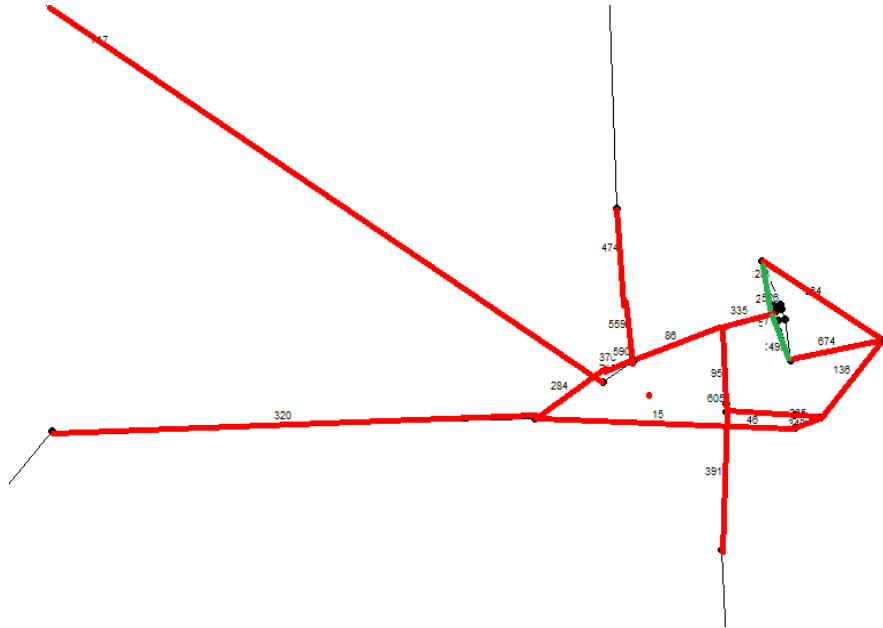


FIGURA 13 DIFERENCIAS HIDRÁULICAS EN LA RED MATRIZ DE MEDELLÍN (4).

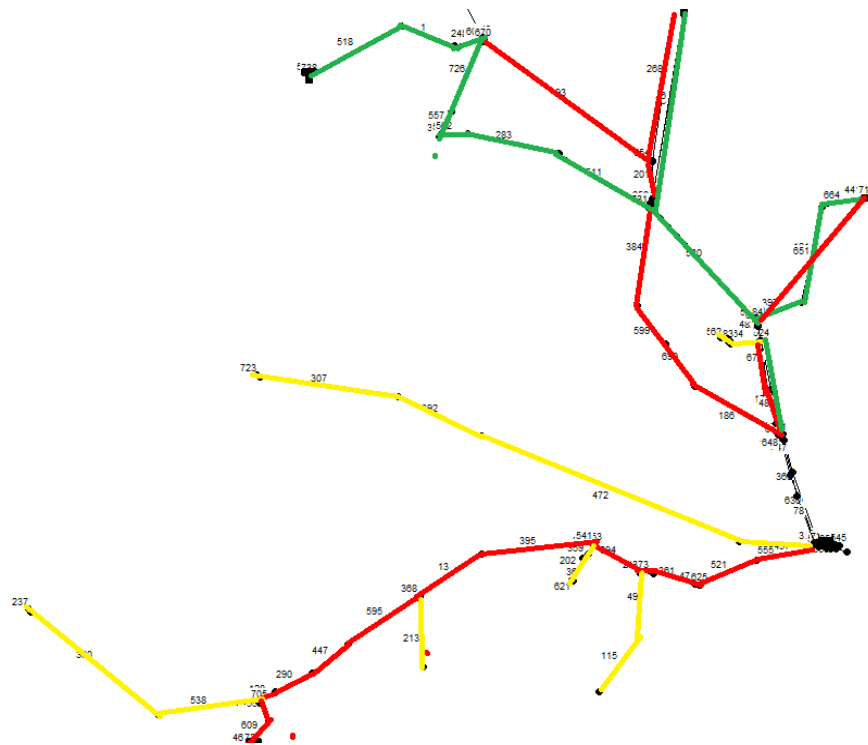


FIGURA 14 DIFERENCIAS HIDRÁULICAS EN LA RED MATRIZ DE MEDELLÍN (5).



Las gráficas anteriores muestran claramente que existen diferencias en la solución hidráulica entre las dos ecuaciones del estudio. Así mismo, se puede observar que a la salida de los embalses se están presentando números de Reynolds diferentes en las dos ecuaciones, lo que implica que en efecto los balances de masa de ambas ecuaciones presentan diferencias significativas que afectan la hidráulica y el funcionamiento de todo el sistema. Otro efecto importante a mencionar es que en las horas de mayor caudal, las diferencias se ven altamente magnificadas y en horarios de menor consumo el número de tuberías que presentan altas diferencias es menor; sin embargo, viendo los resultados y analizando a las demás redes, se concluye que existen una serie de tuberías que presentan diferencias permanentemente.

A partir de estos resultados se avanzó en identificar estas tuberías y determinar las características de las mismas. Los resultados de esto se muestran a continuación:

Las tuberías que presentan color azul son las tuberías que presentan las diferencias más importantes en términos del número de Reynolds y el caudal transportado.

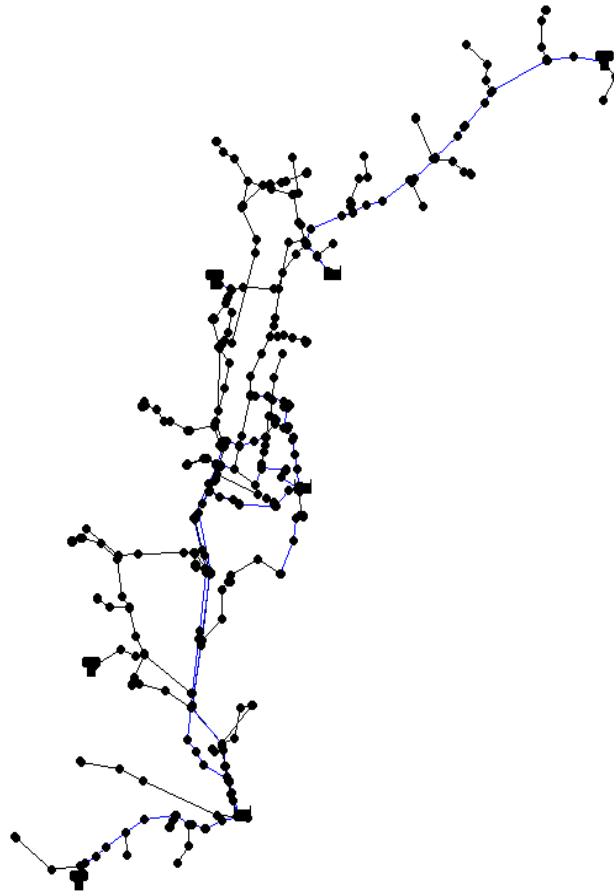


FIGURA 15 TUBERÍAS CON ALTAS DIFERENCIAS RED MATRIZ DE MEDELLÍN CAUDAL MEDIO.

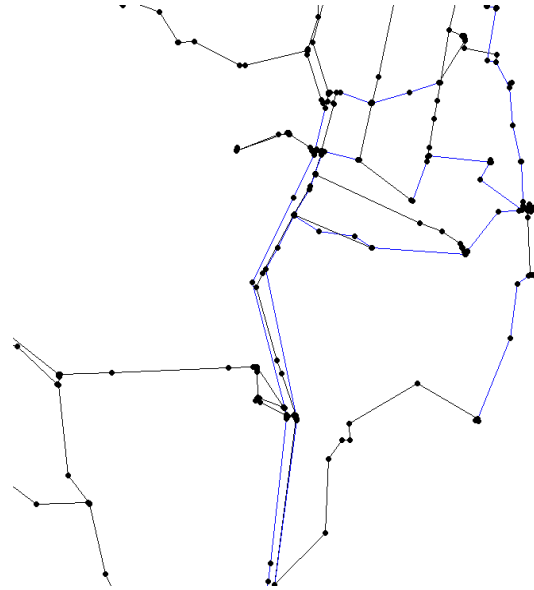


FIGURA 16 TUBERÍAS CON ALTAS DIFERENCIAS RED MATRIZ DE MEDELLÍN CAUDAL MEDIO (ACERCAMIENTO).

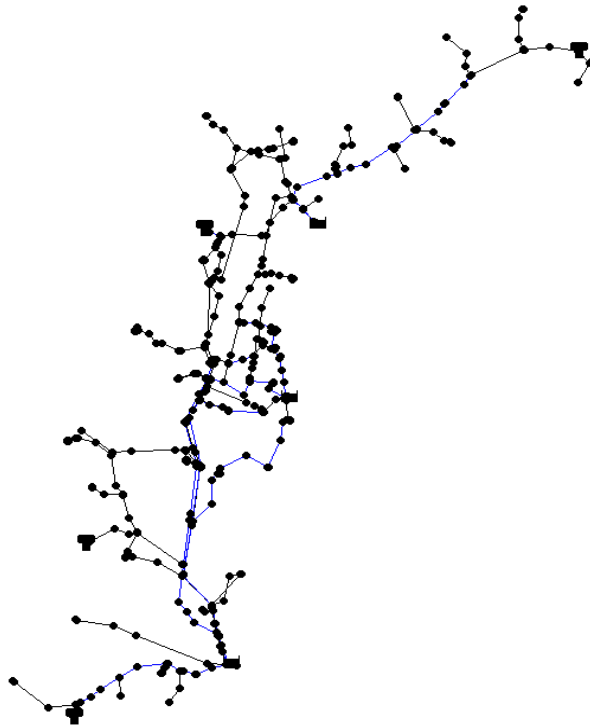


FIGURA 17 TUBERÍAS CON ALTAS DIFERENCIAS RED MATRIZ DE MEDELLÍN CAUDAL MÁXIMO.

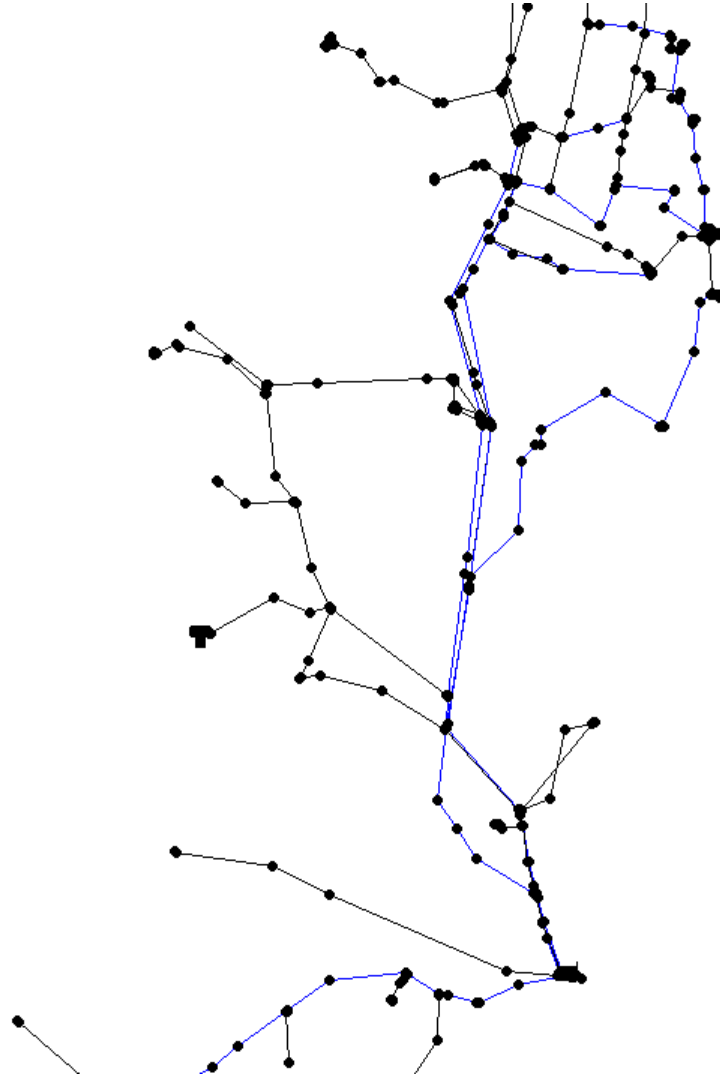


FIGURA 18 TUBERÍAS CON ALTAS DIFERENCIAS RED MATRIZ DE MEDELLÍN CAUDAL MÁXIMO (ACERCAMIENTO).

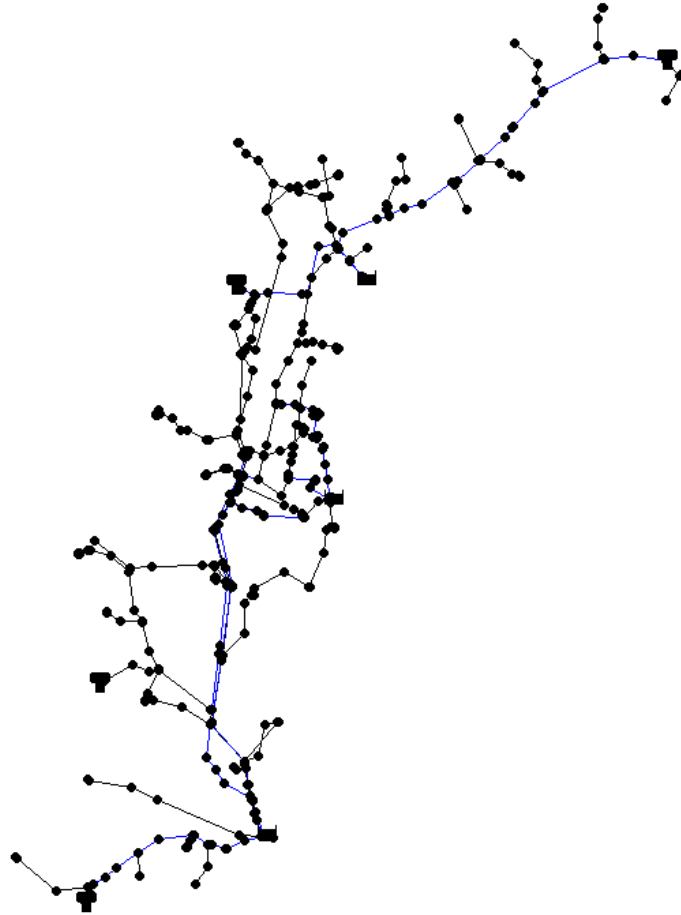


FIGURA 19 TUBERÍAS CON ALTAS DIFERENCIAS RED MATRIZ DE MEDELLÍN CAUDAL MÍNIMO.

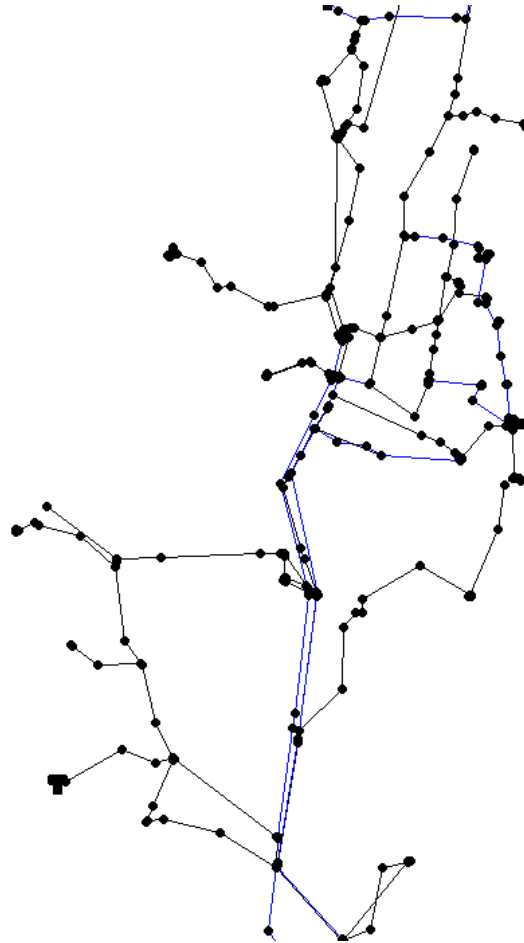


FIGURA 20 TUBERÍAS CON ALTAS DIFERENCIAS RED MATRIZ DE MEDELLÍN CAUDAL MÍNIMO (ACERCAMIENTO).

Las gráficas anteriores muestran comportamientos interesantes en cada una de las tuberías. En primer lugar se confirma que en algunas tuberías se presentan de manera continua las diferencias en términos del caudal transportado y pérdidas por fricción. Son precisamente estas tuberías las que cuentan con las características que afectan la solución hidráulica entre la ecuación físicamente basada y la ecuación empírica. Lo segundo y quizás lo más relevante de esta investigación, es que son tramos de tubería que se dirigen a las ramificaciones de la red y son los tramos que transportan la cantidad de caudal más significativa asociados con tuberías de gran diámetro. Esto es bastante importante considerando el hecho de que en Bogotá no se presentó este fenómeno a causa de ser una red poco ramificada y altamente redundante. Así mismo, en el caso de la Red Medellín este fenómeno se presentó cuando solo existía una tubería única de llegada a los tanques, cosa que no ocurrió en la red matriz de Bogotá.

Al continuar con las demás redes, estos efectos hidráulicos se vieron replicados, confirmado que lo encontrado en la red Matriz de Medellín no fue una simple coincidencia o un caso aislado. Es más, con los resultados que se mostrarán más adelante con la red de Bombeo de Dtown, que es una red con alta redundancia pero con algunas terminaciones ramificadas importantes, se confirman las diferencias más importantes que ocurren en la hidráulica del sistema.

Se muestran a continuación los efectos hidráulicos de las tuberías destacadas en las figuras anteriores. Esto incluye un análisis en el diagrama de Moody donde se verán claras diferencias entre la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach, así como unas tablas resúmenes donde se va a identificar claramente que las tuberías que transportan la mayor cantidad del caudal están causando un efecto significativo al sistema a tal punto que los caudales que están circulando por las tuberías o por tramos específicos de la misma son diferentes y están cambiando de manera drástica el comportamiento entre la red simulada con la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach.

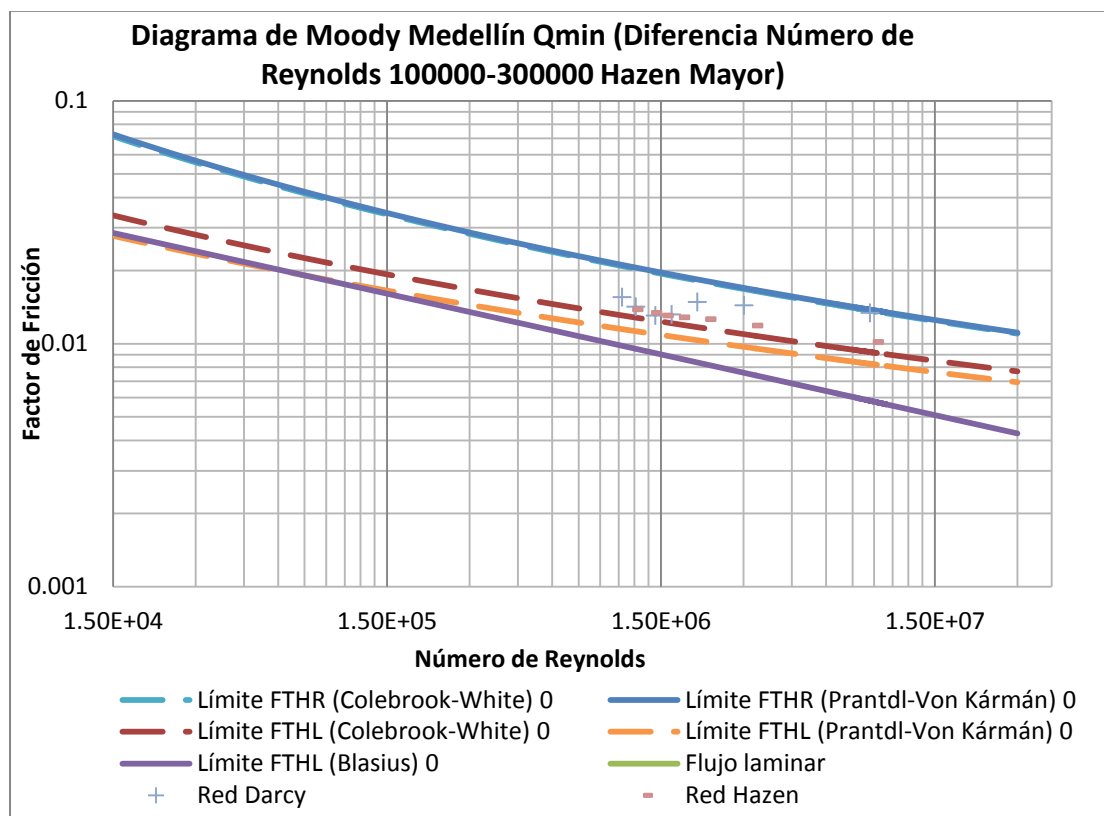


ILUSTRACIÓN 132 DIAGRAMA DE MOODY 1 RED MATRIZ DE MEDELLÍN CAUDAL MÍNIMO.

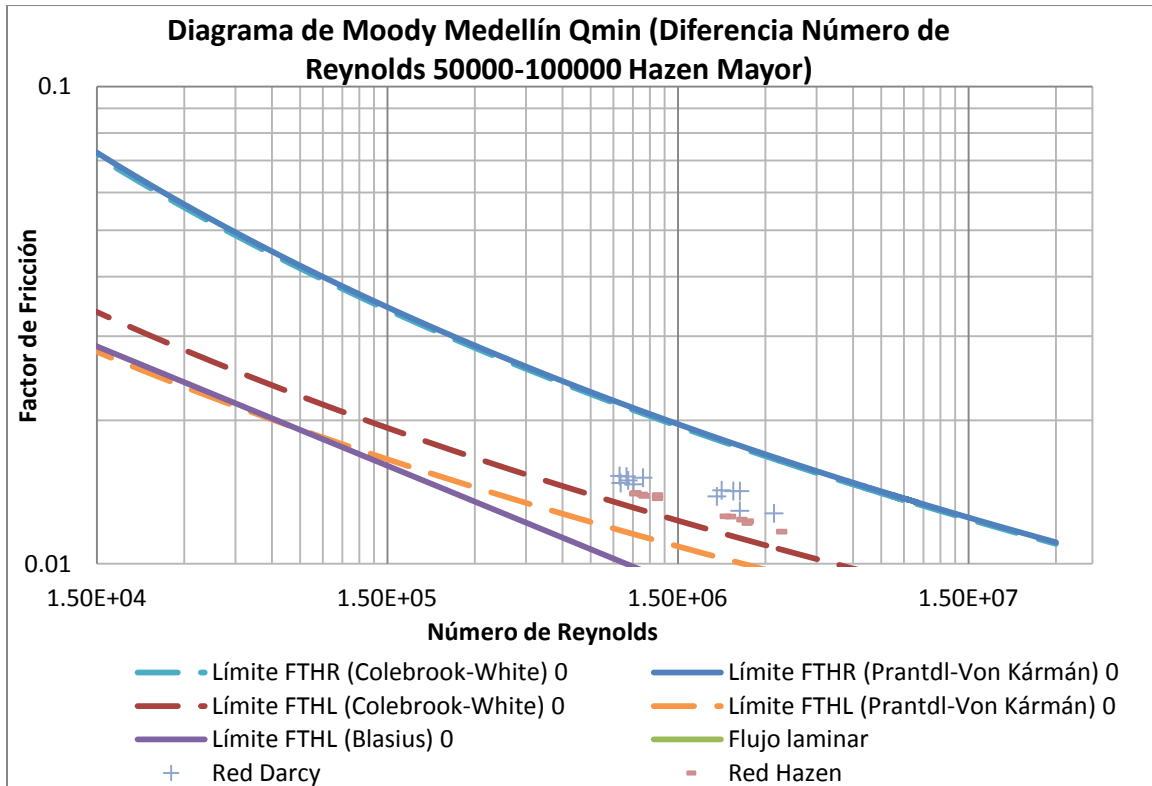


ILUSTRACIÓN 133 DIAGRAMA DE MOODY 2 RED MATRIZ DE MEDELLÍN CAUDAL MÍNIMO

Medellín Q <sub>min</sub> (Diferencias número de Reynolds 100000-300000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/355.6	0.377880187	0.344344902	1.05E+05	1.08E+06	0.015532	1.19E+06	0.013839	9.74%
Tramo 1/406.4	0.7977993	0.740523097	1.57E+05	2.04E+06	0.014836	2.19E+06	0.012605	7.73%
Tramo1/457.2	1.330562902	1.233351668	2.37E+05	3.01E+06	0.014375	3.25E+06	0.011865	7.88%
Tramo1/609.6	4.894837055	4.741772157	2.80E+05	8.69E+06	0.013381	8.97E+06	0.010155	3.23%
Tramo2/609.6	0.759477589	0.662266318	1.78E+05	1.21E+06	0.014191	1.39E+06	0.013377	14.68%
Tramo 1/914.1	1.439873374	1.342661812	1.19E+05	1.64E+06	0.013182	1.76E+06	0.012824	7.24%
Tramo 1/1066.8	1.463411236	1.366199856	1.02E+05	1.43E+06	0.013044	1.53E+06	0.013051	7.12%

TABLA 11 RESUMEN DE RESULTADOS PARA TUBERÍAS CON ALTAS DIFERENCIAS PARA EL CAUDAL MÍNIMO DEMANDADO DE LA RED MATRIZ DE MEDELLÍN.

Medellín Q <sub>min</sub> (Diferencias número de Reynolds 50000-100000) Hazen Mayor								
Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)	
0.448275497	0.41474012	9.22E+04	1.14E+06	0.015156	1.23E+06	0.013728	8.09%	
0.377880224	0.344344847	9.22E+04	9.46E+05	0.015286	1.04E+06	0.014083	9.74%	
0.39742535	0.363890103	9.22E+04	1.00E+06	0.015244	1.09E+06	0.013976	9.22%	
0.448275479	0.414740143	8.19E+04	1.01E+06	0.014961	1.23E+06	0.013938	21.60%	
1.093523789	1.059988469	7.37E+04	2.33E+06	0.014208	2.40E+06	0.012382	3.16%	
0.467676815	0.434141496	7.37E+04	9.54E+05	0.014777	1.03E+06	0.014041	7.72%	
1.150619791	1.117084471	7.37E+04	2.46E+06	0.014208	2.53E+06	0.012289	3.00%	
0.999968563	0.966784696	7.30E+04	2.13E+06	0.014264	2.20E+06	0.012563	3.43%	
0.504120231	0.480915663	5.10E+04	1.06E+06	0.014682	1.11E+06	0.013884	4.83%	
1.150619928	1.11708452	6.14E+04	2.05E+06	0.013851	2.11E+06	0.012581	3.00%	
2.698456168	2.634410223	7.82E+04	3.22E+06	0.012763	3.30E+06	0.011685	2.43%	
2.0528187	2.009605024	5.28E+04	2.45E+06	0.012919	2.51E+06	0.012181	2.15%	

TABLA 12 RESUMEN DE RESULTADOS PAR TUBERÍAS CON ALTAS DIFERENCIAS PARA EL CAUDAL MÍNIMO DEMANDADO DE LA RED MATRIZ DE MEDELLÍN 2.

Las primeras dos columnas de las tablas representan el caudal transportado con cada una de las ecuaciones, la tercera columna es la diferencia en el número de Reynolds entre las ecuaciones, la cuarta y sexta corresponden a los números de Reynolds de cada ecuación, la quinta y séptima columna corresponden a los factores de fricción de cada ecuación y finalmente la columna final equivale a la diferencia





Universidad de los Andes  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA  
*Estudio sobre el uso de la ecuación de Hazen-Williams vs la ecuación de Darcy-Weisbach en tuberías de gran diámetro (Sistemas Matrices) y en tuberías primarias de bombeo.*



---

porcentual del número de Reynolds entre las dos ecuaciones. Estas tablas se presentan en todos los casos de estudio, por lo que la descripción de las mismas solo se va a realizar en esta parte.

Los diagramas de Moody y las tablas resumen mostradas, representan los tramos de la red que registran diferencias considerables en el número de Reynolds (entre 50000 y 300000). Estos resultados muestran claramente que las tuberías que presentan diferencias se encuentran en números de Reynolds mayores a  $3 * 10^5$ ; estos números de Reynolds están asociados con tuberías de gran diámetro y por ende a tuberías que están diseñadas para transportar gran cantidad de caudal. Ahora, al analizar los diagramas de Moody, se puede indentificar un claro desfase entre los números de Reynolds entre la ecuación empírica y la ecuación físicamente basada, así mismo se puede ver claramente que hay diferencias importantes entre los factores de fricción entre las dos ecuaciones.

Por otro lado, si se centra la atención en las tablas resumen se puede evidenciar cuantitativamente que el caudal que están transportando las tuberías diverge de manera importante, por lo que es evidente que el cálculo de las pérdidas por fricción y por ende del factor de fricción va a variar de manera considerable entre la red simulada con la ecuación de Darcy-Weisbach y la ecuación de Hazen-Williams. Como se mencionó atrás, se encontró que con la ecuación de Hazen-Williams el caudal que salía de los embalses podía ser mayor o menor al que se encontraba con la red que utilizó la ecuación físicamente basada, lo cual se confirma con estos resultados, ya que se logró cuantificar que la diferencia de caudal que se puede presentar en esta red es de 184 L/s, lo que es una diferencia bastante importante a la hora de calcular las pérdidas de energía en la red. Por supuesto, el efecto de este exceso de caudal va más allá de lo que se acaba de nombrar ya que al observar las cifras de las tablas resumen resulta evidente que este exceso de caudal está generando que la distribuciones del caudal cambie de manera drástica en casi toda la red.

De esta manera, con la ecuación de Darcy-Weisbach, algunas tuberías están transportando un caudal porcentualmente muy inferior que el mismo tramo trabajado con la ecuación de Hazen-Williams, lo cual implica que la distribución de caudales en toda la red está desbalanceado al utilizar esta ecuación. Esto es coherente con lo mostrado en las Figuras 10, 11, 12, 13 y 14, es decir, hay tramos que transportan más caudal con la ecuación de Hazen-Williams y otros con la ecuación de Darcy-Weisbach.

Estos análisis conllevan muchas consecuencias hidráulicas y operacionales de gran importancia. La primera es que al tener caudales diferentes, los coeficientes teóricos de Hazen-Williams van a divergir de manera considerable con los coeficientes calculados a partir del funcionamiento de la red operada con la ecuación de Darcy-Weisbach, que es consecuente con lo analizado por Bombardelli y García (Fabián Bombardelli, 2003) y por Liou (Liou, 1998), es decir, se presenta una gran variabilidad del coeficiente de Hazen-Williams y este depende profundamente del flujo que esté circulando por la tubería; precisando que en este estudio las condiciones fueron influenciadas por el desbalance de masa que se presentó en la red causado por la solución hidráulica que arroja la ecuación de Hazen-Williams. En segunda instancia, si la red tuviera algún tipo de fugas, la cuantificación de las mismas y los impactos que podrían generar al utilizar la ecuación de Hazen-Williams podrían ser de magnitud, al subestimar la medida de control necesaria y como consecuencia empeorar el problema y dejar a sectores de la red con presiones inferiores a las exigidas en las normativas. En tercera instancia y de

acuerdo con lo mencionado desde el principio de la investigación, los llenados de los tanques son diferentes; en ciertos momentos, algunos de ellos presentan un vaciado total con la ecuación de Darcy-Weisbach y no con la ecuación de Hazen-Williams, lo que de por sí también tiene un efecto hidráulico importante en las presiones y en el funcionamiento general de la red (direcciones de flujo, caudal que pasa por las tuberías y presiones de la red).

La consecuencia final es que estos efectos se vieron presentes en una red con presencia de tanques en sectores ramificados, en tuberías de gran diámetro y que transportaban cantidades de agua considerable, lo que pareciera indicar que este tipo de sistemas matrices son especialmente vulnerables a efectos negativos cuando se utiliza la ecuación de Hazen-Williams con respecto a lo que se presentaría en una red con la hidráulica real del sistema (Darcy-Weisbach).

A continuación se muestran los resultados para el caudal máximo:

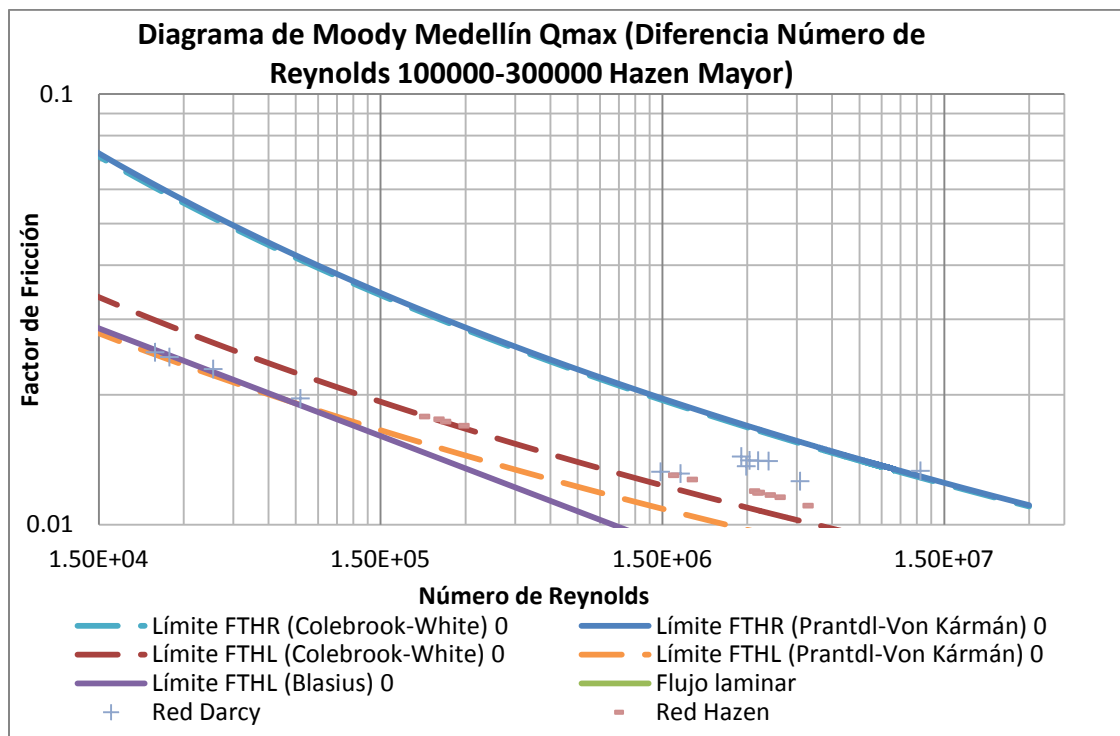


ILUSTRACIÓN 134 DIAGRAMA DE MOODY 1 RED MATRIZ DE MEDELLÍN CAUDAL MÁXIMO.

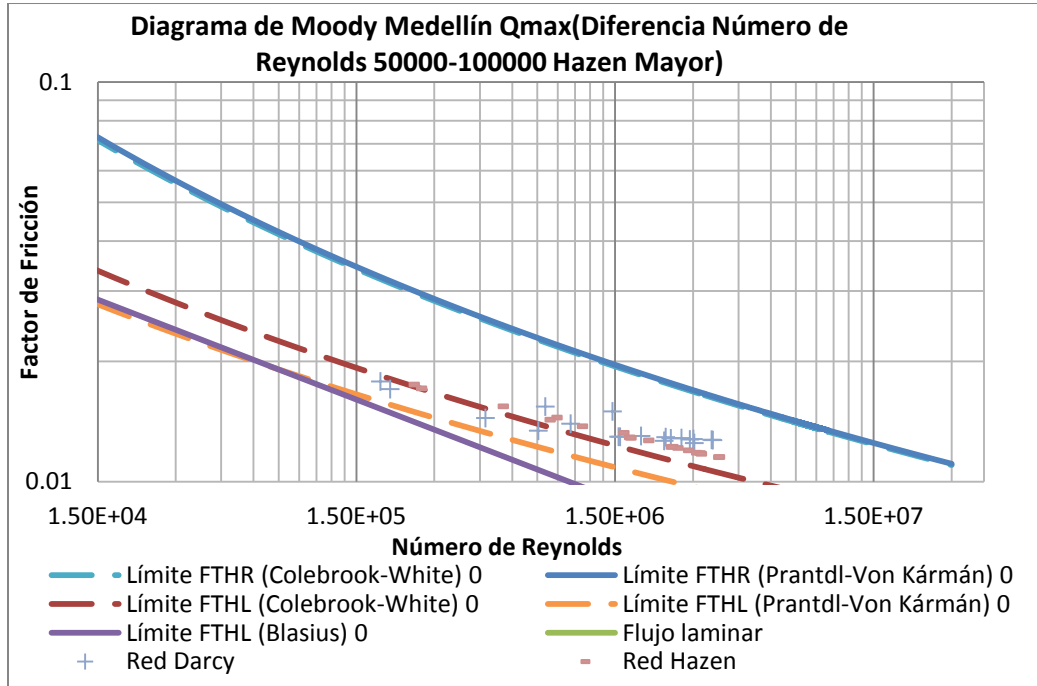


ILUSTRACIÓN 135 DIAGRAMA DE MOODY 2 RED MATRIZ DE MEDELLÍN CAUDAL MÁXIMO.

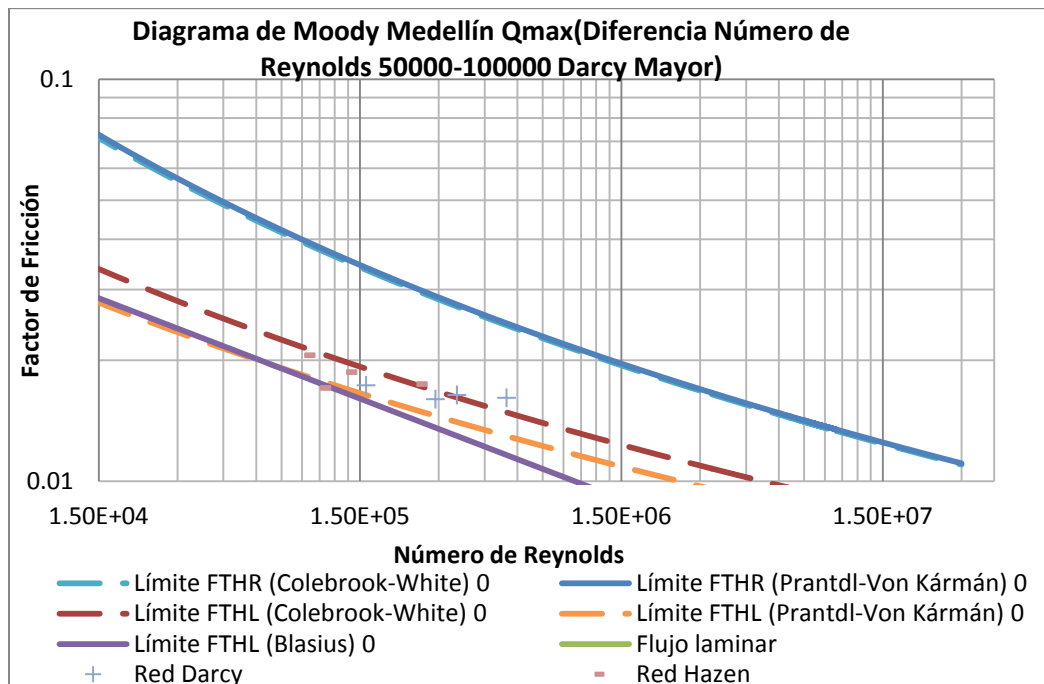


ILUSTRACIÓN 136 DIAGRAMA DE MOODY 3 RED MATRIZ DE MEDELLÍN CAUDAL MÁXIMO.



Medellín Qmáx (Diferencias número de Reynolds 100000-300000) Hazen Mayor									
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)	
Tramo 1/406.4	0.084857823	0.009738642	2.06E+05	2.68E+04	0.024496	2.33E+05	0.017563	771.35%	
Tramo 1/457.2	1.258401382	1.172251484	2.10E+05	2.86E+06	0.014393	3.07E+06	0.011964	7.35%	
Tramo2/457.2	0.084857691	0.009738591	1.84E+05	2.38E+04	0.025134	2.07E+05	0.017825	771.35%	
Tramo 1/508	1.722426817	1.627830003	2.08E+05	3.58E+06	0.014048	3.79E+06	0.011577	5.81%	
Tramo 2/508	0.1300937	0.035496886	2.08E+05	7.80E+04	0.019639	2.86E+05	0.01697	266.49%	
Tramo 3/508	1.589303007	1.494706396	2.08E+05	3.29E+06	0.014075	3.49E+06	0.011716	6.33%	
Tramo 4/508	0.111998973	0.017402767	2.08E+05	3.83E+04	0.022973	2.46E+05	0.01735	543.57%	
Tramo 5/508	1.453840235	1.393323958	1.33E+05	3.06E+06	0.014099	3.20E+06	0.011871	4.34%	
Tramo1/609.6	6.938926482	6.756240356	3.35E+05	1.24E+07	0.013331	1.27E+07	0.009644	2.70%	
Tramo 2/609.6	1.722426655	1.627829898	1.73E+05	2.98E+06	0.013667	3.16E+06	0.011853	5.81%	
Tramo 1/914.4	3.895558716	3.789505441	1.30E+05	4.63E+06	0.012613	4.76E+06	0.011068	2.80%	
Tramo 2/914.4	1.30430832	1.212321406	1.05E+05	1.48E+06	0.013266	1.59E+06	0.013022	7.11%	
Tramo 3/914.4	1.513267342	1.427117115	1.05E+05	1.74E+06	0.013138	1.85E+06	0.01273	6.04%	

TABLA 13 TABLA RESUMEN DE ALTAS DIFERENCIAS RED MATRIZ MEDELLÍN CAUDAL MÁXIMO 1 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 100000 Y 300000.

Medellín Q <sub>máx</sub> (Diferencias número de Reynolds 50000-100000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/355.6	0.07685674	0.059267417	5.52E+04	1.86E+05	0.017823	2.41E+05	0.017511	29.68%
Tramo 1/406.4	0.567917613	0.534669689	9.14E+04	1.47E+06	0.014998	1.56E+06	0.013256	6.22%
Tramo 2/406.4	0.313034379	0.293936777	5.25E+04	8.08E+05	0.015424	8.60E+05	0.014478	6.50%
Tramo 1/508	0.117172254	0.092333656	5.46E+04	2.03E+05	0.017056	2.58E+05	0.017133	26.90%
Tramo 1/914.4	2.972526947	2.908707561	7.80E+04	3.55E+06	0.012744	3.63E+06	0.011525	2.19%
Tramo 2/914.4	0.883612465	0.828882366	6.68E+04	1.01E+06	0.013973	1.08E+06	0.013771	6.60%
Tramo 3/914.4	2.993133313	2.940336518	6.45E+04	3.59E+06	0.012715	3.66E+06	0.011536	1.80%
Tramo 4/914.4	2.272625632	2.223289608	6.03E+04	2.72E+06	0.012864	2.78E+06	0.011987	2.22%
Tramo 5/914.4	0.436581256	0.388173139	5.91E+04	4.74E+05	0.014441	5.33E+05	0.015445	12.47%
Tramo 6/914.4	2.441718798	2.396181743	5.56E+04	2.93E+06	0.01276	2.98E+06	0.011825	1.90%
Tramo 7/914.4	2.518327277	2.472790222	5.56E+04	3.02E+06	0.012793	3.08E+06	0.011805	1.84%
Tramo 8/914.4	1.977192633	1.93205616	5.51E+04	2.36E+06	0.012932	2.42E+06	0.012237	2.34%
Tramo 9/914.4	2.067744673	2.022948367	5.47E+04	2.47E+06	0.012841	2.53E+06	0.012154	2.21%
Tramo 10/914.4	1.594049761	1.551377857	5.21E+04	1.89E+06	0.013019	1.95E+06	0.012694	2.75%
Tramo 1/1066.8	1.568147787	1.481997578	9.02E+04	1.55E+06	0.012966	1.64E+06	0.012914	5.81%
Tramo 2/1066.8	1.588139233	1.501989024	9.02E+04	1.57E+06	0.012961	1.66E+06	0.012885	5.74%
Tramo 3/1066.8	2.972526783	2.908707178	6.68E+04	3.05E+06	0.012499	3.11E+06	0.011751	2.19%
Tramo 4/1066.8	2.272625942	2.223289097	5.17E+04	2.33E+06	0.012661	2.38E+06	0.012227	2.22%
Tramo 1/1219.2	0.883612101	0.828883023	5.01E+04	7.59E+05	0.013425	8.09E+05	0.0143	6.60%

TABLA 14 TABLA RESUMEN DE ALTAS DIFERENCIAS RED MATRIZ MEDELLÍN CAUDAL MÁXIMO 2 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 50000 Y 100000.

Medellín Q <sub>máx</sub> (Diferencias número de Reynolds 50000-100000) Darcy Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/355.6	0.079274158	0.173870484	-2.97E+05	5.46E+05	0.016122	2.49E+05	0.017438	-54.41%
Tramo 1/406.4	0.033702971	0.128299436	-2.60E+05	3.53E+05	0.016386	9.26E+04	0.02057	-73.73%
Tramo 1/609.6	0.073127278	0.159277213	-1.58E+05	2.92E+05	0.015995	1.34E+05	0.018679	-54.09%
Tramo 1/1066.8	0.101640317	0.151339164	-5.20E+04	1.58E+05	0.017317	1.06E+05	0.017063	-32.84%

TABLA 15 TABLA RESUMEN DE ALTAS DIFERENCIAS RED MATRIZ MEDELLÍN CAUDAL MÁXIMO 3 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 50000 Y 100000.



Los resultados con caudal máximo muestran tendencias similares, pero como se mencionó con anterioridad, los efectos están magnificados; no sólo porque es el momento donde más se está presentando el desbalance de masa en la red, sino porque el número de tramos que presentan altas diferencias se vio incrementado. Adicionalmente se identifican diferencias importantes en aquellos tramos cuyas tuberías están transportando más caudal cuando se emplea la ecuación de Darcy-Weisbach respecto a lo encontrado con la ecuación de Hazen-Williams. En resumen, cuando en esta red se presenta el caudal máximo demandado, las más altas diferencias en el número de Reynolds se registran en un mayor número de tramos cuando se emplea la ecuación de Hazen-Williams respecto a la ecuación de Darcy-Weisbach. Este resultado soporta una vez más que la red presenta una hidráulica radicalmente diferente entre las dos ecuaciones, advirtiendo de paso los peligros de utilizar la ecuación de Hazen-Williams en sistemas matrices ramificados y con la presencia de emisores y tanques.

En cuanto al diagrama de Moody, se puede observar que las diferencias entre las dos ecuaciones se vieron severamente magnificadas; es decir, el desfase en los números de Reynolds y las diferencias entre los factores de fricción son realmente importantes. Así mismo, la magnitud de la diferencia en cuanto a los números de Reynolds parecen incoherentes, pero se presentan de este modo ya que la diferencia de caudal que circula por cada tubería es considerable. Un detalle curioso que se puede ver es que cuando la diferencia es mayor en los tramos con la ecuación de Darcy-Weisbach, los números de Reynolds están más cercanos al  $1 * 10^5$  que a  $1 * 10^6$ , y casualmente se presentan en tramos con diámetros menores, mientras que con la ecuación de Hazen-Williams las grandes diferencias se presentan en tramos con diámetros mayores.

Finalmente, se presentan los resultados para el caudal medio:

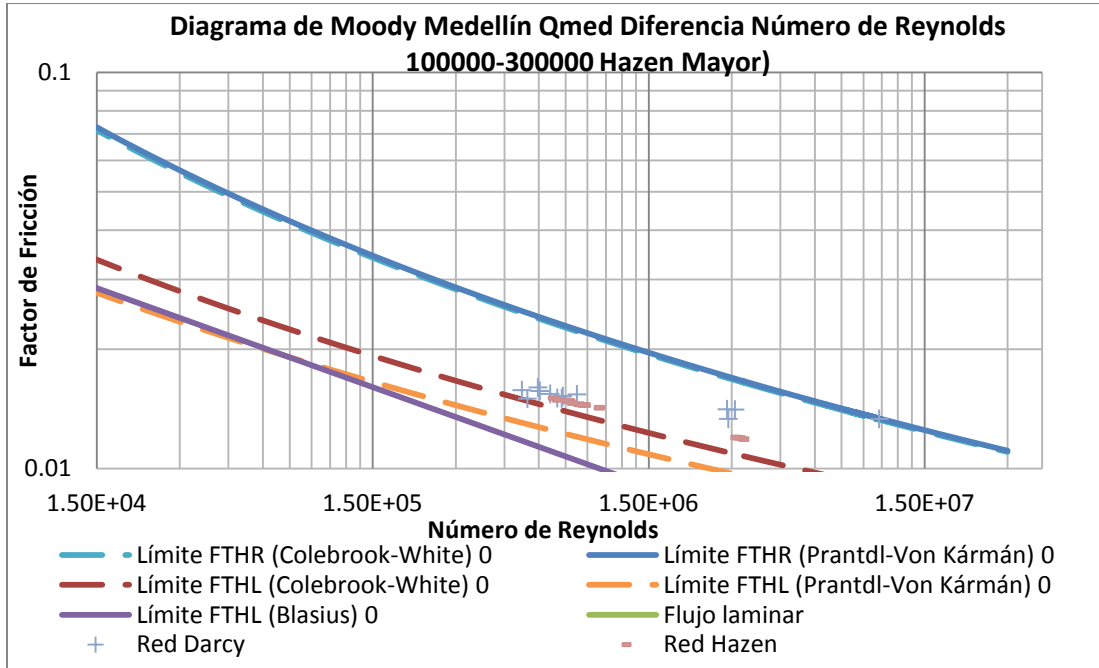


ILUSTRACIÓN 137 DIAGRAMA DE MOODY 1 RED MATRIZ DE MEDELLÍN CAUDAL MEDIO.

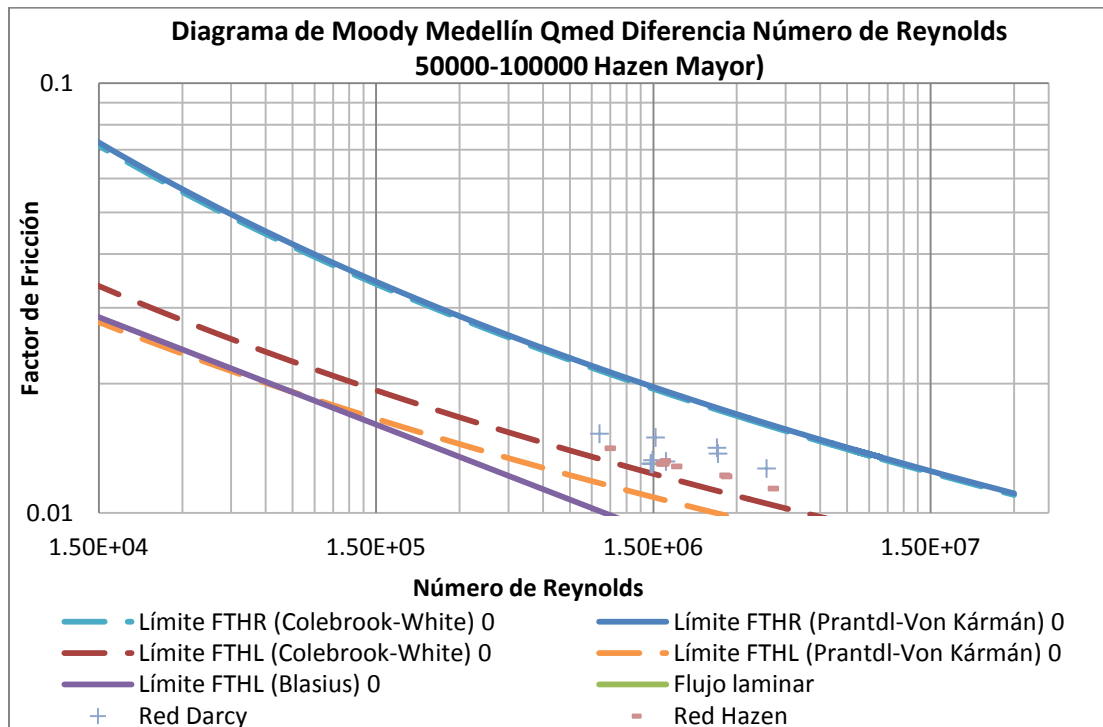


ILUSTRACIÓN 138 DIAGRAMA DE MOODY 2 RED MATRIZ DE MEDELLÍN CAUDAL MEDIO.



Medellín Qmed (Diferencias número de Reynolds 10000-300000) Hazen Mayor									
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)	
Tramo 1/355.6	0.237910566	0.189845645	1.51E+05	5.96E+05	0.016034	7.47E+05	0.01482	25.32%	
Tramo 1/406.4	0.237910528	0.189845667	1.32E+05	5.22E+05	0.015784	6.54E+05	0.015076	25.32%	
Tramo 2/406.4	0.268626243	0.220561383	1.32E+05	6.06E+05	0.015704	7.38E+05	0.014809	21.79%	
Tramo 3/406.4	0.348538342	0.300473611	1.32E+05	8.26E+05	0.015399	9.58E+05	0.014248	16.00%	
Tramo 1/457.2	1.26688569	1.195643541	1.74E+05	2.92E+06	0.013355	3.09E+06	0.011952	5.96%	
Tramo 2/457.2	0.34853844	0.300473609	1.17E+05	7.34E+05	0.015248	8.51E+05	0.014467	16.00%	
Tramo 1/508	1.45228971	1.404224857	1.06E+05	3.09E+06	0.014097	3.19E+06	0.011873	3.42%	
Tramo 2/508	0.366832096	0.318767243	1.06E+05	7.01E+05	0.01507	8.07E+05	0.01455	15.08%	
Tramo 3/508	0.379027937	0.330963084	1.06E+05	7.28E+05	0.015038	8.33E+05	0.014484	14.52%	
Tramo 4/508	0.348538334	0.300473481	1.06E+05	6.61E+05	0.01544	7.66E+05	0.014638	16.00%	
Tramo 5/508	1.362561949	1.314497097	1.06E+05	2.89E+06	0.014121	3.00E+06	0.011986	3.66%	
Tramo 1/609.6	5.744988755	5.61182603	2.44E+05	1.03E+07	0.013355	1.05E+07	0.009917	2.37%	
Tramo 2/609.6	0.369411058	0.298168927	1.31E+05	5.46E+05	0.015027	6.77E+05	0.014914	23.89%	

TABLA 16 TABLA RESUMEN DE ALTAS DIFERENCIAS RED MATRIZ MEDELLÍN CAUDAL MEDIO 1 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 10000 Y 300000.

Medellín Qmed (Diferencias número de Reynolds 50000-100000) Hazen Mayor									
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)	
Tramo 1/406.4	0.581948335	0.557428557	6.74E+04	1.53E+06	0.014975	1.60E+06	0.013208	4.40%	
Tramo 2/406.4	0.368149624	0.349940844	5.00E+04	9.62E+05	0.01528	1.01E+06	0.014135	5.20%	
Tramo 1/508	1.192732249	1.160050022	7.19E+04	2.55E+06	0.01417	2.62E+06	0.012225	2.82%	
Tramo 1/609.6	1.452289758	1.4042248	8.81E+04	2.57E+06	0.013735	2.66E+06	0.012155	3.42%	
Tramo 1/914.4	1.293893827	1.222651186	8.70E+04	1.49E+06	0.01326	1.58E+06	0.013028	5.83%	
Tramo 2/914.4	1.438669656	1.367427671	8.70E+04	1.67E+06	0.013169	1.76E+06	0.012826	5.21%	
Tramo 3/914.4	3.20947225	3.152687358	6.94E+04	3.85E+06	0.012684	3.92E+06	0.01139	1.80%	
Tramo 1/1066.8	1.48913572	1.417892841	7.46E+04	1.48E+06	0.012999	1.56E+06	0.013013	5.02%	
Tramo 2/1066.8	1.475660309	1.404418324	7.46E+04	1.47E+06	0.013021	1.54E+06	0.013033	5.07%	
Tramo 3/1066.8	1.499167197	1.427925212	7.46E+04	1.49E+06	0.013008	1.57E+06	0.013016	4.99%	

TABLA 17 TABLA RESUMEN DE ALTAS DIFERENCIAS RED MATRIZ MEDELLÍN CAUDAL MEDIO 2 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 50000 Y 100000.

Los resultados que arrojan los dos modelos en la hora de consumo medio, son similares a los que se han estado observando a lo largo de análisis de esta red. Sin embargo, resulta de particular importancia resaltar un hallazgo de esta investigación que ha sido objeto de discusión, ampliamente documentada en la literatura, según la cual la ecuación de Hazen-Williams al haber sido desarrollada en un tiempo en el que existían materiales de rugosidad intermedia (no muy rugosos ni muy lisos), y dado que la mayoría de los datos fueron recolectados en flujo transicional, teóricamente estas deberían ser condiciones de aplicabilidad aceptable de la ecuación. Los resultados que arrojaron los diagramas de Moody para los 3 caudales demandados de la red, permiten apreciar que en una cantidad considerable de casos, los datos recolectados durante esta investigación se encuentran localizados en la zona de transición y presentan diferencias importantes. Esto permite concluir que la aplicabilidad de la ecuación de Hazen-Williams, aun en las zonas donde se supone que debería funcionar relativamente bien, muestra por el contrario inconsistencias con respecto a los resultados con la red simulada mediante la ecuación de Darcy-Weisbach.

#### 4.4.3 RED GINEBRA

Al igual que en la dos redes anteriores, se muestran a continuación los resultados para la red de Ginebra. Los resultados que se encontraron en esta red presentan una tendencia similar a lo que se encontró en la red Matriz de Medellín. La siguiente figura muestra las localizaciones de los 4 tanques de la red, así como las ilustraciones donde se ven los niveles de los tanques en el tiempo de ejecución hidráulica.

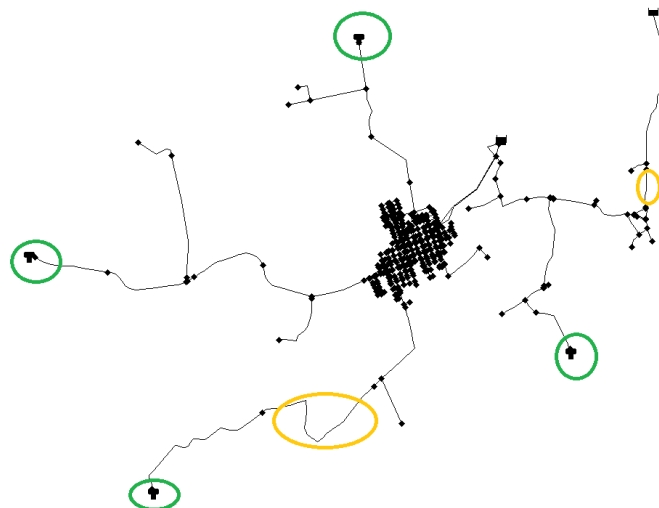


FIGURA 21 RED GINEBRA CON LA LOCALIZACION DE LOS TANQUES Y ALGUNAS TUBERÍAS ANALIZADAS.

Al igual que en la red matriz de Medellín, la red Ginebra es una red que tiene importantes ramificaciones y terminaciones en tanques ubicados en cuatro puntos de la red. Esta

característica es de gran importancia, ya que como se verá más adelante, presenta diferencias en la hidráulica de la red, en los niveles de los tanques y un desbalance de masa en la red, que ocasiona que las pérdidas por fricción y factores de fricción de toda la red se vean afectadas. A continuación se van a mostrar los resultados para los niveles de los tanques:

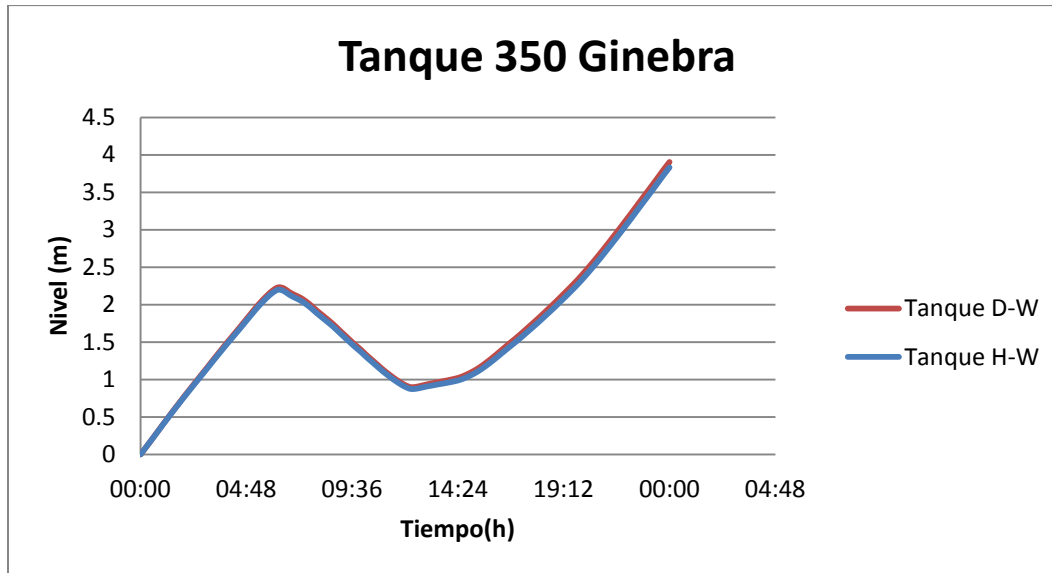


ILUSTRACIÓN 139 NIVEL TANQUE 350 RED GINEBRA.

