

Universidad de los Andes
Facultad De Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental



**TESIS DE ESPECIALIZACIÓN
INGENIERÍA DE SISTEMAS HÍDRICOS URBANOS**

**COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE REDES
EXTERNAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE VS.
METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE REDES INTERNAS PARA
EL CASO DE CAMPAMENTOS Y CIUDADELAS
TEMPORALES.**

Preparado por:
Ing. David Francisco Torrado Lemus

Asesor:
Ing. Juan Saldarriaga

Informe Final de Tesis

Bogotá, Febrero de 2012

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....	2
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 OBJETIVOS	2
2 ESTADO DEL ARTE	4
2.1 PRESIONES MÍNIMAS REQUERIDAS PARA REDES INTERNAS Y EXTERNAS	4
2.2 METODOS DE ESTIMACIÓN DE DEMANDA PARA REDES INTERNAS	5
2.3 COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE DEMANDA PARA REDES INTERNAS	19
2.4 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE DEMANDA PARA RDAP.....	19
2.5 COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE REDES PARA CAMPAMENTOS Y CIUDADELAS TEMPORALES	21
2.6 CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDRÁULICA DE TUBERÍAS.....	22
3 METODOLOGÍA.....	25
3.1 SELECCIÓN DE METODOLOGÍAS DE DISEÑO A COMPARAR.....	25
3.2 IMPLEMENTACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS SELECCIONADAS	26
3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS REDES DE EJEMPLO	33
3.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	38
4 RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS SELECCIONADAS	39
4.1 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO HUNTER MODIFICADO	39
4.2 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA MÉTODOGÍA DE DISEÑO DE REDES EXTERNAS.....	44
4.3 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA RIDAPS	51
5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
5.1 COMPARACIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA.....	56
5.2 COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES CALCULADAS	58
5.3 COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS REDES OBTENIDAS	65
5.4 COMPARACIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	69
6 CONCLUSIONES	71
7 RECOMENDACIONES	73
8 BIBLIOGRAFÍA	74
ANEXO A.....	76
ANEXO B.....	77
ANEXO C.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CURVA DE ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA. MÉTODO HUNTER.	13
FIGURA 2. CURVA DE ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA. MÉTODO HUNTER MODIFICADO PARA COLOMBIA.	14
FIGURA 3. ENCABEZADO DE LA HOJA ELECTRÓNICA PARA EJECUCIÓN DEL MÉTODO HUNTER MODIFICADO.	28
FIGURA 4. CURVA DE COSTOS EMPLEADA.	31
FIGURA 5. VISUALIZACIÓN DE LA PANTALLA DE ACCESO A LOS PROCEDIMIENTOS DEL PROGRAMA RIDAPS.	32
FIGURA 6. ESQUEMA GENERAL RED 1.	35
FIGURA 7. ESQUEMA GENERAL RED 1.	37
FIGURA 8. RESULTADOS MÉTODO HUNTER MODIFICADO PARA LA RED 1.	40
FIGURA 9. RESULTADOS MÉTODO HUNTER MODIFICADO PARA LA RED 2.	43
FIGURA 10. RESULTADOS METODOLOGÍA DE DISEÑO DE REDES EXTERNAS PARA LA RED 1 (DEMANDAS Y DIÁMETROS).	45
FIGURA 11. RESULTADOS METODOLOGÍA DE DISEÑO DE REDES EXTERNAS PARA LA RED 1 (PRESIONES Y DIÁMETROS).	46
FIGURA 12. RESULTADOS METODOLOGÍA DE DISEÑO DE REDES EXTERNAS PARA LA RED 2 (DEMANDAS Y DIÁMETROS).	48
FIGURA 13. RESULTADOS METODOLOGÍA DE DISEÑO DE REDES EXTERNAS PARA LA RED 2 (PRESIONES Y DIÁMETROS).	49
FIGURA 14. RESULTADOS RIDAPS PARA LA RED 1.	52
FIGURA 15. RESULTADOS RIDAPS PARA LA RED 2.	54
FIGURA 16. COMPARACIÓN DE LAS DEMANDAS EN LOS NODOS DE CONSUMO DE LA RED 1.	56
FIGURA 17. COMPARACIÓN DE LAS DEMANDAS EN LOS NODOS DE CONSUMO DE LA RED 2.	57
FIGURA 18. COMPARACIÓN DE LONGITUDES OBTENIDAS POR CADA DIÁMETRO DE TUBERÍA PARA LA RED 1.	59
FIGURA 19. COMPARACIÓN DE LONGITUDES OBTENIDAS POR CADA DIÁMETRO DE TUBERÍA PARA LA RED 2.	59
FIGURA 20. COMPARACIÓN DE COSTOS PARA LAS TRES METODOLOGÍAS Y LAS DOS REDES DE EJEMPLO.	60
FIGURA 21. COMPARACIÓN DE DIÁMETROS TUBO A TUBO PARA LA RED 1.	61
FIGURA 22. COMPARACIÓN DE DIÁMETROS PARA LA RED 1 (ORGANIZADOS POR RESULTADOS DE HUNTER).	62
FIGURA 23. COMPARACIÓN DE DIÁMETROS TUBO A TUBO PARA LA RED 2.	63
FIGURA 24. COMPARACIÓN DE DIÁMETROS PARA LA RED 2 (ORGANIZADOS POR RESULTADOS DE HUNTER).	64
FIGURA 25. RESULTADOS ESCENARIO1 – RED 1.	66
FIGURA 26. RESULTADOS ESCENARIO2 – RED 1.	66
FIGURA 27. RESULTADOS ESCENARIO1 – RED 2.	68
FIGURA 28. RESULTADOS ESCENARIO 2 – RED 2.	68
FIGURA 29. ESCENARIO1 – RED 1 CALCULADA MEDIANTE EL MÉTODO HUNTER MODIFICADO.	78
FIGURA 30. ESCENARIO1 – RED 1 CALCULADA MEDIANTE EL MÉTODO DE DISEÑO DE REDES EXTERNAS.	79
FIGURA 31. ESCENARIO1 – RED 1 CALCULADA MEDIANTE RIDAPS.	80
FIGURA 32. ESCENARIO 2 – RED 1 CALCULADA MEDIANTE EL MÉTODO HUNTER MODIFICADO.	81
FIGURA 33. ESCENARIO 2 – RED 1 CALCULADA MEDIANTE EL MÉTODO DE DISEÑO DE REDES EXTERNAS.	82
FIGURA 34. ESCENARIO 2 – RED 1 CALCULADA MEDIANTE RIDAPS.	83
FIGURA 35. ESCENARIO1 – RED 2 CALCULADA MEDIANTE EL MÉTODO DE HUNTER MODIFICADO.	85



FIGURA 36. ESCENARIO1 – RED 2 CALCULADA MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE REDES EXTERNAS	86
FIGURA 37. ESCENARIO1 – RED 2 CALCULADA MEDIANTE RIDAPS.	87
FIGURA 38. ESCENARIO 2 – RED 2 CALCULADA MEDIANTE EL MÉTODO DE HUNTER MODIFICADO.	88
FIGURA 39. ESCENARIO 2 – RED 2 CALCULADA MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE REDES EXTERNAS.....	89
FIGURA 40. ESCENARIO 2 – RED 2 CALCULADA MEDIANTE RIDAPS.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PRESIÓN MÍNIMA EN LA RDAP PARA COLOMBIA.	4
TABLA 2. PRESIÓN MÍNIMA DE ABASTECIMIENTO PARA REDES INTERNAS EN COLOMBIA.	5
TABLA 3. CAUDALES MÍNIMOS DE ABASTECIMIENTO PARA REDES INTERNAS EN COLOMBIA.	6
TABLA 4. CAUDAL MÁXIMO POSIBLE (MÉTODO BRITÁNICO).	7
TABLA 5. CAUDAL MÁXIMO PROBABLE (MÉTODO DAWSON Y BOWMAN).	8
TABLA 6. COEFICIENTES A,B Y C (MÉTODO DE LA NORMA ESPAÑOLA).	11
TABLA 7. UNIDADES DE CONSUMO PARA DIFERENTES APARATOS. MÉTODO HUNTER MODIFICADO PARA COLOMBIA.	15
TABLA 8. DOTACIÓN NETA SEGÚN EL NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA.	20
TABLA 9. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA PARA COLOMBIA (RAS 2000).	20
TABLA 10. COEFICIENTES K_1 Y K_2	21
TABLA 11. DIÁMETROS NOMINALES E INTERNOS REALIZADOS PARA LOS CÁLCULOS (PVC).	27
TABLA 12. DOTACIONES POR USO PARA CAMPAMENTOS Y CIUDADELAS TEMPORALES.	30
TABLA 13. TÉRMINOS DE LA FUNCIÓN PATRÓN DE CONSUMO.	32
TABLA 14. CARACTERÍSTICAS RED 1.	34
TABLA 15. CARACTERÍSTICAS RED 2.	36
TABLA 16. RESUMEN RESULTADOS MÉTODO HUNTER MODIFICADO PARA LA RED 1.	41
TABLA 17. RESUMEN RESULTADOS MÉTODO HUNTER MODIFICADO PARA LA RED 2.	42
TABLA 18. RESUMEN RESULTADOS METODOLOGÍA DE DISEÑO DE REDES EXTERNAS PARA LA RED 1.	47
TABLA 19. RESUMEN RESULTADOS MÉTODO HUNTER MODIFICADO PARA LA RED 2.	50
TABLA 20. RESUMEN RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE RIDAPS PARA LA RED 1.	53
TABLA 21. RESUMEN RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE RIDAPS PARA LA RED 2.	55

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. MÉTODO ALEMÁN DE LA RAÍZ CUADRADA.....	9
ECUACIÓN 2. CAUDAL MÉTODO DE LA NORMA FRANCESA.	9
ECUACIÓN 3. K MÉTODO DE LA NORMA FRANCESA.	9
ECUACIÓN 4. K MÉTODO RACIONAL.	10
ECUACIÓN 5. K MÉTODO DEL FACTOR DE SIMULTANEIDAD, PARA INSTALACIONES CLASE I.....	10
ECUACIÓN 6. K MÉTODO DEL FACTOR DE SIMULTANEIDAD, PARA INSTALACIONES CLASE II.	10
ECUACIÓN 7. MÉTODO DE LA NORMA ESPAÑOLA.	10
ECUACIÓN 8. PROBABILIDAD DE FUNCIONAMIENTO DE APARATOS EN EL TIEMPO (MÉTODO HUNTER),	12
ECUACIÓN 9. CONDICIÓN QUE SE DEBE SATISFACER DE ACUERDO CONL MÉTODO HUNTER.	12
ECUACIÓN 10. MÉTODO PROBABILÍSTICO GENERAL.....	15
ECUACIÓN 11. FDP PARA LA DURACIÓN DE LOS PULSOS.	17
ECUACIÓN 12. FDP PARA LA INTENSIDAD DE LOS PULSOS.	17
ECUACIÓN 13. FDP PARA LA APARICIÓN DE LOS PULSOS.	17
ECUACIÓN 14. FUNCIÓN QUE DESCRIBE EL COMPORTAMIENTO DEL CONSUMO.	17
ECUACIÓN 15. DOTACIÓN BRUTA.	20
ECUACIÓN 16. CONSERVACIÓN DE LA MASA EN UN CONDUCTO.....	22
ECUACIÓN 17. PRINCIPIO DE BERNOULLI.....	23
ECUACIÓN 18. ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS MENORES	23
ECUACIÓN 19. ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR FRICCIÓN	23
ECUACIÓN 20. ECUACIÓN DE COLEBROOK-WHITE	24

INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución de agua potable en campamentos y ciudades temporales tienen características tanto de redes externas municipales como de redes internas, razón por la cual, no es clara la metodología que se debe seguir para realizar su diseño. En el presente trabajo, se pretende realizar una evaluación de las metodologías disponibles que permita establecer las características de las redes calculadas mediante la implementación de las mismas, para de esta forma determinar cual es la que mejor se ajusta a las necesidades propias de este tipo de instalaciones.

El documento se divide en cuatro grandes partes, en la primera se realiza un análisis del estado del arte, centrado en la descripción de las diversas metodologías disponibles para realizar el diseño de redes tanto externas como internas. En la segunda parte se presenta la metodología que se siguió para realizar la comparación objeto del estudio. En la tercera parte se presentan los resultados y el análisis de dicha comparación, la cual se realizó mediante la implementación de las metodologías seleccionadas en dos redes de ejemplo y el posterior estudio de sus características y funcionamiento hidráulico.

Finalmente como resultado final de este trabajo se emiten las conclusiones y recomendaciones derivadas del análisis de resultados, las cuales están enfocadas en establecer la metodología que ofrece los mejores resultados para ejecutar el diseño del tipo de redes analizadas.

1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

1.1 ANTECEDENTES

Para el desarrollo de proyectos de infraestructura que tienen lugar en puntos distantes de la infraestructura urbana, es común que sea necesaria la construcción de grandes campamentos o ciudadelas temporales, que alberguen a todas las personas involucradas en el proyecto durante el término de su construcción u operación.

De acuerdo con la envergadura del proyecto, estos campamentos pueden ser habitados por 5000 personas o más, lo que equivale a la población del casco urbano de un municipio pequeño, por lo que resulta de vital importancia el diseño y construcción de sistemas de distribución de agua potable que garanticen un servicio de calidad ya que debido a su tamaño cualquier falla puede ocasionar problemas sociales y de salud pública.

A pesar de que este tipo de instalaciones son bastante comunes debido a la gran cantidad de proyectos que las requieren, y que debido a su naturaleza atienden a una población importante, sus sistemas de distribución de agua potable no cuentan con una regulación clara en cuanto a su diseño y al control de su funcionamiento. Es común que los sistemas sean construidos por empresas que prestan el servicio de alquiler de equipos basados en su experiencia sin contar con diseños, por lo que en muchos casos el servicio es intermitente o las presiones de servicio son insuficientes o muy altas.

Teniendo en cuenta las características especiales de este tipo de sistemas, para efectuar su diseño, el profesional encargado debe acudir a su experiencia y criterio para seleccionar el tipo de metodología emplear, encontrando que debido a las características propias de estas redes podrían ser diseñadas como redes municipales o como redes internas. Sin embargo, los resultados que se pueden obtener con estos dos tipos de metodologías pueden ser considerablemente diferentes, lo cual implica que no hay certeza sobre si el sistema funcionará adecuadamente o si el diseño realizado se acerca al óptimo desde el punto de vista económico.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Comparar las metodologías disponibles para el diseño de sistemas de distribución de agua potable en campamentos y ciudadelas temporales

1.2.2 Objetivos Específicos

Analizar las metodologías de diseño de redes externas e internas disponibles para realizar el diseño de redes de distribución de agua potable en campamentos y ciudadelas temporales y las principales diferencias entre las mismas.



Establecer las diferencias en las características, costos y funcionamiento hidráulico de las redes calculadas mediante las metodologías disponibles seleccionadas para el diseño de redes en campamentos y ciudadelas temporales.

Determinar la metodología que ofrece los mejores resultados en términos de costos, características y funcionalidad para el diseño de redes de distribución para campamentos y ciudadelas temporales.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 PRESIONES MÍNIMAS REQUERIDAS PARA REDES INTERNAS Y EXTERNAS

En general los cálculos hidráulicos de redes internas y externas (redes de distribución de agua potable, en adelante RDAP), están gobernadas por los mismos principios físicos y por lo tanto las rutinas para diseñar o comprobar su diseño deberían ser iguales. El objetivo para los dos casos es el de garantizar que las conducciones tengan las características apropiadas para que el suministro se realice en la cantidad y presión requerida por los consumidores.

A pesar de estas similitudes, existe una diferencia importante en los datos de entrada que se requieren para realizar los cálculos, ya que el caudal y las presiones mínimas requeridas son establecidas mediante diferentes aproximaciones.

En el caso de las RDAP, las presiones mínimas dependen de las regulaciones técnicas que existen en cada país, para el caso de Colombia; por ejemplo, el RAS 2000 establece que la presión mínima en la red es función del nivel de complejidad del sistema como se muestra en la siguiente Tabla.

Tabla 1. Presión Mínima en la RDAP para Colombia.

Nivel de Complejidad del Sistema	Población en la zona urbana	Presión Mínima en la red (m)
Bajo	<2500	10
Medio	2501 a 12500	10
Medio Alto	12501 a 60000	15
Alto	>60000	15

Fuente: RAS 2000.

De otra parte, para redes internas la presión mínima en cada tramo está dada por las características de los aparatos que abastezca, para Colombia, de acuerdo con la NTC 1500 las presiones mínimas de suministro para redes residenciales son las siguientes:

Tabla 2. Presión Mínima de abastecimiento para redes internas en Colombia.

Aparatos	Presión mínima (m)
Inodoro fluxómetro	1.02
Inodoro tanque	1.02
Orinal	0.51
Orinal fluxómetro	1.53
Lavamanos	0.51
Ducha	1.02
Lavaplatos	0.28
Lavadora	0.51
Llave de manguera	0.51

Fuente: NTC 1500.

Como se puede observar, las presiones en las redes internas son menores, teniendo en cuenta que en principio cada red cuenta con una presión mínima de suministro garantizada por la RDAP para poder abastecer a los aparatos que tiene conectada. Si bien las diferencias son notables, no representan un aspecto que diferencie de forma notable las metodologías de cálculo hidráulico ya que son valores dados como información de entrada que solo se diferencian en su magnitud.

De otra parte, en la estimación del caudal requerido por la red para el diseño, si existen diferencias notables entre las redes internas y las RDAP. Resulta claro que para las redes internas es necesario garantizar el caudal de funcionamiento de los aparatos conectados, mientras que en las RDAP el objetivo es más general y lo que busca es garantizar la cantidad de agua requerida por los consumidores durante un periodo de tiempo. Por esta razón, los órdenes de magnitud entre los caudales para los dos tipos de redes tienen diferencias significativas; sin embargo pueden existir redes internas muy grandes que sean comparables con RDAP pequeñas; en estos casos la validez de la aplicación de los métodos de estimación de demanda para uno y otro caso se tornan difusos y esto es lo que se busca identificar mediante este trabajo.

Considerando que los métodos de diseño de RDAP y redes internas se diferencian fundamentalmente en la forma de estimar la demanda de diseño en los Numerales 1.2 y 1.3 se hace una revisión de las metodologías disponibles para hacer este cálculo que serán empleadas más adelante para comparar la aplicabilidad de los métodos en el diseño de redes para campamentos y ciudadelas temporales.

2.2 METODOS DE ESTIMACIÓN DE DEMANDA PARA REDES INTERNAS

La demanda en una red interna de distribución de agua potable, se puede definir como el caudal máximo probable o máximo posible que por ella circula. Usualmente, es calculada en función de

la cantidad y características de los aparatos (sanitarios, industriales, conexiones de lavado, etc.) que son abastecidos por cada uno de los tramos que la componen.

El caudal máximo posible en la red es la suma de los caudales mínimos requeridos para el funcionamiento adecuado de los aparatos abastecidos. Para el caso de Colombia por ejemplo, la NTC 1500 establece los siguientes caudales mínimos requeridos.

Tabla 3. Caudales Mínimos de abastecimiento para redes internas en Colombia.

Aparatos	Caudal mínimo (L/s)
Inodoro fluxómetro	0.95 a 2.5
Inodoro tanque	0.19
Orinal	0.19
Orinal fluxómetro	0.95
Lavamanos	0.19
Ducha	0.32
Lavaplatos	0.28
Lavadora	0.32
Llave de manguera	0.32

Fuente: NTC 1500.

En la mayoría de las redes internas, la demanda no es expresada como el caudal máximo posible ya que es poco probable que en un momento dado todos los aparatos funcionen de forma simultánea.

Usualmente, las redes internas se diseñan para abastecer un caudal máximo probable al sistema que resulta del uso normal de los aparatos sanitarios y que cuantitativamente corresponde a la suma de los caudales mínimos requeridos para el funcionamiento de los aparatos en cada tramo, afectada por algún tipo de reducción establecida de acuerdo con alguno de los métodos que se han desarrollado para tal fin.

Los métodos para realizar la estimación de la demanda en redes internas se pueden subdividir en tres grandes grupos: Empíricos, semiempíricos y probabilísticos. Un caso especial que no puede ser resuelto por ninguno de estos métodos es el de certeza total. Tanto las metodologías como el caso especial se describen en detalle a continuación:

2.2.1 Métodos empíricos: Son aquellos en los que el caudal es establecido a través de relaciones entre la cantidad de aparatos instalados y la demanda probable. Dichas relaciones fueron deducidas de acuerdo con la experiencia de los desarrolladores de cada método y por ende carecen de base científica o matemática. En este grupo se destacan el método Británico y el Método de Dawson y Bowman.

- **Método Británico:** Establece el caudal máximo probable a través de la interpretación de Tablas de demandas probables simultáneas. En primer lugar se suman los caudales mínimos abastecidos por un tramo (caudal máximo posible) y con esta sumatoria se obtiene en la siguiente Tabla el valor corregido de caudal máximo probable (García, 2001).

Tabla 4. Caudal máximo posible (Método Británico).

Caudal Máximo Posible (L/s)	Caudal Máximo Probable (L/s)	Caudal Máximo Posible (L/s)	Caudal Máximo Probable (L/s)
0.20	0.20	5.30	2.46
0.88	0.15	6.75	2.65
1.01	0.92	7.76	2.84
1.14	1.01	8.96	3.03
1.26	1.10	10.28	3.28
1.45	1.20	11.86	3.53
1.64	1.29	13.63	3.85
1.89	1.42	15.65	4.10
2.21	1.51	18.05	4.48
2.52	1.64	20.76	4.86
2.90	1.77	23.85	5.36
3.34	1.89	27.44	5.99
3.85	2.02	31.55	6.56
4.48	2.15	31.55	6.31
5.11	2.34		

Fuente: García, 2001.

- **Método de Dawson y Bowman:** Desarrollado por los profesores del mismo apellido de la Universidad de Wisconsin (EEUU), consiste en establecer el caudal máximo posible para cada tramo a partir de la Tabla 1 y definir el caudal máximo probable en función de los grupos de aparatos y del tipo de edificación en el que se encuentren de acuerdo con la Tabla 5 (García, 2001).

Tabla 5. Caudal máximo probable (Método Dawson y Bowman).

Tipo de Edificación	Aparatos Sanitarios	Caudal Máximo Posible (L/s)	Caudal Máximo Probable (L/s)
Casa unifamiliar de familia pequeña	2 llaves exteriores	0.63	0.32
	2 llaves de lavandería	1.01	0.50
	1 llave de fregadero	0.47	
	1 lavabo	0.32	0.32
	1 WC o inodoro	0.19	0.19
	1 tina o regadera	0.63	
	Sumatoria	3.25	1.33
Casa unifamiliar de familia grande	2 llaves exteriores	0.63	0.32
	2 llaves de lavandería	1.01	0.50
	1 llave de fregadero	0.47	
	3 lavabos	0.95	0.32
	3 WCs o inodoros	0.57	0.19
	2 tinas o regaderas	1.26	0.63
	Sumatorias	4.89	1.96
Dos familias en una sola planta	2 llaves exteriores	0.63	0.32
	4 llaves de lavandería	2.02	1.01
	2 llaves de fregadero	0.95	0.47
	2 lavabos	0.63	0.32
	2 WCs o inodoros	0.38	0.19
	2 tinas o regaderas	1.26	
	Sumatorias	5.87	2.30
Grupos de hasta cuatro en apartamentos	2 llaves exteriores	0.63	0.32
	6 llaves de lavandería	3.03	1.51
	4 llaves de fregadero	1.89	0.95
	4 lavabos	1.26	0.32
	4 WCs o inodoros	0.76	0.38
	4 tinas o regaderas	2.52	
	Sumatorias	10.09	3.47
Grupos de hasta seis apartamentos	2 llaves exteriores	0.63	0.32
	8 llaves de lavandería	4.04	1.51
	6 llaves de fregadero	2.84	1.36
	6 lavabos	1.26	0.63
	6 WCs o inodoros*	1.14	0.38
	Sumatorias	13.69	4.83

Fuente: García, 2001.

2.2.2 Métodos semiempíricos: Pueden clasificarse de esta manera aquellos métodos que no cuentan con un fundamento teórico y cuyos resultados se basan en la experiencia de sus desarrolladores, pero que a diferencia de los métodos empíricos, pueden ser expresados a través de relaciones matemáticas. A continuación se describen los más representativos:

- **Método Alemán de la Raíz Cuadrada:** Fue desarrollado por R.J Kessler en 1940. Según este método, el cálculo de caudal máximo probable total de la red está definido por la expresión:

$$Q = q_1 * \sqrt{f_1 * n_1 + f_2 * n_2 + \dots + f_n * n_n}$$

Ecuación 1. Método Alemán de la Raíz Cuadrada.

donde,

Q= Caudal máximo probable total.

q₁= Caudal mínimo instantáneo de una llave de 3/8” que corresponde a 0.25 L/s.

f_n= Factor de carga del tramo n.

n_n= Número de aparatos instalados en el tramo n.

Para este método se define como tramo a cualquier conducción que abastezca uno o varios aparatos iguales. El factor de carga se define como el cuadrado de la relación entre el caudal mínimo instantáneo del tipo de aparato conectado al tramo y el caudal mínimo instantáneo de una llave de 3/8”. La aplicación del factor de carga y la raíz cuadrada permite considerar de manera arbitraria que no todos los aparatos se encuentran en uso de forma simultánea (Cortés, 2008).

- **Método de la norma Francesa:** En Francia, el cálculo de la demanda en redes internas se realiza a través del procedimiento consignado en la norma NP-41-204, en el cual se establece que el caudal máximo probable resulta de multiplicar el caudal máximo posible obtenido como la suma de los caudales mínimos requeridos por los aparatos conectados a cada tramo, por un factor de simultaneidad. Lo anterior se resume en las expresiones:

$$Q = K * \sum Q \text{ min}$$

Ecuación 2. Caudal Método de la norma francesa.

donde:

Q= Caudal máximo probable.

Q_{min}= Caudal mínimo requerido por los aparatos conectados.

K= Factor de simultaneidad (0.2<K<1), que se calcula mediante la expresión;

$$K = \frac{0.8}{\sqrt{x-1}}$$

Ecuación 3. K Método de la norma francesa.

X=Número de aparatos conectados.

El caudal obtenido es mayorado con un factor de 1.25 para hoteles y cuarteles y 1.5 para restaurantes (García, 2001).

- **Método Racional:** Es un complemento del anterior para el caso de instalaciones edificaciones en las que se alimenta varias edificaciones con una cantidad similar de aparatos a través de una misma tubería. El método consiste en sumar el caudal máximo probable de todas las edificaciones y afectarlo mediante un coeficiente K_2 que se calcula mediante la expresión:

$$K_2 = \frac{N + 19}{10 * (N + 1)}$$

Ecuación 4. K Método Racional.

donde:

N= Número de edificaciones con cantidad similar de aparatos sanitarios.

- **Método del factor de Simultaneidad:** Es una variación del método de la norma francesa en el que el factor de simultaneidad es calculado de acuerdo con el tipo de instalación, de la siguiente manera:

Instalación clase 1 es aquella en la que predominan los aparatos comunes; K se calcula como:

$$K = \frac{1}{\text{Log}_{10}x}$$

Ecuación 5. K Método del Factor de Simultaneidad, para instalaciones clase I.

Instalación clase 2 es aquella en la que predominan los aparatos de fluxómetro; K se calcula como:

$$K = \frac{1}{\sqrt{x-1}} - 0.07$$

Ecuación 6. K Método del Factor de Simultaneidad, para instalaciones clase II.

Instalación clase 3 es de tipo residencial, K se calcula de acuerdo con la Ecuación 5 (Rodríguez, 2005).

- **Método de la norma Española:** En España, el cálculo de la demanda en redes internas se realiza a través del procedimiento consignado en la norma UNE 149.201/07, según la cual el caudal máximo probable se calcula mediante la expresión:

$$Q = A * Q_T^B + C$$

Ecuación 7. Método de la norma Española.

donde:

Q = Caudal máximo probable.

Q_T = Caudal total que representa la suma de los mínimos requeridos por todos los aparatos.

A, B, C = Coeficientes que dependen del tipo de edificio, de los caudales totales del edificio y de los caudales máximos por aparatos (Q_u) de acuerdo con la siguiente Tabla.

Tabla 6. Coeficientes A, B y C (Método de la norma Española).

	Q_u (L/s)	Q_T (L/s)	A	B	C
Viviendas	<0.5	<20	0.682	0.45	-0.14
	>0.5	<1	1	1	0
	>0.5	<20	1.7	0.21	-0.7
Oficinas, Aeropuertos	<0.5	<20	0.682	0.45	-0.14
	>0.5	<1	1	1	0
	>0.5	<20	1.7	0.21	-0.7
	Sin limite	>20	0.4	0.54	0.48
Hoteles	<0.5	<20	0.698	0.5	-0.12
	>0.5	<1	1	1	0
	>0.5	<20	1	0.366	0
	Sin limite	>20	1.08	0.5	-1.83
Centros Comerciales	<0.5	<20	0.698	0.5	0.12
	>0.5	<1	1	1	0
	>0.5	<20	1	0.366	0
	Sin limite	>20	4.3	0.27	-6.65

Fuente: IDAE, 2008.

2.2.3 Métodos probabilísticos: Se fundamentan en la suposición de que la operación de los aparatos sanitarios que constituyen la red es un evento aleatorio. Bajo este criterio se establecen funciones de probabilidad de ocurrencia de estos eventos y a partir de ellas se calcula el caudal máximo probable en cada tramo del sistema y en la red en general. El principal método probabilístico es el de Hunter y de él se derivan métodos modificados consignados en las normas técnicas de diversos países para ajustar los resultados a sus realidades domésticas.

- **Método de Hunter:** Fue desarrollado en 1940 por el Dr. Roy Hunter del National Bureau of Standards de los Estados Unidos de Américas. Está basado en el concepto de que la probabilidad p de que un aparato de n existentes en la red o en un tramo de la misma, se encuentre en operación en un momento de observación aleatorio equivale a t/T , donde t es la duración de cada operación del aparato, y T es el lapso de tiempo entre operaciones

sucesivas. De igual forma, la probabilidad de que un accesorio no esté en operación en el momento de la observación equivale a $(T-t)/T$ (Hunter, 1940).

Teniendo en cuenta lo anterior y luego de establecer la probabilidad de que uno de los restantes accesorios $(n-1)$ esté operando en el instante de observación, el método generaliza, la probabilidad de que cualquier cantidad de aparatos esté funcionando de forma simultánea en el momento de la observación mediante la expresión:

$$p_r^n = C_r^n (1-p)^{n-r} p^r$$

Ecuación 8. Probabilidad de funcionamiento de aparatos en el tiempo (Método Hunter),

donde:

p_r^n = Probabilidad de que r cantidad de accesorios de n posibles esté funcionando en cualquier instante.

C_r^n = Combinatoria de selección de r aparatos de n posibles.

De acuerdo con el método, las redes internas se deben diseñar de tal forma que suministre el caudal requerido para que m aparatos de los n posibles operen simultáneamente durante el 99% del tiempo; entendiéndose por operación simultánea un evento que ocurre cuando m aparatos se encuentran descargando en el instante de observación y un tiempo t antes del mismo.

Según lo anterior, la aplicación del método requiere el cálculo del número m de aparatos que satisface la condición:

$$\sum_{r=m+1}^{r=n} C_r^n (1-p)^{n-r} p^r \leq 0.01$$

Ecuación 9. Condición que se debe satisfacer de acuerdo conl Método Hunter.

La cual corresponde a la forma dada en las Tablas de distribución de probabilidad binomial.

Resulta claro que para estimar el caudal máximo probable es necesario establecer los valores de t , T y q (que representa el caudal unitario). Estos valores deben ser supuestos de acuerdo con la experiencia del diseñador; sin embargo Hunter en su trabajo original sugiere los valores t de 10 segundos para aparatos con fluxómetro y 60 segundos para aparatos de tanque, y un único valor de 5 minutos para T . El valor de q es relativo al tipo de aparato objeto de análisis ya que Hunter analizo sistemas compuestos por un solo tipo de aparato (Cortés, 2008).

Considerando que las redes abastecen distintos tipos de aparatos, para poder emplear la metodología de Hunter es necesario que a cada aparato le sea asignado un valor de

referencia conocido como unidad de consumo el cual representa el efecto relativo de la demanda del aparato con respecto a los demás.

Finalmente, el método de Hunter, se sintetiza en una curva en la que para los valores de t , T y q especificados en el trabajo original, con esta gráfica se puede obtener el valor de la demanda en función del número de unidades de consumo presentes en una red.

