

TESIS DE MAESTRÍA

**RELACIÓN DENSIDAD DE HABITANTES VS TOPOLOGÍA DE LAS REDES
DE AGUA POTABLE**

LAURA KATHERINE GONZÁLEZ DÍAZ

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2020**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la oportunidad de realizar esta maestría

Al ingeniero Juan Saldarriaga por compartir sus
conocimientos y guiarme en esta investigación

A mi familia por el apoyo constante

A mi hija Gabriela, por inspirarme

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo General	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
2	Marco teórico	3
2.1	Ecuaciones de resistencia fluida	3
2.2	Análisis de redes cerradas de tuberías	5
2.3	Caracterización de las redes de distribución de agua potable	7
2.3.1	Variables que intervienen en la modelación hidráulica	7
2.4	Tipos de problemas hidráulicos a solucionar	8
2.4.1	Comprobación de diseño	9
2.4.2	Diseño optimizado de redes de distribución de agua potable	9
2.5	Índices geométricos	12
2.6	Índices de confiabilidad y eficiencia energética	14
3	Metodología	16
3.1	Caracterización de las redes	16
3.2	Identificación de las redes a analizar	17
3.2.1	Sector 13 M453 B (Bogotá)	17
3.2.2	Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)	18
3.2.3	Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	19
3.2.4	Red Morro Bajo (Bucaramanga)	19
3.2.5	Red Toro (Valle del Cauca)	20
3.2.6	Red Bolívar (Valle del Cauca)	21
3.2.7	Red Modena	22
3.3	Comprobación de diseño de las redes	23
3.4	Variables y criterios a analizar	24

3.4.1	Diámetros de las tuberías.....	24
3.4.2	Presiones en los nodos.....	25
3.5	Variación de la demanda.....	26
3.6	Diseño óptimo de las redes.....	26
3.7	Índices geométricos	26
3.8	Índices de confiabilidad y eficiencia energética.....	26
3.9	Comparación de las superficies de gradiente hidráulico y de presión	26
3.10	Mapas de potencia específica de las redes.....	27
4	Resultados.....	28
4.1	Diseño optimizado de las RDAP	28
4.1.1	Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos	28
4.1.2	Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá).....	31
4.1.3	Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	33
4.1.4	Red Morro Bajo (Bucaramanga).....	36
4.1.5	Red Toro (Valle del Cauca)	38
4.1.6	Red Bolívar (Valle del Cauca).....	41
4.1.7	Red Modena	43
4.1.8	Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos	46
4.2	Índices geométricos	48
4.2.1	Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos	48
4.2.2	Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá).....	49
4.2.3	Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	49
4.2.4	Red Morro Bajo (Bucaramanga).....	49
4.2.5	Red Toro (Valle del Cauca)	50
4.2.6	Red Bolívar (Valle del Cauca).....	50
4.2.7	Red Modena	51
4.2.8	Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos	51
4.3	Índices de confiabilidad y eficiencia energética.....	52
4.3.1	Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos	52

4.3.2	Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá).....	53
4.3.3	Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	54
4.3.4	Red Morro Bajo (Bucaramanga).....	55
4.3.5	Red Toro (Valle del Cauca)	56
4.3.6	Red Bolívar (Valle del Cauca).....	57
4.3.7	Red Modena	58
4.3.8	Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos	59
4.4	Mapas de potencia específica para cada tubo de las redes.....	60
4.4.1	Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos	60
4.4.2	Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá).....	62
4.4.3	Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	63
4.4.4	Red Morro Bajo (Bucaramanga).....	64
4.4.5	Red Toro (Valle del Cauca)	65
4.4.6	Red Bolívar (Valle del Cauca).....	66
4.4.7	Red Modena	67
4.4.8	Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos.....	68
5	Análisis de resultados.....	69
5.1	Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos	69
5.2	Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá).....	77
5.3	Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	85
5.4	Red Morro Bajo (Bucaramanga).....	92
5.5	Red Toro (Valle del Cauca)	100
5.6	Red Bolívar (Valle del Cauca).....	108
5.7	Red Modena	116
5.8	Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos.....	123
6	Conclusiones.....	130
7	RECOMENDACIONES	132
8	Referencias.....	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del cálculo hidráulico de una RDAP (Juan Saldarriaga, 2016).	7
Figura 2. Criterio de I-Pai Wu para la línea de gradiente hidráulico ideal o de mínimo costo	10
Figura 3. Relación esquemática entre el caudal de diseño y el costo por unidad de longitud de la tubería ...	11
Figura 4. Red de distribución de agua potable Sector 13 M453 B (Bogotá)	17
Figura 5. Red de distribución de agua potable Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)	18
Figura 6. Red de distribución de agua potable Troncal del Caribe (Santa Marta)	19
Figura 7. Red de distribución de agua potable Morro Bajo (Bucaramanga)	20
Figura 8. Red de distribución de agua potable Toro (Valle del Cauca)	21
Figura 9. Red de distribución de agua potable Bolívar (Valle del Cauca)	22
Figura 10. Red de distribución de agua potable Modena	23
Figura 11. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos	28
Figura 12. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos	29
Figura 13. Superficies de Presión Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos	30
Figura 14. Presiones Máximas y Mínimas Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos	30
Figura 15. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)	31
Figura 16. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)	32
Figura 17. Superficies de Presión Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)	32
Figura 18. Presiones Máximas y Mínimas Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)	33
Figura 19. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	34
Figura 20. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	34
Figura 21. Superficies de Presión Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	35
Figura 22. Presiones Máximas y Mínimas Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	35
Figura 23. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Morro Bajo (Bucaramanga)	36
Figura 24. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Morro Bajo (Bucaramanga)	37
Figura 25. Superficies de Presión Red Morro Bajo (Bucaramanga)	37
Figura 26. Presiones Máximas y Mínimas Red Morro Bajo (Bucaramanga)	38

Figura 27. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Toro (Valle del Cauca)	39
Figura 28. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Toro (Valle del Cauca)	39
Figura 29. Superficies de Presión Red Toro (Valle del Cauca)	40
Figura 30. Presiones Máximas y Mínimas Red Toro (Valle del Cauca)	40
Figura 31. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Bolívar (Valle del Cauca).....	41
Figura 32. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Bolívar (Valle del Cauca).....	42
Figura 33. Superficies de Presión Red Bolívar (Valle del Cauca).....	42
Figura 34. Presiones Máximas y Mínimas Red Bolívar (Valle del Cauca).....	43
Figura 35. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Modena	44
Figura 36. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Modena	44
Figura 37. Superficies de Presión Red Modena	45
Figura 38. Presiones Máximas y Mínimas Red Modena	45
Figura 39. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos.....	46
Figura 40. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos.....	47
Figura 41. Superficies de Presión Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos	47
Figura 42. Presiones Máximas y Mínimas Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos	48
Figura 43. Porcentaje de potencia específica para Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos ...	61
Figura 44. Porcentaje de potencia específica para Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)	62
Figura 45. Porcentaje de potencia específica para Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	63
Figura 46. Porcentaje de potencia específica para Red Morro Bajo (Bucaramanga)	64
Figura 47. Porcentaje de potencia específica para Red Toro (Valle del Cauca).....	65
Figura 48. Porcentaje de potencia específica para Red Bolívar (Valle del Cauca).....	66
Figura 49. Porcentaje de potencia específica para Red Modena	67
Figura 50. Porcentaje de potencia específica para Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos..	68
Figura 51. Diámetros de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos para (a) QMHx1 = 44.75 lps, (b) QMHx2 = 89.50 lps, (c) QMHx4 = 178.99 lps y QMHx8 = 357.99 lps.	69
Figura 52. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos	70

Figura 53. Localización de centroides geométricos de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos. V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.70	
Figura 54. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos. (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico 71	71
Figura 55. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos 72	72
Figura 56. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos 73	73
Figura 57. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos 74	74
Figura 58. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos 75	75
Figura 59. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos 76	76
Figura 60. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos77	77
Figura 61. Diámetros de la Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá) para (a) QMHx1 = 98.65 lps, (b) QMHx2 = 197.29 lps, (c) QMHx4 = 394.58 lps y QMHx8 = 789.16 lps. 77	77
Figura 62. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá) 78	78
Figura 63. Localización de centroides geométricos de la Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá) . V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro. 79	79
Figura 64. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá). (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico 79	79
Figura 65. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)..... 80	80
Figura 66. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)..... 81	81
Figura 67. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)..... 82	82
Figura 68. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)..... 83	83
Figura 69. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá) 84	84
Figura 70. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá) 85	85
Figura 71. Diámetros de la Red Troncal del Caribe (Santa Marta) para (a) QMHx1 = 56.48 lps, (b) QMHx2 = 112.96 lps, (c) QMHx4 = 225.92 lps y QMHx8 = 451.84 lps. 85	85
Figura 72. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Troncal del Caribe (Santa Marta) . 86	86