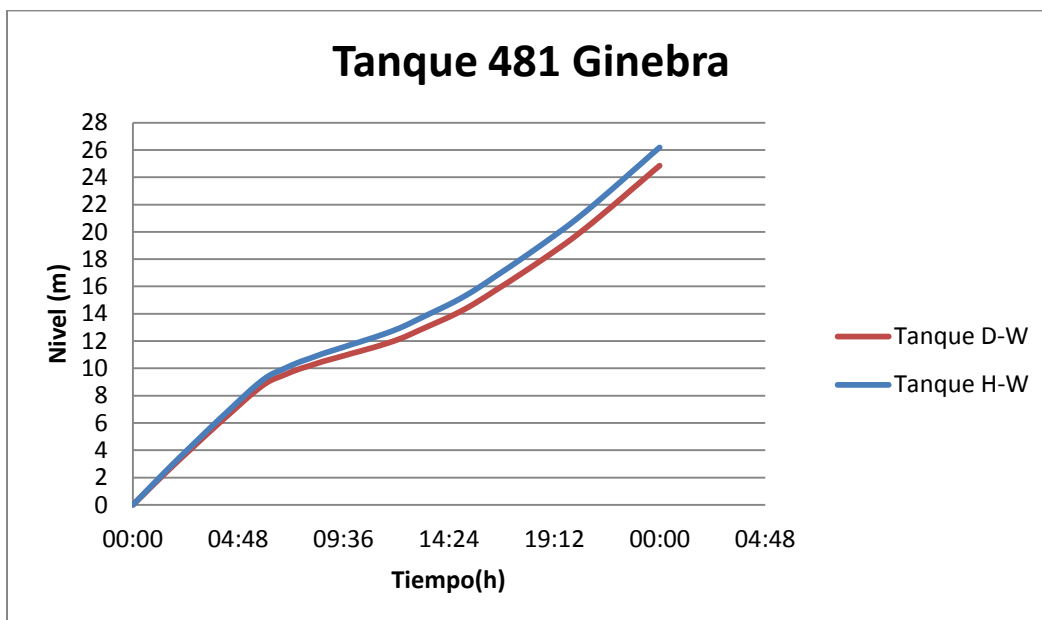


ILUSTRACIÓN 140 NIVEL TANQUE 481 RED GINEBRA.

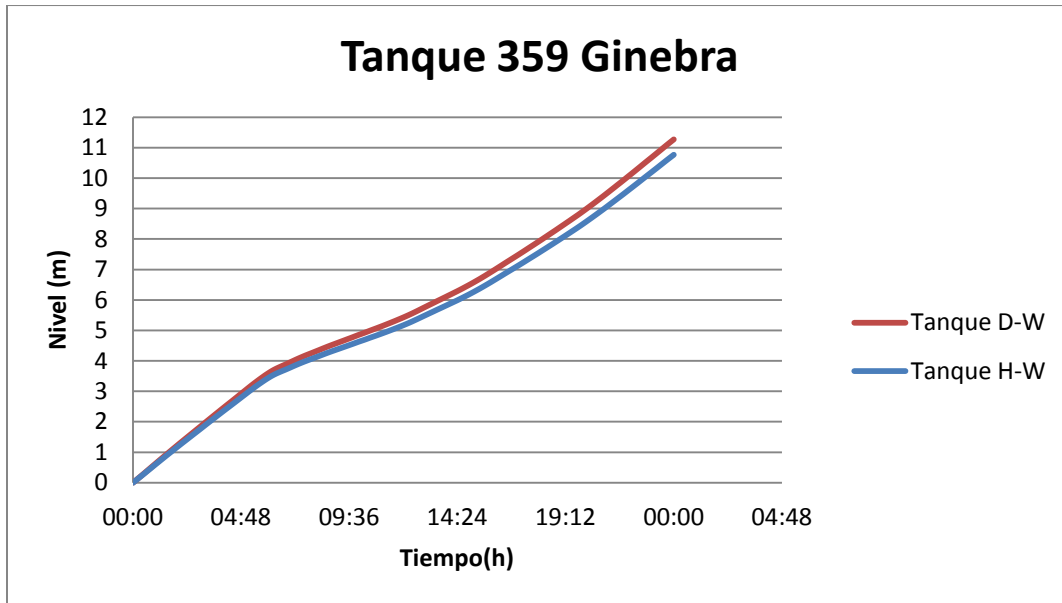


ILUSTRACIÓN 141 NIVEL TANQUE 359 RED GINEBRA.

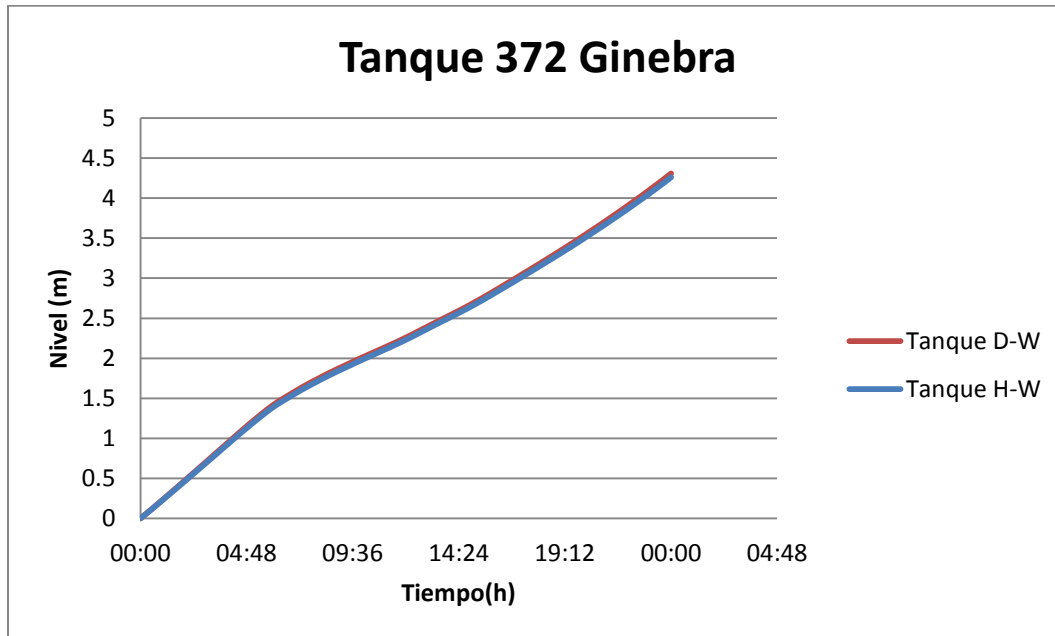


ILUSTRACIÓN 142 NIVEL TANQUE 372 RED GINEBRA.

Los resultados tienen dos detalles bastante interesantes de analizar. El primero es que pareciera que no existiera una diferencia notable entre los patrones de llenado entre la ecuación empírica y la ecuación físicamente basada, salvo en los tanques 481 y 359 donde al

final del tiempo de ejecución se puede ver que las líneas de llenado se empiezan a separar. Lo segundo es que en los dos tanques donde se vieron diferencias, los patrones de llenado son diferentes. Conviene recordar acá que en la red Matriz de Medellín se había visualizado que el nivel del tanque con la ecuación de Hazen-Williams siempre se encontraba por encima del nivel respecto de lo encontrado con la ecuación de Darcy-Weisbach; en contraste, lo que se encontró en la red Ginebra es que hay tanques que se están llenando más rápido con la ecuación de Darcy-Weisbach que con la ecuación de Hazen-Williams. Esto es un descubrimiento bastante significativo ya que se encuentra que no solo la ecuación de Hazen-Williams puede subestimar o sobrestimar el caudal que sale de los embalses, sino también los caudales que están entrando en los tanques de la red.

La consecuencia de esto es que evidentemente la hidráulica del sistema va a cambiar de manera radical, al existir un tanque con más nivel del que realmente se presenta y otro con un nivel menor, con lo cual el operario que busca solucionar un problema podría adoptar soluciones inadecuadas dado a que en los dos casos los resultados son claramente divergentes respecto de lo que realmente se está presentando en la red.

Con el fin de determinar si las diferencias se seguían presentando bajo otros escenarios, se decidió probar la red con solo 2 tanques. Los resultados de este escenario se presentan a continuación:

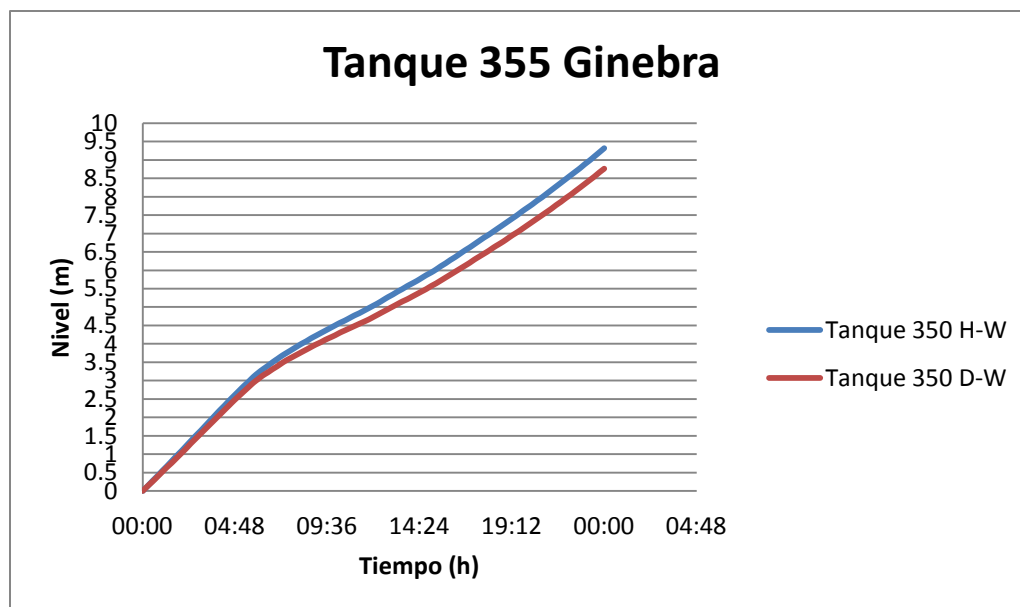


ILUSTRACIÓN 143 NIVEL TANQUE 355 RED GINEBRA CON SOLO 2 TANQUES.

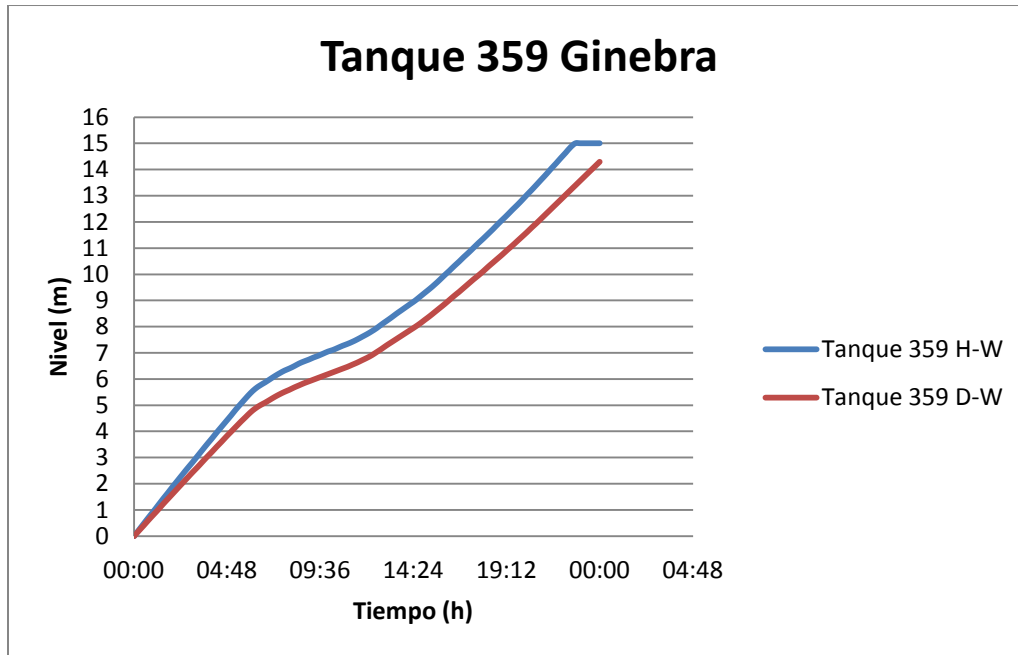


ILUSTRACIÓN 144 NIVEL TANQUE 359 RED GINEBRA CON SOLO 2 TANQUES.

Los resultados con solo dos tanques son mucho más evidentes que los encontrados anteriormente. Las ilustraciones permiten apreciar claramente las diferencias entre el patrón de llenado con la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach. No obstante, a diferencia de los hallazgos encontrados cuando la red cuenta con los 4 tanques, en este modelo no se detectó que uno de los dos tanques se llenara a mayor velocidad que el otro, al aplicar la ecuación de Darcy-Weisbach. A pesar de esto, ya queda sentado el antecedente de que esta situación si puede llegar a ocurrir y que definitivamente existe un desbalance de masa y un desbalance de caudales que circula por la red cuando se compara la hidráulica de las dos ecuaciones.

A continuación se muestran los resultados con tuberías de la Red Ginebra en cuanto al número de Reynolds y las pérdidas por fricción, cuando se emplea la ecuación físicamente basada y la ecuación empírica:

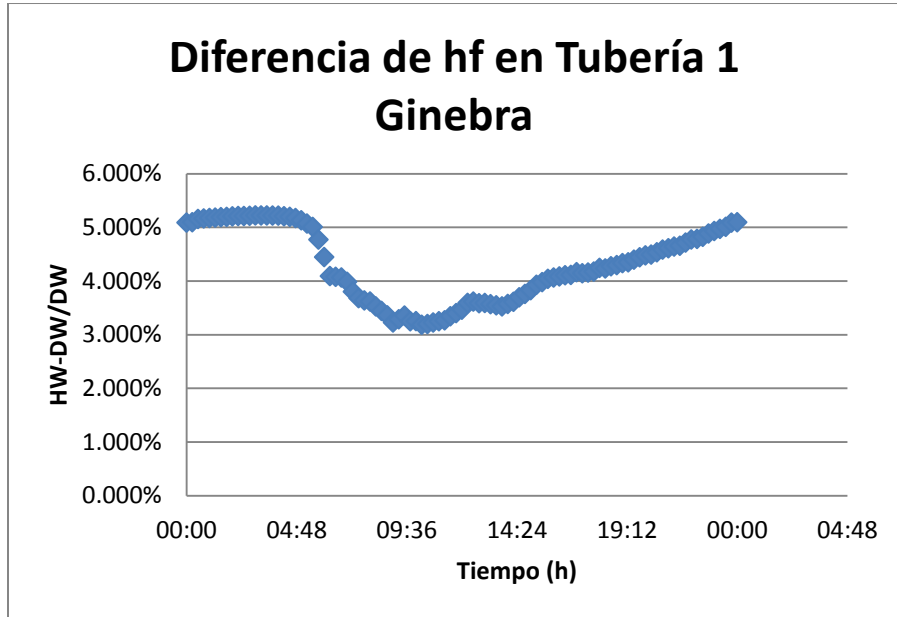


ILUSTRACIÓN 145 DIFERENCIA EN LAS PÉRDIDAS POR FRICCIÓN TUBERÍA 1.

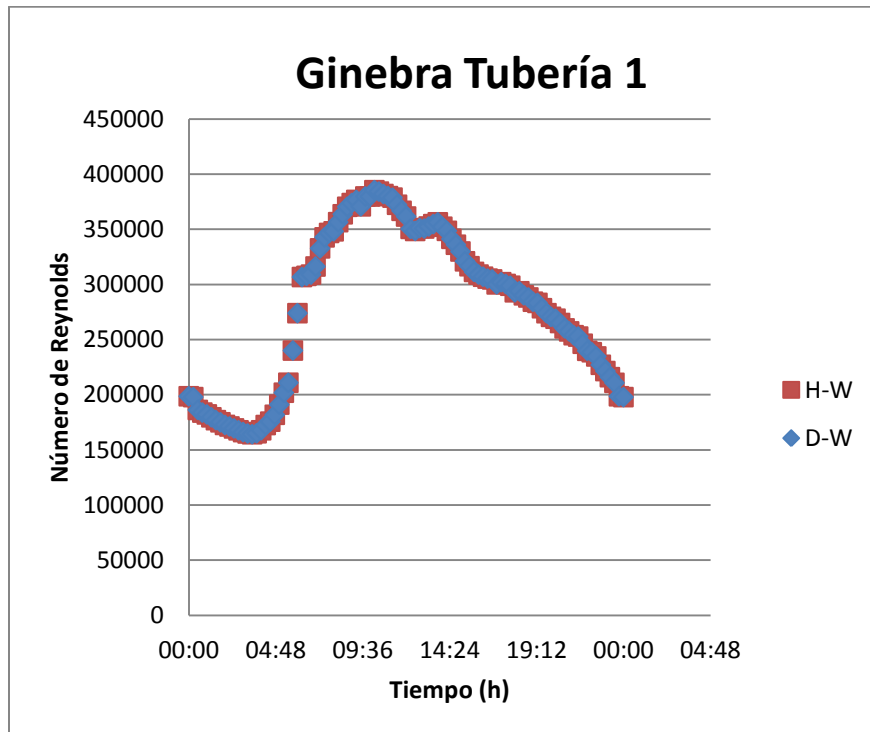


ILUSTRACIÓN 146 DIFERENCIA EN EL NÚMERO DE REYNOLDS TUBERÍA 1.

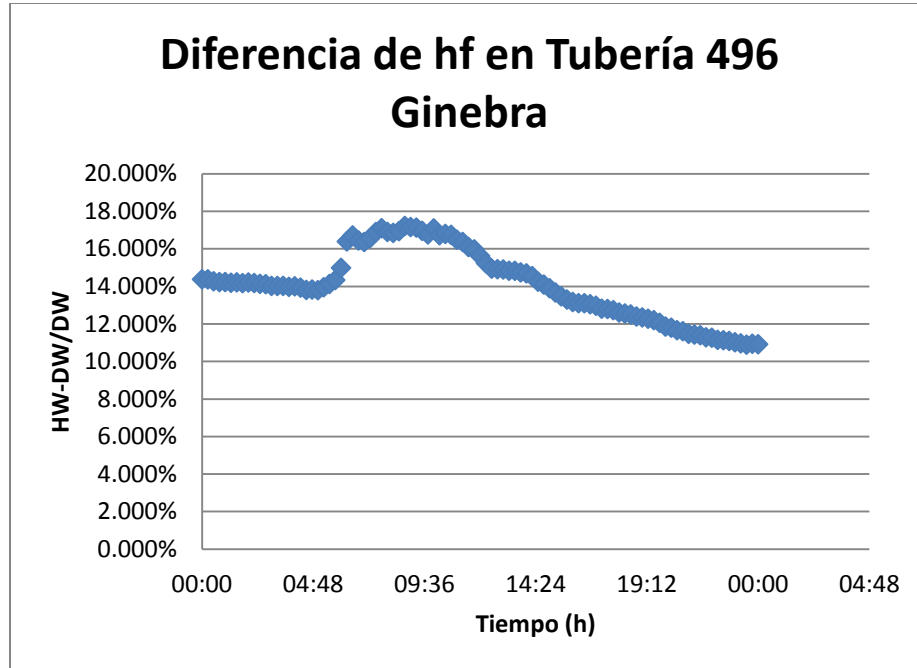


ILUSTRACIÓN 147 DIFERENCIA EN LA PÉRDIDAS POR FRICCIÓN TUBERÍA 496.

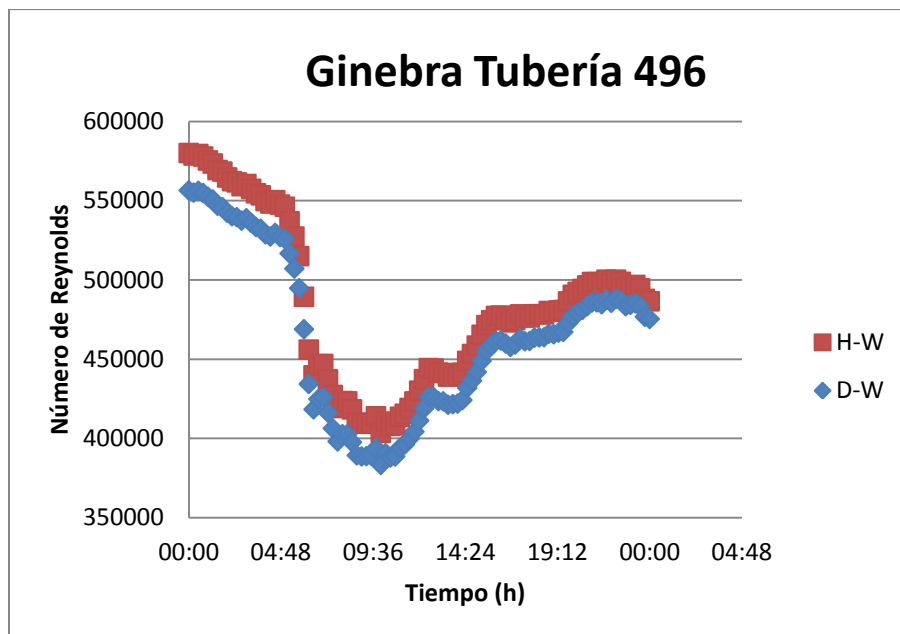


ILUSTRACIÓN 148 DIFERENCIA EN EL NÚMERO DE REYNOLDS TUBERÍA 496.



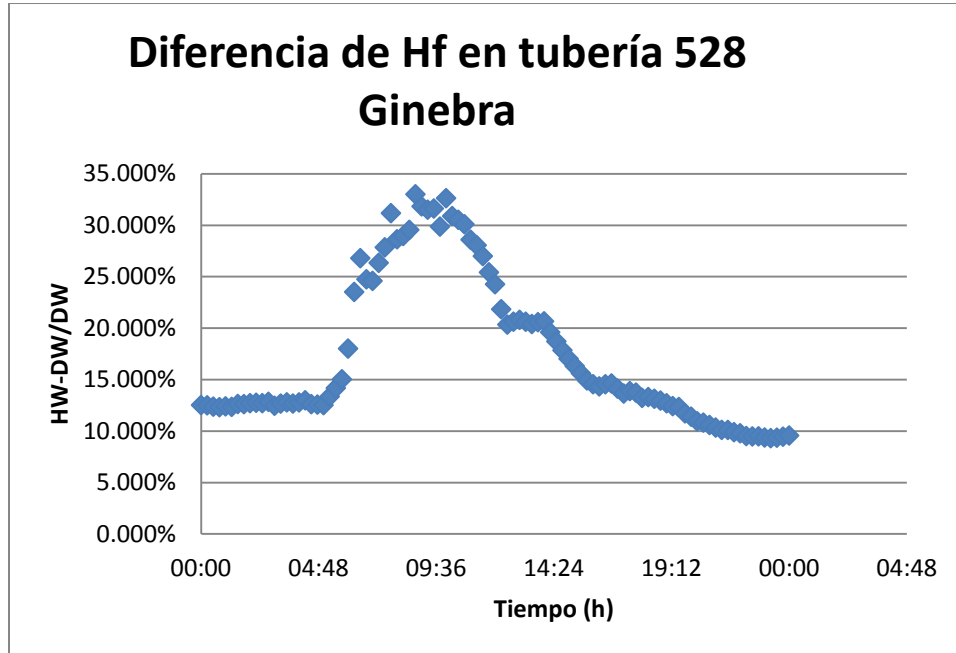


ILUSTRACIÓN 149 DIFERENCIA EN LA PÉRDIDAS POR FRICCIÓN TUBERÍA 528.

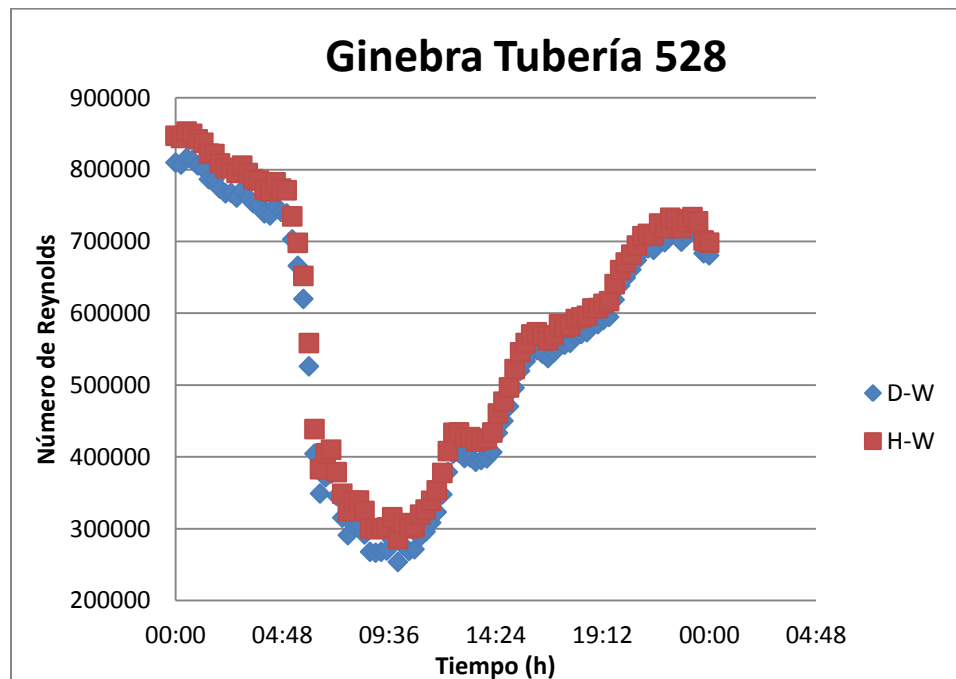


ILUSTRACIÓN 150 DIFERENCIA EN EL NÚMERO DE REYNOLDS TUBERÍA 528.

Los resultados demuestran una vez más lo que se ha estado observando a partir de la red Matriz de Medellín y en general en toda la investigación: La red que opera con la ecuación de Hazen-Williams está presentando caudales diferentes a la salida de los embalses y el caudal que pasa por los tramos de las tuberías es diferente con respecto a lo que ocurre en la red que es operada mediante la ecuación de Darcy-Weisbach. Por otro lado, se puede ver que en este caso, los desbalances que resultan característicos por la naturaleza empírica de la ecuación Hazen-Williams, están generando unas diferencias considerables en las pérdidas por fricción en las tuberías, lo que condiciona en gran medida las presiones que va a tener la red en todo su conjunto.

Lo anterior genera nuevas preguntas que sería bastante interesante seguir a futuro en otras tesis o investigaciones y es: ¿cuántas de estas diferencias están causadas por el balance de masa de la red? Y ¿cuántas son atribuibles a la naturaleza empírica de la ecuación y al uso indiscriminado de coeficientes constantes en la ecuación de de Hazen-Williams?

Prosiguiendo con los resultados, se muestran a continuación aquellos tramos de las tuberías que tienen números de Reynolds mayores al utilizar la ecuación de Hazen-Williams (Rojo), las que tienen mayor con la ecuación de Darcy-Weisbach (Verde) y las tuberías que no presentan ningún tipo de diferencias (Amarillo):

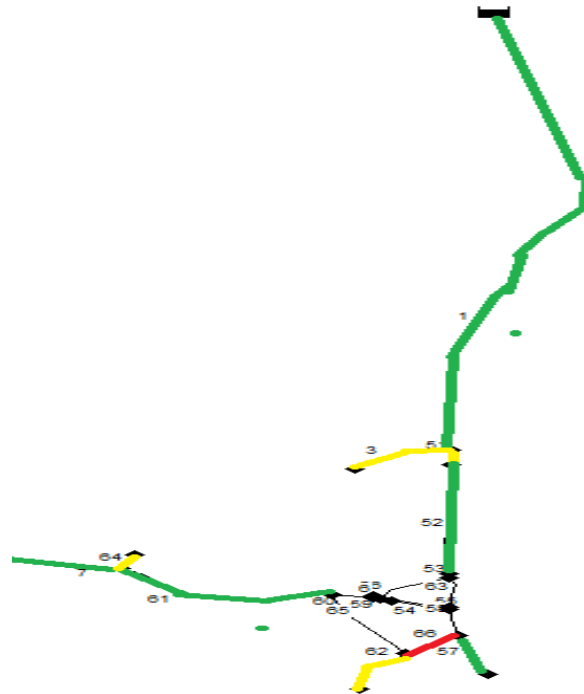


FIGURA 22 SALIDA DEL PRIMER EMBALSE RED GINEBRA.

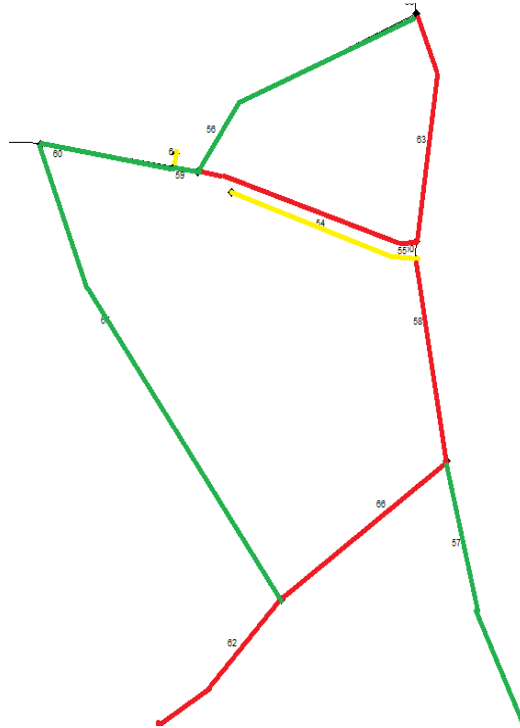


FIGURA 23 DIFERENCIA EN ALGUNOS TRAMOS DE LA RED GINEBRA.

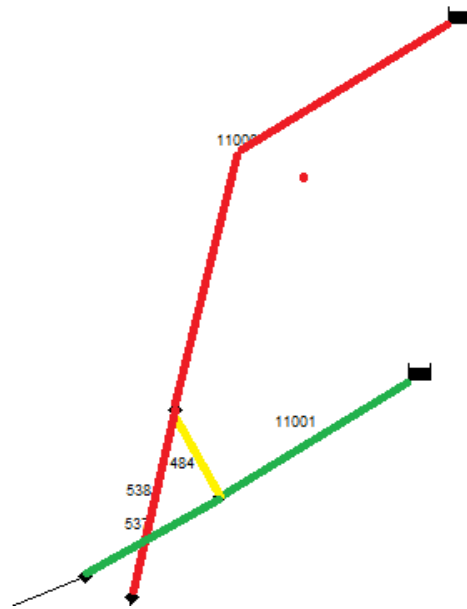


FIGURA 24 SALIDA DE LOS OTROS EMBALSES DE LA RED GINEBRA.



FIGURA 25 DIFERENCIAS DE LOS ENTRAMADOS INTERNOS DE LA RED GINEBRA 1.

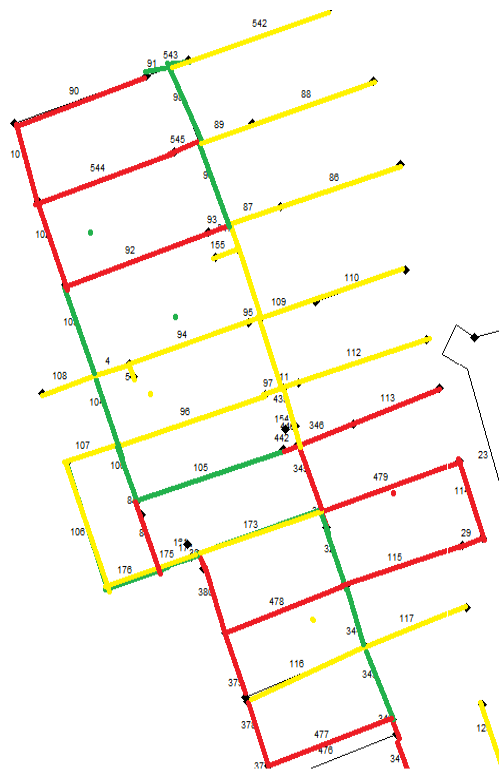


FIGURA 26 DIFERENCIAS DE LOS ENTRAMADOS INTERNOS DE LA RED GINEBRA 2.

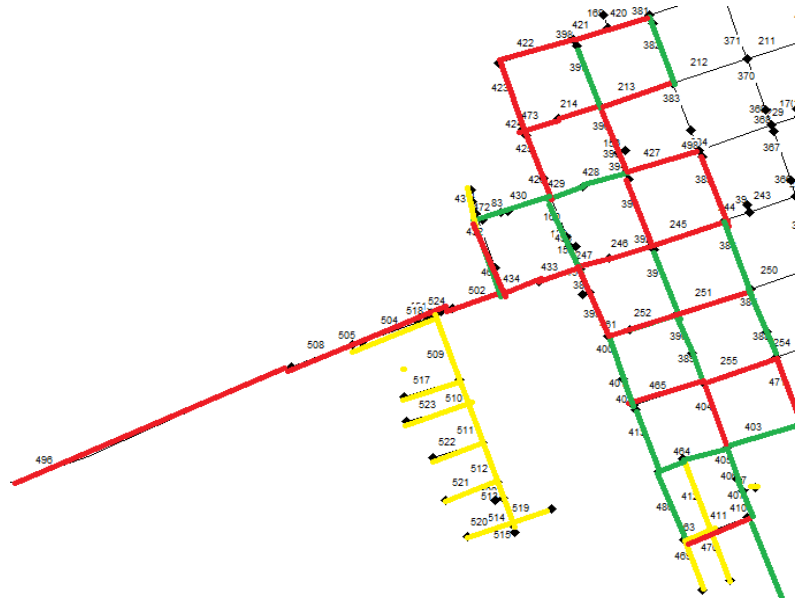


FIGURA 27 DIFERENCIAS DE LOS ENTRAMADOS INTERNOS DE LA RED GINEBRA 3.

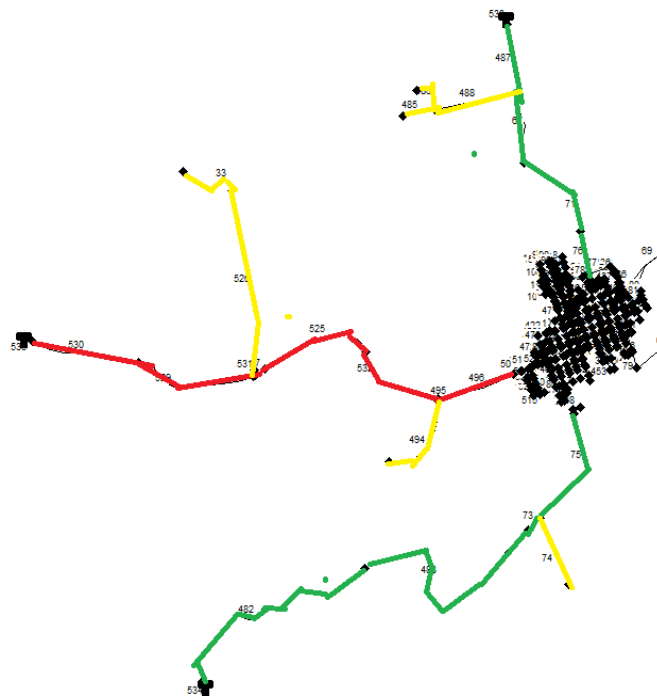


FIGURA 28 DIFERENCIAS EN LAS RAMIFICACIONES DE LA RED GINEBRA.

Las figuras anteriores muestran nuevamente que la hidráulica entre la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach es bastante diferente. De las figuras se identifican 2 patrones importantes: primero, se puede ver que para 2 tanques, el número de Reynolds es mayor utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach, lo que implica que el tiempo de llenado es menor en la realidad (el llenado es más rápido) que en la simulación basada en la ecuación de Hazen-Williams. Lo segundo, la presencia de diferencias en la salida de los embalses implica que en efecto se está presentando un desbalance de masa en la red; este desbalance fue cuantificado y se encontró que en esta red se presenta un desbalance de masa máximo de 44 L/s.

Esta cantidad resulta ser bastante más baja en comparación con la cantidad de caudal encontrada en la red matriz de Medellín; sin embargo hay que considerar que la red de Medellín maneja en conjunto con sus 3 embalses una demanda de cerca de  $8.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , en contraste con los casi  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  que maneja la red de Ginebra. Aun así y pese a que el desbalance de masa parece ser muy bajo en comparación con el caudal total, es este desbalance el que está causando que los tanques se llenen más rápido cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach y más lentamente con la ecuación de Hazen-Williams. A su vez es uno de los causantes de que se presenten diferencias en las pérdidas por fricción en la red, sin mencionar que está causando que la hidráulica de toda la red se esté solucionando de manera diferente a la realidad cuando se utiliza la ecuación empírica.

A continuación se muestran los resultados en aquellos tramos de tubería de la red que presentaron las diferencias hidráulicas más amplia (tramos con números de Reynolds considerablemente mayores con la ecuación de Hazen-Williams.):

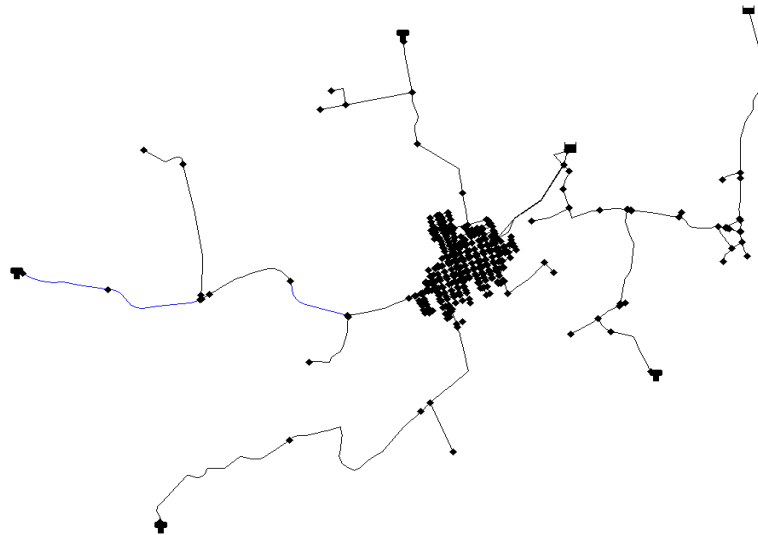


FIGURA 29 TRAMOS DE LA RED GINEBRA CON DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS CON LA DEMANDA MEDIA DEL SISTEMA.

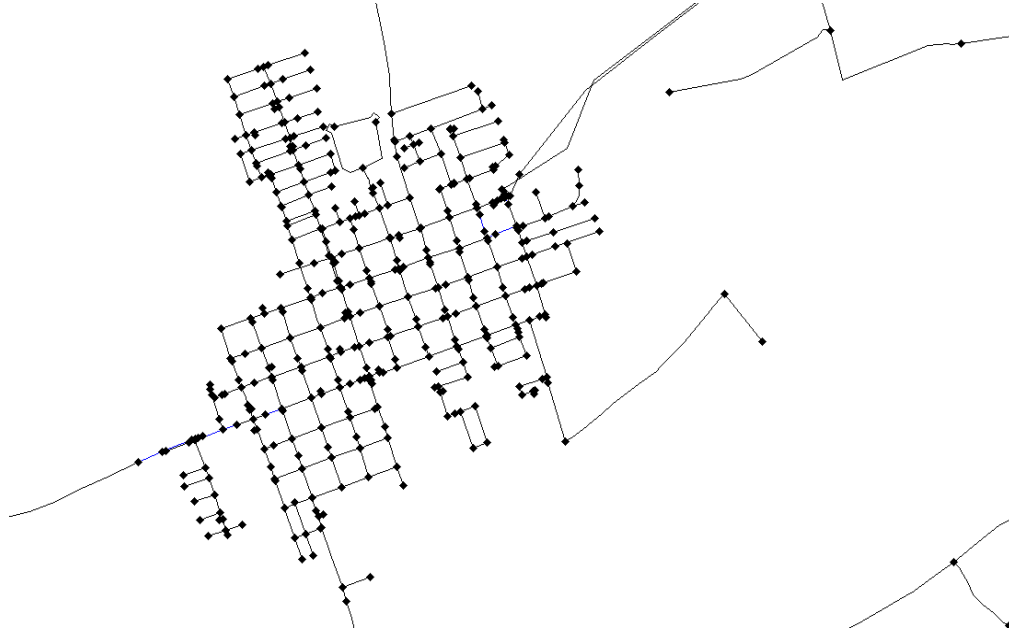


FIGURA 30 TRAMOS INTERNOS DE LA RED GINEBRA CON DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS CON LA DEMANDA MEDIA DEL SISTEMA.

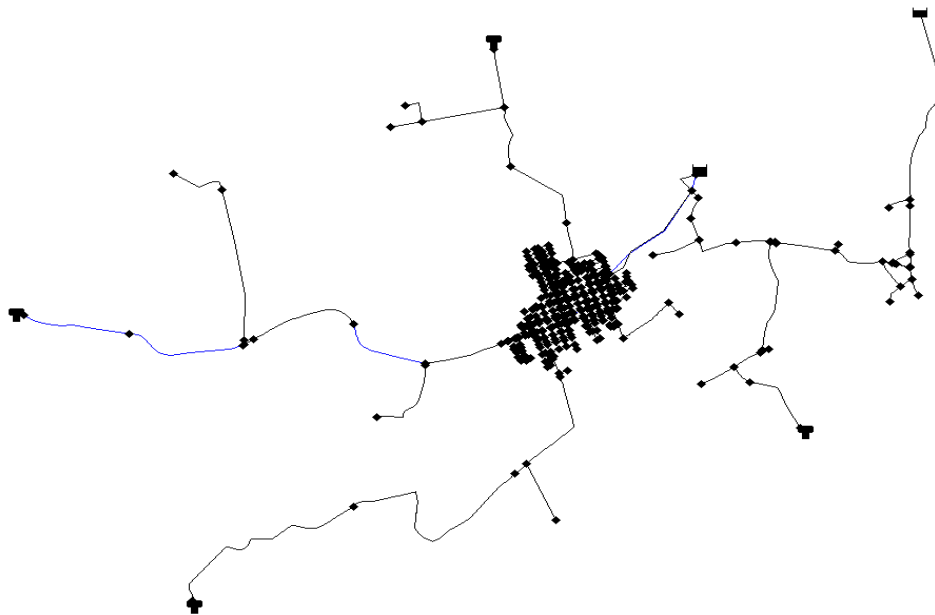


FIGURA 31 TRAMOS DE LA RED GINEBRA CON DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS CON LA DEMANDA MÁXIMA DEL SISTEMA.

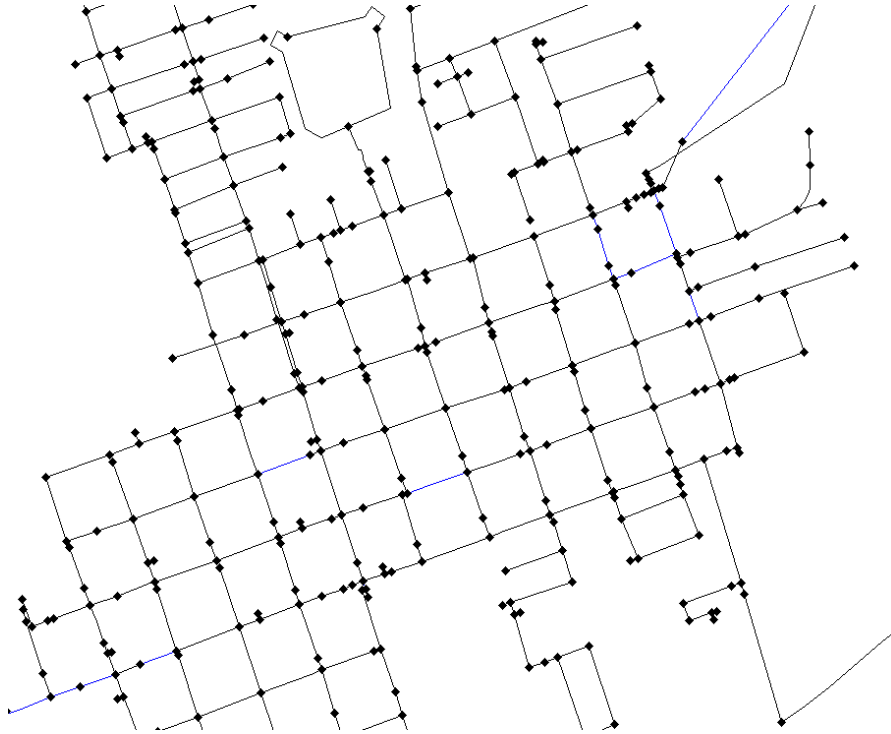


FIGURA 32 TRAMOS INTERNOS DE LA RED GINEBRA CON DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS CON LA DEMANDA MÁXIMA DEL SISTEMA.

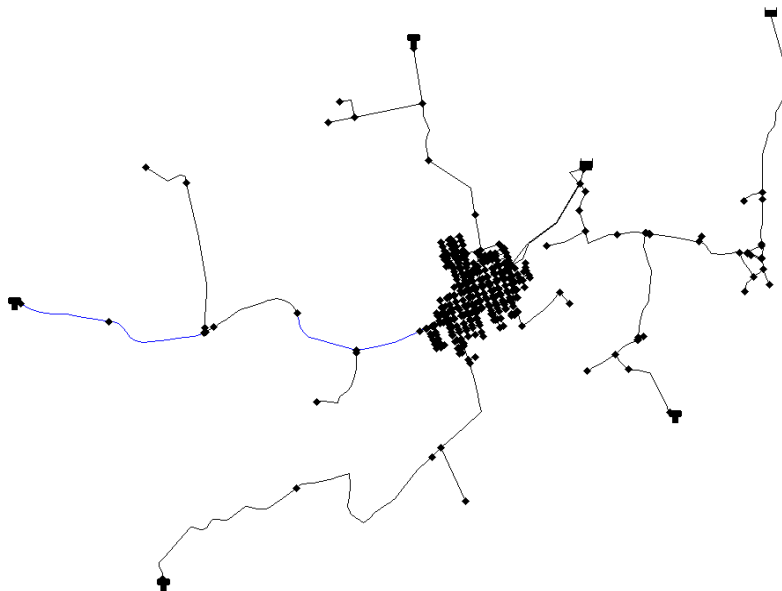


FIGURA 33 TRAMOS DE LA RED GINEBRA CON DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS CON LA DEMANDA MÍNIMA DEL SISTEMA.





FIGURA 34 TRAMOS INTERNOS DE LA RED GINEBRA CON DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS CON LA DEMANDA MÍNIMA DEL SISTEMA.

Los resultados que se aprecian en las figuras anteriores son nuevamente un testimonio de lo que se ha venido presentando en esta investigación en cuanto a que las diferencias significativas tienen una tendencia a dirigirse a los tanques que se encuentran localizados en las ramificaciones de la red. En la Figura 31 se observa con claridad que se presentan diferencias significativas a la salida de dos de los embalses del sistema, siendo considerablemente mayor el caudal que está circulando cuando se emplea la ecuación de Hazen-Williams que cuando se emplea la ecuación de Darcy-Weisbach. Así mismo, durante la investigación se pudo ver el comportamiento que se genera, al desbalancear la masa del sistema y dirigirse hacia las ramificaciones, cuando se emplea la ecuación de Hazen-Williams está cambiando de manera considerable el comportamiento de la red; es decir, el flujo sigue una dirección diferente con la ecuación empírica que con la ecuación físicamente basada y como se vio en los análisis previos de los emisores, una causa importante para esto es el hecho de que el coeficiente teórico de 140 (la mayor parte de la red) es inadecuado y el agua se dirige por un camino que de acuerdo con la ecuación de Hazen-Williams parece ser el más viable, pero que con la ecuación de Darcy-Weisbach revela que no es el adecuado para ese caudal específico. Lo anterior se suma con lo que se ha venido discutiendo y es el hecho de que al existir una subestimación y/o sobrestimación de la masa del sistema, la hidráulica de los dos sistemas arroja resultados radicalmente distintos.

Adicionalmente, se graficaron en el diagrama de Moody los tramos de tuberías con diferencias significativas y se elaboró una tabla resumen con las principales características de estos tramos. Dichos resultados se muestran a continuación:

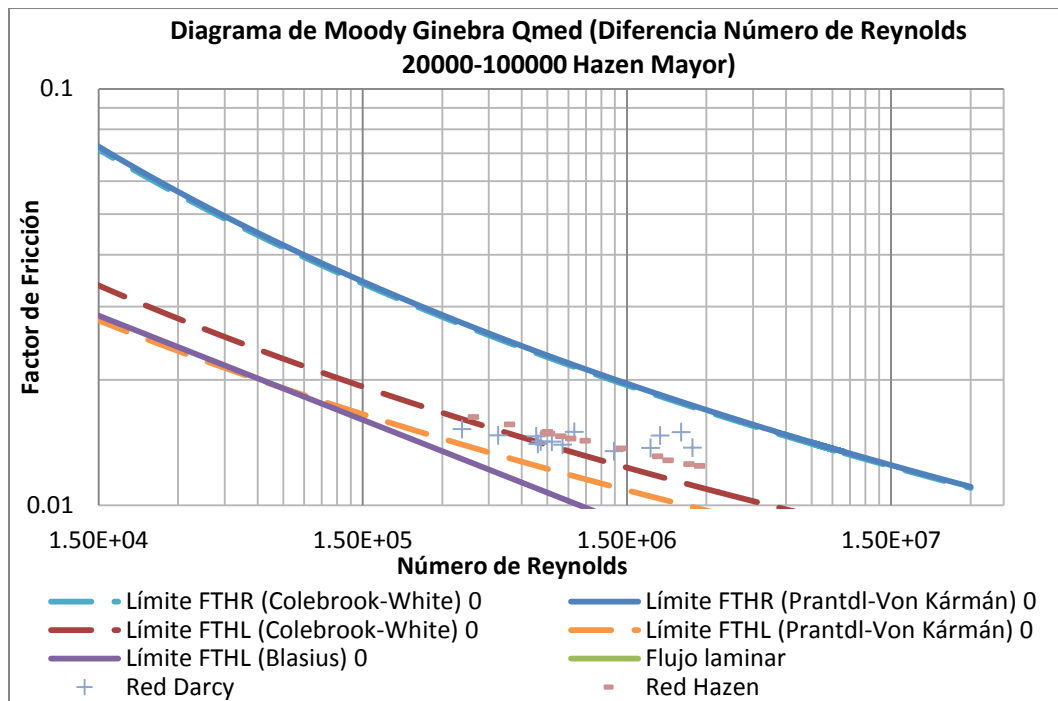


ILUSTRACIÓN 151 DIAGRAMA DE MOODY RED GINEBRA TRAMOS CON HAZEN-WILLIAMS MAYOR CAUDAL MEDIO.

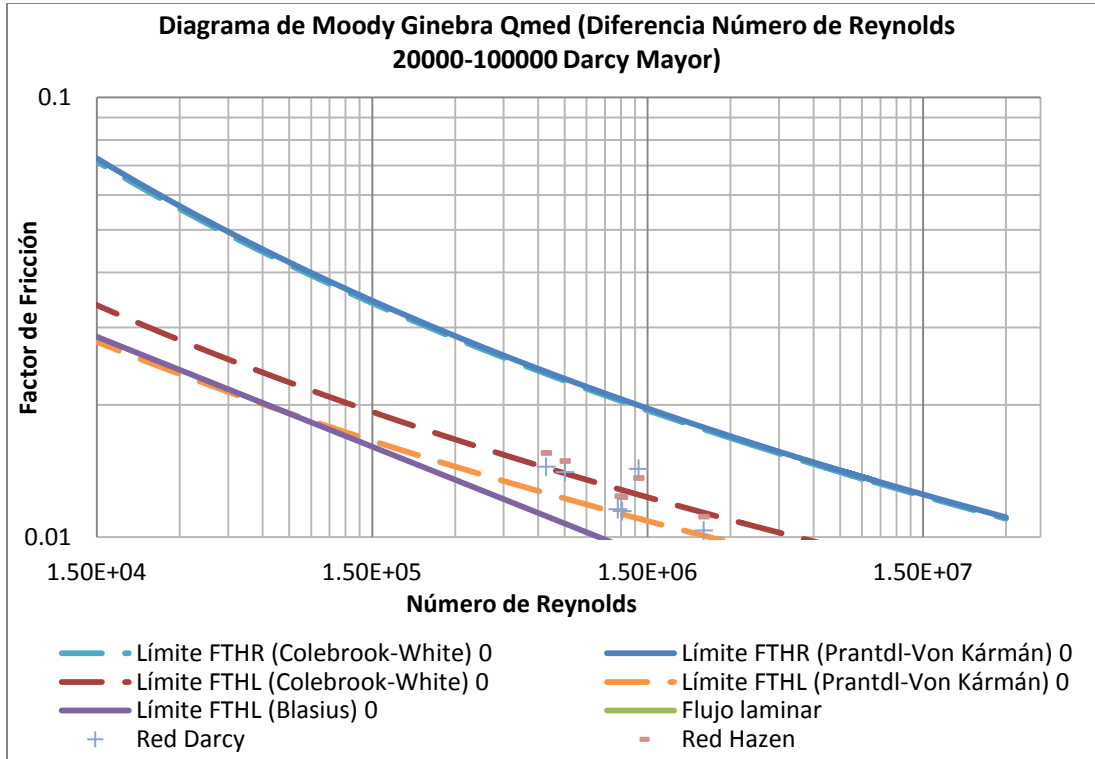


ILUSTRACIÓN 152 DIAGRAMA DE MOODY RED GINEBRA CON DARCY-WEISBACH MAYOR Y CAUDAL MEDIO.

Ginebra Qmed (Diferencias número de Reynolds 20000-100000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/400	0.886178194	0.862266527	6.68E+04	2.41E+06	0.014994	2.47E+06	0.012568	2.77%
Tramo 1/450	0.831258153	0.807395481	5.92E+04	2.00E+06	0.014715	2.06E+06	0.012831	2.96%
Tramo 1/500	0.44836614	0.42473724	5.28E+04	9.49E+05	0.015015	1.00E+06	0.0143	5.56%
Tramo 1/700	1.701775796	1.665451807	5.80E+04	2.66E+06	0.013764	2.72E+06	0.012443	2.18%
Tramo 1/800	0.51657585	0.487614387	4.04E+04	6.81E+05	0.014654	7.21E+05	0.015013	5.94%
Tramo 2/800	1.349101924	1.320827088	3.95E+04	1.84E+06	0.01374	1.88E+06	0.013122	2.14%
Tramo 1/900	0.652497971	0.628654862	2.96E+04	7.80E+05	0.014228	8.10E+05	0.014659	3.79%
Tramo 1/1000	0.790535453	0.76668134	2.66E+04	8.56E+05	0.01399	8.83E+05	0.014477	3.11%
Tramo 2/1000	0.657719911	0.633876794	2.66E+04	7.08E+05	0.014239	7.35E+05	0.014868	3.76%
Tramo 1/1100	0.51017041	0.481209049	2.94E+04	4.89E+05	0.014734	5.18E+05	0.015651	6.02%
Tramo 2/1100	1.349128055	1.320852833	2.87E+04	1.34E+06	0.013498	1.37E+06	0.013702	2.14%
Tramo 1/1300	0.827664138	0.803804181	2.05E+04	6.91E+05	0.014047	7.11E+05	0.014954	2.97%
Tramo 1/1500	0.507591445	0.478631458	2.16E+04	3.56E+05	0.01525	3.78E+05	0.016302	6.05%

TABLA 18 RESUMEN DE TUBERÍAS RED GINEBRA CAUDAL MEDIO 1 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 20000 Y 100000.

Ginebra Qmed (Diferencias número de Reynolds 20000-100000) Darcy Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/300	0.314627952	0.326242129	-4.32E+04	1.21E+06	0.011468	1.17E+06	0.012332	-3.56%
Tramo1/350	0.359975159	0.366814049	-2.18E+04	1.17E+06	0.011575	1.15E+06	0.012394	-1.86%
Tramo2/350	0.725253099	0.751855805	-8.49E+04	2.40E+06	0.010359	2.31E+06	0.01114	-3.54%
Tramo1/600	0.72148777	0.748090243	-4.95E+04	1.39E+06	0.0143	1.34E+06	0.013632	-3.56%
Tramo1/1100	0.714592477	0.741195114	-2.70E+04	7.53E+05	0.014064	7.26E+05	0.014898	-3.59%
Tramo1/1300	0.72162033	0.74822535	-2.29E+04	6.43E+05	0.014461	6.20E+05	0.015546	-3.56%

TABLA 19 RESUMEN DE TUBERÍAS RED GINEBRA CAUDAL MEDIO 2 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 20000 Y 100000.

Los resultados de los diagramas de Moody y las tablas resumen muestran que si bien las diferencias no son tan significativas como en la red matriz de Medellín, si se mantienen las conclusiones que se han sacado hasta ahora, es decir, la presencia de caudales mayores con la ecuación de Hazen-Williams se presenta en tuberías de gran diámetro que transportan gran cantidad de caudal y viceversa en tuberías de menor diámetro cuando se emplea la ecuación de Darcy-Weisbach (salvo algunas excepciones en las que aparecen tramos pequeños en Hazen-Williams y de gran diámetro en la de Darcy-Weisbach). Así mismo, se puede ver que el efecto hidráulico se está presentando nuevamente en números de Reynolds entre  $2 \cdot 10^5$  y  $5 \cdot 10^6$  que está generalmente asociado con tuberías de gran diámetro como lo ilustran en su artículo Bombardelli y García (Fabián Bombardelli, 2003). Otro detalle importante es que, si bien el desfase en el número de Reynolds no es tan significativo según se observa en los diagramas y en las tablas resumen, sí se puede ver con claridad que el desfase del factor de fricción entre las dos ecuaciones puede tener implicaciones considerables a la hora de evaluar la hidráulica del sistema.

A continuación se muestran los resultados para el caudal mínimo de la red así como su respectivo análisis:

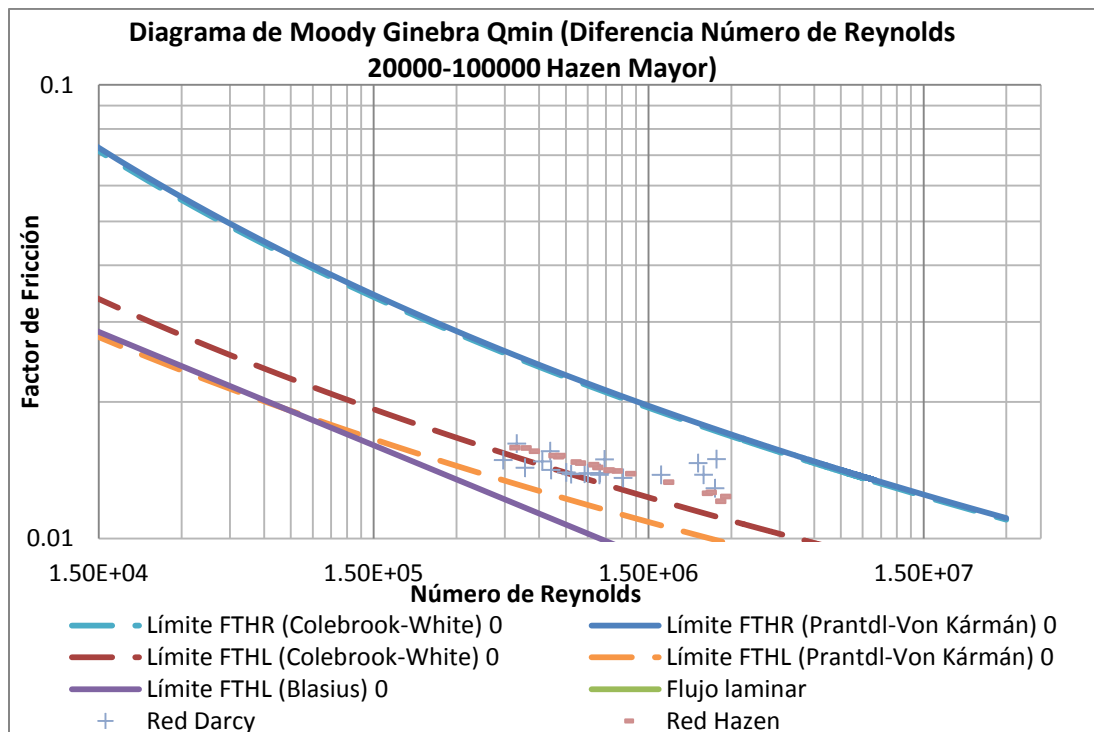


ILUSTRACIÓN 153 DIAGRAMA DE MOODY RED GINEBRA CON HAZEN-WILLIAMS MAYOR Y CAUDAL MÍNIMO.