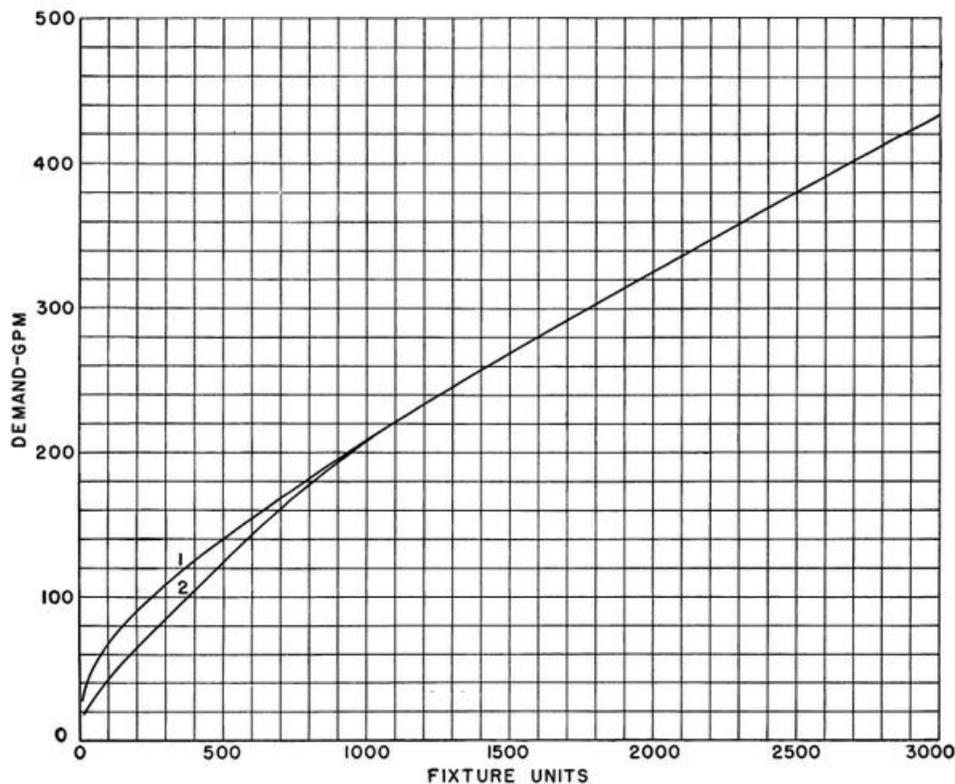


Figura 1. Curva de estimación de la demanda. Método Hunter.

Fuente: Hunter, 1940.

- **Método de Hunter Modificado:** Es el más empleado tanto en Estados Unidos como en los países de América Latina. Consiste en ajustar los valores de las variables t , T y q del método Hunter original a los aparatos sanitarios que se manejan en la actualidad. Lo anterior teniendo en cuenta, que los valores originales empleados se ajustaban a los aparatos predominantes en la década de los 40 que difieren de los que predominan actualmente (Cortés, 2008).

Los cambios en las citadas variables han suscitado la formulación de nuevas gráficas de estimación de la demanda que son diferentes entre todos los países en los que su uso está regido a través de normas técnicas o legales. Para el caso de Colombia, la aplicación del

método está normalizada según la norma NTC 1500 de la cual se extrae la curva que se muestra en la siguiente Figura.

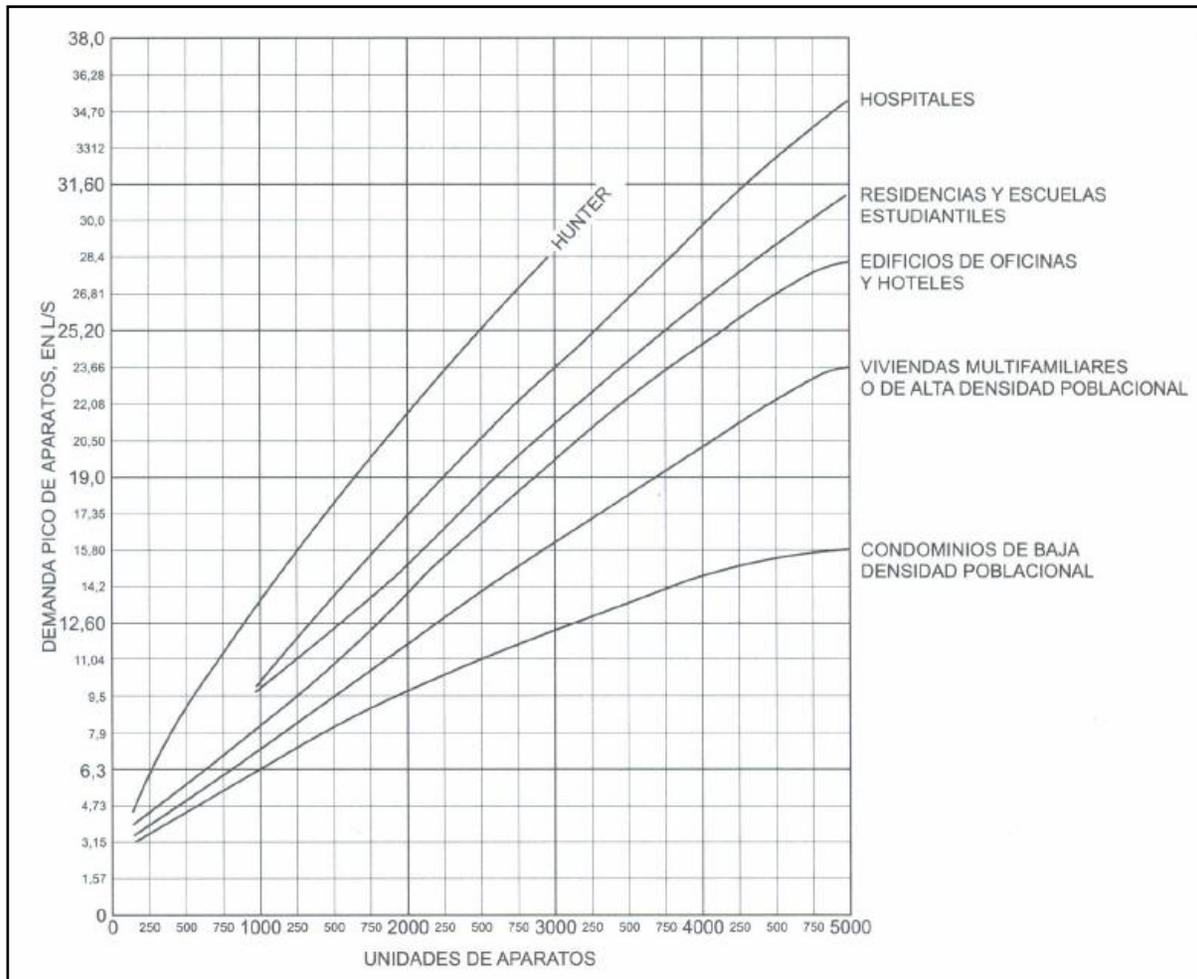


Figura 2. Curva de estimación de la demanda. Método Hunter Modificado para Colombia. Fuente: NTC 1500.

Análogamente, para cada país se han establecido Tablas en las que se consigna el valor de las unidades de consumo para cada uno de los aparatos que compone la red. Para el caso de Colombia la norma NTC 1500 establece los valores mostrados a continuación.

Tabla 7. Unidades de consumo para diferentes aparatos. Método Hunter Modificado para Colombia.

Aparatos	Ocupación	Tipo de control del Suministro	Unidades de Consumo
Inodoro	Público	Flujómetro	10
Inodoro	Público	Tanque	5
Orinal	Público	Flujómetro de 2.5 cm	10
Orinal	Público	Flujómetro de 2 cm	5
Orinal	Público	Llave	2
Lavamanos	Público	Llave	4
Tina	Público	Válvula Mezcladora	4
Ducha	Público	Válvula Mezcladora	4
Fregadero de Servicio	Público	Llave	2
Fregadero de Cocina	Hotel, Restaurante	Llave	4
Inodoro	Privado	Flujómetro	6
Inodoro	Privado	Tanque de limpieza	3
Lavamanos	Privado	Llave	1
Bidé	Privado	Válvula mezcladora	2
Tina	Privado	Válvula mezcladora	2
Ducha	Privado	Válvula mezcladora	2
Ducha separada	Privado	Válvula mezcladora	2
Fregadero de Cocina	Privado	Llave	2
Lavadero	Privado	Llave	3
Lavadora	Privado	Llave	2
	Pública	Llave	4
Lavaplatos eléctricos	Privado	Llave	3
	Público	Llave	6

Fuente: NTC 1500.

- Método Probabilístico General:** Es un método de uso muy escaso. A igual que el método Hunter, tiene en cuenta la duración media de operación t del aparato, y T es el tiempo entre operaciones consecutivas. Se diferencia en que incluye el valor de la duración media del periodo punta de consumo expresado como h . El método busca calcular la cantidad de aparatos que deben funcionar simultáneamente de tal forma que en el transcurso de un día la probabilidad de que este valor sea excedido sea baja (García, 2001). Para tal fin usa la expresión:

$$\text{Log } A^{r-1} - \text{Log } B = \text{Log } C_r^n$$

Ecuación 10. Método probabilístico General

donde:

$$A = T/t$$

$$B = H/T$$

C_r^n = Combinatoria de selección de r aparatos de n posibles.

Como se observa, a través de la expresión se obtiene el valor de la combinatoria y de allí se debe obtener la cantidad de accesorios r, para posteriormente calcular el caudal. Este proceso resulta dispendioso y por eso el método no es muy empleado.

- **Métodos Modernos:** Los métodos modernos analizan el consumo de agua como proceso estocástico. Se define como proceso estocástico al conjunto de variables aleatorias que evolucionan en función de otra variable que generalmente es el tiempo; cada una de las variables aleatorias del proceso tiene su propia función de distribución de probabilidad y entre ellas, pueden estar correlacionadas o no. Resulta claro que el uso de los aparatos sanitarios en una edificación es un proceso estocástico en el que la probabilidad de uso de los aparatos en cualquier instante está influenciado por factores como la cantidad, edad y actividades de los usuarios, el tipo de aparatos y sus usos, el momento del día o el día de la semana, la ubicación geográfica de la red y los factores climáticos que ella implica entre otros.

Un enfoque moderno para la estimación de la demanda en redes internas es el de realizar su análisis como un proceso estocástico. La metodología que usualmente se aplica para modelar el proceso es el de los Pulsos Rectangulares de Poisson (PRP), el cual necesita como parámetros básicos la intensidad, duración y frecuencia de los pulsos de demanda. Cada parámetro está representado por su media, varianza y distribución de probabilidad. En la mayoría de los estudios, para caracterizar estos parámetros es necesario el registro de los caudales instantáneos cada segundo, para poder separar los pulsos y procesar estadísticamente las series resultantes, lo cual genera grandes cantidades de datos lo que lleva a la metodología a ser costosa, y difícil de desarrollar (Alcocer, 2006).

Se han desarrollado modelos para predecir la demanda de agua en redes internas, basados en información estadística de usuarios y usos de agua tal como la cantidad de personas por vivienda y sus edades, frecuencia, duración y flujo por uso de aparatos, ocurrencia a través del día de usos de diferentes aparatos. Estos modelos luego han sido comparados con valores medidos de demanda instantánea y total diaria y han mostrado un buen comportamiento. Dada la complejidad del tratamiento estadístico de los datos, estos modelos deben ser desarrollados por medios computacionales alimentados por una importante cantidad de información; algunos de ellos han sido desarrollados sobre MATLAB, un ejemplo de ellos es el modelo SIMDEUM desarrollado en Holanda (Blokker, 2006).

En Colombia, el CIACUA de la Universidad de los Andes, desarrolló un programa para el diseño de redes internas denominado RIDAPS, el cual permite realizar el cálculo de la red

de tal forma que funcione sin fallas, para un conjunto de escenarios con una probabilidad de ocurrencia conjunta aceptable. Para tal fin el consumo de agua se modela como un Proceso Rectangular No Homogéneo Poisson (PRNHP) que tiene dos suposiciones fundamentales: El parámetro de intensidad (λ) depende del tiempo y los pulsos de consumo no pueden comenzar y terminar simultáneamente (CIACUA, 2011).

Las tres variables del modelo de PRNHP son la intensidad, duración y frecuencia de aparición de los pulsos. La función de densidad de probabilidad (fdp) de la duración es la exponencial, expresada mediante la ecuación:

$$f(t) = \alpha e^{-\alpha t}$$

Ecuación 11. Fdp para la duración de los pulsos.

donde α^{-1} es la duración media de los pulsos.

La fdp para la intensidad está dada por la distribución Weibull, con parámetros λ (l/s) y de forma β , descrita por la ecuación:

$$f(I) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{I}{\lambda} \right)^{\beta-1} e^{-(I/\lambda)^\beta}; I \geq 0$$

Ecuación 12. Fdp para la intensidad de los pulsos.

Finalmente, la fdp para la aparición de los pulsos en el tiempo corresponde a la de un proceso Poisson No Homogéneo. García (2004), define la fdp para este caso como:

$$v_j(t) = C_j g(t) + \varepsilon(t)$$

Ecuación 13. Fdp para la aparición de los pulsos.

donde, $\varepsilon(t)$ es una variable aleatoria, su media es 0 y su desviación estándar es σ_r , C_j es el valor esperado de llegadas en un día y $g(t)$ es un patrón que describe el comportamiento del consumo a lo largo del día. Teniendo en cuenta que $v_j(t)$ equivale a la tasa de llegadas para distintos instantes de tiempo, al integrarlo respecto al tiempo debe ser igual a la tasa de llegadas para todo el periodo, es decir C_j . Por otro lado como $\varepsilon(t)$ tiene una media igual a 0, se espera que al integrarlo en un periodo de un día tomara un valor nulo. De esta forma $g(t)$ al ser integrada con respecto al tiempo para un periodo de un día debe dar como resultado la unidad. La función seleccionada para definir $g(t)$ es el siguiente polinomio de grado tres:

$$g(t) = \frac{1}{10000} [A_3 t^3 + A_2 t^2 + A_1 t + C_o] \quad t \in [0,24] h$$

Ecuación 14. Función que describe el comportamiento del consumo.

donde, C_0 es un coeficiente adimensional y A_1 , A_2 , y A_3 tienen unidades inversas a segundos elevado a la respectiva potencia (CIACUA, 2011).

Para encontrar los escenarios de uso bajo los cuales se debe realizar el diseño, el modelo RIDAPS, plantea la siguiente aproximación para resolver el problema: Dado que el uso de los aparatos (nodos de consumo) sigue un proceso estocástico que puede ser descrito por el modelo de PRNHP, la secuencia de estados (es decir el número de aparatos ocupados en el tiempo) es también una variable aleatoria. Esta secuencia es una secuencia de Markov, y es posible predecir su comportamiento en estado estacionario utilizando la teoría de cadenas de Markov. Este proceso aleatorio es estocásticamente estable, por lo tanto se tiene interés en la probabilidad estacionaria para aparatos encendidos simultáneamente. Es decir, dar respuesta a la pregunta ¿cuál es la probabilidad de que m aparatos de n estén ocupados simultáneamente? Por ejemplo, para m aparatos, en donde los eventos que incrementan el número del estado están relacionados con la aparición de pulsos de consumo (parámetro λ), mientras que los eventos que disminuyen el número del estado están relacionados con la duración de los pulsos de demanda (parámetro α), en donde los parámetros λ , α y μ son parte del modelo de PRNHP, y en donde cada estado (escenario) tiene asociada una probabilidad de aparición en el tiempo. Para propósitos de diseño, se selecciona como parámetro de diseño el porcentaje de tiempo en el cuál el sistema opera correctamente, por ejemplo que en el 95% del tiempo se cumplen las restricciones hidráulicas; de esta manera sólo interesan los escenarios que acumulen esa probabilidad de aparición (CIACUA, 2011).

En general los métodos modernos requieren para el correcto modelado de las demandas e un estudio de campo para obtener las características estadísticas de los pulsos de consumo para cada tipo de edificación en particular. La adquisición de datos en este tipo de sistemas representa un esfuerzo importante debido a la frecuencia de muestreo y la consecuente cantidad de información requerida para poder calibrar los modelos de adecuadamente (CIACUA, 2011).

2.2.4 Casos de certeza total: En ciertas redes o en tramos de las mismas, puede darse el caso de tener la plena certeza que durante un período determinado de tiempo, un grupo de aparatos sanitarios estarán funcionando simultáneamente. Esta circunstancia suele darse en instalaciones de tipo colectivo, como internados, cuarteles militares, o centros de espectáculos en los cuales el funcionamiento de los aparatos está dado por el régimen horario de la institución o el desarrollo del evento. Para efectos de diseño, en estos casos la demanda equivale al caudal máximo posible (Rodríguez, 2005).

2.3 COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE DEMANDA PARA REDES INTERNAS

Si bien la reglamentación técnica de cada país establece la metodología que se debe emplear para el diseño de redes internas, esto no significa que los métodos estipulados sean infalibles o que ningún otro tenga un mejor ajuste para las áreas reglamentadas.

Por tal razón, en varios países se han realizado estudios para comparar los resultados obtenidos a través del uso de las metodologías reglamentadas con respecto a otras o versus valores reales medidos de demanda. Un ejemplo de esto es el trabajo realizado por Cortés (2008), en el cual se analiza la aplicabilidad del método Hunter para el diseño de redes internas en México, encontrando que los consumos reales son hasta un 27% menores que los calculados de acuerdo con el método Hunter original y que existen diferencias significativas entre la frecuencia de uso establecida en el método y la que se puede medir en México.

En Colombia, Castro (2006), elaboró una comparación entre los métodos Hunter, Hunter Modificado, Británico, Raíz Cuadrada, Factor de Simultaneidad, Alemán de la Raíz Cuadrada y Racional, versus la demanda real medida en varias edificaciones de uso habitacional y educativo, encontrando que para todos los casos el método racional es el que mejor se ajusta a los caudales aforados pero hace la salvedad de que en algunos casos el caudal calculado fue menor al aforado. El método de Hunter modificado, que es el normalizado para Colombia fue el que mostró el segundo mejor ajuste, mientras que los métodos que más se alejan del caudal real son los del factor de simultaneidad y el de Hunter Original.

2.4 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE DEMANDA PARA RDAP

2.4.1 Métodos Tradicionales: Usualmente en los reglamentos técnicos que regulan el diseño de RDAP en diferentes lugares del mundo, la estimación de la demanda se basa en el cálculo de la cantidad de agua asignada a un consumidor para su consumo en cierto tiempo, la cual se conoce como dotación y es expresada en términos de volumen de agua por consumidor por unidad de tiempo.

Para establecer la demanda se deben realizar estudios de la dotación desagregada por usos y por zonas de la red a abastecer, el cual debe considerar el uso residencial, comercial, industrial, rural, escolar, institucional y los demás que tengan un consumo representativo de agua (RAS 2000).

La dotación puede ser expresada en términos del consumo de agua por habitante, por vivienda o suscriptor. Por este motivo, en zonas de Estados Unidos por ejemplo, el consumo de agua se establece en términos de unidades residenciales promedio y para las actividades diferentes a la residencial, se expresa en términos de unidades residenciales equivalentes (DOH, 2009).

En Colombia, de acuerdo con el RAS 2000, la demanda se establece en términos de la dotación en volumen de agua por habitante por día, definiendo la dotación neta como la mínima cantidad

de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante y se puede establecer a través de Tablas guía, el análisis de los registros históricos o comparación con municipios similares.

Tabla 8. Dotación neta según el nivel de complejidad del sistema.

Nivel de Complejidad del Sistema*	Dotación neta mínima (L/Hab-d)	Dotación neta máxima (L/Hab-d)
Bajo	100	150
Medio	120	175
Medio Alto	130	-
Alto	150	-

Fuente: RAS 2000.

La dotación neta establecida puede ser corregida teniendo en cuenta entre otros el efecto del tamaño de la población, el clima, el sistema de alcantarillado existente u otros aspectos socioeconómicos que se consideren relevantes.

La dotación neta debe ser mayorada teniendo en cuenta el porcentaje de pérdidas (%p) que se presenta en la red, obteniendo de esta manera una dotación bruta, que se calcula mediante la expresión:

$$d_{Bruta} = \frac{d_{neta}}{1 - \% p}$$

Ecuación 15. Dotación Bruta.

Una vez establecida la dotación bruta, se puede calcular la demanda en términos del caudal medio diario, máximo diario y máximo horario tal y como se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 9. Estimación de la demanda para Colombia (RAS 2000).

Caudal	Definición	Ecuación
Medio Diario (Qmd)	Promedio de los consumo diarios en un periodo de un año	$Qmd = \frac{población * d_{neta}}{86400}$
Máximo Diario (QMD)	Máximo registrado en un día durante un periodo de un año	$QMD = Qmd * k_1$
Máximo Horario (QMH)	Máximo registrado durante una hora en un periodo de un año	$QMH = QMD * k_2$

A continuación se muestran los valores propuestos de los coeficientes k_1 y k_2 .

Tabla 10. Coeficientes k_1 y k_2 .

Nivel de Complejidad del Sistema	Coeficiente de consumo máximo diario k_1	Coeficiente de consumo máximo horario k_2		
		red Menor	red Secundaria	red Matriz
Bajo	1.3	1.6	-	-
Medio	1.3	1.6	1.5	-
Medio Alto	1.2	1.5	1.45	1.4
Alto	1.2	1.5	1.45	1.4

Fuente: RAS 2000.

Para las RDAP el caudal de diseño es función del nivel de complejidad del sistema; así para el nivel bajo se debe usar el QMH, para los niveles medio y medio alto se debe emplear el mayor entre el QMH y el Qmd mas el caudal de incendio y para el nivel alto se debe emplear el QMH.

2.4.2 Métodos Modernos: Al igual que para el caso de redes internas, los métodos modernos para estimar la demanda en RDAP incluyen aproximaciones probabilísticas. Buena parte de los trabajos en ese sentido se enfocan al análisis del consumo residencial ya que este es el más importante a nivel urbano. Aksela (2011) por ejemplo, recopiló datos de consumo de una muestra de viviendas, y con estos datos estableció un modelo de regresión lineal para predecir el consumo medio semanal; para tal fin las viviendas se estratificaron por conglomerados de acuerdo con sus consumos mediante el algoritmo de las k-medias. El modelo obtenido mostró un buen desempeño; sin embargo está limitado al análisis del comportamiento de la demanda para viviendas unifamiliares.

En general, los modelos probabilísticos, requieren para su desarrollo la obtención de una cantidad importante de datos de demanda instantánea de los suscriptores y el análisis y cuantificación de la mayor cantidad de variables posibles que influya en su comportamiento. Los modelos obtenidos no pueden ser generalizados sin tener un tratamiento previo que permita realizarlo y por este motivo no son usados ampliamente en los contextos nacionales y aún permanecen en el campo de la investigación.

2.5 COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE REDES PARA CAMPAMENTOS Y CIUDADELAS TEMPORALES

Dentro de la revisión bibliográfica realizada no se encontraron investigaciones cuyo objeto sea similar al de este trabajo; de hecho, no se encontraron alusiones expresas a las metodologías que se deben emplear para el diseño de este tipo de sistemas.

Los trabajos realizados por Castro (2006) y Cortés (2008) son una referencia apropiada en cuanto a la comparación de las metodologías de diseño de redes internas; sin embargo no se evidenció la existencia de investigaciones en las que se comparen estas metodologías con las de diseño de

RDAP, lo cual es apenas lógico debido a las notables diferencias que existen entre estos dos tipos de sistemas, que ya se expresaron al inicio de este capítulo y que se hacen menos notorias para el caso objeto de este trabajo.

Vale la pena resaltar que de acuerdo con la revisión realizada, las tendencias modernas para la estimación de la demanda en redes externas e internas se inclinan hacia el desarrollo de modelos estocásticos que permiten incluir variables propias del comportamiento y características socioeconómicas de las poblaciones servidas. Si bien estos modelos pueden simular el comportamiento de los dos tipos de redes, deben ser alimentados por volúmenes importantes de datos de consumos instantáneos que no se tienen disponibles para el desarrollo de este trabajo y por lo tanto no es viable su desarrollo en etapas posteriores del mismo.

2.6 CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDRÁULICA DE TUBERÍAS

En los numerales anteriores se expusieron las presiones y caudales requeridos para el funcionamiento de redes internas y externas de distribución de agua mostrando las diferencias que existen entre sus requerimientos y formas de cálculo; más allá de estas diferencias, el cálculo en sí de las redes está gobernado por los mismos principios físicos por lo que a pesar de que las redes externas han sido considerablemente más estudiadas, los métodos de cálculo hidráulico desarrollados para ellas pueden ser empleados para las redes internas.

En la actualidad existen diversos paquetes computacionales que permiten implementar métodos modernos como el método del gradiente para realizar el cálculo de cualquier tipo de red abierta o cerrada; no obstante, es común que las redes internas sean calculadas tubo a tubo, con lo que se pierde de vista su comportamiento dinámico.

Las diversas metodologías empleadas para realizar el cálculo de las redes están fundamentadas en los principios de conservación de la masa y la energía. El principio de conservación de la masa para el caso de un tramo conducción, indica que toda la masa que entra a un conducto es igual a la masa que sale del mismo, por lo tanto:

$$\rho_e V_e A_e = \rho_s V_s A_s$$

Ecuación 16. Conservación de la masa en un conducto

donde:

ρ_{e-s} = Densidad del fluido a la entrada y a la salida.

V_{e-s} = Velocidad de flujo a la entrada y a la salida.

A_{e-s} = área transversal del conducto a la entrada y a la salida.

Resulta claro que si la densidad del fluido es constante, la anterior ecuación se simplifica encontrando que el caudal a la entrada debe ser igual al caudal a la salida.

De otra parte, la ley de la conservación de la energía entre dos puntos de un conducto se puede expresar a través del Principio de Bernoulli:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{1-2}$$

Ecuación 17. Principio de Bernoulli

donde:

Z_{1-2} = Elevación de los puntos 1 y 2 con respecto al nivel de referencia.

$P_{1-2}/\rho g$ = Altura de presión en los puntos 1 y 2.

$V_{1-2}/2g$ = Altura de velocidad en los puntos 1 y 2.

h_{1-2} = Pérdidas de energía entre los puntos 1 y 2.

Las pérdidas de energía tienen básicamente dos componentes, las pérdidas menores y las pérdidas por fricción. Las pérdidas menores, ocasionadas por los accesorios, que de forma general se pueden calcular mediante la expresión:

$$hm = K * \frac{v^2}{2 * g}$$

Ecuación 18. Ecuación para el cálculo de pérdidas menores

donde K es un coeficiente que depende del tipo de accesorio evaluado.

Por su parte las pérdidas por fricción son las ocasionadas por el esfuerzo cortante que tiene lugar en la pared del conducto. La ecuación físicamente basada que permite el cálculo es estas pérdidas es la ecuación de Darcy-Weisbach.

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

Ecuación 19. Ecuación para el cálculo de pérdidas por fricción

donde, para un conducto circular:

f= Factor de fricción, adimensional.

L=Longitud de tubería.

D= Diámetro interno de la tubería.

V= Velocidad de flujo.

El cálculo del factor de fricción depende del régimen de flujo. Para todo el rango de flujo turbulento, típico de las redes de distribución de agua potable, se calcula mediante la ecuación físicamente basada de Colebrook-White.

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

Ecuación 20. Ecuación de Colebrook-White

donde:

Ks=Rugosidad absoluta de la tubería.

Re= Número de Reynolds.

3 METODOLOGÍA

3.1 SELECCIÓN DE METODOLOGÍAS DE DISEÑO A COMPARAR

Como se estableció en el Estado del Arte, el diseño hidráulico de las redes internas y externas obedece a los mismos principios físicos y por lo tanto las rutinas de cálculo o comprobación de diseño para los dos tipos de redes son similares; no obstante, los datos de entrada pueden ser diferentes para cada tipo de red, considerando que ni las presiones mínimas requeridas ni los caudales que circulan por cada uno de los tramos se estiman de forma similar.

Considerando que el objetivo fundamental de este trabajo es el de comparar las metodologías de diseño de redes internas y externas para el caso particular de las redes de distribución en campamentos y ciudadelas temporales, es necesario seleccionar cuales de estas metodologías se quieren comparar y a partir de esta selección desarrollar el estudio.

Resulta claro que se requiere seleccionar al menos una metodología de diseño de redes internas y una de redes externas. Como se estableció en el Numeral 1.2, existe una gran cantidad de metodologías disponibles para realizar la estimación de la demanda en redes internas que parten de diferentes aproximaciones empíricas, semiempíricas y probabilísticas, cuyos resultados pueden diferir ampliamente entre si y cuya comparación ya se ha realizado en estudios previos como el realizado por Castro (2006). Considerando que el análisis comparativo entre las diferentes metodologías disponibles para estimar la demanda en redes internas no es uno de los objetivos de este trabajo, se requiere seleccionar una de estas metodologías a fin de compararla con una de redes externas.

Considerando que es el método normalizado para Colombia, y que como se estableció en el estado del arte, está fundamentado en una descripción probabilística de los eventos de consumo de agua, se seleccionó el método Hunter Modificado de acuerdo con la Norma NTC 1500 como el método de redes internas empleado para hacer la comparación que es objeto de este estudio.

En cuanto a las metodologías de estimación de demanda para redes externas, tanto en Colombia como en el ámbito internacional predomina el uso de dotaciones para calcular los caudales que circulan por cada tramo. Por tal motivo, se empleará para efectos del presente estudio la metodología de estimación de demanda de agua potable mediante dotaciones descrita en el RAS 2000 la cual está reglamentada para Colombia.

Como complemento a las dos metodologías previamente descritas, se incluirá en la comparación una aproximación moderna empleando un modelo de cálculo de demanda a través de procesos estocásticos. Para tal fin se empleará el software RIDAPS desarrollado por el CIACUA de la Universidad de Los Andes y cuyos fundamentos se describieron brevemente en el estado del arte.

3.2 IMPLEMENTACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS SELECCIONADAS

Para poder realizar la comparación del uso de las metodologías seleccionadas en el caso específico de redes de distribución de campamentos y ciudadelas temporales, es necesario implementarlas en redes de ejemplo y comparar los resultados obtenidos desde los puntos de vista hidráulico, económico y funcional.

Para tal fin, se seleccionaron dos redes de ejemplo reales. Una de ellas pertenece a un ejemplo típico de campamento instalado para obras cuya duración es inferior a dos años y está conformado exclusivamente por contenedores móviles y carpas, y otra pertenece a una ciudadela temporal constituida por edificaciones fijas de construcción convencional.

Teniendo la topología y elevaciones de estas redes y los usos de cada una de sus acometidas, se procedió a realizar la estimación de demanda empleando los tres métodos seleccionados; vale la pena resaltar que para el caso de la lavandería y el casino los caudales son conocidos y corresponden a los especificados por los proveedores de los equipos que se encuentran al interior de estas edificaciones, y por lo tanto para estos casos no se realiza la estimación de la demanda.

Se estableció una presión inicial en la red de 30 mca y una presión mínima en todos los puntos de suministro de 7 mca. Conociendo las demandas y las presiones mínimas en los puntos de consumo se procedió a realizar el cálculo de las redes de ejemplo mediante cada metodología seleccionada. En todos los casos se ignoró el efecto de los accesorios en las pérdidas de energía, por lo tanto no se realizó el cálculo de pérdidas menores para ninguno de los tramos evaluados.

El cálculo de las redes se realizó considerando como único material de tubería disponible el PVC, teniendo en cuenta que por su facilidad de instalación y desinstalación, su rango de presiones de trabajo, y los diámetros en los que se encuentra disponible comercialmente, es el material más recomendable para utilizar en este tipo de sistemas y de hecho es el más ampliamente utilizado.

Para realizar los cálculos hidráulicos se empleó una rugosidad absoluta del PVC de 1.5×10^{-6} mm (Saldarriaga, 2009) y una viscosidad cinemática del agua de 1.141×10^{-6} m²/s correspondiente a una temperatura de 15°C. De otra parte, los diámetros internos considerados corresponden a los ofrecidos comercialmente por la empresa PAVCO SA para las tuberías de mayor relación diámetro/espesor (RDE) disponibles en el mercado con el fin de garantizar que los costos por metro lineal de tubería son los más bajos para cada uno de los diámetros empleados.

A continuación se presenta el listado de los diámetros internos empleados, con sus respectivos diámetros nominales y la RDE a la que corresponde cada uno de ellos.

Tabla 11. Diámetros nominales e internos realizados para los cálculos (PVC).

Diámetro Nominal (pulg)	Diámetro Interno (mm)	RDE
1/2	18.18	RDE 13.5
3/4	23.63	RDE 21
1	30.20	RDE 21
1 1/4	38.14	RDE 21
1 1/2	43.68	RDE 21
2	55.70	RDE 26
2 1/2	67.45	RDE 26
3	83.42	RDE 32.5
4	108.72	RDE 41
6	160.04	RDE 41
8	208.37	RDE 41
10	259.73	RDE 41
12	308.05	RDE 41

Fuente: PAVCO SA (2008).

Teniendo en cuenta las características topológicas e hidráulicas comunes para todas las metodologías previamente mencionadas, a continuación se hace una breve descripción de las particularidades consideradas en cada metodología para ejecutar los cálculos de las redes de ejemplo.

3.2.1 Implementación del Método Hunter Modificado: Como se mencionó anteriormente, el primer paso en el desarrollo de todas las metodologías es la estimación de la demanda; en este caso se siguieron los lineamientos expresados en la NTC 1500, según la cual, el caudal en cada tramo debe ser calculado de acuerdo con la Figura 2 del presente documento. Como se puede observar, en esta gráfica se presentan varias curvas de acuerdo con el tipo de instalación a atender; teniendo en cuenta que los cálculos se realizan para instalaciones cuya función es la de prestar alojamiento temporal a trabajadores que usualmente laboran por turnos de una o varias semanas, se empleará la curva correspondiente a Edificios de Oficinas y Hoteles.