Figura 73. Localización de centroides geométricos de la Red Troncal del Caribe (Santa Marta) . V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.	87
Figura 74. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Troncal del Caribe (Santa Marta). (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico	87
Figura 75. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	88
Figura 76. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	88
Figura 77. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	89
Figura 78. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	90
Figura 79. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	91
Figura 80. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	91
Figura 81. Diámetros de la Red Morro Bajo (Bucaramanga) para (a) QMHx1 = 60.78 lps, (b) QMHx2 = 121.56 lps, (c) QMHx4 = 243.12 lps y QMHx8 = 486.24 lps.....	92
Figura 82. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Morro Bajo (Bucaramanga)	92
Figura 83. Localización de centroides geométricos de la Red Morro Bajo (Bucaramanga) . V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.	93
Figura 84. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Morro Bajo (Bucaramanga). (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico	94
Figura 85. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Morro Bajo (Bucaramanga)	95
Figura 86. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Morro Bajo (Bucaramanga)	96
Figura 87. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Morro Bajo (Bucaramanga)	97
Figura 88. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Morro Bajo (Bucaramanga)	98
Figura 89. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Morro Bajo (Bucaramanga)	99
Figura 90. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Morro Bajo (Bucaramanga)	99
Figura 91. Diámetros de la Red Toro (Valle del Cauca) para (a) QMHx1 = 30.02 lps, (b) QMHx2 = 60.04 lps, (c) QMHx4 = 120.08 lps y QMHx8 = 240.16 lps.	100
Figura 92. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Toro (Valle del Cauca).....	101
Figura 93. Localización de centroides geométricos de la Red Toro (Valle del Cauca). V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.	101
Figura 94. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Toro (Valle del Cauca). (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico.	102

Figura 95. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Toro (Valle del Cauca)	103
Figura 96. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Toro (Valle del Cauca)	104
Figura 97. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Toro (Valle del Cauca)	105
Figura 98. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Toro (Valle del Cauca)	106
Figura 99. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Toro (Valle del Cauca)	107
Figura 100. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Toro (Valle del Cauca)	107
Figura 101. Diámetros de la Red Bolívar (Valle del Cauca) para (a) QMHx1 = 35.85 lps, (b) QMHx2 = 71.70 lps, (c) QMHx4 = 143.40 lps y QMHx8 = 286.60 lps.	108
Figura 102. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Bolívar (Valle del Cauca)	109
Figura 103. Localización de centroides geométricos de la Red Bolívar (Valle del Cauca) . V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.	109
Figura 104. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Bolívar (Valle del Cauca). (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico	110
Figura 105. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Bolívar (Valle del Cauca).....	111
Figura 106. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Bolívar (Valle del Cauca).....	112
Figura 107. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Bolívar (Valle del Cauca).....	113
Figura 108. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Bolívar (Valle del Cauca).....	114
Figura 109. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Bolívar (Valle del Cauca).....	115
Figura 110. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Bolívar (Valle del Cauca)	115
Figura 111. Diámetros de la Red Modena para (a) QMHx1 = 406.94 lps, (b) QMHx2 = 813.88 lps, (c) QMHx4 = 1627.76 lps y QMHx8 = 3255.52 lps.	116
Figura 112. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Modena	116
Figura 113. Localización de centroides geométricos de la Red Modena. V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.	117
Figura 114. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Modena. (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico	117
Figura 115. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Modena	118
Figura 116. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Modena	119
Figura 117. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Modena	120
Figura 118. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Modena	121

Figura 119. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Modena	122
Figura 120. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Modena.....	123
Figura 121. Localización de centroides geométricos de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos. V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.	123
Figura 122. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos. (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico	124
Figura 123. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos	125
Figura 124. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos	126
Figura 125. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos	127
Figura 126. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos	128
Figura 127. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos	129
Figura 128. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de la red Sector 13 M453 B (Bogotá)	17
Tabla 2. Caracterización de la red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)	18
Tabla 3. Caracterización de la red Troncal del Caribe (Santa Marta)	19
Tabla 4. Caracterización de la red Morro Bajo (Bucaramanga)	19
Tabla 5. Caracterización de la red Toro (Valle del Cauca)	20
Tabla 6. Caracterización de la red Bolívar (Valle del Cauca)	21
Tabla 7. Caracterización de la red Modena	22
Tabla 8. Diámetros comerciales disponibles para las tuberías de las redes a analizar	24
Tabla 9. Diámetros discretos Res Modena	25
Tabla 10. Índices geométricos Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos	48
Tabla 11. Índices geométricos Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)	49
Tabla 12. Índices geométricos Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	49
Tabla 13. Índices geométricos Red Morro Bajo (Bucaramanga)	50
Tabla 14. Índices geométricos Red Toro (Valle del Cauca)	50
Tabla 15. Índices geométricos Red Bolívar (Valle del Cauca)	51
Tabla 16. Índices geométricos Red Modena	51
Tabla 17. Índices geométricos Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos	52
Tabla 18. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos	52
Tabla 19. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos	52
Tabla 20. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos	53
Tabla 21. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos	53
Tabla 22. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)	53
Tabla 23. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)	53
Tabla 24. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)	54
Tabla 25. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)	54

Tabla 26. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	54
Tabla 27. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	54
Tabla 28. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	55
Tabla 29. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)	55
Tabla 30. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Morro Bajo (Bucaramanga)	55
Tabla 31. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Morro Bajo (Bucaramanga)	55
Tabla 32. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Morro Bajo (Bucaramanga)	56
Tabla 33. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Morro Bajo (Bucaramanga)	56
Tabla 34. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Toro (Valle del Cauca)	56
Tabla 35. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Toro (Valle del Cauca)	56
Tabla 36. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Toro (Valle del Cauca)	57
Tabla 37. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Toro (Valle del Cauca)	57
Tabla 38. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Bolívar (Valle del Cauca)	57
Tabla 39. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Bolívar (Valle del Cauca)	57
Tabla 40. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Bolívar (Valle del Cauca)	58
Tabla 41. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Bolívar (Valle del Cauca)	58
Tabla 42. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Modena	58
Tabla 43. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Modena	58
Tabla 44. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Modena	59
Tabla 45. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Modena	59
Tabla 46. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos	59
Tabla 47. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos	59
Tabla 48. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos	60
Tabla 49. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos	60

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de Darcy – Weisbach.....	3
Ecuación 2. Factor de fricción f para flujo laminar	3
Ecuación 3. Ecuación de Blassius.....	4
Ecuación 4. Ecuación de Colebrook – White	4
Ecuación 5. Cálculo de pérdidas menores	4
Ecuación 6. Ecuación de conservación de la masa	5
Ecuación 7. Ecuación de conservación de la masa para cada nudo	5
Ecuación 8. Ecuación de altura piezométrica	6
Ecuación 9. Ecuación de caudal.....	6
Ecuación 10. Ecuación de la línea de gradiente hidráulico parabólica.....	9
Ecuación 11. Centroide de volumen.....	13
Ecuación 12. Centroide de potencia específica	13
Ecuación 13. Centroide de diámetro	13
Ecuación 14. Centroide de potencia.....	13
Ecuación 15. Potencia específica.....	13
Ecuación 16. Centroide en la coordenada X.....	14
Ecuación 17. Centroide en la coordenada Y.....	14
Ecuación 18. Índice de resiliencia.....	14
Ecuación 19. Índice de resiliencia modificado.....	14
Ecuación 20. Índice de resiliencia centralizado	15
Ecuación 21. Porcentaje de potencia consumida.....	15
Ecuación 22. Diferencia porcentual de elevación en la LGH	26
Ecuación 23. Diferencia porcentual de elevación en la Presión	27
Ecuación 24. Cambio porcentual relativo de potencia específica	27

1 INTRODUCCIÓN

El agua potable es el producto número uno más consumido en el planeta, como recurso hídrico es vital para el ciclo de vida del ser humano, ya que, gracias a este se generan todo tipo de procesos industriales, comerciales, recreacionales, de producción de alimentos, entre otros; que permiten el desarrollo socioeconómico de una comunidad, siendo en Colombia el acceso al agua potable un derecho fundamental, según lo contempla su Constitución Política de 1991, así como el sexto de los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas, considerándose este como un servicio de primera necesidad; razón por la cual, se hace necesario garantizar su disposición de manera idónea, cumpliendo con los requerimientos de saneamiento básico que establezca la normatividad vigente.

Los sistemas de distribución de agua son complejos de diseñar y operar, dependen plenamente del crecimiento de la población, urbanización y variabilidad climática; estos aspectos afectan la demanda del agua significativamente (Savić, Mala-Jetmarova, & Sultanova, 2018). Para la ingeniería colombiana, es un reto inminente proveer agua en la cantidad y calidad adecuada, teniendo en cuenta las condiciones óptimas de diseño y la relación directa con los costos de implementación, operación y mantenimiento, con el fin de generar un sistema eficiente de abastecimiento de agua de acuerdo a las características del contexto y de la población a proveer. A pesar de ser deber del estado, abastecer de agua de calidad a la totalidad de la población, existe un gran número de zonas (en su mayoría rurales) en los municipios del país que aún no cuentan con conexión al acueducto.