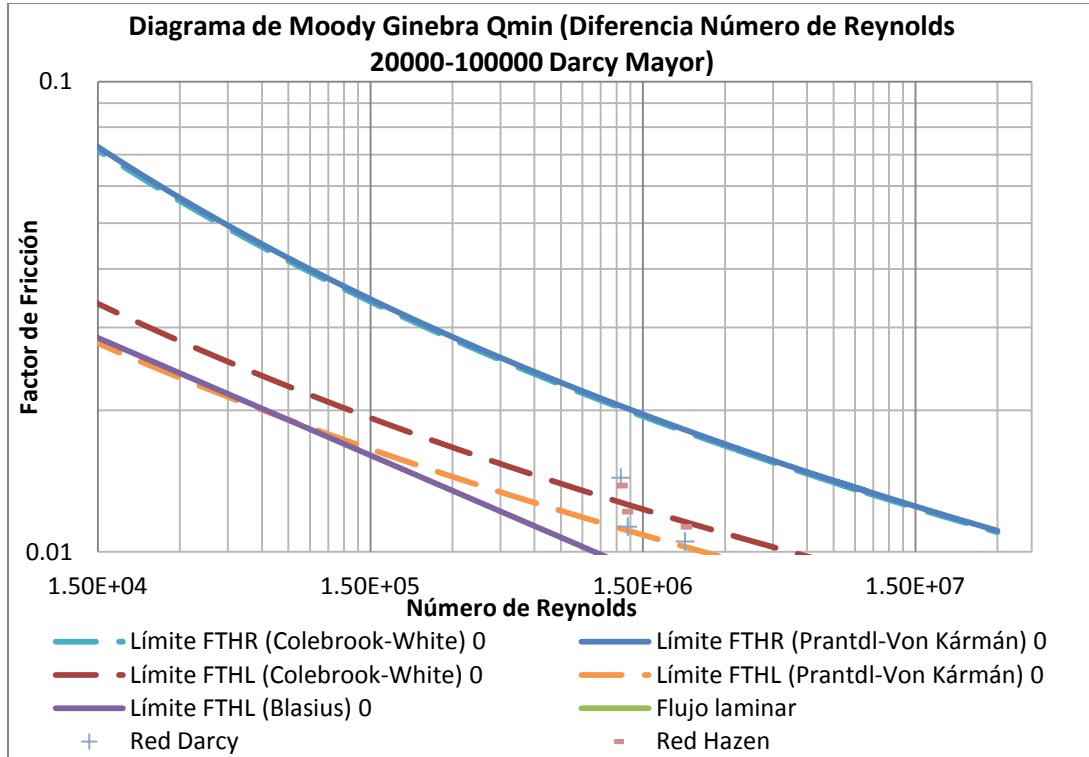


ILUSTRACIÓN 154 DIAGRAMA DE MOODY RED GINEBRA CON DARCY-WEISBACH MAYOR Y CAUDAL MÍNIMO.

Ginebra Qmin (Diferencias número de Reynolds 20000-100000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/400	0.985769571	0.949498125	1.01E+05	2.65E+06	0.01496	2.75E+06	0.012374	3.82%
Tramo 2/400	0.185409007	0.17824228	2.00E+04	4.98E+05	0.016185	5.18E+05	0.015831	4.02%
Tramo 1/450	0.951802666	0.915589659	8.99E+04	2.27E+06	0.01466	2.36E+06	0.012579	3.96%
Tramo 2/450	0.273641336	0.265373161	2.05E+04	6.59E+05	0.015573	6.79E+05	0.015144	3.12%
Tramo 1/500	0.496994853	0.464789208	7.19E+04	1.04E+06	0.01494	1.11E+06	0.014086	6.93%
Tramo 1/700	1.52909503	1.491191636	6.05E+04	2.38E+06	0.013819	2.44E+06	0.012636	2.54%
Tramo 1/800	1.223768462	1.194131431	4.14E+04	1.67E+06	0.013811	1.71E+06	0.013308	2.48%
Tramo 2/800	0.46807167	0.441692847	3.68E+04	6.17E+05	0.014787	6.53E+05	0.015232	5.97%
Tramo 1/900	0.841537906	0.805348596	4.49E+04	9.99E+05	0.013939	1.04E+06	0.014127	4.49%
Tramo 2/900(10m)	2.128923957	2.109213424	2.45E+04	2.62E+06	0.012904	2.64E+06	0.012079	0.93%
Tramo 1/1000	0.926680297	0.890477369	4.04E+04	9.95E+05	0.013814	1.03E+06	0.014148	4.07%
Tramo 2/1000	0.844762484	0.808572122	4.04E+04	9.03E+05	0.013926	9.43E+05	0.014339	4.48%
Tramo 1/1100	1.223795449	1.194158402	3.01E+04	1.21E+06	0.013598	1.24E+06	0.013893	2.48%
Tramo 2/1100	0.464115431	0.437736121	2.68E+04	4.44E+05	0.014888	4.71E+05	0.015855	6.03%
Tramo 1/1200	0.980285858	0.944021198	3.38E+04	8.79E+05	0.013894	9.12E+05	0.014542	3.84%
Tramo 2/1200	0.8455383	0.809346022	3.37E+04	7.53E+05	0.013982	7.87E+05	0.01474	4.47%
Tramo 1/1300	0.94958671	0.913376014	3.11E+04	7.85E+05	0.013861	8.16E+05	0.014662	3.96%
Tramo 1/1600	0.986868249	0.950596677	2.53E+04	6.64E+05	0.014161	6.89E+05	0.015227	3.82%
Tramo 1/1900	0.943487237	0.907277782	2.13E+04	5.33E+05	0.014318	5.55E+05	0.015572	3.99%

TABLA 20 RESUMEN DE TUBERÍAS RED GINEBRA CAUDAL MÍNIMO 1 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 20000 Y 100000.

Ginebra Qmin (Diferencias número de Reynolds 20000-100000) Darcy Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/300	0.341147651	0.355331047	-5.28E+04	1.32E+06	0.011318	1.27E+06	0.012187	-3.99%
Tramo 1/350	0.653872607	0.672552988	-5.96E+04	2.15E+06	0.010525	2.09E+06	0.01131	-2.78%
Tramo 1/600	0.651522931	0.670202935	-3.48E+04	1.25E+06	0.014383	1.21E+06	0.013839	-2.79%

TABLA 21 RESUMEN DE TUBERÍAS RED GINEBRA CAUDAL MÍNIMO 2 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 20000 Y 100000.

Los resultados que se encontraron en el caudal mínimo no presentaron grandes diferencias según se aprecia en el diagrama de Moody y porcentualmente en la tablas de resumen; esto es coherente con lo que se encontró en el análisis de emisores y en la red matriz de Medellín, donde se puede ver claramente que incluso en el análisis de presiones este es el momento de ejecución hidráulica que presenta menores diferencias entre las dos ecuaciones. Sin embargo vale la pena resaltar que si bien son diferencias pequeñas, hay repetición en las tendencias de la red, es decir, hay desfases entre los factores de fricción de las dos ecuaciones. Por lo demás, el efecto se está presentando en diámetros de gran tamaño (ver Tablas 20 y 21) y los rangos de números de Reynolds donde estas tuberías presentan las diferencias, son similares a lo observado en las tuberías con el caudal medio y en los tramos analizados en la red matriz de Medellín.

Lo anterior reafirma lo que se viene analizando y es que efectivamente las tuberías que están transportando la mayor cantidad de caudal son las que están presentando estas grandes diferencias; así mismo, al mirar los mapas de la redes también se puede ver que el efecto es bastante importante en las tuberías que se dirigen a las ramificaciones con terminaciones en tanques. Es de resaltar finalmente que al examinar los datos de presiones que aparecen en la Sección 4.3.3 Red Ginebra y lo registrado en las Figuras 22, 23, 24, 25, 26, 27 y 28, se concluye que estas diferencias están cambiando de manera significativa la hidráulica de la red, generando resultados divergentes entre la ecuación físicamente basada y la ecuación empírica de Hazen-Williams.

Por último, se muestran los resultados para la hora de máximo consumo en la red:

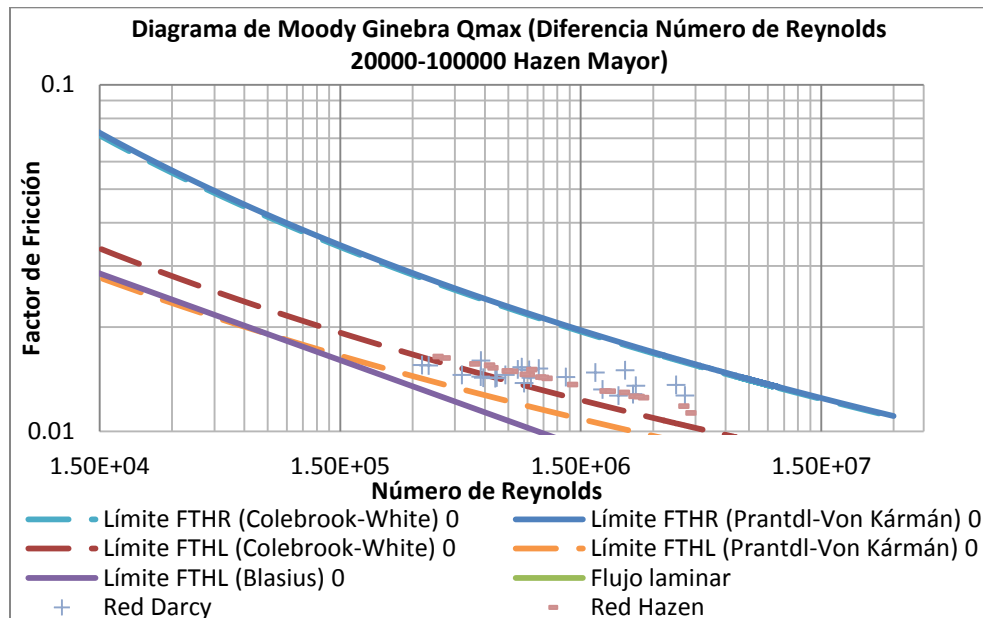


ILUSTRACIÓN 155 DIAGRAMA DE MOODY RED GINEBRA CON HAZEN-WILLIAMS MAYOR Y CAUDAL MÁXIMO.



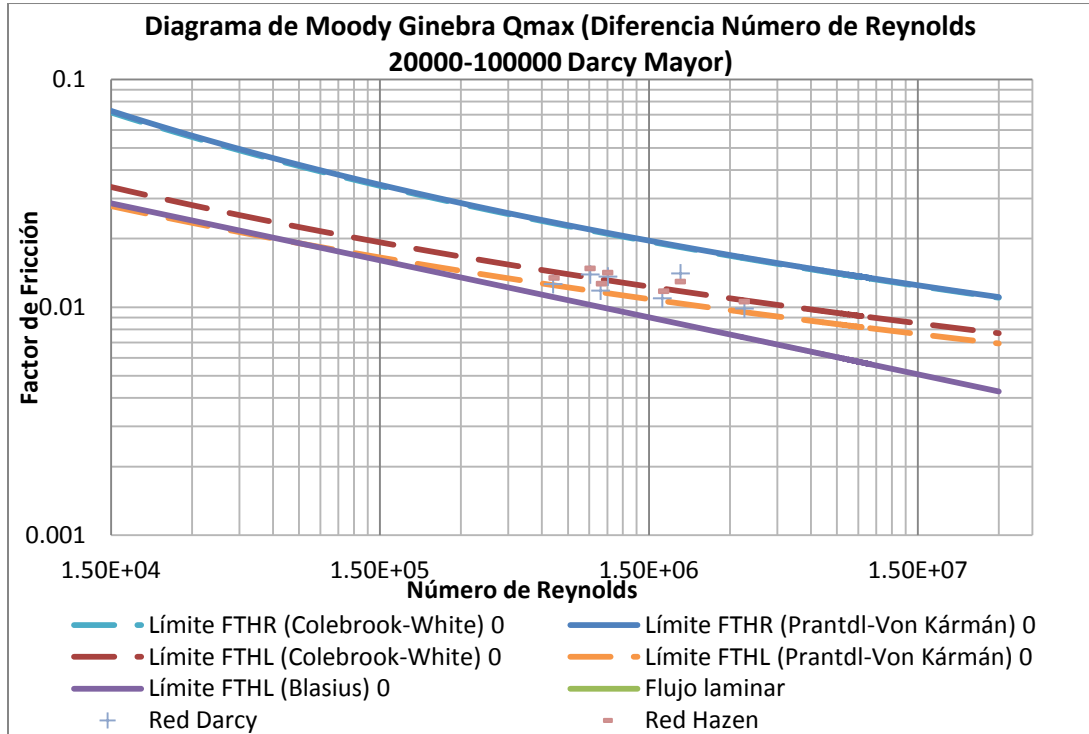


ILUSTRACIÓN 156 DIAGRAMA DE MOODY RED GINEBRA CON DARCY-WEISBACH MAYOR Y CAUDAL MÁXIMO.

Ginebra Qmáx (Diferencias número de Reynolds 20000-100000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/400	0.855668428	0.821648121	9.50E+04	2.29E+06	0.015013	2389190.526	0.012632	4.14%
Tramo 2/400	0.214688148	0.206816825	2.20E+04	5.77E+05	0.01601	599450.5263	0.015497	3.81%
Tramo 1/450	0.729701641	0.695725894	8.43E+04	1.73E+06	0.014788	1811081.842	0.013078	4.88%
Tramo 2/450	0.353687583	0.344002493	2.40E+04	8.54E+05	0.015321	877834.3421	0.014586	2.82%
Tramo 3/450	0.419230847	0.404677923	3.61E+04	1.00E+06	0.015185	1040509.342	0.014228	3.60%
Tramo 1/500	0.438097255	0.410053632	6.26E+04	9.16E+05	0.015045	978601.3158	0.014348	6.84%
Tramo 2/500	0.377434476	0.367914861	2.13E+04	8.22E+05	0.015098	843095.614	0.014615	2.59%
Tramo 1/600	0.713216114	0.699241242	2.60E+04	1.30E+06	0.014351	1327624.211	0.013657	2.00%
Tramo 1/700	2.414230294	2.344037241	1.12E+05	3.74E+06	0.013621	3851996.842	0.011833	2.99%
Tramo 1/800	1.877102113	1.821462245	7.77E+04	2.54E+06	0.013546	2620614.737	0.012515	3.05%
Tramo 2/800	0.719910785	0.667302931	7.34E+04	9.32E+05	0.014281	1005064.561	0.014315	7.88%
Tramo 3/800	0.537068584	0.522515722	2.03E+04	7.29E+05	0.014557	749799.2982	0.014908	2.79%
Tramo 1/900(10m)	3.321460504	3.278810226	5.29E+04	4.07E+06	0.012694	4121846.842	0.011309	1.30%
Tramo 2/900	0.316100126	0.282152688	4.21E+04	3.50E+05	0.015497	392272.1053	0.016288	12.03%
Tramo 1/1000	0.635544194	0.601577294	3.79E+04	6.72E+05	0.014311	709824.5614	0.014943	5.65%
Tramo 2/1000	0.328166056	0.294218791	3.79E+04	3.29E+05	0.015544	366521.0526	0.016447	11.54%
Tramo 1/1100	1.877121937	1.821481912	5.65E+04	1.85E+06	0.013216	1905921.754	0.013068	3.05%
Tramo 2/1100	0.705100563	0.652493047	5.34E+04	6.63E+05	0.014247	715918.5965	0.014925	8.06%
Tramo 1/1300	2.923951644	2.881826397	3.62E+04	2.48E+06	0.012811	2512072.105	0.012604	1.46%
Tramo 2/1300	0.721407958	0.687433801	2.92E+04	5.91E+05	0.01429	619787.5439	0.015257	4.94%
Tramo 1/1500	0.699141221	0.646533289	3.92E+04	4.81E+05	0.014556	520569.7368	0.015566	8.14%
Tramo 1/1600	0.859742823	0.825721133	2.37E+04	5.76E+05	0.014392	600141.7544	0.015518	4.12%
Tramo 1/1700	3.321456098	3.278806543	2.80E+04	2.15E+06	0.012687	2182151.316	0.012956	1.30%
Tramo 1/3000	2.414211067	2.344020033	2.61E+04	8.73E+05	0.013793	898792.1053	0.01508	2.99%

TABLA 22 RESUMEN DE TUBERÍAS RED GINEBRA CAUDAL MÁXIMO 1 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 20000 Y 100000.

Ginebra Qmáx (Diferencias número de Reynolds 20000-100000) Darcy Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/300	0.257876628	0.266503127	-3.21E+04	9.92E+05	0.011838	9.60E+05	0.012698	-3.24%
Tramo 1/350	0.200476396	0.206990188	-2.08E+04	6.61E+05	0.012649	6.40E+05	0.013455	-3.15%
Tramo 2/350	0.512478112	0.527357185	-4.75E+04	1.68E+06	0.010953	1.64E+06	0.011177	-2.82%
Tramo 3/350	1.0220822	1.065028027	-1.37E+05	3.40E+06	0.009877	3.26E+06	0.010593	-4.03%
Tramo 1/600	1.013464093	1.056409413	-7.99E+04	1.97E+06	0.014082	1.89E+06	0.012973	-4.07%
Tramo 1/1100	0.997552813	1.040498306	-4.36E+04	1.06E+06	0.013639	1.01E+06	0.014196	-4.13%
Tramo 1/1300	1.013737553	1.056683085	-3.69E+04	9.08E+05	0.013938	8.71E+05	0.01482	-4.06%

TABLA 23 RESUMEN DE TUBERÍAS RED GINEBRA CAUDAL MÁXIMO 2 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 20000 Y 100000.



Los resultados con caudal máximo muestran que, al igual que en la red matriz de Medellín, un mayor número de tramos se vieron afectados con respecto a las demás horas del día. Se observa también que las diferencias porcentuales aumentaron de manera considerable, a pesar de que en esta red no se vio un efecto tan claro del desfase del número de Reynolds, sí se aprecia que en muchos casos se presentaba una diferencia considerable cuando se comparaban los factores de fricción con las dos ecuaciones. Otro detalle de resaltar es que con el caudal máximo de la red o en mejores términos, en la hora de máximo consumo, los rangos de número de Reynolds de los tramos con las principales diferencias se mantuvo también entre  $1 * 10^5$  y  $5 * 10^6$  que suelen corresponder a los tramos con diámetros de gran diámetro y por ende a los tramos que están transportando la mayor cantidad de caudal.

Otro detalle importante es el hecho de que el flujo que se está presentando en las tuberías oscila entre flujo turbulento hidráulicamente liso y flujo transicional (este último predominando en la mayoría de los escenarios), lo que en principio llevaría a pensar que la ecuación de Hazen-Williams está en un punto de aplicación aceptable. Sin embargo, al mirar los resultados, está claro que pese a ser una red que no presentó las diferencias que se vieron en la red matriz de Medellín y las que se verán a continuación en las redes de Dtown y Andalucía, es una red que también presentó divergencias importantes en la hidráulica, en cuanto a los niveles de los tanques, presiones de los nudos de demanda, números de Reynolds del sistema y pérdidas por fricción en los tramos de las tuberías.

La explicación de por qué es posible que las diferencias sean bajas entre la red Ginebra simulada con la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach se encuentra en la sección dedicada a emisores, en el análisis de las ilustraciones (Ilustración 79, Ilustración 80, Ilustración 81) y en la comparación realizada en los estudios de Bombardelli y García (Fabián Bombardelli, 2003), específicamente en la Gráfica 4 (Sección 2.5 Trabajos de Fabián Bombardelli y Marcelo García). Al comparar estas gráficas, se puede ver que aunque en los estudios de los autores hay gran variación de los coeficientes de Hazen-Williams para un mismo material, en los resultados de la presente investigación los coeficientes encontrados con la ecuación empírica coinciden con los coeficientes teóricos tomados en esta investigación (140 para hierro dúctil y 150 para PVC). Esto último implica que en este caso, la hidráulica entre las dos ecuaciones es muy similar; lo que no quiere decir que la ecuación de Hazen-Williams sea indicada para este tipo de redes, ya que como se ha visto a través de los análisis de esta red y de toda investigación, existen diferencias que cambian radicalmente la hidráulica, y adicionalmente se registra un desbalance de masa entre las dos ecuaciones, diferencias en las pérdidas por fricción en las tuberías, diferencias en los llenados en los tanques y por ende diferencias a la hora de establecer criterios para una operación indicada o búsqueda de soluciones a la red.

---

#### 4.4.4 RED ANDALUCÍA

---

Los resultados de la red de Andalucía se muestran de manera similar a la redes presentadas a anteriormente. Hay que resaltar que después de la red matriz de Medellín esta fue la red que presentó las mayores diferencias hidráulicas entre la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach.

A continuación se muestran los tanques y el esquema de su localización:

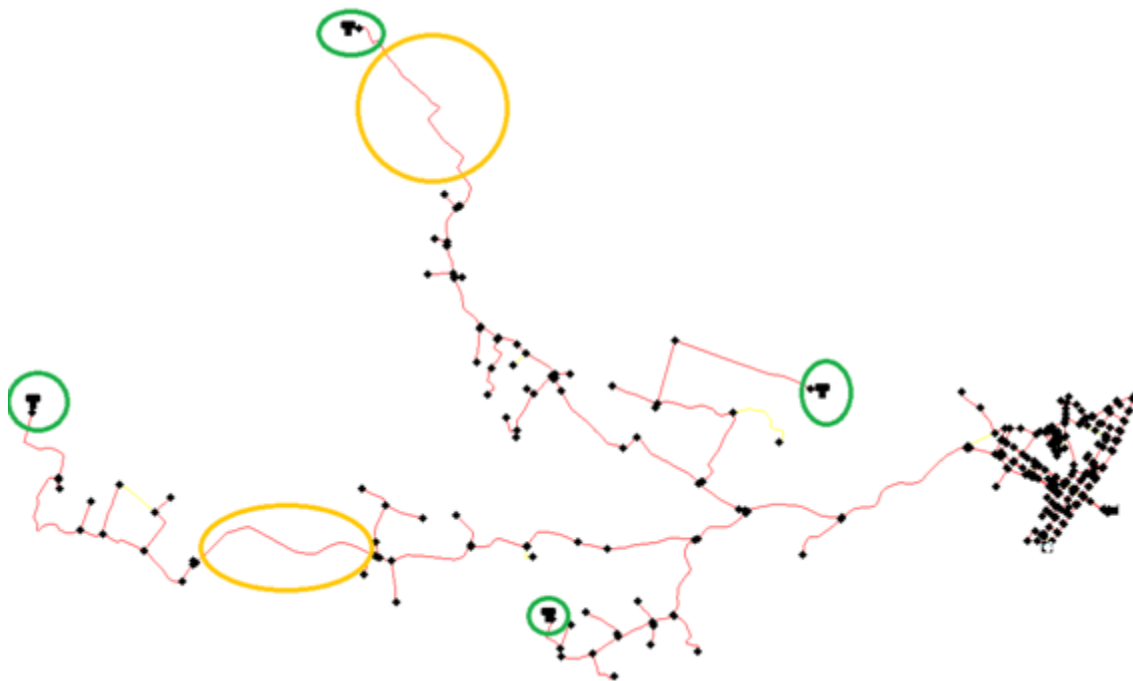


FIGURA 35 LOCALIZACIÓN DE LOS TANQUES Y DE ALGUNOS TRAMOS ANALIZADOS DE LA RED DE ANDALUCÍA.

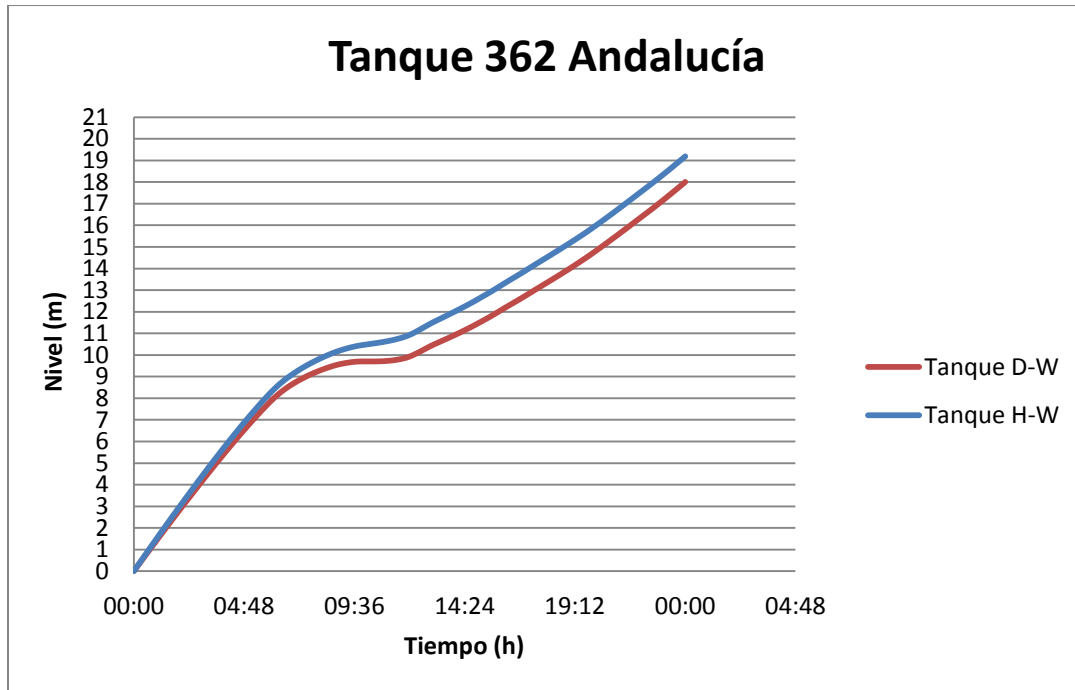


ILUSTRACIÓN 157 NIVEL TANQUE 362 DE LA RED DE ANDALUCÍA.

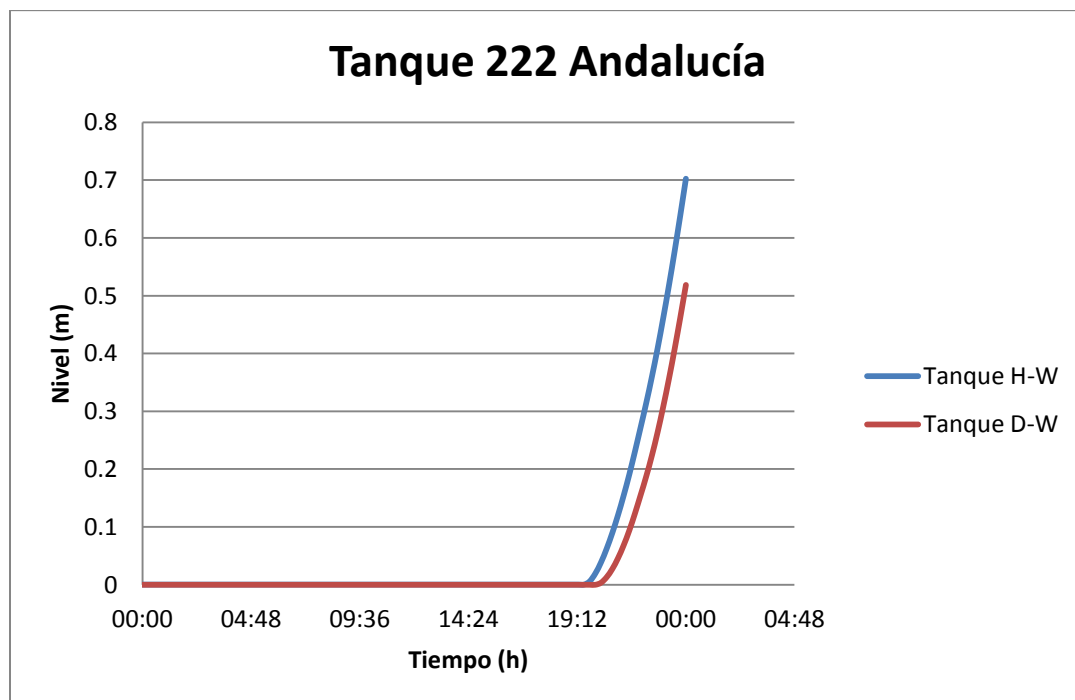


ILUSTRACIÓN 158 NIVEL TANQUE 222 DE LA RED DE ANDALUCÍA.

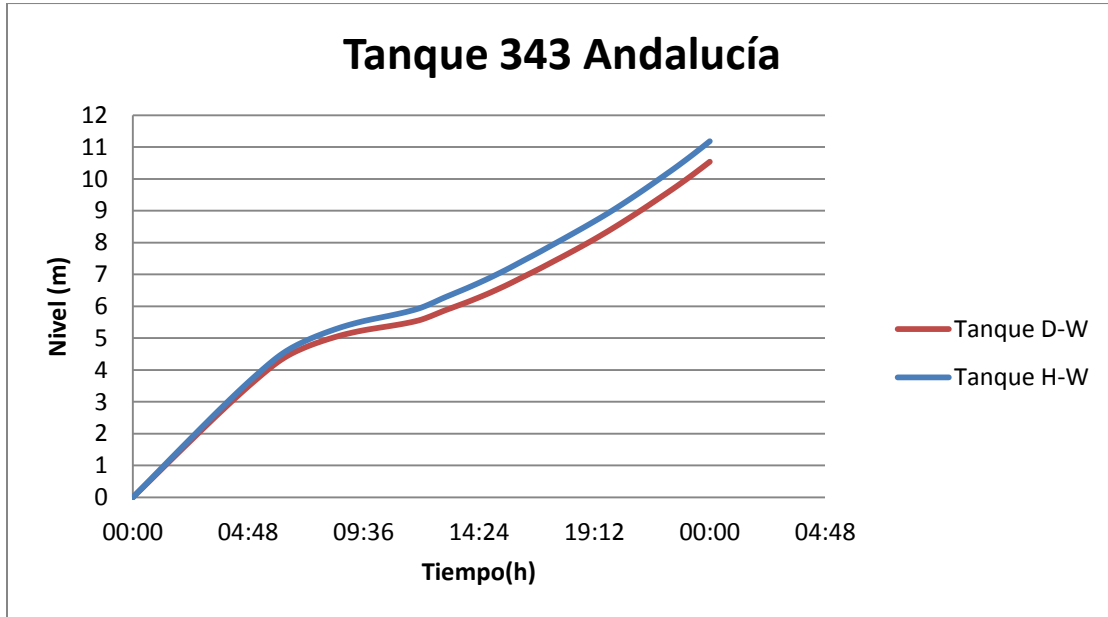


ILUSTRACIÓN 159 NIVEL TANQUE 343 DE LA RED DE ANDALUCÍA.

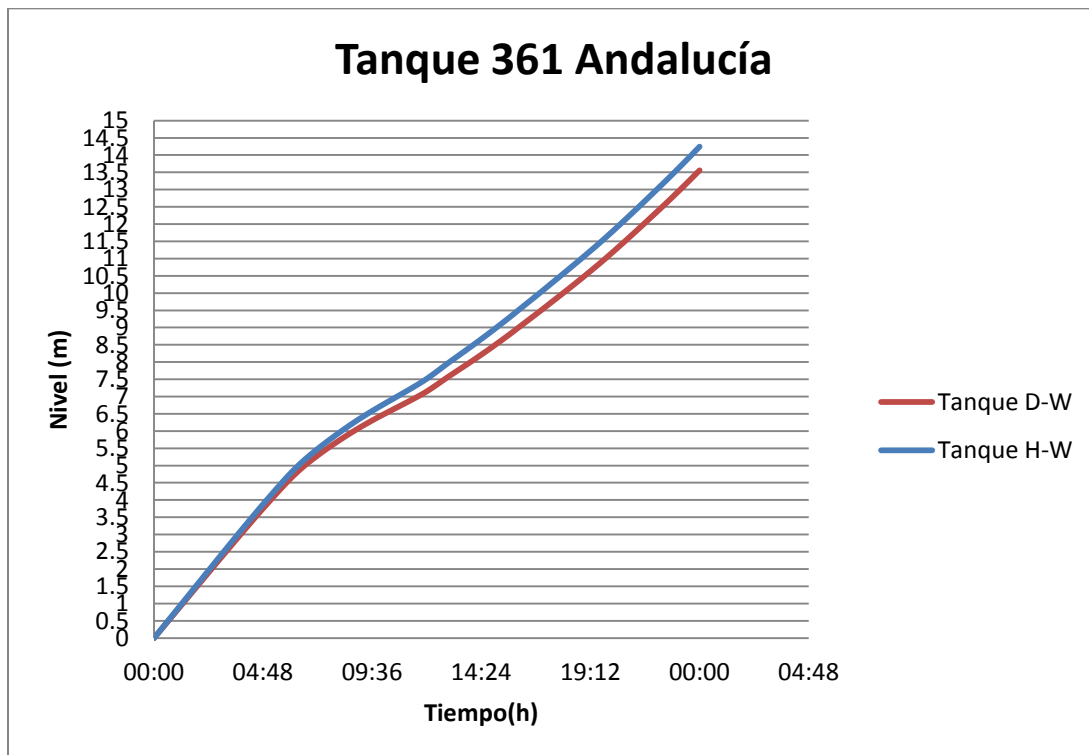


ILUSTRACIÓN 160 NIVEL TANQUE 361 DE LA RED DE ANDALUCÍA.

Los resultados con los 4 tanques en la red de Andalucía muestran un comportamiento muy similar a lo que se encontró inicialmente en la red de Ginebra. Al inicio del día los tanques parecen estar llenándose de manera muy similar en las dos redes; sin embargo, si se observan las ilustraciones, se puede ver que existe una clara separación en los patrones de llenado de los tanques en los últimos horarios del día o más precisamente cuando se presentan los tiempos de demanda media y máxima del día, con diferencias que alcanzan hasta 1 metro. Esto se presenta ya que como se ha venido analizando a lo largo de esta investigación, existe un desbalance de masa causado por operar la red utilizando la ecuación de Hazen-Williams con respecto a la hidráulica. Por tales motivos se decidió investigar el efecto con 2 tanques en la red.

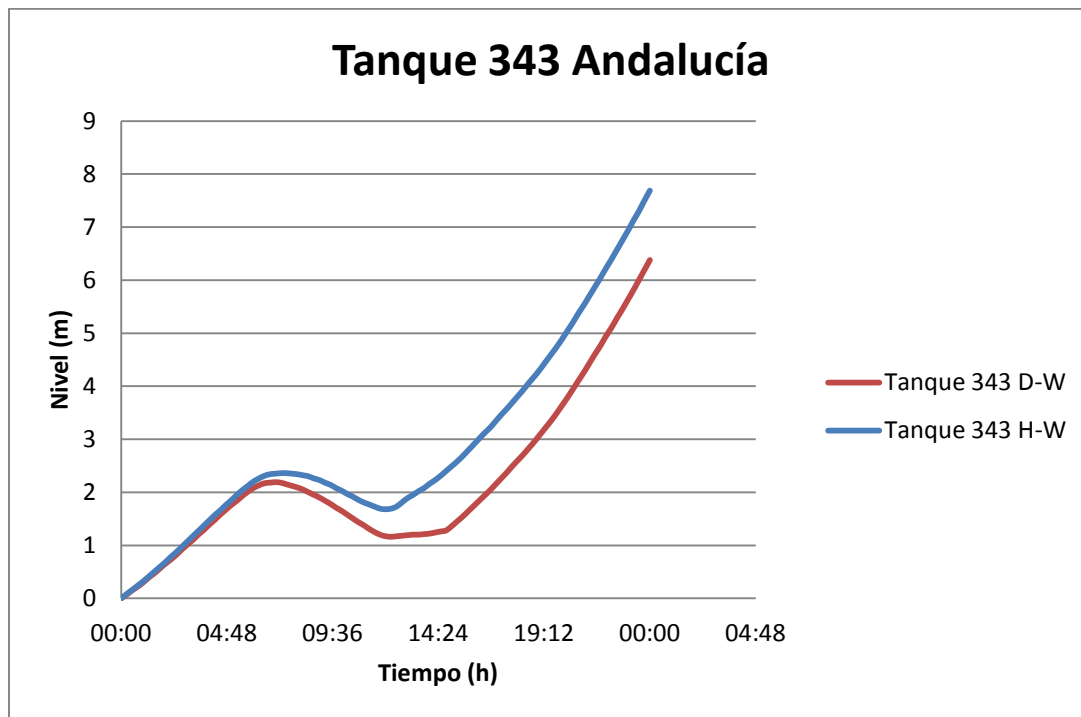


ILUSTRACIÓN 161 NIVEL TANQUE 343 DE LA RED DE ANDALUCÍA CON 2 TANQUES.

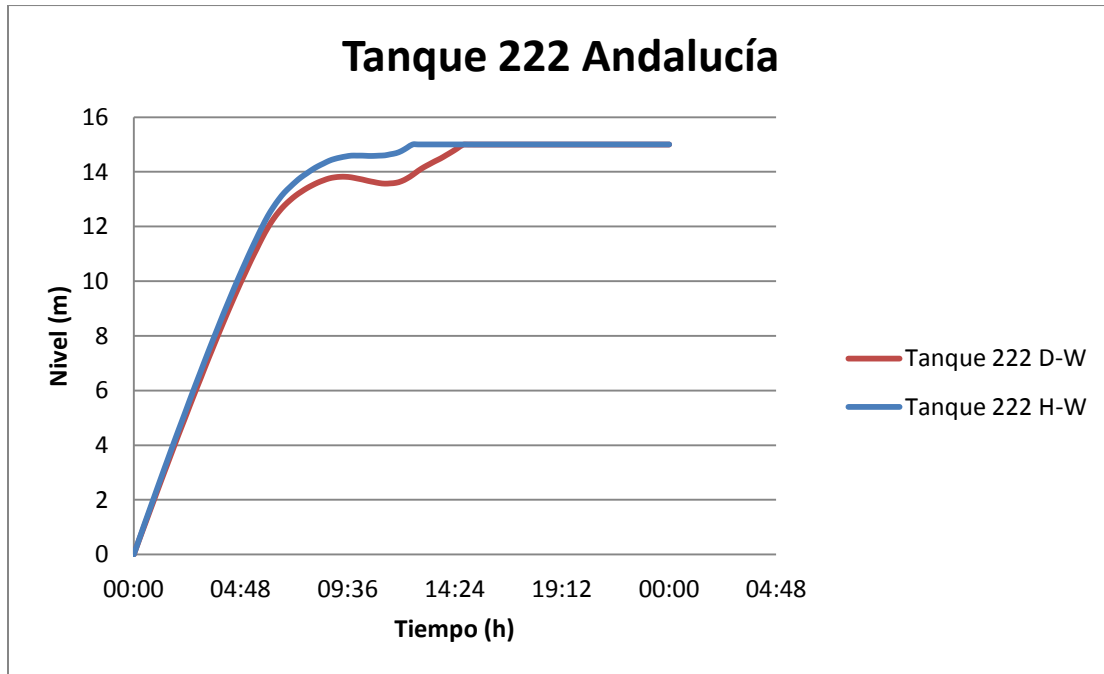


ILUSTRACIÓN 162 NIVEL TANQUE 222 DE LA RED DE ANDALUCÍA CON 2 TANQUES.

Los resultados con 2 tanques no muestran una diferencia significativa con respecto a lo que se encontró cuando se trabajó con los cuatro tanques; sin embargo, debido a que los niveles de los tanques no fueron tan altos como cuando se tenían los cuatro tanques, se puede ver con mucha más claridad que hay diferencias significativas entre las dos ecuaciones. Para comenzar, se observa que en el momento en que se produce un vaciado de tanque, está claro que con la ecuación de Hazen-Williams el vaciado del tanque 222 es mucho más lento. Adicionalmente, cuando se ven los tanques en el análisis de esta red, se identifica una diferencia casi constante, como si se mantuviera una distancia entre los llenados, al aplicar las dos ecuaciones.

Estas diferencias, como se verá más adelante, van a jugar un papel vital en la hidráulica de la red, y al recopilar los resultados con emisores en la red se identifica claramente que los emisores presentan diferencias bastante grandes en el caudal emisor y en las presiones de la red. Así mismo, cuando se llegue a los análisis de los diagramas de Moody y las diferencias en las tuberías de la red con respecto al número de Reynolds, se va a observar que lo que está ocurriendo internamente en la red es bastante interesante ya que las consecuencias operacionales al emplear la ecuación de Hazen-Williams van a ser preocupantes.

A continuación se muestran los análisis realizados a un grupo de tuberías con el fin de determinar lo que ocurría en el tiempo y si los hallazgos eran similares a lo encontrado en las otras redes probadas durante esta tesis. Los resultados que arroja esta red ratifican los



hallazgos encontrados en la red matriz de Medellín y la red de Ginebra, según se aprecia en el diagrama de Moody donde se aprecian claramente las diferencias entre las dos ecuaciones.

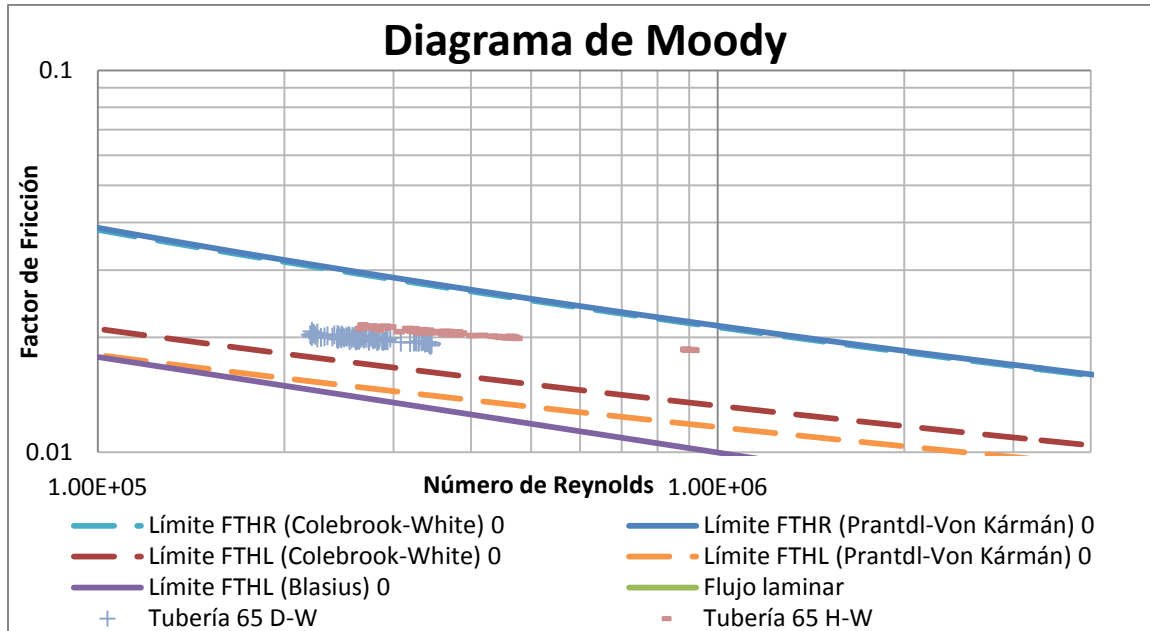


ILUSTRACIÓN 163 DIAGRAMA DE MOODY DE LA TUBERÍA 65 RED DE ANDALUCÍA, CON DIÁMETRO DE 1500 MM Y CAUDAL MEDIO DE 110 L/S.

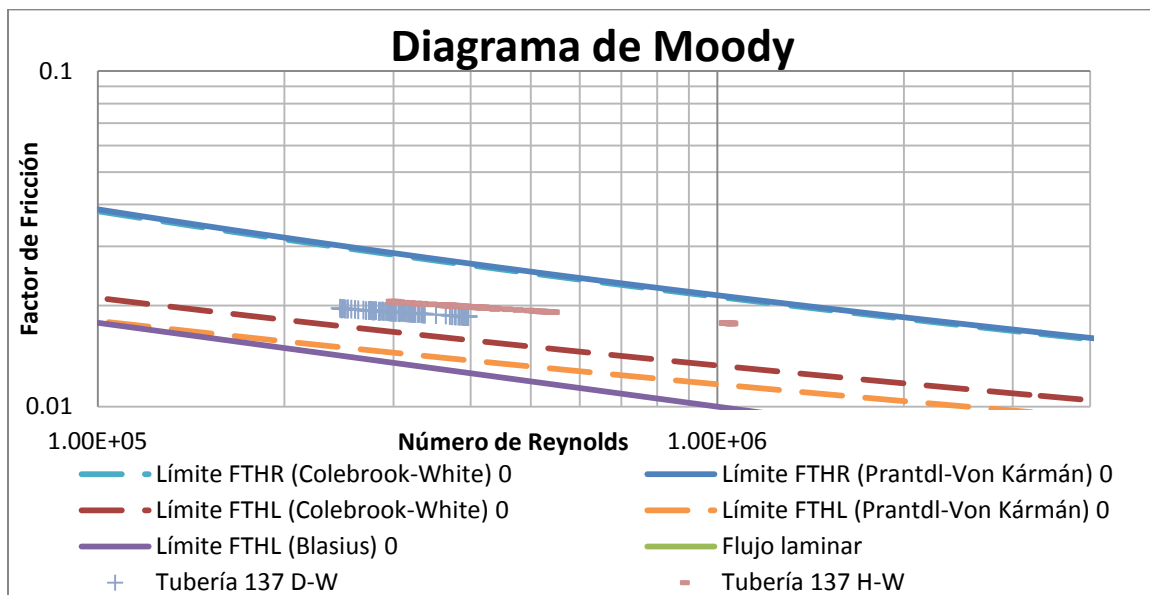


ILUSTRACIÓN 164 DIAGRAMA DE MOODY DE LA TUBERÍA 137 RED DE ANDALUCÍA, CON DIÁMETRO DE 1300 MM Y CAUDAL MEDIO DE 110 L/S.

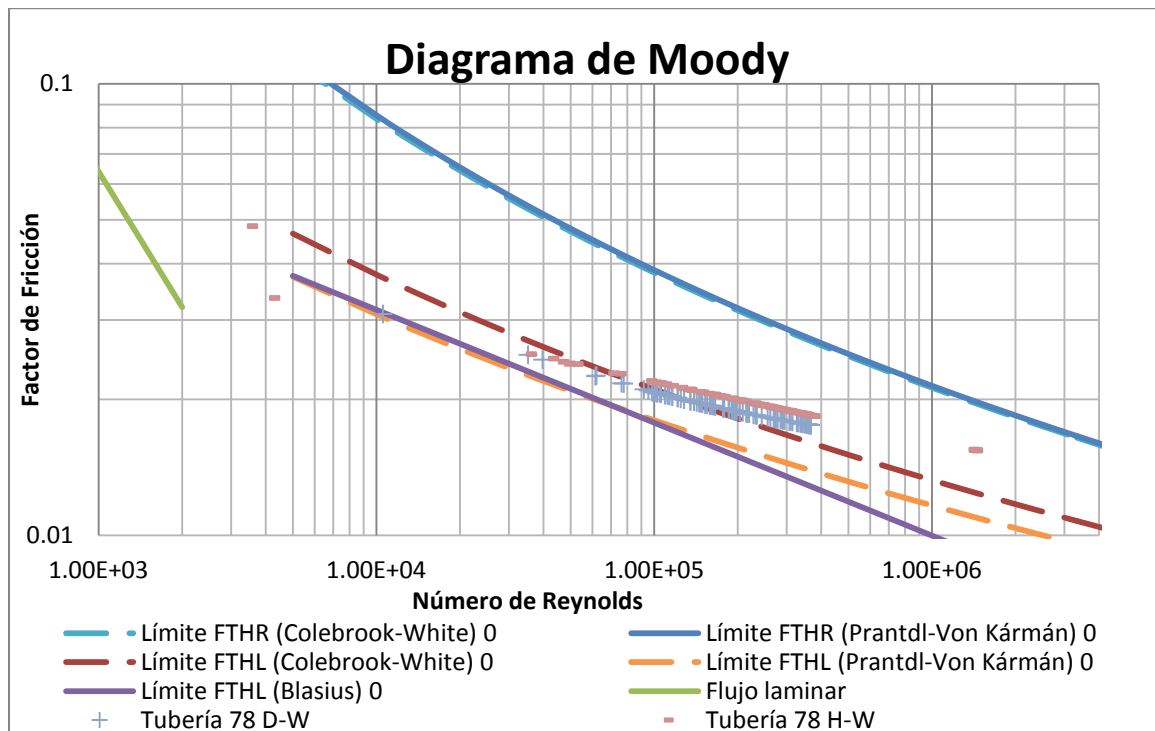


ILUSTRACIÓN 165 DIAGRAMA DE MOODY DE LA TUBERÍA 78 RED DE ANDALUCÍA, CON DIÁMETRO DE 700 MM Y CAUDAL MEDIO DE 408 L/S.

Conviene precisar que los diagramas de Moody realizados para esta red se basaron en tuberías que se dirigían a los tanques y que a su vez eran pertenecientes a las ramificaciones de la red. Como se mencionó atrás, los resultados que se observan en estos diagramas permiten ver con total claridad que hay una diferencia considerable en los números de Reynolds que se presentan en las tuberías. Al igual que en los casos anteriores este desfase es causado por un desbalance de masa entre la red simulada con la ecuación empírica y la ecuación físicamente basada. Posteriormente se realizó un análisis para determinar cuáles fueron las tuberías que presentaron mayores diferencias y se identificó que los efectos hidráulicos en la red fueron bastante considerables.

Una vez identificadas las diferencias de nivel en los tanques de la red (al igual que anteriormente se habían identificado las diferencias en los emisores) y que también se estaba presentando un desbalance importante en el caudal que estaba circulando por la red, se trazó un mapa para determinar cuáles eran las tuberías que presentaban números de Reynolds mayores con la ecuación de Hazen-Williams (Rojo), cuales presentaban diferencias mayores con la ecuación de Darcy-Weisbach (Verde) y las tuberías que no presentaron ningún tipo de diferencias (Amarillo).

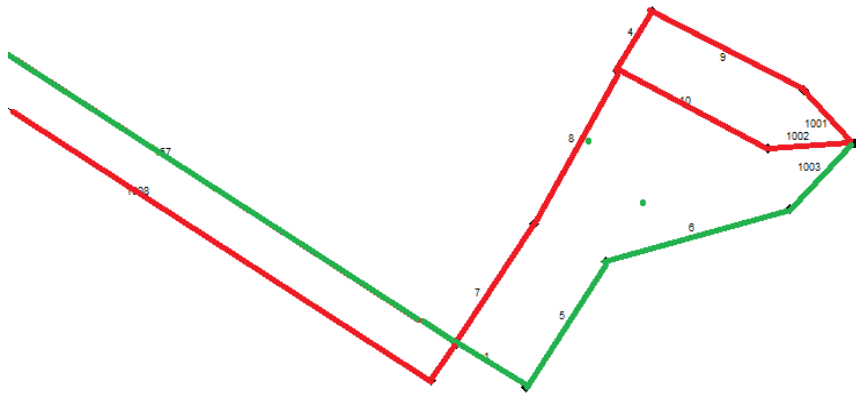


FIGURA 36 SALIDA DEL EMBALSE RED ANDALUCÍA.

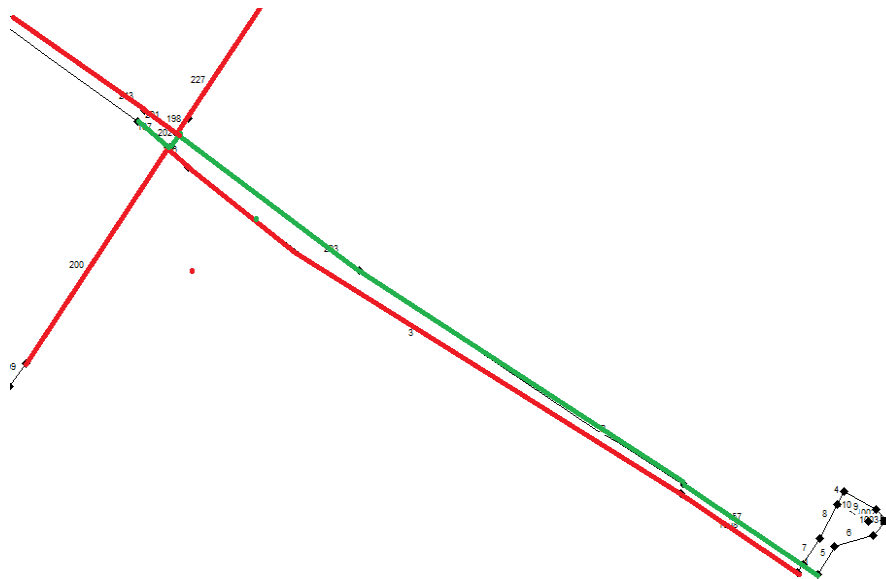


FIGURA 37 PRINCIPALES TRAMOS A LA SALIDA DEL EMBALSE RED ANDALUCÍA.

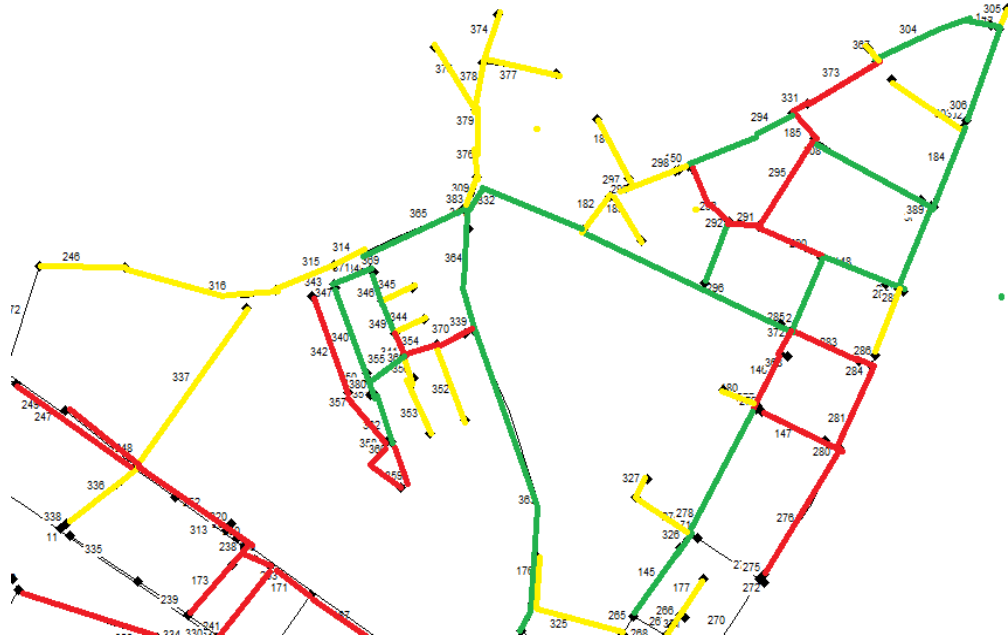


FIGURA 38 ENTRAMADO INTERNO DE LA RED DE ANDALUCÍA 1.



FIGURA 39 ENTRAMADO INTERNO DE LA RED DE ANDALUCÍA 2.

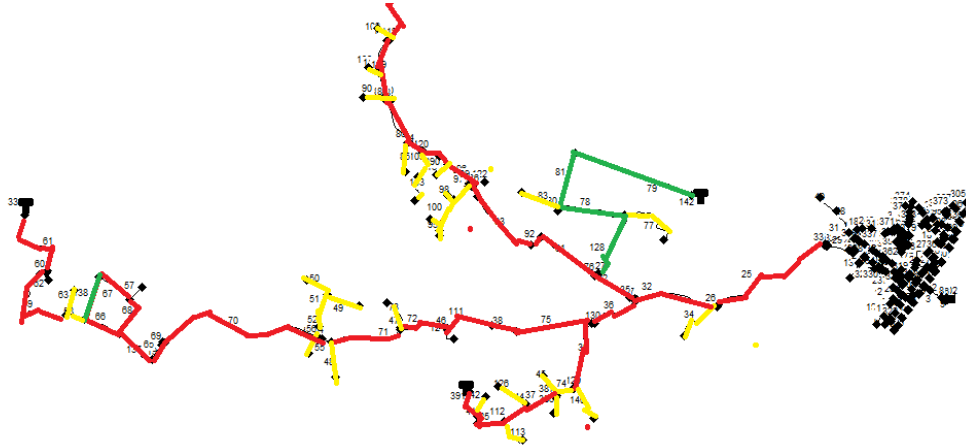


FIGURA 40 RAMIFICACIONES DE LA RED ANDALUCÍA.

De las figuras anteriores se puede ver que la solución de la hidráulica utilizando la ecuación de Hazen-Williams es considerablemente diferente a la ecuación de Darcy-Weisbach. Este no es un efecto nuevo, teniendo en cuenta que es algo que se ha observado en todas las redes del sistema.

Así mismo, los resultados que se observan en las figuras anteriores permiten concluir una vez más que los tramos que presentan diferencias entre las dos ocasiones suelen seguir la dirección de las ramificaciones con tanques y también que hay tanques a los que les está entrando más caudal cuando se emplea la ecuación de Hazen-Williams que con la ecuación de Darcy-Weisbach.

Hay quienes argumentan que las diferencias de llenado en estos tanques son bajas o poco significativas y que esta no es una razón suficiente para dejar de utilizar la ecuación de Hazen-Williams. Sin embargo, si se vuelve al análisis de los emisores y a las ilustraciones con los niveles de los tanques en las otras redes, se puede ver que, al utilizar la ecuación de Hazen-Williams, los patrones de vaciado de los tanques tienen a ser subestimados y/o sobrestimados. El efecto que esto tiene en la red es que si se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach y la lectura arroja que el tanque ya no tenga agua, esta será suministrada por el embalse, mientras que al operar la misma red con la ecuación empírica, el resultado mostrará erróneamente que el tanque todavía tiene agua almacenada, lo cual genera un nuevo desbalance de masa en la red y direcciones de flujo distintas, cambiando la forma en que se están simulando las pérdidas por fricción, las presiones en la red e incluso las velocidades que se presentan en las tuberías.

Con base a lo expuesto anteriormente, se procedió a identificar las tuberías que presentaban las mayores diferencias entre las dos ecuaciones y se crearon nuevos mapas resaltando las tuberías que presentaban diferencias importantes en términos del número de Reynolds.

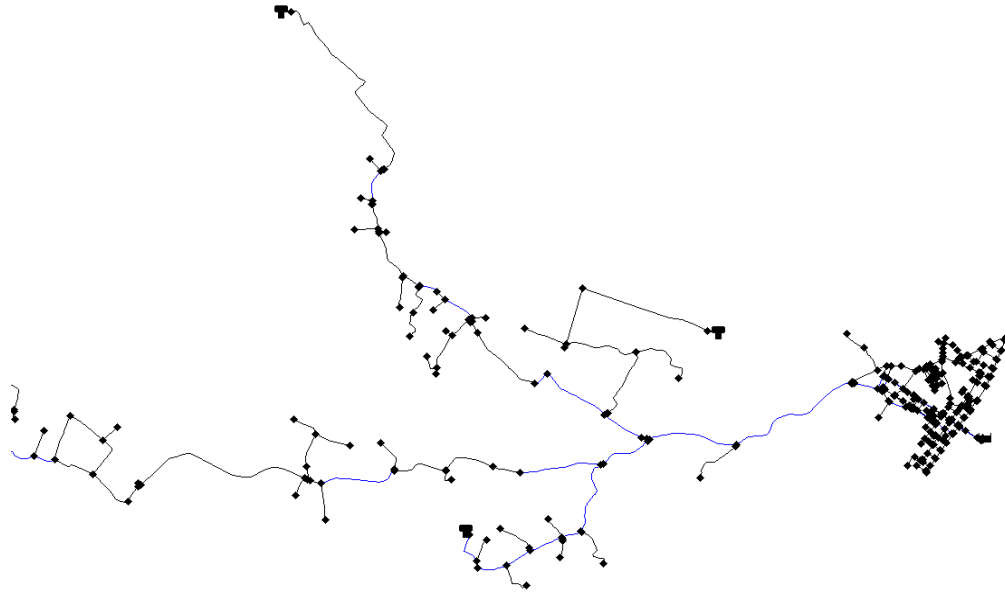


FIGURA 41 RAMIFICACIONES CON ALTAS DIFERENCIAS RED DE ANDALUCÍA CAUDAL MEDIO.