Para emplear la citada curva es necesario estimar previamente el número de unidades de consumo abastecidas por cada tramo de la red, lo cual se consiguió contando la cantidad de cada tipo de aparatos conectados y multiplicando este valor por las unidades de consumo correspondientes mostradas en la Tabla 7. Conociendo este valor se estableció el caudal para cada tramo de la red de acuerdo con la topología previamente definida.

Vale la pena resaltar que una de las singularidades de este método, es que el caudal calculado para un tramo no necesariamente corresponde a la suma de los caudales de los tramos que se

encuentren conectados inmediatamente aguas abajo, lo cual es consecuencia de la fundamentación probabilística del método, según la cual, a mayor cantidad de aparatos conectados a un tramo, menor probabilidad de que sean usados de forma simultánea.

Conociendo todos los datos de entrada, se realizó el cálculo de la red empleando una hoja de electrónica en la cual dadas la elevación, el caudal de diseño y la presión disponible al inicio del tramo, se supone un diámetro, se calculan las pérdidas por fricción y con ello la elevación de la línea de gradiente hidráulico y la presión disponible en su punto final y en todos los demás nodos conectados aguas abajo. Los diámetros se ajustaron de tal forma que la presión en los puntos de consumo nunca sea inferior a 7 mca, pero que se acerque lo máximo posible a este valor a fin de optimizar la energía disponible y de esta manera obtener una red cuyo costo sea cercano al mínimo; lo anterior considerando que para la ejecución de esta metodología no se cuenta con ningún tipo de algoritmo de optimización que permita encontrar una red de mínimo costo.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las columnas que conforman la hoja de cálculo elaborada para la ejecución del método hunter modificado.

1		2		3			4		5		6	
De	A	Cantidad de aparatos					Unidades de Consumo Tramo	Caudal Tramo	Elevación Inicial			
		Sanitarios	Lavamanos	Duchas	Orinales	Llave de Jardinería						

7		8		9		10		11		12		13		14	
Elevación final	Longitud Tramo (m)	Diámetro Nominal (pulg)	RDE Tubería	Diámetro Interno (mm)	Velocidad (m/s)	Número de Reynolds	Factor de Fricción (f)								

15		16		17		18		19		20	
Pérdidas por fricción tramo hf (m)	Pérdidas por fricción Acumuladas hfac (m)	LGH Inicial (m)	LGH Final (m)	P.disponible inicial (mca)	P.disponible final (mca)						

Figura 3. Encabezado de la hoja electrónica para ejecución del Método Hunter Modificado.

- Columnas 1 y 2: Enumeración de los nodos de inicio y fin del tramo de acuerdo con lo establecido en los planos del Anexo A.
- Columna 3: Cantidad de aparatos de cada tipo conectados aguas debajo del tramo analizado
- Columna 4: Unidades de consumo, calculadas multiplicando la cantidad de aparatos por los valores expresados en la Tabla 7.
- Columna 5: Caudal del tramo, calculado ingresando a la Figura 2 en la curva de Edificios de Oficinas y Hoteles con el total de unidades de consumo mostradas en la columna 4.
- Columnas 6 y 7: Elevación de los nodos inicial y final del tramo.
- Columna 8: Longitud del tramo de acuerdo con lo estipulado en planos.
- Columnas 9, 10 y 11: Características de la tubería de acuerdo con la Tabla 11.
- Columna 12: Velocidad calculada como el caudal a través de la tubería sobre el área interna real.
- Columna 13: Número de Reynolds.
- Columna 14: Factor de fricción calculado de acuerdo con la ecuación de Colebrook-White (Ecuación 26).
- Columna 15: Pérdidas por fricción en el tramo calculadas de acuerdo con la ecuación de Darcy-Weisbach (Ecuación 25).
- Columna 16: Sumatoria de las pérdidas por fricción acumuladas desde el punto inicial del sistema hasta el final del tramo siguiendo el recorrido del agua.
- Columnas 17 y 18: Elevación de la línea de gradiente hidráulico, calculada como la suma de la elevación física del nodo, la energía inicial del sistema menos las pérdidas por fricción en el tramo.
- Columnas 19 y 20: Presión al inicio y al final del tramo, calculada como la resta de la LGH y la elevación física del nodo.

3.2.2 Implementación de la Metodología de Diseño de redes Externas: Tal como en el caso anterior, el paso inicial en esta metodología es la estimación de la demanda en cada nodo. Para tal fin se siguieron los lineamientos del RAS 2000 que se resumieron en las Tablas 9 y 10. Las redes en los casos de estudio están dentro del Nivel Bajo de Complejidad, por lo tanto la demanda en los puntos de consumo corresponde al Caudal Máximo Horario (QMH) en los mismos.

Para estimar el QMH es necesario conocer el Caudal Medio Diario (Qmd) el cual a su vez se calcula con base en las dotaciones netas de las zonas analizadas. Teniendo en cuenta que a diferencia de una zona residencial común, las actividades cotidianas que tienen lugar en los campamentos están separadas geográficamente en zonas dedicadas para el aseo personal, el lavado de ropa, la preparación de alimentos, entre otras, es necesario definir la dotación para cada uno de estos usos a fin de establecer la demanda en da punto.

En la siguiente Tabla, se muestran las dotaciones netas empleadas para cada uno de los usos que pueden tener lugar en este tipo de redes. Estos datos son típicos de acuerdo con registros

consultados en diferentes campamentos relacionados especialmente con el sector hidrocarburos en los Llanos Orientales de Colombia.

Tabla 12. Dotaciones por uso para Campamentos y Ciudades Temporales.

Uso	Valor Dotación	Unidad
Aseo Personal	150	L/hab-día
Lavado de Ropa	50	L/hab-día
Preparación Alimentos	30	L/hab-día
Oficinas	30	L/hab-día
Aseo Personal (Ejército)	120	L/hab-día
Centro de Salud	30	L/cama-día
Riego de jardines	2	L/m ² -día

A partir de las dotaciones netas y conociendo la población servida, se establece el caudal medio diario, el cual se mayoría multiplicándolo por los factores de mayoración k_1 y k_2 , tal como se muestra en la Tabla 9. En la Tabla 10 se presentan los valores típicos de estos coeficientes, que para el caso del nivel Bajo de Complejidad, corresponden a 1.3 y 1.6 respectivamente con lo que el factor de mayoración global del Q_{md} para establecer el Q_{MH} es de 2.08. Este valor es consecuente con lo observado típicamente para este tipo de instalaciones y por lo tanto se adoptó para realizar el cálculo de la demanda en cada punto.

Para realizar el cálculo de la red en sí, se importó un modelo digital elaborado en un archivo .dxf al programa REDES desarrollado por el CIACUA de la Universidad de Los Andes. Una vez en el ambiente del citado programa, se introdujeron las demandas previamente calculadas en cada nodo de acometida para posteriormente ejecutar una rutina de diseño mediante algoritmos genéticos.

Como parámetros para ejecutar el diseño se introdujeron los diámetros mostrados en la Tabla 11, una presión mínima de 7 mca y los coeficientes K y x de la regresión de la curva de costos desarrollada para el proyecto, la cual corresponde a valores típicos empleados en campamentos ubicados en los Llanos Orientales de Colombia y que se muestra a continuación.

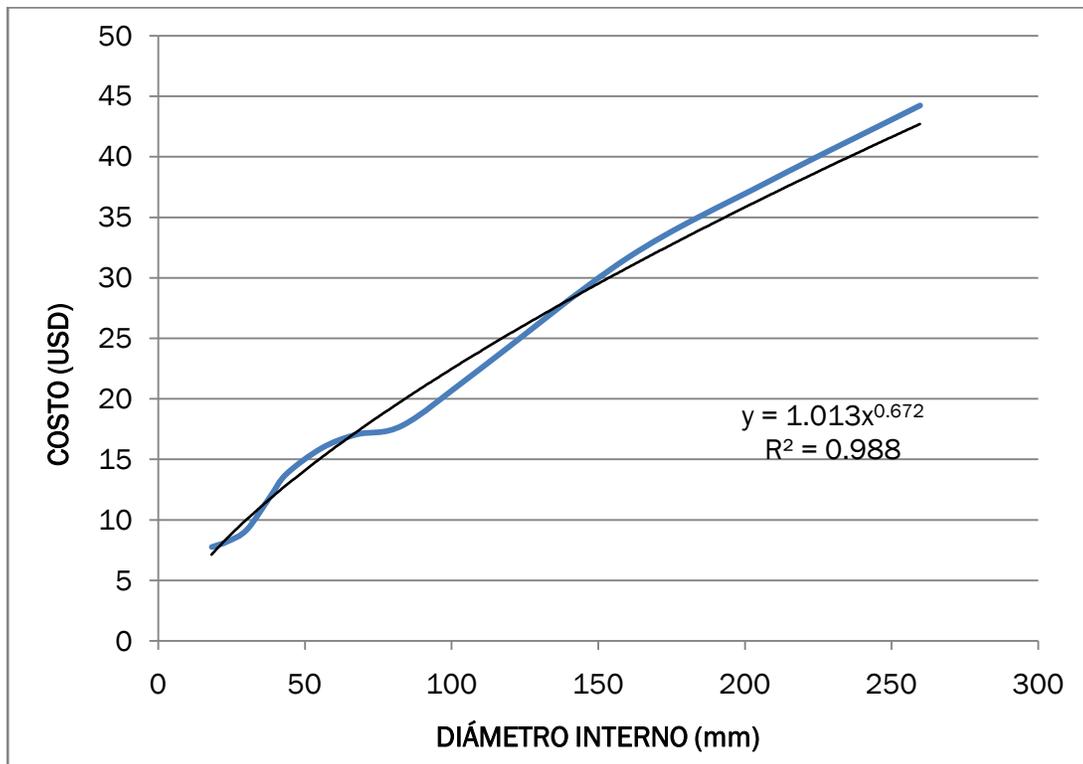


Figura 4. Curva de Costos empleada.

Una vez ajustados estos parámetros se procedió a ejecutar el algoritmo, luego se seleccionó la red de mínimo costo encontrada y se asignó para luego ejecutar nuevamente el algoritmo basado en dicha red; este proceso se repitió hasta que el costo de la red se mantuviera constante entre dos ejecuciones consecutivas del algoritmo. De esta forma se obtuvo una red cercana al mínimo costo para comparar sus características con las de las demás metodologías seleccionadas.

3.2.3 Implementación de la Metodología de Procesos Estocásticos: Como se mencionó anteriormente para implementar una metodología en la que el consumo de agua sea analizado como un proceso estocástico, se empleará el software RIDAPS desarrollado por el CIACUA de la Universidad de los Andes.

El primer paso para emplear este software, fue importar el modelo crudo de la red desde el programa REDES que previamente se había obtenido al iniciar la aplicación de la metodología de diseño de redes externas.

Una vez hecho esto se procede a introducir manualmente los siguientes datos:

- Percentil de la función de frecuencia de diseño (λ): Se empleó el percentil 0.1 de la función descrita en la Ecuación 14 para todos los nodos. Los términos de dicha función

corresponden a los establecidos para el edificio ML de la Universidad de Los Andes que se presentan a continuación:

Tabla 13. Términos de la función patrón de consumo.

Término	Valor
A_1	-90
A_2	15.5
A_3	-0.05
C_0	445.25

Fuente: CIACUA, 2011.

- Duración promedio de uso del aparato (α): Este valor se basa en la experiencia del diseñador y varía de acuerdo con cada aparato. Se empleó un valor de 10.72 s para todos los nodos, de acuerdo con lo establecido por CIACUA (2011) para el edificio ML.
- Presión mínima deseada en cada nodo (P_{min}): Correspondiente a 7 mca para todos los nodos de consumo.

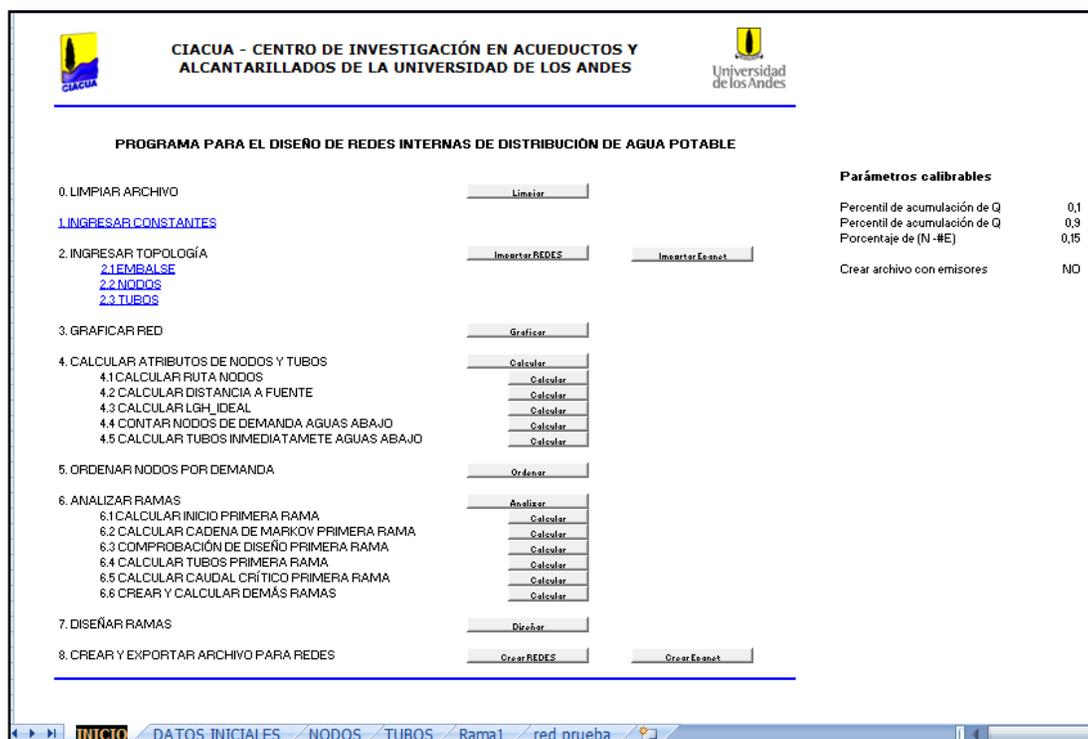


Figura 5. Visualización de la pantalla de acceso a los procedimientos del programa RIDAPS.

Considerando estos datos, se procedió a ejecutar los siguientes procedimientos del programa, la visualización del acceso a estos procedimientos se puede observar en la Figura anterior.

- **Graficar red:** Con este procedimiento se obtiene una representación gráfica la red que se pretende diseñar.
- **Calcular Atributos de Nodos y Tubos:** Con este procedimiento se calcularon la ruta, distancia a la fuente y LGH ideal de los nodos, y la demanda y los tubos conectados aguas abajo para el caso de las tuberías.
- **Ordenar Nodos por Demanda:** Con este procedimiento se obtienen los nodos ordenados de mayor a menor demanda.
- **Analizar Ramas:** Con este procedimiento el programa automáticamente calcula el punto de inicio de la primera rama y para ésta calculará la cadena de Markov, comprueba diseño, calcula los tubos que pertenecen a ésta y el caudal crítico para la rama. Esto mismo se realiza para las otras ramas que componen la red (CIACUA, 2011).
- **Diseñar:** Con este procedimiento el programa establece cada uno de los diámetros de las tuberías que componen la red analizada.

3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS REDES DE EJEMPLO

Como se mencionó anteriormente, se seleccionaron dos redes de ejemplo para implementar en ellas las metodologías seleccionadas. A continuación se realiza una breve descripción de los aspectos más importantes de cada una de ellas.

- **Red 1 (Ciudadela temporal):** Esta red fue seleccionada por ser un ejemplo típico de una ciudadela temporal. Alimenta 17 edificaciones permanentes en las que se alojan 371 personas y se preparan los alimentos y se lava la ropa a 2000; cuenta con oficinas, sede social, centro de salud, canchas deportivas, instalaciones del Ejército y dos comedores. El área total aproximada en el que está construida la ciudadela es de 6 Ha.

La red de distribución es alimentada por un único sistema de almacenamiento y presurización ubicado a 190.5 msnm. El punto más alto de la red se ubica a 194 msnm y el más bajo a 176.5 msnm; no obstante la mayor parte de las edificaciones se ubican entre 185 y 190 msnm.

La red está conformada por una tubería principal de la que se dependen varios ramales para atender toda la ciudadela. El ramal más largo atiende la sede social, el comedor alterno, el casino, las oficinas y el centro de salud. Posteriormente existen otros cuatro ramales que atienden las edificaciones de alojamiento, uno que atiende la lavandería y otro la PTAR.

En la Figura de la siguiente página se puede observar un esquema de la misma, en la Tabla posterior se presentan las principales características de la red, asimismo en el plano que se encuentra en el anexo A se puede observar la topología completa con la nomenclatura empleada para el desarrollo del estudio.

Tabla 14. Características Red 1.

CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD
Edificaciones de Vivienda	9
Habitaciones	96
Raciones de comida preparadas por día	6000
Población atendida para lavado de ropa	2000
Puestos de trabajo en oficina	75
Total duchas atendidas	147
Total sanitarios atendidos	178
Longitud total de tubería (m)	1493
Caudal requerido en casino (L/s)	1.6
Caudal requerido en Lavandería (L/s)	2.2

- **Red 2 (Campamento):** Esta red fue seleccionada por ser un ejemplo típico de un campamento móvil. Alimenta exclusivamente contenedores y carpas que pueden ser trasladados, con facilidad mientras que el área disponible lo permita. El campamento aloja un total de 1160 personas a las que les provee de alimentación y lavado de ropa.

El personal que habita este campamento se aloja en 48 contenedores con dos habitaciones con capacidad para 4 personas cada una, 18 contenedores con dos habitaciones con capacidad para 2 personas cada una y 31 carpas tipo iglú con una capacidad máxima para 25 personas las cuales hacen uso de 48 contenedores de baterías sanitarias que cuentan con 6 lavamamos, 5 sanitarios, 3 orinales y 4 duchas cada uno. El campamento cuenta con un casino con comedor, lavandería, oficinas y enfermería, todos instalados en contenedores móviles.

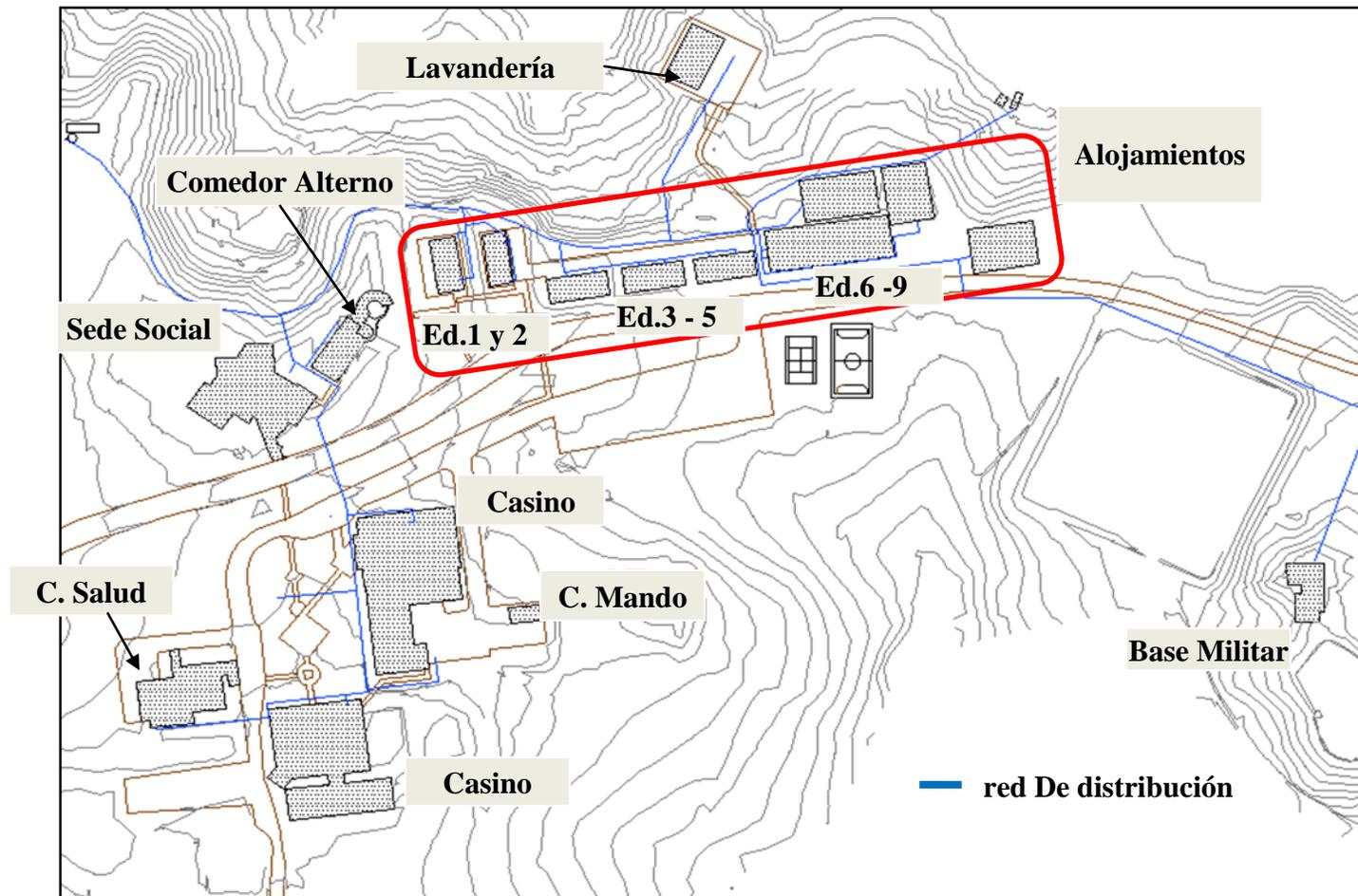


Figura 6. Esquema General Red 1.

A diferencia de la Red 1, la Red 2 está altamente concentrada; el campamento está compuesto por dos terrazas que tienen un área total menor a 3 Ha. La red de distribución es alimentada por un único sistema de almacenamiento y presurización ubicado a 201 msnm que corresponde al punto más alto del sistema. Todos los contenedores y por ende la red se encuentran entre los niveles 199.5 y 196 msnm.

La red está conformada por una tubería principal de la que se desprenden varios ramales hacia sus márgenes derecha e izquierda para atender el campamento; de cada ramal se desprenden varias acometidas en las que se instalan múltiples de distribución a los que se conectan los contenedores mediante mangueras o tuberías; en cualquiera de los dos casos la instalación se realiza por encima del nivel de terreno con el fin de facilitar el traslado o redistribución de los contenedores.

Teniendo en cuenta que la distribución espacial de los contenedores puede variar con facilidad y por lo tanto el trazado de la conexión entre los múltiples de distribución y los contenedores no es exacto ni permanente, para el diseño de esta red se tomarán como puntos de consumo los múltiples y no las acometidas para cada contenedor.

En la siguiente Tabla se presentan las principales características de la Red 2; asimismo en la Figura se puede observar un esquema de la misma y en el plano que se encuentra en el anexo A se puede observar la topología completa con la nomenclatura empleada para el desarrollo del estudio.

Tabla 15. Características Red 2.

CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD
Contenedores para 8 personas	48
Contenedores para 4 personas	18
Contenedores de batería de baños	48
Raciones de comida preparadas por día	3480
Población atendida para lavado de ropa	1160
Total duchas atendidas	304
Total sanitarios atendidos	352
Longitud total de tubería (m)	850
Caudal requerido en casino (L/s)	0.8
Caudal requerido en Lavandería (L/s)	1.35

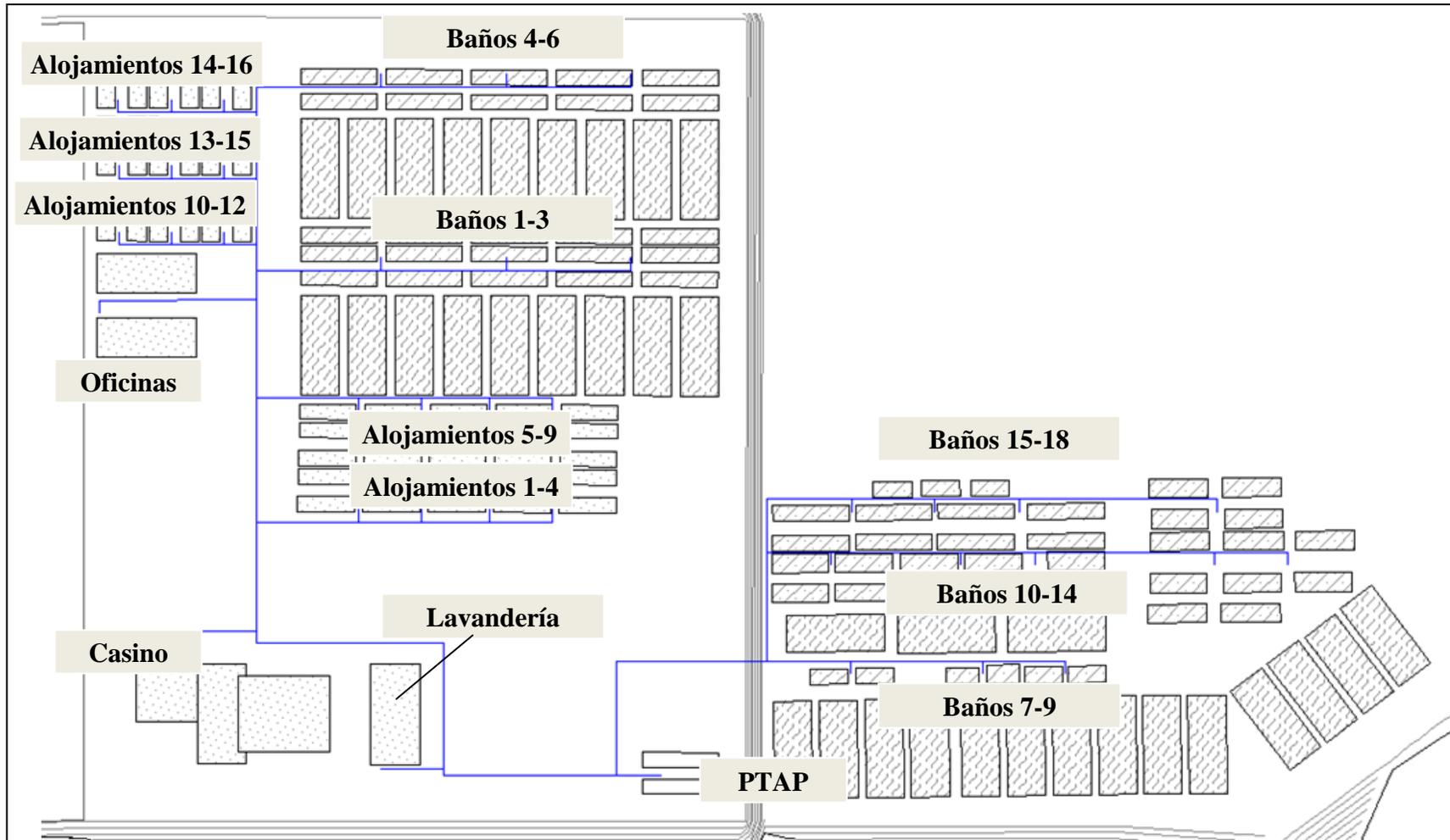


Figura 7. Esquema General Red 1.

3.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

La implementación de las metodologías seleccionadas tuvo como resultado una demanda estimada, una combinación de diámetros de tubería y una serie de presiones disponibles en cada uno de los nodos para cada una de las dos redes de ejemplo utilizadas. Estos resultados por si solos no permiten establecer cuál de las metodologías es la más adecuada para el cálculo de redes de distribución en campamentos y ciudadelas temporales, por lo que se hace necesario comparar los resultados obtenidos.

La comparación de los resultados obtenidos se realizó analizando las diferencias entre los datos de entrada, las características de las redes calculadas y el comportamiento de las mismas ante diferentes escenarios de demanda. A continuación se hace una breve exposición de la forma en que se realizó el análisis de cada uno de los puntos mencionados.

- **Análisis de los datos de entrada:** Como se ha mencionado anteriormente, la única diferencia en los datos de entrada para el cálculo de las redes radica en las demandas de cada una de las acometidas. Para compararlos, se tabularon y graficaron los resultados obtenidos en la estimación de demanda para establecer de manera rápida y clara, las diferencias entre los valores obtenidos mediante cada método y adicionalmente evaluar la pertinencia de los caudales encontrados para el servicio requerido.
- **Características de las redes:** Se analizaron las características particulares de las redes que se encontraron como resultado de la implementación de las metodologías. Para ello se compararon gráfica y analíticamente los diámetros calculados para cada tramo, las presiones disponibles en cada acometida y el costo de las redes.
- **Comportamiento de las redes:** Se analizó el comportamiento de las redes calculadas ante diferentes escenarios de demanda. Para tal fin se establecieron dos diferentes escenarios para cada una de las redes de ejemplo, en los que se establecieron una cierta cantidad de acometidas encendidas con un caudal diferente al empleado para realizar el cálculo de la red y que se puede presentar en la realidad. Las redes obtenidas fueron introducidas al programa REDES y analizadas en periodo estacionario bajo los escenarios previamente planteados. Los resultados obtenidos de presión disponible en las acometidas se compararon con respecto a la presión mínima de funcionamiento requerida (7 mca) y entre sí; con ello se pudo evaluar la red de mejor comportamiento hidráulico, considerando que el análisis se realizó para escenarios comunes para las tres redes.

Haciendo un consolidado de los resultados encontrados al hacer las mencionadas comparaciones se emitieron las conclusiones del estudio realizado.

4 RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS SELECCIONADAS

4.1 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO HUNTER MODIFICADO

En la Figura 8, se observan los resultados obtenidos para el diámetro y la presión disponible en cada nodo tras la aplicación del Método Hunter Modificado mediante la aplicación de la metodología expuesta en el Numeral 2.2.1 para la Red 1. Como se observa en la Figura, el ramal principal que parte desde el punto inicial hasta el punto de derivación hacia el ramal dos es de 4". El ramal uno que termina en las oficinas y el centro de salud y que alimenta el comedor alterno, la sede social, el casino y el cuarto de control es de 2". Los ramales 2 y 3 que alimentan las edificaciones de alojamientos 1 a 5 son en 1 ½" mientras que los ramales 4 y 5 que alimentan los edificios 6 al 9 son de 2 ½".

En cuanto a las presiones en los nodos se observa que en los puntos más extremos de la red que corresponden a la base militar y a las oficinas, la presión disponible es cercana a la mínima requerida (7 mca); no obstante en zonas intermedias como la alimentada por los ramales 2 y 3, la presión cercana a los 20 mca. Si bien sería deseable que en todos los nodos la presión fuera cercana a la mínima a fin de optimizar la energía disponible, esto se dificulta considerando que existen puntos considerablemente más cercanos al inicio de la red que cuentan con una diferencia topográfica favorable que aumenta la energía disponible; por lo tanto, para lograr que estos puntos tengan presiones cercanas a la mínima, se deberían emplear en dichos ramales diámetros de tubería más pequeños que ocasionarían velocidades superiores a 5 m/s las cuales no son deseables en este tipo de redes ya que implican consideraciones adicionales durante su construcción y operación que no son fáciles de implementar para el caso de las ciudadelas y campamentos temporales.

En cuanto a las demandas, las cuales no se visualizan en la gráfica pero que se presentan de forma exhaustiva en el Capítulo 5, vale la pena resaltar que como es propio del método, el caudal total de la red no equivale a la suma de los caudales en todos sus tramos. La demanda disminuye conforme aumenta la cantidad de aparatos servidos; para este caso la demanda total del sistema es de 16.6 L/s, siendo la demanda más grande la del ramal 5 que abastece las edificaciones de alojamiento 6 al 8, los cuales concentran la mayor cantidad de instalaciones para alojamiento de personal con un total de 7.79 L/s. Consecuentemente una de las acometidas a la edificación de alojamiento 7 es la que mayor demanda individual tiene que corresponde a 4.95 L/s. De lo anterior se puede concluir, que el uso del agua que más importancia tiene para el cálculo de esta red mediante este método es el de aseo personal, ya que si bien el lavado de ropa que tiene lugar en la lavandería, y la preparación de alimentos, que tiene lugar en el casino requieren caudales importantes, son los alojamientos los que tienen las mayores demandas puntuales.