Con el fin de facilitar el proceso de verificación del funcionamiento de los sistemas de abastecimiento de agua potable, se pretende identificar y analizar el funcionamiento de las redes de distribución de algunos municipios de Valle del Cauca, Santa Marta, Bucaramanga, sectores de Bogotá y de una red patrón internacional, fundamentado en sus características hidráulicas y topológicas, tales como los diámetros de las tuberías, el material que las compone, la longitud de los tramos, las presiones del sistema, el número de nudos o uniones, las diferencias de alturas entre los mismos, el caudal disponible para satisfacer las necesidades de la población (demanda) y todos los factores que puedan llegar a tener relación con el comportamiento de las redes.

Para ello, la investigación se basa en los principios básicos de la hidráulica, los métodos modernos de diseño de redes cerradas y las metodologías apropiadas, que permiten realizar comprobaciones de diseño óptimas mediante el uso de programas computacionales como REDES®, desarrollado en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA – del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes en Bogotá, Colombia, el cual es una herramienta de simulación de sistemas de tuberías con flujo a presión (Juan Saldarriaga, 2016) y su metodología de superficie de uso óptimo de potencia (OPUS) la cual produce diseños que cumplen

con las necesidades hidráulicas a partir de los costos menores, generando eficiencia en la distribución del agua potable mediante la red.

Con la optimización de las redes de distribución de agua potable, se puede identificar el comportamiento de las mismas de acuerdo a las características poblacionales y climatológicas de la zona donde abastezcan el caudal demandado, además de los cambios que hayan experimentado en relación a la eficiencia esperada del sistema en función del periodo de diseño. Es importante obtener conclusiones mucho más claras acerca de la descripción geométrica de las redes y plantear nuevos parámetros o criterios de evaluación con el fin de aplicarlos en las redes del presente trabajo de investigación.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Analizar la relación existente entre topología de la red de distribución de agua potable y la densidad poblacional para redes de diferentes municipios del Valle del Cauca, Santa Marta, Bucaramanga, sectores de Bogotá y red patrón internacional.

1.1.2 Objetivos Específicos

Caracterizar las redes de distribución existentes y diagnosticar su comportamiento en función de los cambios poblacionales.

Identificar los factores más influyentes en el comportamiento de las redes de distribución de agua potable.

Comparar las superficies de gradiente hidráulico de acuerdo a los aumentos poblacionales en cada una de las redes.

2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan las teorías y ecuaciones necesarias para el cálculo de las variables que se analizarán en la investigación, en particular a la aplicación de principios hidráulicos a redes de distribución de agua potable.

2.1 Ecuaciones de resistencia fluida

Primeramente, se establecen las ecuaciones de resistencia fluida basadas en la Física Clásica, que se fundamentan en la solución de problemas para tuberías circulares, ya sea para flujo laminar o flujo turbulento. La ecuación de Darcy – Weisbach es la más general para el caso de tuberías a presión, resultado de aplicar las leyes físicas del movimiento de Newton. La energía de presión expresada como energía por unidad de peso del fluido tienen unidades de altura piezométrica (h), para el caso, se expresa como la pérdida de altura piezométrica por fricción (Juan Saldarriaga, 2016).

Ecuación 1. Ecuación de Darcy – Weisbach

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

Donde:

h_f = energía por unidad de peso perdida por fricción

f = factor de fricción de Darcy

l = longitud del tramo de la tubería en la cual se pierde h_f

d = diámetro de la tubería

v = velocidad media

g = aceleración de la gravedad

Para determinar el factor de fricción, se establece el tipo de flujo, ya que la ecuación varía según esta condición. Para flujo laminar en tuberías el factor de fricción únicamente es función del número de Reynolds, expresado así:

Ecuación 2. Factor de fricción f para flujo laminar

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

Las ecuaciones para el factor de fricción de Darcy para de flujo turbulento pueden ser clasificadas como hidráulicamente liso o hidráulicamente rugoso. Para los flujos hidráulicamente lisos la

ecuación de Blassius es función sólo del número de Reynolds, para un rango de 5000 y 100000, esta se puede calcular con la siguiente ecuación (Juan Saldarriaga, 2016):

Ecuación 3. Ecuación de Blassius

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

El cálculo del factor de fricción es una función compleja del número de Reynolds y de la rugosidad relativa para flujo turbulento. Colebrook y White estudiaron el comportamiento de la rugosidad relativa; para ellos debía existir una única ecuación que influyese cualquier tipo de flujo turbulento. Para esto, combinaron los resultados de Prandtl y von Kármán con los de Nikuradse y obtuvieron resultados exitosos en la validación (Juan Saldarriaga, 2016). La siguiente ecuación no es explícita para el factor de fricción, lo cual implica utilizar algún método numérico para calcularlo, pero eso no es problema con los avances tecnológicos actuales con los que se cuentan hoy día.

Ecuación 4. Ecuación de Colebrook – White

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

Donde:

- f = factor de fricción de Darcy
- k_s = rugosidad absoluta del material
- d = diámetro de la tubería
- Re = número de Reynolds

Por otro lado, existen pérdidas menores, las cuales son generadas por los accesorios que hacen parte del sistema de distribución de agua potable, estas son proporcionales a la carga de velocidad del fluido y pueden ser producidas por cualquier tipo de accesorio, ya sea codos, válvulas, expansiones, contracciones, tees y demás elementos que hagan parte del funcionamiento de las tuberías. La Ecuación 5 presenta el cálculo de las pérdidas menores:

Ecuación 5. Cálculo de pérdidas menores

$$h_m = \sum k_m \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- h_m = energía por unidad de peso perdida en el accesorio
- k_m = coeficiente de pérdidas menores del accesorio

v = velocidad media del flujo en la tubería

g = aceleración de la gravedad

El coeficiente de pérdidas menores es un valor adimensional que ha sido deducido en ensayos de laboratorio y se puede obtener en tablas dadas por los fabricantes de los accesorios.

2.2 Análisis de redes cerradas de tuberías

Los principios fundamentales de las redes cerradas se crean a partir de las ecuaciones de conservación de la masa y conservación de la energía. Primeramente, se presenta la siguiente ecuación de conservación de la masa:

Ecuación 6. Ecuación de conservación de la masa

$$\sum_{i=1}^m Q_e = \sum_{i=1}^{Nu} Q_D$$

Donde:

Q_e = caudales que alimentan la red de distribución

Q_D = caudales consumidos en cada uno de los nudos

Nu = número de uniones (nudos) existentes en la red

La Ecuación 6 es una ecuación de conservación de la masa para la red como un todo. Sin embargo, para cada uno de los nudos de la red se puede establecer una ecuación similar, debido a que localmente también se debe cumplir el hecho que la masa se conserve (Juan Saldarriaga, 2016).

Ecuación 7. Ecuación de conservación de la masa para cada nudo

$$\sum_{j=1}^{NTi} Q_{ij} - Q_{Di} = 0$$

Donde:

NTi = número de tubos que llegan al nudo i

Q_{ij} = caudal que pasa por la tubería ij hacia el nudo i desde el nudo j

Para cada uno de los caudales Q_{ij} de la Ecuación 7 se puede plantear la siguiente ecuación de conservación de la energía entre los nudos i y j :

Ecuación 8. Ecuación de altura piezométrica

$$H_j - H_i = \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\sum k_{mij} + f \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right)$$

Donde:

$H_j - H_i$ = alturas piezométricas de los nudos i y j, respectivamente

Q_{ij} = caudal de la tubería que une los nudos i y j

k_{mij} = coeficiente de pérdidas menores

f = factor de fricción de Darcy

l_{ij} = longitud del tramo de tubería ij

A_{ij} = área del tramo de tubería ij

En la red existen en total $(NU - 1)$ ecuaciones de este tipo, debiéndose conocer H_1 o cualquier otra altura piezométrica de la red para poder solucionar dichas ecuaciones. En caso contrario se puede suponer alguna de las alturas piezométricas, ya que los valores absolutos de éstas no alteran la distribución de caudales (Juan Saldarriaga, 2016).

El segundo principio básico para la modelación hidráulica de las redes cerradas corresponde a las *ecuaciones de caudal*, las cuales están fundamentadas en la ecuación de continuidad y la conservación de la masa.

Ecuación 9. Ecuación de caudal

$$\sum_{j=1}^{NT_i} \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\sum k_{mij} + f \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) = 0$$

En total se tiene NC ecuaciones de caudal, donde NC es el número de circuitos que conforman la red. Para el cálculo de una red cerrada se tiene un número total de ecuaciones de $NC + (NU - 1)$. Dado esto, el análisis de la red se puede resolver con NT incógnitas, usualmente el caudal en cada tubería (Juan Saldarriaga, 2016).

El método más eficiente para la solución de redes cerradas en la actualidad es el método del gradiente, desarrollado por los profesores Ezio Todini y Enda P. O'Connell en la Universidad de Newcastle Upon Tyne y por R. Salgado. Ellos plantearon un método en el cual las ecuaciones de energía individuales para cada tubo son combinadas con las ecuaciones de masa individuales para cada unión con el fin de obtener una solución simultánea tanto de caudales en las tuberías como las alturas piezométricas en los nudos (Juan Saldarriaga, 2016).