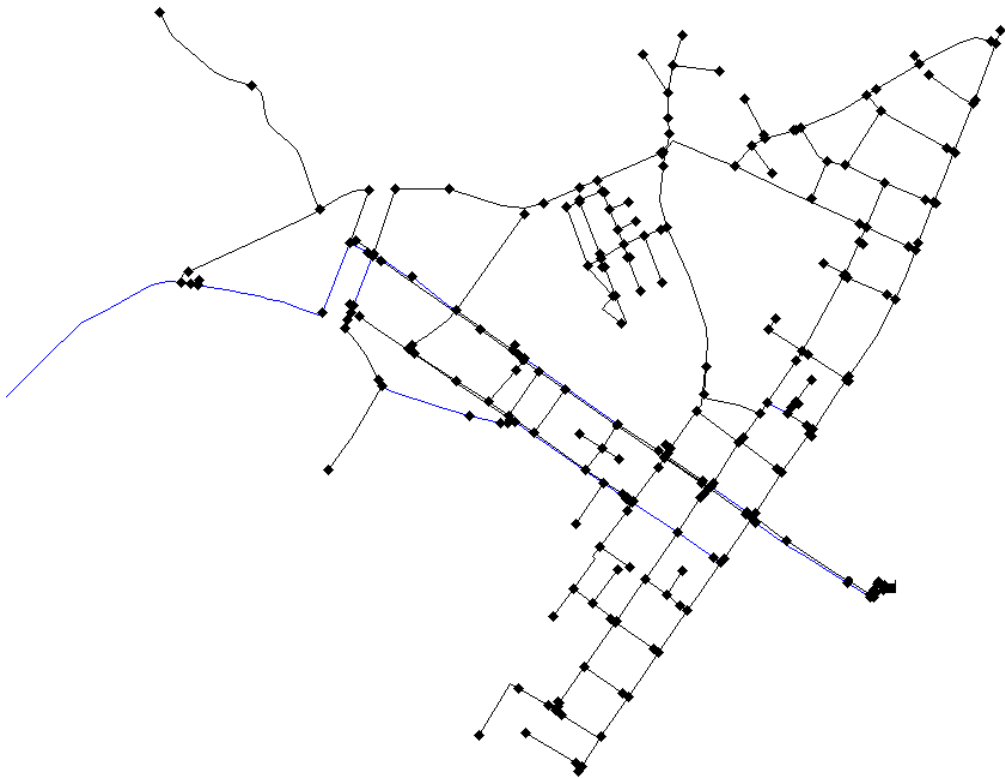


FIGURA 42 ENTRAMADOS INTERNOS CON ALTAS DIFERENCIAS RED ANDALUCÍA CAUDAL MEDIO.

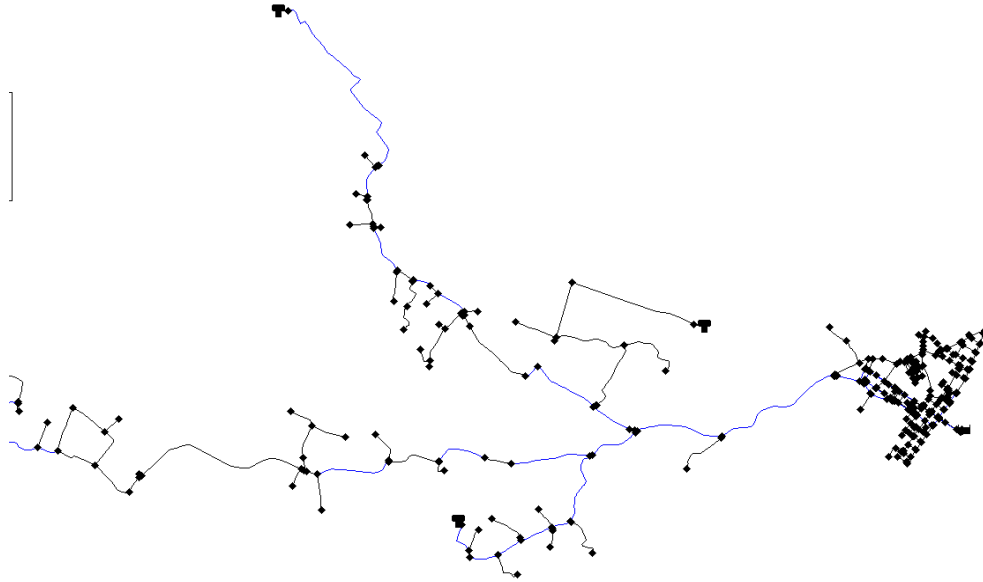


FIGURA 43 RAMIFICACIONES CON ALTAS DIFERENCIAS RED ANDALUCÍA CAUDAL MÁXIMO.

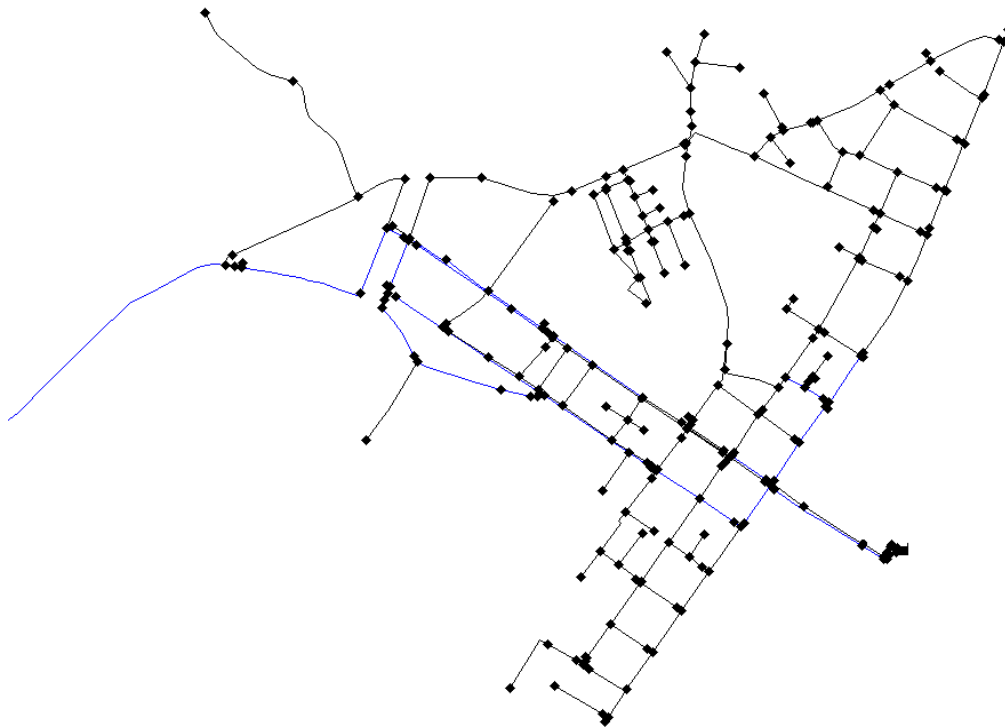


FIGURA 44 ENTRAMADOS INTERNOS CON ALTAS DIFERENCIAS RED ANDALUCÍA CAUDAL MÁXIMO.

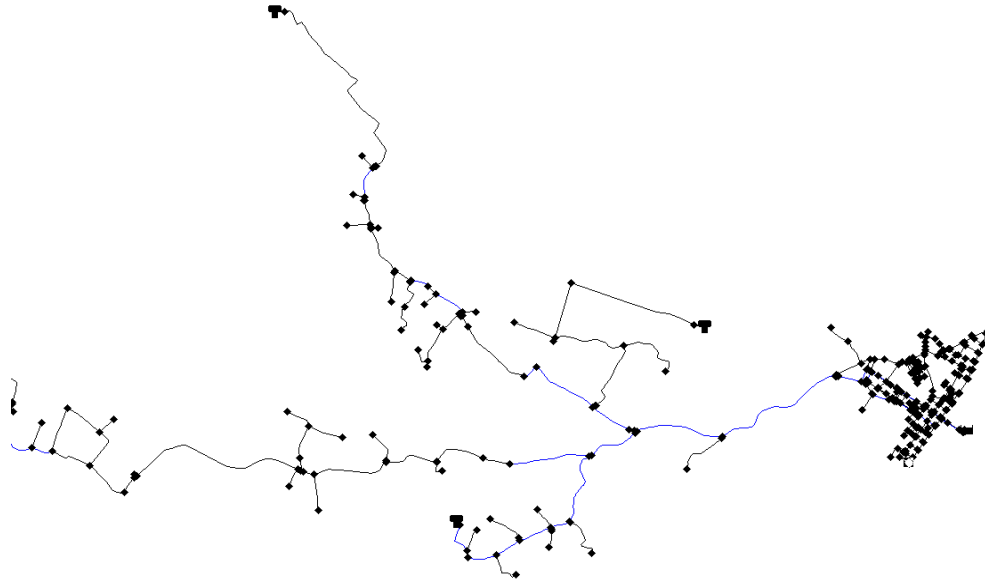


FIGURA 45 RAMIFICACIONES CON ALTAS DIFERENCIAS RED ANDALUCÍA CAUDAL MÍNIMO.

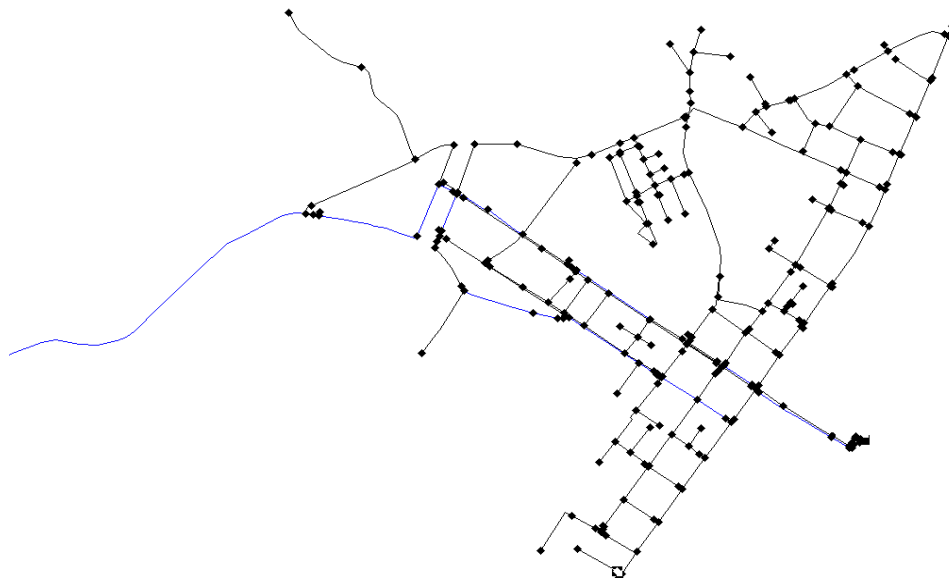


FIGURA 46 ENTRAMADOS INTERNOS CON ALTAS DIFERENCIAS RED ANDALUCÍA CAUDAL MÍNIMO.

Se observa una vez más que los tramos de tuberías que presentan altas diferencias en cuanto al número de Reynolds son tramos que salen de los embalses (es decir se está presentando una diferencia de caudal entre la red que trabaja con la ecuación empírica y la ecuación físicamente basada) y en los tramos que conducen a las ramificaciones que tienen terminaciones en tanques. Si bien las figuras podrían interpretarse en que sólo son estas



ramas los que se ven afectadas, la realidad es que al estar transportando caudales diferentes, toda la hidráulica de la red se está viendo comprometida, ya que de estos tramos se subdividen nuevos tramos que a su vez están transportando una cantidad de caudal diferente a la que transportarían si se operara con la ecuación de Darcy-Weisbach. Otro efecto que se puede observar en las figuras es que el número de tramos con diferencias en el número de Reynolds se ve incrementado cuando se presenta la hora de máximo consumo por lo que es el momento en que la hidráulica de la red está más vulnerable a presentar diferencias entre las dos ecuaciones. Al observar más detalladamente las figuras, se puede ver que en los 3 momentos claves del estudio hay tramos que permanentemente presentan diferencias significativas; estos tramos, como se verá más adelante, son aquellos que presentan grandes diámetros y que están transportando la mayor cantidad de caudal.

A continuación se presentan los resultados cuantitativos de estos tramos; esto incluye, los diagramas de Moody de los tramos, al igual que las tablas resumen con la información más relevante.

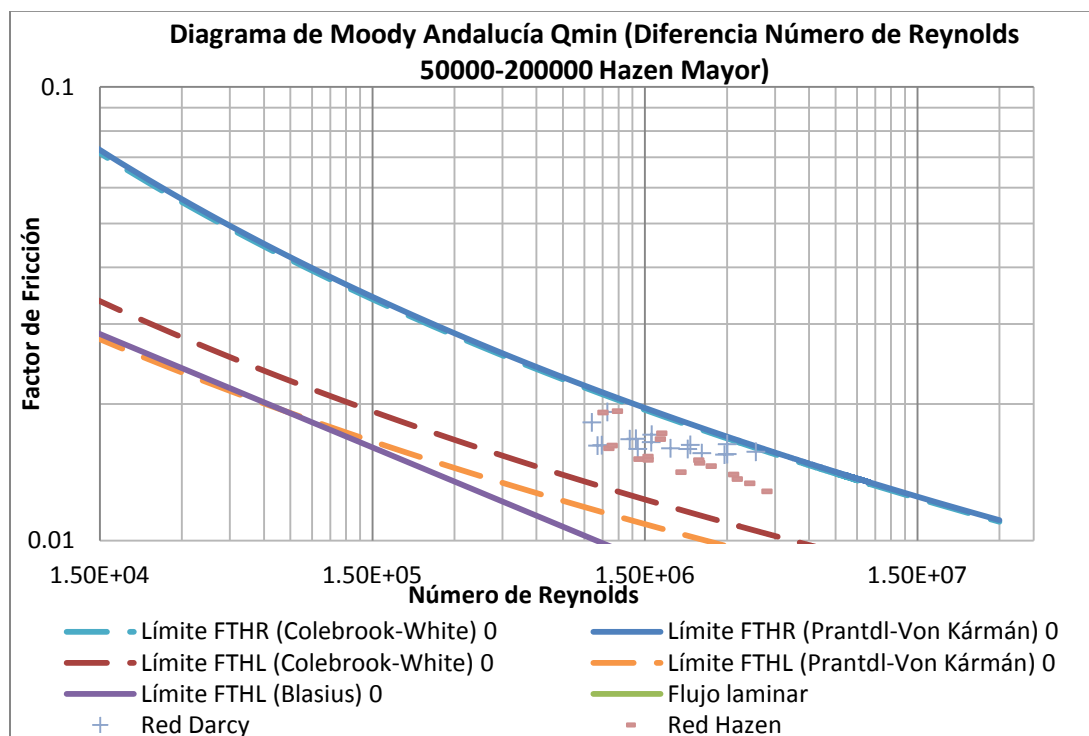


ILUSTRACIÓN 166 DIAGRAMA DE MOODY DE RED DE ANDALUCÍA TRAMOS CON HAZEN-WILLIAMS MAYOR PARA EL CAUDAL MÍNIMO.

Andalucía Qmín (Diferencias número de Reynolds 50000-200000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Porcentual
Tramo 1/400(1 m)	1.255457833	1.208021166	1.32E+05	3.01E+06	0.016299	3.51E+06	0.013364	16.33%
Tramo 2/400	0.492057604	0.473851698	5.08E+04	1.32E+06	0.016718	1.37E+06	0.015112	3.84%
Tramo 1/450(14 m)	1.633116866	1.546938234	2.14E+05	3.84E+06	0.015684	4.05E+06	0.012828	5.57%
Tramo 2/450	0.789886582	0.752138173	9.37E+04	1.87E+06	0.015963	1.96E+06	0.014141	5.02%
Tramo 3/450	0.597988802	0.561470273	9.06E+04	1.39E+06	0.016753	1.48E+06	0.015306	6.50%
Tramo 1/600	1.694455383	1.618881764	1.41E+05	3.01E+06	0.015501	3.15E+06	0.013657	4.67%
Tramo 2/600	1.232868682	1.185431984	8.83E+04	2.21E+06	0.016241	2.29E+06	0.014828	4.00%
Tramo 3/600	0.798179922	0.760431707	7.03E+04	1.42E+06	0.01591	1.49E+06	0.015054	4.96%
Tramo 1/700	1.917299443	1.846180069	1.13E+05	2.95E+06	0.01546	3.06E+06	0.013975	3.85%
Tramo 2/700	0.668146127	0.631627405	5.83E+04	1.01E+06	0.01618	1.07E+06	0.015967	5.78%
Tramo 1/800	1.632515805	1.546337646	1.20E+05	2.16E+06	0.015905	2.28E+06	0.015029	5.57%
Tramo 2/800	1.812858303	1.74173918	9.93E+04	2.43E+06	0.015575	2.53E+06	0.014583	4.08%
Tramo 3/800	0.785671608	0.747923236	5.27E+04	1.04E+06	0.016217	1.10E+06	0.016187	5.05%
Tramo 1/1100 (1 m)	1.641815987	1.56855301	7.44E+04	1.59E+06	0.017104	1.67E+06	0.017227	4.67%
Tramo 1/1300(8 m)	1.917301996	1.84618138	6.11E+04	1.59E+06	0.016471	1.65E+06	0.016726	3.85%
Tramo 1/1600(1 m)	1.641815422	1.568552476	5.11E+04	1.09E+06	0.0192	1.15E+06	0.019277	4.67%
Tramo 1/1800	1.634192316	1.548013842	5.35E+04	9.61E+05	0.018209	1.01E+06	0.019143	5.57%

TABLA 24 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED ANDALUCÍA PARA EL CAUDAL MÍNIMO PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 50000 Y 200000.

En la hora de menor consumo de la red, los resultados muestran las mismas tendencias que se han estado observados a lo largo de esta investigación. Es decir, tanto en el diagrama de Moody como en la tabla de resumen se puede ver que las tuberías que están teniendo este efecto son tuberías con números de Reynolds entre  $1.5 * 10^5$  y  $5 * 10^6$ . Así mismo, los diámetros de la red que presentan divergencias considerables en los números de Reynolds son los mayores a los 600 mm. Si bien, las diferencias porcentuales no parecen ser de gran magnitud, estas juegan un papel significativo por el hecho de que simplemente no se está representando de manera correcta la hidráulica del sistema, al utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach. Así mismo, cuando se presenten los resultados para la hora en que se consume el caudal medio y el caudal máximo de esta red se observará que las diferencias porcentuales se amplían.

Se destaca también el hecho que la mayoría de los datos mostrados se encuentran dentro de la zona de transición, acercándose al flujo turbulento hidráulicamente rugoso. Esto es bastante interesante porque como se ha estado mencionando anteriormente, estas condiciones deberían ser las adecuadas para la aplicación de la ecuación de Hazen-Williams. Sin embargo, al identificar los puntos en el diagrama de Moody (cada uno representa un tramo de la red), se puede ver que hay divergencia considerable a la hora de evaluar el factor de fricción y también un desfase en los números de Reynolds. Todo lo anterior permite concluir que incluso dentro de ciertos rangos históricamente aceptables (B.A. Christensen, 2000) de la ecuación de Hazen-Williams, esta sigue presentando divergencias considerables con respecto a la ecuación de Darcy-Weisbach en términos de la masa que circula en el sistema, el cálculo de las pérdidas por fricción y las presiones de la red. Ver Sección 4.2.4 Red Andalucía.

Otro aspecto que no se ha mencionado de la red es que se cuantificó el desbalance de masa que la ecuación de Hazen-Williams está enviando al sistema con respecto a lo que se presenta con la ecuación de Darcy-Weisbach. La red está presentando un desbalance de masa de 170 L/s, que se constituye en el desbalance de masa más grande de todas las redes probadas hasta el momento; una vez más, 170 L/s dentro de un caudal total de la red de  $2.2 m^3/s$  no parece ser tan significativo, pero con lo que se ha mostrado y analizado, en conjunto con los resultados que se van a mostrar más adelante, se concluye que el efecto que puede tener este desbalance es bastante considerable.

A continuación se muestran los resultados para la hora en que se presenta el caudal medio demandado:

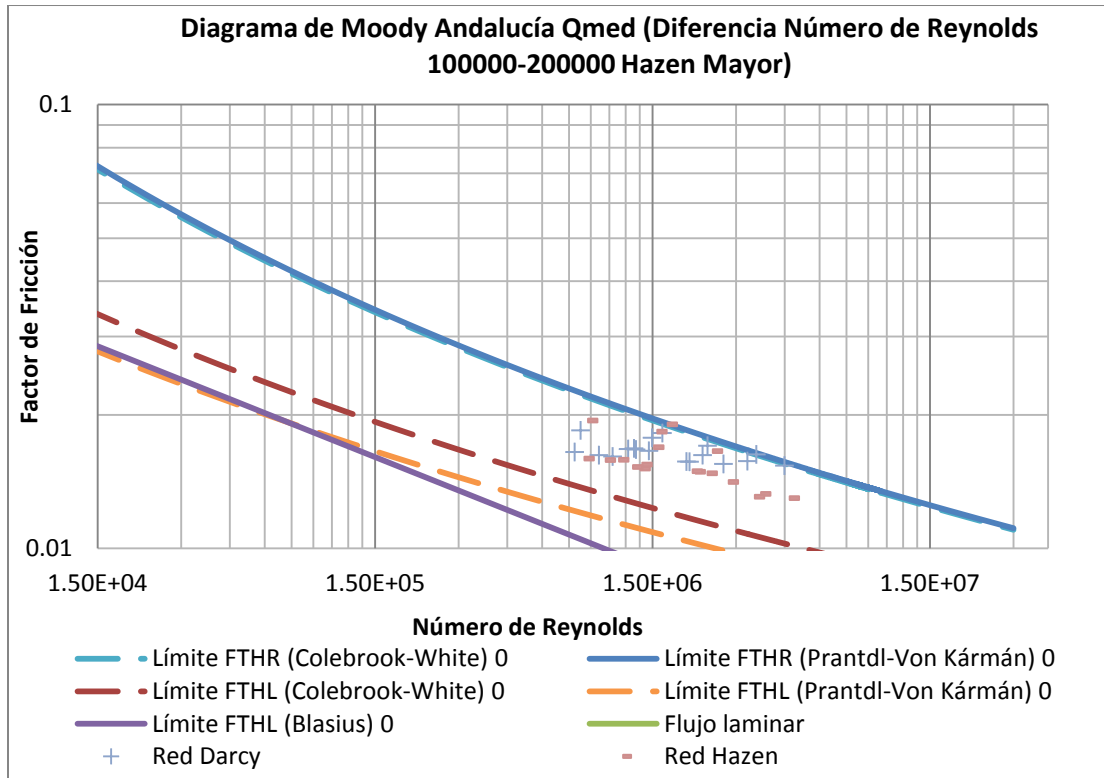


ILUSTRACIÓN 167 DIAGRAMA DE MOODY DE RED DE ANDALUCÍA TRAMOS CON HAZEN-WILLIAMS MAYOR PARA EL CAUDAL MEDIO.

Andalucía Qmed (Diferencias número de Reynolds 100000-200000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Porcentual
Tramo 1/400(1m)	1.3246161	1.2731166	1.44E+05	3.55E+06	0.016286	3.70E+06	0.013267	4.05%
Tramo 2/400	0.486968475	0.468815599	5.07E+04	1.31E+06	0.016706	1.36E+06	0.015133	3.87%
Tramo 3/400	0.457533009	0.439380133	5.07E+04	1.23E+06	0.016747	1.28E+06	0.015258	4.13%
Tramo 1/450(14 m)	1.4152378	1.329811601	2.12E+05	3.30E+06	0.015729	3.51E+06	0.013074	6.42%
Tramo 2/450	0.556147736	0.518839081	9.26E+04	1.29E+06	0.016804	1.38E+06	0.01545	7.19%
Tramo 1/500	0.382239542	0.352280529	6.69E+04	7.87E+05	0.016488	8.54E+05	0.015937	8.50%
Tramo 1/600	2.51929687	2.41194912	2.00E+05	4.49E+06	0.015366	4.69E+06	0.012981	4.45%
Tramo 2/600	1.274045443	1.222546571	9.59E+04	2.28E+06	0.016226	2.37E+06	0.014768	4.21%
Tramo 3/600	0.547248601	0.517153966	5.60E+04	9.63E+05	0.016224	1.02E+06	0.015816	5.82%
Tramo 1/700(26 m)	1.772082763	1.696207088	1.21E+05	2.71E+06	0.015499	2.83E+06	0.014115	4.47%
Tramo 2/700	0.713206485	0.675897677	5.95E+04	1.08E+06	0.016111	1.14E+06	0.015838	5.52%
Tramo 1/800(15m)	1.538275062	1.462399819	1.06E+05	2.04E+06	0.015678	2.15E+06	0.014882	5.19%
Tramo 2/800	1.501440014	1.425564771	1.06E+05	1.99E+06	0.015694	2.10E+06	0.014927	5.32%
Tramo 1/1100(1m)	2.440539436	2.334931916	1.07E+05	2.37E+06	0.017034	2.48E+06	0.016567	4.52%
Tramo 1/1300(8m)	1.772084907	1.696208493	6.52E+04	1.46E+06	0.016592	1.52E+06	0.016904	4.47%
Tramo 1/1600(2m)	2.440537959	2.334932191	7.37E+04	1.63E+06	0.018196	1.70E+06	0.019035	4.52%
Tramo 1/1800	2.519296587	2.411951382	6.66E+04	1.50E+06	0.017755	1.56E+06	0.01833	4.45%
Tramo 2/1800	1.417644282	1.332219037	5.30E+04	8.27E+05	0.01845	8.80E+05	0.019417	6.41%

TABLA 25 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED ANDALUCÍA PARA EL CAUDAL MEDIO PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 100000 Y 200000.

Como se mencionó anteriormente, los resultados del caudal medio son muy similares a lo encontrado con el caudal mínimo y con los resultados encontrados en la red Ginebra y la red matriz de Medellín. Se puede ver que existe un desbalance de masa, una diferencia importante en el diagrama de Moody, donde se ve claramente un desfase en el número de Reynolds y también diferencias considerables a la hora de calcular el factor de fricción. Así mismo, se observó que el efecto se vio agravado, tanto en el número de tramos afectados, como en la magnitud de los errores.

Un detalle a mencionar es que no se deben subestimar la magnitud de los errores en los factores de fricción ni en los caudales, teniendo en cuenta que la hidráulica de la red se está solucionando de manera diferente y lo que es más importante, las pérdidas por fricción en la red están directamente relacionadas con el factor de fricción y directamente relacionadas con el cuadrado de la velocidad.

Finalmente se van a presentar los resultados de la red en la hora de máximo consumo:

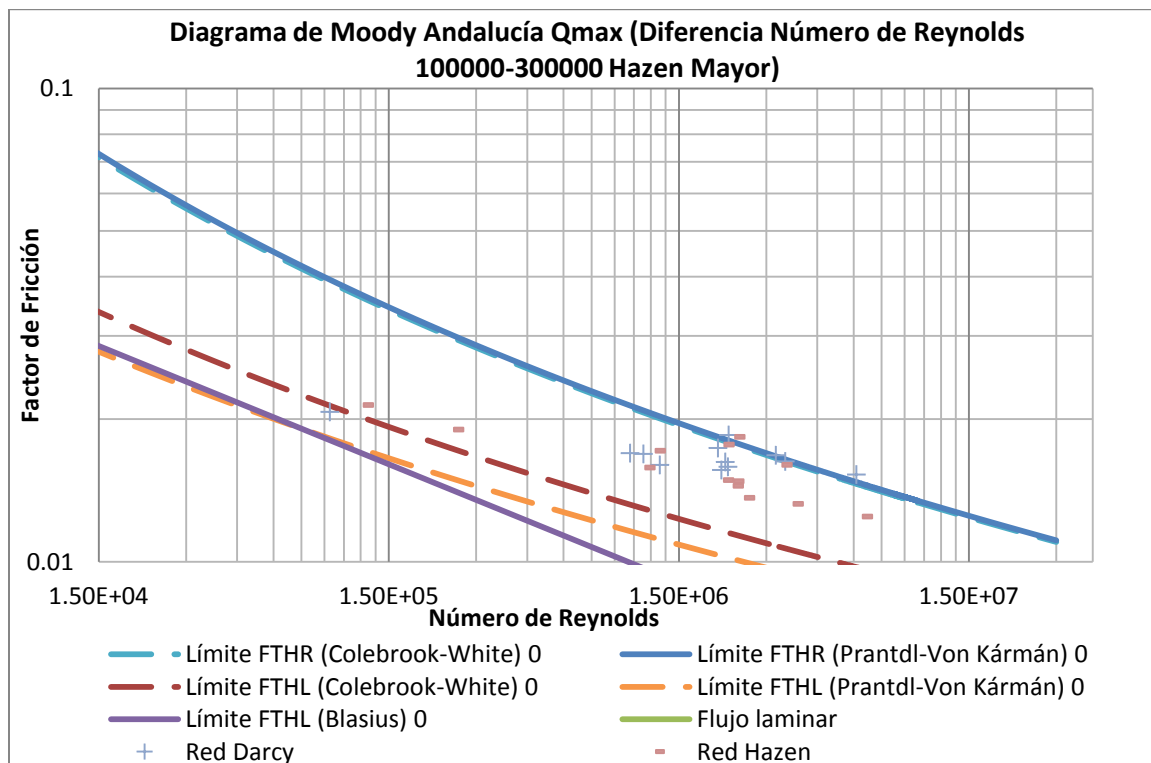


ILUSTRACIÓN 168 DIAGRAMA DE MOODY DE RED DE ANDALUCÍA TRAMOS CON HAZEN-WILLIAMS MAYOR PARA EL CAUDAL MÁXIMO1.

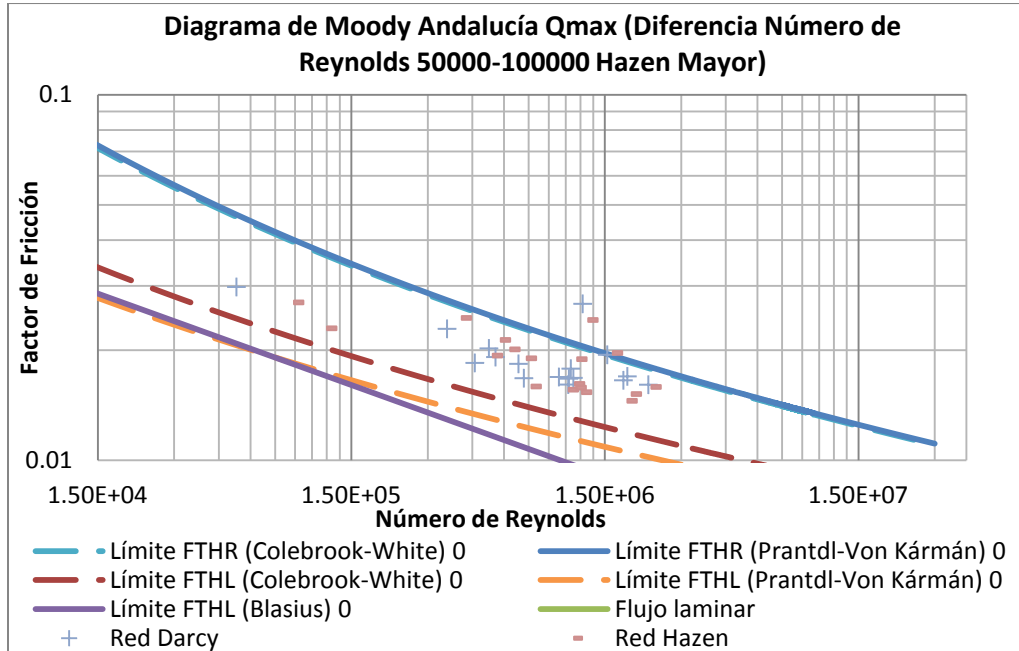


ILUSTRACIÓN 169 DIAGRAMA DE MOODY DE RED DE ANDALUCÍA TRAMOS CON HAZEN-WILLIAMS MAYOR PARA EL CAUDAL MÁXIMO2.

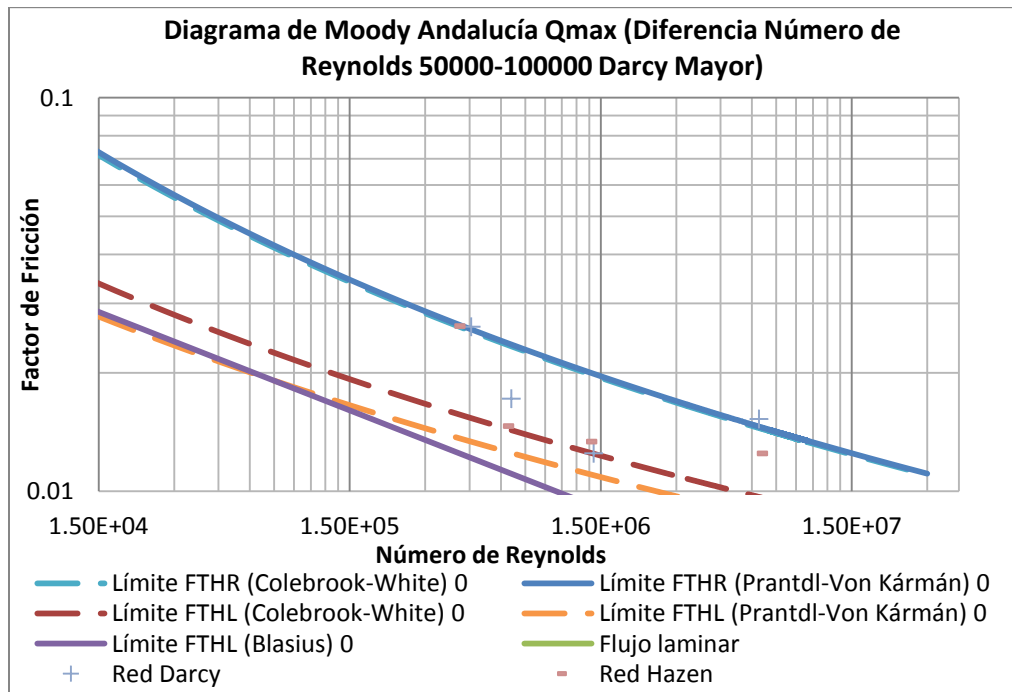


ILUSTRACIÓN 170 DIAGRAMA DE MOODY DE RED DE ANDALUCÍA TRAMOS CON DARCY-WEISBACH MAYOR PARA EL CAUDAL MÁXIMO.

Andalucía Qmáx (Diferencias número de Reynolds 100000-300000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Porcentual
Tramo 1/400 (1m)	1.336721285	1.251016627	2.39E+05	3.49E+06	0.016295	3.73E+06	0.013255	6.85%
Tramo 1/450(14m)	1.022125493	0.893315668	3.20E+05	2.22E+06	0.015874	2.54E+06	0.013652	14.42%
Tramo 2/450(13m)	0.463505432	0.410747645	1.31E+05	1.02E+06	0.016965	1.15E+06	0.015818	12.84%
Tramo 1/600	3.473507572	3.301068065	3.21E+05	6.14E+06	0.015287	6.47E+06	0.012462	5.22%
Tramo 2/600	1.25140986	1.165704982	1.60E+05	2.17E+06	0.01625	2.33E+06	0.0148	7.35%
Tramo 3/600	0.135378642	0.050535	1.58E+05	9.41E+04	0.020735	2.52E+05	0.019026	167.89%
Tramo 1/700	1.453820098	1.319000393	2.15E+05	2.10E+06	0.01563	2.32E+06	0.014472	10.22%
Tramo 1/800	1.059387768	0.92456921	1.88E+05	1.29E+06	0.016019	2.15E+06	0.014882	66.38%
Tramo 2/800	0.088147058	0.003303448	1.18E+05	4.61E+03	0	1.23E+05	0.021442	2568.34%
Tramo 1/1100(1 m)	3.364344602	3.193374214	1.74E+05	3.24E+06	0.016791	3.42E+06	0.016025	5.35%
Tramo 1/1300(8m)	1.45382075	1.319001909	1.16E+05	1.13E+06	0.016902	1.25E+06	0.017165	10.22%
Tramo 1/1600(2m)	3.364345144	3.193372132	1.19E+05	2.23E+06	0.01853	2.35E+06	0.018364	5.35%
Tramo 1/1800	3.473507007	3.301068663	1.07E+05	2.05E+06	0.017395	2.16E+06	0.017686	5.22%

TABLA 26 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED ANDALUCÍA PARA EL CAUDAL MÁXIMO 1 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 100000 Y 300000.

Andalucía Qmáx (Diferencias número de Reynolds 50000-100000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/400	0.437297634	0.404428658	9.18E+04	1.13E+06	0.016802	1.22E+06	0.015351	8.13%
Tramo 2/400	0.387639861	0.354771011	9.18E+04	9.91E+05	0.016895	1.08E+06	0.015598	9.26%
Tramo 3/400	0.660977397	0.637131578	6.66E+04	1.78E+06	0.016545	1.85E+06	0.014539	3.74%
Tramo 4/400	0.276631182	0.258013224	5.20E+04	7.20E+05	0.016766	7.72E+05	0.015914	7.22%
Tramo 1/450(5m)	0.773151269	0.742804409	7.53E+04	1.84E+06	0.016959	1.92E+06	0.015175	4.09%
Tramo 1/600	0.615466935	0.582596891	6.12E+04	1.08E+06	0.016718	1.15E+06	0.016173	5.64%
Tramo 1/700(25m)	0.728463284	0.675704484	8.42E+04	1.08E+06	0.016107	1.16E+06	0.015793	7.81%
Tramo 1/1100	0.728462569	0.67570395	5.36E+04	6.86E+05	0.018354	7.40E+05	0.019005	7.81%
Tramo 1/1200	0.096001542	0.011158183	7.90E+04	1.04E+04	0	8.94E+04	0.02703	760.37%
Tramo 2/1200	2.465549058	2.397585476	6.33E+04	2.23E+06	0.016092	2.29E+06	0.015868	2.83%
Tramo 1/1400	0.680851018	0.578302114	8.18E+04	4.61E+05	0.018463	5.43E+05	0.019339	17.73%
Tramo 2/1400	0.151213337	0.066370386	6.77E+04	5.29E+04	0.029795	1.21E+05	0.02296	127.83%
Tramo 1/1600	0.837071079	0.751368432	5.98E+04	5.24E+05	0.020228	5.84E+05	0.021339	11.41%
Tramo 1/1700(6m)	1.780161557	1.679770542	6.60E+04	1.10E+06	0.017807	1.17E+06	0.018904	5.98%
Tramo 1/1800	1.026184433	0.897374767	7.99E+04	5.57E+05	0.019158	6.37E+05	0.020108	14.35%
Tramo 1/2400	3.473508703	3.301066934	8.02E+04	1.54E+06	0.019433	1.62E+06	0.019658	5.22%
Tramo 1/2800	1.027801191	0.898991996	5.14E+04	3.59E+05	0.022885	4.10E+05	0.024512	14.33%
Tramo 1/3000(3m)	3.473508986	3.301070892	6.42E+04	1.23E+06	0.02679	1.29E+06	0.024196	5.22%

TABLA 27 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED ANDALUCÍA PARA EL CAUDAL MÁXIMO 2 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 50000 Y 100000.





Andalucía Q <sub>máx</sub> (Diferencias número de Reynolds 50000-100000) Darcy Mayor							
Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
0.193565348	0.207216669	-4.36E+04	6.61E+05	0.017206	6.18E+05	0.014661	-6.59%
0.41481193	0.440925305	-8.33E+04	1.41E+06	0.012501	1.32E+06	0.013388	-5.92%
3.405600123	3.443189868	-1.20E+05	1.10E+07	0.00956	1.09E+07	0.009828	-1.09%
3.405598277	3.443189004	-7.00E+04	6.41E+06	0.015278	6.34E+06	0.012493	-1.09%
0.637332891	0.737308674	-6.20E+04	4.57E+05	0.026208	3.95E+05	0.026306	-13.56%

TABLA 28 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED ANDALUCÍA PARA EL CAUDAL MÁXIMO 3 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 50000 Y 100000.

Los resultados con máximo caudal muestran que la magnitud de las diferencias aumentó de manera considerable; esto se puede ver en el diagrama de Moody donde es más evidente el desfase en los números de Reynolds y las altas diferencias entre los factores de fricción calculados. Por otro lado, al mirar las tablas de resumen, se puede ver que las diferencias en estos casos alcanzaron unas magnitudes altas que confirman una vez más que la solución de la hidráulica con la ecuación empírica, para este tipo de escenarios o redes (con tanques o emisores y ramificaciones) pueden presentar diferencias radicales en aspectos como las pérdidas por fricción, factores de fricción de las tuberías y números de Reynolds en cada uno de los tramos.

En cuanto al funcionamiento de la red, las razones para que se presenten tantas diferencias hidráulicas entre la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach, están fundamentadas en lo que se ha documentado a lo largo de esta sección. Pero así mismo también se basa en lo que los autores Liou (Liou, 1998) y Bombardelli (Fabián Bombardelli, 2003) describen en sus investigaciones. Al igual que estos autores, durante esta investigación también se compararon los coeficientes teóricos de Hazen-Williams reportados en la literatura, con los coeficientes hallados analizando los resultados de una red que utilizó la ecuación de Darcy-Weisbach. Estos resultados se pueden ver en la Sección 4.3.4 Red Andalucía, en donde se encontró que en efecto, la variabilidad del coeficiente de Hazen-Williams es bastante significativa, demostrando una vez más que utilizar un coeficiente constante es un riesgo de suma importancia. Otro aspecto relevante es el análisis realizado a partir de los diámetros de la red que permitió concluir que incluso en grandes diámetros de presentaban variaciones drásticas del coeficiente.

Al comparar los resultados del estudio de Bombardelli con lo encontrado en esta y las dos redes anteriores, se puede ver con claridad que existe una variación para números de Reynolds grandes (entre  $1.5 * 10^5$  y  $1 * 10^7$ ) estando estos números de Reynolds asociados con tuberías de gran diámetro, o como en este caso de estudio, asociados con tuberías de redes matrices. Conviene precisar también que, a pesar de que no siempre se presenten estos rangos del número de Reynolds en tuberías de gran diámetro, durante esta investigación se ha venido demostrando que las tuberías que están presentando las principales variaciones e inconsistencias entre la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach, son las tuberías de mayor diámetro, que transportan la cantidad más importante de caudal en la red y también las tuberías de las ramificaciones que se dirigen a los diferentes tanques.

---

#### 4.4.5 RED DE BOMBEO DTOWN

---

La red de Dtown, se trabajó con el fin de observar los efectos que podía tener en la hidráulica el utilizar la ecuación de Hazen-Williams con coeficientes constantes. Esta red a diferencia de las anteriores, tiene unas características únicas, estas son: La presencia de bombas para entregar el caudal, los diámetros de las tuberías no superan los 600 mm y al ser tan pequeños, la red estaba compuesta principalmente por tuberías de PVC.

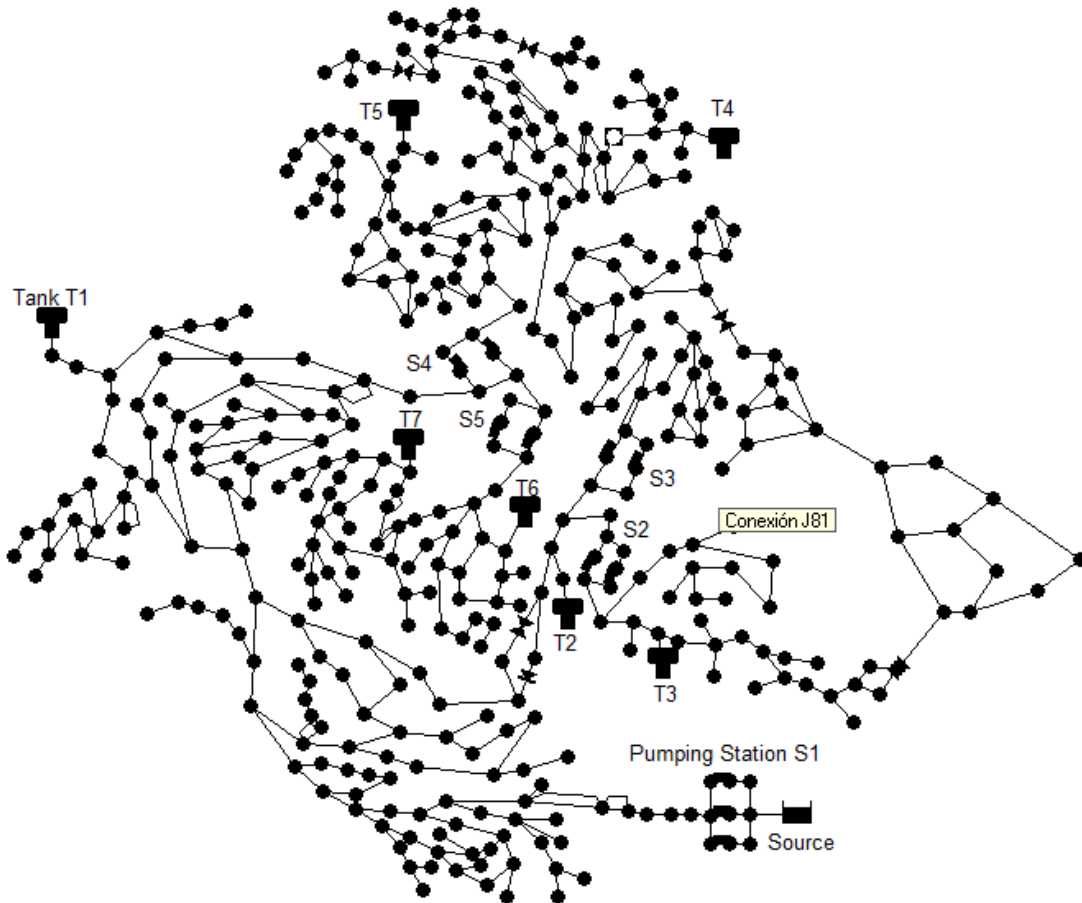


ILUSTRACIÓN 171 RED DTOWN CON SUS RESPECTIVOS TANQUES.

Antes de comenzar, hay que aclarar que si bien muchos de los resultados arrojaron similitudes con lo que se ha encontrado hasta el momento, esta red presentó diferencias importantes ya que los momentos en que se presentaron las diferencias más significativas fueron en una serie de horas específicas del día y estas serán detalladas más adelante. A continuación se muestran los resultados para los tanques de esta red; sin embargo no se analizaron tuberías específicas como en los demás casos ya que está más que demostrado que existen diferencias en los números de Reynolds del sistema; lo que si se realizó fue identificar aquellas tuberías que presentaban las diferencias más significativas y en que horarios específicos.

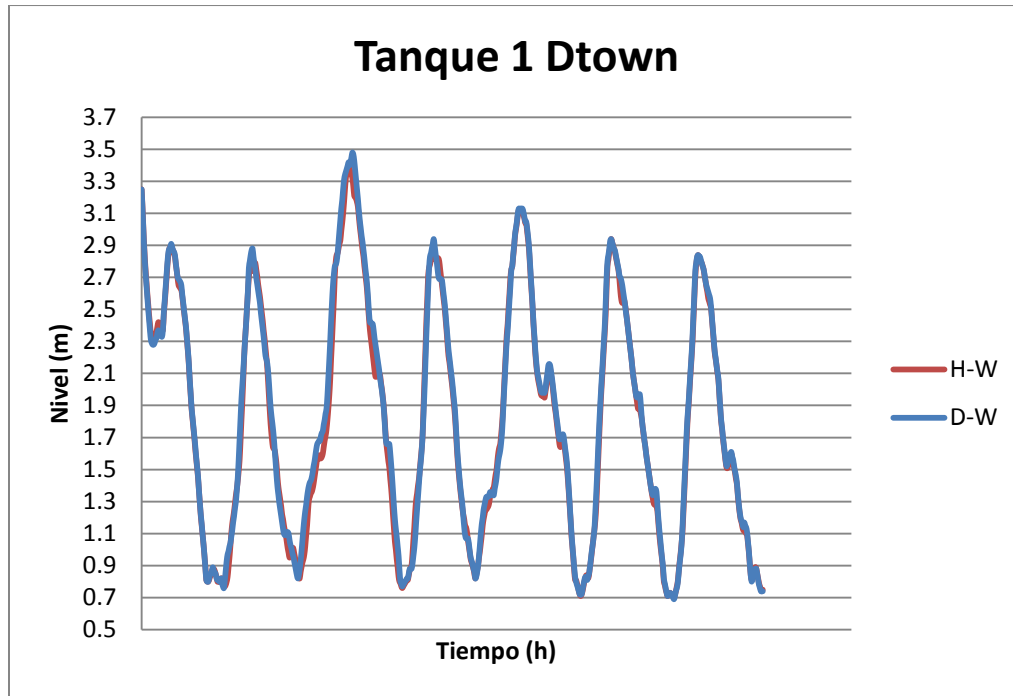


ILUSTRACIÓN 172 NIVEL TANQUE 1 RED DTOWN.

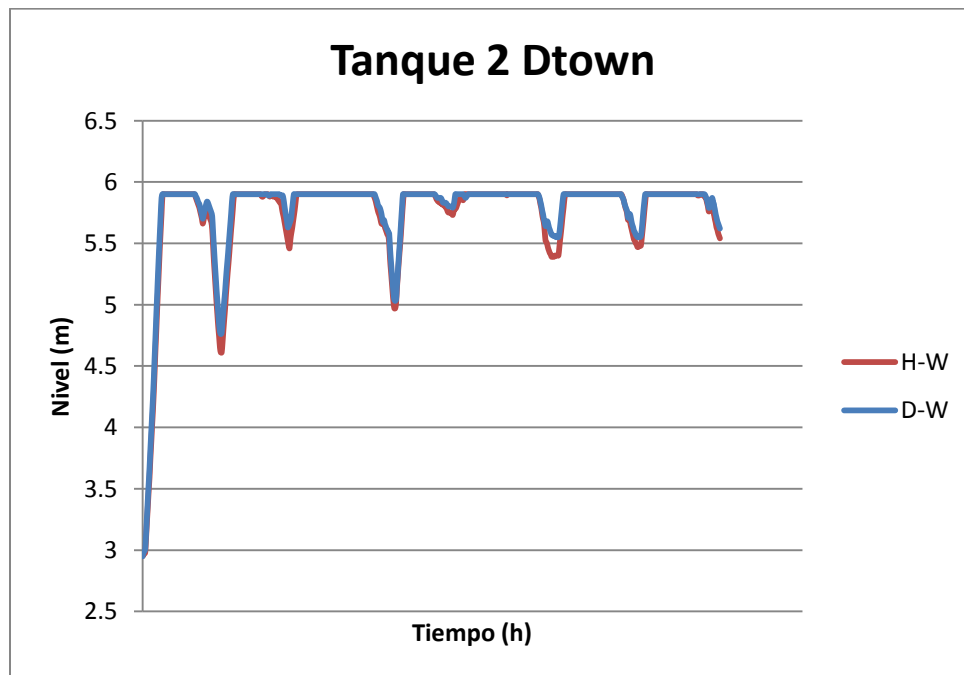


ILUSTRACIÓN 173 NIVEL TANQUE 2 RED DTOWN.

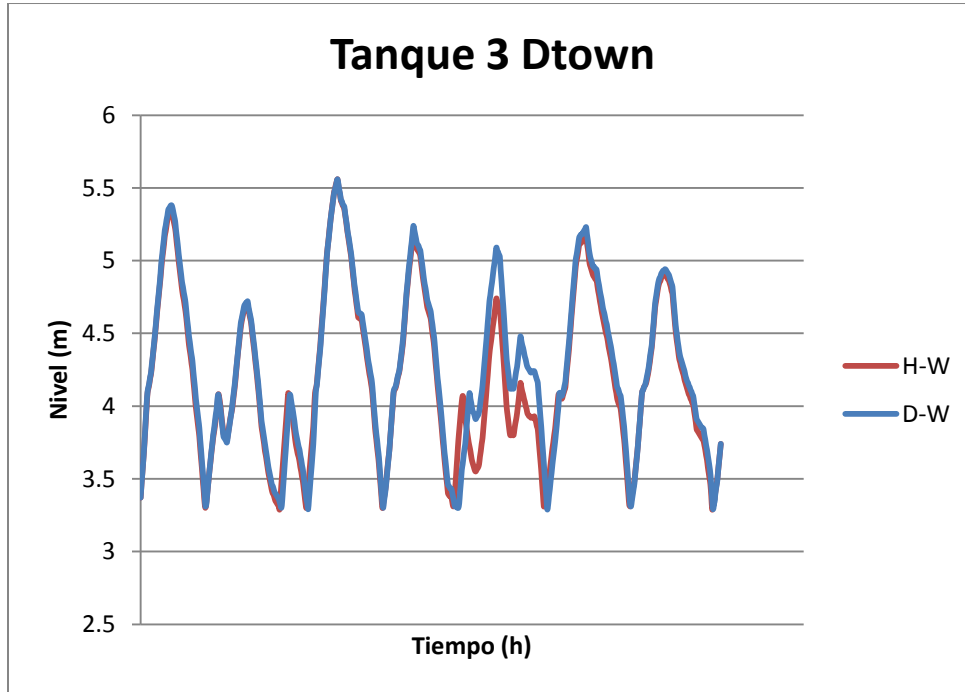


ILUSTRACIÓN 174 NIVEL TANQUE 3 RED DTOWN.

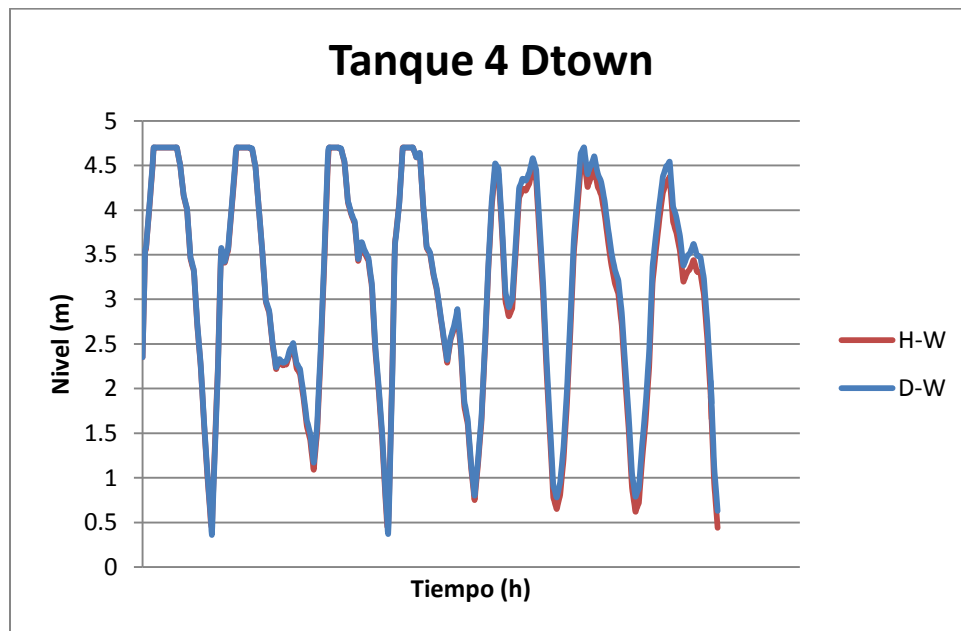


ILUSTRACIÓN 175 NIVEL TANQUE 4 RED DTOWN.

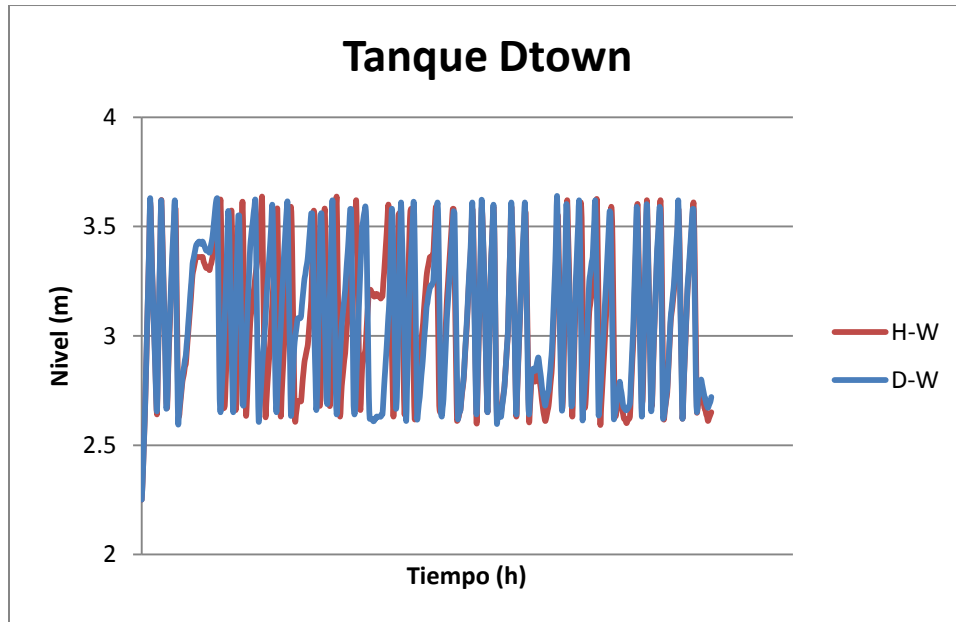


ILUSTRACIÓN 176 NIVEL TANQUE 5 RED DTOWN.

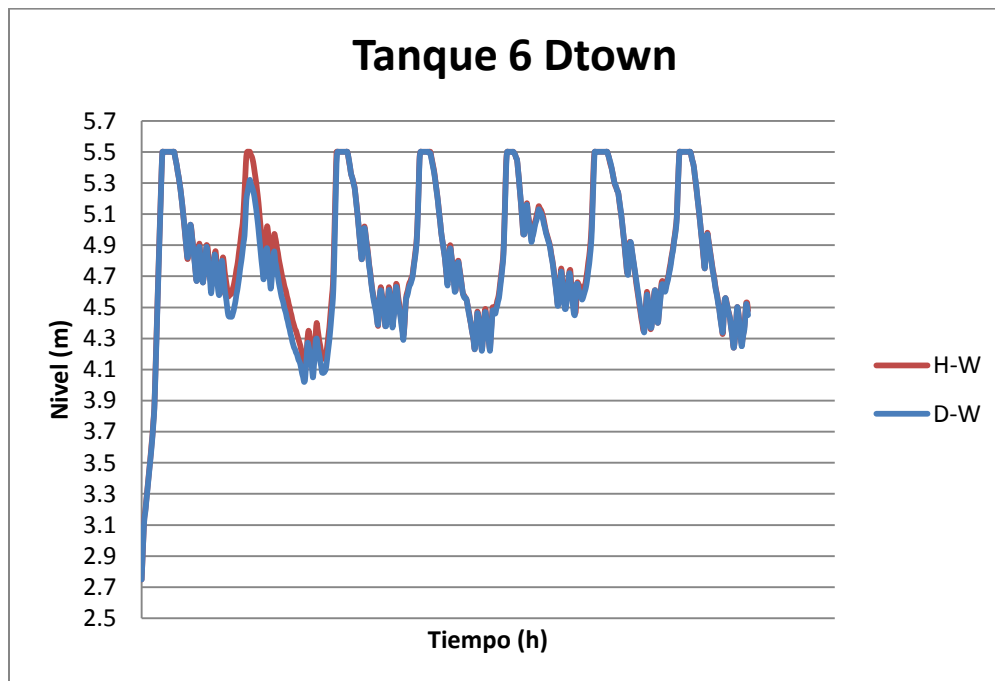


ILUSTRACIÓN 177 NIVEL TANQUE 6 RED DTOWN.