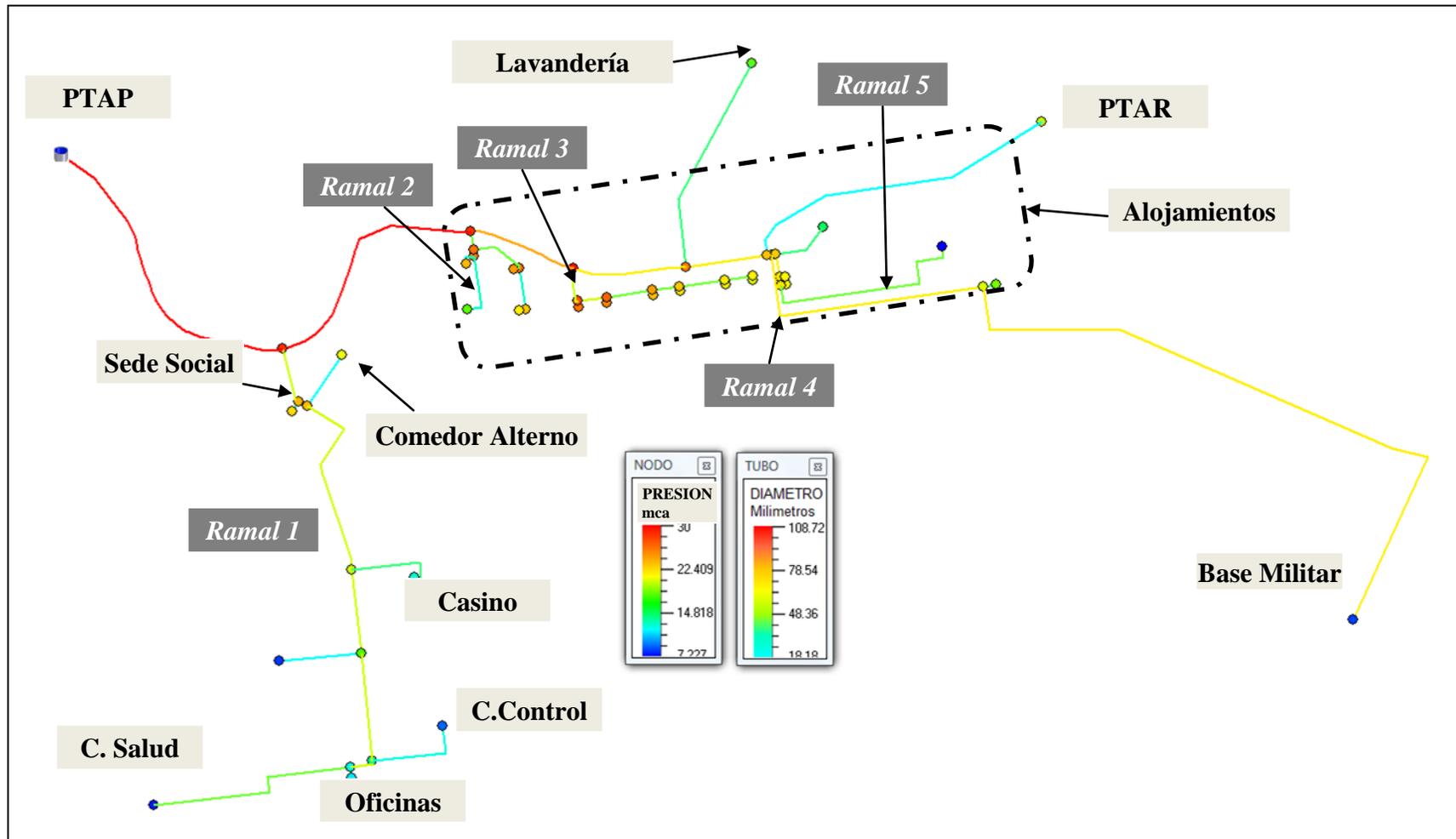


Figura 8. Resultados método Hunter Modificado para la Red 1.

A continuación se presenta un cuadro resumen con los resultados más relevantes de la aplicación del método Hunter Modificado para el cálculo de la Red 1. En el Capítulo 5 estos resultados serán objeto de análisis y comparación con los resultados de las otras metodologías seleccionadas.

Tabla 16. Resumen resultados Método Hunter modificado para la Red 1.

PARÁMETRO	VALOR
Demanda Total	16.6 L/s
Demanda Ramal 1	5.55 L/s
Demanda Ramal 2	4.57 L/s
Demanda Ramal 3	4.74 L/s
Demanda Ramal 4	4.55 L/s
Demanda Ramal 5	7.79 L/s
Longitud Tubería ½"	179.8 m
Longitud Tubería ¾"	50.6 m
Longitud Tubería 1"	47.6 m
Longitud Tubería 1 ¼"	143.5 m
Longitud Tubería 1 ½"	233.7 m
Longitud Tubería 2"	192.7 m
Longitud Tubería 2 ½"	421.2 m
Longitud Tubería 3"	38.9 m
Longitud Tubería 4"	205.15 m

En cuanto a la Red 2, en la Figura 9 se observan los resultados obtenidos para el diámetro y la presión disponible en cada nodo tras la aplicación del Método Hunter Modificado siguiendo la misma metodología que para la Red 1, explicada en el Numeral 2.2.1. Como se observa en la Figura, el tubo principal con el que inicia la red hasta el punto de derivación del ramal 1 es de 4", luego se reduce a 3" y continúa con este diámetro hasta el punto de derivación del ramal 5, donde se reduce a 2 ½" y con este diámetro continúa hasta la última derivación. Los ramales 2, 3 y 4 que alimentan las zonas con contenedores de alojamiento con baños más grandes y las oficinas son en 1 ½", mientras que los ramales 6, 7 y 8 que atienden zonas más pequeñas son en 1 ¼", de otra parte los ramales 5, 9, 1a, 1b y 1c, que alimentan zonas dedicadas exclusivamente a baterías de baños tienen diámetros entre 1 ½" y 2 ½", lo que indica que son estas zonas las que tienen una mayor importancia dentro del funcionamiento de la red.

En cuanto a las presiones, a diferencia de la Red 1, la Red 2 solo tiene dos niveles con una diferencia de elevación de 2 metros entre ellas, lo que facilita tener una distribución de presiones más homogénea; es por ello que en la terraza en la que se ubica el inicio de la red, la mayoría de las acometidas tienen presiones cercanas a la mínima requerida (7 mca); de otra parte en la

terrazza que tiene el nivel más bajo las presiones son algo mayores debido a la ganancia de energía y por lo tanto oscilan en la mayoría de las acometidas entre 7 y 20 mca.

En cuanto a las demandas (que se presentarán de forma exhaustiva en el Capítulo 5), el caudal total del sistema es de 32.48 L/s, siendo el ramal de mayor demanda el 5 con un caudal de 8.49 L/s el cual abastece la mayor cantidad de contenedores de baterías de baño, lo cual ratifica lo que se había establecido anteriormente en cuanto a que las instalaciones que demandan la mayor cantidad de agua para esta red son las baterías de baño.

A continuación se presenta un cuadro resumen con los resultados más relevantes de la aplicación del método Hunter Modificado para el cálculo de la Red 2.

Tabla 17. Resumen resultados Método Hunter modificado para la Red 2.

PARÁMETRO	VALOR
Demanda Total	32.48 L/s
Demanda Ramal 1	13.37 L/s
Demanda Ramal 1a	4.64 L/s
Demanda Ramal 1b	8.75 L/s
Demanda Ramal 1c	5.92 L/s
Demanda Ramal 2	4.51 L/s
Demanda Ramal 3	5.09 L/s
Demanda Ramal 4	2.32 L/s
Demanda Ramal 5	8.49 L/s
Demanda Ramal 6	3.74 L/s
Demanda Ramal 7	3.74 L/s
Demanda Ramal 8	3.74 L/s
Demanda Ramal 9	6.62 L/s
Longitud Tubería ½"	16.1 m
Longitud Tubería ¾"	12 m
Longitud Tubería 1"	82.4 m
Longitud Tubería 1 ¼"	63.6 m
Longitud Tubería 1 ½"	213.84 m
Longitud Tubería 2"	187.5 m
Longitud Tubería 2 ½"	129 m
Longitud Tubería 3"	158.2 m
Longitud Tubería 4"	7 m

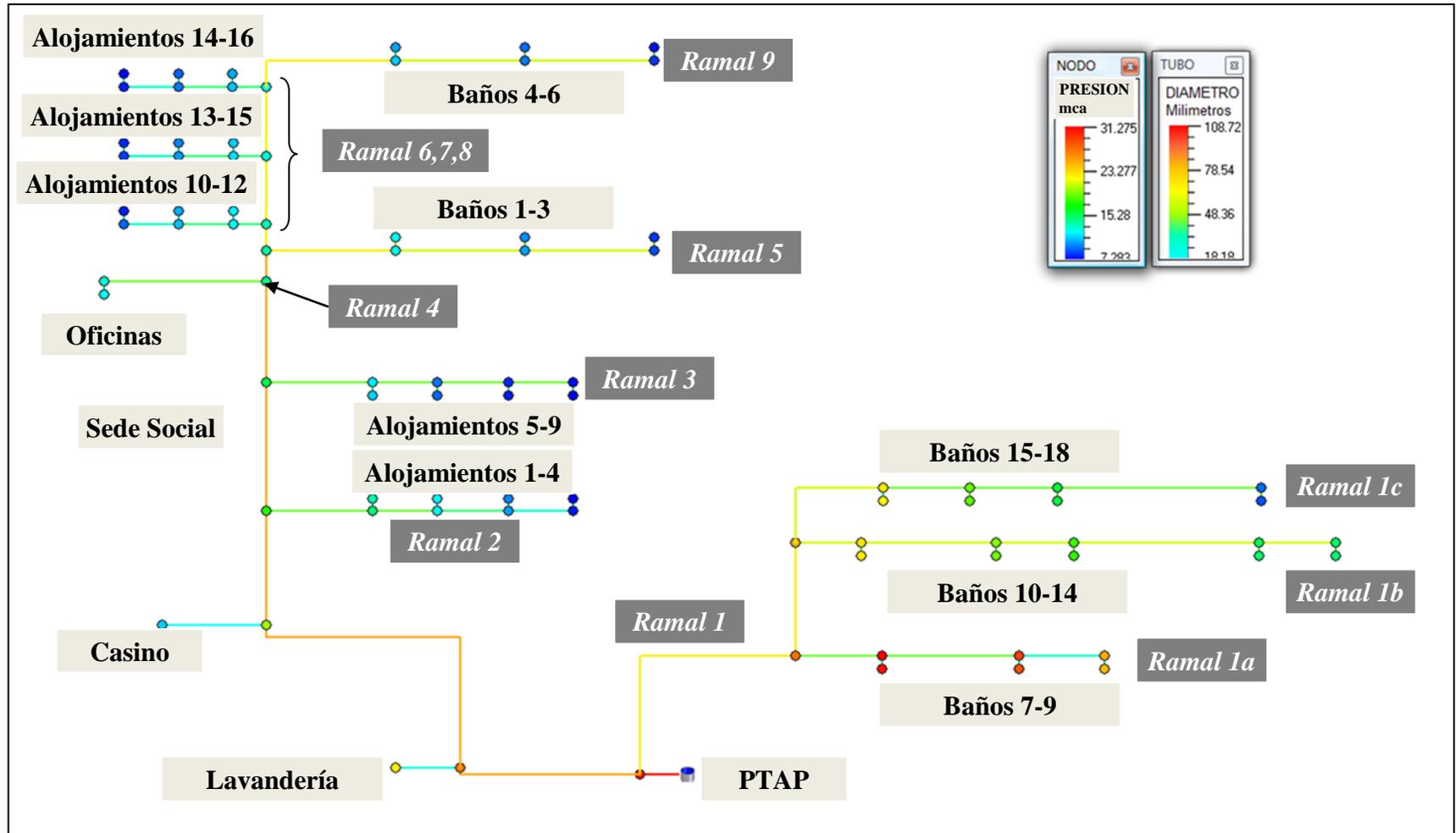


Figura 9. Resultados método Hunter Modificado para la Red 2.

4.2 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA MÉTODOGÍA DE DISEÑO DE REDES EXTERNAS

Como se indicó en el Numeral 2.2.2, para implementar la metodología de diseño de redes externas se estimó la demanda de acuerdo con las dotaciones establecidas en la Tabla 12, mayorando este caudal por un factor de 2.08 para convertirlo en QMH que corresponde al caudal de diseño de este tipo de redes. Estas demandas, junto con la topología del sistema y la curva de costos mostrada en la Figura 4 se introdujeron al programa REDES para realizar el diseño de cada una de las redes mediante algoritmos genéticos.

En la Figura 10 se observan los diámetros obtenidos en el diseño y las demandas en cada nodo con las que se alimentó el programa para el caso de la Red 1. Resulta claro que la mayoría de los nodos tienen demandas iguales o inferiores a 0.1 L/s, las cuales se distinguen por su color azul; únicamente el casino y la lavandería tienen demandas superiores; sin embargo, como se explicó en el Capítulo 3, la demanda para estos nodos no se calculó para ninguna metodología sino que se introdujo debido a que corresponde a un caudal mínimo solicitado por el proveedor de estos servicios.

Considerando los caudales mínimos para el correcto funcionamiento de los aparatos sanitarios expuestos en la Tabla 3, es evidente que los QMH calculados para dada una de las acometidas, no son suficientes ni siquiera para abastecer de forma adecuada un solo aparato sanitario cualquiera que este sea, por lo tanto se puede concluir que para el caso de la Red 1, la metodología tradicional de estimación de demanda para redes externas no permite establecer de forma apropiada el caudal que debe circular a través de la red.

Más allá de las bajas demandas obtenidas con el método, vale la pena analizar los diámetros encontrados en el diseño; en este caso, el ramal principal tiene un diámetro de 2 ½", que se reduce a 2" luego de la derivación del ramal 1 la cual es de 1 ¼"; el ramal principal conserva su diámetro hasta llegar a la derivación a la lavandería punto en el cual se reduce a 1 ½". Nuevamente el ramal secundario de mayor diámetro es el 5 que abastece las edificaciones de alojamiento 6 a 8, lo cual parece ratificar que estas edificaciones presentan la demanda crítica para el sistema. Vale la pena resaltar que la mayoría de las tuberías que se desprenden de los ramales secundarios tienen diámetros de 1" o menores.

En cuanto a las presiones, en la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos para cada nodo; se observa que para la lavandería, el casino y la base militar, la presión es cercana a la mínima requerida (7 mca), mientras que para los demás nodos oscila entre 14 y 25 mca. En el Capítulo 5 se evaluará el comportamiento de estas presiones frente a escenarios de demanda diferentes y de esta manera se evaluará la viabilidad de los resultados obtenidos desde el punto de vista hidráulico.

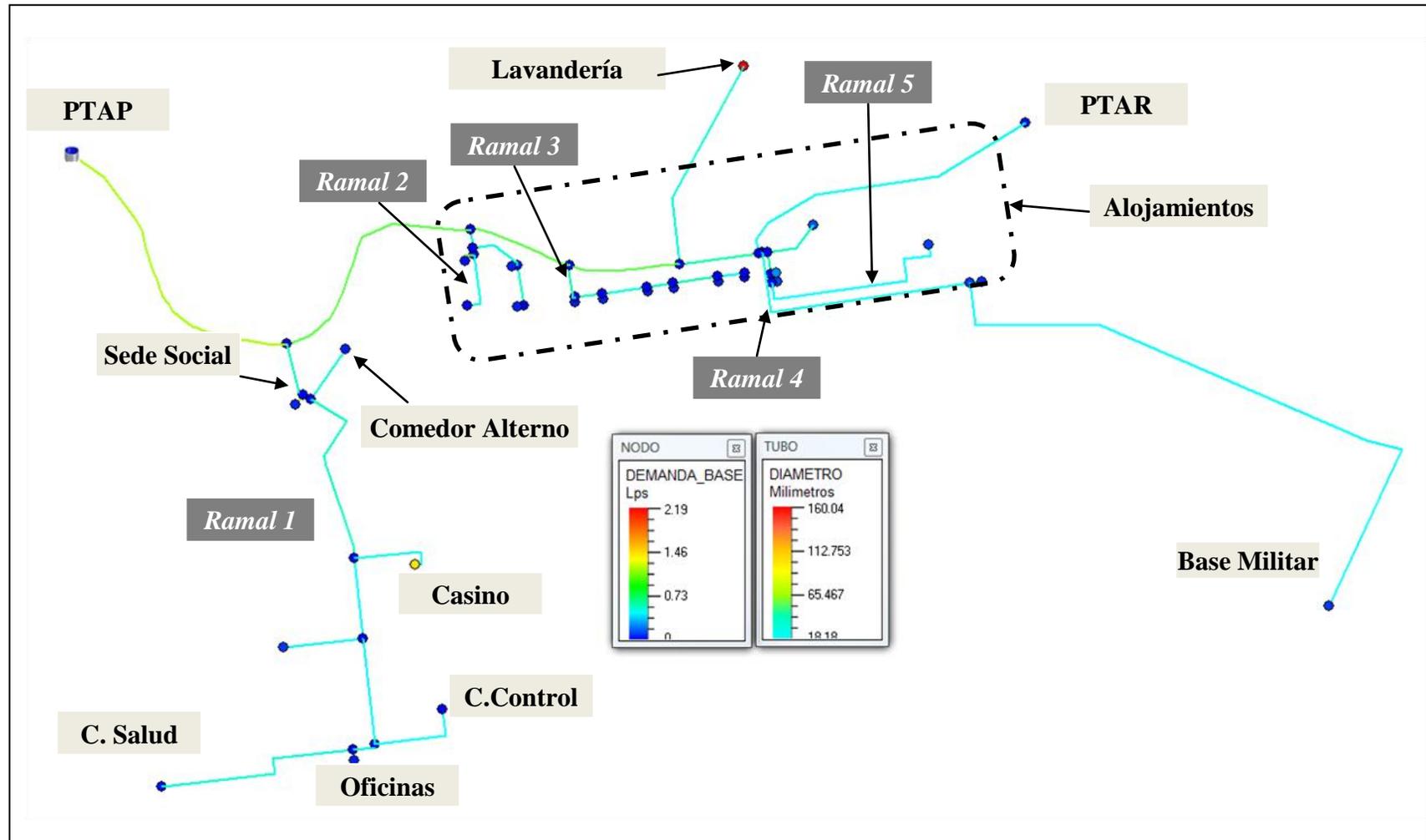


Figura 10. Resultados metodología de diseño de redes externas para la Red 1 (Demandas y diámetros).

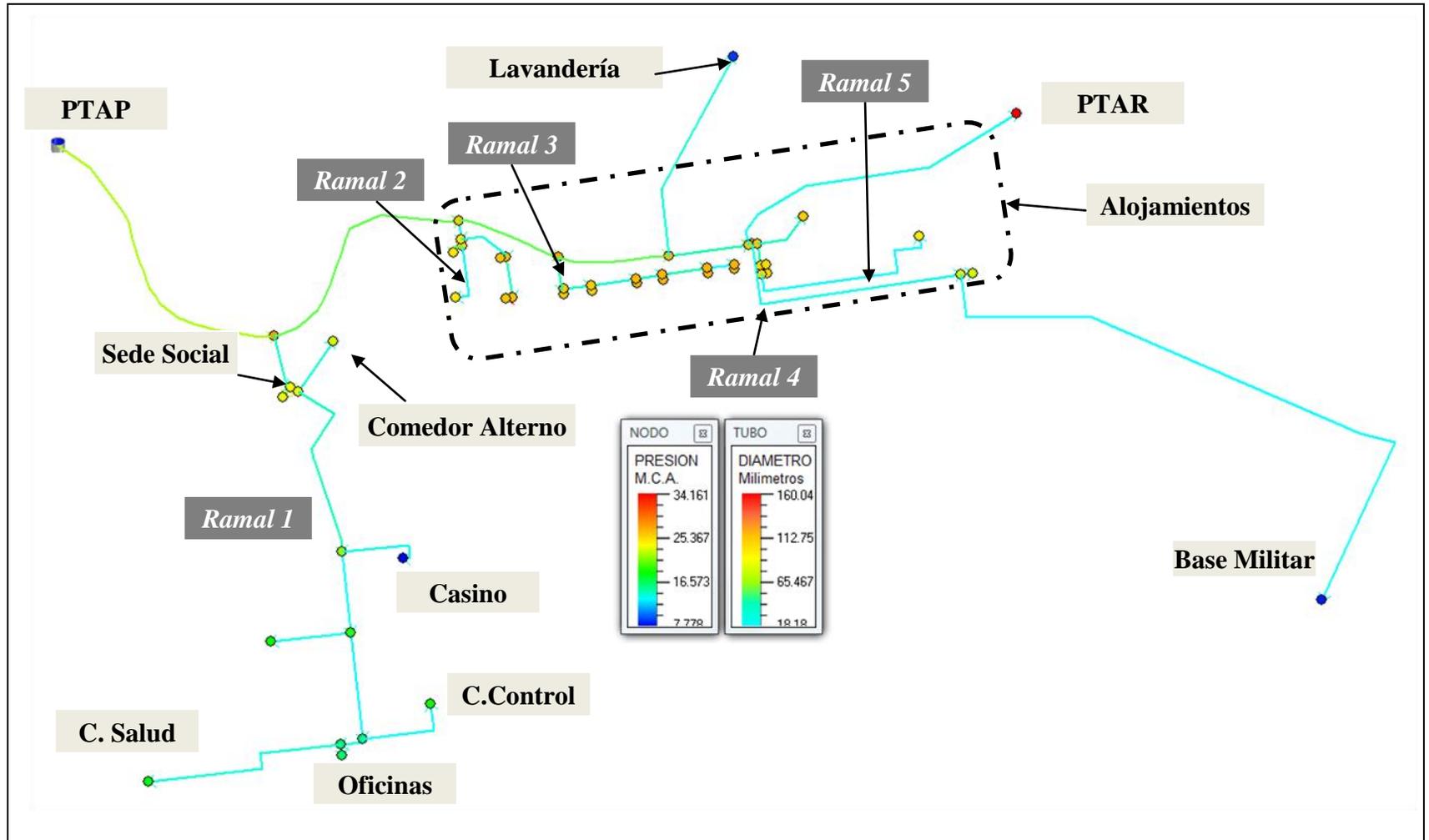


Figura 11. Resultados metodología de diseño de redes externas para la Red 1 (Presiones y diámetros).

A continuación se presenta un cuadro resumen con los resultados más relevantes de la aplicación de la metodología de diseño de redes externas para el cálculo de la Red 1. En el Capítulo 5 estos resultados serán objeto de análisis y comparación con los resultados de las otras metodologías seleccionadas.

Tabla 18. Resumen resultados Metodología de Diseño de redes Externas para la Red 1.

PARÁMETRO	VALOR
Demanda Total	5.2 L/s
Demanda Ramal 1	1.69 L/s
Demanda Ramal 2	0.16 L/s
Demanda Ramal 3	0.33 L/s
Demanda Ramal 4	0.18 L/s
Demanda Ramal 5	0.61 L/s
Longitud Tubería ½"	432.5 m
Longitud Tubería ¾"	308.5 m
Longitud Tubería 1"	243.6 m
Longitud Tubería 1 ¼"	146.4 m
Longitud Tubería 1 ½"	70.1 m
Longitud Tubería 2"	177.3 m
Longitud Tubería 2 ½"	118.9 m
Longitud Tubería 3"	6.9 m
Longitud Tubería 4"	3.8 m

De la misma forma, se aplicó la metodología de diseño de redes Externas para la Red 2. Las demandas con las que se alimentó el modelo en REDES, y los diámetros obtenidos como resultado se pueden observar en la Figura 12. Al igual que en el caso de la Red 1, la mayoría de las demandas son inferiores a 0.1 L/s, lo cual se evidencia por el color azul. Nuevamente, resaltan como grandes demandas las del casino y la lavandería que no son resultado de la estimación de demanda. De esta manera se ratifica que los problemas inherentes al uso de este tipo de estimación de demanda para campamentos y ciudadelas temporales no son particulares para la Red 1, sino a las características propias de este tipo de instalaciones.

En cuanto a los diámetros obtenidos en el diseño, el tramo principal antes de la derivación al ramal 1 es de 2", desde allí se reduce a 1 ½" hasta la derivación al ramal 5 donde se reduce a 1" hasta el final del trazado. Para esta red, la diferencia entre los diámetros de los distintos ramales no es tan clara como en los resultados del método Hunter, encontrándose en ellos diámetros entre 1" y 2" sin que exista un patrón específico que describa esta distribución..

En lo referente a las presiones encontradas, en la Figura 13 se observan los resultados obtenidos.

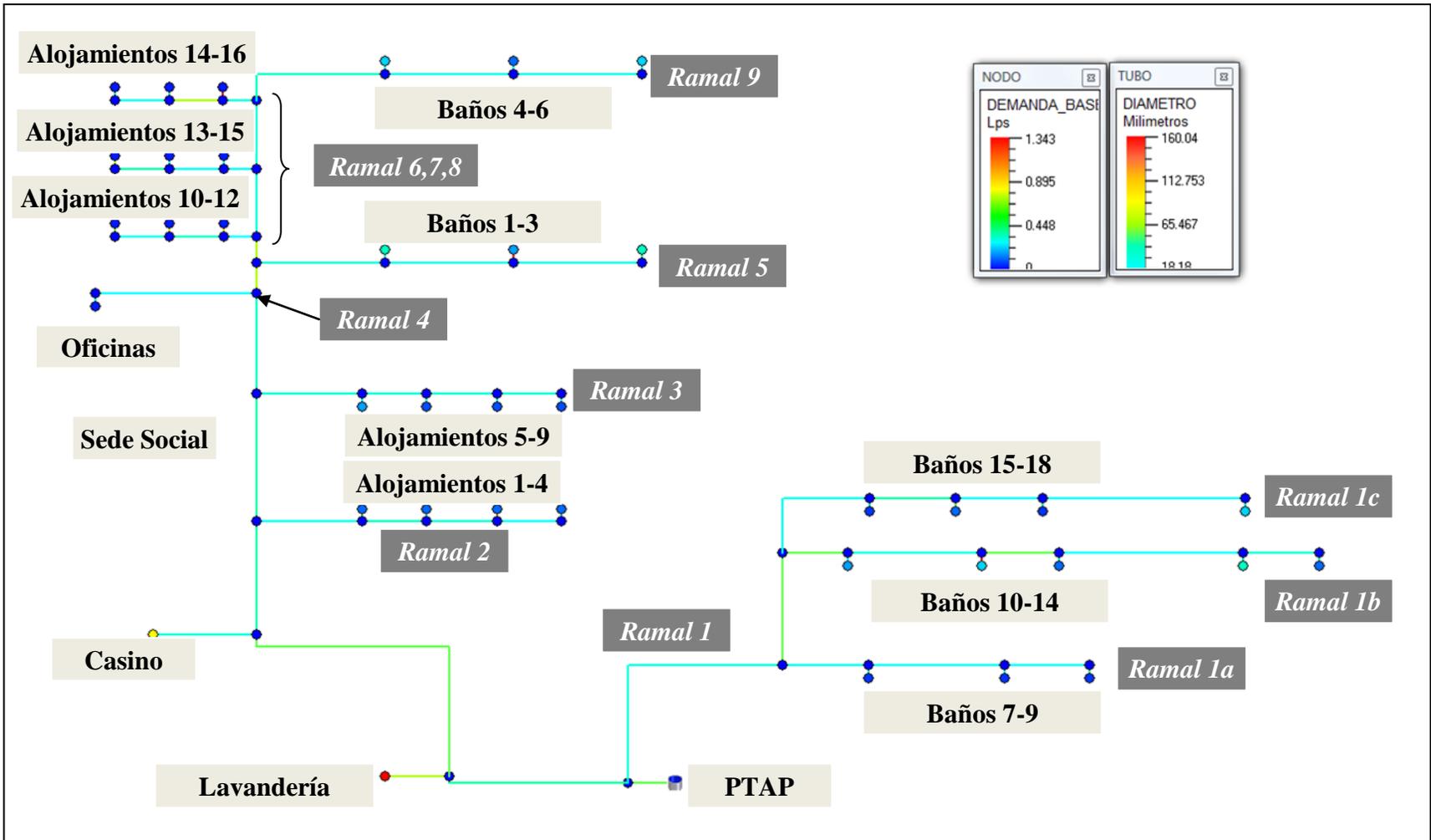


Figura 12. Resultados metodología de diseño de redes externas para la Red 2 (Demandas y diámetros).

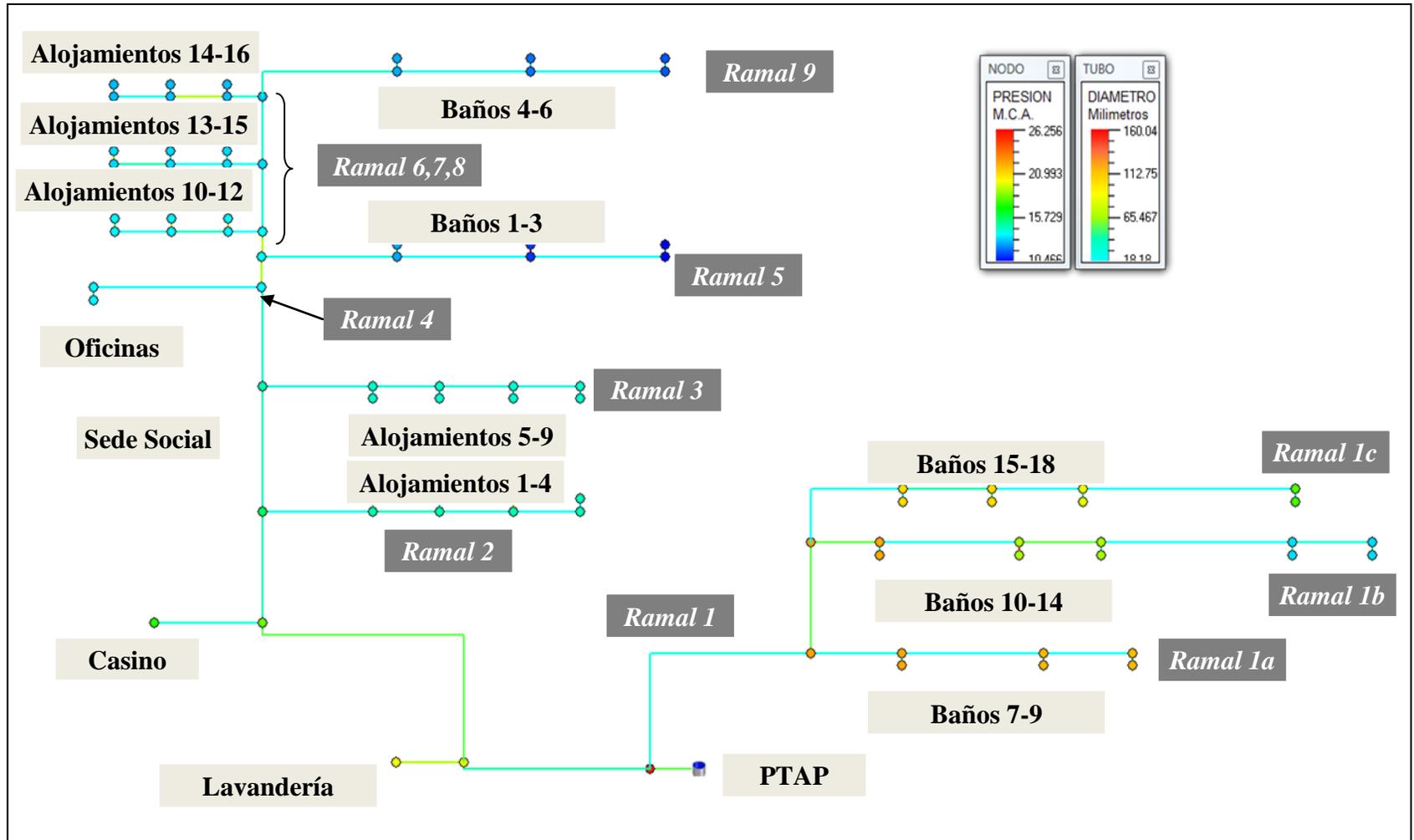


Figura 13. Resultados metodología de diseño de redes externas para la Red 2 (Presiones y diámetros).

Al igual que para el caso del método Hunter, las presiones encontradas en la Red 2 son más homogéneas. En la terraza en la que se encuentra el inicio de la red, nuevamente las presiones son más cercanas a la mínima requerida, pero en esta metodología son superiores, oscilando entre 10 y 15 mca. En la terraza más baja nuevamente las presiones encontradas son superiores, variando entre 12 y 20 mca.

A continuación se presenta un cuadro resumen con las principales características de esta red que serán comparadas con los resultados de las otras metodologías en el siguiente capítulo.

Tabla 19. Resumen resultados Método Hunter modificado para la Red 2.

PARÁMETRO	VALOR
Demanda Total	6.06 L/s
Demanda Ramal 1	1.55 L/s
Demanda Ramal 1a	0.17 L/s
Demanda Ramal 1b	0.94 L/s
Demanda Ramal 1c	0.44 L/s
Demanda Ramal 2	0.28 L/s
Demanda Ramal 3	0.42 L/s
Demanda Ramal 4	0.03 L/s
Demanda Ramal 5	0.83 L/s
Demanda Ramal 6	0.08 L/s
Demanda Ramal 7	0.08 L/s
Demanda Ramal 8	0.08 L/s
Demanda Ramal 9	0.56 L/s
Longitud Tubería ½"	158 m
Longitud Tubería ¾"	195.1 m
Longitud Tubería 1"	184.9 m
Longitud Tubería 1 ¼"	68 m
Longitud Tubería 1 ½"	117.5 m
Longitud Tubería 2"	132.3 m
Longitud Tubería 2 ½"	29.2 m
Longitud Tubería 3"	2 m
Longitud Tubería 4"	4 m

4.3 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA RIDAPS

Como se mencionó con anterioridad, a fin de incluir uno de los métodos modernos de estimación de demanda y diseño de redes de distribución, que se basan en el análisis del consumo de agua como un proceso estocástico, se empleó el programa RIDAPS, desarrollado por el CIACUA de la Universidad de los Andes, cuya fundamentación teórica fue presentada brevemente en el estado del arte.