2.3 Caracterización de las redes de distribución de agua potable

La modelación hidráulica de una red corresponde únicamente al cálculo de las presiones en cada uno de los nudos y los caudales en cada uno de sus tubos, en un instante de tiempo o a través de periodos extendidos, teniendo en cuenta las demandas de agua de los usuarios y la oferta de agua en la fuente en cuanto a masa y energía. Los valores calculados de las presiones y caudales también dependen de la topología de la red y de las características físicas de los tubos y accesorios (Juan Saldarriaga, 2016). La Figura 1 se muestran las variables de entrada, los parámetros fijos de la red y las variables de salida:

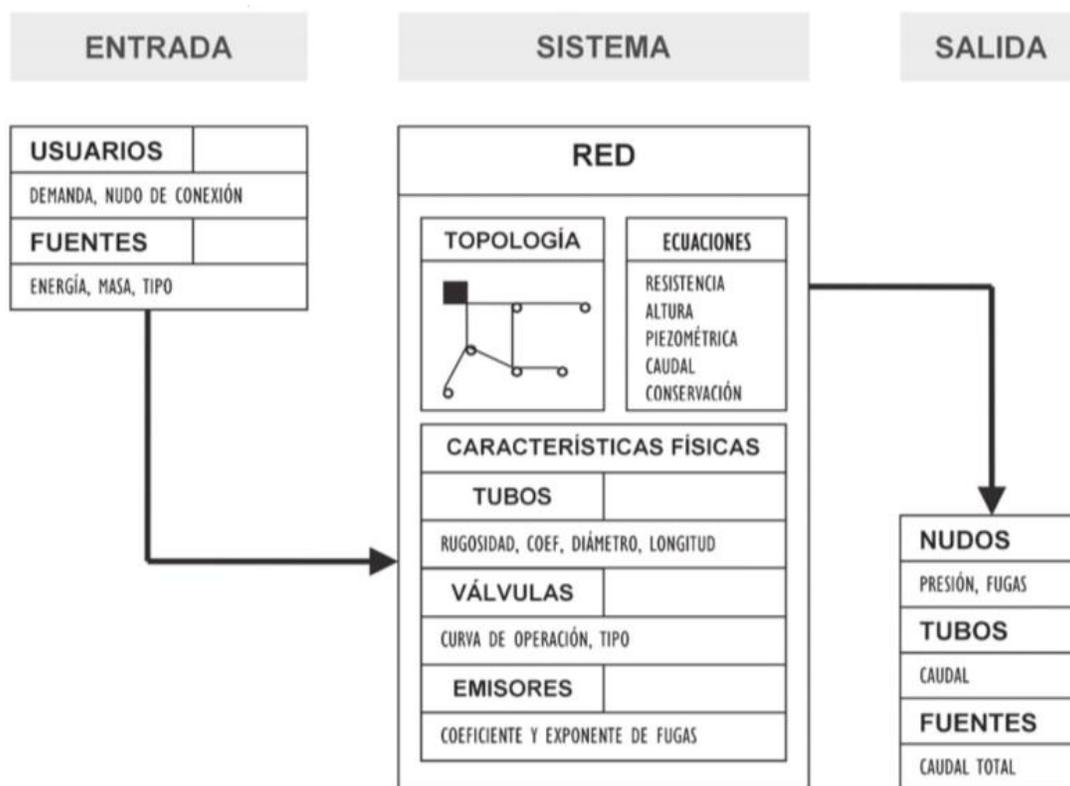


Figura 1. Esquema del cálculo hidráulico de una RDAP (Juan Saldarriaga, 2016).

2.3.1 Variables que intervienen en la modelación hidráulica

Existe un número de variables necesarias para la modelación hidráulica de una red de distribución de agua potable. Estas se clasifican de la siguiente forma (Juan Saldarriaga, 2016):

Variables hidráulicas: son las que describen el flujo en la red. Se calculan a través de la modelación matemática o se ingresan como parámetros hidráulicos de entrada, estas son:

- Presiones en los nudos

- Caudales en los tubos
- Caudal de fuga en los nudos
- Altura piezométrica en las fuentes
- Demanda de caudal en los nudos, las cuales están divididas en:
 - Demandas conocidas
 - Demandas desconocidas

Variables topológicas: son las que describen la topología de la red, incluyendo su conectividad. Es decir, son todas las variables independientes de la hidráulica de la red y cuyo valor tiene sentido, aunque en esta no haya flujo de agua. Desde la perspectiva topológica, una tubería se define de manera única mediante la asignación de sus nudos correspondientes (Berardi, Laucelli, & Giustolisi, 2010). Asimismo, la topología de la red se compone de:

- Nudo inicial y final de cada tubo
- Longitudes en los tubos
- Coeficiente de pérdidas menores en los tubos
- Rugosidades en los tubos
- Diámetro en los tubos
- Exponentes de fugas en los nudos
- Coeficientes de fugas en los nudos
- Coordenadas X, Y, Z de cada uno de los nudos

La topología es una de las ramas clásicas de las matemáticas que estudia las propiedades y relaciones tanto geométricas como espaciales de los elementos que componen un grafo o red. Trasladado al campo de la modelación de redes de distribución de agua, la topología se centra en el estudio de la configuración y la relación existente entre las líneas y los nudos que conforman el esquema geométrico del modelo matemático de una red. Para ello, es necesario caracterizar una red de distribución de agua como una entidad topológica fundamentada en un grafo conexo que puede ser recorrido y explorado (Bartolín, 2013).

2.4 Tipos de problemas hidráulicos a solucionar

Los tipos de problemas hidráulicos dependen de las variables conocidas y desconocidas que se presenten en el sistema, para el caso del capítulo 2.2 Análisis de redes cerradas de tuberías, se puede clasificar como una comprobación de diseño, donde son conocidas las variables topológicas de la red, los caudales demandados y la presión en la entrada, de esta forma los métodos de cálculo determinarán los caudales en cada una de las tuberías y las presiones o alturas piezométricas en cada uno de los nudos de la red (Juan Saldarriaga, 2016); por otro lado está el diseño optimizado que pretende determinar el diámetro correspondiente para cumplir las restricciones hidráulicas que se indiquen y sea el de mínimo costo. Estos dos tipos de problema se caracterizan así:

2.4.1 Comprobación de diseño

Para este tipo de problema la tubería existe, las características físicas de la red son conocidas y la energía disponible para el fluido también. Los caudales que pasan por cada tubería son desconocidos, ya que se tiene únicamente el caudal demandado en los nudos según los usuarios de la red. Las variables serían las siguientes:

VARIABLES CONOCIDAS	INCÓGNITAS
$D, k_s, H (o P), \sum k_m, \rho, \mu, g, l$	$Q (o v)$

2.4.2 Diseño optimizado de redes de distribución de agua potable

Para este caso, se conoce el caudal demandado, la potencia disponible (sea gravitacional o mecánica), la longitud y accesorios de los tubos y las propiedades físicas del fluido. Es desconocido el diámetro para cada una de las tuberías que componen la red, este diámetro se puede determinar de forma continua o discreta; para propósitos de esta investigación se tomará un listado de diámetros comerciales disponibles como restricción (Villalba & Saldarriaga, 2005). Únicamente se optimizará una red con diámetros continuos con propósitos de comparar su comportamiento. Las variables se clasifican así:

VARIABLES CONOCIDAS	INCÓGNITAS
$k_s, Q (o v), H (o P), \sum k_m, \rho, \mu, g, l$	d

Para la optimización de redes hidráulicas se han desarrollado varias metodologías que permiten mejorar cada vez más los costos y beneficios de los diseños. En 1975 I-Pai Wu realizó un análisis para las principales tuberías de riego localizado de alta frecuencia, según su investigación, si se conoce la altura piezométrica a la entrada de una tubería en serie (LGH_{Max}), y la altura piezométrica mínima aceptable en los nudos de ésta (LGH_{Min}), es posible asignar una altura piezométrica objetivo a cada nudo de la tubería (LGH_x), de manera que el diseño correspondiente a las pérdidas objetivo asignadas y a los caudales que debe transportar cada segmento de la tubería, es de mínimo costo (Juan Saldarriaga, Hernández, Escovar, & Páez, 2012). I-Pai Wu encontró que la mejor de la línea de gradiente hidráulico (LGH) que se ajustaba era parabólica, desarrollada por la Ecuación 10 e ilustrada en la Figura 2:

Ecuación 10. Ecuación de la línea de gradiente hidráulico parabólica

$$LGH_x = 4 * F * \frac{LGH_{Max} - LGH_{Min}}{(L_{Tot})^2} * X^2 - (1 + 4 * F) * \frac{LGH_{Max} - LGH_{Min}}{(L_{Tot})^2} * X + LGH_{Max}$$

Donde:

F = diferencia relativa entre la altura piezométrica asignada al punto del medio por una línea recta y por la línea parabólica

L_{Tot} = longitud total de la tubería

X = coordenada longitudinal de cada nudo donde se asignará la altura piezométrica