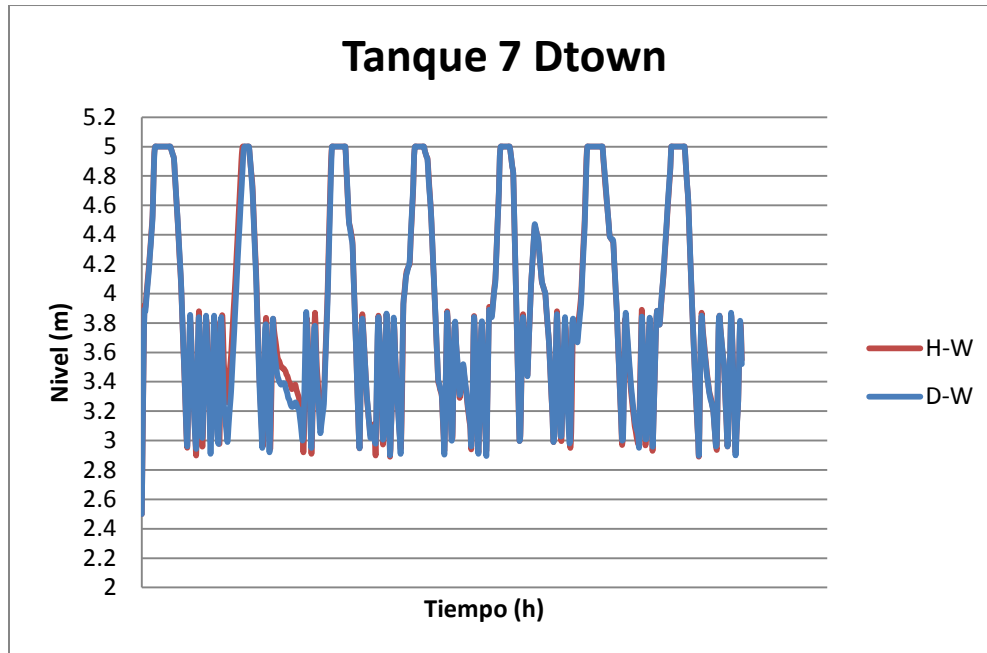


ILUSTRACIÓN 178 NIVEL TANQUE 7 RED DTOWN.

Los resultados que arroja el estudio de los tanques de la red de bombeo de Dtown son bastante reveladores ya que pese a ser una red con diámetros más bajos que las redes trabajadas anteriormente, estos muestran una gran similitud. Si se analizan los tanques 3 y 5 de esta red, se puede ver que tienen diferencias en los patrones de llenado de los tanques así como en los tiempos de vaciado. En el tanque 3 se puede ver que en un período de tiempo, el llenado con la ecuación de Hazen-Williams es menor que con la ecuación de Darcy-Weisbach. Sin embargo, si se observa el tanque 5 se puede ver que en más de un período de tiempo, el llenado del tanque es mayor con la ecuación de Hazen-Williams y lo que es más importante aún, hay momentos donde se ve claramente que el tanque se está vaciando a una gran velocidad con la ecuación de Darcy-Weisbach, mientras que en esos tiempos el tanque se sigue llenando o su vaciado es muy poco con la ecuación de Hazen-Williams.

Lo anterior parece coincidir con lo que se encontró inicialmente en la red de Ginebra; es decir, la ecuación de Hazen-Williams tiende a subestimar o sobrestimar los niveles de los tanques en la red; considerando además que esto ocurre bajo un mismo escenario, lo que implica que las hidráulicas al ejecutar la ecuación de Hazen-Williams es diferente a la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach. Si bien, los resultados que arroja esta red muestran tendencias similares a los de las redes estudiadas anteriormente, cabe resaltar que las diferencias hidráulicas en los tramos de esta red fueron las más grandes en términos de magnitud del desbalance de masa, números de Reynolds de las tuberías y por ende cálculo del factor de fricción y pérdidas por fricción en la red. A continuación se van a mostrar las figuras de las redes en los 3 períodos más significativos (horarios de consumo medio, máximo y mínimo).

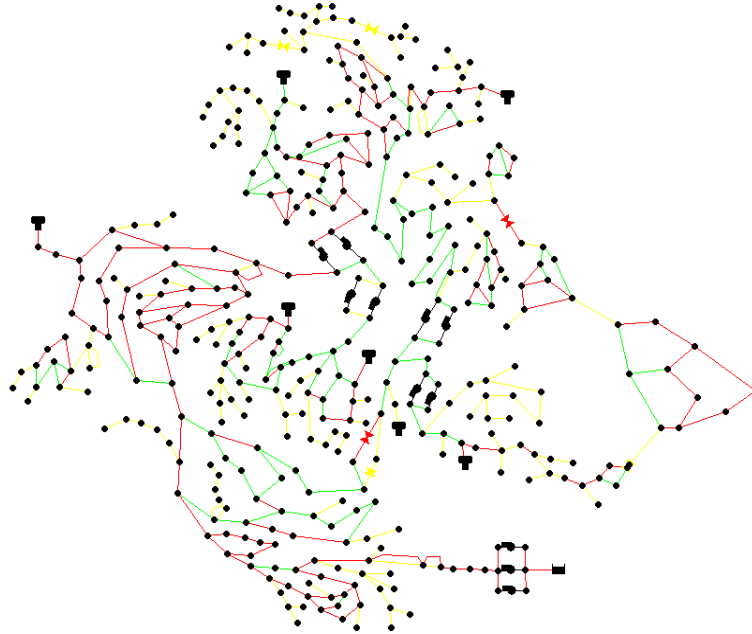


FIGURA 47 ESQUEMA DE LA RED EN LA HORA DE LA DEMANDA MEDIA DE LA RED DTOWN.

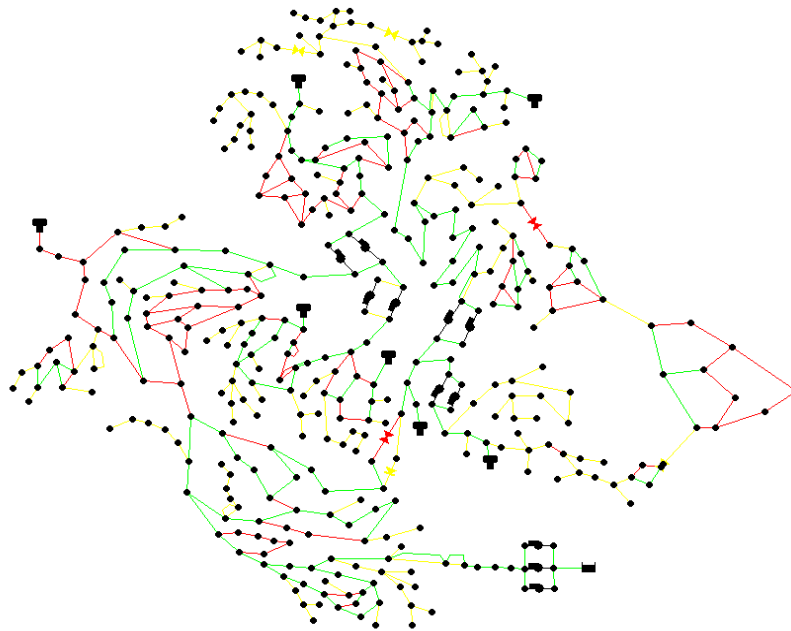


FIGURA 48 ESQUEMA DE LA RED EN LA HORA DE LA DEMANDA MÁXIMA DE LA RED DTOWN.



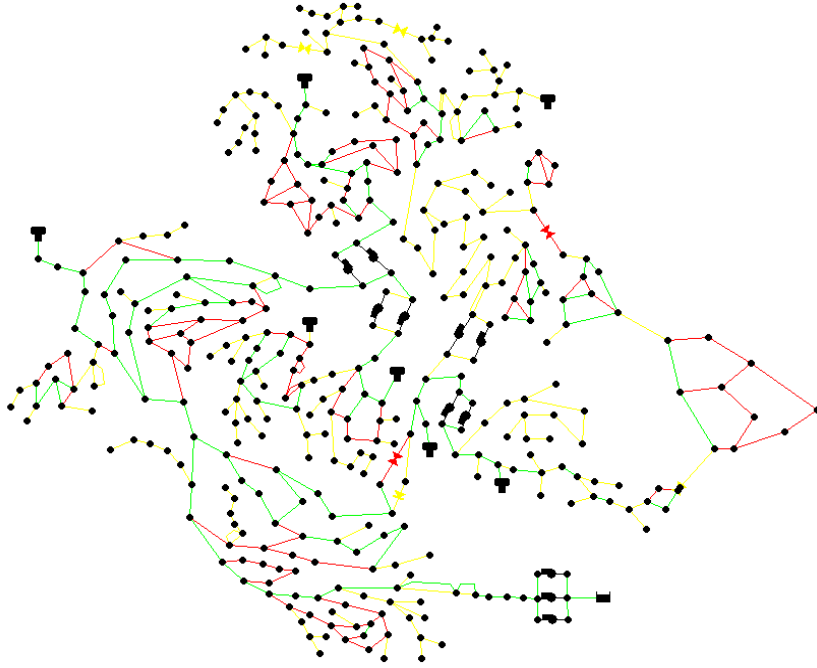


FIGURA 49 ESQUEMA DE LA RED EN LA HORA DE LA DEMANDA MÍNIMA DE LA RED DTOWN.

Después de sacar estas gráficas y analizar los resultados, se encontró que las hidráulicas de la red en la hora de máximo y mínimo consumo no presentaban diferencias significativas entre la ecuación físicamente basada y la ecuación empírica, mientras que en la hora de consumo medio, la hidráulica cambiaba de manera radical. Este resultado fue bastante extraño considerando lo que se había analizado anteriormente y es que el efecto hidráulico que generaba la ecuación de Hazen-Williams frente a la ecuación de Darcy-Weisbach se veía magnificado cuando se llegaba al horario de máximo consumo. Este fenómeno se estudiará más en detalle al examinar lo que ocurre internamente en la red, en cada fracción de tiempo (cada 15 minutos para 168 horas). Con base en esto, se identificaron las tuberías y sectores de la red que estaban presentando las diferencias más significativas; el esquema de la red se muestra a continuación:

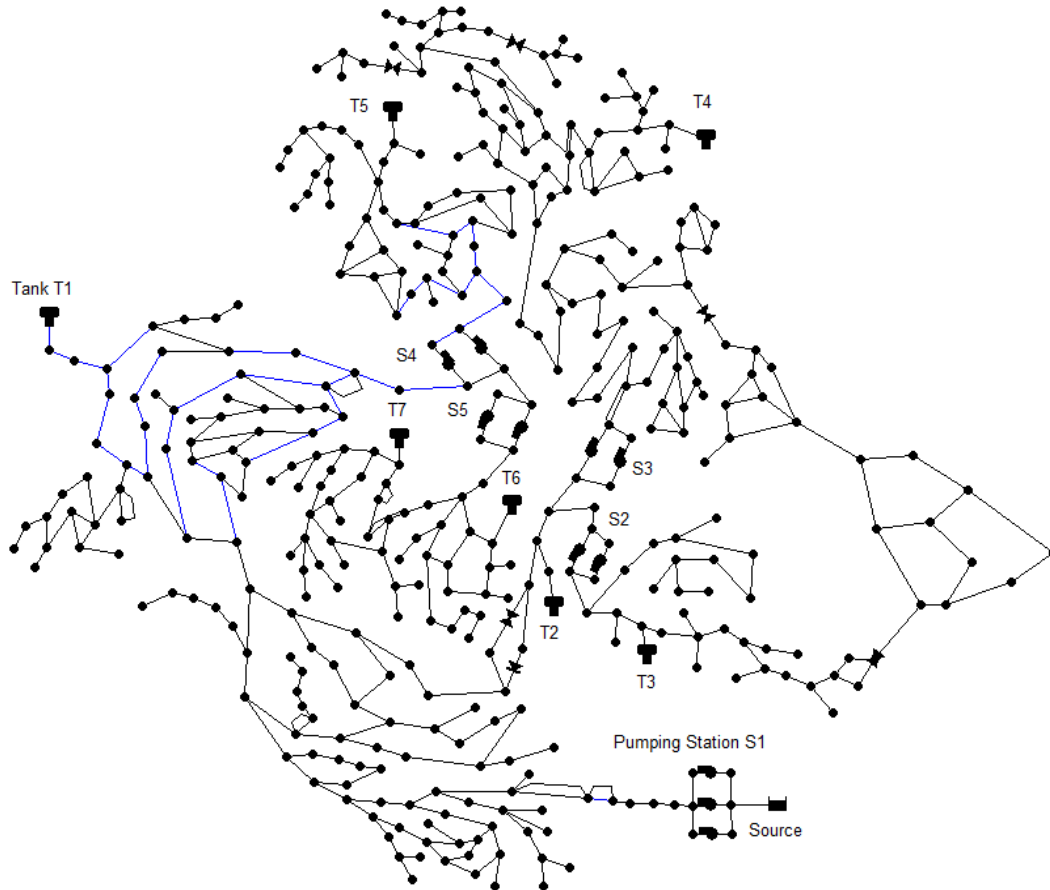


FIGURA 50 TUBERÍAS CON LAS DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS.

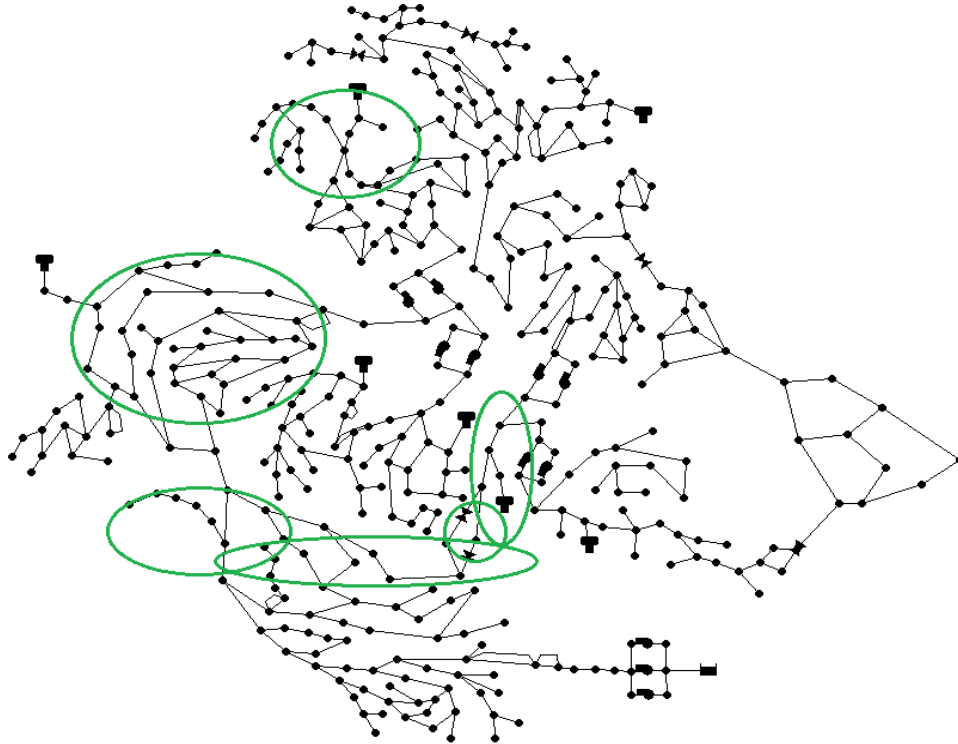


FIGURA 51 SECTORES CON LAS PRINCIPALES DIFERENCIAS HIRÁULICAS EN DTOWN.

Una vez identificados los sectores, se procedió a analizar los horarios en que se estaban presentando las diferencias hidráulicas más significativas.

Momentos con hidráulica diferente
05:45
10:45
17:30-24:15
26:00-31:00
35:00-38:45
43:00-56:00
73:00-76:45
79:15-81:15
93:45-95:15
Tiempo total de ejecución de la red
168:00:00

TABLA 29 TIEMPOS EN LOS QUE LA HIDRÁULICA DE LA RED DTOWN CAMBIA SIGNIFICATIVAMENTE.

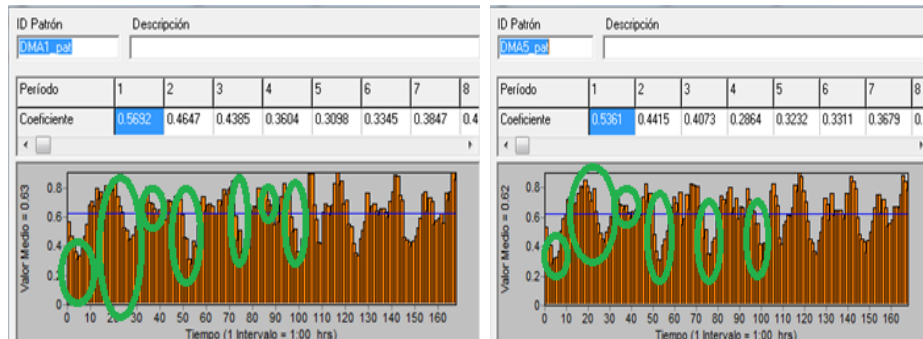


ILUSTRACIÓN 179 PATRONES 1 Y 5 DE LA RED DE DTOWN CON SUS HORARIOS DE DIFERENCIA HIDRÁULICA.

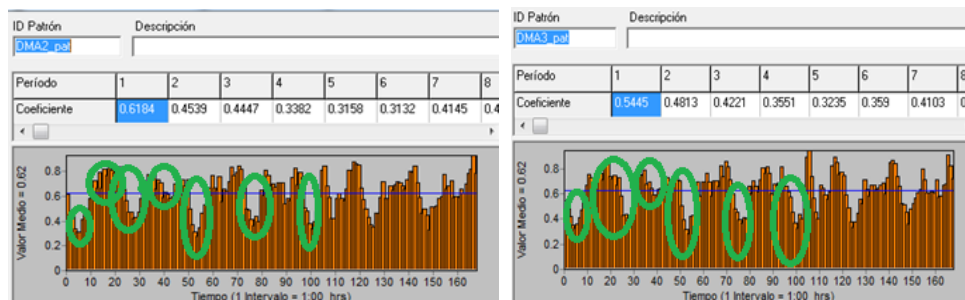


ILUSTRACIÓN 180 PATRONES 2 Y 3 DE LA RED DTOWN CON SUS HORARIOS DE DIFERENCIA HIDRÁULICA.

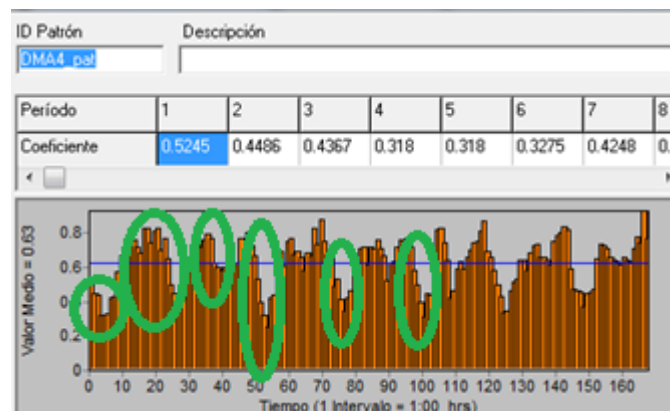


ILUSTRACIÓN 181 PATRÓN 4 DE LA RED DTOWN CON SUS HORARIOS DE DIFERENCIA HIDRÁULICA.

La tabla y las ilustraciones muestran que las principales diferencias entre la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach se están presentando en los momentos del día en los que se está pasando del caudal máximo al caudal mínimo. Si bien, cuando se llegan a estos puntos ya la hidráulica parece igualarse entre las dos ecuaciones, las diferencias en estos momentos del tiempo son bastante significativas. En las tablas que se muestran más

adelante se van a mostrar las altas diferencias que se presentan en los tramos de la red identificados, así como los diagramas de Moody donde se va a evidenciar la magnitud de la diferencia con respecto al número de Reynolds y el factor de fricción.

Todo lo anterior parece reforzar los análisis de la redes anteriores y prenden una nueva alarma, ya que al limitarse el análisis del problema a solo tres momentos del día o de la ejecución hidráulica, se pueden estar obviando efectos significativos de la ecuación de Hazen-Williams; infortunadamente, estos cálculos y estos resultados se encontraron al final del estudio, pues el enfoque de trabajar en tantas redes consumió una cantidad considerable de tiempo. A futuro, se recomienda que se trabaje con solo un par de redes y se pueda estudiar todo lo que se realizó durante esta investigación, pero analizando períodos de tiempo con separación menor y de manera más detallada.

A continuación se presentan los resultados de los diagramas de Moody con los tramos de tuberías que presentaron las diferencias hidráulicas más significativas, así como las tablas resumen de la red.

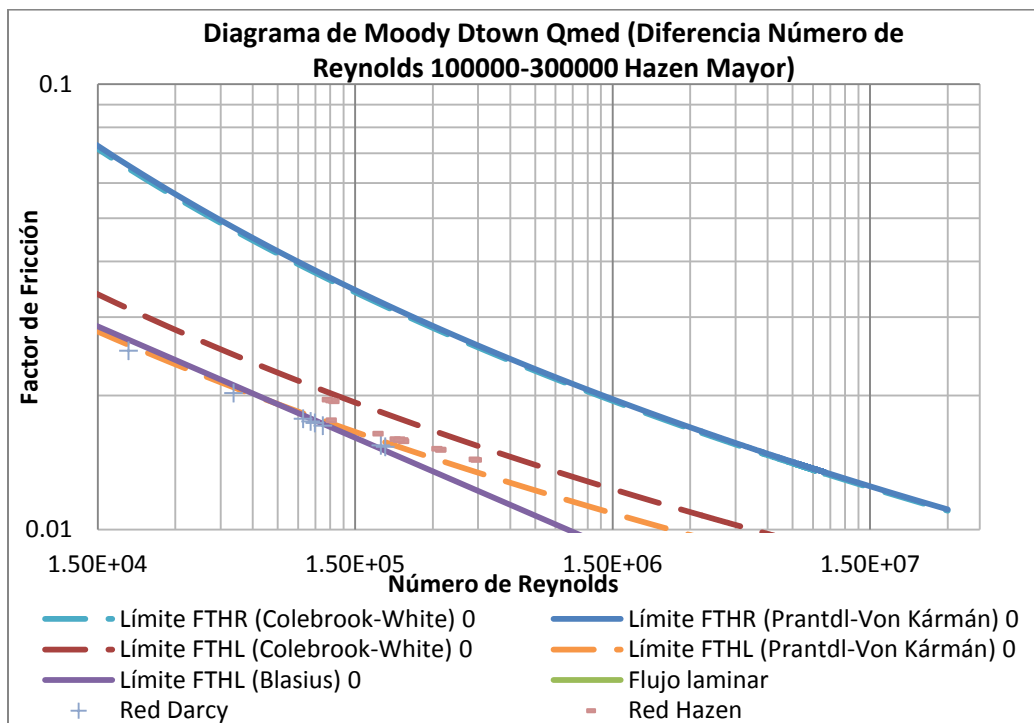


ILUSTRACIÓN 182 DIAGRAMA DE MOODY RED DTOWN TRAMOS CON HAZEN-WILLIAMS MAYOR PARA EL CAUDAL MEDIO 1.

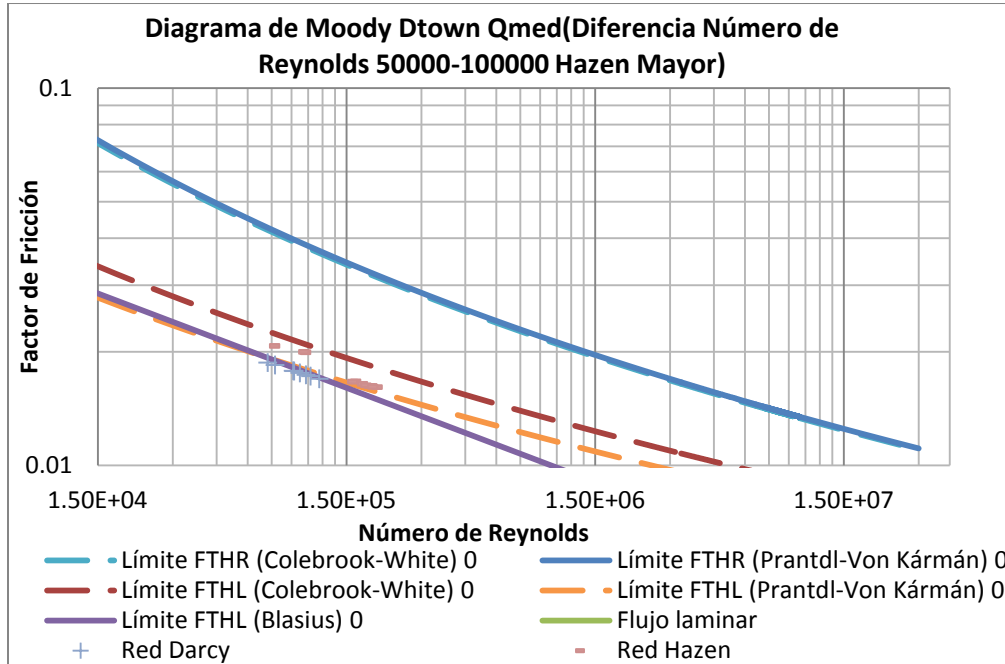


ILUSTRACIÓN 183 DIAGRAMA DE MOODY RED DTOWN TRAMOS CON HAZEN-WILLIAMS MAYOR PARA EL CAUDAL MEDIO 2.

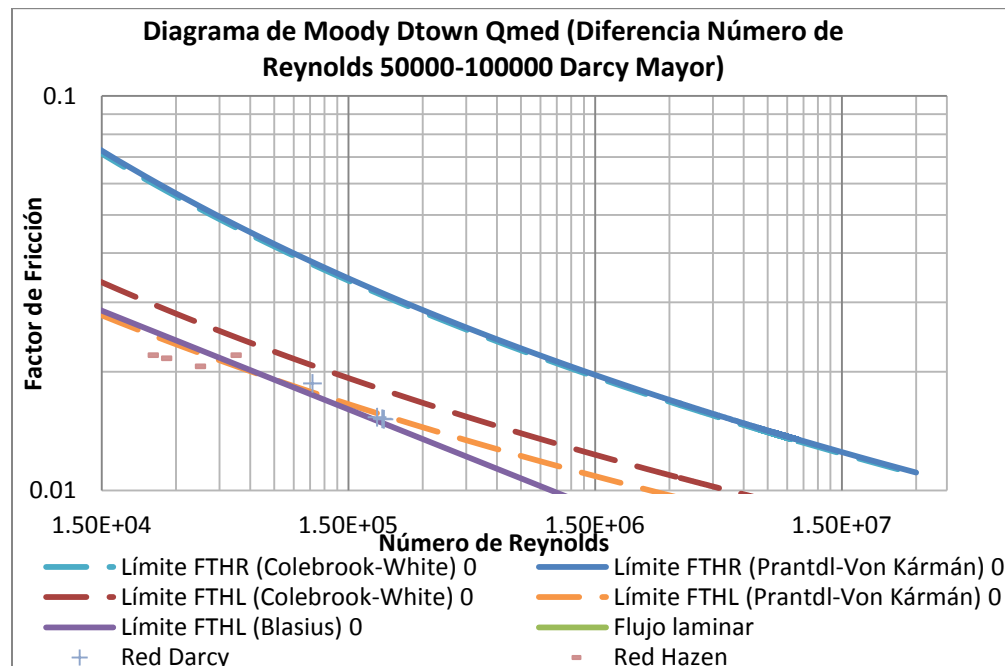


ILUSTRACIÓN 184 DIAGRAMA DE MOODY RED DTOWN TRAMOS CON DARCY-WEISBACH MAYOR PARA EL CAUDAL MEDIO.

Dtown Qmed (Diferencias número de Reynolds 100000-300000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/102	0.010621605	0.000268181	1.13E+05	2.94E+03	0.037296	1.16E+05	0.017588	3860.60%
Tramo 1/152	0.042245765	3.64829E-08	3.10E+05	2.67E-01	0.00E+00	3.10E+05	0.0151	115795850.00%
Tramo 2/152	0.04224571	5.47244E-08	3.10E+05	4.01E-01	0.00E+00	3.10E+05	0.0151	77197100.00%
Tramo 3/152	0.040837433	0.001408333	2.89E+05	1.03E+04	0.029787	2.99E+05	0.015176	2799.70%
Tramo 4/152	0.030032108	0.001860239	2.07E+05	1.37E+04	0.027663	2.21E+05	0.015877	1514.42%
Tramo 5/152	0.029199432	0.002692915	1.95E+05	1.98E+04	0.025193	2.15E+05	0.015943	984.31%
Tramo 6/152	0.02412075	0.006909631	1.26E+05	5.06E+04	0.020238	1.77E+05	0.016406	249.09%
Tramo 1/203	0.077389244	0.035727728	2.29E+05	1.97E+05	0.015329	4.26E+05	0.014326	116.61%
Tramo 2/203	0.076061025	0.034399487	2.29E+05	1.89E+05	0.015443	4.18E+05	0.014365	121.11%
Tramo 3/203	0.040396674	0.01904543	1.17E+05	1.05E+05	0.017342	2.22E+05	0.015773	112.11%
Tramo 4/203	0.038645022	0.018334749	1.12E+05	1.01E+05	0.01748	2.13E+05	0.015877	110.77%
Tramo 5/203	0.03745284	0.017142567	1.12E+05	9.43E+04	0.017722	2.06E+05	0.015951	118.48%
Tramo 6/203	0.038745517	0.020444881	1.01E+05	1.12E+05	0.017097	2.13E+05	0.015871	89.51%
Tramo 1/406	0.043311994	0.002287462	1.13E+05	6.29E+03	0.035439	1.19E+05	0.019397	1793.45%
Tramo 2/406	0.042183604	0.001159202	1.13E+05	3.19E+03	0.027483	1.16E+05	0.019474	3539.02%
Tramo 3/406	0.040838883	0.000185519	1.12E+05	5.10E+02	1.25E-01	1.12E+05	0.019564	21913.33%

TABLA 30 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED DTOWN PARA EL CAUDAL MEDIO 1 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 10000 Y 30000.

Dtown Qmed (Diferencias número de Reynolds 50000-100000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/152	0.021392938	0.009893753	8.43E+04	7.25E+04	0.018728	1.57E+05	0.0167	116.23%
Tramo 1/203	0.027720769	0.014102349	7.49E+04	7.76E+04	0.018455	1.53E+05	0.016677	96.57%
Tramo 2/203	0.030359364	0.016828104	7.44E+04	9.26E+04	0.01779	1.67E+05	0.016454	80.41%
Tramo 3/203	0.03312331	0.019592051	7.44E+04	1.08E+05	0.017246	1.82E+05	0.016243	69.07%
Tramo 4/203	0.034770842	0.021239615	7.44E+04	1.17E+05	0.016967	1.91E+05	0.016128	63.71%
Tramo 1/254	0.040517597	0.022216944	8.05E+04	9.77E+04	0.017586	1.78E+05	0.016229	82.37%
Tramo 2/254	0.039175683	0.020875031	8.05E+04	9.18E+04	0.017813	1.72E+05	0.01631	87.67%
Tramo3/254	0.041800225	0.023499573	8.05E+04	1.03E+05	0.017384	1.84E+05	0.016154	77.88%
Tramo 1/406	0.035851623	0.003163142	8.99E+04	8.70E+03	0.030592	9.86E+04	0.019947	1033.42%
Tramo 2/406	0.035255451	0.003759444	8.66E+04	1.03E+04	0.02924	9.70E+04	0.019996	837.78%
Tramo 1/508	0.033667672	0.00534698	6.23E+04	1.18E+04	0.02877	7.40E+04	0.020737	529.66%

TABLA 31 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED DTOWN PARA EL CAUDAL MEDIO 2 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 50000 Y 100000.

Dtown Qmed (Diferencias número de Reynolds 50000-100000) Darcy Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/203	0.006571227	0.035674551	-1.60E+05	1.96E+05	0.015334	3.62E+04	0.020636	-81.58%
Tramo 2/203	0.004791708	0.03745407	-1.80E+05	2.06E+05	0.015193	2.64E+04	0.021633	-87.21%
Tramo 3/203	0.004229973	0.038015805	-1.86E+05	2.09E+05	0.01515	2.33E+04	0.022029	-88.87%
Tramo 1/406	0.018336335	0.039050497	-5.70E+04	1.07E+05	0.018681	5.04E+04	0.022028	-53.04%

TABLA 32 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED DTOWN PARA EL CAUDAL MEDIO 3 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 50000 Y 100000.



Los resultados que se muestran solo corresponden al caudal medio, ya que colocar los resultados en cada uno de los tiempos en que se presentaba la hidráulica radicalmente diferente entre las dos ecuaciones era muy extenso y los resultados con el caudal medio representan de manera muy similar lo que ocurre en los tiempos de alta diferencia hidráulica.

Lo primero que se puede observar en los diagramas de Moody es que se presentan unas diferencias en los números de Reynolds de una magnitud superior a las redes de Andalucía y Medellín. Como se mencionó con anterioridad, estas diferencias son tan grandes que por momentos la magnitud de la diferencia del caudal que pasa por los mismos tramos de tuberías, utilizando las dos ecuaciones, es enorme. Con base en esto, se cuantificó cuanto era la cantidad de caudal que se podía estar desbalanceando a causa del uso de la ecuación de Hazen-Williams y se encontró que era de 80 L/s. Esta es una cantidad considerable de masa teniendo en cuenta que la demanda base de la red es de 360 L/s.

Lo anterior fortalece todo lo que se ha venido estudiando en esta investigación solo que a una mayor escala; es decir, en redes con terminaciones en tanques y que operan con coeficientes constantes de Hazen-Williams, se están presentando desbalances de masa en instantes claves del tiempo; así mismo, gracias a los resultados encontrados en la red de Dtown, se puede ver que el problema no se limita a tiempos de máximo, mínimo y consumo medio, sino que es un problema en varios períodos, lo que lo hace todavía más preocupante. Por otro lado, y al existir este desbalance de masa, también se puede ver que la solución de la hidráulica de la red está cambiando de manera radical, el agua está seleccionando una ruta para suplir la red con la ecuación de Darcy-Weisbach y una distinta al utilizar la ecuación empírica.

Otro punto clave que también se vio en la red de la Cumbre, que se analiza a continuación, es que pese a tener predominantemente tuberías en PVC, presentó los mayores errores de magnitud en los números de Reynolds de todas las tuberías evaluadas. Este resultado parece mostrar que las diferencias en redes con este material si pueden llegar a ser de gran importancia, en contraste con lo que se había estudiado previamente. Por otro lado, un detalle interesante es que si bien las tuberías que presentaban diferencias tenían números de Reynolds con rangos más bajos que las otras redes estudiadas (principalmente entre  $1.5 * 10^4$  y  $1.5 * 10^5$ ), las grandes diferencias se siguieron presentando en las tuberías que transportaban la mayor cantidad de caudal y en los tramos que se dirigían hacia las ramificaciones con tanques (siendo la red Dtown una red con mucha redundancia y ciclos pero con la presencia de terminaciones ramificada pequeñas).

Todo lo anterior permite decir que la ecuación de Hazen-Williams presenta más problemas de los que se habían analizado anteriormente en la literatura. Al ser esta una red de bombeo, la sobrestimación y/o subestimación del caudal del sistema generara evidentemente que los costos del bombeo de la red se vean afectados en gran medida, sin mencionar la posibilidad de que se comenten graves equivocaciones, al seleccionar la bomba adecuada para operar el sistema. A lo anterior se le suman las consecuencias que se observaron en las redes anteriores: 1) Diferencias de presiones en los nudos, al calcular de manera diferente la



hidráulica del sistema utilizando la ecuación de Hazen-Williams con coeficientes estáticos. 2) Subestimación o sobrestimación de las fugas del sistema al evaluar de forma incorrecta el caudal de los emisores. 3) Posibles errores de los operarios de la red al plantear las soluciones al tener hidráulicas del sistema diferentes entre las dos ecuaciones. 4) En algunas condiciones del día, la hidráulica del sistema entre las dos ecuaciones es bastante similar, lo que puede conllevar a pensar que el sistema siempre se va a comportar de manera correcta y sin falencias, lo que puede llevar a tener consecuencias de desabastecimiento considerables.

---

#### 4.4.6 RED LA CUMBRE

---

En esta sección solo se van a mostrar los resultados más relevantes de esta red, pues se utilizó exclusivamente para determinar si en esta red también se presentaban las diferencias más representativas entre las dos ecuaciones. Esto con el fin de no volver a mencionar lo que se ha estado mencionado con las cuatro redes anteriores.

Pese a ser una red con bajo caudal base (800 L/s) y en la cual predominan los diámetros de 300 mm, presentó las mismas diferencias encontradas en las redes de Ginebra, Medellín y Andalucía., solo que a una menor escala (debido a que el caudal era más bajo) pero con órdenes de magnitud porcentual importantes. A continuación se muestran los resultados de esta red:

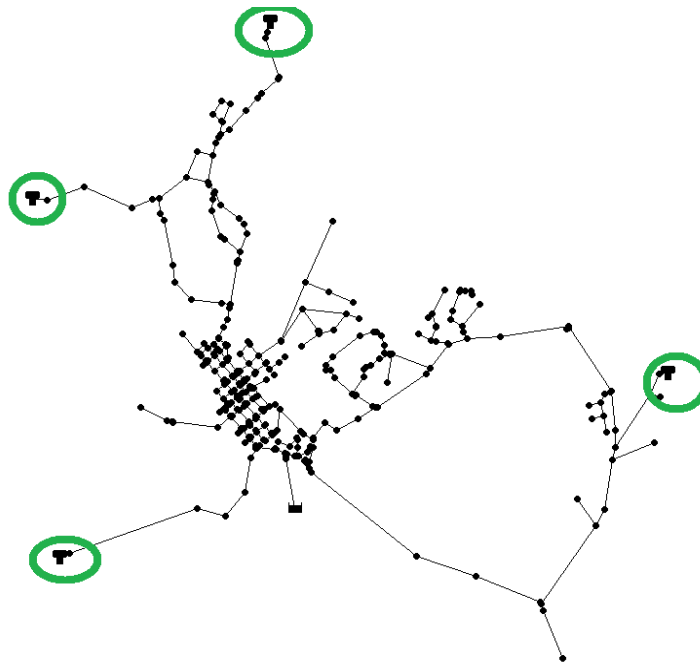


ILUSTRACIÓN 185 LOCALIZACIÓN DE LOS TANQUES DE LA RED LA CUMBRE.

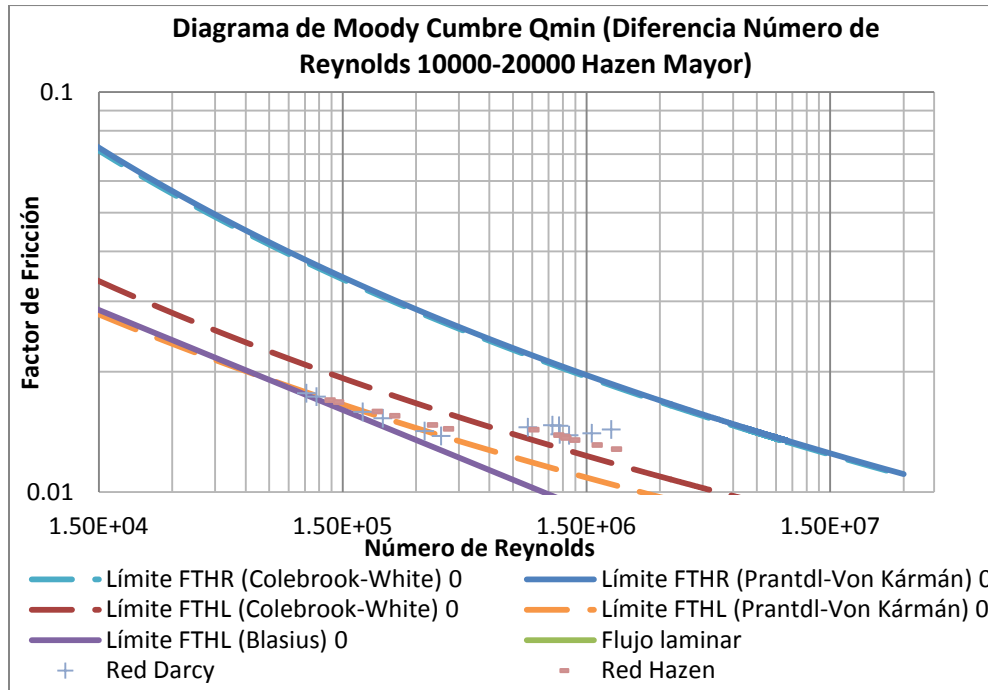


ILUSTRACIÓN 186 DIAGRAMA DE MOODY RED LA CUMBRE TRAMOS CON HAZEN-WILLIAMS MAYOR PARA EL CAUDAL MÍNIMO.

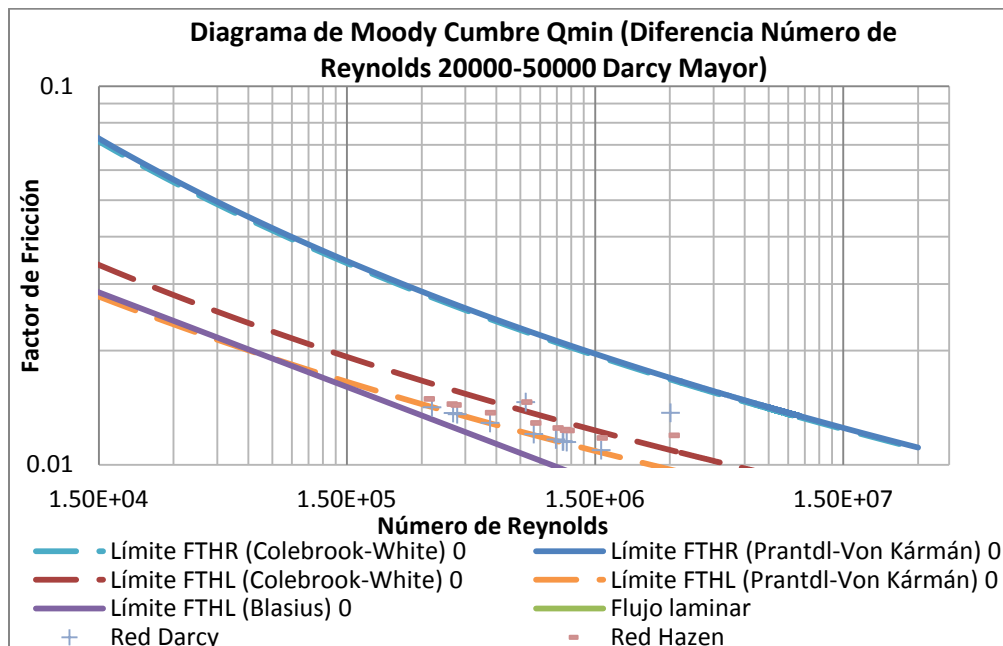


ILUSTRACIÓN 187 DIAGRAMA DE MOODY RED LA CUMBRE TRAMOS CON DARCY-WEISBACH MAYOR PARA EL CAUDAL MÍNIMO.

Cumbre Qmin (Diferencias número de Reynolds 10000-20000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Porcentual
Tramo 1/300	0.010935968	0.009129038	2.11E+04	1.07E+05	0.017672	1.28E+05	0.016989	19.79%
Tramo 2/300	0.011853743	0.010046813	2.11E+04	1.18E+05	0.017328	1.39E+05	0.016796	17.99%
Tramo 3/300	0.017065913	0.015547163	1.78E+04	1.82E+05	0.015875	2.00E+05	0.015908	9.77%
Tramo 4/300	0.02014164	0.01880145	1.57E+04	2.20E+05	0.015303	2.36E+05	0.015523	7.13%
Tramo 5/300	0.028760378	0.027891	1.02E+04	3.26E+05	0.014213	3.36E+05	0.014725	3.12%
Tramo 6/300	0.03346398	0.032594603	1.02E+04	3.81E+05	0.013819	3.91E+05	0.014398	2.67%
Tramo 1/500	0.158064438	0.155465313	1.82E+04	1.09E+06	0.014701	1.11E+06	0.013889	1.67%
Tramo 2/500	0.272526625	0.270998375	1.07E+04	1.90E+06	0.014344	1.91E+06	0.012812	0.56%
Tramo 3/500	0.167425	0.165482875	1.36E+04	1.16E+06	0.014653	1.17E+06	0.013771	1.17%
Tramo 1/600	0.1498725	0.14793039	1.14E+04	8.65E+05	0.014529	8.76E+05	0.01433	1.31%
Tramo 2/600	0.27248247	0.27063756	1.08E+04	1.58E+06	0.014034	1.59E+06	0.013118	0.68%
Tramo 1/700	0.236649788	0.23327724	1.69E+04	1.17E+06	0.013951	1.19E+06	0.013663	1.45%
Tramo 2/700	0.257234443	0.254712045	1.26E+04	1.28E+06	0.013877	1.29E+06	0.013496	0.99%

TABLA 33 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED LA CUMBRE PARA EL CAUDAL MÍNIMO 1 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 10000 Y 20000.

Cumbre Qmin(Diferencias número de Reynolds 20000-50000) Darcy Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Porcentual
Tramo 1/300	0.0710019	0.07273017	-20213.68421	850645.2632	0.012043	830431.5789	0.012882	-2.38%
Tramo 2/300	0.032684715	0.034412985	-20213.68421	402491.0526	0.013685	382277.3684	0.014449	-5.02%
Tramo 3/300	0.046622745	0.048476363	-21679.73684	566975	0.012885	545295.2632	0.01371	-3.82%
Tramo 4/300	0.0338886	0.035742218	-21679.73684	418037.6316	0.013588	396357.8947	0.014372	-5.19%
Tramo 5/300	0.02643165	0.028285268	-21679.73684	330821.8421	0.014171	309142.1053	0.014911	-6.55%
Tramo 6/300	0.093625155	0.095656433	-23757.63158	1118788.684	0.011527	1095031.053	0.012366	-2.12%
Tramo 7/300	0.087315435	0.089346713	-23757.63158	1044990.789	0.011651	1021233.158	0.012493	-2.27%
Tramo 8/300	0.09672264	0.098753918	-23757.63158	1155016.579	0.011468	1131258.947	0.012306	-2.06%
Tramo 9/300	0.131488695	0.13591683	-51791.05263	1589670.526	0.010918	1537879.474	0.011759	-3.26%
Tramo 1/350	0.108997897	0.111029192	-20363.85965	1113074.605	0.011516	1092710.746	0.012333	-1.83%
Tramo 1/600	0.51298551	0.51739281	-25773.68421	3025688.947	0.0137	2999915.263	0.011945	-0.85%
Tramo 2/600	0.13057092	0.13499901	-25895.26316	789467.8947	0.014622	763572.6316	0.014627	-3.28%

TABLA 34 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED LA CUMBRE PARA EL CAUDAL MÍNIMO 2 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 10000 Y 20000.

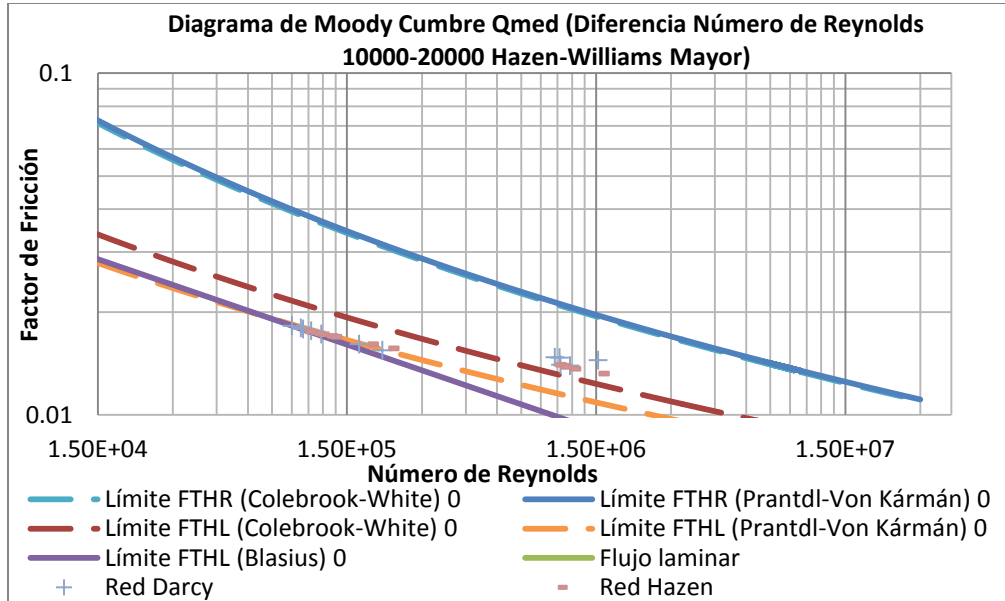


ILUSTRACIÓN 188 DIAGRAMA DE MOODY RED LA CUMBRE TRAMOS CON HAZEN-WILLIAMS MAYOR PARA EL CAUDAL MEDIO.

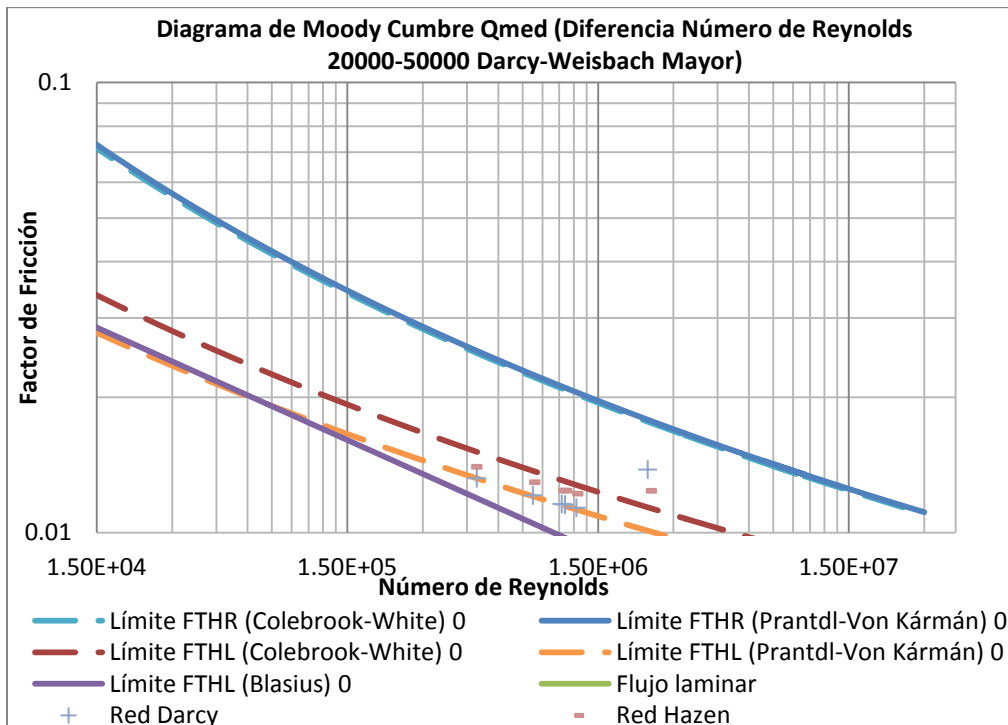


ILUSTRACIÓN 189 DIAGRAMA DE MOODY RED LA CUMBRE TRAMOS CON DARCY-WEISBACH MAYOR PARA EL CAUDAL MEDIO.

Cumbre Qmed (Diferencias número de Reynolds 10000-20000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Porcentual
Tramo 1/300	0.010796873	0.009233393	1.83E+04	1.08E+05	0.017633	1.26E+05	0.017021	16.93%
Tramo 2/300	0.009959603	0.008396123	1.83E+04	9.82E+04	0.017983	1.16E+05	0.017226	18.62%
Tramo 3/300	0.015702368	0.014386928	1.54E+04	1.68E+05	0.016118	1.84E+05	0.016105	9.14%
Tramo 4/300	0.018998798	0.017831003	1.37E+04	2.09E+05	0.015461	2.22E+05	0.015657	6.55%
Tramo 5/300	0.011186168	0.01013661	1.23E+04	1.19E+05	0.017246	1.31E+05	0.016933	10.35%
Tramo 6/300	0.009616275	0.00856674	1.23E+04	1.00E+05	0.017845	1.12E+05	0.017318	12.25%
Tramo 7/300	0.008779005	0.00772947	1.23E+04	9.04E+04	0.01823	1.03E+05	0.01755	13.58%
Tramo 1/500	0.221013813	0.218273125	1.92E+04	1.53E+06	0.014466	1.55E+06	0.013216	1.26%
Tramo 2/500	0.14833175	0.146261688	1.45E+04	1.03E+06	0.01475	1.04E+06	0.014019	1.42%
Tramo 3/500	0.15442325	0.152837125	1.11E+04	1.07E+06	0.014714	1.08E+06	0.013936	1.04%
Tramo 1/700	0.21860664	0.215865948	1.37E+04	1.08E+06	0.014022	1.10E+06	0.013825	1.27%
Tramo 2/700	0.237702308	0.235671258	1.02E+04	1.18E+06	0.013943	1.19E+06	0.013654	0.86%

TABLA 35 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED LA CUMBRE PARA EL CAUDAL MEDIO 1 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 10000 Y 20000.

Cumbre Qmed (Diferencias número de Reynolds 20000-50000) Darcy Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Número Reynolds(%)
Tramo 1/300	0.091793475	0.093991163	-2.57E+04	1.10E+06	0.011558	1.07E+06	0.012401	-2.34%
Tramo 2/300	0.121291043	0.125235428	-4.61E+04	1.46E+06	0.011054	1.42E+06	0.0119	-3.15%
Tramo 1/350	0.107178282	0.109375993	-2.20E+04	1.10E+06	0.011544	1.07E+06	0.012364	-2.01%
Tramo 1/600	0.12045375	0.12439818	-2.31E+04	7.27E+05	0.014712	7.04E+05	0.014802	-3.17%
Tramo 1/600	0.47415555	0.47822625	-2.38E+04	2.80E+06	0.013732	2.77E+06	0.012085	-0.85%

TABLA 36 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED LA CUMBRE PARA EL CAUDAL MEDIO 2 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 20000 Y 50000.

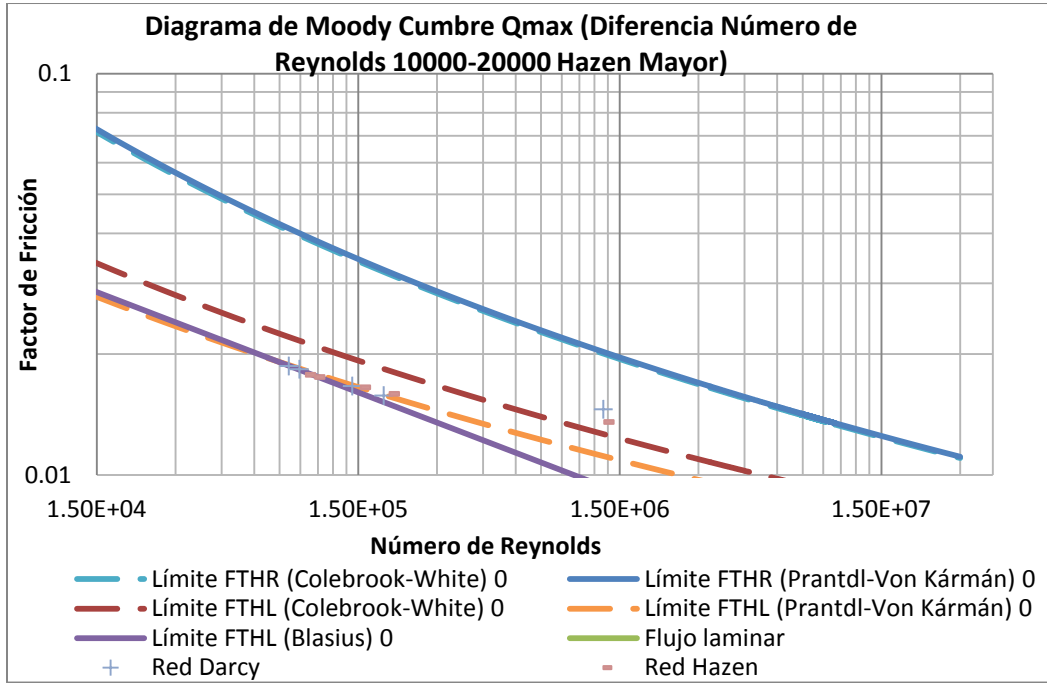


ILUSTRACIÓN 190 DIAGRAMA DE MOODY RED LA CUMBRE TRAMOS CON HAZEN-WILLIAMS MAYOR PARA EL CAUDAL MÁXIMO.

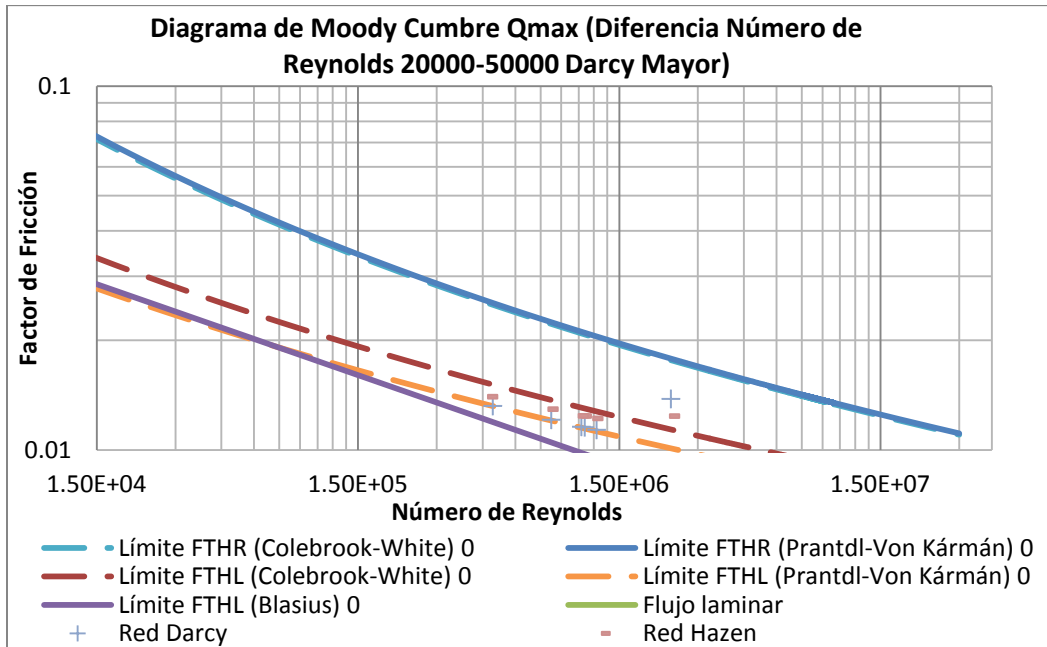


ILUSTRACIÓN 191 DIAGRAMA DE MOODY RED LA CUMBRE TRAMOS CON DARCY-WEISBACH MAYOR PARA EL CAUDAL MÁXIMO.

Cumbre Qmax (Diferencias número de Reynolds 10000-20000) Hazen Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Porcentual
Tramo 1/300	0.008785328	0.007652025	1.33E+04	8.95E+04	0.018343	1.03E+05	0.017539	14.81%
Tramo 2/300	0.008100743	0.00696744	1.33E+04	8.15E+04	0.018683	9.47E+04	0.017764	16.27%
Tramo 3/300	0.013135658	0.012180465	1.12E+04	1.42E+05	0.016654	1.54E+05	0.016534	7.84%
Tramo 4/300	0.01693602	0.016069928	1.01E+04	1.88E+05	0.015767	1.98E+05	0.015926	5.39%
Tramo 1/500	0.1867995	0.185204875	1.12E+04	1.30E+06	0.014572	1.31E+06	0.013549	0.86%

TABLA 37 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED LA CUMBRE PARA EL CAUDAL MÁXIMO 1 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 10000 Y 20000.

Cumbre Qmax (Diferencias número de Reynolds 20000-50000) Darcy Mayor								
Tramo/Diámetro(mm)	Caudal Hazen(m <sup>3</sup> /s)	Caudal Darcy(m <sup>3</sup> /s)	Diferencia en Número de Reynolds	Reynolds Darcy	Factor Fricción Darcy	Reynolds Hazen	Factor Fricción Hazen	Diferencia Porcentual
Tramo 1/300	0.040413938	0.042159578	-2.04E+04	4.93E+05	0.013204	4.73E+05	0.014002	-4.14%
Tramo 2/300	0.068824665	0.070570305	-2.04E+04	8.25E+05	0.012102	8.05E+05	0.012941	-2.47%
Tramo 3/300	0.092250113	0.094805393	-2.99E+04	1.11E+06	0.011541	1.08E+06	0.012392	-2.70%
Tramo 4/300	0.102138098	0.105232613	-3.62E+04	1.23E+06	0.011354	1.19E+06	0.012207	-2.94%
Tramo 1/350	0.104829559	0.107384848	-2.56E+04	1.08E+06	0.011577	1.05E+06	0.012404	-2.38%
Tramo 1/600	0.40170321	0.40522131	-2.06E+04	2.37E+06	0.013806	2.35E+06	0.012385	-0.87%

TABLA 38 RESUMEN DE TRAMOS DE LA RED LA CUMBRE PARA EL CAUDAL MÁXIMO 2 PARA DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE REYNOLDS ENTRE 20000 Y 50000.