Como se explicó en la metodología, el programa requiere como datos de entrada la topología de la red, el tiempo medio de duración de los pulsos de consumo y el percentil de la función de frecuencia de diseño. Para las dos redes de ejemplo estos valores se tomaron como 10.72 segundos y 0.1 respectivamente, que corresponde a lo establecido por el CIACUA (2011) para el edificio ML de la Universidad de Los Andes.

Asimismo requiere el ingreso de la presión mínima requerida en las acometidas (7 mca) y el caudal mínimo requerido en cada una de ellas; este último dato resulta evidente para el caso del diseño de redes internas para cuyo diseño fue desarrollado el programa, en las que corresponde al caudal mínimo requerido para un óptimo funcionamiento de los aparatos sanitarios. Para el caso de las redes de distribución objeto de este estudio, este caudal no resulta tan evidente ya que las acometidas analizadas no se conectan a aparatos individuales sino a conjuntos de aparatos al interior de edificaciones.

Por tal motivo, y considerando que no se cuenta con un registro de caudales instantáneos para este tipo de edificaciones, fue necesario establecer un caudal mínimo en cada una de las acometidas de las redes de ejemplo analizadas a fin de poder ejecutar el programa. Para los dos casos el valor mínimo general para una acometida se fijó en 0.19 L/s, el cual corresponde al mínimo para que funcione cualquier aparato sanitario de acuerdo con la NTC 1500; asimismo, para las dos redes, los caudales del casino y la lavandería se mantuvieron de acuerdo con lo solicitado por los proveedores para cada caso tal y como se estableció para las otras dos metodologías previamente desarrolladas.

Para el caso de la Red 1, a las acometidas de todas las edificaciones que no corresponden a alojamientos se les asignó el caudal mínimo de 0.2 L/s. En cuanto a las edificaciones de alojamiento, el caudal fue asignado de acuerdo con la cantidad de ramales que tienen sus redes internas de distribución. Como resultado de este análisis se encontró que las edificaciones 6, 7 y 8 son las únicas que tienen más de un ramal principal interno, teniendo dos cada una de ellas, por lo tanto les fue asignado un caudal de 0.4 L/s. Habiendo establecido los datos anteriores, se ejecutó el programa obteniendo como resultado el diseño de la red. Vale la pena resaltar que los resultados encontrados corresponden a un conjunto de diámetros calculados para el correcto funcionamiento de la red frente a un escenario crítico de consumo el que una cierta cantidad de nodos por cada rama está encendida, los nodos encendidos para ejecutar el diseño son establecidos por el programa a través del análisis del problema como un proceso estocástico.

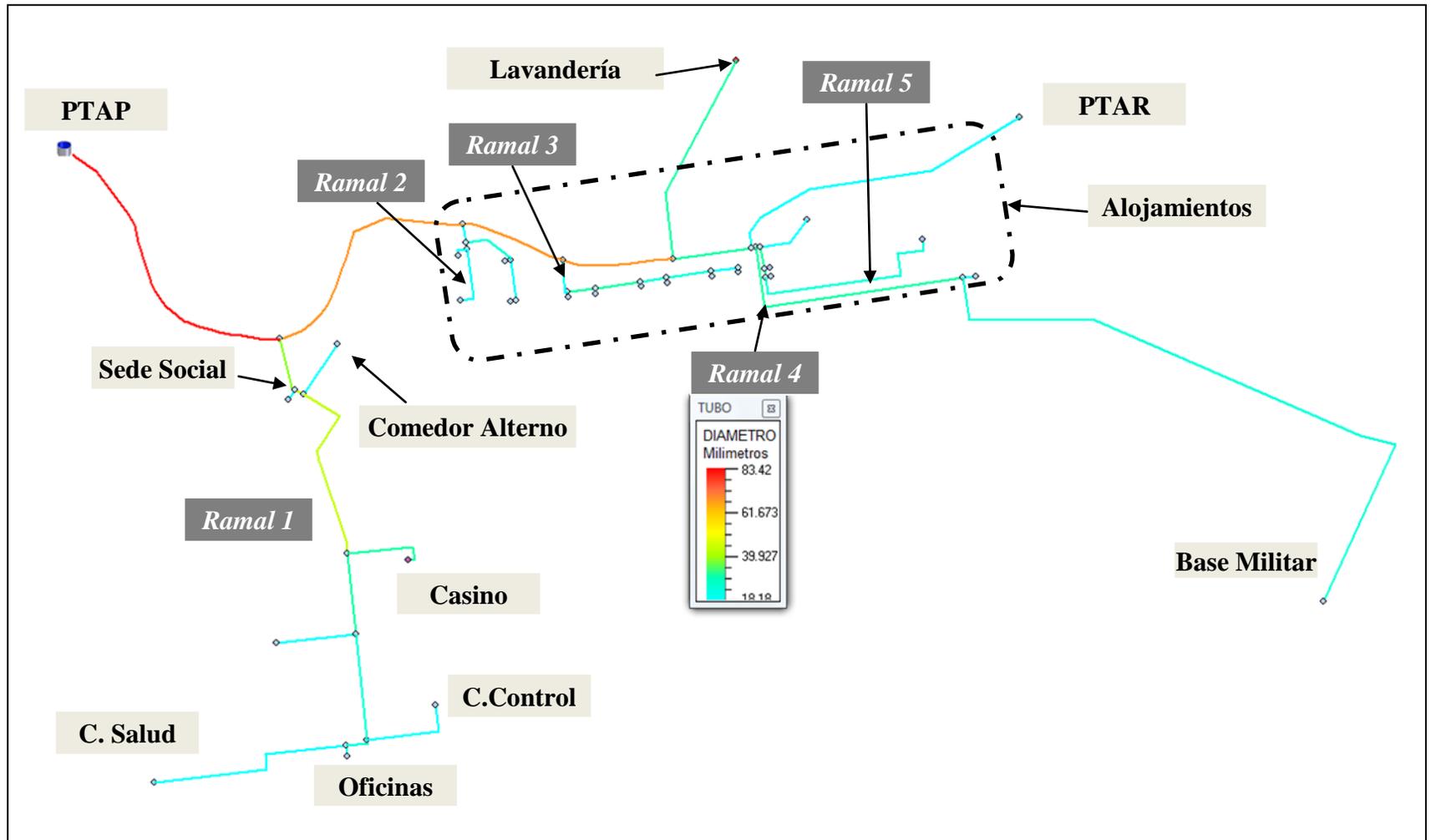


Figura 14. Resultados RIDAPS para la Red 1.

Como se observa en la Figura de la página anterior, la rama principal inicia en 3" hasta el punto de derivación del ramal 1, punto en el cual se disminuye a 2. 1/2" y continúa con este diámetro hasta la derivación hacia la lavandería donde disminuye a 1" hasta el final del trazado. El ramal 1 es el de mayor diámetro con 1 1/4", lo cual se explica en que es de este ramal que se alimenta el casino. La derivación hacia la lavandería y el ramal 5 que alimenta los alojamientos 6, 7 y 8, tienen 1" de diámetro, las demás tuberías tienen diámetros entre 3/4" y 1/2".

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos para la Red 1.

Tabla 20. Resumen resultados de la aplicación de RIDAPS para la Red 1.

PARÁMETRO	VALOR
Demanda Escenario Crítico	4.3 L/s
Longitud Tubería 1/2"	420 m
Longitud Tubería 3/4"	414.5 m
Longitud Tubería 1"	301 m
Longitud Tubería 1 1/4"	19.8 m
Longitud Tubería 1 1/2"	72 m
Longitud Tubería 2 1/2"	170 m
Longitud Tubería 3"	114 m

Para el caso de la Red 2, considerando que las acometidas corresponden a puntos en los que se ubican facilidades para la conexión de múltiples contenedores de alojamiento o de baños, la asignación de los caudales mínimos que se introdujo al programa se realizó en función del número de contenedores abastecidos, estableciendo que al menos por cada dos contenedores debe tenerse el caudal mínimo.

Considerando lo anterior, se obtuvo el diseño para una red cuyo escenario crítico considera un caudal total de 5.15 L/s. La distribución de los diámetros obtenidos se puede observar en la gráfica de la página siguiente.

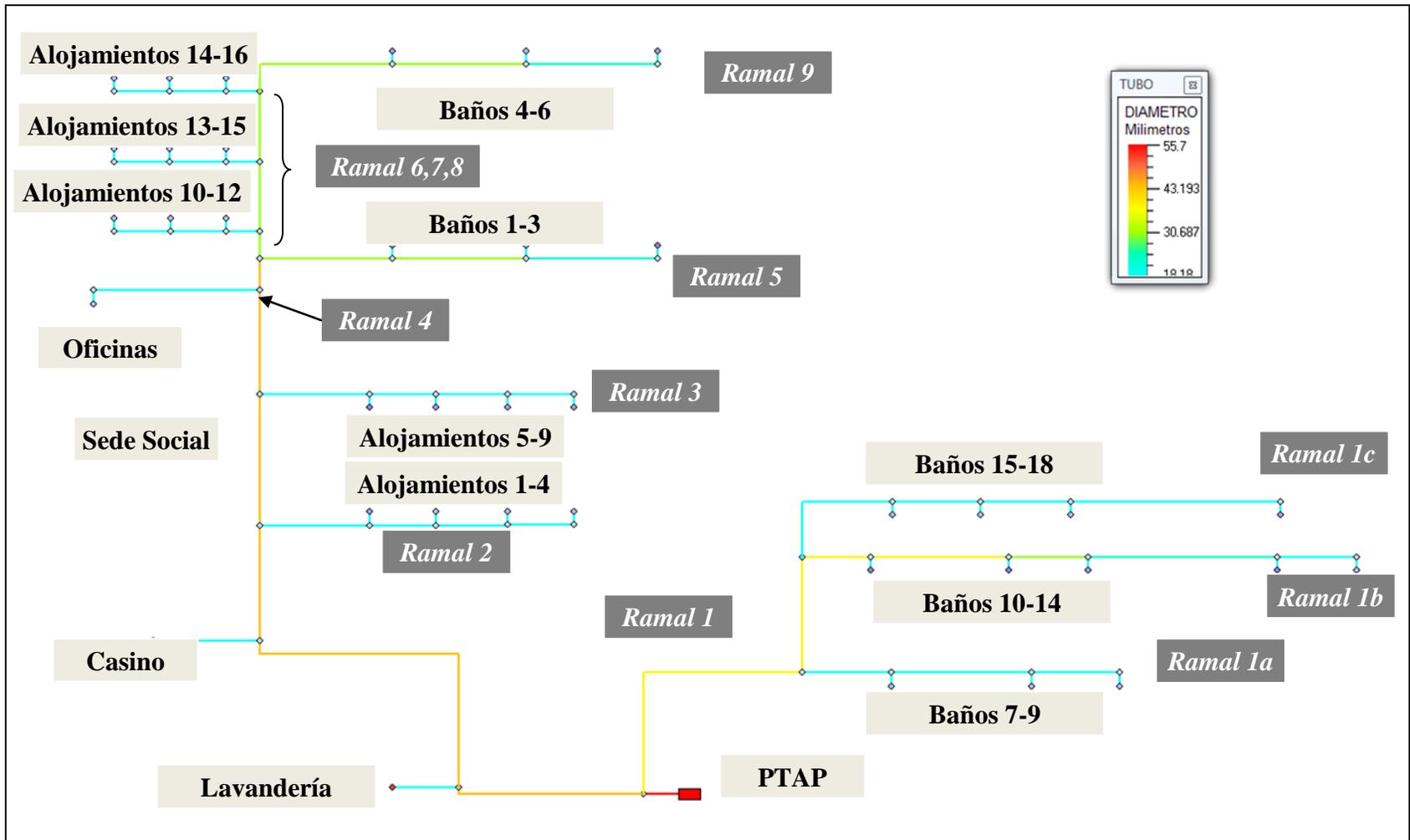


Figura 15. Resultados RIDAPS para la Red 2.

Para el caso de esta red, el diámetro de la tubería principal es de 2" en el punto en el que se bifurca hacia el ramal 1 se reduce a 1 ½" y conserva este diámetro hasta la bifurcación del ramal 5, donde se reduce a 1", diámetro que conserva hasta el final del trazado. Los ramales 5, 9 y 1 b tienen diámetros de 1" y 1 ¼" lo cual se explica en que estos son los ramales que abastecen la mayor parte de los contenedores de batería de baños; todas las demás tuberías tienen entre ½" y ¾".

A continuación se presenta un cuadro resumen con las principales características de esta red.

Tabla 21. Resumen resultados de la aplicación de RIDAPS para la Red 2.

PARÁMETRO	VALOR
Demanda Escenario Crítico	5.15 L/s
Longitud Tubería ½"	420 m
Longitud Tubería ¾"	72 m
Longitud Tubería 1"	121 m
Longitud Tubería 1 1/4"	90 m
Longitud Tubería 1 ½"	158.1 m
Longitud Tubería 2"	7 m

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 COMPARACIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada para el diseño de redes externas e internas de distribución de agua, son similares; se requieren la topología del sistema y la presión y el caudal mínimo en cada uno de los nodos de consumo. Para el caso de este estudio, se supuso un valor único de presión mínima requerida de 7 mca y se tienen dos redes de ejemplo cuya topología no varía al implementar las tres metodologías seleccionadas, por lo tanto el único dato de entrada diferente para realizar el cálculo de las redes es el de la demanda o caudal mínimo requerido en los puntos de consumo.

La forma en la que se estimaron estos caudales fue expuesta brevemente en el Capítulo 3 de este documento. Para el caso de la Red 1, los caudales del casino y la lavandería fueron excluidos del cálculo ya que obedece a consideraciones de los proveedores de los equipos que hacen parte de estas edificaciones; por lo tanto el caudal en estos nodos es el mismo para las tres metodologías, aunque se debe hacer la salvedad de que para el caso del método hunter, al caudal de funcionamiento se le sumó el que corresponde a las unidades de consumo propias de instalaciones sanitarias anexas a estas edificaciones, en especial baterías de baños. La comparación de los caudales introducidos a cada nodo de consumo se muestra en la siguiente gráfica.

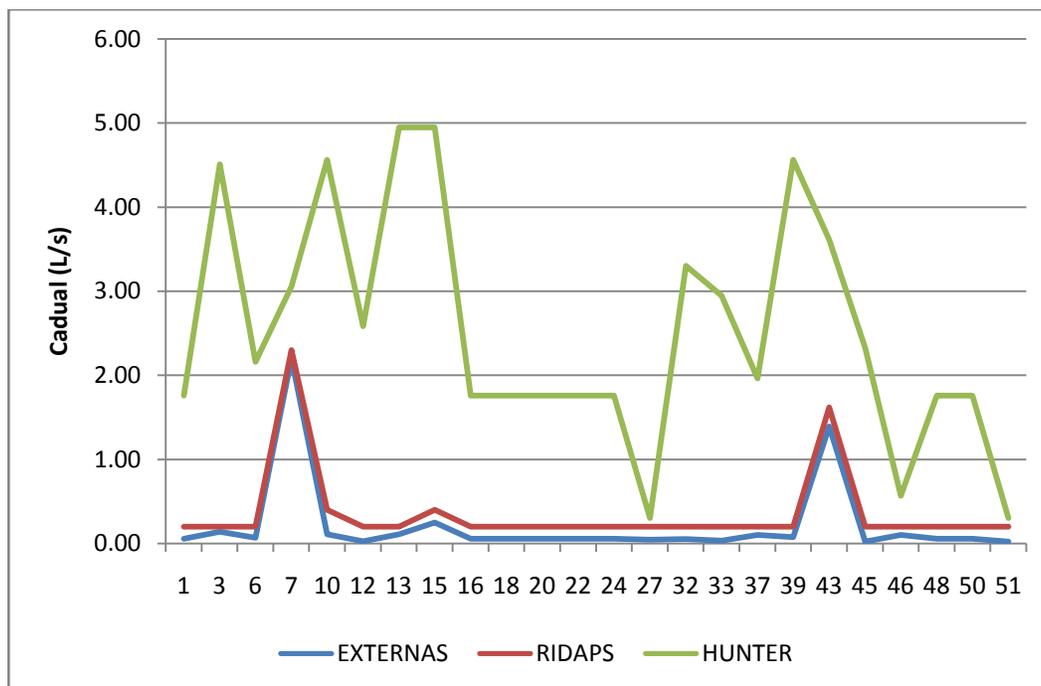


Figura 16. Comparación de las demandas en los nodos de consumo de la Red 1.

Como se puede observar, la demanda que se introdujo para realizar el cálculo de la red fue muy superior para el caso del método de Hunter Modificado que para los otros dos métodos, siendo en promedio hasta 30 veces más alto. El punto de demanda más alto para el caso de la metodología de redes externas y los supuestos para RIDAPS, corresponde a la lavandería ubicada en el nodo 7; este es uno de los puntos más cercanos a los resultados obtenidos por el método Hunter; como se mencionó anteriormente la diferencia radica en que se sumó para este último método el caudal demandado por otros aparatos sanitarios incluidos en estas edificaciones que no son requeridos para su función principal. Otro punto cercano corresponde al nodo 27 en el que se ubica el comedor alterno, esto se explica ya que en este lugar en el único aparato sanitario es un lavaplatos. Los nodos con mayor diferencia son el 13, 15 y 39, en los que se ubican los alojamientos 6, 7 y 8 que son los que tienen la mayor concentración de aparatos sanitarios.

En la gráfica se observa que los caudales de la metodología de redes Externas y de RIDAPS, son similares; sin embargo si se observara en mayor detalle y eliminando la curva de caudales del método Hunter Modificado, los caudales de RIDAPS duplican o triplican los de la metodología de redes externas; no obstante se debe resaltar que el patrón es idéntico a diferencia de lo que se observa al comparar los valores del método Hunter, lo cual se explica en que la demanda por el método de redes externas depende de la cantidad de de personas que usan las edificaciones, mientras que para RIDAPS el criterio indirectamente fue el tamaño de las mismas; para el caso de esta red estas dos características están correlacionadas directamente y por lo tanto se observa un comportamiento similar en la variación de las demandas.

En cuanto a la Red 2, la comparación de las demandas empleadas se muestra a continuación.

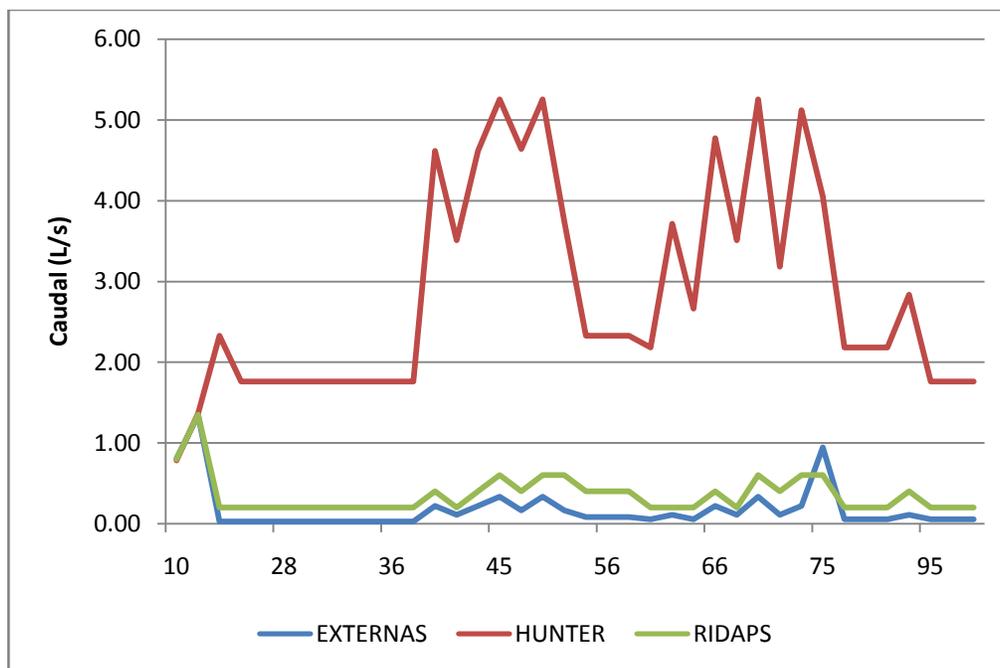


Figura 17. Comparación de las demandas en los nodos de consumo de la Red 2.

En la Red 2, los caudales de la lavandería y el casino son idénticos para las tres metodologías ya que no tienen otros aparatos sanitarios anexos y se observan en los dos primeros puntos de consumo y que corresponden a los nodos 10 y 21. Al igual que para el caso de la Red 1, para los demás nodos la diferencia de los caudales del método Hunter Modificado es evidente siendo hasta 30 veces más altos que para el método de redes externas y 10 veces más que para RIDAPS.

Todos los picos que se observan en la gráfica corresponden a nodos que abastecen contenedores de baños; si bien la diferencia en magnitud es notable entre las tres metodologías, los picos son similares entre las tres. En este caso, aparte de los mencionados nodos del casino y la lavandería no hay ningún otro en el que los valores de los caudales se acerquen; esto se explica en qué tal y como se observó para los edificios 6, 7 y 8 de la Red 1, para la Red 2 todas las acometidas abastecen puntos con una muy alta concentración de aparatos sanitarios.

Nuevamente, los caudales de la metodología de redes Externas y de RIDAPS aparentan ser similares, aunque los de esta última son entre 2 y 3 veces superiores. El patrón de variación es de igual forma muy similar entre estas metodologías ya que como se explicó para la Red 1, la magnitud de los caudales para ambos casos está correlacionada por el tamaño de la infraestructura a atender.

Al hacer un análisis global de los resultados para las dos metodologías, es evidente que el orden de magnitud de las demandas del método Hunter modificado es muy superior, por lo que es apenas lógico que los resultados en el cálculo de las redes sean muy diferentes. Se resalta que para las tres metodologías los mayores caudales calculados o supuestos corresponden a los de las edificaciones de mayor uso y por lo tanto con una mayor cantidad de aparatos sanitarios por atender. Asimismo, es claro que si bien existen diferencias importantes en los caudales empleados para RIDAPS y la metodología de redes Externas, sus patrones de variación son muy similares ya que están correlacionados por el tamaño de las edificaciones a atender.

Vale la pena resaltar que para el caso de RIDAPS, los caudales que hacen parte de este análisis fueron supuestos de acuerdo con el criterio expuesto en el capítulo anterior; sin embargo, como se explicó en el estado del arte, lo ideal es que los caudales empleados fueran producto de un monitoreo extendido que permitiera analizar la variación instantánea de la demanda, considerando que para el caso de este estudio no se está analizando la red hasta la acometida de cada aparato sanitario sino hasta la entrada a cada edificación que cuenta con un conjunto de los mismos.

5.2 COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES CALCULADAS

Como resultado de la implementación de las tres metodologías, se obtuvieron tres diferentes diseños para cada una de las dos redes de ejemplo analizadas. Las características puntuales de cada una de las redes obtenidas fueron analizadas ampliamente en el Capítulo 4. Una primera comparación que se puede realizar a partir de los cuadros de resumen realizados en el capítulo

anterior para cada red encontrada es la de las longitudes de cada diámetro nominal de tubería que se obtuvieron. Los resultados para las dos redes se muestran a continuación.

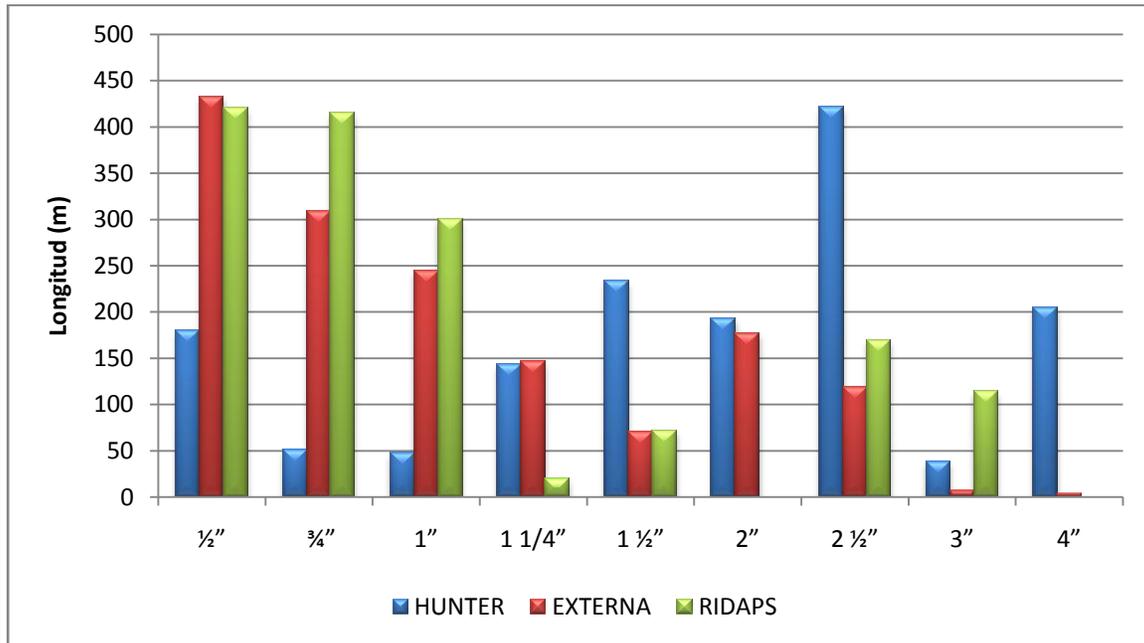


Figura 18. Comparación de longitudes obtenidas por cada diámetro de tubería para la Red 1.

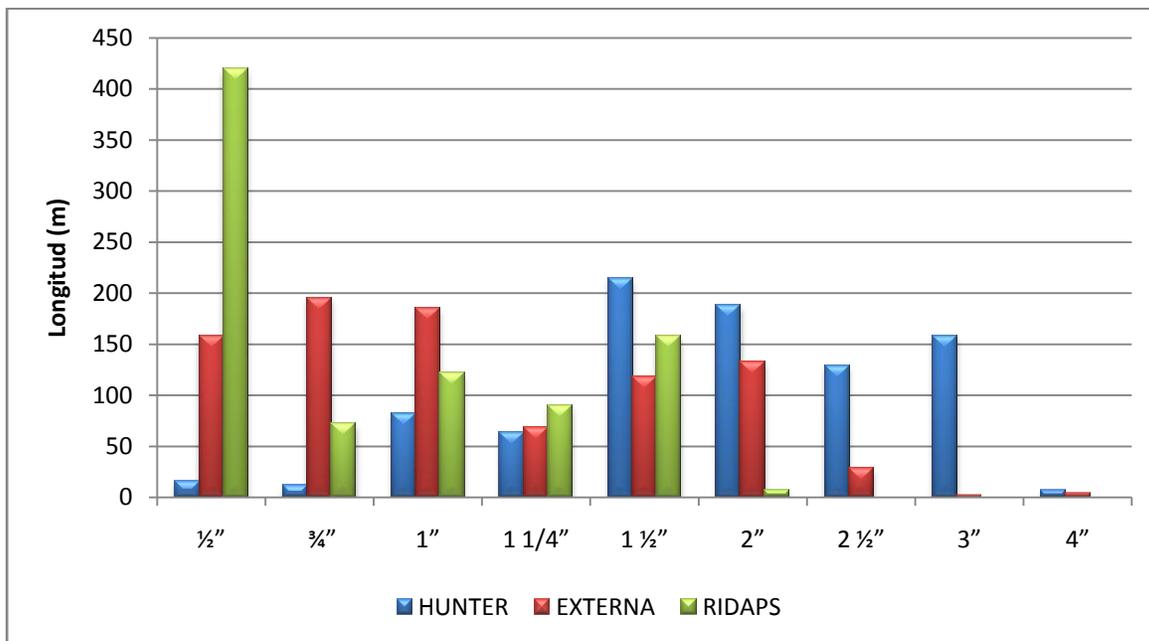


Figura 19. Comparación de longitudes obtenidas por cada diámetro de tubería para la Red 2.

Resulta claro que para las dos redes, los diámetros obtenidos mediante el método Hunter Modificado son ostensiblemente mayores, lo cual es de esperarse ante la pronunciada diferencia entre las demandas que se introdujeron a cada método. Para el caso de la Red 1, la tubería de diámetro mínimo (1/2") es la que empleada en mayor cantidad para el caso de la metodología de redes Externas y de RIDASP, seguida de la segunda en tamaño (3/4"); en contraste, para el caso del método hunter, la tubería más empleada es la séptima más grande (2 1/2").

Para el caso de la Red 2, es evidente que la mayor parte de la tubería para el caso de RIDAPs tiene el diámetro mínimo (1/2"), mientras que para el caso de la metodología de redes externas, los diámetros se encuentran distribuidos de una manera más uniforme y para el caso del método Hunter modificado la mayor parte de las tuberías tiene diámetros entre 1 1/2" y 3".

El análisis de estas gráficas refleja como las diferencias en las demandas generan diseños con diferencias considerables que necesariamente deben impactar su comportamiento hidráulico. De otra parte, la totalización realizada de las longitudes por cada diámetro permite de manera sencilla establecer el costo total de la red empleando la curva de costos mostrada en la Figura 4. Los resultados de esta comparación se muestran a continuación.

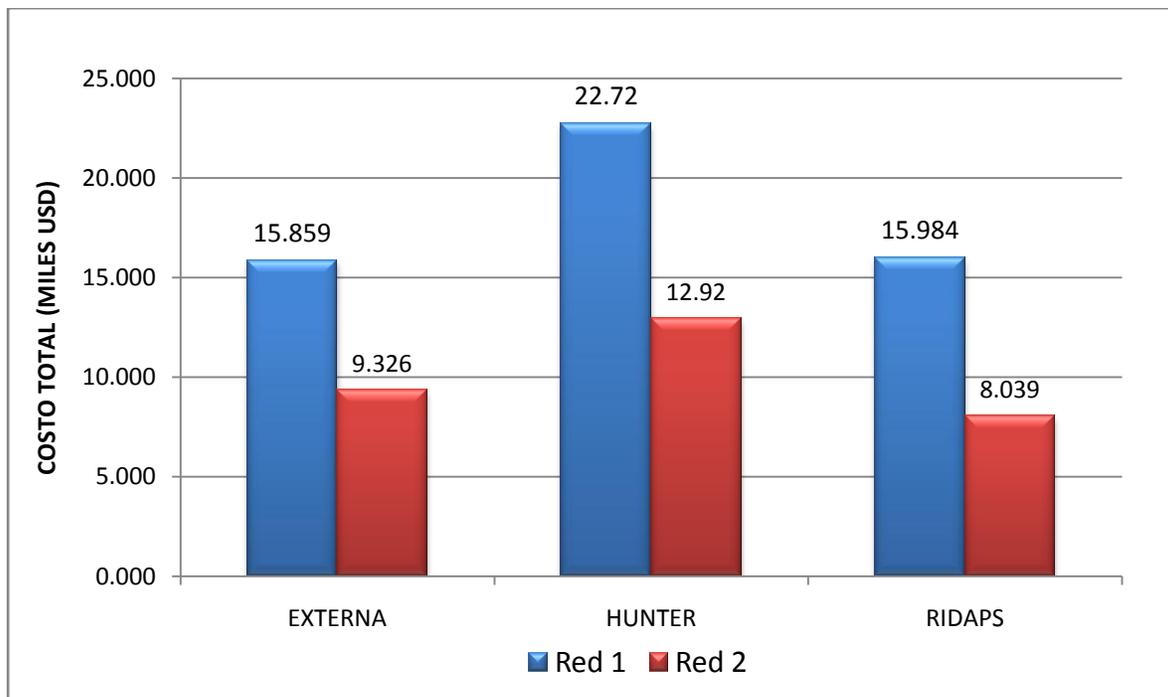


Figura 20. Comparación de costos para las tres metodologías y las dos redes de ejemplo.

Como es de esperarse las redes calculadas mediante el método Hunter Modificado son las de más alto costo siendo este en promedio un 40% superior al de la segunda red más costosa. Para la Red 1, el costo obtenido para la metodología de redes externas y RIDAPS es prácticamente el mismo teniendo una diferencia únicamente del 1%, mientras que para el caso de la Red 2 la diferencia es

más pronunciada, encontrando que para la metodología de redes externas el costo es superior en un 16% al de RIDAPS.

El costo de las redes tiene una proporcionalidad directa con la magnitud del diámetro de las tuberías que a su vez se relaciona entre otros con el caudal a transportar. Teniendo en cuenta lo anterior, es evidente que el costo de las redes obtenidas mediante el método Hunter Modificado debe ser más alto ya que los caudales a transportar son ostensiblemente mayores que los de las otras metodologías; de igual forma, es claro que para el caso de la Red 1 todos los costos deben ser más altos ya que las longitudes de tubería dada la topología de la red son muy superiores a los de la Red 2.

La similitud en los costos de la metodología de redes externas y RIDAPS para la Red 1 radica en que si bien existe una diferencia importante en los caudales introducidos para ambos métodos, para el caso de RIDAPS el cálculo no se elabora totalizando estos caudales sino mediante la estimación del escenario más crítico en el cual el caudal es muy inferior, siendo de 4.3 L/s frente a los 5.2 L/s que se tienen para el caso de la metodología de redes externas. Esto también es válido para el caso de la Red 2, en el que el caudal total de RIDAPS es de 5.15 L/s mientras que el de redes externas es de 6.06 L/s, sin embargo, para esta red, la diferencia en costos es más pronunciada ya que al ser mucho más corta y plana, hay un mayor aprovechamiento de la energía disponible que genera diámetros menores y por ende menores costos.