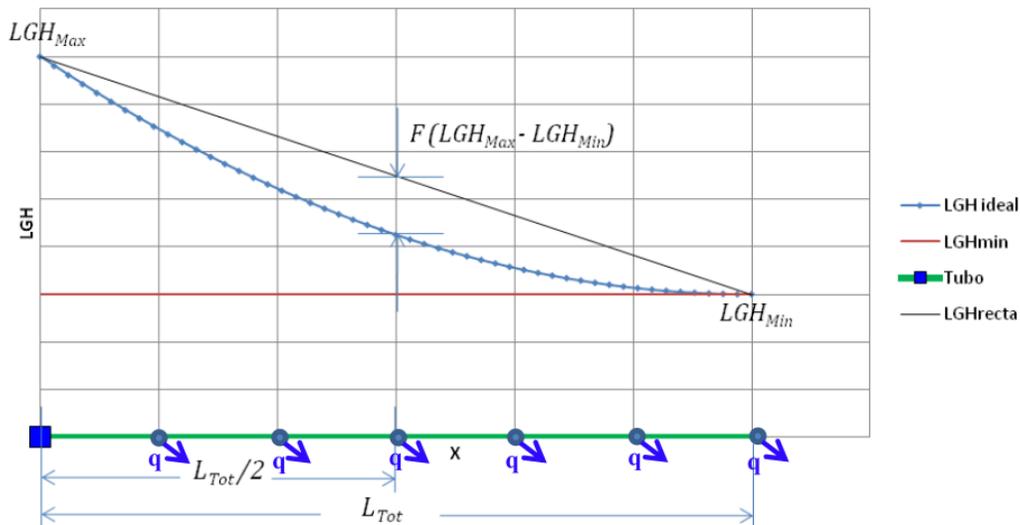


Figura 2. Criterio de I-Pai Wu para la línea de gradiente hidráulico ideal o de mínimo costo

El método de diseño Superficie de Uso Óptimo de Potencia (OPUS por sus siglas en inglés) es un algoritmo basado en este método y posteriores investigaciones. A continuación, se describe su metodología:

2.4.2.1 Metodología Superficie de Uso Óptimo de Potencia – OPUS

OPUS es una metodología que reduce significativamente el número de iteraciones para el diseño óptimo de la red manteniendo unos costos mínimos de construcción (J. Saldarriaga, Páez, Cuero, & León, 2012). Los pasos que sigue la metodología son los siguientes:

2.4.2.1.1 Estructura del árbol (Búsqueda de sumideros)

En primer lugar, este subproceso busca la manera de transformar la geometría de la red para generar una red abierta (usualmente denominadas estructuras de árbol por su parecido con las ramificaciones) mediante la identificación de nudos sumideros (nudos con altura piezométrica menor que todos sus vecinos). Posteriormente, basado en las ecuaciones de pérdidas por fricción en tuberías con flujo presurizado, (Darcy-Weisbach & Colebrooke-White o Hazen-Williams) es posible encontrar una relación biunívoca entre el caudal de diseño (Q) y el diámetro requerido. Dado ello, si se conoce la relación entre el diámetro de la tubería y el costo por unidad de longitud de la misma, es posible encontrar una relación entre Q y el costo por unidad de longitud de la tubería, como se muestra en la Figura 3 (Juan Saldarriaga et al., 2012):

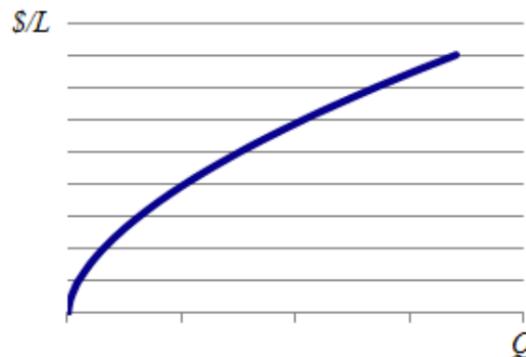


Figura 3. Relación esquemática entre el caudal de diseño y el costo por unidad de longitud de la tubería

Este algoritmo inicia en la fuente o embalse de la red y recorre las tuberías hacia aguas abajo agregando a la red abierta un tubo y nudo a la vez. En el momento en que tiene más de una posibilidad de adición de una pareja tubería-nudo selecciona aquella cuya relación beneficio-costos (cociente entre la demanda del nudo y el costo marginal de conectarlo a la fuente) es mayor. En el momento en que se han agregado todos los nudos de la red cerrada a la red abierta, se definen como sumideros, aquellos nudos con ningún nudo aguas abajo; luego de esto la estructura de árbol está completa. La complejidad computacional del algoritmo es $O(NN^2)$, donde NN es el número de nudos de la red, y por lo tanto el tiempo computacional de toda la metodología no se ve mayormente afectado por este paso (Juan Saldarriaga et al., 2012).

2.4.2.1.2 Superficie de uso óptimo de potencia:

OPUS asigna una altura piezométrica a cada nudo de la red, de manera que las pérdidas totales de las tuberías quedan predefinidas como la diferencia entre las alturas piezométricas de sus nudos adyacentes (Juan Saldarriaga et al., 2012). Se calcula la flecha óptima para el sistema por la metodología de Wu, para que posteriormente el algoritmo comience en las hojas del árbol (los sumideros) y navegue por las ramas asignando valores de altura piezométrica objetivo en los nudos. En cada ramificación, se calculan valores promediados con el caudal correspondiente a cada rama (Hernández, Saldarriaga, Takahashi, & Escovar, 2010).

2.4.2.1.3 Distribución óptima del caudal

Este procedimiento asigna la distribución óptima de flujos objetivos para cada tubería de la red, para determinar el diámetro que garantice un costo mínimo. El patrón de distribución de flujo obtenido debe tener en cuenta la conservación de masa en cada nodo, y también debe adaptarse a la superficie de uso de óptimo de potencia previamente establecida (J. Saldarriaga et al., 2012).

2.4.2.1.4 Cálculo del diámetro

En este subproceso se asignan los tamaños de diámetros continuos en todas las tuberías. El cálculo explícito del conjunto de diámetros continuos se puede alcanzar simplemente cuando se usa la

ecuación de Hazen-Williams, mientras que se requiere un cálculo iterativo cuando se emplean las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White. Debido a la disponibilidad limitada de tamaños de diámetros comerciales, se requiere un siguiente paso para transformar este diseño "óptimo" en uno factible (J. Saldarriaga et al., 2012).

2.4.2.1.5 Redondeo de diámetros

Para redondear los diámetros a un tamaño determinado, cada uno de los diámetros continuos obtenidos antes se aproxima a un valor discreto de una lista de tamaños de diámetro disponibles comercialmente. Para la aproximación de diámetros continuos a diámetros discretos se plantean cuatro criterios:

- Aproximar al siguiente (AS): se aproximan todos los diámetros al siguiente diámetro comercial
- Aproximar al anterior (AA): se aproximan todos los diámetros al anterior diámetro comercial
- Redondeo Lineal (RL): se aproximan todos los diámetros al diámetro comercial más cercano
- Redondeo Potencial (RP): se aproximan los diámetros por medio de una potencia de 2.6

Según las investigaciones, la mejor opción para discretizar los diámetros es un redondeo potencial; a partir de esto se selecciona el diámetro cuya aproximación de caudal es más cercana a la aproximación de caudal del diámetro continuo (J. Saldarriaga et al., 2012).

2.4.2.1.6 Optimización

Allí se establecen dos objetivos principales: garantizar que no se presenten presiones por debajo del mínimo permitido en ningún nodo e identificar posibles reducciones en el costo de la red. Para regular la presión necesaria en la red se incrementa el tamaño del diámetro iterativamente, haciendo una simulación hidráulica por tubería; este proceso se realiza hasta que todo el sistema cumpla con las restricciones mínimas de presión. Para la reducción de los costos se ejecuta un doble barrido sobre las tuberías, reduciendo los diámetros si no se viola ninguna de las restricciones. Este barrido bidireccional comienza en los depósitos en la dirección del flujo, hacia los sumideros y luego hacia atrás; así, cada reducción del diámetro de la tubería se examina dos veces.

2.5 Índices geométricos

Para el análisis geométrico de esta investigación, se eligieron cuatro índices que permiten realizar un análisis de centroides de acuerdo a coordenadas X y en cada par de nodos limitando cada sección de las n tuberías del sistema (Moreno, Rojas, & Saldarriaga, 2018). Los índices geométricos a evaluar son: centroide de volumen Ecuación 11, centroide de potencia específica Ecuación 12, centroide de diámetro Ecuación 13, centroide de potencia Ecuación 14 y potencia específica Ecuación 15.