---

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

- El estudio con emisores demostró que operar una red matriz utilizando la ecuación de Hazen-Williams conlleva el riesgo de que se esté sobrestimando el caudal que pueda ser emitido.
- Las diferencias de los caudales de emisores trabajados con la ecuación de Darcy-Weisbach frente a uno operando con la ecuación de Hazen-Williams pueden ser de 5 hasta más de 100 L/s, lo que implica un volumen considerable, teniendo en cuenta que la red debe funcionar 24 horas.
- Pese a que en el caso de la Red Ginebra ésta se comportó con coeficientes de Hazen-Williams similares a los valores teóricos establecidos durante este estudio, se pudo evidenciar que en las otras redes la variación del coeficiente es bastante importante, llegando a presentarse valores de 80 e incluso 200, que pueden llevar a subestimar o sobrestimar en gran medida las pérdidas por fricción.
- Pese a que se utilizó una rugosidad absoluta menor para el hierro dúctil a los valores utilizados en la literatura clásica (debido a que los proveedores de la tubería sugieren este valor), y teniendo en cuenta que una rugosidad de 0.1 mm debería asemejarse más a un coeficiente de Hazen-Williams de 140 (que es un coeficiente relativamente liso), las redes siguieron presentando variaciones importantes, incluso alcanzando coeficientes con valores de 100 o 120, demostrando una vez más lo riesgoso que puede llegar a ser el diseñar o en este caso, operar una red matriz con coeficientes constantes de Hazen-Williams, como también se concluye en las investigaciones adelantadas por Bombardelli.
- Una conclusión importante es que se logró establecer que la red que trabajaba con la ecuación de Hazen-Williams presentaba valores diferentes en los números de Reynolds que la red trabajada con la ecuación de Darcy-Weisbach, lo que permite concluir que para una tubería específica, el caudal que circula en ella no es el mismo para las dos ecuaciones, cambiando así la hidráulica de todo el sistema.
- En cuanto a las presiones, se encontraron resultados similares a los que se han encontrado en las tesis que precedieron a este trabajo, es decir, que la ecuación de Hazen-Williams puede subestimar o sobrestimar las pérdidas por fricción, entregando presiones que realmente no se presentan en la realidad.
- Adicionalmente, es aconsejable trabajar con controles de bombas, de tal forma que se optimice el comportamiento de la misma, para una red que opere con la ecuación de Hazen-Williams y posteriormente analizar el comportamiento con la ecuación de Darcy-Weisbach y analizar las diferencias hidráulicas y consecuencias económicas.
- Los trabajos futuros también deben tener en cuenta la variación en la operación de válvulas, para analizar que ocurre con la hidráulica en caso de que se presente alguna situación inesperada en la red, es decir analizar que tan robusta se comporta la red con las dos ecuaciones y ver si las diferencias hidráulicas de las mismas se ven afectadas por una situación como esta.



- Es recomendable extender los análisis que se realizaron en esta parte, para otros tipos de materiales como lo son el CCP (Concreto con revestimiento interno de acero) y materiales modernos como lo es el GRP (Poliéster reforzado con fibra de vidrio), ya que estos materiales o se usan ya ampliamente o van a convertirse en el futuro de las redes de distribución de agua potable.
- En las redes estudiadas, está claro que la ecuación de Hazen-Williams presenta un desbalance de masa con respecto a la red en la que se emplea la ecuación de Darcy-Weisbach; esto implica que se presenten llenados de los tanques diferentes entre las dos ecuaciones.
- Así mismo, las 2 ecuaciones (Hazen-Williams y Darcy-Weisbach) están presentando diferencias considerables en los caudales que transportan las tuberías; como consecuencia, la hidráulica de la red utilizando las 2 ecuaciones es diferente. Esto último conlleva a que se presenten diferencias en las presiones, en los números de Reynolds en las tuberías y en las pérdidas por fricción.
- Si bien, en términos porcentuales las mayores diferencias en el número de Reynolds se presentan en tuberías de diámetros pequeños, esto se debe a que el caudal transportado es más bajo que en tuberías de gran diámetro y se ve “magnificada” esta diferencia.
- En consecuencia, las tuberías que transportan gran cantidad de caudal (las de mayor diámetro de la red) presentan diferencias porcentuales menores; pero el efecto de estos tramos es grande en la hidráulica de toda la red, considerando que el caudal que se dejó de transportar en las otras tuberías está cambiando radicalmente el comportamiento hidráulico; este efecto se presentó principalmente y en mayor grado en las redes que tienen ramificaciones y terminaciones en tanques.
- En el caso de estudio de Dtown, éste presentó altas diferencias en la solución de la hidráulica de la red entre las dos ecuaciones; esto debido a que ciertos tramos de tubería se calculó más caudal utilizando la ecuación de Hazen-Williams en contraste a lo encontrado usando la ecuación de Darcy-Weisbach y viceversa
- Esto último se presentó en momentos específicos del día y en 2 de los 5 sectores de la red Dtown. Las diferencias implican que el fluido debe recorrer diferentes rutas para satisfacer las demandas de los nudos.
- En la red Dtown las grandes diferencias parecen presentarse en instancias cuando el patrón de consumo está pasado de máximo consumo, a horarios de menor consumo, es decir cuando el patrón está presentando una especie de “valle”.
- Se puede concluir que al evaluar la hidráulica de manera diferente en este tipo de redes, el análisis de fugas o de selección de puntos para la colocación de válvulas va a ser radicalmente distinto entre un operario que maneje la red utilizando la ecuación de Hazen-Williams que otro que utilice la ecuación de Darcy-Weisbach. El primero corre el riesgo de agravar o dejar de solucionar el problema al utilizar una hidráulica que no se presenta en la realidad.
- El desbalance de masa en las redes con sistemas de bombeo también causará que los costos del mismo y la selección de bombas del sistema sea diferente entre las dos



---

ecuaciones, corriendo el riesgo de que se sobrestime la bomba que se necesite o en un escenario más grave, que se seleccione una bomba con capacidad insuficiente para el sistema.

- El análisis realizado en la red Dtown en varios momentos del día (cada 15 minutos) permitió detectar efectos significativos de la ecuación de Hazen-Williams. A futuro, se recomienda que se trabaje con solo un par de redes y se pueda estudiar todo lo que se realizó durante esta investigación, pero analizando períodos de tiempo con separación menor y de manera más detallada.
- Para finalizar, está claro que la ecuación de Hazen-Williams subestima o sobrestima el caudal que circula en las redes; como consecuencia, la ecuación empírica está resolviendo de manera diferente la hidráulica de la red. Así mismo, es importante mencionar que el efecto se ve aseverado en redes con ramificaciones, tanques, y a mayor demanda de caudal las diferencias en los números de Reynolds de las tuberías se ven magnificados.
- Los resultados de esta tesis pueden ser utilizados para la calibración de redes, de tal forma que los operarios apunten siempre a las tuberías de gran diámetro.



---

## BIBLIOGRAFÍA

---

- AMIANTIT. (s.f.). <http://www.amiantit.com/>. Obtenido de <http://www.amiantit.com/>:  
[http://www.amiantit.com/media/pdf/brochures/Ductile\\_Iron\\_Pipe\\_Co.\\_Ltd/final%20sadiip%20ductile%20iron%20pipe\\_FINAL\\_LR\\_WS\\_HIDD.pdf](http://www.amiantit.com/media/pdf/brochures/Ductile_Iron_Pipe_Co._Ltd/final%20sadiip%20ductile%20iron%20pipe_FINAL_LR_WS_HIDD.pdf)
- B.A. Christensen, F. A. (2000). Discussion Limitations and proper use of the Hazen-Williams Equation. *Journal of hydraulics engineering* , 167-170.
- Empresas Públicas de Medellín. (2006-2009). <http://es.scribd.com>. Obtenido de <http://es.scribd.com>: <http://es.scribd.com/doc/35115401/Normas-Acueducto-Version-Final>
- Engineering Tool Box. (s.f.). *Engineering Tool Box*. Obtenido de Engineering Tool Box:  
[http://www.engineeringtoolbox.com/hazen-williams-coefficients-d\\_798.html#UpDEFsRLNy0](http://www.engineeringtoolbox.com/hazen-williams-coefficients-d_798.html#UpDEFsRLNy0)
- Fabián A. Bombardelli, M. H. (2003). Hydraulic Design of Large-Diameter Pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 839-846.
- Gardner Williams, A. H. (1905). *Hydraulic Tables*. Library of the University of California.
- Hernández, R. A. (Diciembre de 2011). Efecto del Uso de la ecuación de Hazen-Williams vs la ecuación de Darcy-Weisbach en tuberías de gran diámetro (Redes matrices). Bogotá, Colombia.
- Liou, C. P. (1998). LIMITATIONS AND PROPER USE OF THE HAZEN-WILLIAMS EQUATION. *Journal of hydraulics Engineering*, 951-954.
- M. Moghazi, H. E.-D. (1998). Estimating Hazen-Williams Coefficient for Polyethylene Pipes. *Journal of Transportation Engineering*, 197-199.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (01 de Febrero de 2013). DOCUMENTACIÓN TÉCNICO NORMATIVA DEL SECTOR DE AGUA . *DOCUMENTACIÓN TÉCNICO NORMATIVA DEL SECTOR DE AGUA* . Bogotá.
- Quentin B. Travis, L. W. (2007). Relationship between Hazen-Williams and Colebrook-White Roughness Values. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1270-1273.
- Saint-Gobain-PAM. (s.f.). <http://www.saint-gobain-pam.co.uk/>. Obtenido de <http://www.saint-gobain-pam.co.uk/>: [http://www.saint-gobain-pam.co.uk/assets/docs/ws/Water\\_Sewer\\_Design\\_Guide.pdf](http://www.saint-gobain-pam.co.uk/assets/docs/ws/Water_Sewer_Design_Guide.pdf)



---

Saldarriaga, J. G. (2007). *Hidráulica de Tuberías Abastecimiento de agua, redes, riesgos*. Bogotá: Alfaomega.

Tata Kubota. (s.f.). <http://tatametalikskubota.com/>. Obtenido de <http://tatametalikskubota.com/>: <http://tatametalikskubota.com/products/ductile-iron-pipes.asp>

Uribe, J. D. (Junio de 2012). Efecto del uso de ecuaciones empíricas vs físicamente basadas sobre los costos de diseños optimizados en acueductos. Bogotá: Universidad de los Andes.

Valiantzas, J. D. (2008). Explicit Power Formula for the Darcy-Weisbach Pipe Flow Equation: Application in Optimal Pipeline Design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 454-461.

## ANEXOS

### LOCALIZACIÓN DE LOS EMISORES

#### EMISORES BOGOTÁ

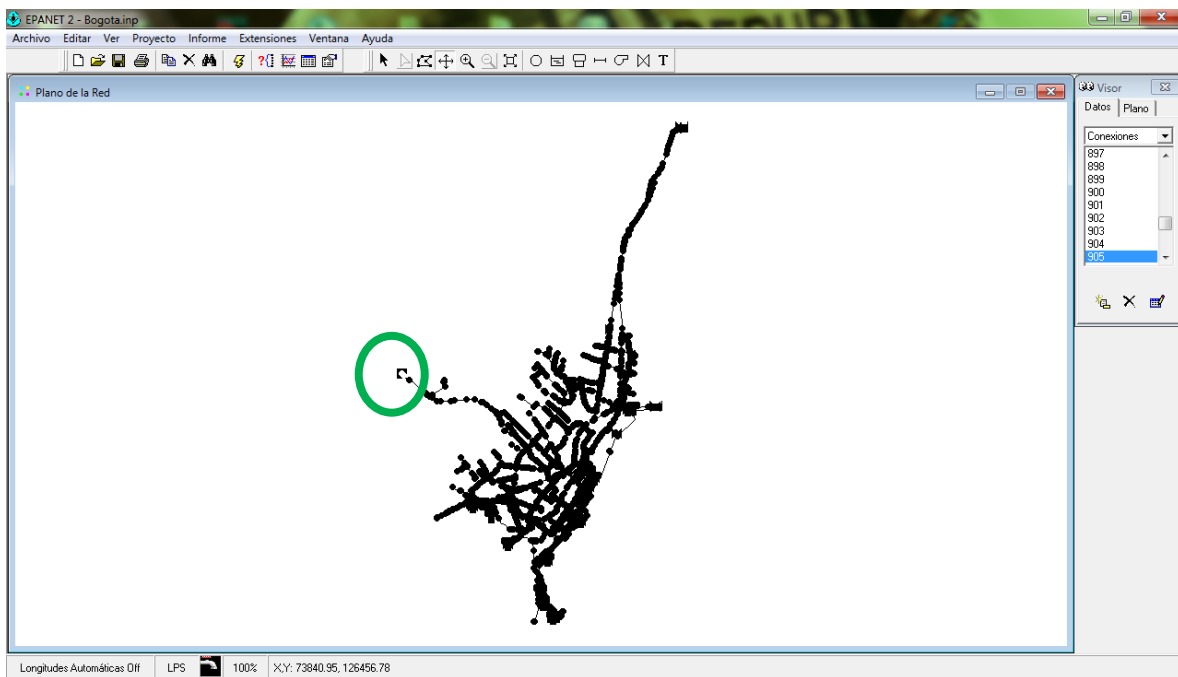


Ilustración 192 Emisor 905 red matriz de Bogotá.

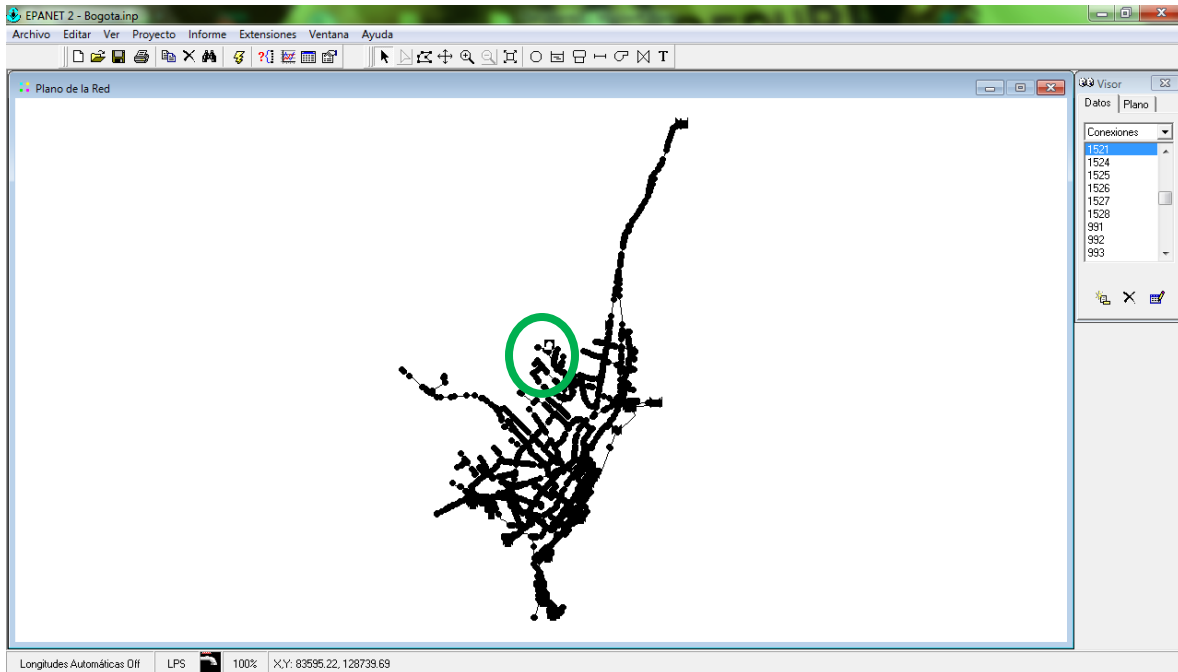


Ilustración 193 Emisor 1521 red matriz de Bogotá.

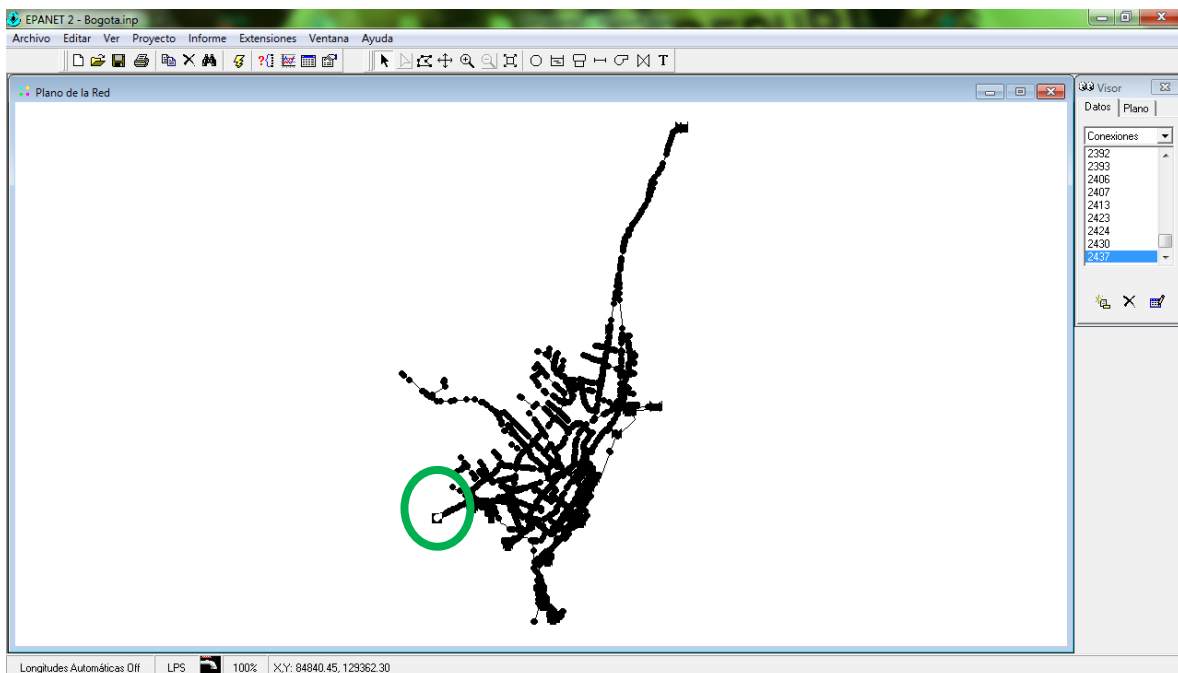


Ilustración 194 Emisor 2437 red matriz de Bogotá.

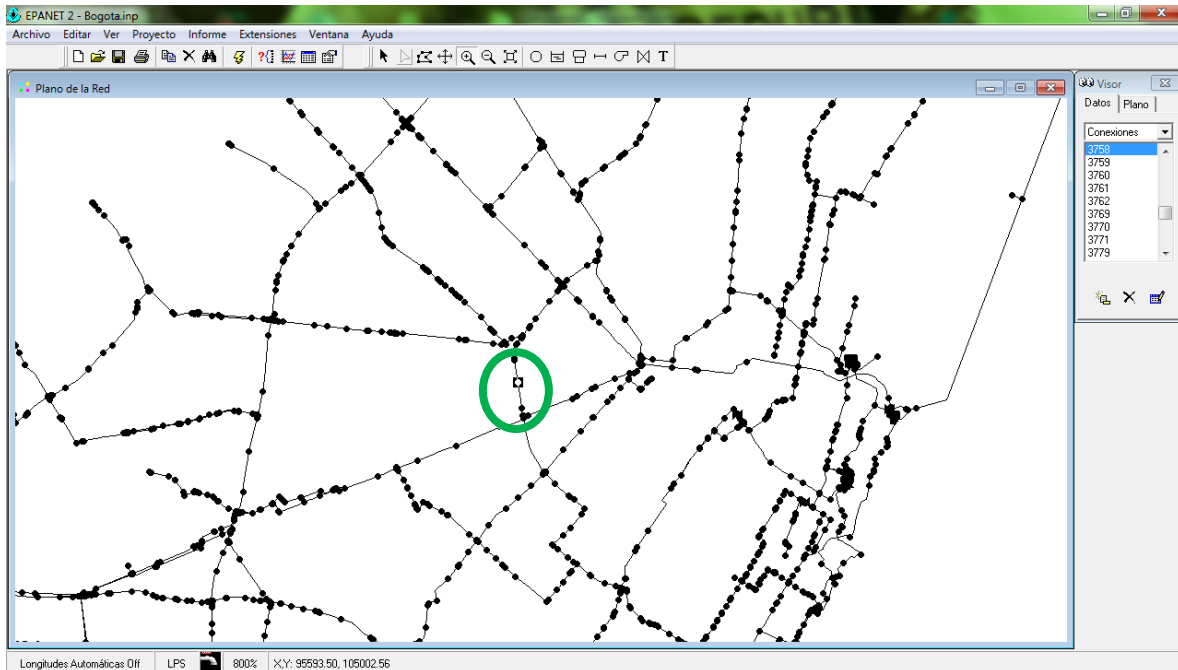


Ilustración 195 Emisor 3758 red matriz de Bogotá.

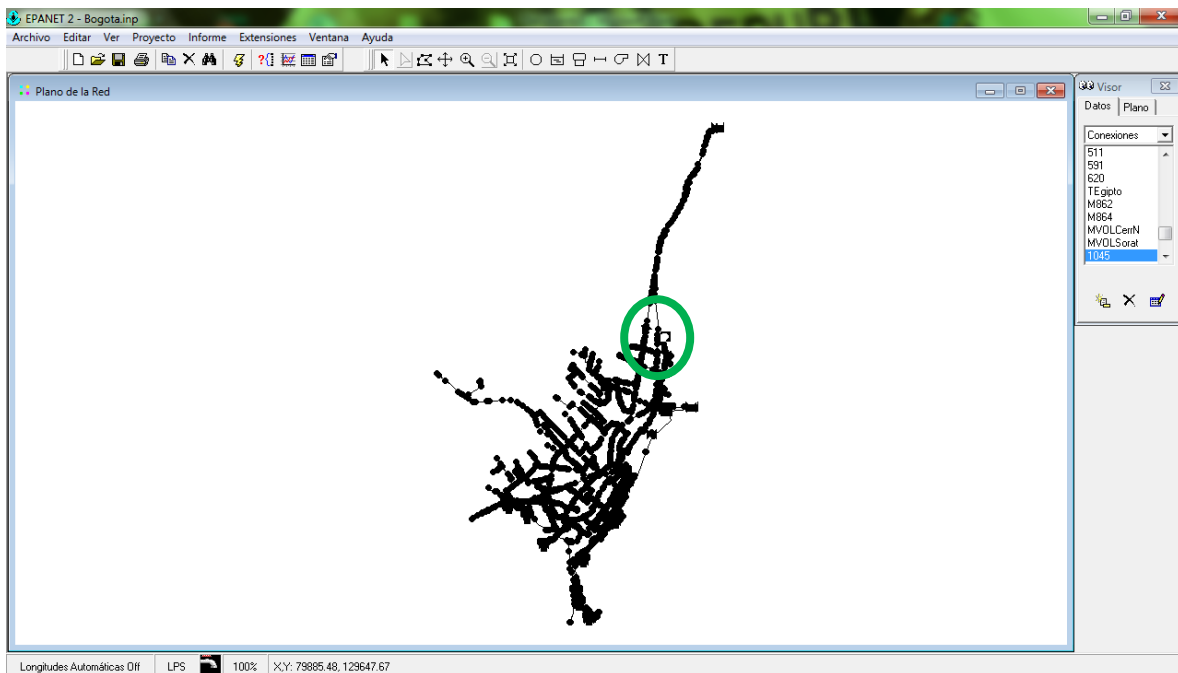


Ilustración 196 Emisor 1045 red matriz de Bogotá.

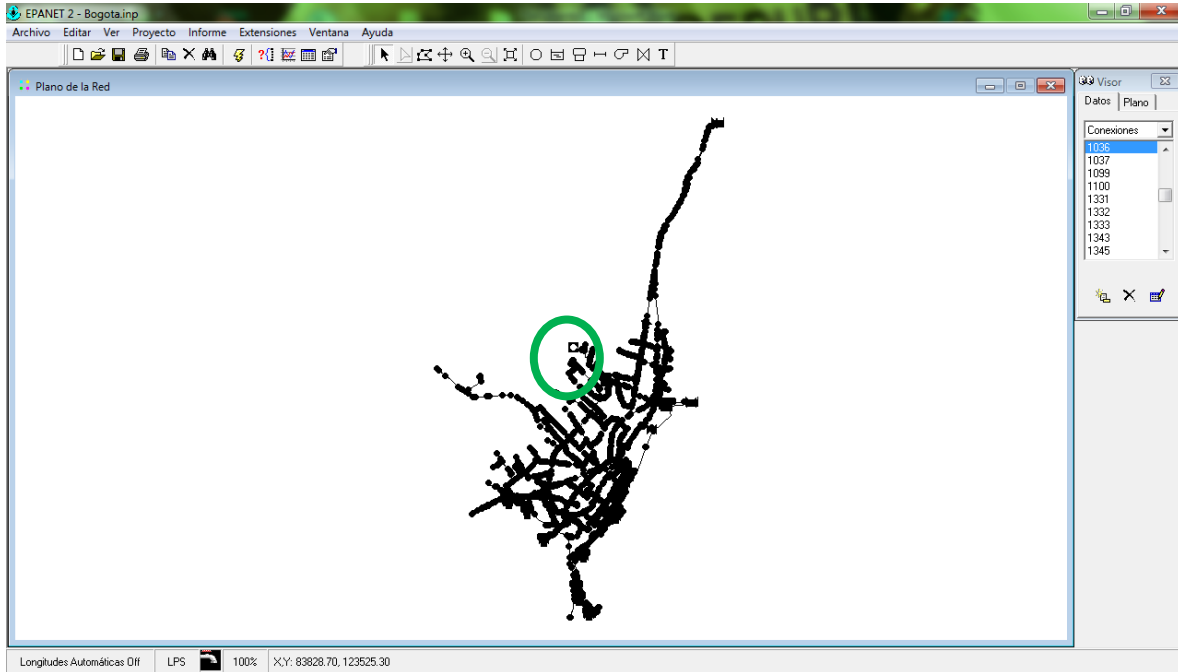


Ilustración 197 Emisor 1036 red matriz de Bogotá.

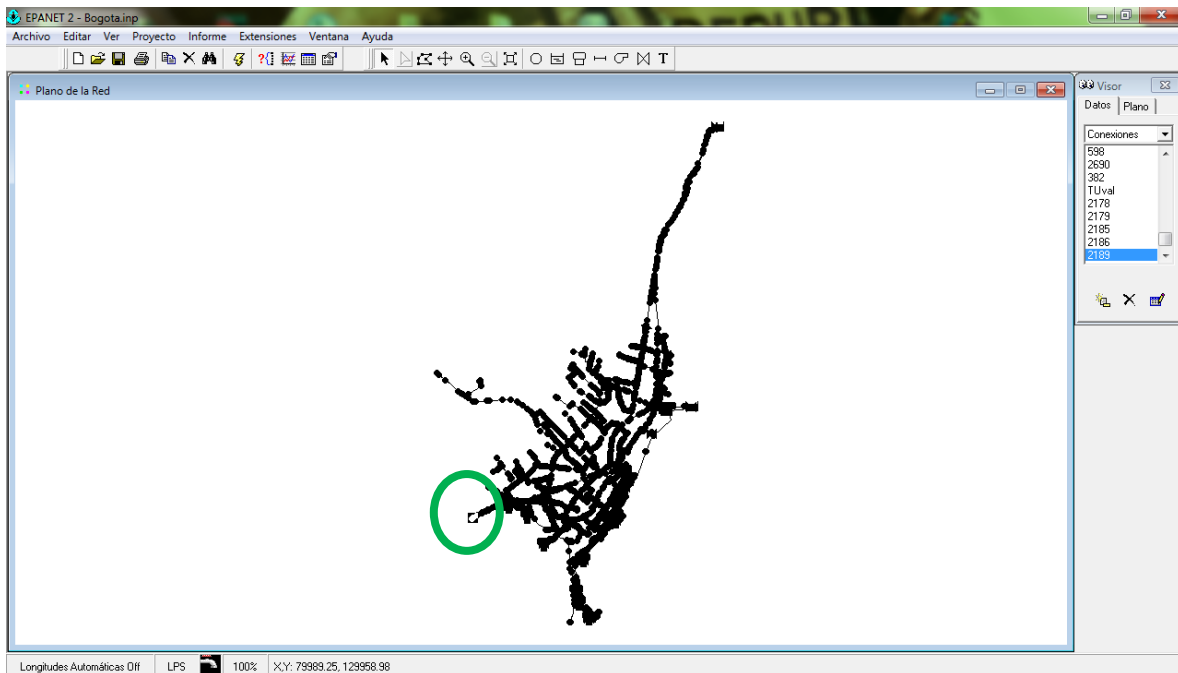


Ilustración 198 Emisor 2189 red matriz de Bogotá.



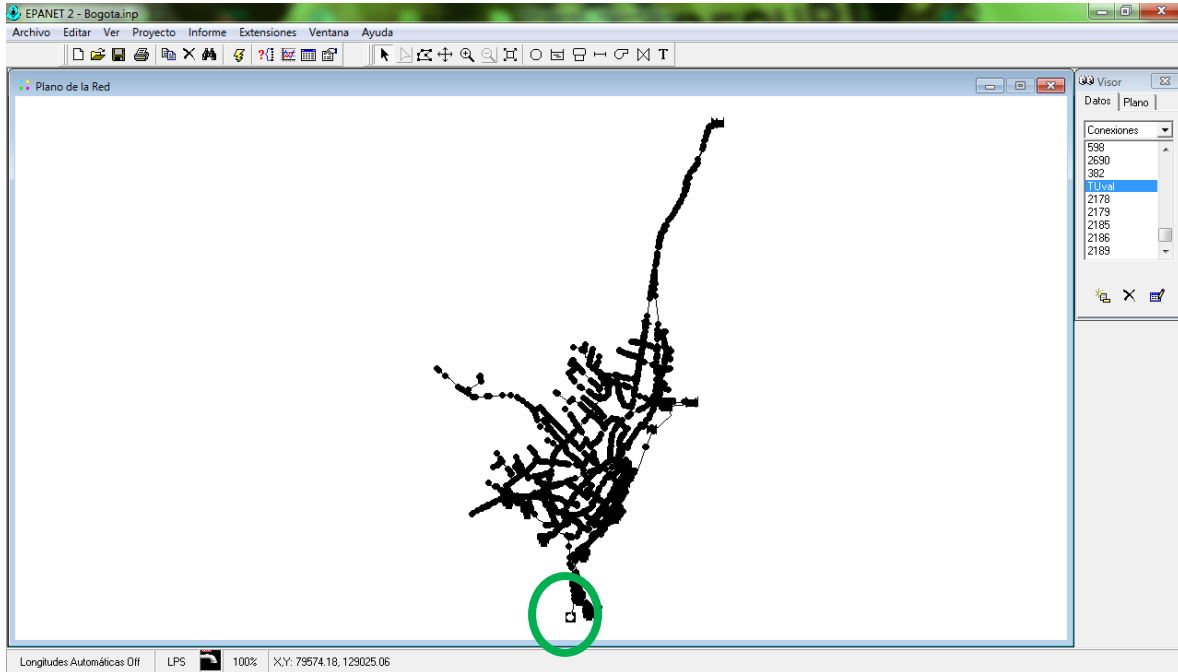


Ilustración 199 Emisor TUval red matriz de Bogotá.

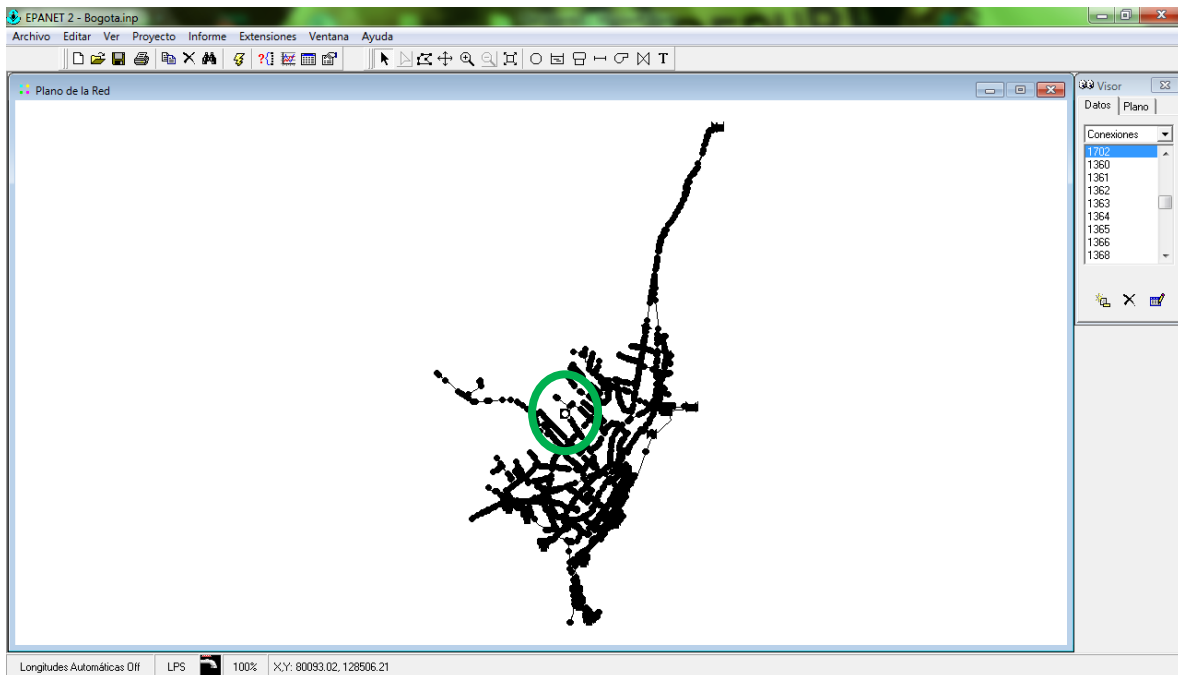


Ilustración 200 Emisor 1702 red matriz de Bogotá.

## EMISORES GINEBRA

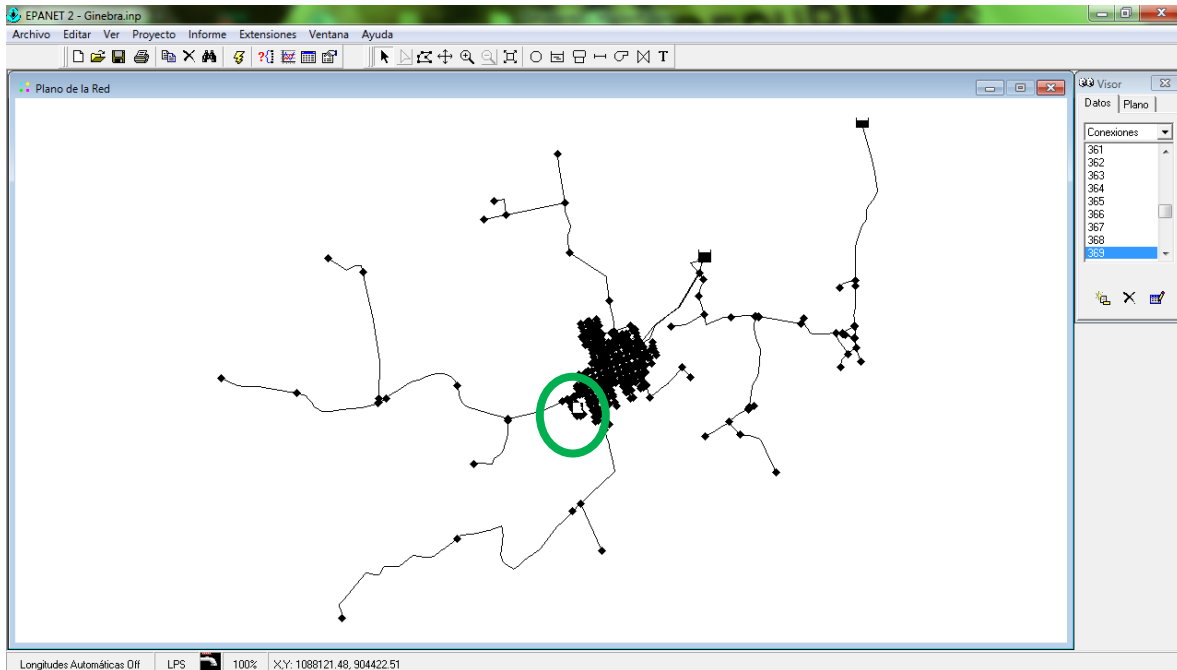


Ilustración 201 Emisor 369 red Ginebra.

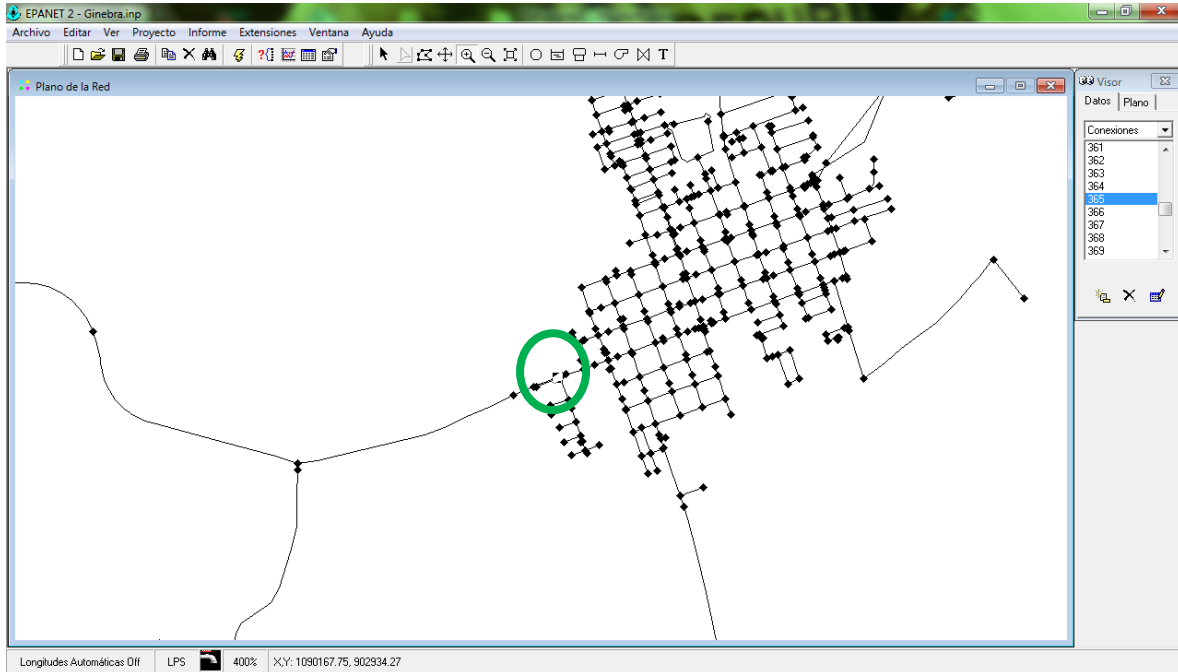


Ilustración 202 Emisor 365 red Ginebra.

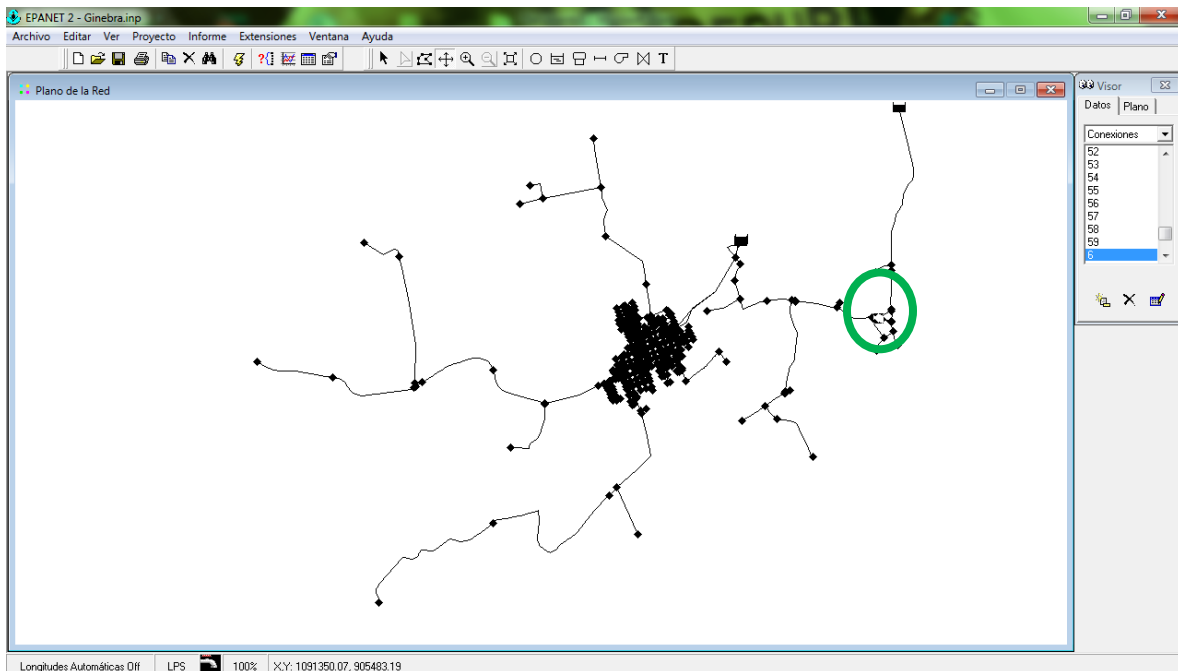


Ilustración 203 Emisor 6 red Ginebra.

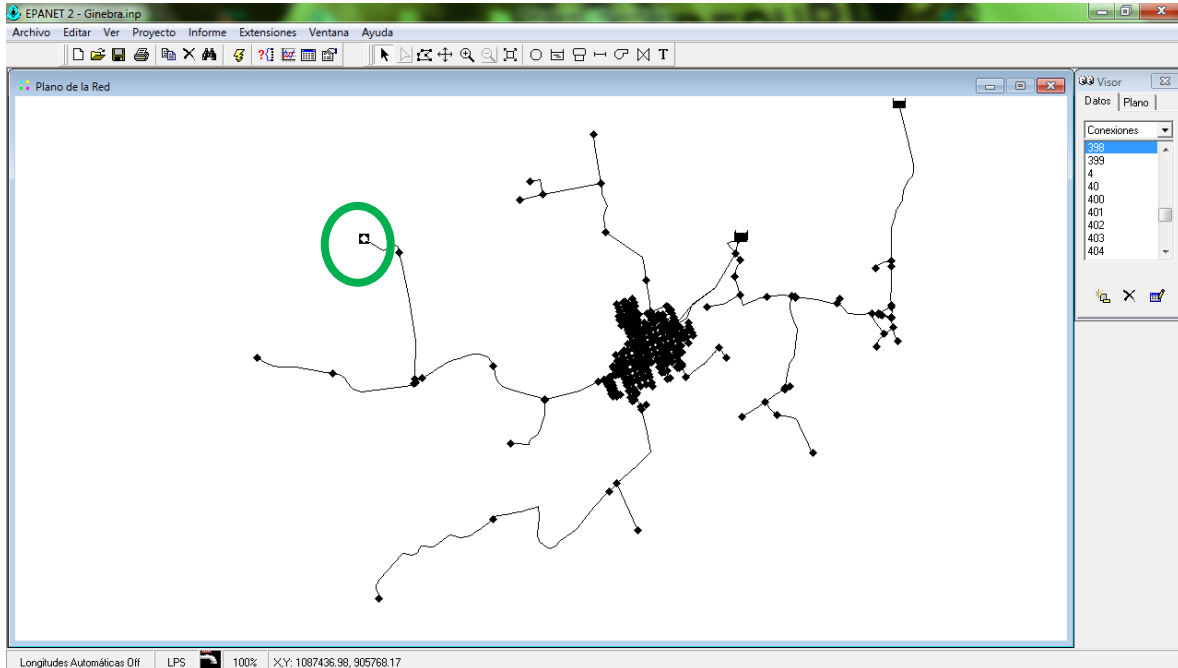


Ilustración 204 Emisor 398 red Ginebra.

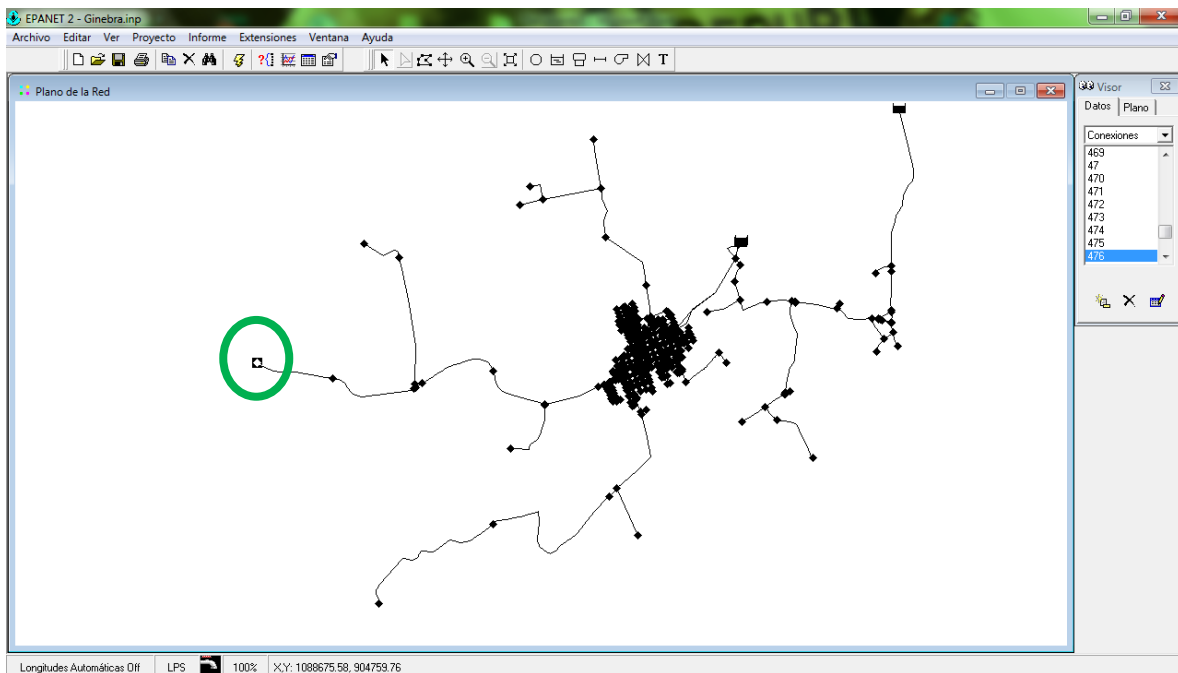


Ilustración 205 Emisor 476 red Ginebra.

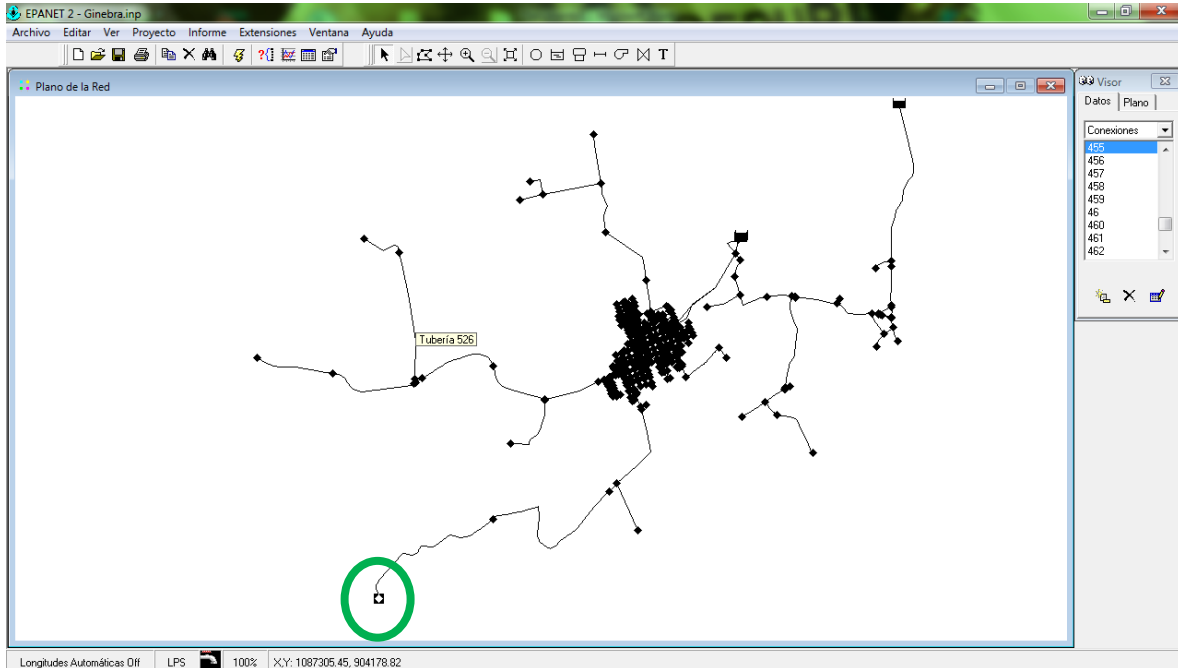


Ilustración 206 Emisor 455 red Ginebra.

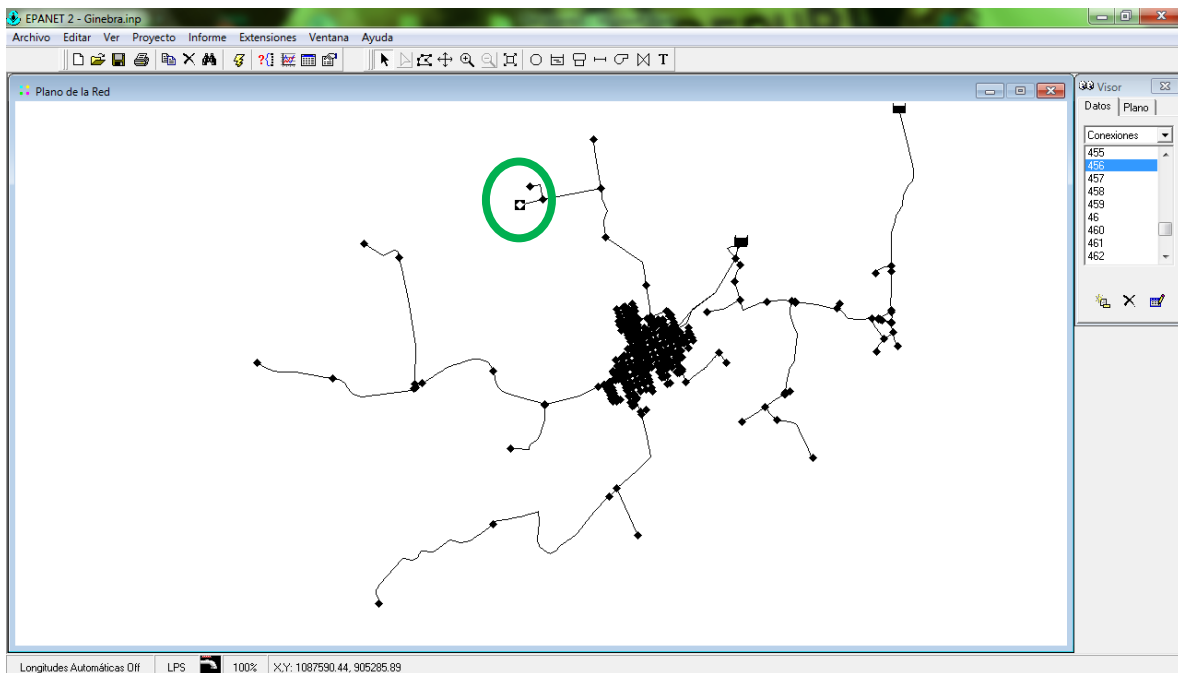


Ilustración 207 Emisor 456 red Ginebra.

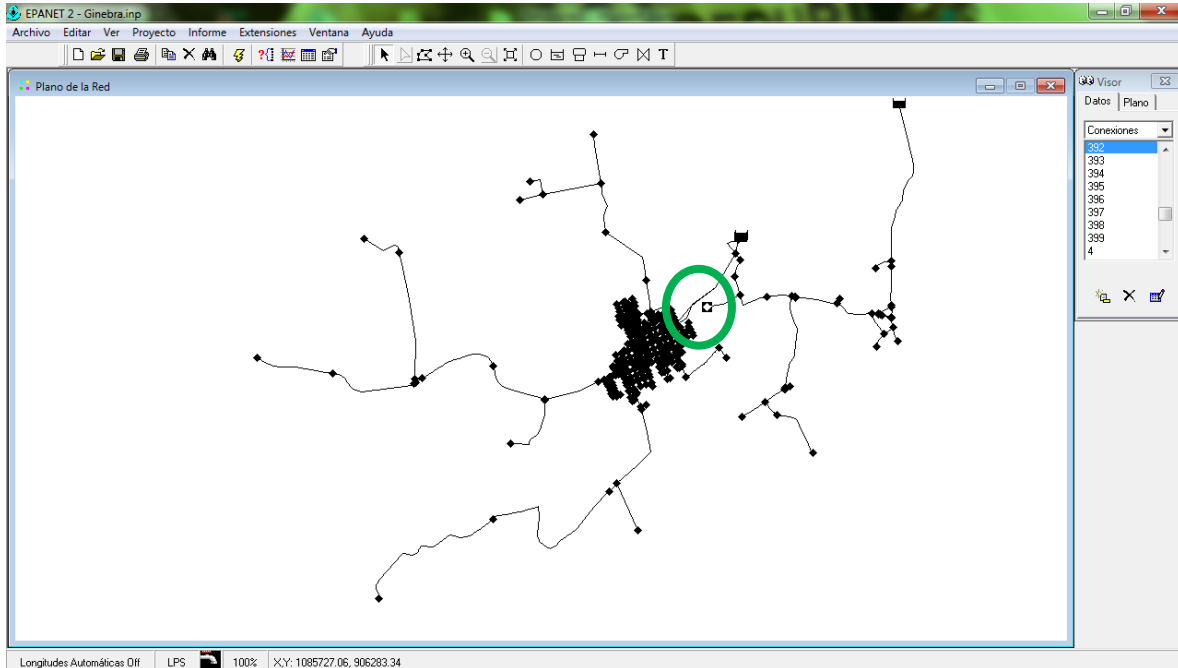


Ilustración 208 Emisor 392 red Ginebra.

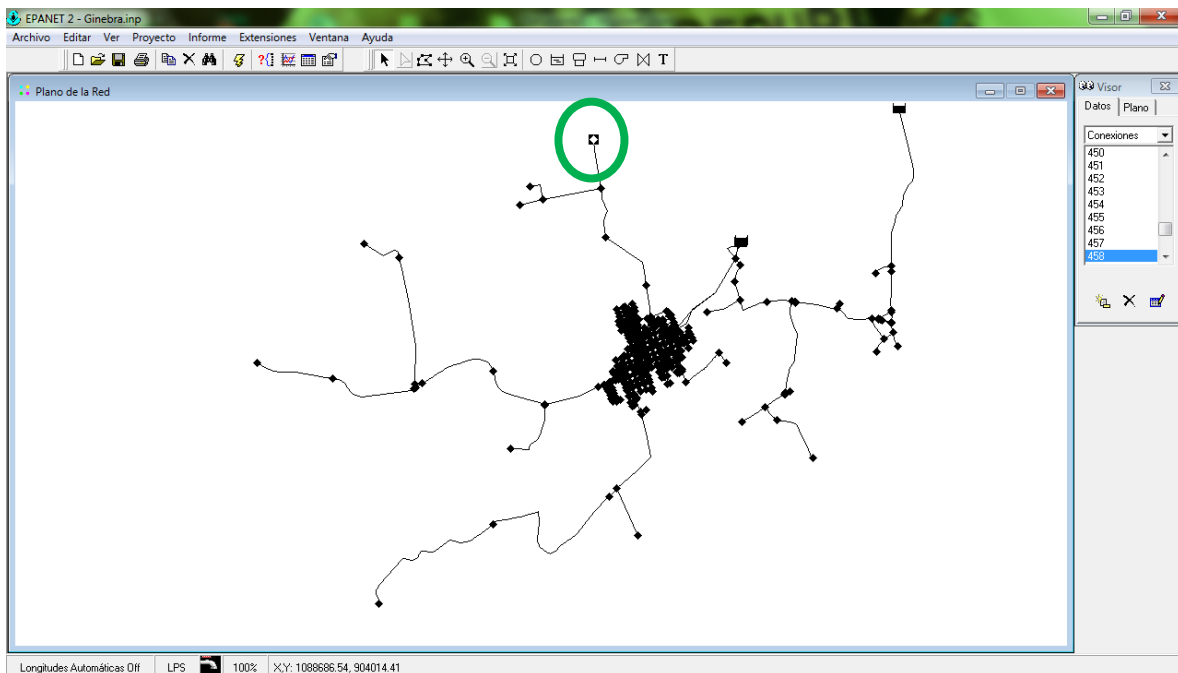


Ilustración 209 Emisor 458 red Ginebra.

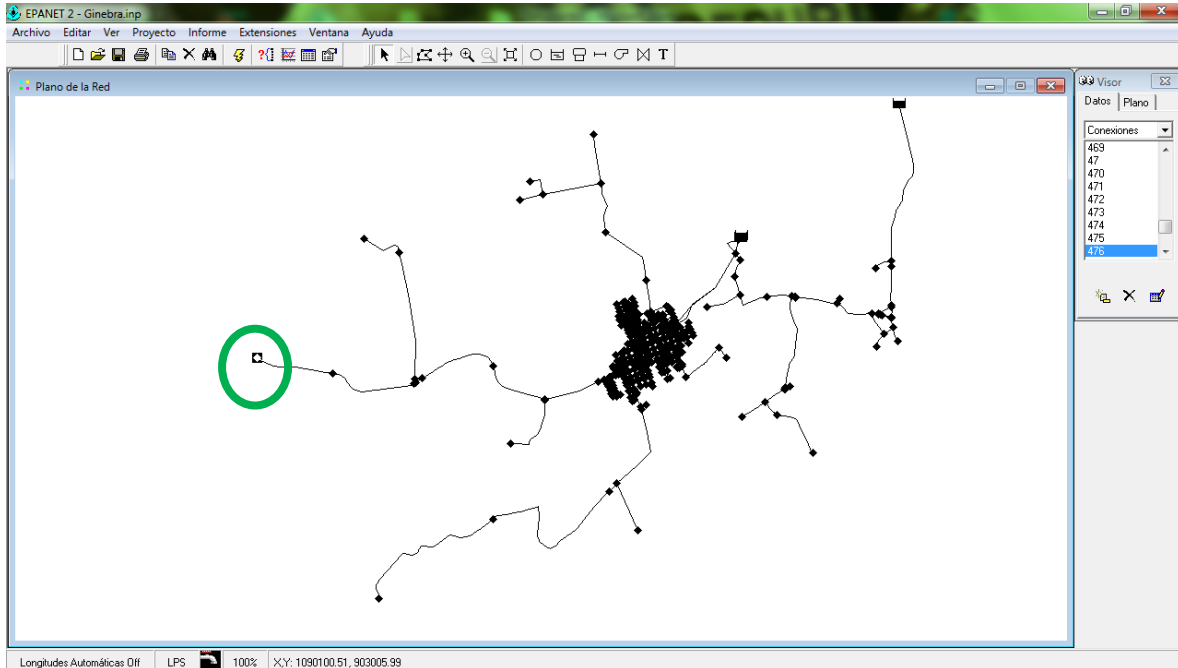


Ilustración 210 Emisor 476 red Ginebra.

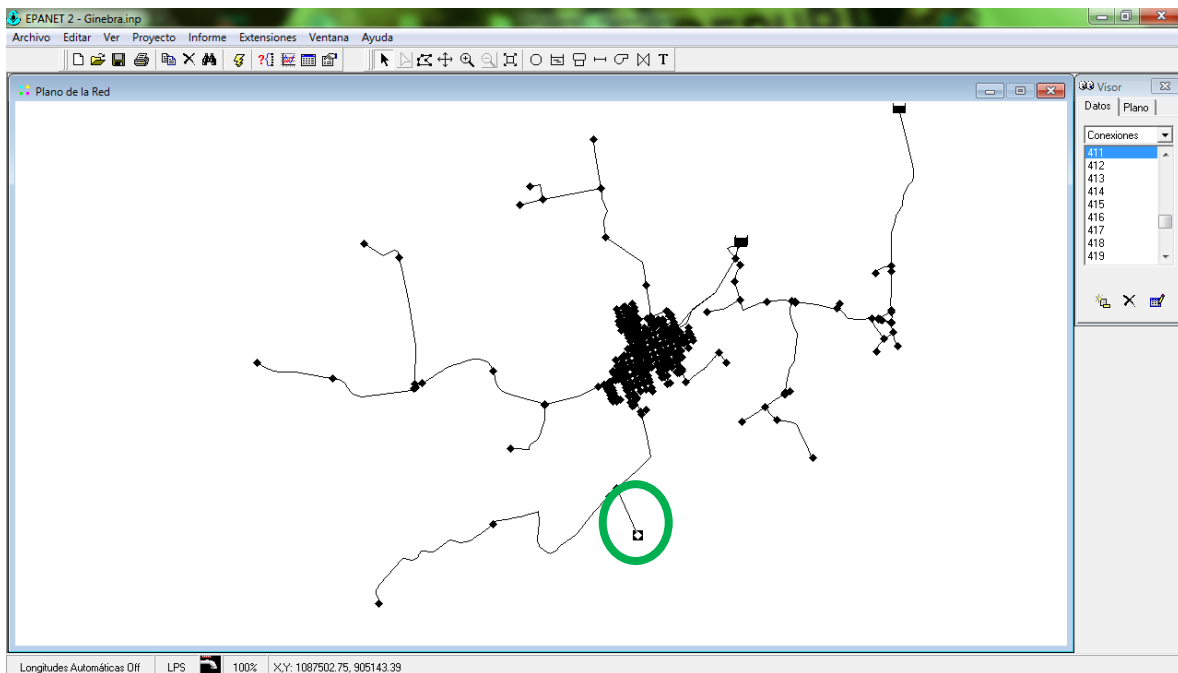


Ilustración 211 Emisor 411 red Ginebra.