Habiendo analizado a nivel general las diferencias entre los diámetros calculados mediante cada una de las metodologías empleadas, es relevante realizar un análisis de las diferencias puntuales encontradas tubo a tubo. Los resultados de esta comparación para la Red 1 se muestran a continuación.

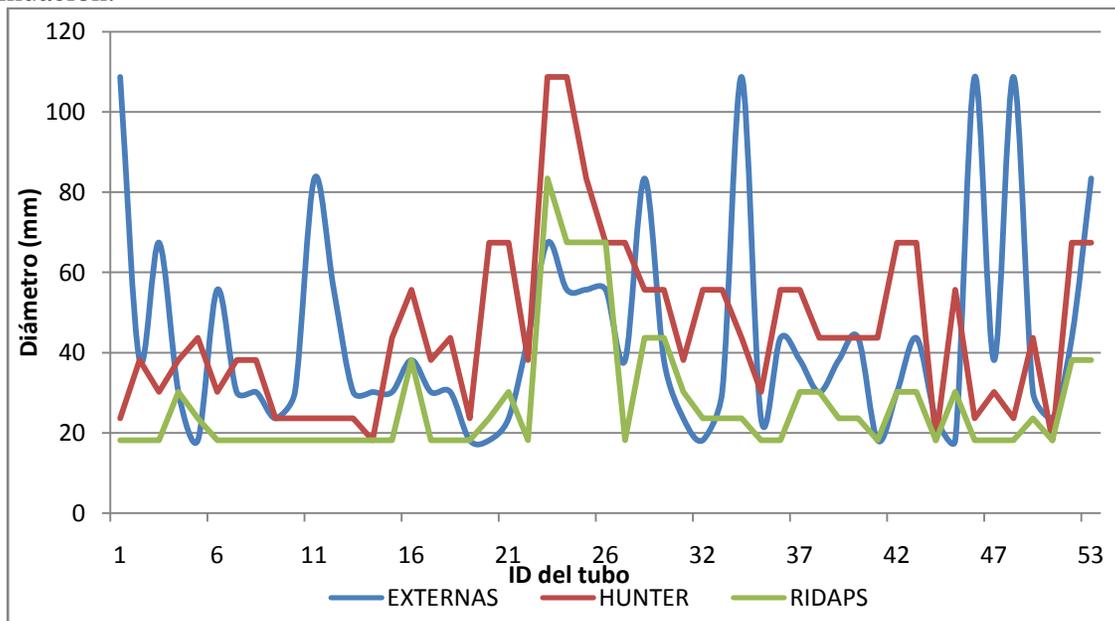


Figura 21. Comparación de diámetros tubo a tubo para la Red 1.

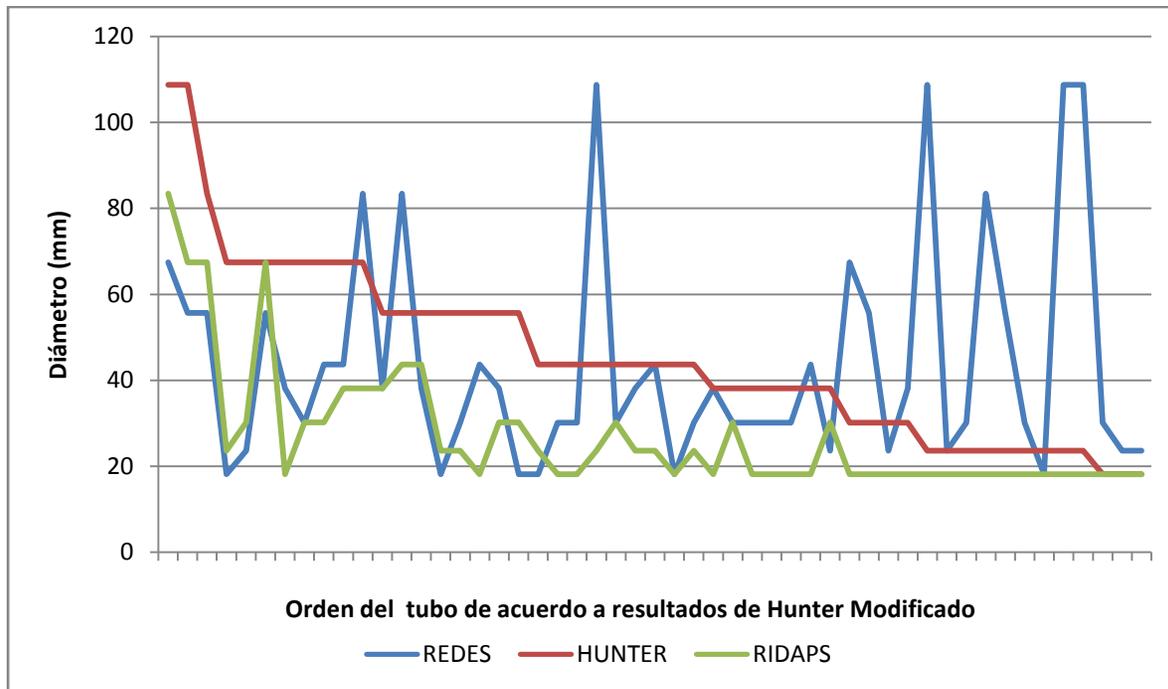


Figura 22. Comparación de diámetros para la Red 1 (organizados por resultados de Hunter).

Como se puede observar en las Figuras, los diámetros arrojados por la aplicación del método Hunter Modificado son superiores en casi todos los casos, lo que complementa los resultados encontrados al analizar la longitud total de cada uno de los diámetros, mostrando que la razón para encontrar estas mayores longitudes no solo radica en la longitud de los tramos que tienen estos diámetros sino en la cantidad de veces que estos se presentan.

Es claro que los diámetros encontrados mediante la aplicación de RIDAPS no superan en ningún caso los encontrados por el método Hunter Modificado; no obstante, vale la pena resaltar que en buena parte de los casos se observa que el patrón de las dos gráficas es similar a pesar de que exista una importante diferencia en la magnitud de los resultados. Un ejemplo de ello es que los mayores diámetros para las dos metodologías se presentan para los tubos 23 y 24 que representan los dos primeros del ramal principal y los menores para los tubos 9 al 13 que son las acometidas hacia las edificaciones 1 a 3.

Este resultado es parecido al encontrado por CIACUA (2011), cuando al realizar la comparación de estas dos metodologías para el caso de redes internas, obtuvieron resultados muy similares en cuanto a la variación y la magnitud de los resultados. Este hecho se puede explicar, en que si bien las dos metodologías son diferentes, ambas incluyen una aproximación probabilística del consumo de agua y por lo tanto la manera en la que en ellas se calculan los caudales para realizar el diseño es similar, mientras que tiene una diferencia marcada con el procedimiento de diseño de redes externas en el que los caudales simplemente se totalizan. La similitud en los patrones de los métodos de Hunter y RIDAPS, parece indicar que si se introdujeran caudales mínimos de mayor

magnitud para la ejecución de este último, los resultados obtenidos para los diámetros de la red serían muy similares en tamaño.

En la Figura 22, en la que se ordenan los tubos de mayor a menor diámetro de acuerdo con los resultados obtenidos por el método Hunter, es evidente que en al menos un 15% de los tramos, los diámetros encontrados para la metodología de redes externas superan a los encontrados por el método Hunter Modificado; estos diámetros se encuentran entre las 3” y 4”, tamaños que como se observó en la Figura 18, tienen longitudes marginales y que corresponden a pequeños tramos en su mayoría de conexión a acometidas en las que el algoritmo de diseño del programa REDES busca optimizar la energía remanente para cumplir con la presión mínima requerida. El patrón de variación que se observa para esta metodología no es similar a ninguna de las otras dos implementadas.

Los resultados del mismo análisis para el caso de la Red 2 se muestran en las siguientes gráficas.

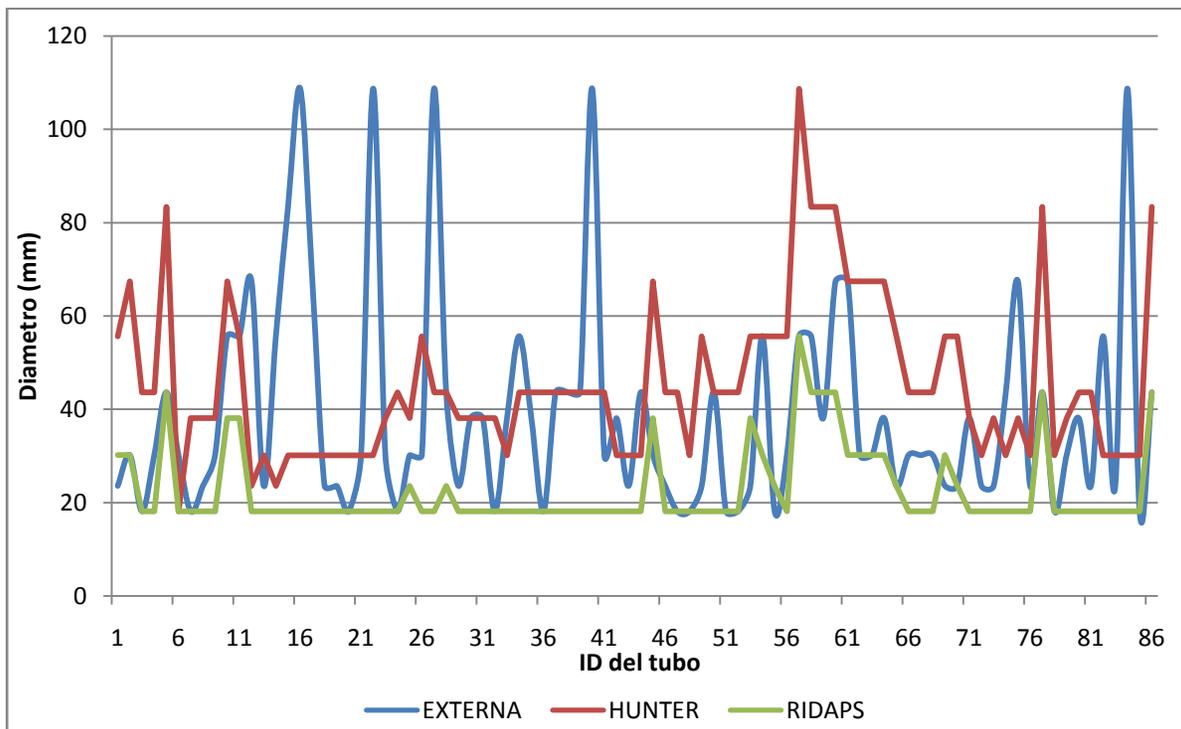


Figura 23. Comparación de diámetros tubo a tubo para la Red 2.

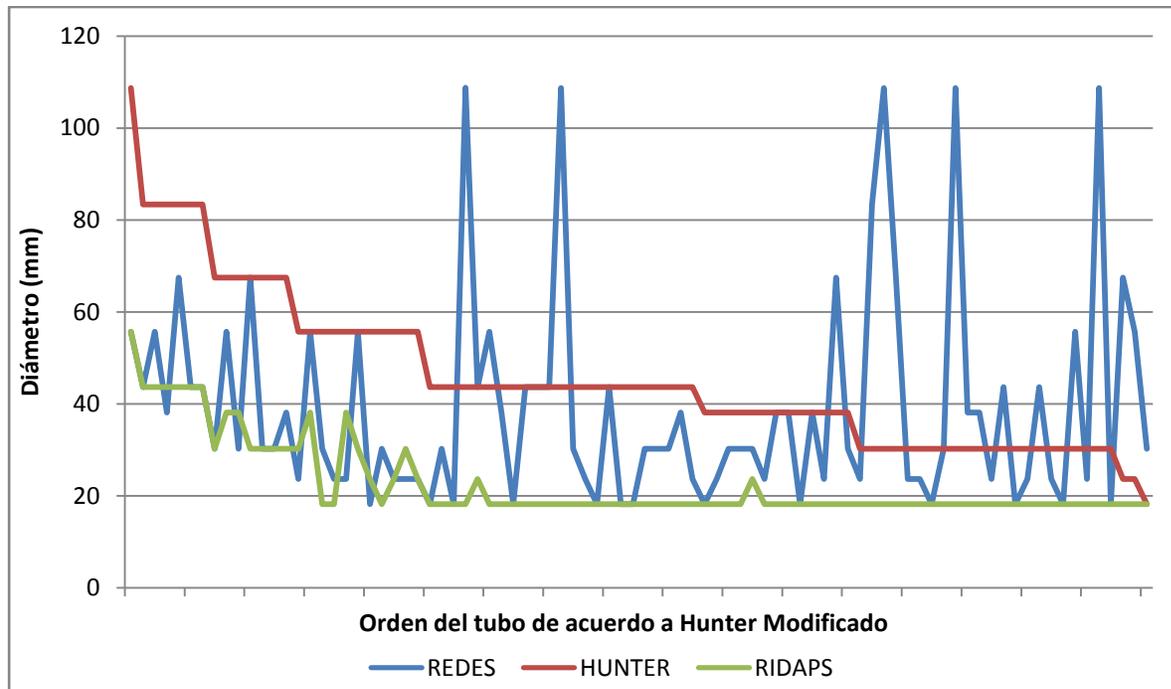


Figura 24. Comparación de diámetros para la Red 2 (organizados por resultados de Hunter).

Tal como se observó para la Red 1, los patrones de variación de los diámetros son similares para los métodos de Hunter Modificado y RIDAPS, presentando los mayores diámetros en la tubería principal (tubos 6, 57, 60, 76 y 86). En las Figura 23 se observa con claridad como los tubos de mayor diámetro del método Hunter (mayores a 1 ½”) son superiores en todos los casos a los de las demás metodologías, mientras que para las tuberías de menor diámetro esta diferencia se hace menos notoria y de hecho una gran cantidad de tubos que en el método Hunter resultaron con un diámetro de ¾”, para el caso de la metodología de redes Externas tienen diámetros mucho mayores. En la mencionada gráfica también se puede apreciar con claridad el predominio del diámetro mínimo en los resultados obtenidos con RIDAPS, no solo en longitud de los tubos sino en cantidad de los mismos.

A nivel general, de la comparación entre los diámetros obtenidos se debe resaltar que los resultados obtenidos mediante el método Hunter, muestran mayores tamaños en la mayoría de los casos aunque en una cantidad relevante son sobrepasados por los de la metodología de redes externas. No obstante en los casos que esto sucede, las longitudes suelen ser pequeñas y corresponder a diámetros de acometidas.

Se debe resaltar la similitud en los patrones de variación de los diámetros para los resultados obtenidos mediante RIDAPS y el método Hunter Modificado, el cual se presenta como consecuencia de la forma como estos agregan los caudales y cuya diferencia radica en la magnitud de las demandas mínimas que se introdujeron al ejecutar RIDAPS.

Con las comparaciones realizadas hasta este punto, se puede fácilmente deducir que para las redes de ejemplo analizadas, la red más costosa y de mayor tamaño es la calculada mediante el método Hunter Modificado, seguida de la calculada mediante el método de redes externas y por último la diseñada con RIDAPS. No obstante, esta deducción no permite afirmar que alguna de ellas deba ser aceptada como la óptima o descartada por sus altos costos, ya que ante la incertidumbre con respecto a los caudales reales instantáneos de funcionamiento, es necesario analizar el comportamiento hidráulico de estas redes frente a diferentes escenarios de consumo a fin de evaluar su respuesta ante condiciones reales de operación y de esta manera evaluar su funcionalidad para complementar los resultados encontrados y poder concluir sólidamente cual metodología es la que mejor se adapta al diseño del tipo de redes analizadas en este estudio.

5.3 COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS REDES OBTENIDAS

A fin de evaluar la funcionalidad de los diseños obtenidos mediante cada una de las metodologías para las redes de ejemplo se plantearon tres escenarios de consumo que podrían tener lugar durante la operación normal del sistema. Los escenarios planteados consisten en suponer que una cierta cantidad de aparatos se encuentra encendidos de forma simultánea; para evaluarlos se introdujo la topología de las redes obtenidas mediante cada metodología al programa REDES introduciendo las demandas correspondientes a cada escenario y ejecutando la función *Calcular Hidráulica en Estado Estable*; una vez ejecutado este procedimiento para cada una de las redes obtenidas se procedió a comparar las presiones en cada nodo para de esta forma determinar si la red tiene un comportamiento aceptable desde el punto de vista hidráulico.

Para cada red de ejemplo se plantearon dos escenarios comparativos. Para la Red 1, los escenarios se plantearon en función de una cantidad de duchas abiertas en los edificios de alojamiento y de sanitarios en funcionamiento en los demás edificios; esta cantidad fue multiplicada por los caudales mínimos presentados en la Tabla 3 obteniendo de esta forma la demanda de cada acometida. Los dos escenarios planteados corresponden a cuando el 15% y el 30% de los aparatos analizados se encuentran encendidos; para todos los casos la lavandería y el casino se encuentran encendidos a su máxima capacidad. En el Anexo B se pueden apreciar las visualizaciones de los resultados arrojados por el programa REDES para cada condición analizada, en las siguientes gráficas se observa la variación de las presiones en los nodos de las redes diseñadas cuando se presenta cada escenario para el caso de la Red 1.

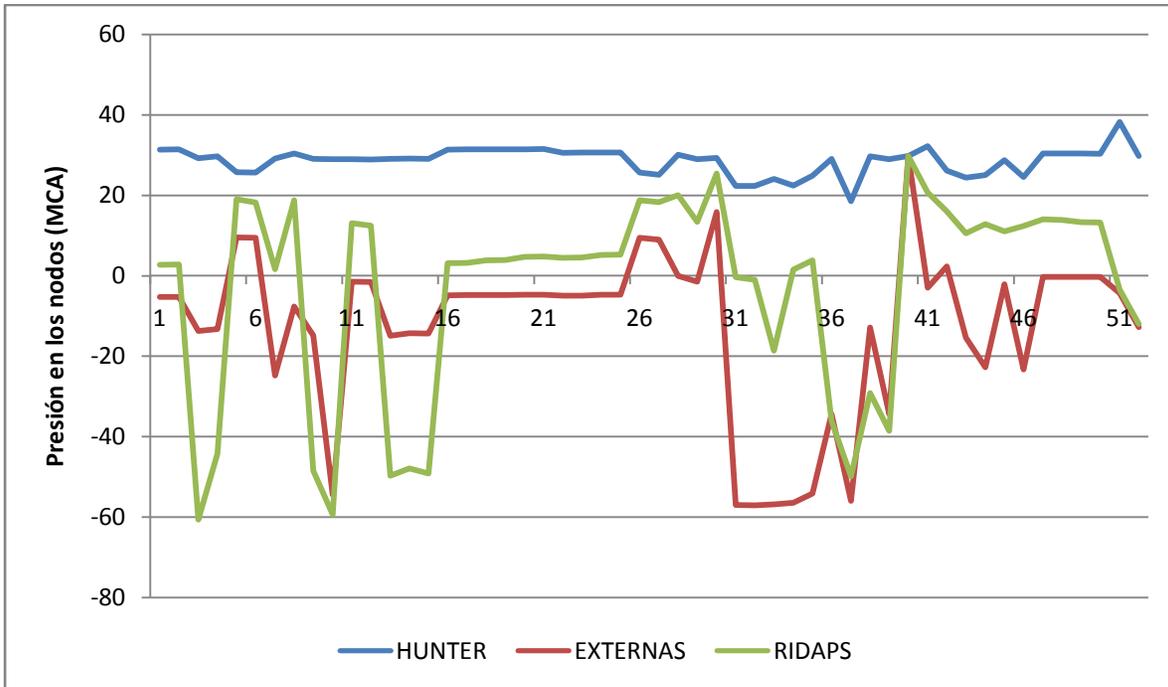


Figura 25. Resultados Escenario1 – Red 1.

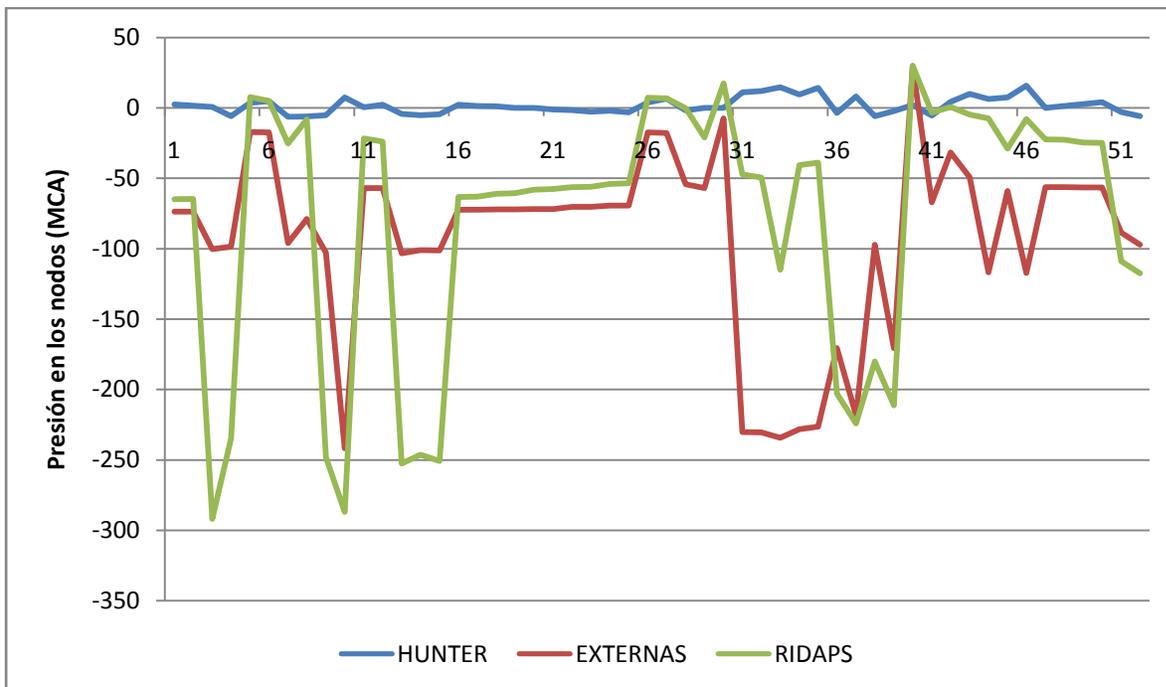


Figura 26. Resultados Escenario2 – Red 1.

Al analizar el comportamiento de las presiones en los tres escenarios de consumo planteados para las tres redes diseñadas para la Red 1, resulta claro que el conjunto de diámetros que presenta un mejor comportamiento hidráulico es el obtenido mediante el método de Hunter Modificado. Para el escenario 1, que tiene los caudales más bajos, la presión promedio obtenida para la mencionada red es de 25 mca la cual excede la presión mínima requerida de 7 mca garantizando el correcto funcionamiento de los aparatos servidos; mientras tanto la red obtenida mediante la metodología de redes externas presenta un 86% de los nodos con presiones negativas y la obtenida mediante RIDAPS presenta un 16% de los nodos bajo la misma condición. Asimismo, en la red obtenida mediante la metodología de redes externas, un 88% de los nodos no alcanzan la presión mínima, mientras que para la obtenida con RIDAPS un 59% tienen esta misma condición.

Al aumentar el caudal y analizar el escenario 2, se observa que nuevamente la red obtenida mediante el método Hunter presenta mayores presiones en todos los nodos (se exceptúa el nodo 40, el cual es intermedio y no corresponde a una acometida de consumo). Para este escenario, este conjunto de diámetros presenta un 80% de los nodos por debajo de la presión mínima requerida, y un 38% con presiones inferiores a 0 mca. En cuanto a la red obtenida mediante la metodología de redes externas, un 98% de los nodos tiene presiones menores a la mínima requerida y en todos los casos estas presiones son negativas; por su parte en la red obtenida mediante RIDAPS, un 92% de los nodos tiene presiones menores a la mínima requerida y un 86% tiene presiones negativas.

Para el caso de la Red 2, se plantearon dos escenarios de consumo basados en las particularidades del tipo de campamento que abastece. Considerando que la totalidad de las estructuras abastecidas son contenedores, en todas ellas es posible el uso simultáneo de sanitarios y duchas; no obstante, se considera más crítico el uso de estas últimas ya que en el caso de los sanitarios un bajo caudal significa mayores tiempos de llenado del tanque lo que en sí no impide su uso, mientras que bajos caudales o presiones en las duchas retrasarían notablemente las actividades de aseo personal que son las que representan el mayor pico de consumo. Considerando que en esta red no se abastecen de forma representativa otras estructuras diferentes a alojamientos y baterías de baño, los escenarios planteados corresponden a cuando el 15% y 30% de las duchas se encuentran en funcionamiento; para todos los casos, se considera que el casino y la lavandería se encuentran trabajando a su máxima capacidad. En las siguientes gráficas se puede observar la variación de presiones para las redes obtenidas frente a los escenarios de consumo propuestos, la visualización de los resultados obtenidos en el programa REDES se puede observar en el Anexo C.

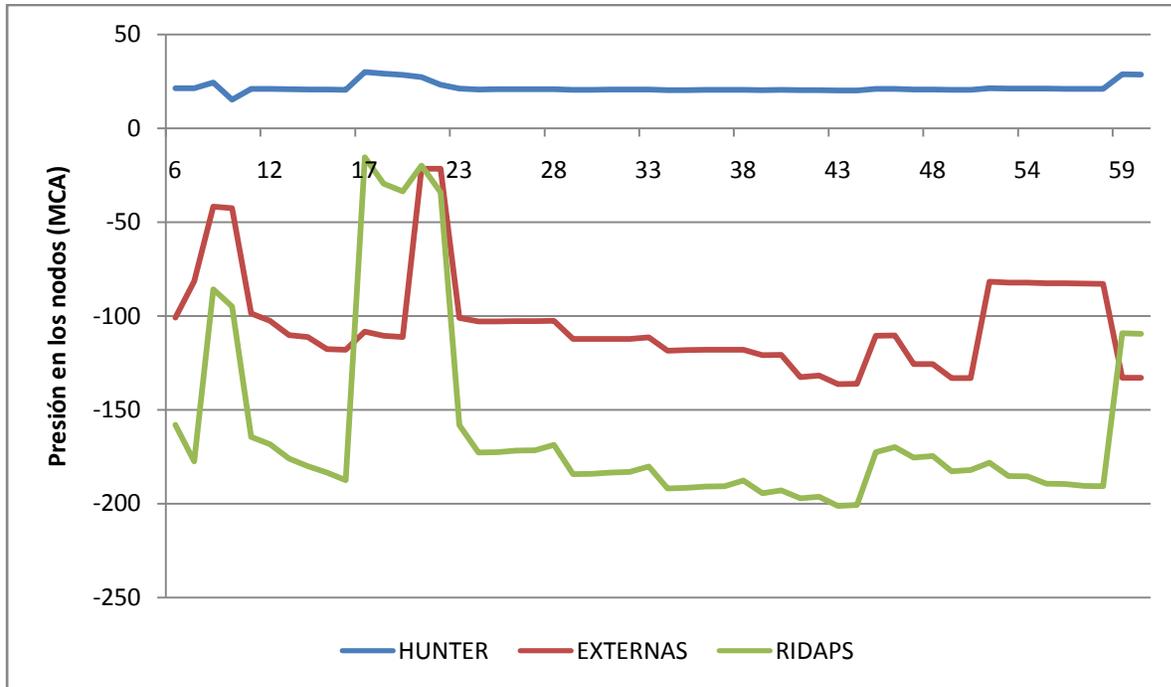


Figura 27. Resultados Escenario1 – Red 2.

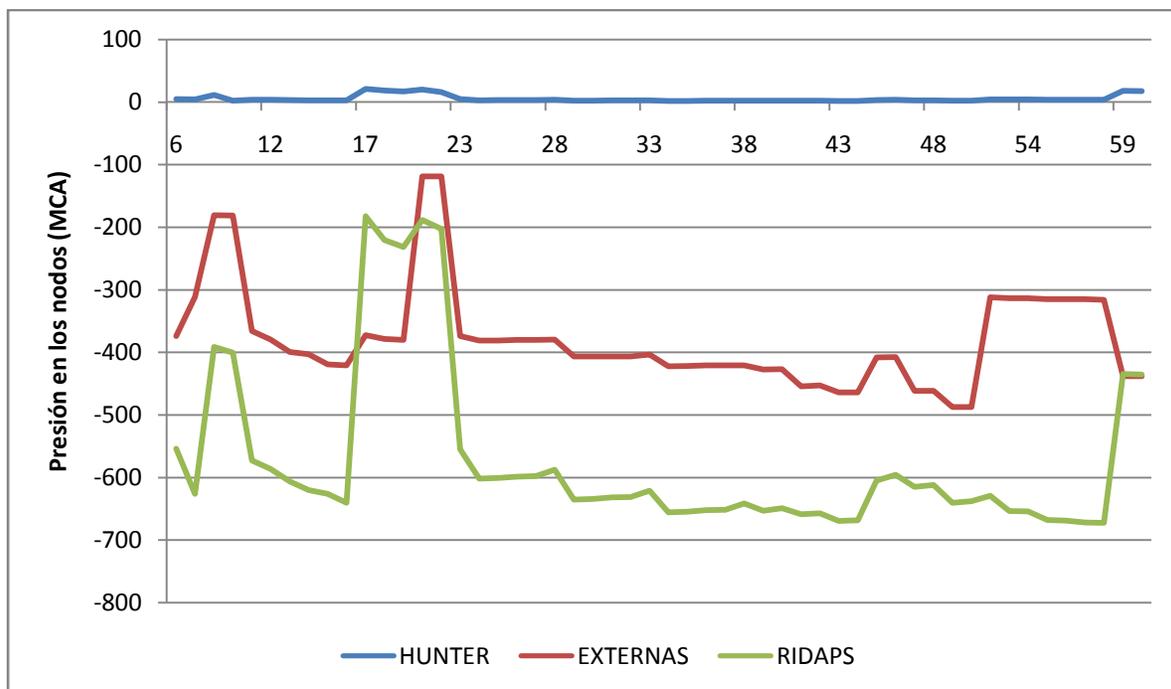


Figura 28. Resultados Escenario 2 – Red 2.

Al igual que para el caso de la Red 1, para los dos escenarios la red obtenida mediante el método de Hunter Modificado es la que mayores presiones presenta en todos los nodos, mostrando un mejor comportamiento hidráulico que las demás. No obstante, para el caso de las redes obtenidas mediante la metodología de redes Externas y RIDAPS el comportamiento en la Red 2 es diferente al mostrado para la Red 1, ya que en este caso las redes obtenidas mediante la primera, muestran un mejor comportamiento hidráulico, teniendo presiones superiores en el 75% de los casos. Este hecho se presenta debido a la diferencia en las suposiciones que se tuvieron al introducir las demandas mínimas al RIDAPS, lo que ocasiona que los escenarios críticos que considera el programa sean diferentes y por lo tanto los diseños generados también lo sean.

Para las dos redes de ejemplo, los patrones para los diferentes escenarios se conservaron cambiando únicamente sus magnitudes, lo cual era de esperarse ya que las demandas en todos los nodos se modificaron linealmente entre los escenarios sin encender o apagar diferentes cantidades de los mismos. Se destaca que los cambios en las presiones para el caso de la Red 2 son más pronunciados lo cual es lógico considerando que los caudales para esta red son mayores.

Para el caso particular de la Red 2, en el escenario 1 la red obtenida mediante el método Hunter Modificado presenta en todos los nodos una presión superior a la mínima requerida (7 mca), mientras que las redes obtenidas mediante RIDAPS y la metodología de redes externas presentan la totalidad de los nodos con presiones inferiores a 0. Para el caso del escenario 2, la red del método Hunter Modificado tiene un 62% de los nodos con presiones por debajo de la mínima y ninguno de ellos con presiones negativas; es claro que en el caso de este escenario, las redes obtenidas mediante RIDAPS y la metodología de redes externas tienen la totalidad de los nodos con presiones negativas.

En general, se debe resaltar que el escenario 2 parece representar caudales muy altos que difícilmente se presentarán en la realidad y por lo tanto para las dos redes de ejemplo, los resultados obtenidos muestran que la mayoría de las presiones son inferiores a la requerida; a pesar de ello los resultados son válidos para analizar a nivel conceptual el comportamiento hidráulico de las redes.

5.4 COMPARACIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez analizadas las diferencias entre los datos de entrada, las características de las redes y su comportamiento hidráulico, es posible realizar una comparación global de los resultados para establecer la metodología más recomendable para realizar el diseño de redes de distribución de agua para campamentos y ciudadelas temporales.

A través de este capítulo, se observó que las redes obtenidas mediante el método Hunter Modificado se calcularon con las mayores demandas, por lo que los diámetros obtenidos son más grandes y sus costos de construcción son más altos. Al evaluar su comportamiento hidráulico frente a diferentes escenarios, se observó que las redes obtenidas mediante este método, presentaron en todos los escenarios analizados, presiones superiores a las de las redes obtenidas

mediante las demás metodologías, lo cual por sí solo no representa ninguna ventaja comparativa, pero que si se tiene en cuenta que fue el único método que arrojó redes que bajo algunos escenarios presentaron la totalidad de las presiones por encima de la mínima requerida, es claro que este es el método que ofrece los mejores resultados desde el punto de vista funcional para realizar el diseño de las redes de distribución que son objeto de este estudio.