Ecuación 11. Centroide de volumen

$$C_V = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} V_i * Dist_i}{V_T}$$

Ecuación 12. Centroide de potencia específica

$$CP_s = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} P_{Si} * Dist_i}{P_{ST}}$$

Ecuación 13. Centroide de diámetro

$$C_d = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} d_i * Dist_i}{\sum_{i=1}^{n_t} d_i}$$

Ecuación 14. Centroide de potencia

$$C_P = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} Q_D * h_i * Dist_i}{\sum_{i=1}^{n_n} Q_D * h_i}$$

Ecuación 15. Potencia específica

$$P_{si} = q_i (h_{i,ini} - h_{i,fin})$$

Donde:

V_i = volumen de la tubería

V_T = volumen total

P_{Si} = potencia específica de la tubería

q_i = caudal en la tubería i

$h_{i,ini}, h_{i,fin}$ = altura piezométrica de los nudos inicial y final de la tubería i

P_{ST} = potencia específica total

d_i = diámetro de la tubería i

Q_D = caudal demandado

n_t = número de tuberías

n_n = número de nudos de demanda

$Dist_i$ = centroide de la tubería i calculado para X y con la Ecuación 16 y Ecuación 17 respectivamente

Ecuación 16. Centroide en la coordenada X

$$Dist_{(X_i)} = \frac{|C_{xini} - C_{xfin}|}{2} + \min(C_{xini}, C_{xfin})$$

Ecuación 17. Centroide en la coordenada Y

$$Dist_{(Y_i)} = \frac{|C_{yini} - C_{yfin}|}{2} + \min(C_{yini}, C_{yfin})$$

Donde:

$C_{xini,fin}$ = coordenada X de los nudos inicial y final de la tubería i

$C_{yini,fin}$ = coordenada Y de los nudos inicial y final de la tubería i

2.6 Índices de confiabilidad y eficiencia energética

La confiabilidad se entiende como la capacidad de un sistema para funcionar como se requiere bajo diferentes condiciones. Sin embargo, en una RDAP su cuantificación requiere la evaluación del sistema bajo escenarios normales y subnormales, así como su simulación bajo demanda impulsada por la presión para evaluar su desempeño en el suministro de agua (Paez & Fillion, 2017). Para esta investigación se tendrán en cuenta cuatro índices para la evaluación de fallas hidráulicas y mecánicas que se han desarrollado a lo largo de los últimos años y fueron recopiladas para diferentes estudios de caso en Colombia (Moreno et al., 2018).

La Ecuación 18 presenta el índice de resiliencia (Todini, 2000), la Ecuación 19 el índice de resiliencia modificado (Jayaram & Srinivasan, 2008), la Ecuación 20 el índice de resiliencia centralizado (Paez & Fillion, 2017) y la Ecuación 21 el índice de potencia específico expresado en porcentaje (Juan Saldarriaga, Ochoa, Moreno, Romero, & Óscar, 2010).

Ecuación 18. Índice de resiliencia

$$RI = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} D_i (H_i - H_i^{(req)})}{\sum_{k=1}^{n_r} D_{out_k} H_k + \sum_{j=1}^{m_p} P_j / \gamma - \sum_{i=1}^{n_n} D_i H_i^{(req)}}$$

Ecuación 19. Índice de resiliencia modificado

$$MRI = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} D_i (H_i - H_i^{(req)})}{\sum_{i=1}^{n_n} D_i H_i^{(req)}}$$

Ecuación 20. Índice de resiliencia centralizado

$$CMRI = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} D_i p_i}{\sum_{i=1}^{n_n} D_i p_{min}} - 1$$

Ecuación 21. Porcentaje de potencia consumida

$$P_{PC} = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} q_i (h_i - Z_{min})}{\sum_{i=1}^{n_e} Q_i (H_i - Z_{min})} * 100$$

Donde:

- D_i = demanda en el nudo i
- H_i = altura calculada en el nudo i
- $H_i^{(req)}$ = altura objetivo en el nudo i
- D_{out_k} = flujo de salida en el embalse k
- H_k = altura embalse k
- P_j = potencia de la bomba
- γ = peso específico del agua
- n_n = número de nudos de demanda
- n_r = número de embalses

RI se basa en la relación entre la capacidad de recuperación de un sistema y la cantidad de energía que se disipa: si la energía disipada es menor, la capacidad de respuesta es mayor porque hay una mayor cantidad de energía disponible (Todini, 2000). MRI es la relación entre la potencia excedente disponible en los nodos a demanda y la potencia requerida (Paez & Fillion, 2017). CMRI es la versión centralizada de la MRI y se calcula cambiando el dato del modelo para obtener $\sum_{i=1}^{n_n} D_i z_i = 0$ (Paez & Fillion, 2017). Finalmente, el PPC es una medida de la eficiencia energética del sistema y representa el porcentaje de energía total disponible que se utiliza para satisfacer la demanda. Los valores más altos de PPC indican una mayor eficiencia energética de la red (Juan Saldarriaga et al., 2010).

3 METODOLOGÍA

Es necesario reconocer la importancia del análisis de los costos y beneficios que se dan en cuanto a la implementación del diseño o de la optimización de una red de distribución de agua potable. Para ello se parte de una investigación acerca de la topología de las redes y sus características hidráulicas, como lo son el diámetro, material, longitud y accesorios de las tuberías, las presiones del sistema, el número de nudos o uniones, las diferencias de alturas entre los mismos y todos los elementos que influyen en su funcionamiento, con el fin de tener la mayor cantidad de información disponible y posteriormente realizar un análisis exhaustivo del comportamiento de las redes en su consumo máximo de acuerdo de las características poblacionales del municipio o del sector de la determinada ciudad.

De esta manera, se establece la metodología desarrollada para abarcar el análisis planteado anteriormente, basado en investigaciones previas (Moreno et al., 2018): Caracterización de las redes, identificación de las redes que se van a analizar, comprobación de diseño, determinación de parámetros a analizar, aumento de demanda, diseño óptimo de las RDAP y finalmente análisis de la variación de parámetros definidos.

Asimismo, se analizarán distintos índices geométricos y de confiabilidad y eficiencia energética. También, se pretende realizar la comparación de las superficies de gradiente hidráulico de cada uno de los escenarios de las redes, con el fin de identificar posibles patrones en común, de acuerdo a las características físicas y topológicas de la red. Por medio de un análisis de pendientes y un análisis volumétrico se podrán determinar los cambios más concluyentes en las superficies de gradiente hidráulico, ya que se requiere determinar si existe una relación entre la respuesta hidráulica de la red con respecto a la densidad de habitantes.

3.1 Caracterización de las redes

De acuerdo a la metodología mencionada, lo primero es identificar los parámetros requeridos para realizar el análisis de las redes de distribución de agua potable, teniendo en cuenta la topología de las distintas redes a relacionar. Los componentes son los siguientes:

Características hidráulicas: verificar si el funcionamiento de la red es por gravedad, implementar la curva de demanda del sistema, establecer la presión mínima de la red la cuál será de 15 mca, exceptuando la red patrón internacional que estandariza una presión mínima de 20 mca.

Características físicas: Número de tuberías y nudos en la red, longitud, material, rugosidad y diámetros comerciales disponibles de las tuberías para la posterior optimización, topografía de la zona, ubicación y elevación del embalse, coordenadas X, Y, Z, para los nudos de la red, verificación de existencia de válvulas.

3.2 Identificación de las redes a analizar

Se eligieron siete redes de distribución de agua para el estudio: Sector 13 M453 B y Sector 8 Subsector 5 de Bogotá, Red Troncal del Caribe de Santa Marta, Red Morro Bajo de Bucaramanga, Red Toro, Red Bolívar del Departamento del Valle del Cauca y Red Modena.

3.2.1 Sector 13 M453 B (Bogotá)

Esta red se encuentra ubicada en el sector 13 – Zona 4 de Bogotá D.C., el nivel del embalse se halla a 2604.83 msnm. La información básica de la red se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de la red Sector 13 M453 B (Bogotá)

Característica	Descripción
Número de Tuberías	373
Número de Nudos	327
Número de Tanques	1
Material de las Tuberías	PVC ($K_s=0.0015\text{mm}$)

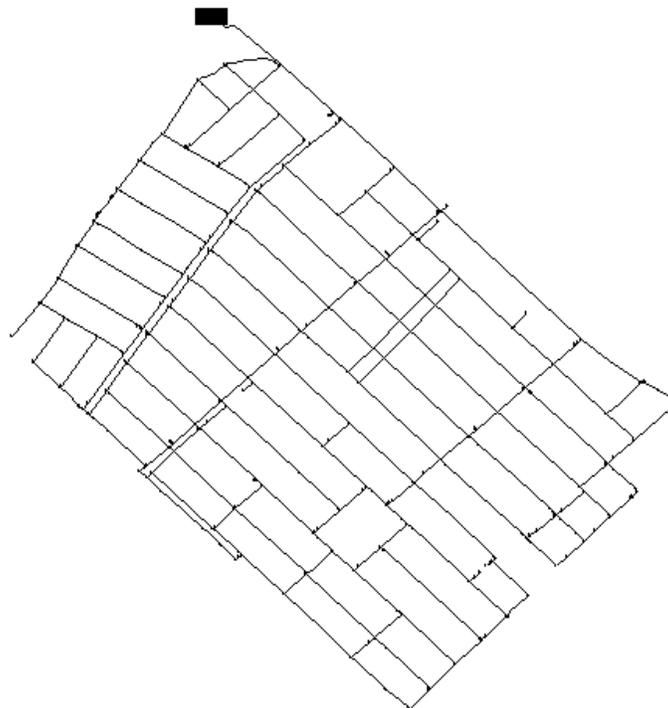


Figura 4. Red de distribución de agua potable Sector 13 M453 B (Bogotá)