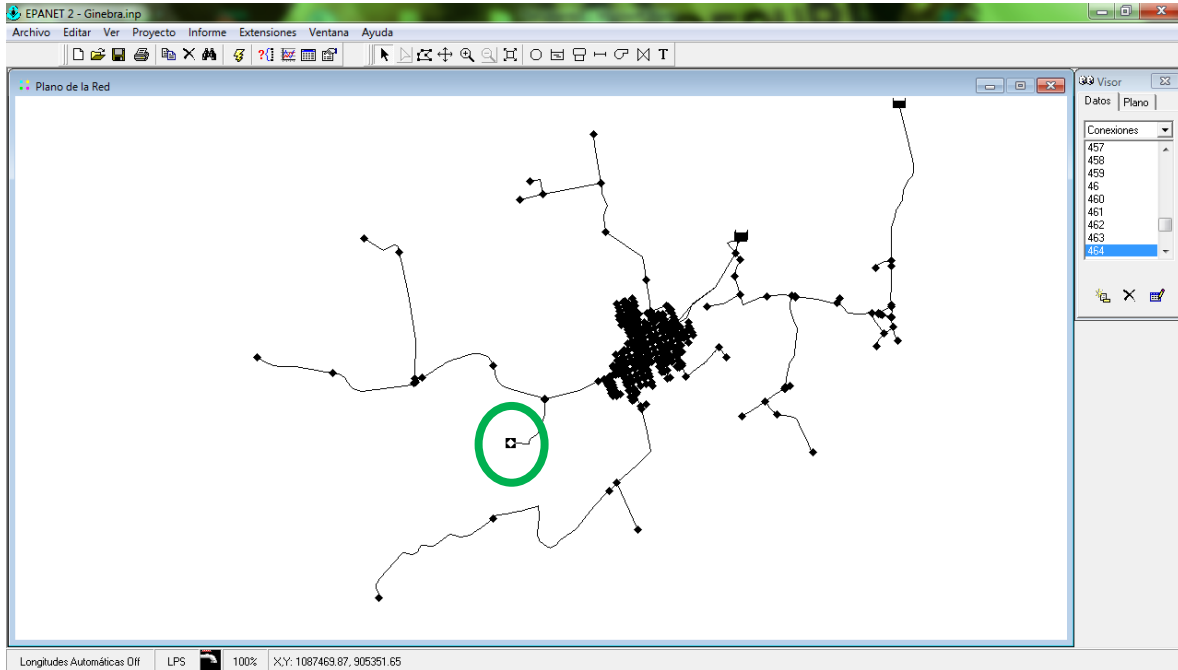


Ilustración 212 Emisor 464 red Ginebra.

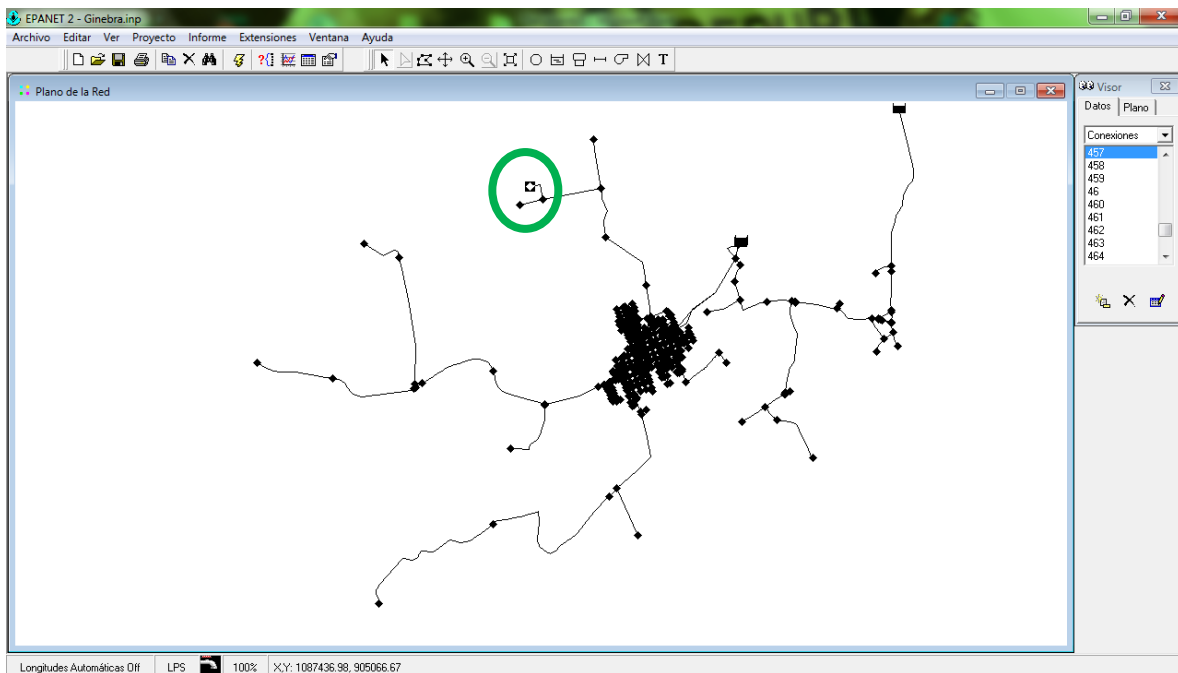


Ilustración 213 Emisor 457 red Ginebra.



## EMISORES ANDALUCÍA

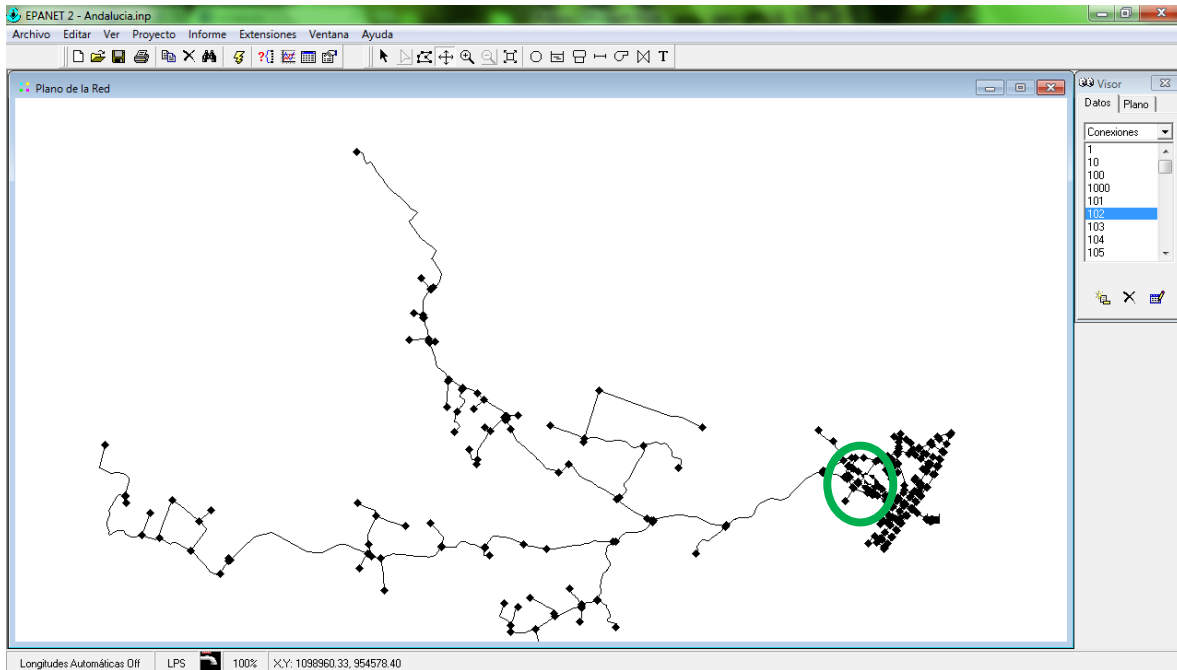


Ilustración 214 Emisor 102 red Andalucía.

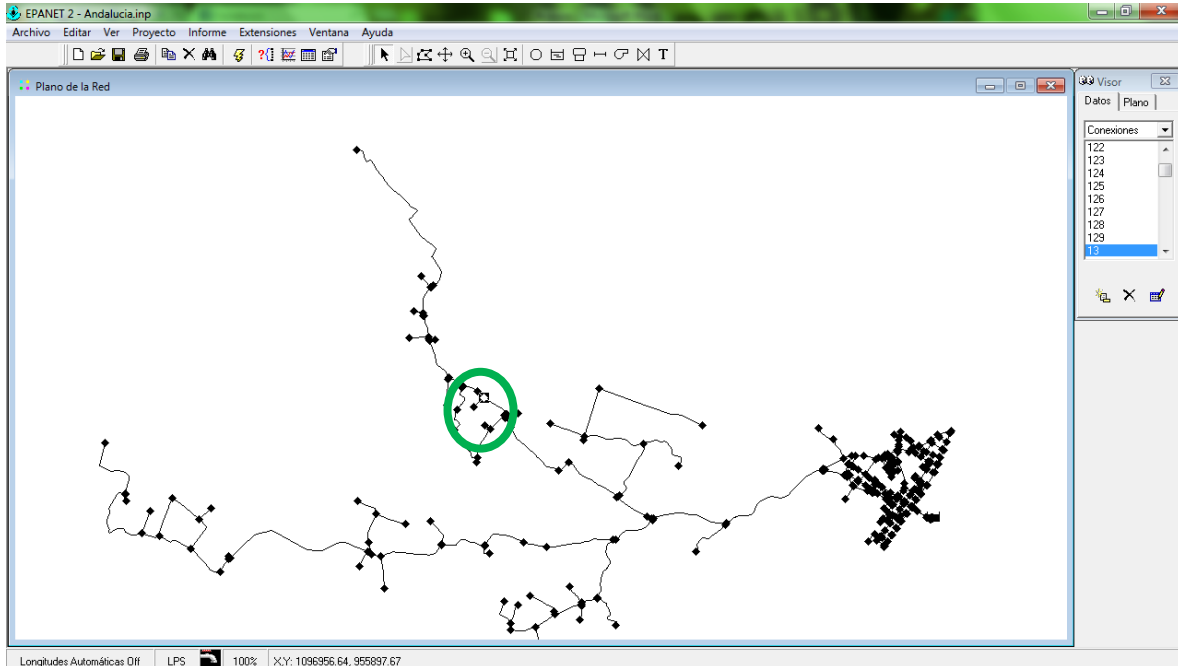


Ilustración 215 Emisor 13 red Andalucía.

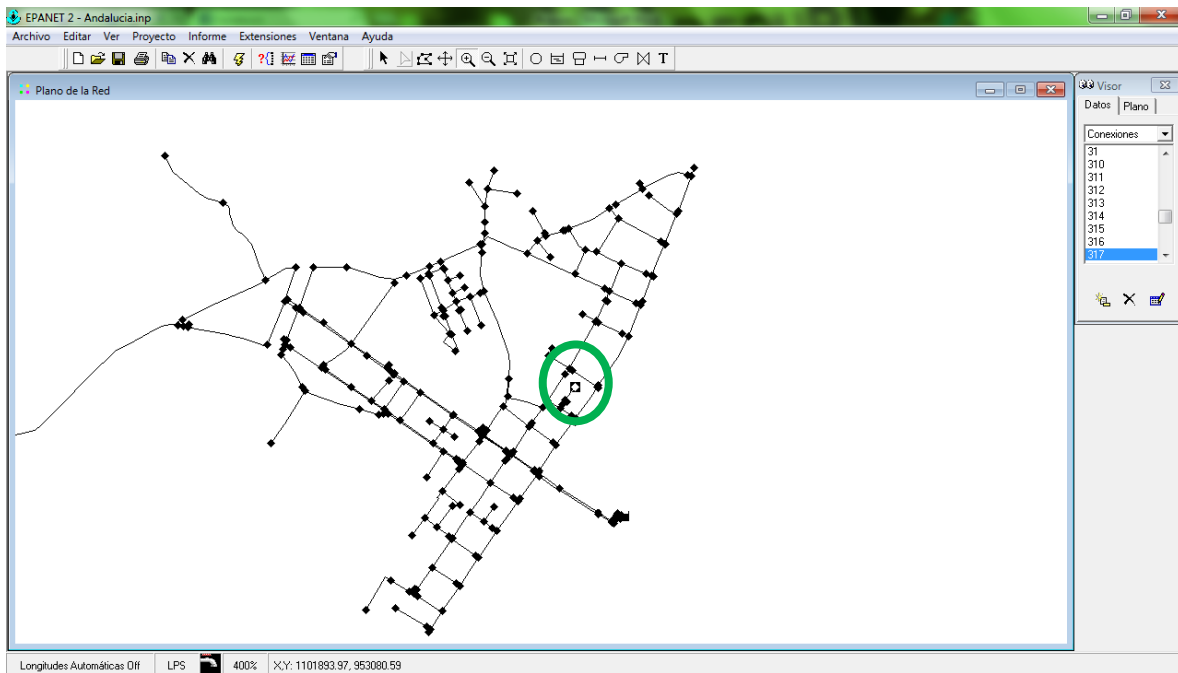


Ilustración 216 Emisor 317 red Andalucía.

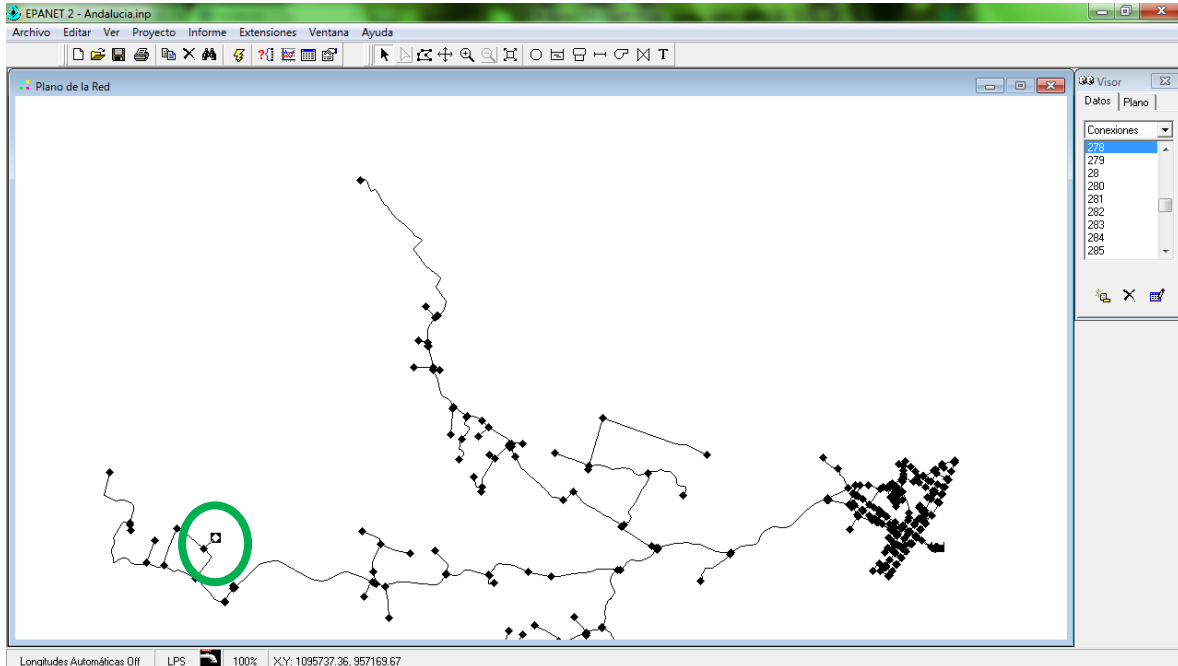


Ilustración 217 Emisor 278 red Andalucía.

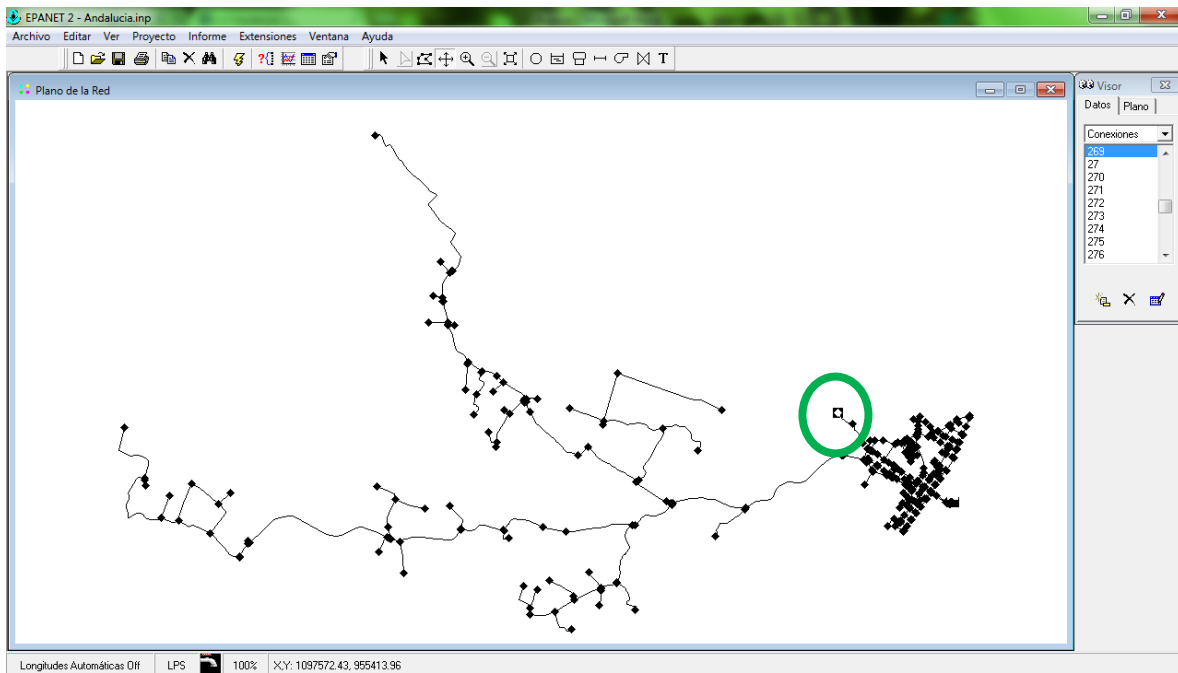


Ilustración 218 Emisor 269 red Andalucía.

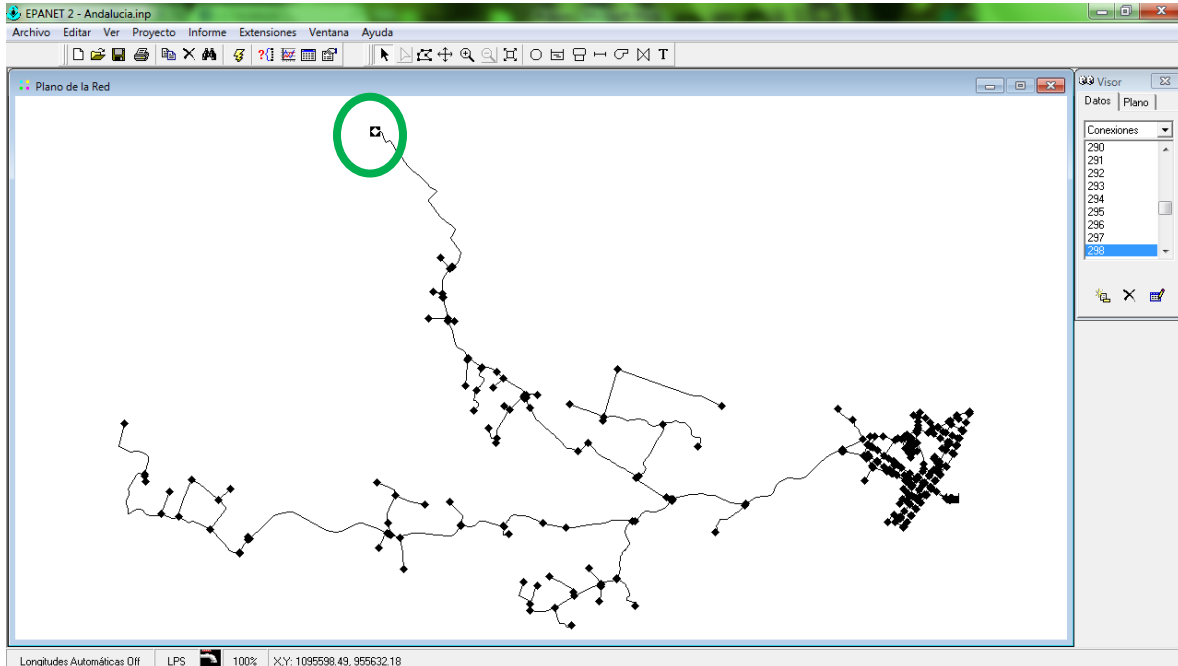


Ilustración 219 Emisor 298 red Andalucía.

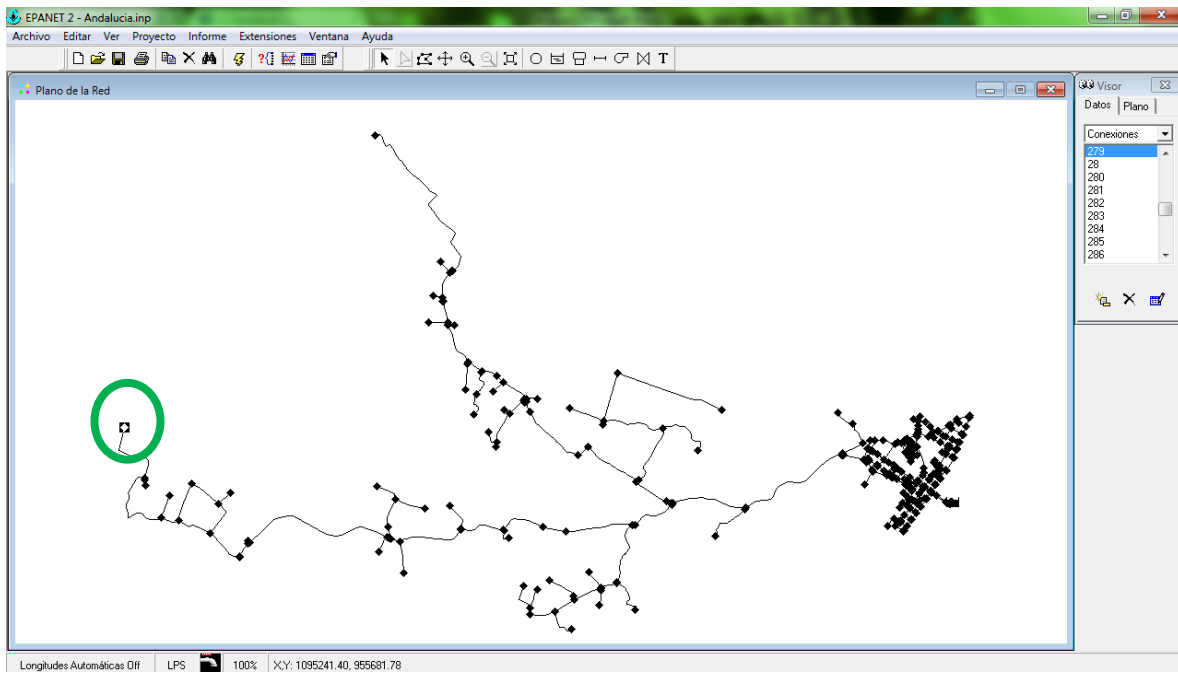


Ilustración 220 Emisor 279 red Andalucía.

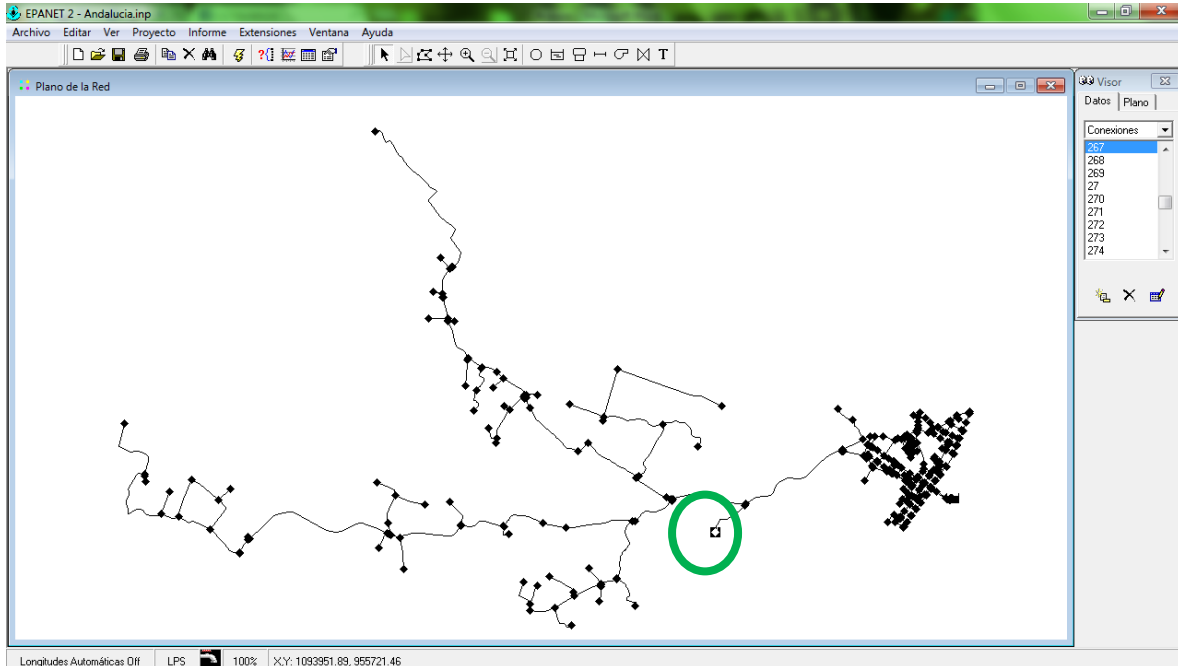


Ilustración 221 Emisor 267 red Andalucía.

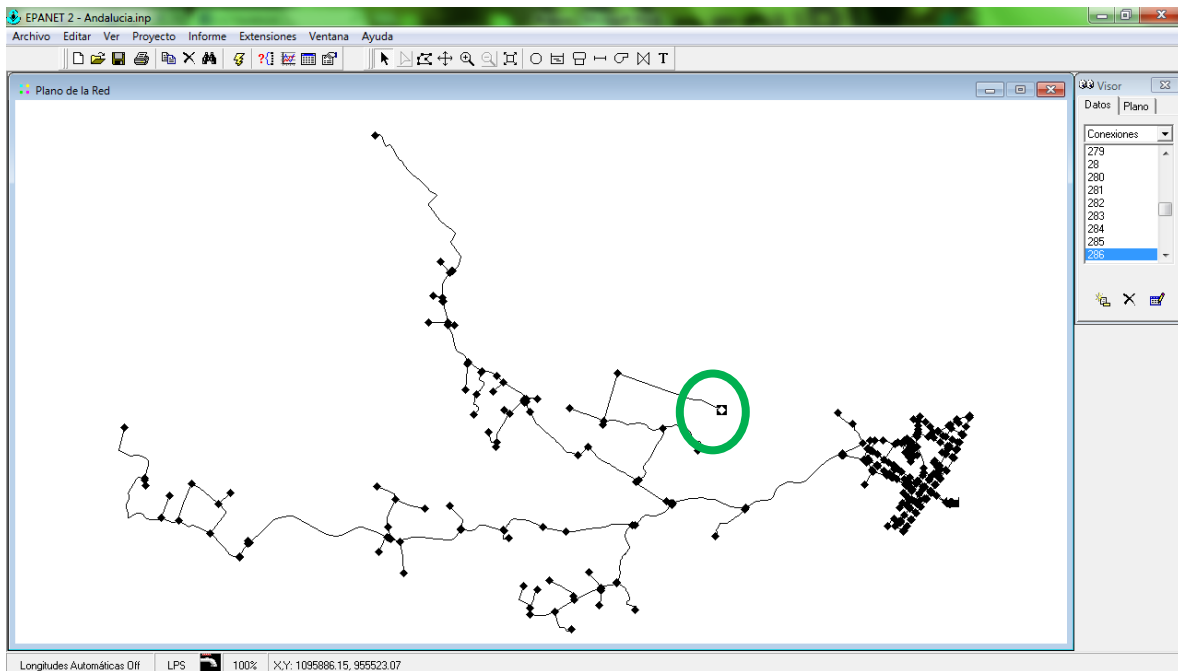


Ilustración 222 Emisor 286 red Andalucía.

## EMISORES MEDELLÍN

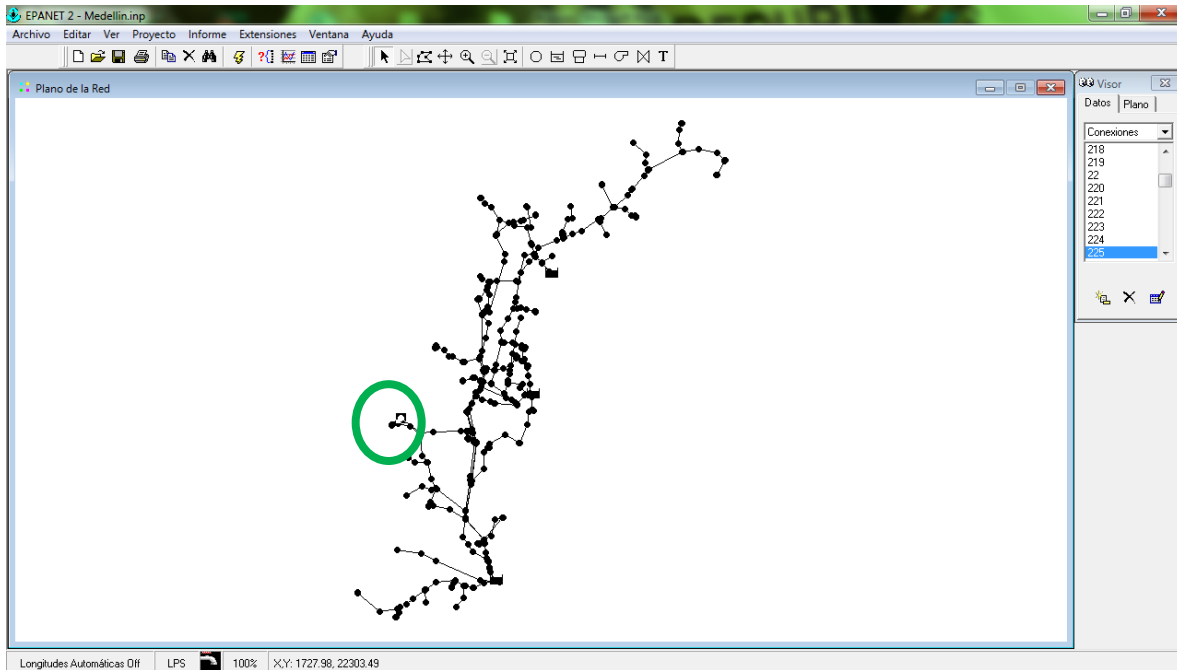


Ilustración 223 Emisor 225 red matriz de Medellín.

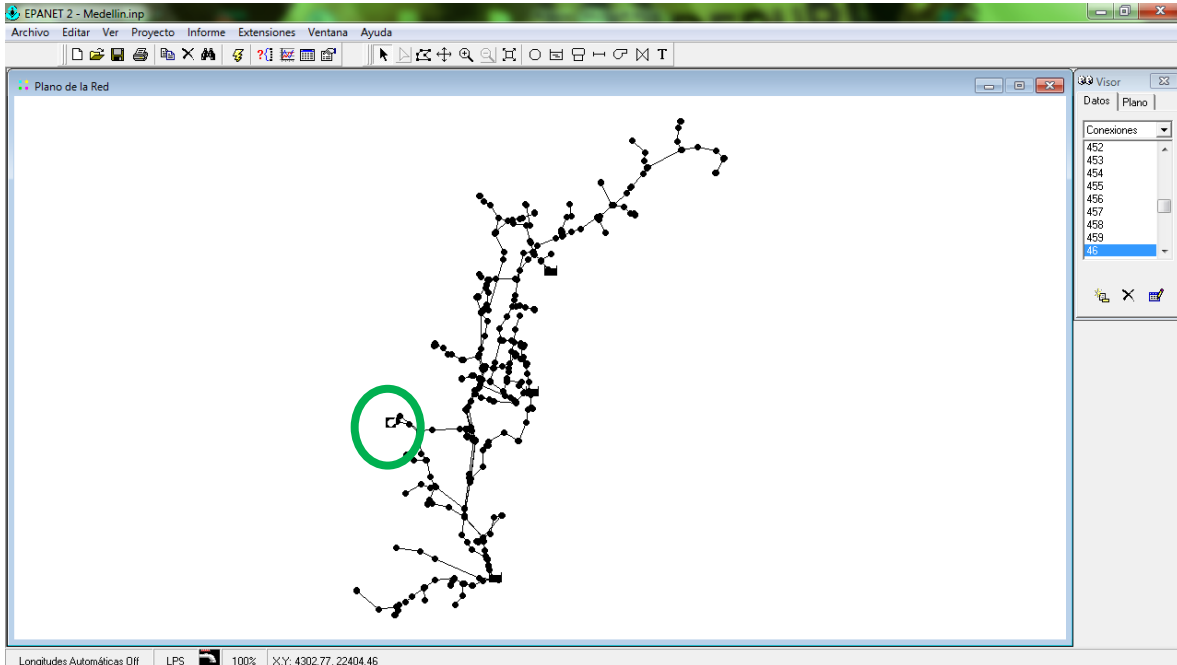


Ilustración 224 Emisor 46 red matriz de Medellín.

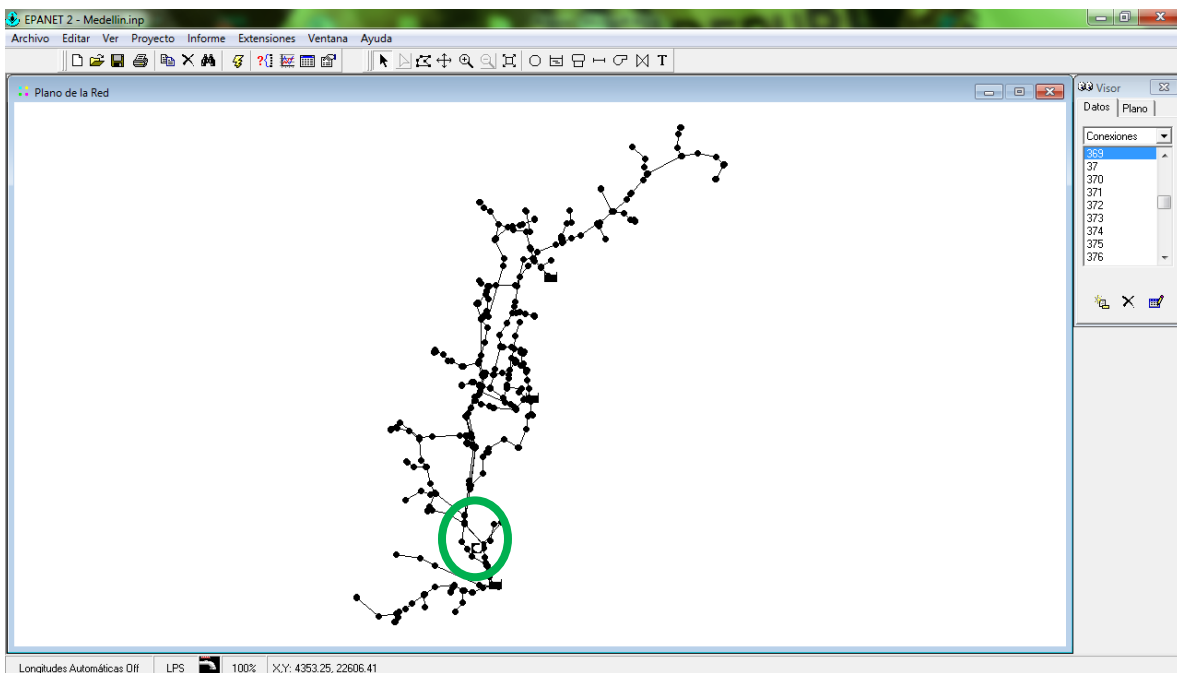


Ilustración 225 Emisor 369 red matriz de Medellín.

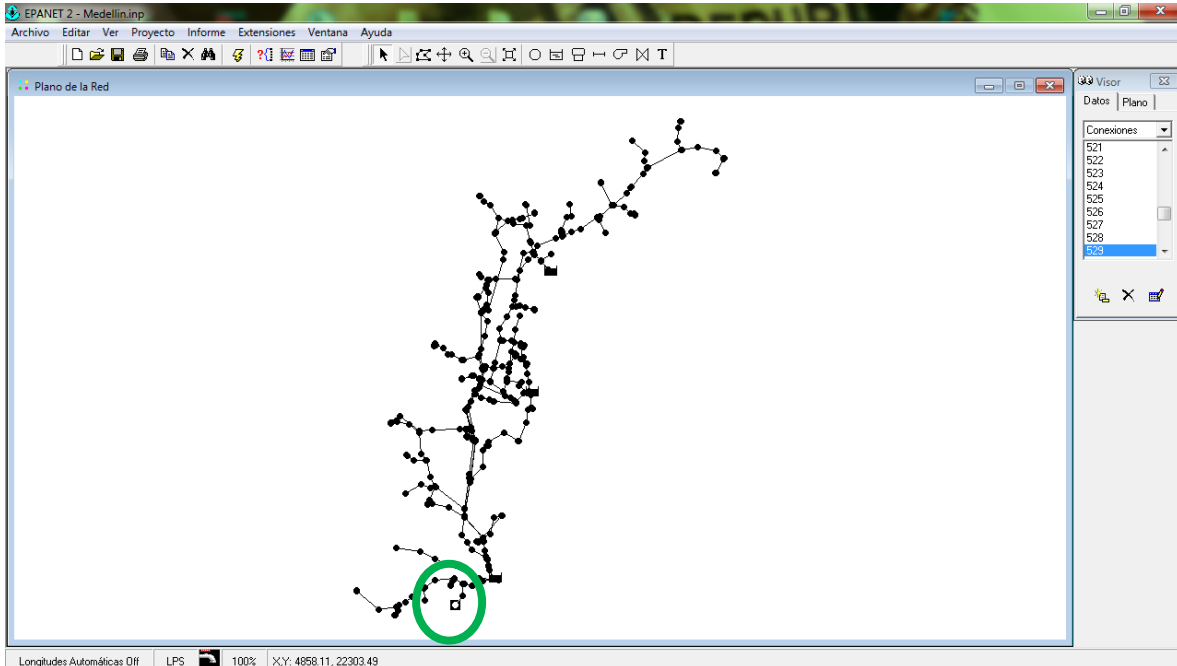


Ilustración 226 Emisor 529 red matriz de Medellín.

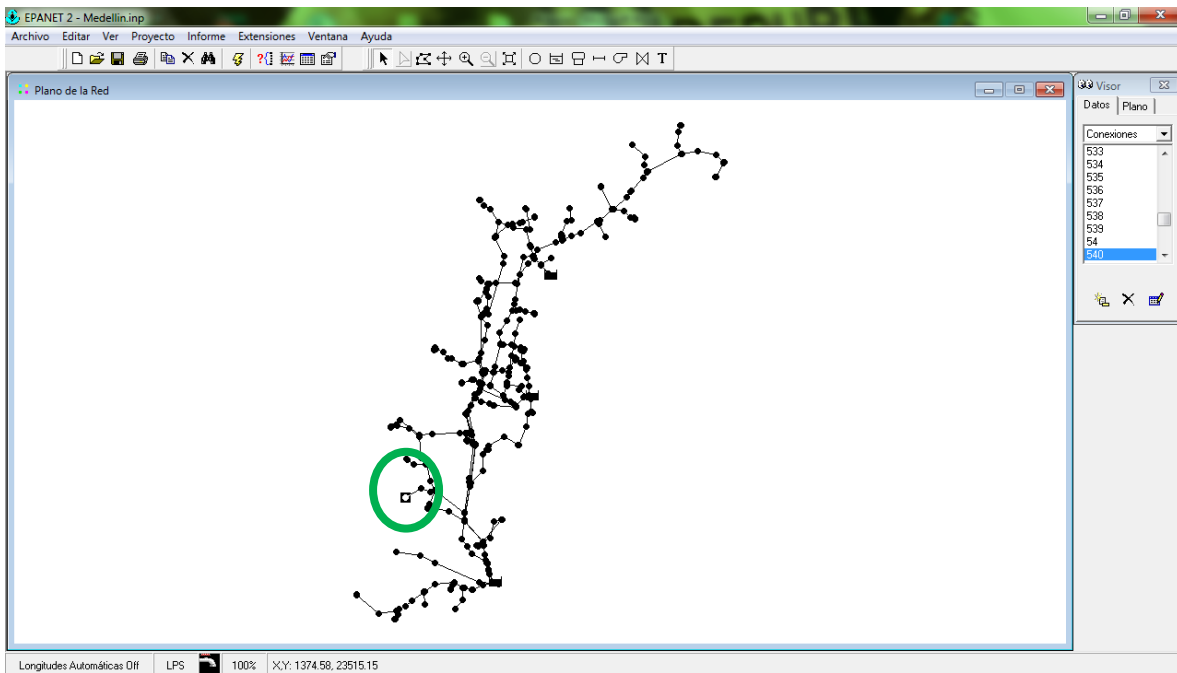


Ilustración 227 Emisor 540 red matriz de Medellín.



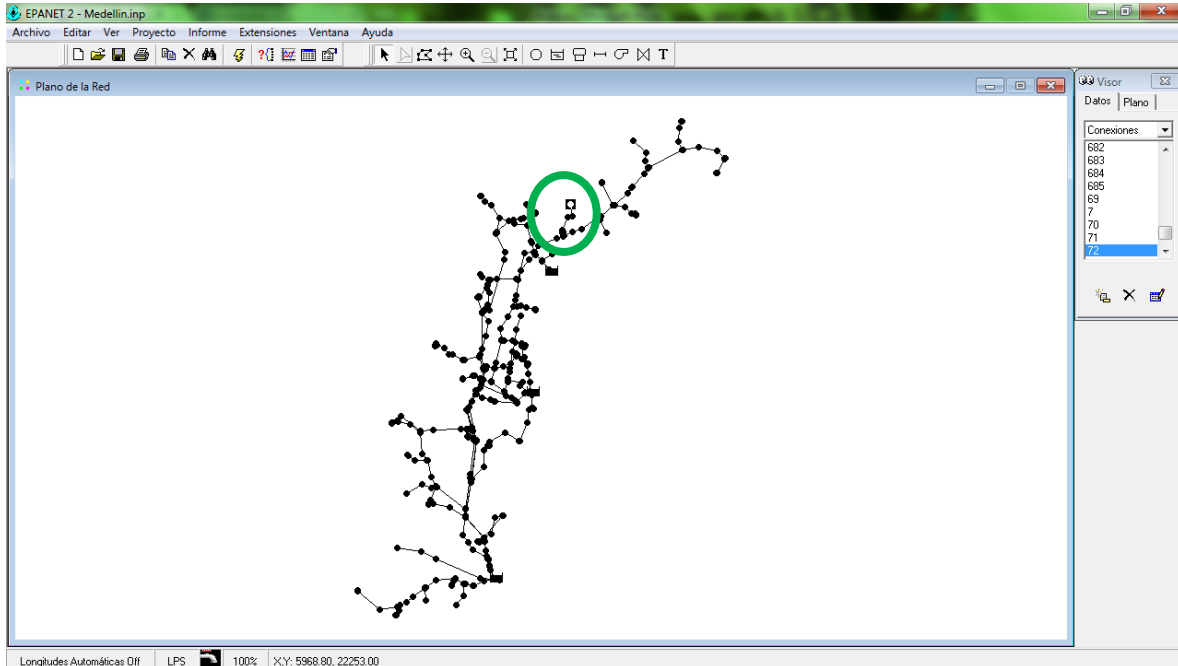


Ilustración 228 Emisor 72 red matriz de Medellín.

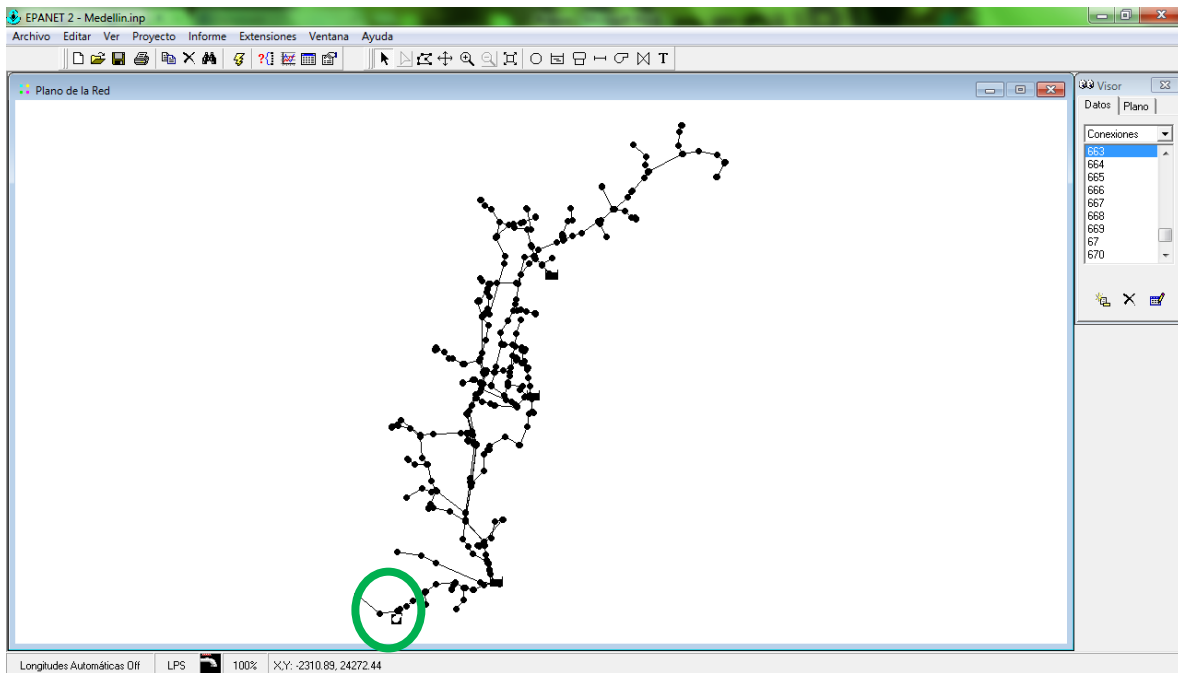


Ilustración 229 Emisor 663 red matriz de Medellín.

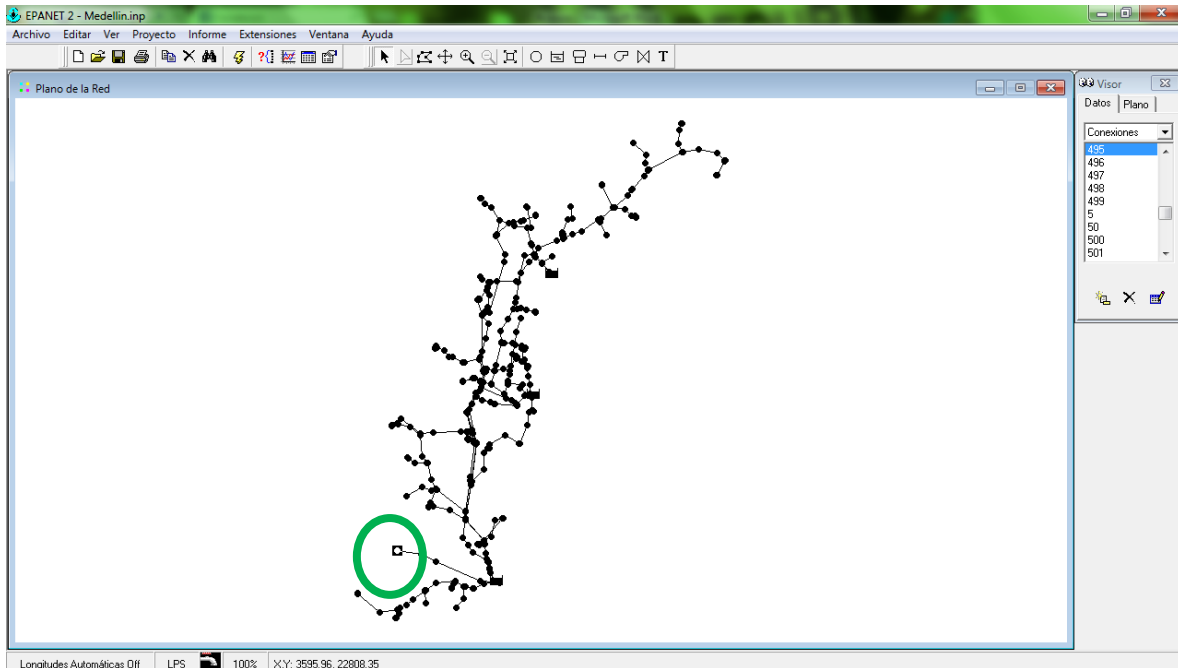


Ilustración 230 Emisor 495 red matriz de Medellín.

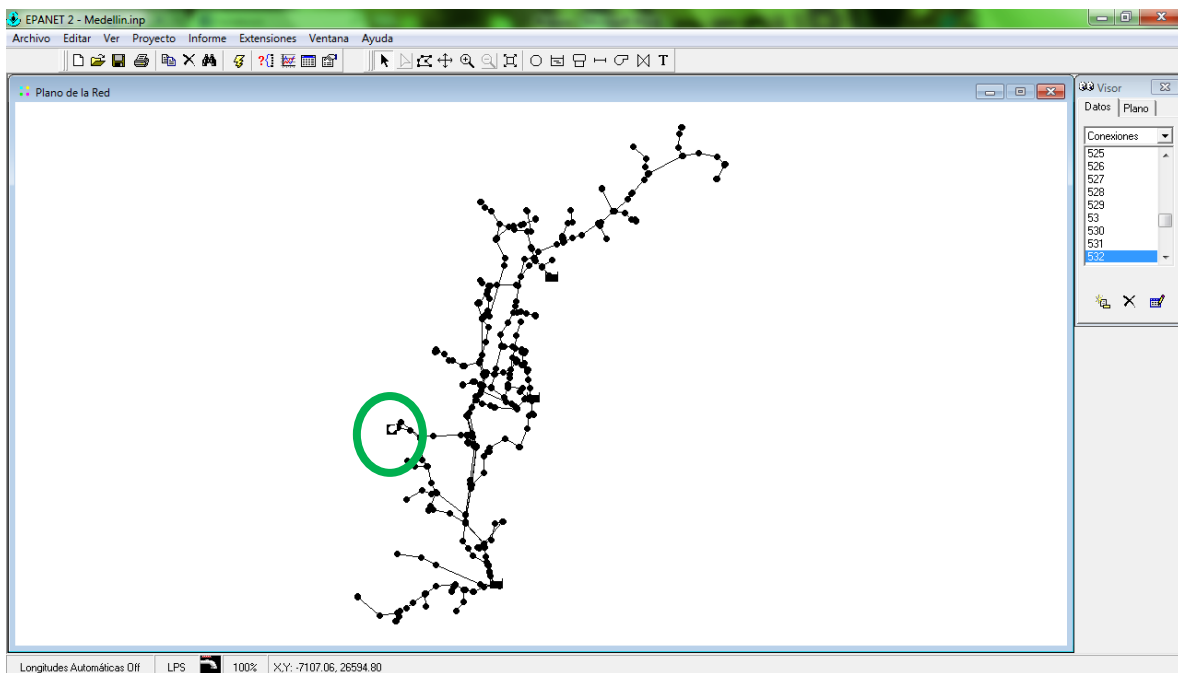


Ilustración 231 Emisor 532 red matriz de Medellín.

## RESULTADOS ADICIONALES

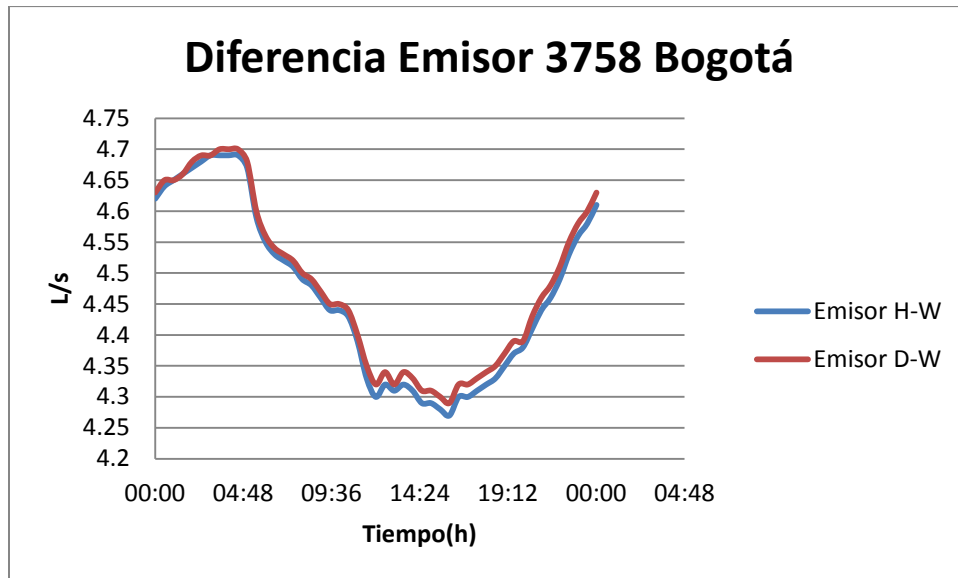


Ilustración 232 Emisor 3758.

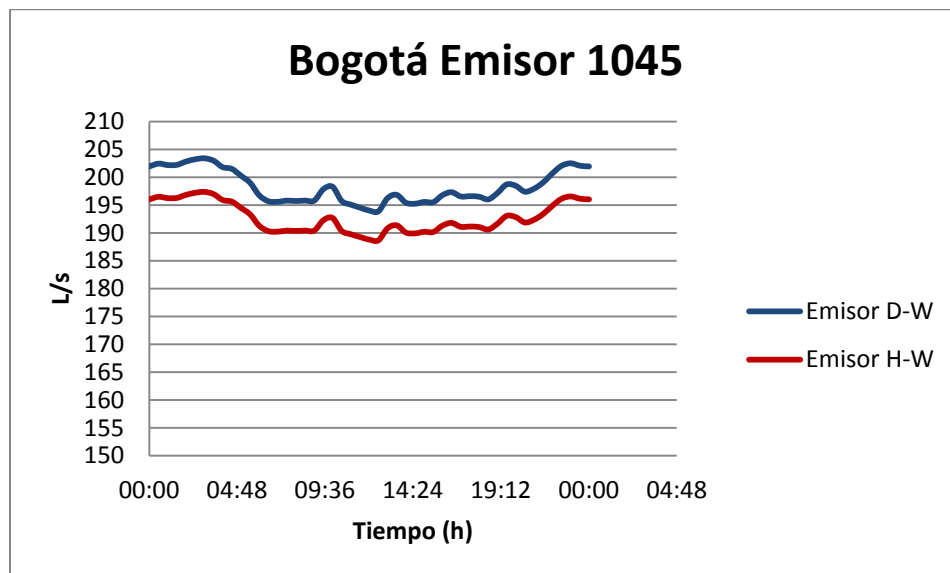


Ilustración 233 Emisor 1045.

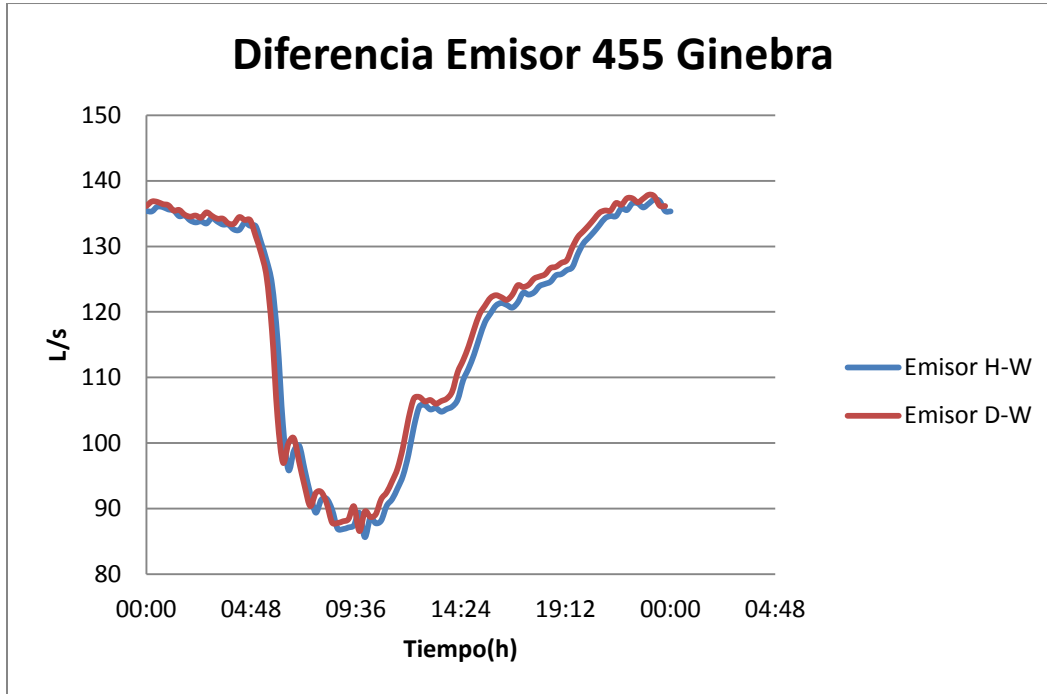


Ilustración 234 Emisor 455.

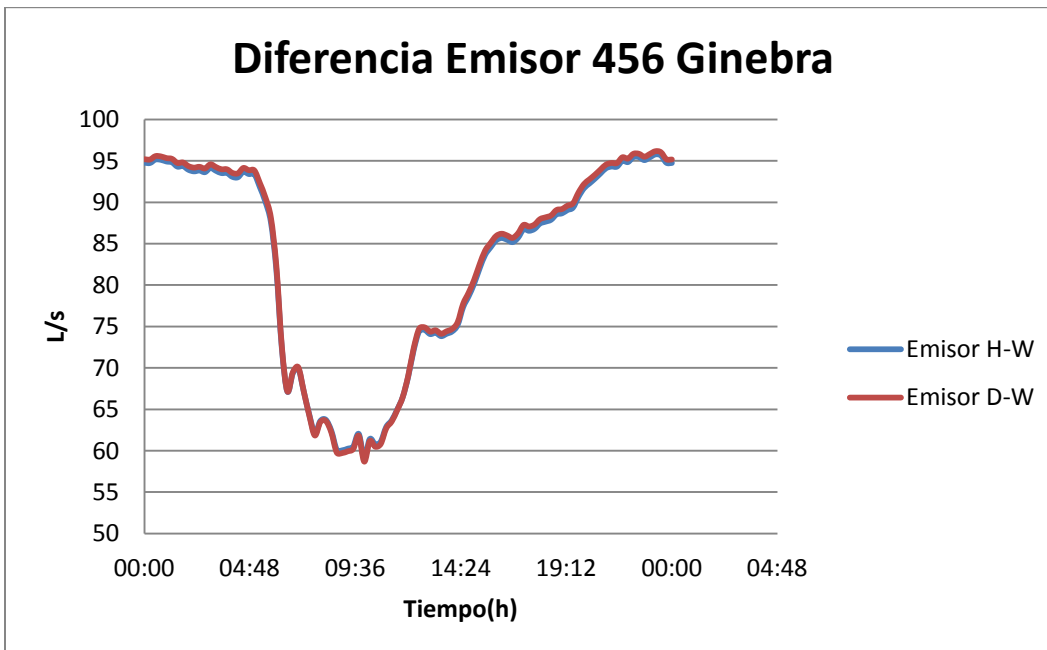


Ilustración 235 Emisor 456.