Vale la pena resaltar que el diseño de las redes para el caso del método Hunter Modificado se realizó tubo a tubo con las demandas calculadas de acuerdo con lo establecido en la NTC 1500 pero no se incluyó ningún algoritmo de optimización, por lo que no hay razón para pensar que el diseño evaluado en este estudio es el más cercano al óptimo que se puede encontrar mediante este método y por lo tanto, las diferencias en costos entre esta metodología y las demás analizadas podrían ser menores que las encontradas.

Los resultados obtenidos mediante el programa RIDAPS muestran que es posible que los caudales mínimos supuestos por acometida sean muy bajos y por consiguiente las redes obtenidas fueron subdimensionadas por ende los resultados desde el punto de vista hidráulico no fueron los apropiados. Aún así, a pesar de que las demandas con las cuales se alimentó el programa son similares para los nodos de consumo a las introducidas para el caso de la metodología de redes externas, las redes calculadas mediante el programa RIDAPS presentaron un mejor comportamiento que las redes calculadas mediante la mencionada metodología para el caso de una red de ejemplo típica de una ciudadela temporal. Dada la naturaleza del programa, es posible que si el análisis de la red se hubiera realizado hasta las acometidas de cada uno de los aparatos sanitarios la red obtenida hubiera mostrado un mejor comportamiento hidráulico; también es posible que si el programa se hubiera alimentado con caudales mínimos instantáneos reales medidos para los diferentes tipos de acometidas presentes en las redes, los resultados serían diferentes.

La metodología de redes externas no arrojó resultados satisfactorios ya que subdimensiona el caudal en las acometidas a tal punto que este toma valores menores a los mínimos requeridos para un solo aparato a pesar de que en cada punto analizado se conecta un grupo de los mismos; por tal motivo arroja diseños con diámetros muy pequeños, y a diferencia de RIDAPS no se vislumbra alguna modificación a los datos de entrada que permita obtener mejores diseños, ya que un aumento en el caudal de las acometidas de acuerdo con datos reales instantáneos llevaría a sobredimensionamiento en la red ya que para esta metodología todos los caudales deben ser sumados y no hay una aproximación probabilística que lleve a realizar el diseño bajo un escenario crítico en el que se considere solo el uso de ciertos aparatos.

En general no se apreciaron diferencias significativas en los resultados obtenidos entre las dos redes de ejemplo más allá de la diferencia en los resultados obtenidos mediante RIDAPS la cual obedece a la diferencia en las suposiciones realizadas para alimentar al programa con los caudales mínimos por acometida. La similitud en los resultados indica que las conclusiones obtenidas son válidas tanto para campamentos como para ciudadelas temporales a pesar de las diferencias que estas redes pueden tener en cuanto a distribución de la demanda, población y aparatos sanitarios atendidos.

6 CONCLUSIONES

El cálculo hidráulico de redes internas y redes externas obedece a los mismos principios físicos; sin embargo sus datos de entrada son diferentes ya que la normatividad técnica y legal establece diferentes valores para los caudales y presiones mínimas requeridas según sea el caso. Estableciendo una presión mínima requerida igual para los dos casos, la diferencia entre estos métodos se reduce a la diferencia en la estimación de la demanda que se considera para el diseño.

Las metodologías de diseño de redes externas basan la estimación de la demanda en la definición de un caudal de agua a suministrar de acuerdo con la población a servir y a los usos del agua, mientras que en las metodologías de diseño de redes internas se cuenta con aproximaciones empíricas, semiempíricas y probabilísticas con las que se calcula el caudal de agua tramo a tramo en función de la cantidad de usuarios y el tipo de aparatos a abastecer.

Para establecer la metodología que mejor se ajusta al diseño de redes de distribución de agua potable en campamentos y ciudadelas temporales, que se caracterizan por ser instalaciones que tienen características tanto de redes externas como de redes internas, se compararon el método de Hunter Modificado que está establecido en la NTC1500 implementado mediante una aplicación de hoja electrónica, la metodología de diseño de redes externas basada en lo establecido en el RAS 2000 la cual se desarrolló en el programa REDES y un método moderno que analiza el consumo de agua como un proceso estocástico que está estructurado en el programa RIDAPS.

Se analizaron dos redes de ejemplo que representan instalaciones típicas para una ciudadela temporal y para un campamento. Cada red de ejemplo fue diseñada empleando las metodologías seleccionadas y posteriormente se evaluaron sus datos de entrada, sus características y su comportamiento hidráulico frente a tres diferentes escenarios de consumo, dos de los cuales resultaron tener caudales muy altos que arrojaron una importante cantidad de nodos con presiones negativas en todos los métodos.

Para todos los casos, el método de Hunter Modificado fue el que arrojó diseños con mayores diámetros y demandas estimadas considerablemente más altas y por consiguiente mayores costos. RIDAPS arrojó los diseños con menores diámetros y menores costos. No obstante lo anterior, la funcionalidad de los diseños fue el factor preponderante para definir cuál de las metodologías arrojaba como resultado redes aplicables para el caso de estudio.

El método de Hunter Modificado fue el que mejores resultados arrojó para el diseño de las redes de ejemplo analizadas, mostrando un mejor comportamiento hidráulico en todos los escenarios de consumo planteados y siendo el único método con el que se obtuvo una red en la que la presión en todos los nodos fuera superior a la mínima requerida en alguno de los citados escenarios.

El diseño realizado mediante el método de Hunter Modificado no involucró ningún algoritmo de optimización, por lo tanto es de esperarse que sea posible obtener para el caso analizado, redes cuyos costos constructivos sean menores manteniendo su funcionalidad.

El método Hunter Modificado está fundamentado en el análisis de aparatos sanitarios de la década de 1940; por esta razón a pesar de que los resultados obtenidos en este estudio fueron positivos, se debe resaltar que la estimación de demanda mediante este método es susceptible de mejorarse de acuerdo con las características actuales de los aparatos y de los patrones de consumo de agua reales, en este caso de los que se presentan en campamentos y ciudadelas temporales.

Los diseños obtenidos con RIDAPS no mostraron un buen funcionamiento ante los escenarios planteados debido a que la suposición del caudal mínimo en los nodos de consumo no estaba fundamentada en mediciones reales de caudales instantáneos en la acometida de edificaciones con servicios y aparatos sanitarios similares a los analizados. Adicionalmente, el programa está estructurado para realizar el cálculo hasta las acometidas de los aparatos y en este estudio se realizó el análisis hasta la acometida de edificaciones que contienen grupos de aparatos.

El cálculo mediante la metodología de redes externas no ofreció resultados satisfactorios, ya que el caudal de diseño se subdimensiona notablemente, lo que resulta en diseños con diámetros inferiores a los requeridos. No se vislumbra ninguna posibilidad de mejorar esta metodología para ajustarla al caso de estudio ya que cualquier modificación que aumente el caudal en todas las acometidas sobredimensionaría los ramales principales al tener que sumar todos los caudales servidos.

Tanto para el caso de campamentos como de ciudadelas temporales, empleando la información que se tiene disponible, y realizando el diseño hasta las acometidas de las edificaciones, el método de diseño de redes de distribución de agua potable que funciona mejor es el método de Hunter Modificado. Es posible que los resultados de RIDAPS mejoren ostensiblemente si el análisis se realiza hasta la acometida de los aparatos sanitarios o se alimenta el programa con caudales instantáneos reales.

7 RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar un algoritmo que permita obtener resultados cercanos al óptimo empleando el método Hunter Modificado o cualquier variación al mismo.
- Se recomienda evaluar nuevamente los resultados de este estudio realizando el cálculo en RIDAPS con caudales instantáneos reales medidos en las edificaciones típicas que componen un campamento o una ciudadela temporal.
- Para futuros estudios comparativos, se recomienda que el análisis con RIDAPS se realice hasta la acometida de cada uno de los aparatos sanitarios.
- Si no se cuenta con información real de las acometidas de las edificaciones o no es posible realizar el análisis hasta las acometidas de los aparatos sanitarios, no se recomienda la implementación de RIDAPS, y en su reemplazo emplear el método Hunter Modificado con un algoritmo de optimización.
- Se recomienda realizar una caracterización detallada de los patrones de consumo en campamentos y ciudadelas temporales que permita alimentar los modelos estocásticos disponibles o ajustar el método Hunter Modificado a los caudales reales que se pueden presentar en este tipo de instalaciones.

8 BIBLIOGRAFÍA

AKSELA, K y AKSELA M, Demand Estimation with Automated Meter Reading in a Distribution Network. En: Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 137, No. 5. (September, 2011) P. 456-467

ALCOCER, V, TZATCHKOV, V. G., y BUCHBERGER, S. Instantaneous water demand parameter estimation from coarse meter readings. En: Water distribution system analysis #8 ASCE. 2006

BLOKKER, E; VREEBURG, J y VAN DIJK, J. Simulating Residential Water Demand with a Stochastic End-Use Model En: Journal Of Water Resources Planning And Management. Vol. 136, No. 1 (Enero, 2010) P. 19-26.

CASTRO, Nelson; GARZÓN, Jorge y ORTIZ, Rafael. Aplicación de los métodos para el cálculo de caudales máximos Probables instantáneos, en edificaciones de diferente tipo. En: VI Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua: João Pessoa, Brasil. 2006.

CIACUA, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de Los Andes. Desarrollo e Implementación de una Metodología Moderna para el Diseño de redes Internas de Distribución de Agua Potable. Bogotá, D.C. 2011.

COLOMBIA, MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS 2000). Bogotá, D.C: Ministerio de Desarrollo Económico, 2000.

CORTÉS, Martín. Análisis del método de Hunter y actualización del método de cálculo para instalaciones hidráulicas en Edificios. Tesis. Instituto Politécnico Nacional, México D.F. 2008.

ESPAÑA, IDAE: INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. Guía técnica de agua caliente sanitaria central. Madrid: 2008. 133 p.

GARCÍA, V., CABRERA, E., GARCÍA-BARTUAL, R., ARREGUI, F., & GARCÍA-SERRA, J. Stochastic Model to Evaluate Residential Water Demands. En: Journal of Water Resources Planning and Management Vol. 130, No 5. (Septiembre, 2004) P.386-394.

GARCIA SOSA, Jorge. Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificios. México: Fundación ICA. 2001. 290 p.

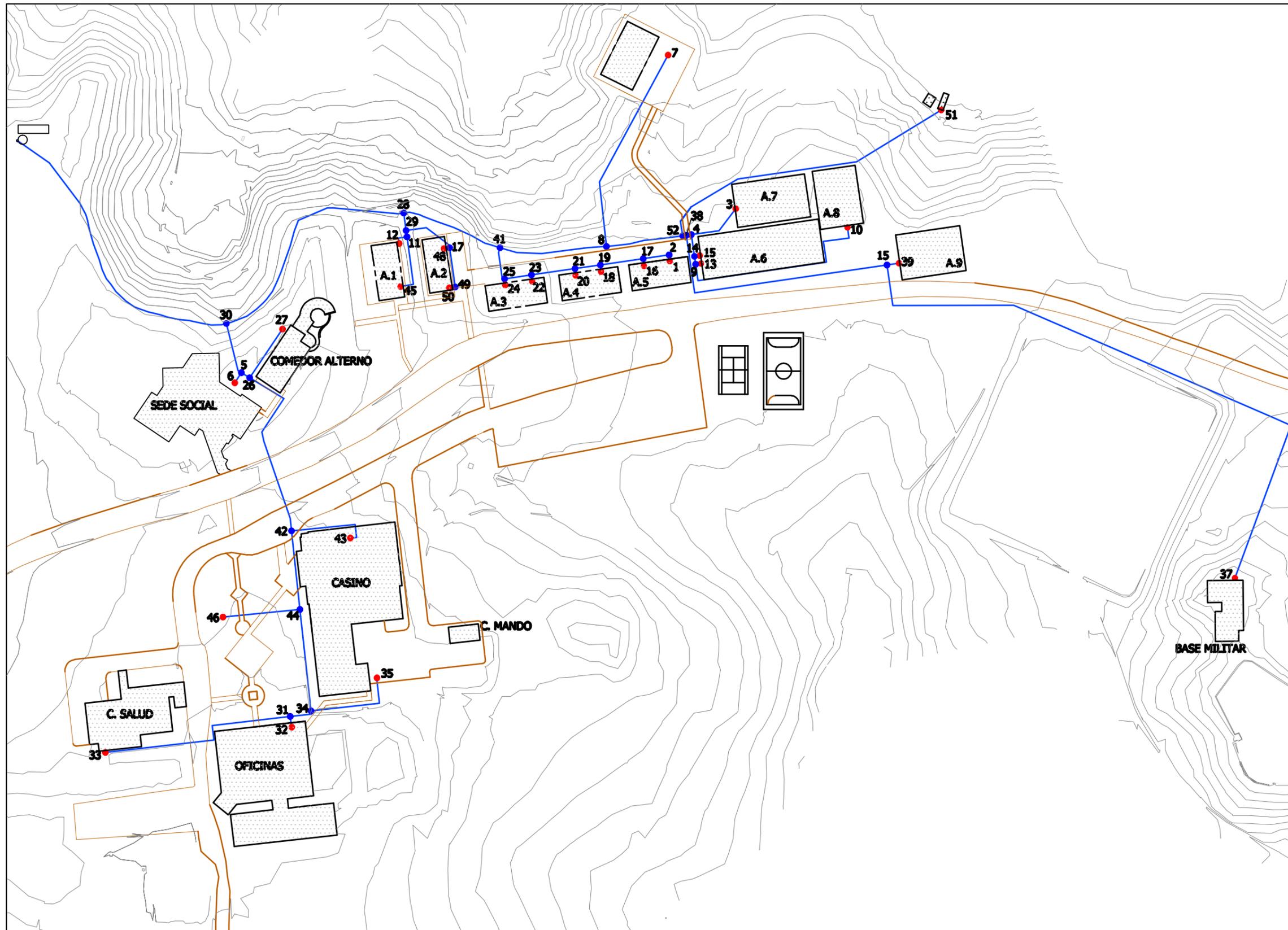
HUNTER, Roy. Methods of estimating loads on plumbing systems. Washington D.C: National Bureau of Standards. 1940. 21 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Código Colombiano de Fontanería. Bogotá D.C: ICONTEC. 2004. 101 p. (NTC 1500)

RODRIGUEZ, Hector. Diseños hidráulicos, sanitarios y de gas en edificaciones. 1 ed. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2005.233 p.

WASHINGTON, DOH: DEPARTMENT OF HEALTH. Water System Design Manual. Olympia: 2009. 325 p.

ANEXO A.
PLANOS DE LAS REDES DE EJEMPLO.



NOTAS

1. EL PLANO MUESTRA EL TRAZADO REAL DE UNA RED EXISTENTE
2. LAS ACOMETIDAS MOSTRADAS CORRESPONDEN A PUNTOS EN LOS QUE SE CONECTAN LAS INSTALACIONES INTERNAS DE LAS EDIFICACIONES.
3. LAS EDIFICACIONES DENOTADAS COMO A.# CORRESPONDEN A ALOJAMIENTOS.

CONVENCIONES

- RED DE DISTRIBUCIÓN
- NODO DE UNIÓN
- NODO DE CONSUMO
- EDIFICACIÓN ABASTECIDA
- ### NÚMERO DE NODO



ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DE SISTEMAS HÍDRICOS URBANOS

PROYECTO:
COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE REDES EXTERNAS DE DISTRIBUCIÓN DE A.P VS METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE REDES INTERNAS PARA EL CASO DE CAMPAMENTOS Y CIUDADELAS TEMPORALES

TÍTULO:
PLANTA RED 1

ASESOR: ING. JUAN SALDARRIAGA

ELABORÓ: ING. DAVID TORRADO CÓD: 201110892

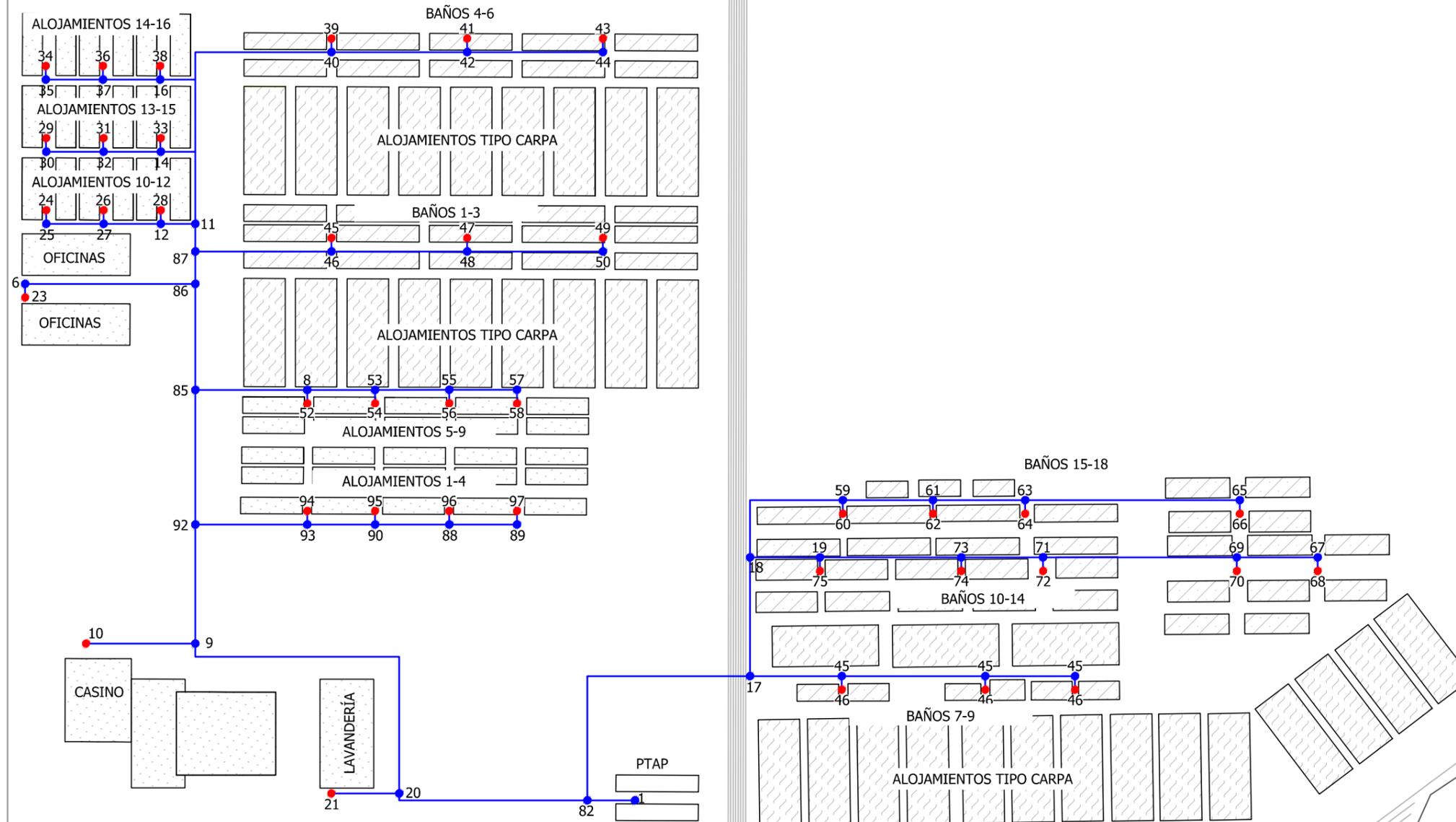
DIBUJÓ: D.F.T FECHA: 30/01/12 ESCALA: 1:1500

NOTAS

1. EL PLANO MUESTRA EL TRAZADO REAL DE UNA RED EXISTENTE
2. LAS ACOMETIDAS MOSTRADAS CORRESPONDEN A PUNTOS EN LOS QUE SE CONECTAN MANGUERAS QUE A SU VEZ SE CONECTAN A LOS CONTENDORES.
3. LOS NÚMEROS QUE INDICAN LOS ALOJAMIENTOS O BAÑOS, CORRESPONDEN AL NÚMERO DE ACOMETIDA.

CONVENCIONES

-  RED DE DISTRIBUCIÓN
-  NODO DE UNIÓN
-  NODO DE CONSUMO
-  CONTENIDOR TIPO ALOJAMIENTO
-  CONTENIDOR TIPO BAÑO
- ### NÚMERO DE NODO



ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DE SISTEMAS HÍDRICOS URBANOS

PROYECTO:
COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE REDES EXTERNAS DE DISTRIBUCIÓN DE A.P VS METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE REDES INTERNAS PARA EL CASO DE CAMPAMENTOS Y CIUDADELAS TEMPORALES

TITULO:
PLANTA RED 2

ASESOR: ING. JUAN SALDARRIAGA

ELABORÓ: ING. DAVID TORRADO CÓD: 201110892

DIBUJÓ: D.F.T. FECHA: 30/01/12 ESCALA: 1:750

ANEXO B.
***RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE LOS ESCENARIOS
PARA LA RED 1.***

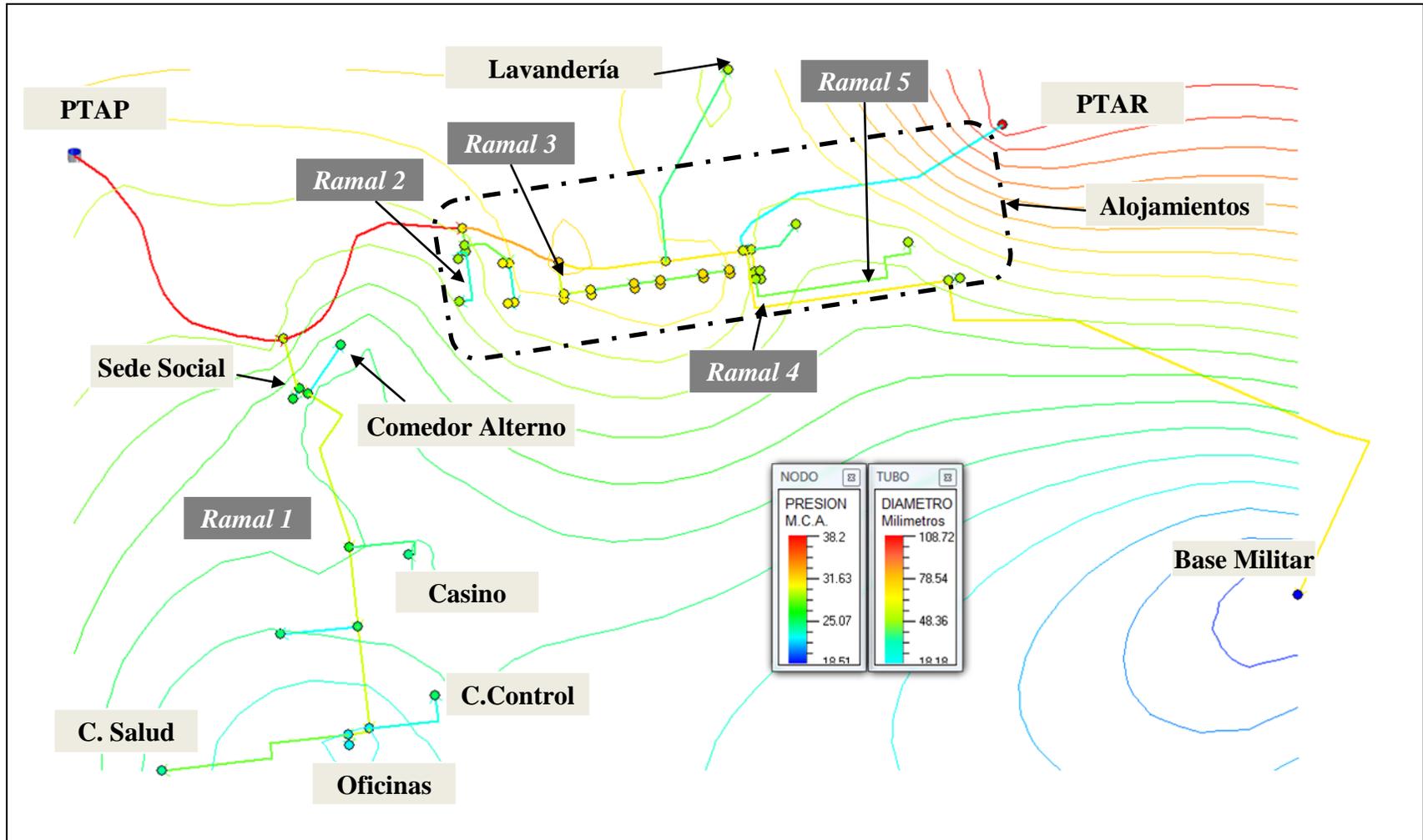


Figura 29. Escenario1 – Red 1 calculada mediante el método Hunter Modificado.

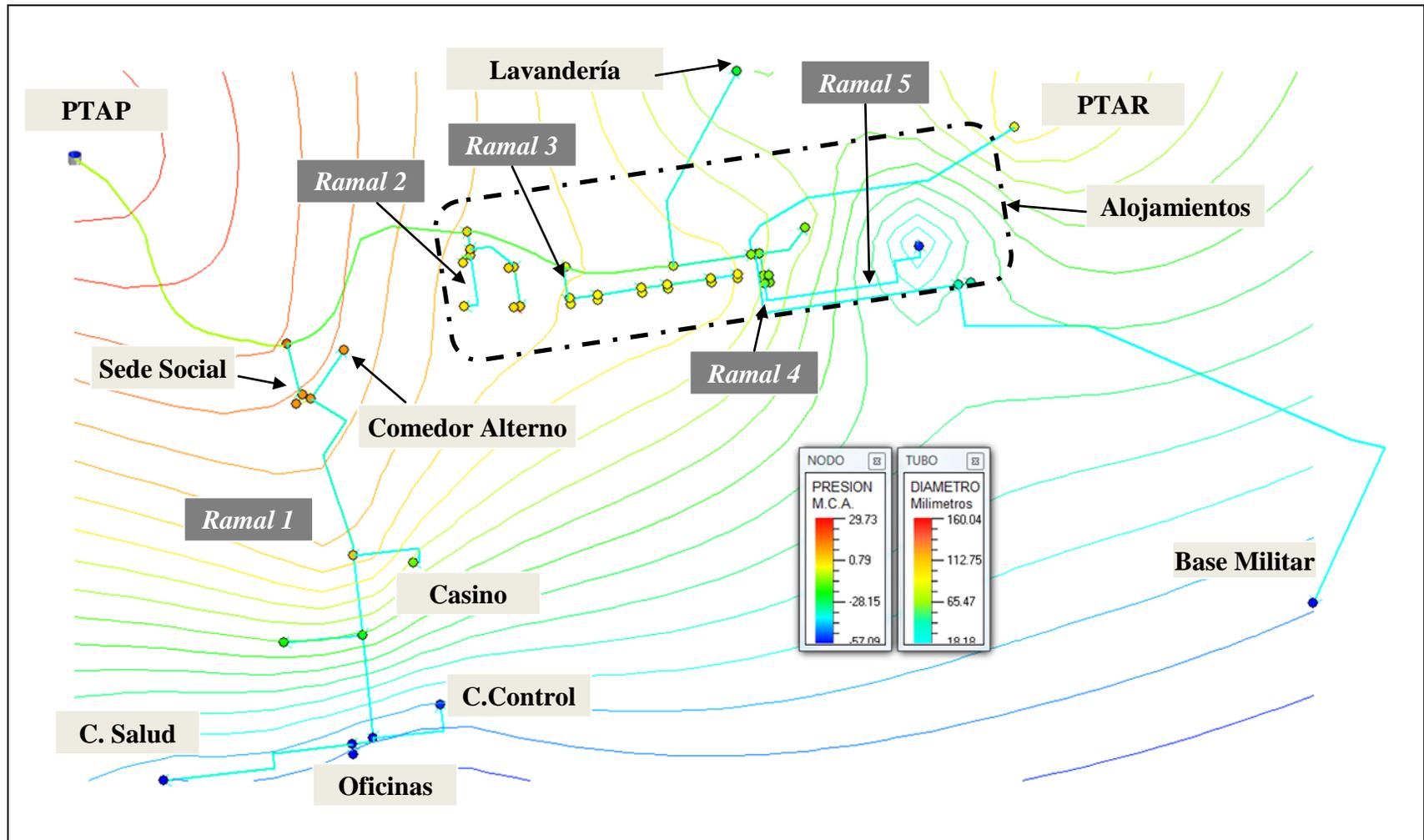


Figura 30. Escenario1 – Red 1 calculada mediante el método de diseño de redes Externas.

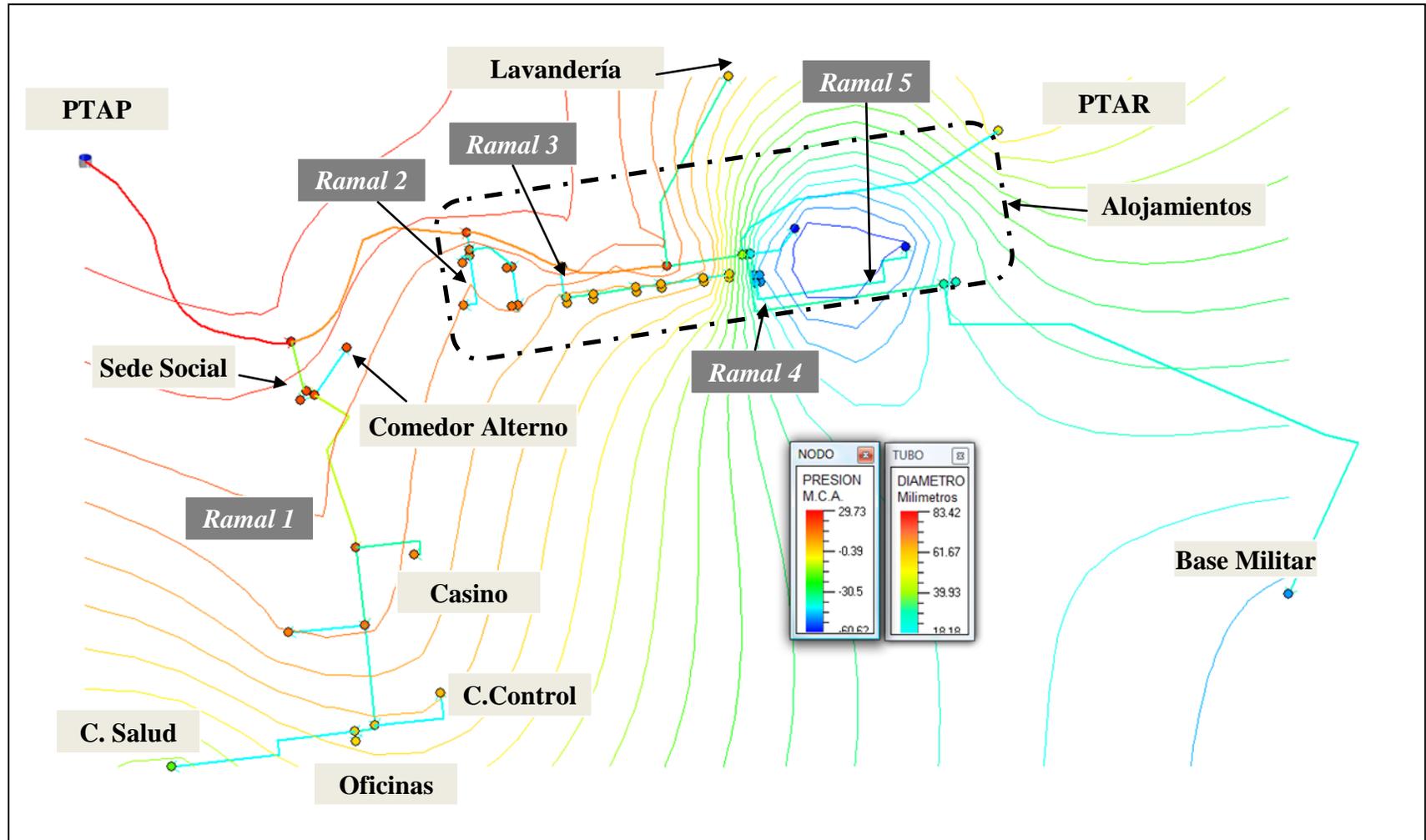


Figura 31. Escenario1 – Red 1 calculada mediante RIDAPS.