3.2.2 Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

Esta red se encuentra ubicada en el sector 8 subsector 5 - Zona 1 de Bogotá D.C., el nivel del embalse se halla a 2634 msnm. La información básica de la red se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización de la red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

Característica	Descripción
Número de Tuberías	1131
Número de Nudos	962
Número de Tanques	1
Material de las Tuberías	PVC ($K_s=0.0015\text{mm}$)

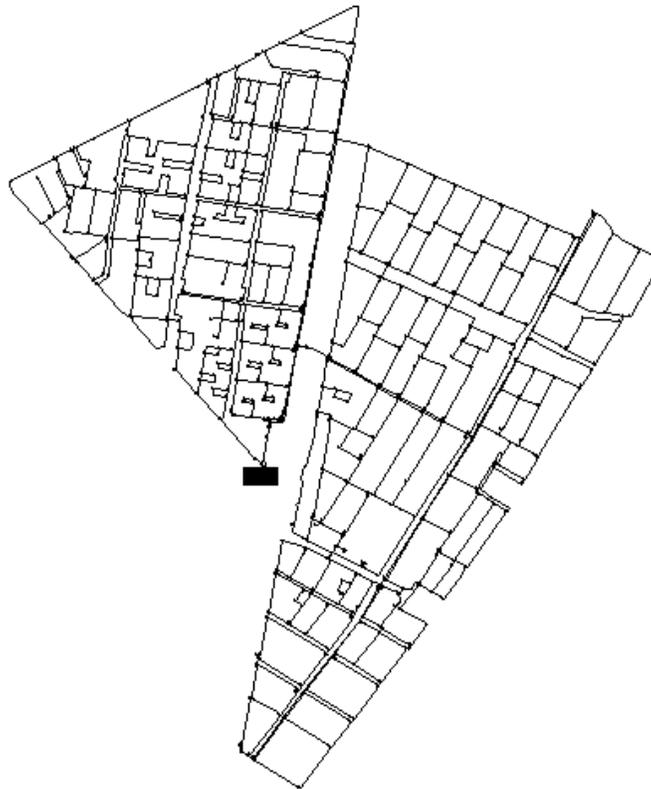


Figura 5. Red de distribución de agua potable Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

3.2.3 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

Esta red se encuentra ubicada por la zona de la Troncal del Caribe en la ciudad de Santa Marta, el nivel del embalse se halla a 90 msnm. La Tabla 3 muestra las características de la red Troncal del Caribe, así:

Tabla 3. Caracterización de la red Troncal del Caribe (Santa Marta)

Característica	Descripción
Número de Tuberías	310
Número de Nudos	245
Número de Tanques	1
Material de las Tuberías	PVC ($K_s=0.0015\text{mm}$)



Figura 6. Red de distribución de agua potable Troncal del Caribe (Santa Marta)

3.2.4 Red Morro Bajo (Bucaramanga)

Esta red se encuentra ubicada en la ciudad de Bucaramanga, el nivel del embalse se halla a 1050 msnm. La Tabla 4 muestra las características de la red Morro Bajo, así:

Tabla 4. Caracterización de la red Morro Bajo (Bucaramanga)

Característica	Descripción
Número de Tuberías	762
Número de Nudos	666
Número de Tanques	1
Material de las Tuberías	PVC ($K_s=0.0015\text{mm}$)

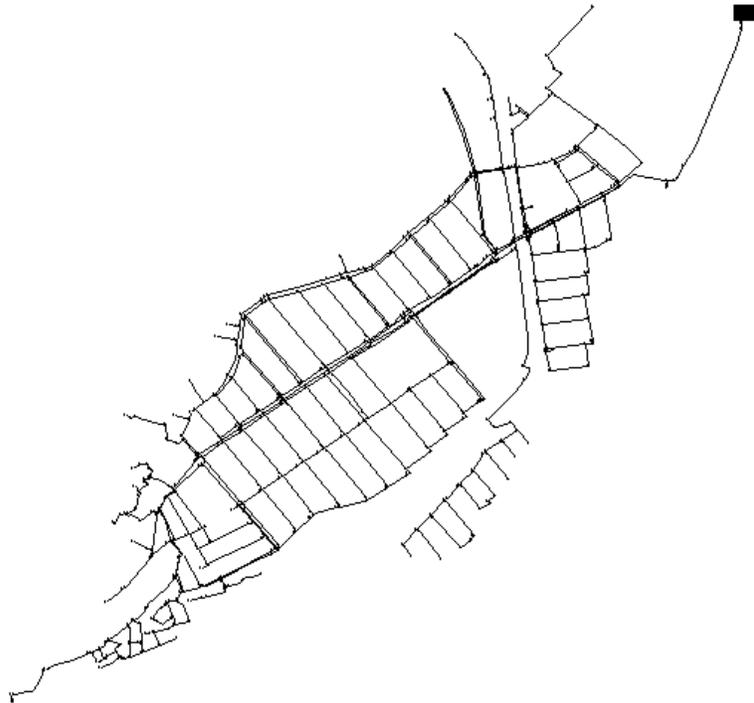


Figura 7. Red de distribución de agua potable Morro Bajo (Bucaramanga)

3.2.5 Red Toro (Valle del Cauca)

Toro es un municipio ubicado al norte del departamento del Valle del Cauca, junto a la cordillera occidental, tiene una altura de 960 msnm. La Tabla 5 muestra las características de la red del Municipio de Toro, así:

Tabla 5. Caracterización de la red Toro (Valle del Cauca)

Característica	Descripción
Número de Tuberías	423
Número de Nudos	363
Número de Tanques	1
Material de las Tuberías	PVC ($K_s=0.0015\text{mm}$)

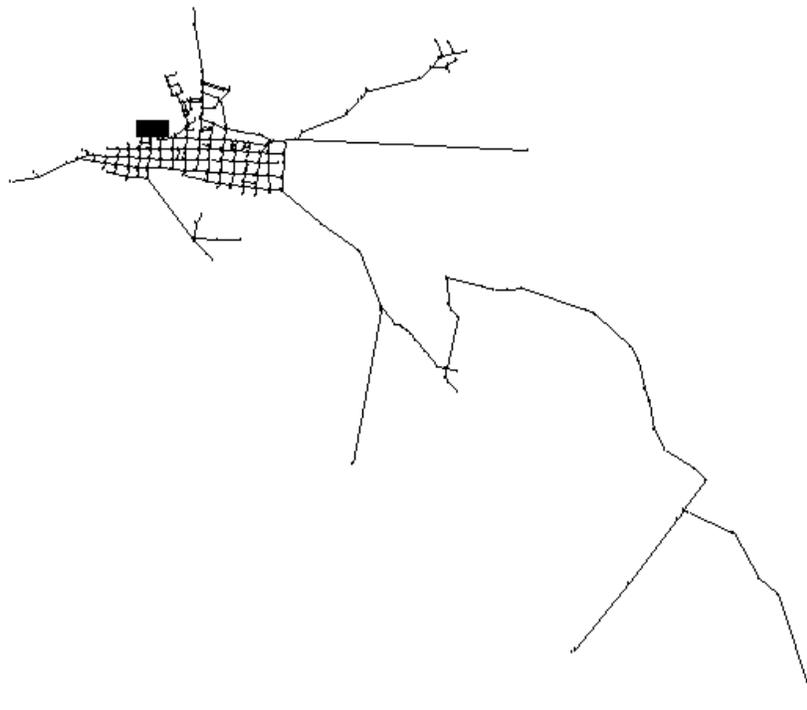


Figura 8. Red de distribución de agua potable Toro (Valle del Cauca)

3.2.6 Red Bolívar (Valle del Cauca)

El municipio de Bolívar se encuentra ubicado en la región centro – norte del Departamento del Valle del Cauca, cuenta con una altura de 978 msnm. La Tabla 6 muestra la caracterización de la red del Municipio de Bolívar, así:

Tabla 6. Caracterización de la red Bolívar (Valle del Cauca)

Característica	Descripción
Número de Tuberías	333
Número de Nudos	285
Número de Tanques	1
Material de las Tuberías	PVC ($K_s=0.0015\text{mm}$)