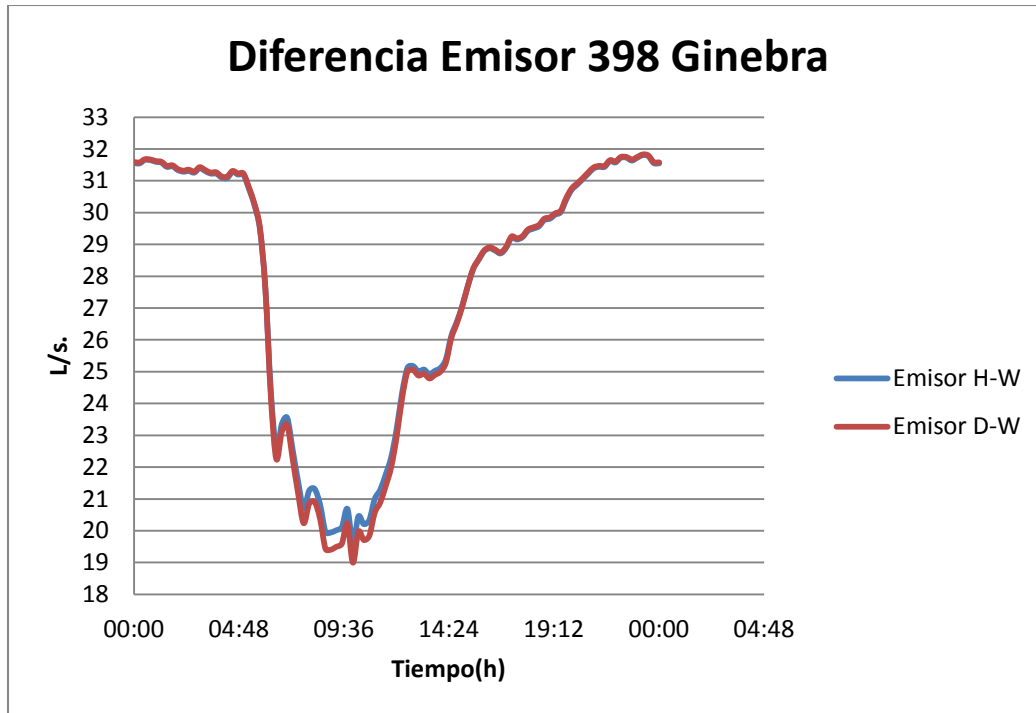


Ilustración 236 Emisor 398.

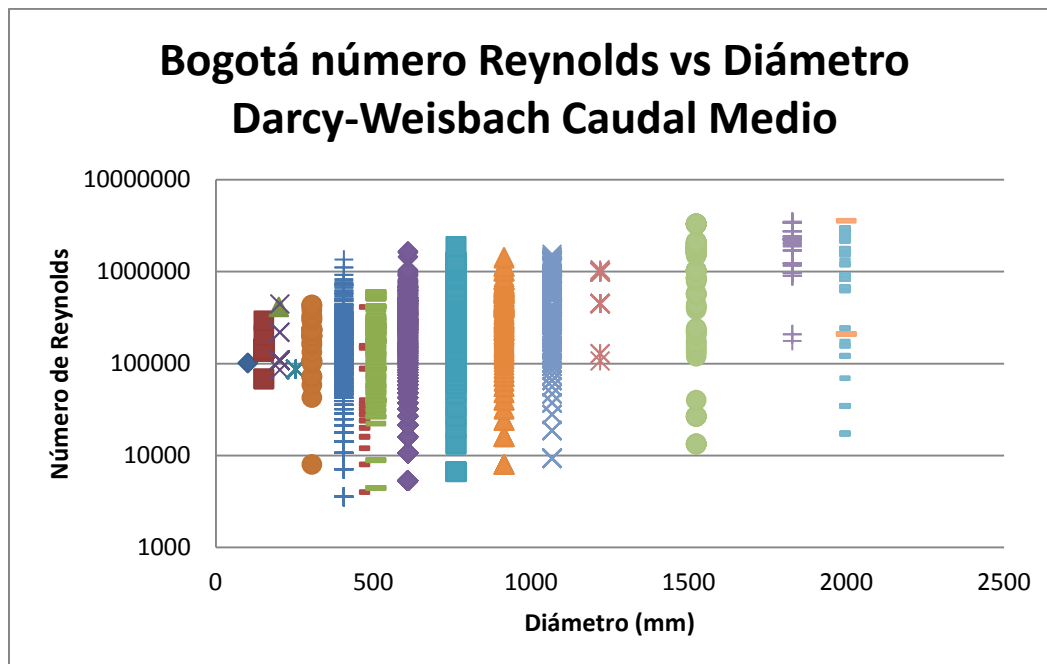


Ilustración 237 Reynolds vs Diámetro caudal medio Darcy-Weisbach.

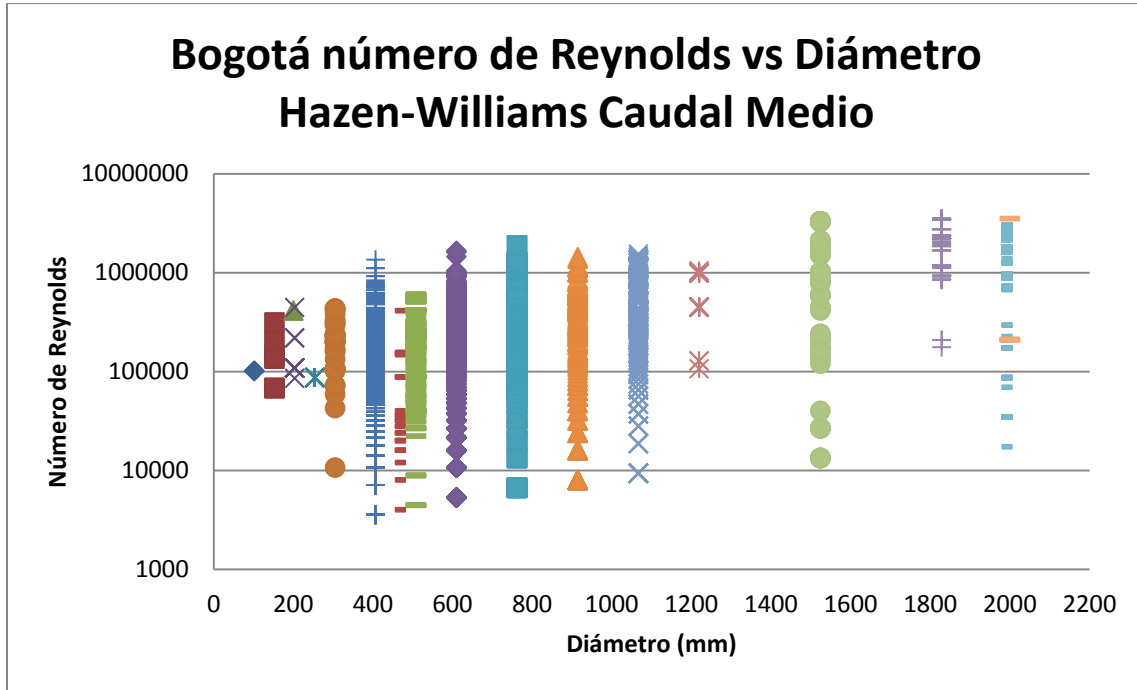


Ilustración 238 Reynolds vs Diámetro caudal medio Hazen-Williams.

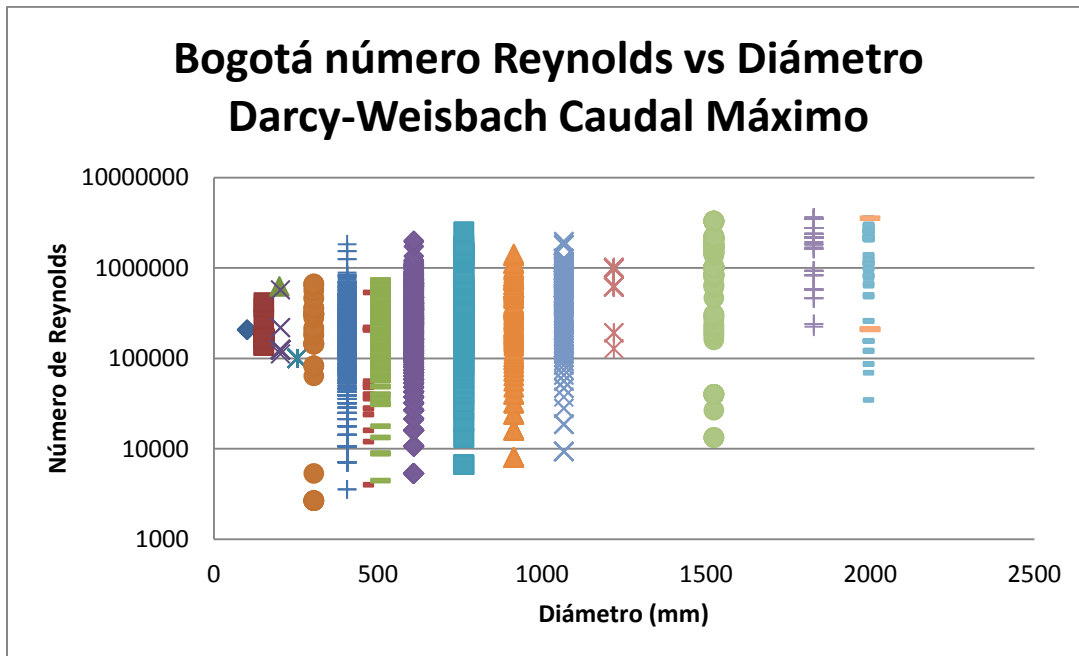


Ilustración 239 Reynolds vs Diámetro caudal Máximo Darcy-Weisbach.

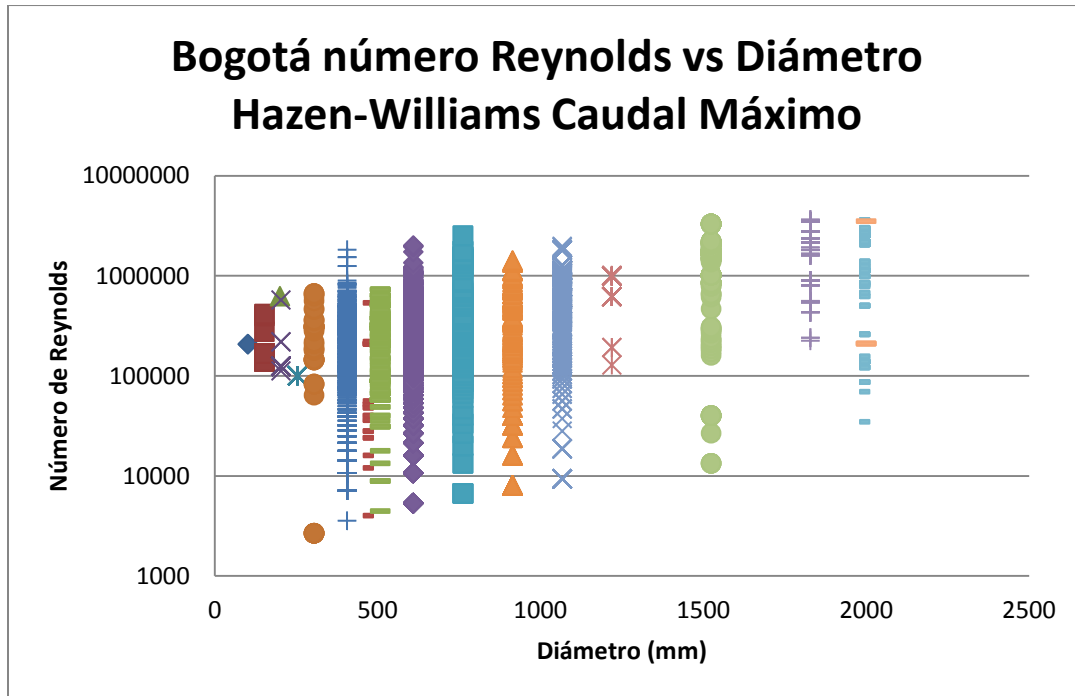


Ilustración 240 Reynolds vs Diámetro caudal máximo Hazen-Williams.

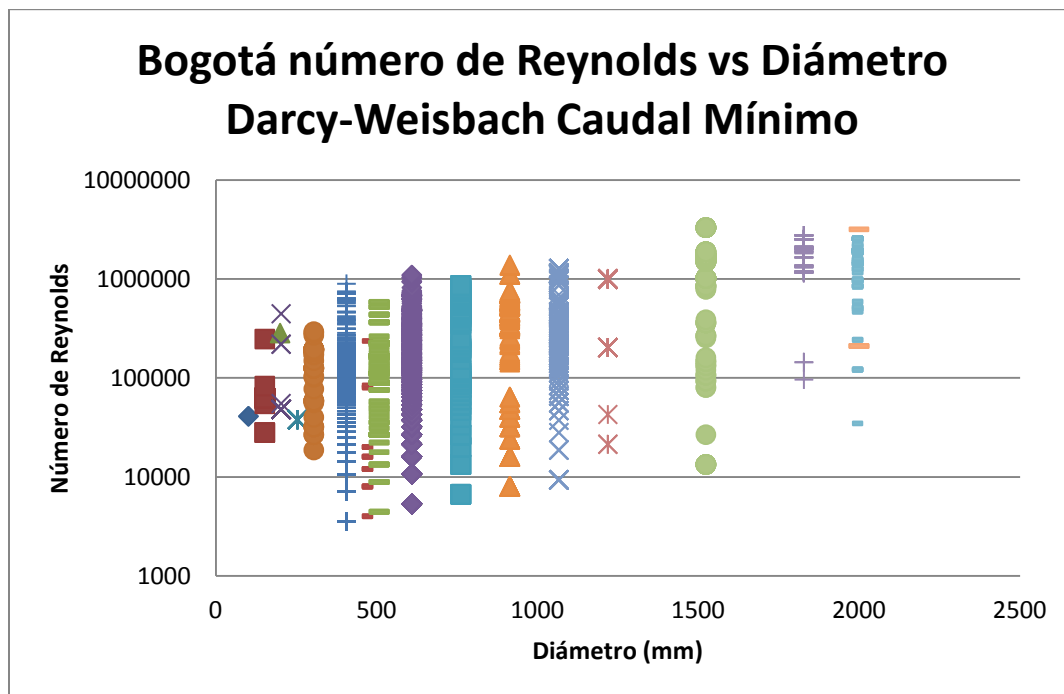


Ilustración 241 Reynolds vs Diámetro caudal mínimo Darcy-Weisbach.

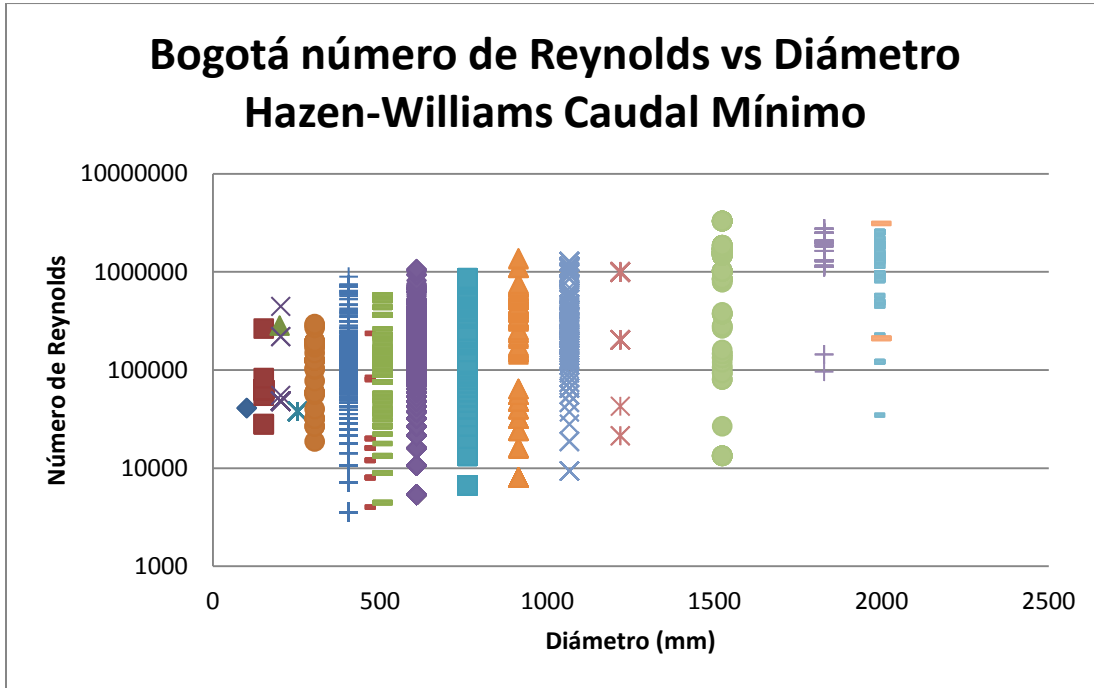


Ilustración 242 Reynolds vs Diámetro caudal mínimo Hazen-Williams.



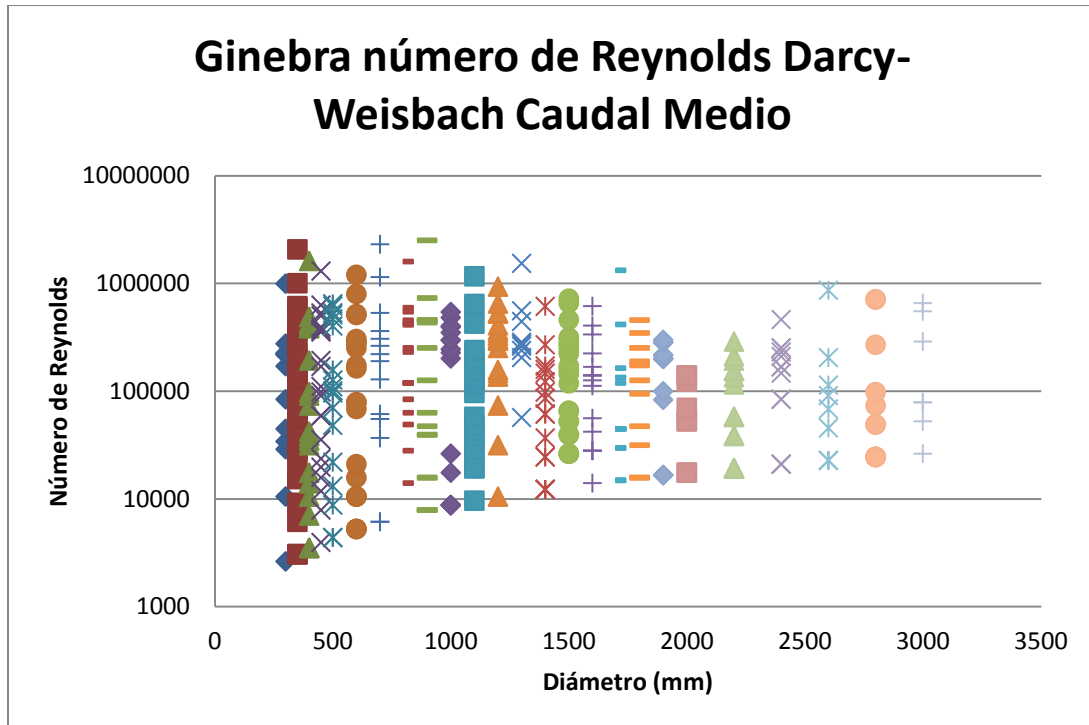


Ilustración 243 Reynolds vs Diámetro caudal Medio Darcy-Weisbach.

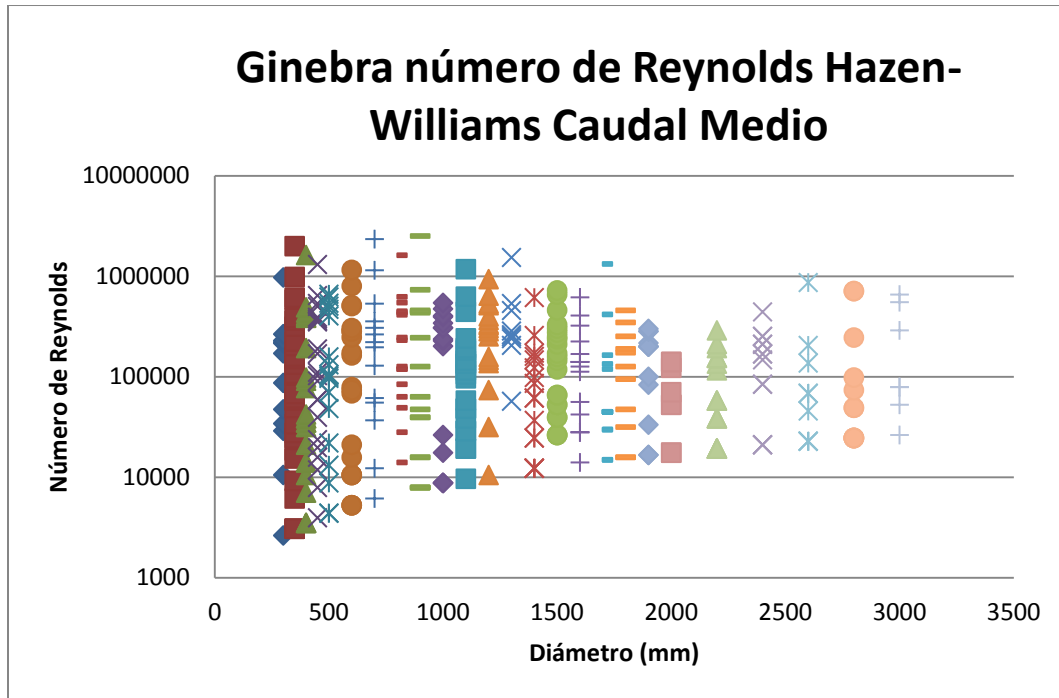


Ilustración 244 Reynolds vs Diámetro caudal medio Hazen-Williams.

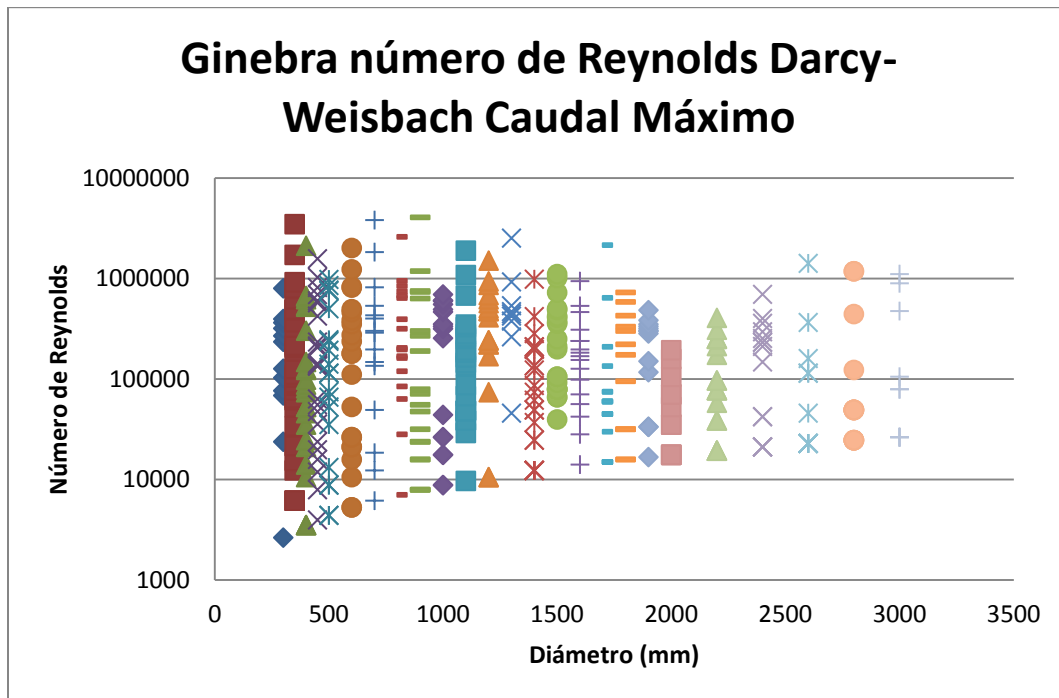


Ilustración 245 Reynolds vs Diámetro caudal Máximo Darcy-Weisbach.

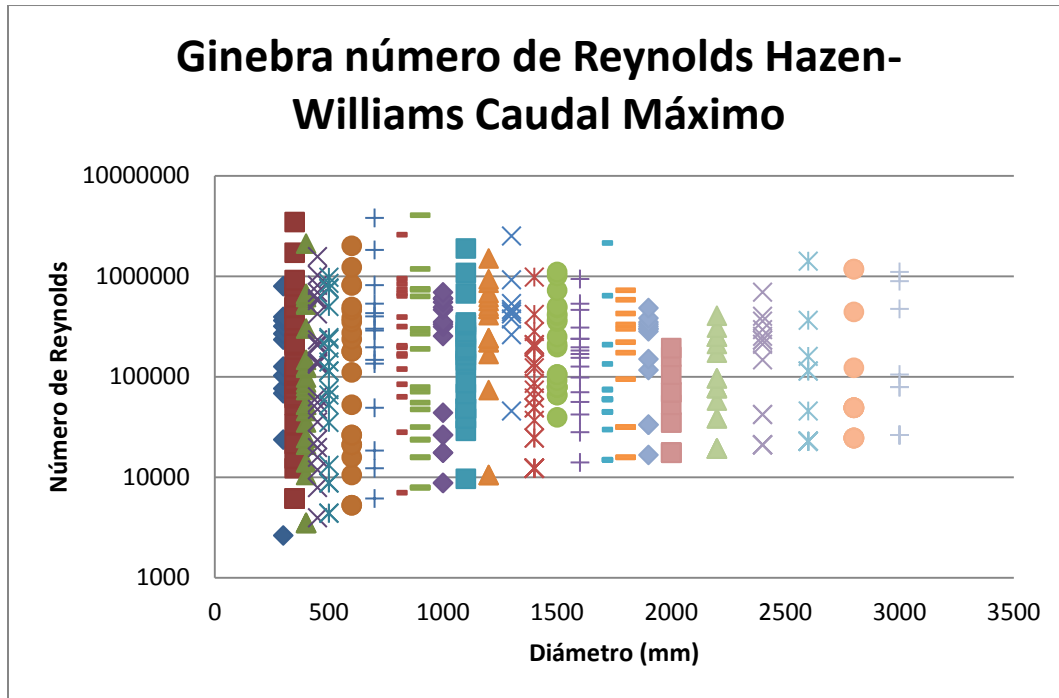


Ilustración 246 Reynolds vs Diámetro caudal Máximo Hazen-Williams.

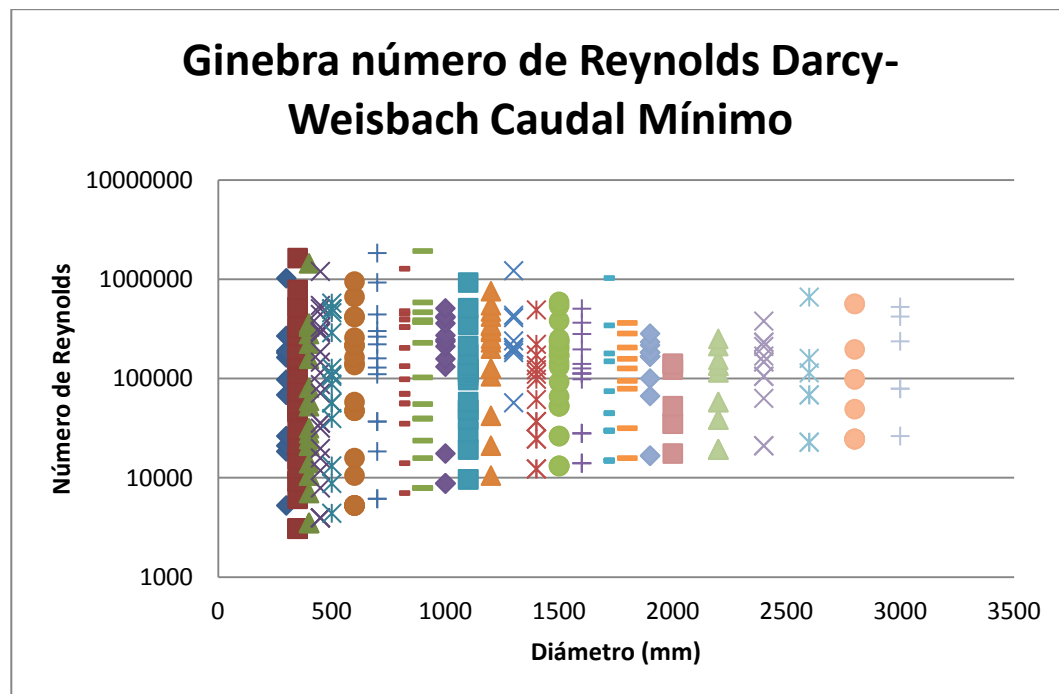


Ilustración 247 Reynolds vs Diámetro caudal Mínimo Darcy-Weisbach.

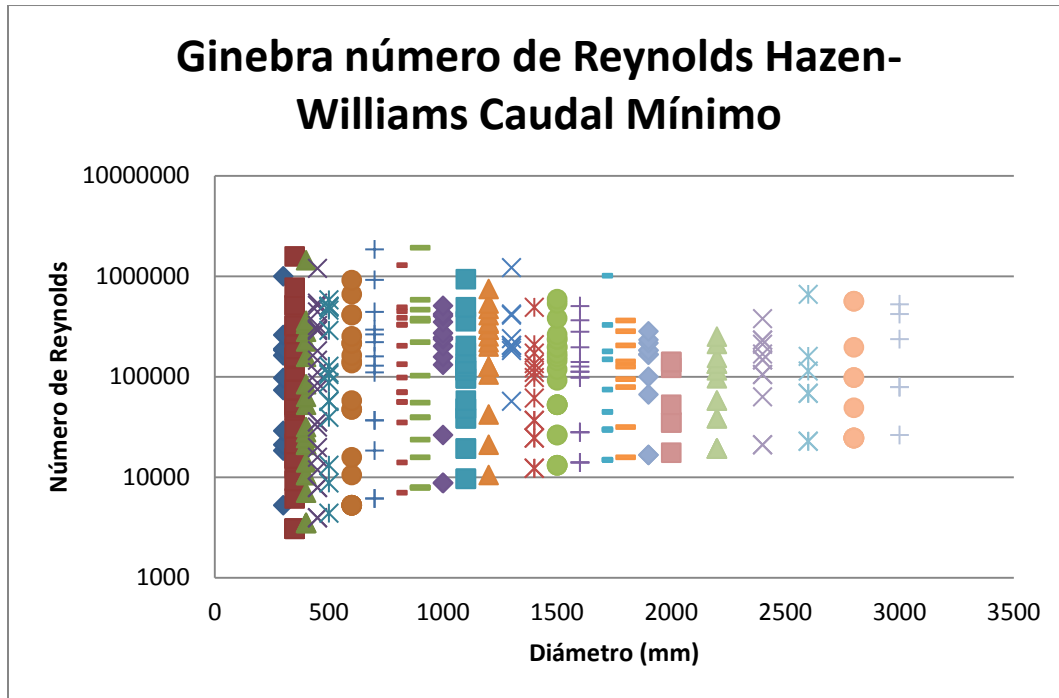


Ilustración 248 Reynolds vs Diámetro caudal Mínimo Hazen-Williams.

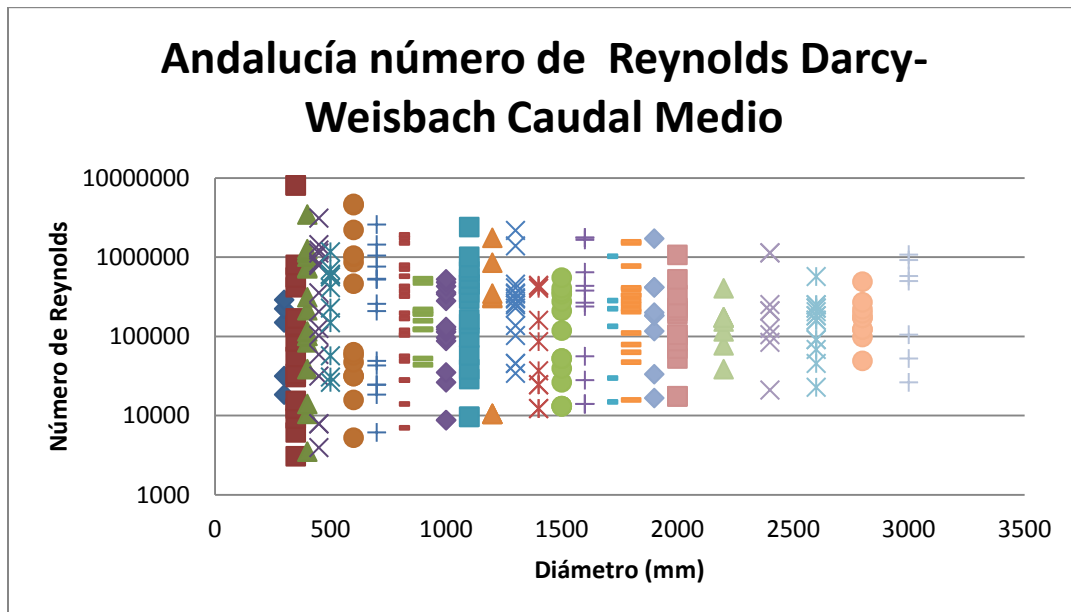


Ilustración 249 Reynolds vs Diámetro caudal Medio Darcy-Weisbach.

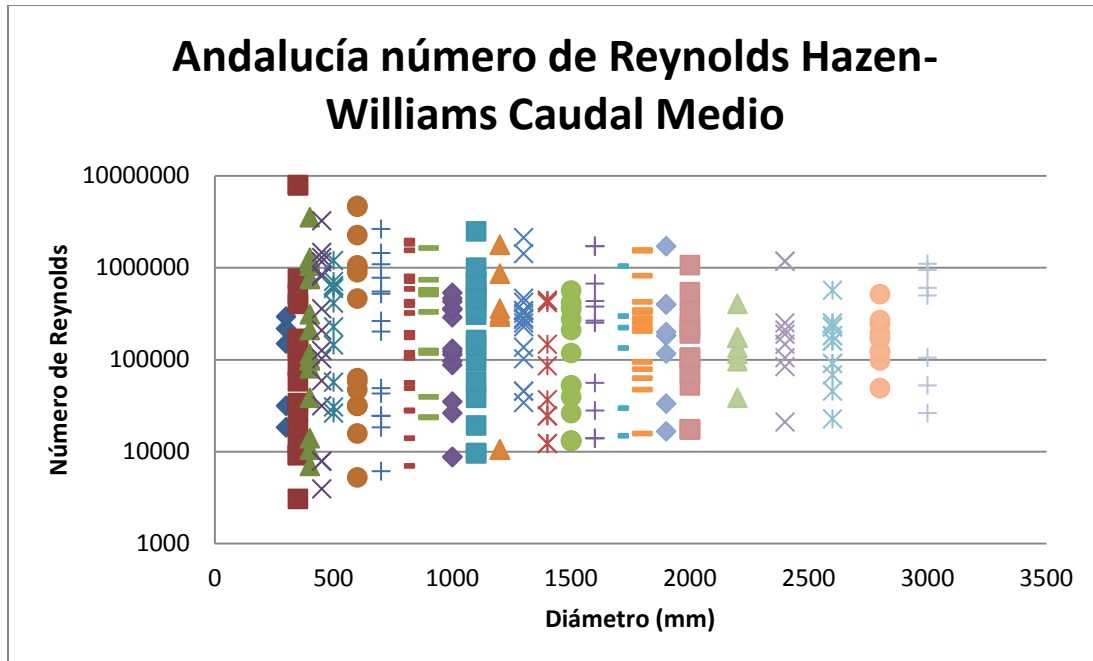


Ilustración 250 Reynolds vs Diámetro caudal Medio Hazen-Williams.

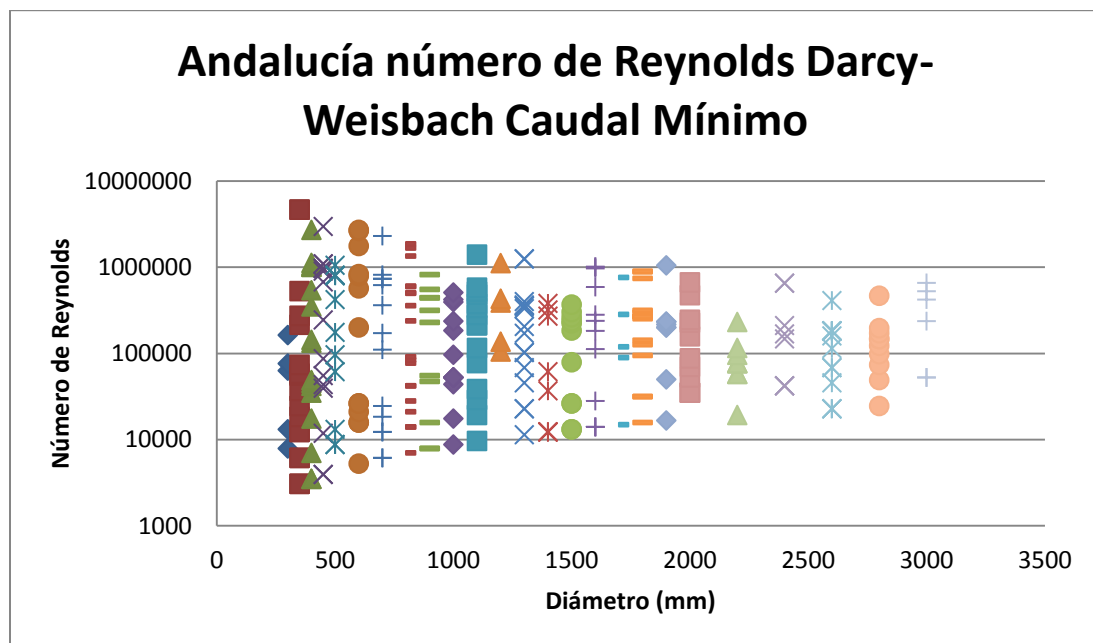


Ilustración 251 Reynolds vs Diámetro caudal Mínimo Darcy-Weisbach.

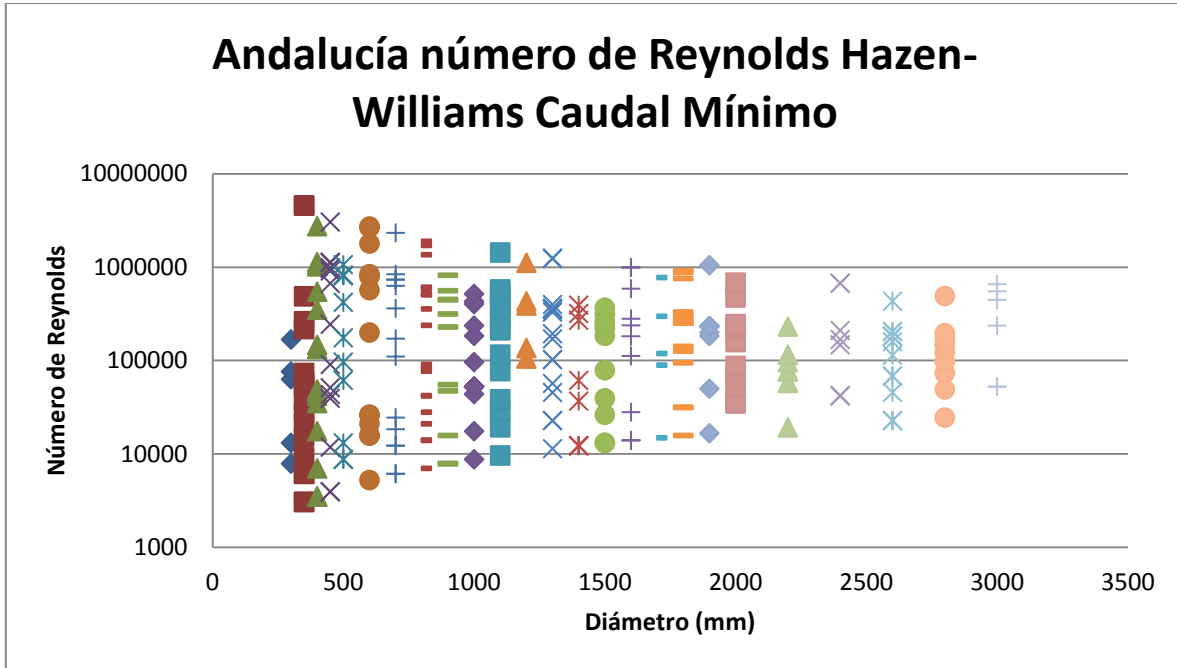


Ilustración 252 Reynolds vs Diámetro caudal mínimo Hazen-Williams.

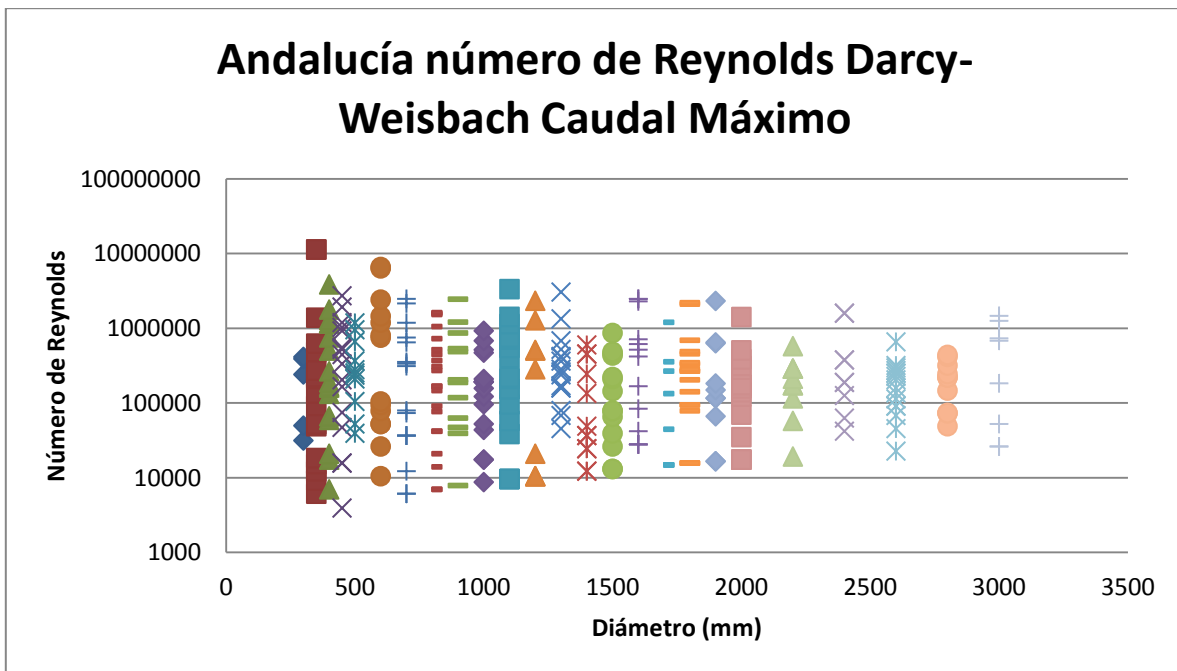


Ilustración 253 Reynolds vs Diámetro caudal Máximo Darcy-Weisbach

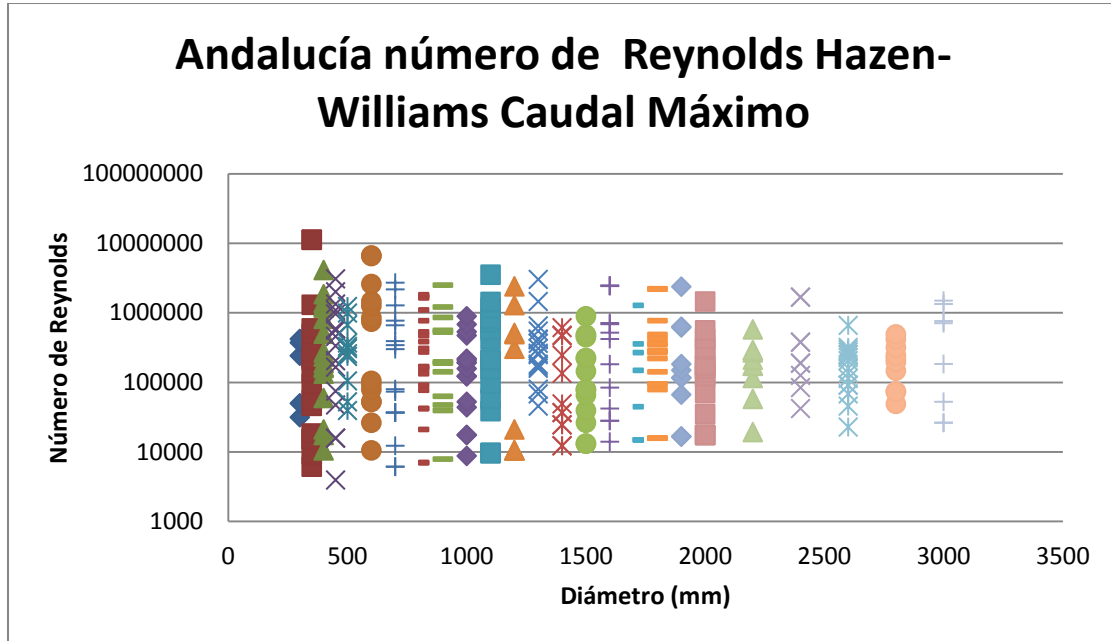


Ilustración 254 Reynolds vs Diámetro caudal máximo Hazen-Williams.

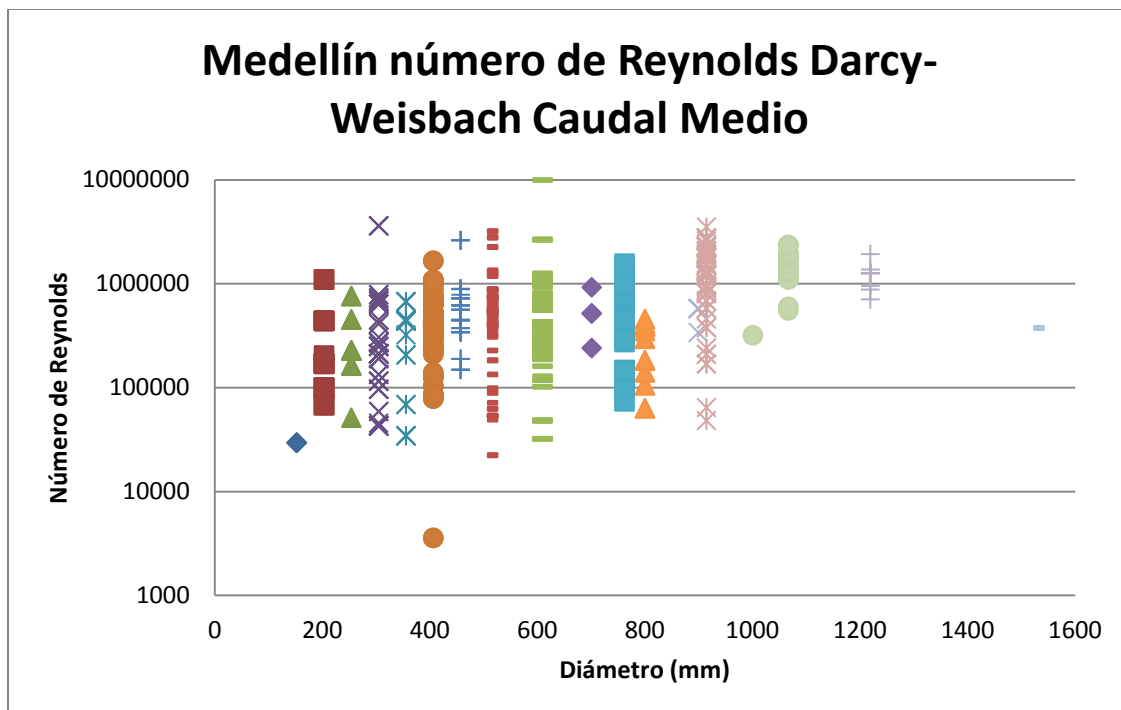


Ilustración 255 Reynolds vs Diámetro caudal Medio Darcy-Weisbach.

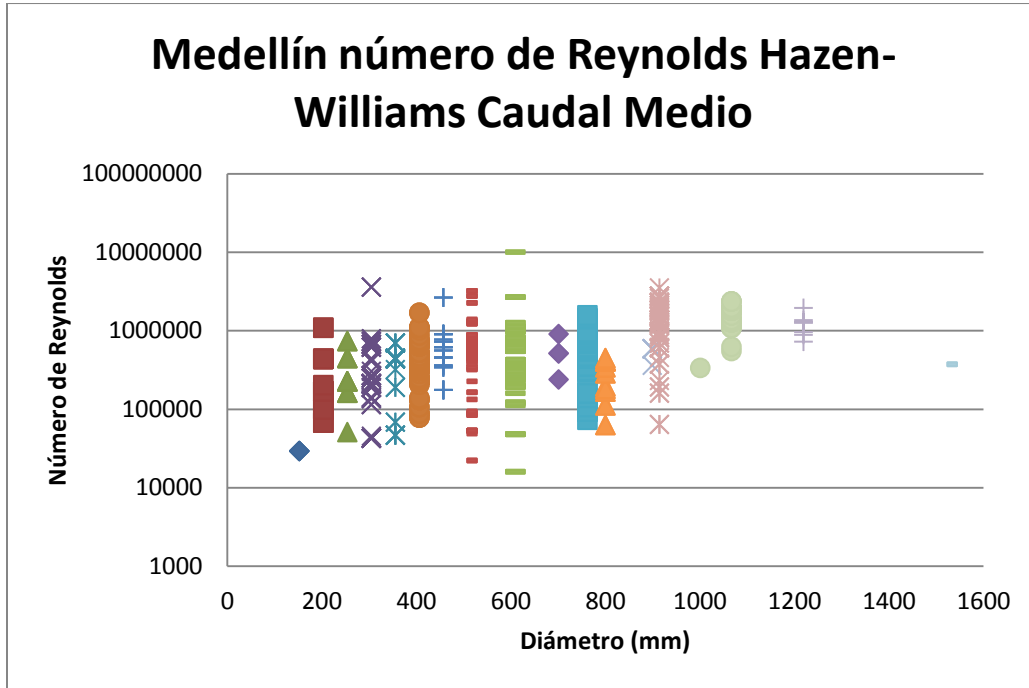


Ilustración 256 Reynolds vs Diámetro caudal medio Hazen-Williams.

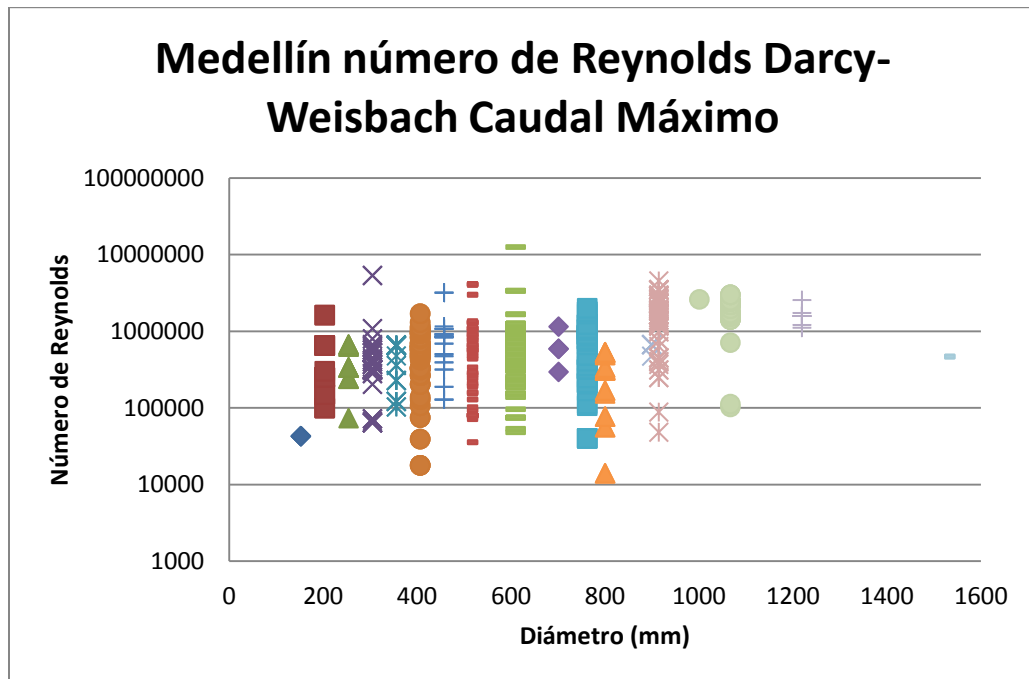


Ilustración 257 Reynolds vs Diámetro caudal Máximo Darcy-Weisbach.



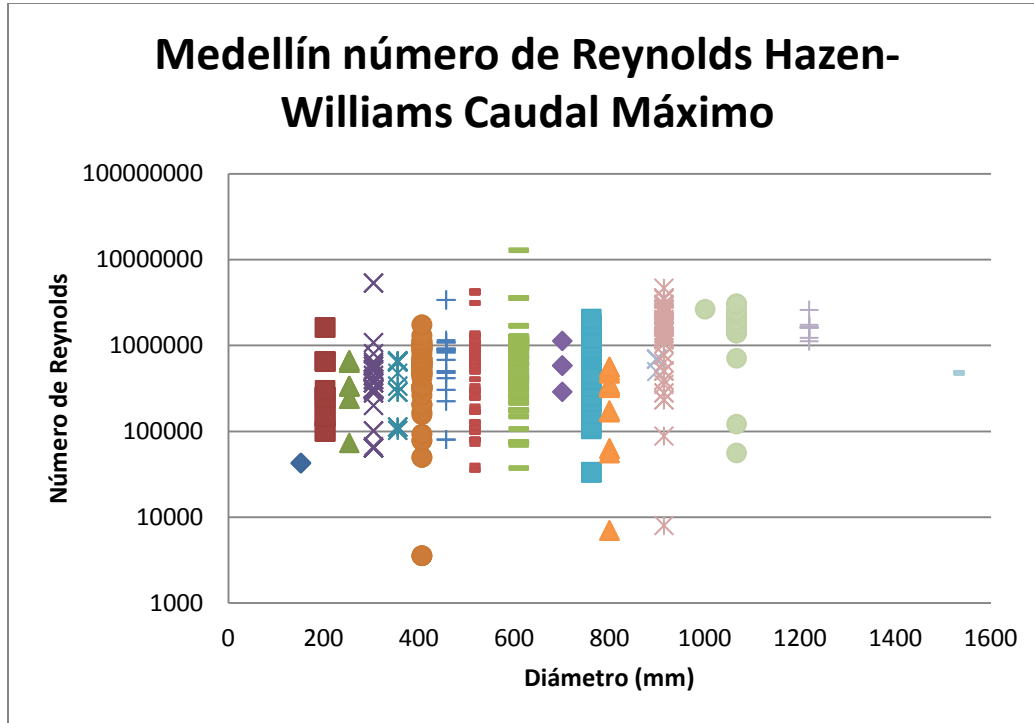


Ilustración 258 Reynolds vs Diámetro caudal máximo Hazen-Williams.

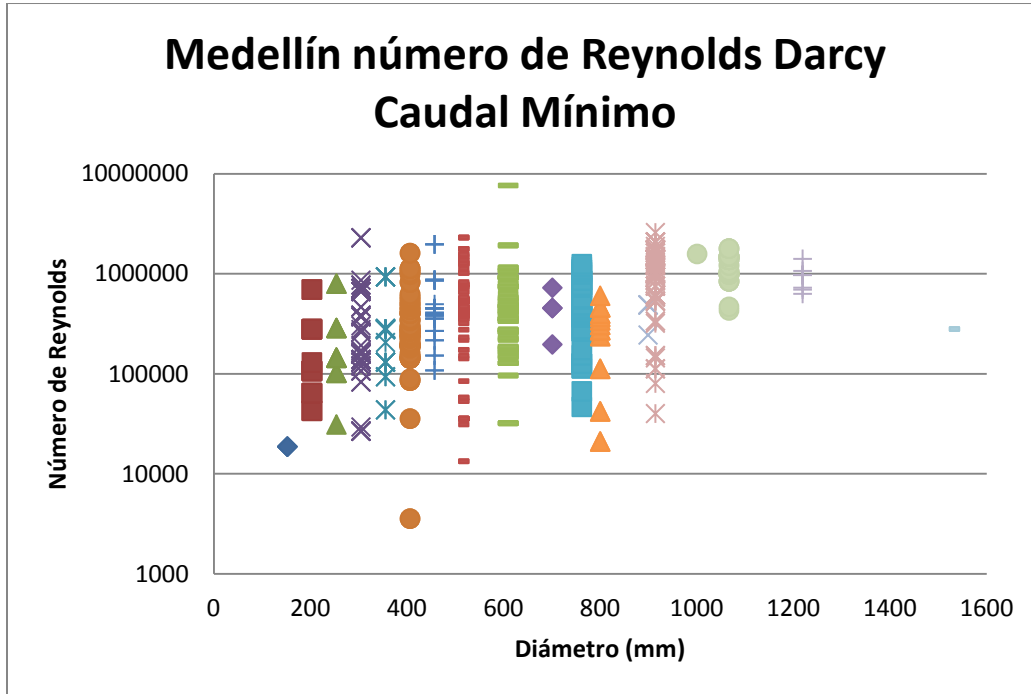


Ilustración 259 Reynolds vs Diámetro caudal Mínimo Darcy-Weisbach.

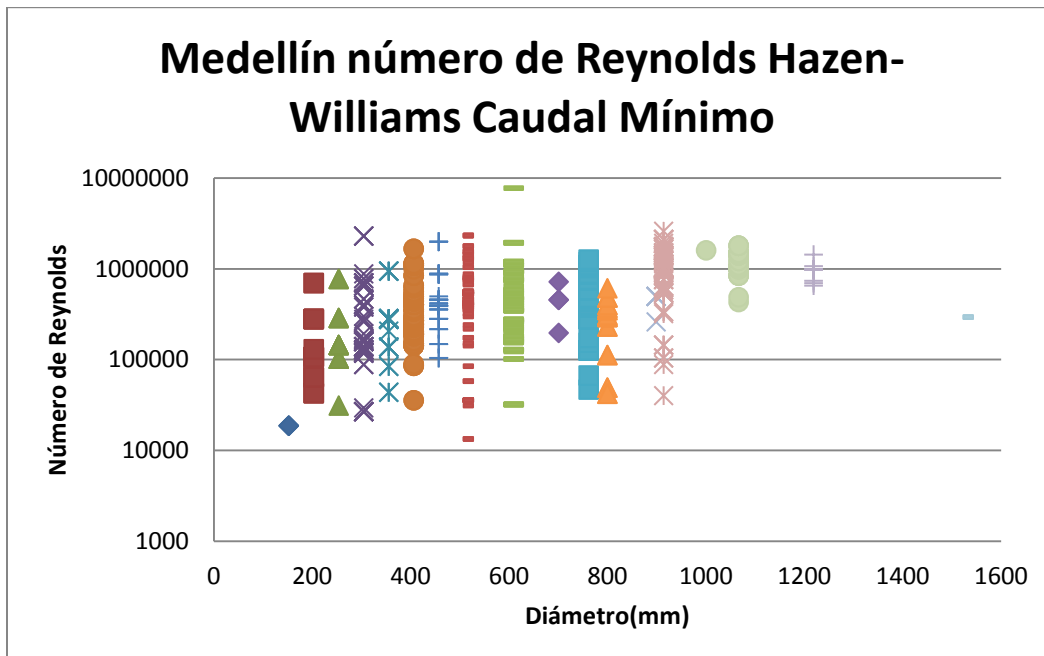


Ilustración 260 Reynolds vs Diámetro caudal mínimo Hazen-Williams.



Universidad de los Andes  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA  
*Estudio sobre el uso de la ecuación de Hazen-Williams vs la ecuación de Darcy-Weisbach en tuberías de gran diámetro (Sistemas Matrices) y en tuberías primarias de bombeo.*

---