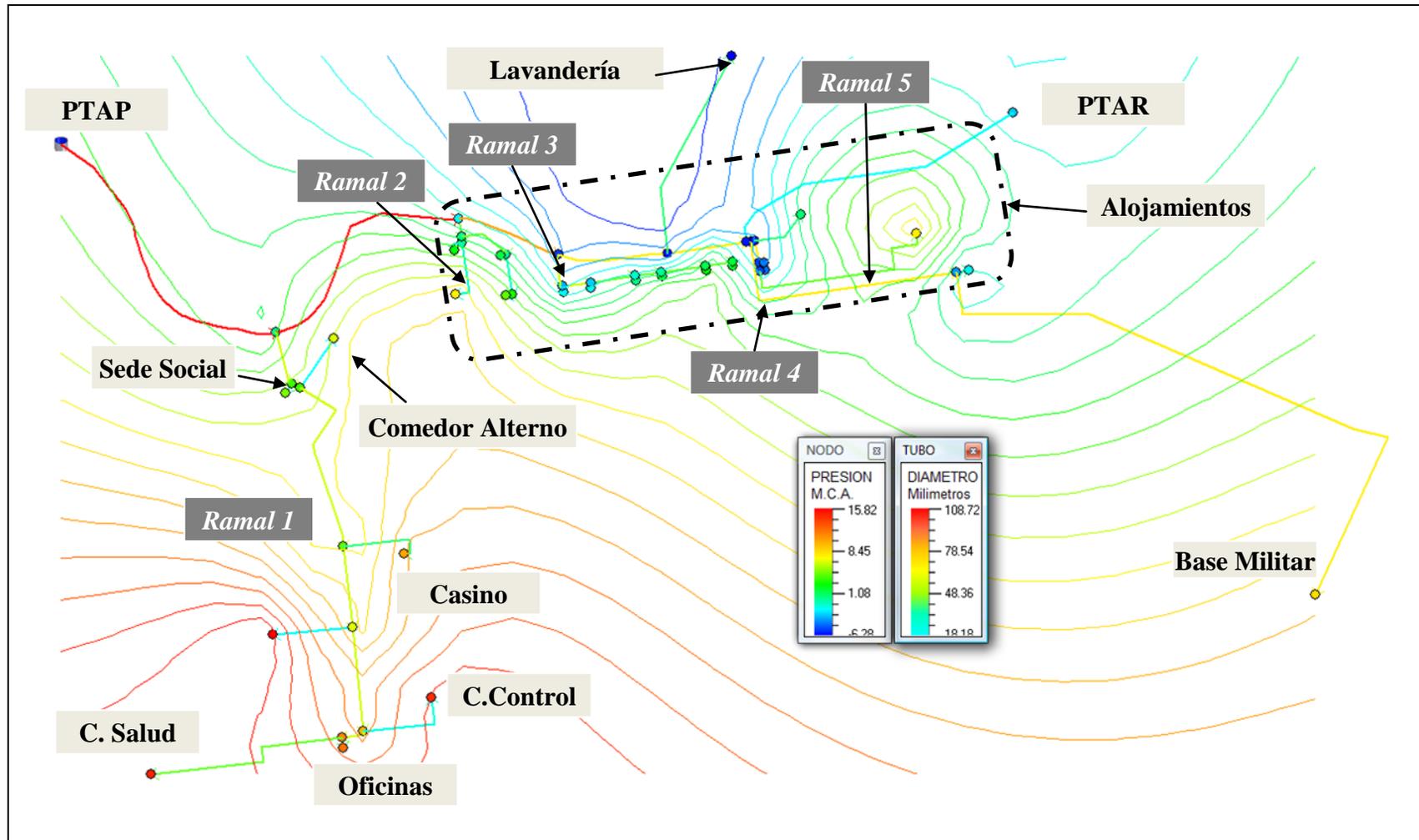


Figura 32. Escenario 2 – Red 1 calculada mediante el método Hunter Modificado.

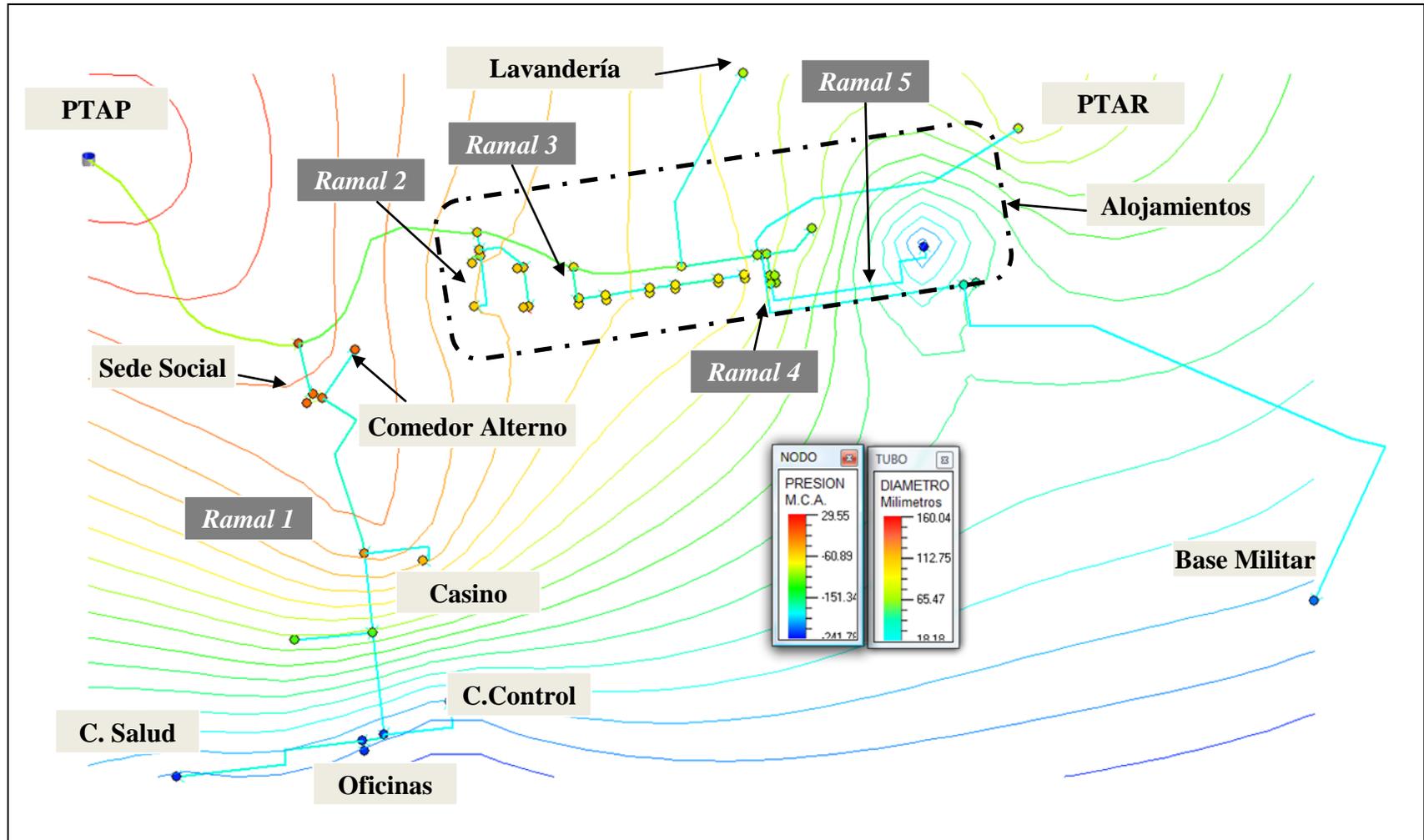


Figura 33. Escenario 2 – Red 1 calculada mediante el método de diseño de redes Externas.

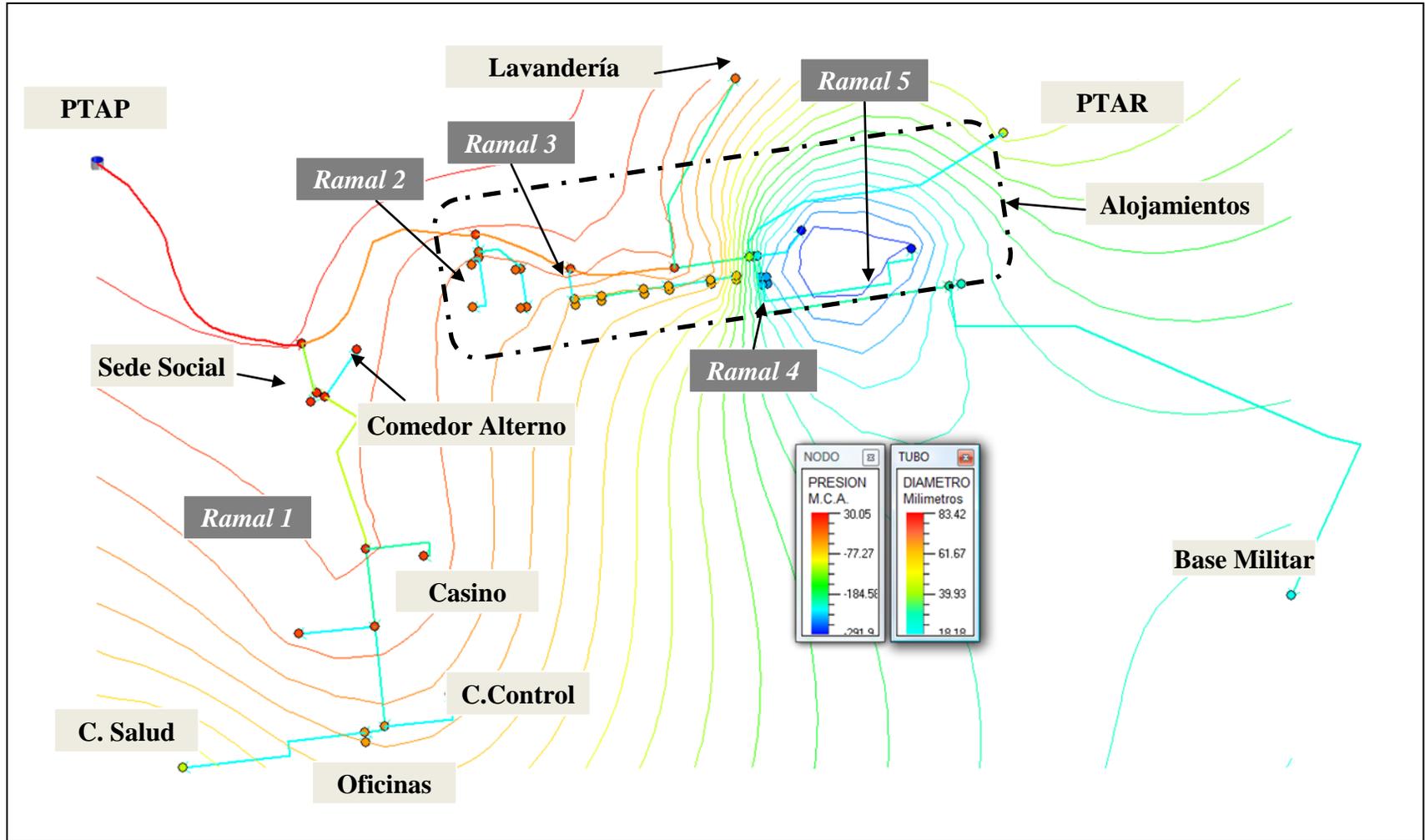


Figura 34. Escenario 2 – Red 1 calculada mediante RIDAPS..

ANEXO C.
***RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE LOS ESCENARIOS
PARA LA RED 2.***

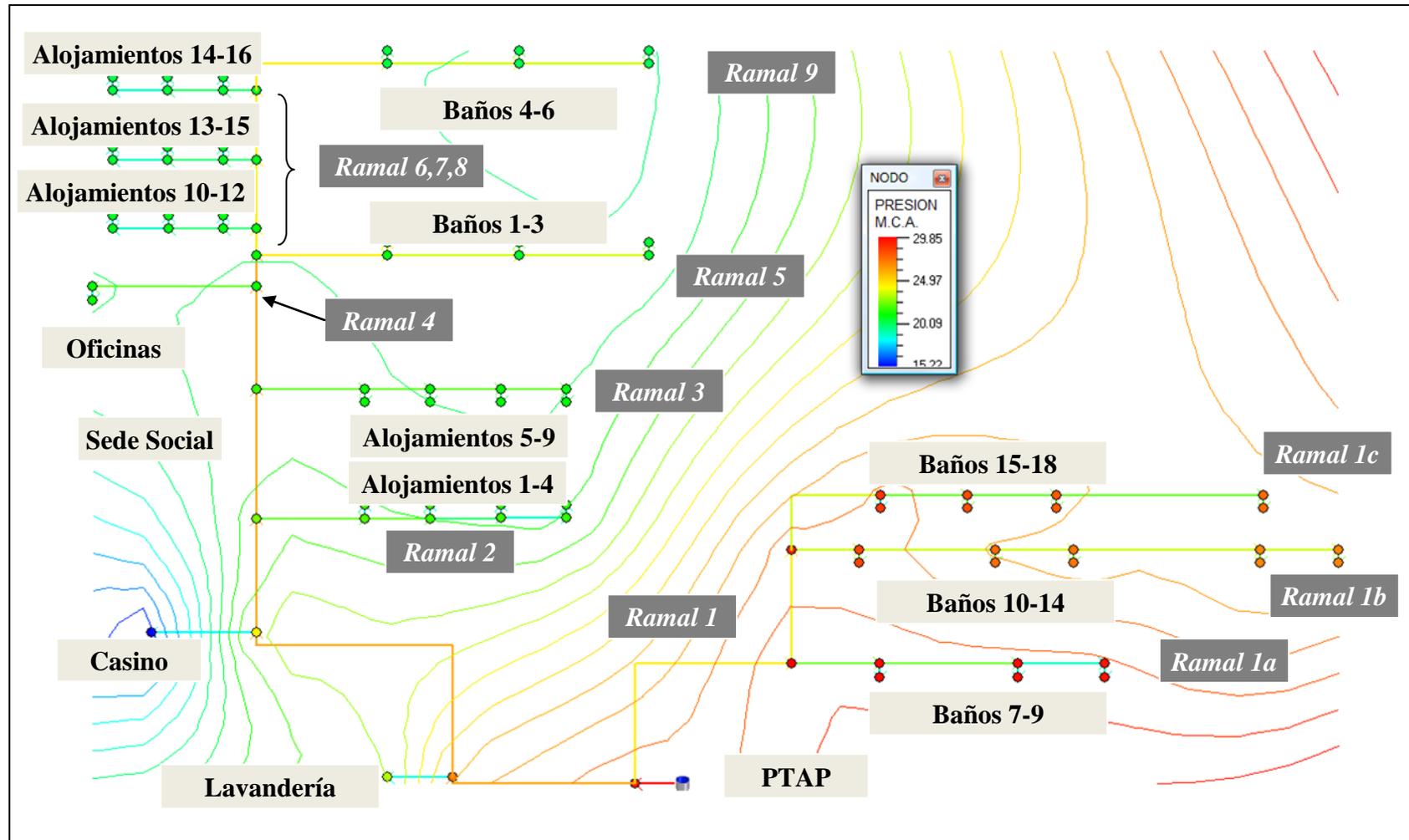


Figura 35. Escenario1 – Red 2 calculada mediante el método de Hunter Modificado.

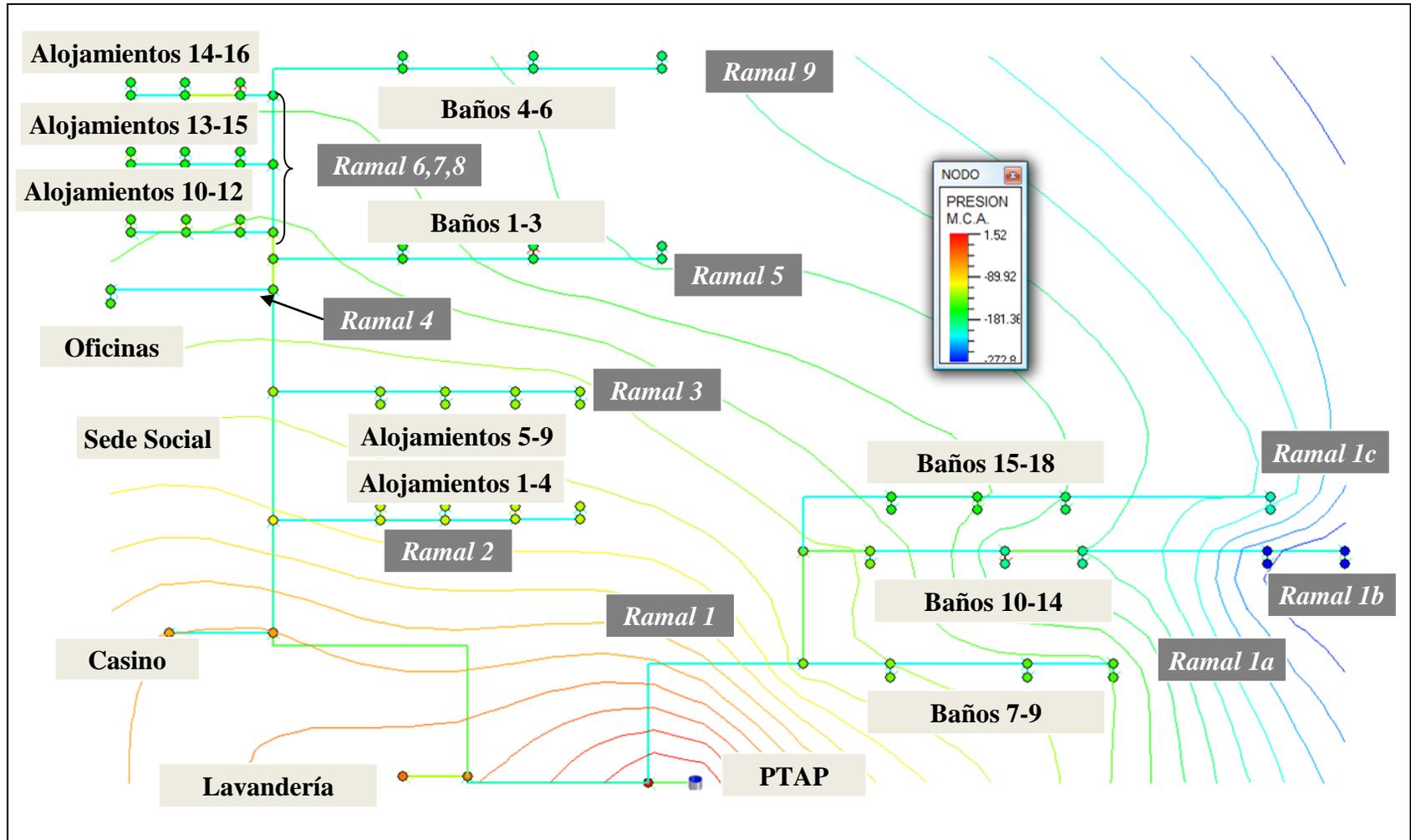


Figura 36. Escenario1 – Red 2 calculada mediante la metodología de Diseño de redes Externas

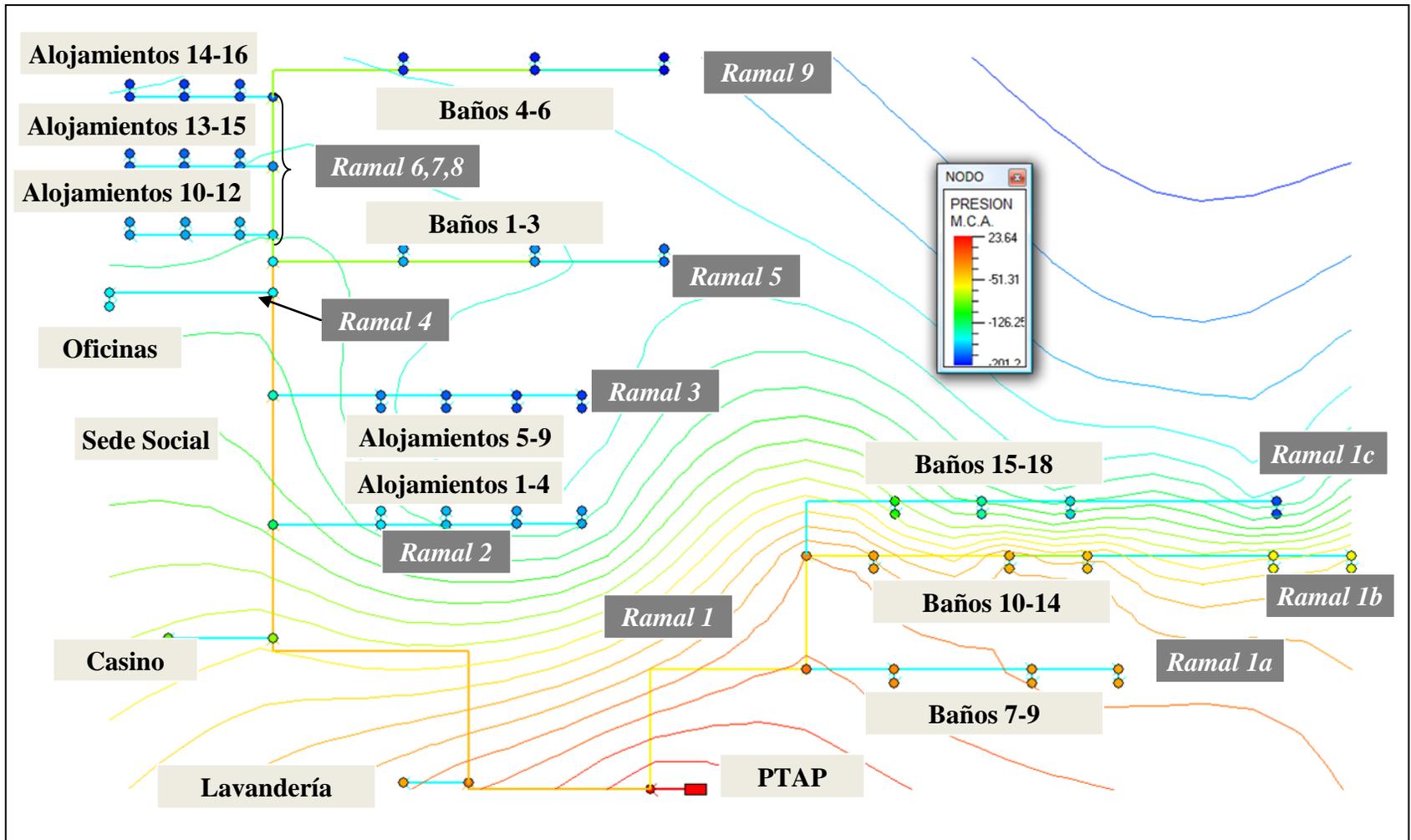


Figura 37. Escenario1 – Red 2 calculada mediante RIDAPS.

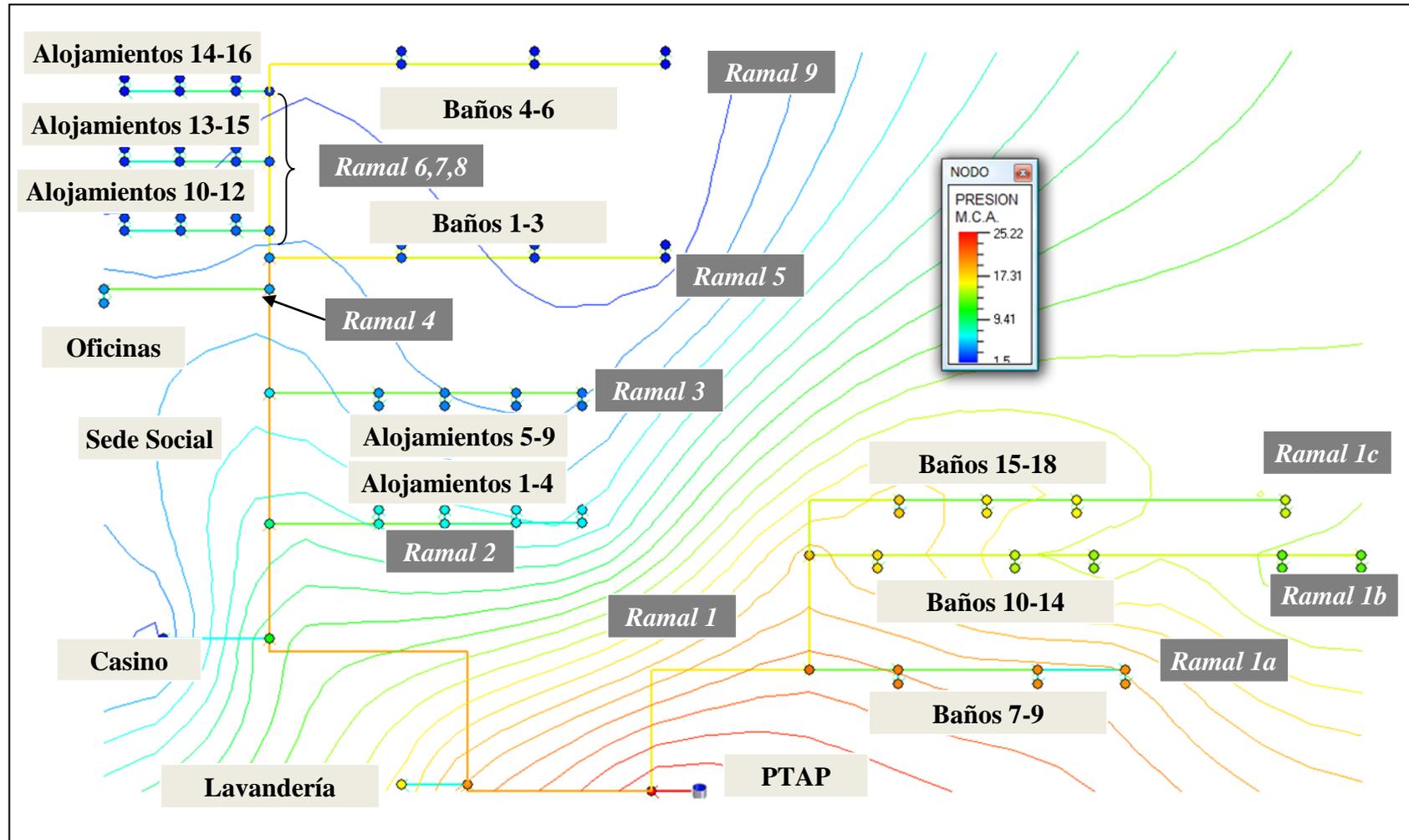


Figura 38. Escenario 2 – Red 2 calculada mediante el método de Hunter Modificado.

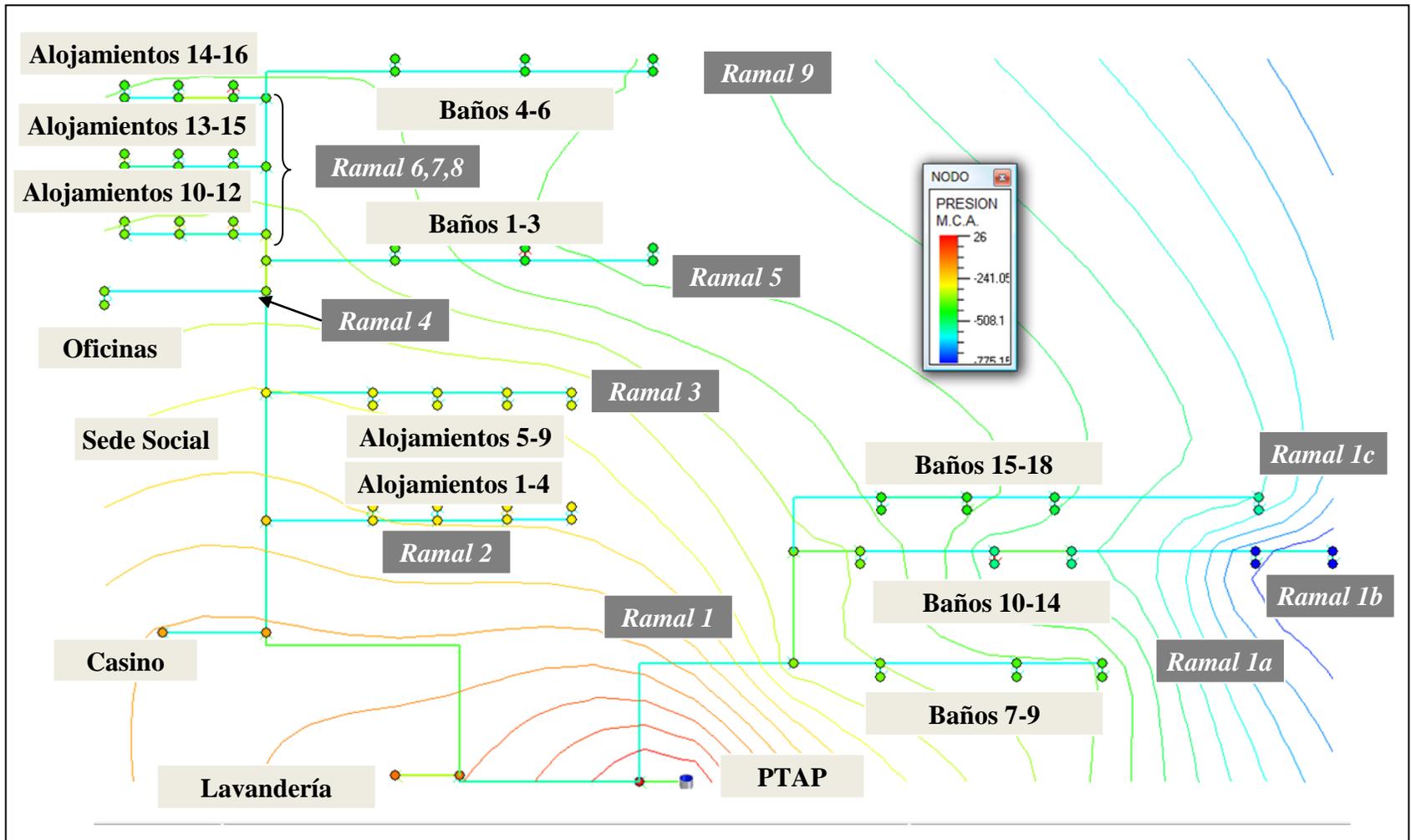


Figura 39. Escenario 2 – Red 2 calculada mediante la metodología de Diseño de redes Externas

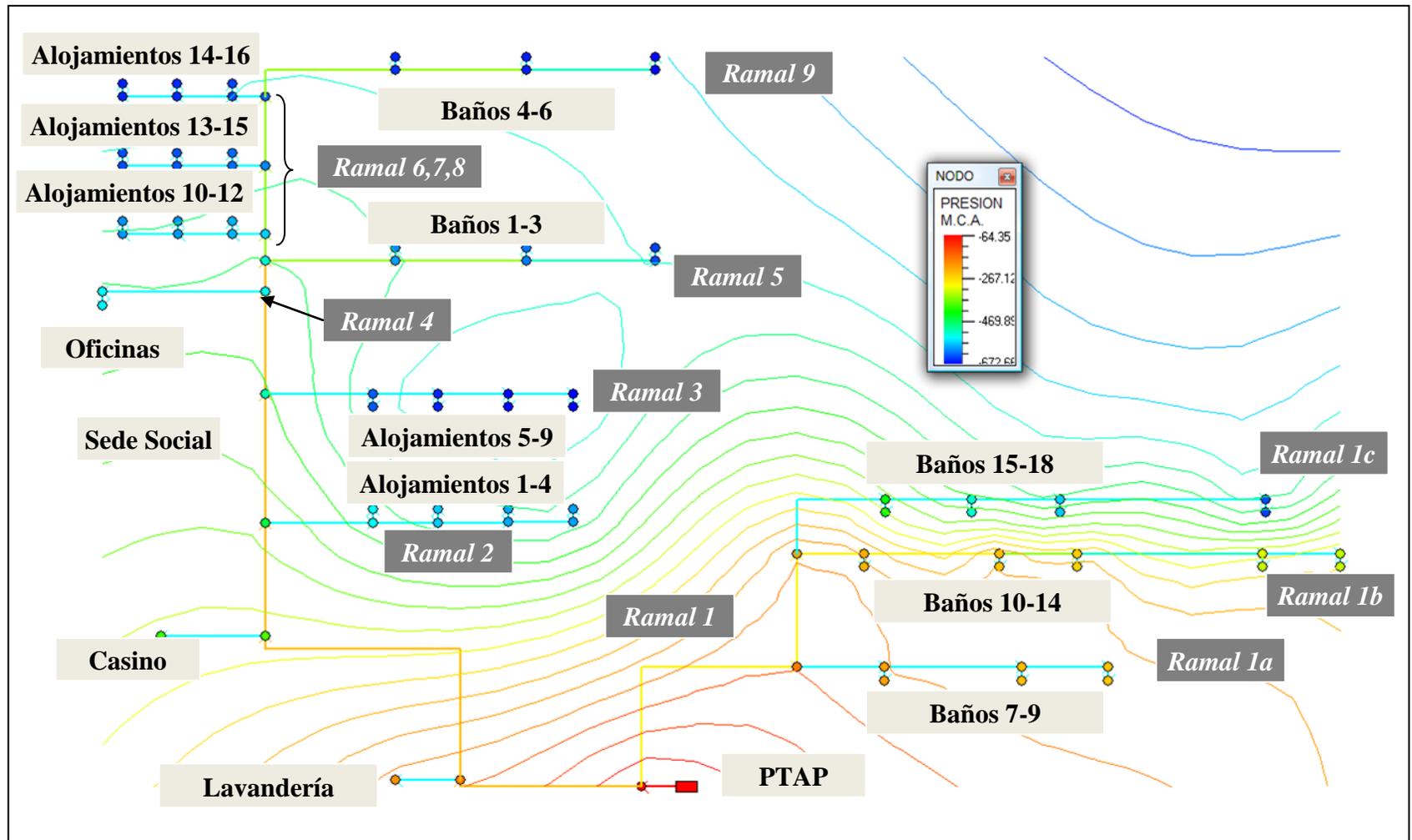


Figura 40. Escenario 2 – Red 2 calculada mediante RIDAPS.