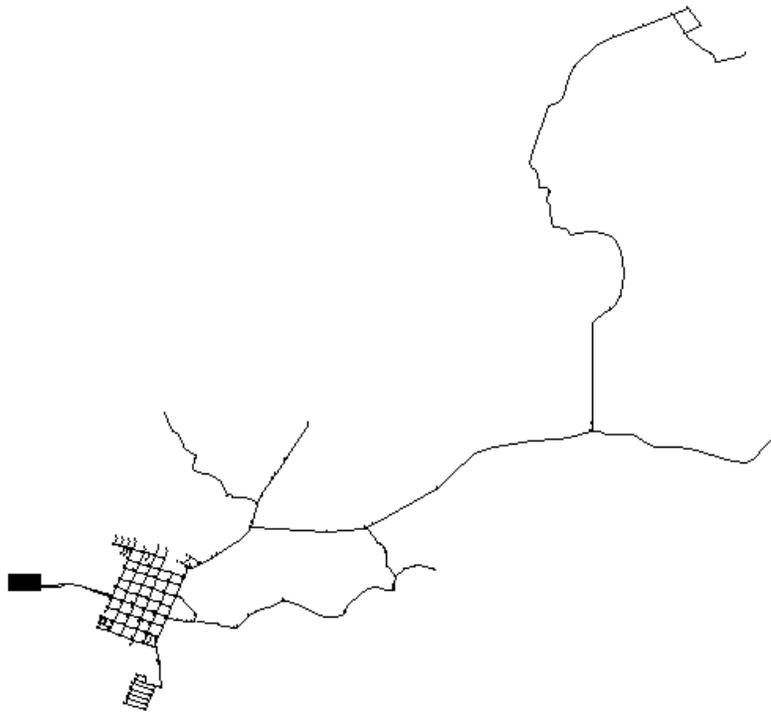


Figura 9. Red de distribución de agua potable Bolívar (Valle del Cauca)

3.2.7 Red Modena

Modena se considera una red patrón internacional. Esta red fue extraída de la base de datos del centro de sistemas de agua de la Universidad de Exeter. La Tabla 7 muestra la caracterización de la red en el siguiente orden:

Tabla 7. Caracterización de la red Modena

Característica	Descripción
Número de Tuberías	317
Número de Nudos	268
Número de Tanques	4
Material de las Tuberías	PES (CH-W=130)

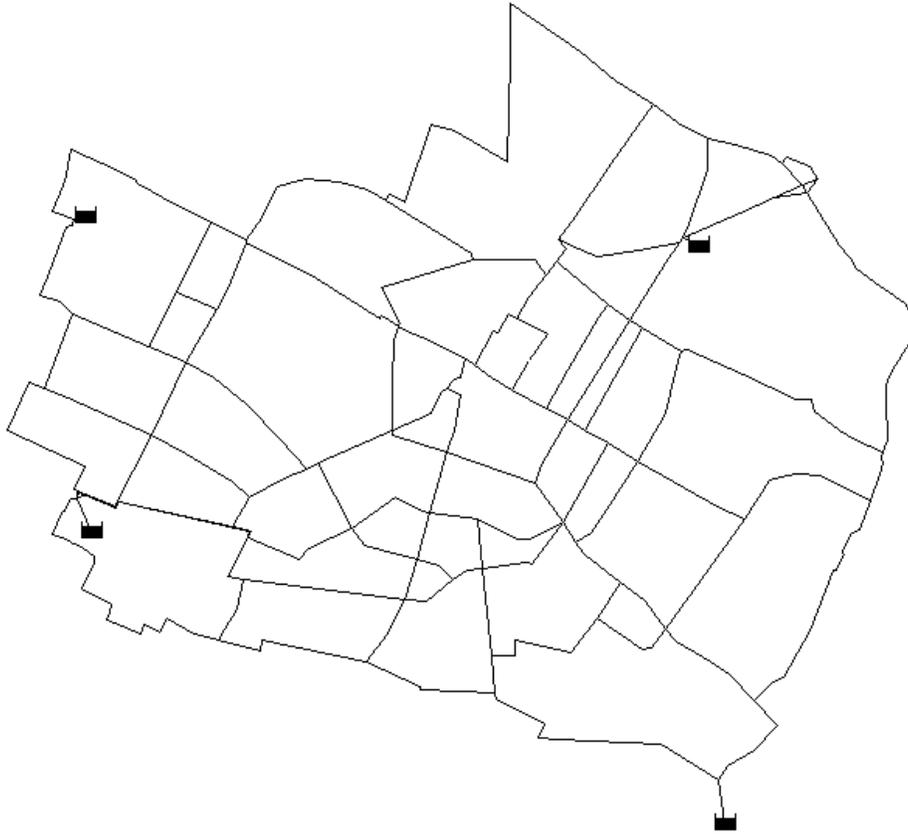


Figura 10. Red de distribución de agua potable Modena

3.3 Comprobación de diseño de las redes

Una vez elegidas y caracterizadas las redes de distribución de agua potable con las que se efectuará la investigación, se realiza la comprobación de diseño de cada una, teniendo en cuenta las condiciones iniciales de demanda y de características físicas de las redes. Esto con el propósito de verificar que la red tenga los datos necesarios para posteriormente ser optimizada.

Esto se realiza ejecutando el programa REDES[®], en su última versión 2019. Este programa permite realizar una simulación hidráulica por medio de la modelación de una red de distribución de agua potable, teniendo en cuenta los embalses, nodos, tubos, válvulas y demás elementos que puedan hacer parte del sistema. REDES[®] permite realizar el cálculo hidráulico estático o en periodo extendido (Juan Saldarriaga, Lopez, Paez, Luna, & Gonzalez Hernandez, 2018).

El programa REDES[®] permite calcular gran cantidad de variables que son determinantes a la hora de analizar una RDAP, ya sea la presión en los nodos, la distribución de caudales en los tubos, los

diámetros y velocidades de los mismos, todas estas complementando un modelo con información más puntual y detallada.

3.4 Variables y criterios a analizar

De acuerdo a investigaciones realizadas con anterioridad se evaluarán las siguientes variables y criterios en cada una de las redes de distribución:

3.4.1 Diámetros de las tuberías

Según la Resolución 330 de 2017 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Sistemas de transporte y distribución, en su Artículo 63. Diámetro interno real mínimo en la red de distribución: El diámetro mínimo en las redes de distribución no deberá ser inferior a 75mm para sectores urbanos, mientras que para sectores rurales no deberán ser inferiores a 50mm. Se deben realizar los cálculos necesarios que permitan garantizar que, con el diámetro interno real de la tubería seleccionada, se cumplan las condiciones mínimas establecidas.

Dado esto, para la optimización de las redes de distribución se utilizarán los diámetros comerciales, listados en la Tabla 8, considerando un material de PVC con rugosidad $k_s = 0.0015\text{mm}$:

Tabla 8. Diámetros comerciales disponibles para las tuberías de las redes a analizar

Diámetro interior (mm)
80.42
103.42
152.22
198.21
247.09
293.07
321.76
367.70
413.66
459.64
551.54

A medida que ocurre la optimización de las redes, los diámetros van a tener un cambio de acuerdo a la demanda, además de las presiones mínimas y las variables que influyen en el comportamiento. Estos cambios deben garantizar las restricciones dadas y el mínimo costo de la red.

Para el caso de la red patrón internacional, se considerará un material de PES con $C_H\text{-}w=130$ y los siguientes diámetros discretos:

Tabla 9. Diámetros discretos Res Modena

Diámetro interior (mm)
100
125
150
200
250
300
350
400
450
500
600
700
800

La Red del Sector M453 B (Bogotá) se optimizará para los distintos incrementos de caudal con los diámetros comerciales mencionados y, también, con diámetros continuos. Esto, con el propósito de hacer un análisis más profundo en la relación de la determinación de diámetros y distribución de disipación de energía de la red.

3.4.2 Presiones en los nodos

Se requiere garantizar una presión mínima de 15 mca en los nodos de la red de distribución, con el fin de suplir el servicio de agua potable adecuadamente. Asimismo, al variar las demandas en las diferentes redes, se podrán identificar patrones en determinadas zonas ya sea que tengan cambios significativos o permanezcan constantes. La red patrón internacional será la única que tendrá una presión mínima de 20 mca.

3.5 Variación de la demanda

Para analizar las variables topológicas y los cambios en las superficies de gradiente hidráulico, se determinaron aumentos de demanda uniformes con los que se optimizarán las redes, siendo así un caudal máximo horario - QMH inicial, para luego aumentarlo dos, cuatro y ocho veces respectivamente, esto basado en investigaciones anteriores (Moreno et al., 2018).

3.6 Diseño óptimo de las redes

La metodología empleada para la optimización de las redes será la de superficie de uso óptimo de potencia – OPUS, la cual se encuentra habilitada en el programa REDES®, esta se describió en el capítulo 2.4.2.1.

Cabe resaltar que para la comprobación de diseño se tiene en cuenta la curva de demanda que permite hallar la hora en que el caudal es el máximo, para el caso se trabajará con el caudal máximo horario (QMH) en cada una de las redes y el incremento de demanda que se estableció en Variación de la demanda.

3.7 Índices geométricos

Como se indicó en el capítulo 2.5, se tiene previsto realizar un análisis evaluando cuatro índices geométricos, los cuales son: centroide de volumen, centroide de potencia específica, centroide de diámetro, centroide de potencia y potencia específica.

3.8 Índices de confiabilidad y eficiencia energética

Para hallar los índices de confiabilidad y eficiencia energética, se pretende trabajar con las cuatro ecuaciones que fueron planteadas en el capítulo 2.6, estos fueron: índice de resiliencia, índice de resiliencia modificado, índice de resiliencia centralizado e índice de potencia específico. Estos índices definen la capacidad de trabajar bajo diferentes condiciones para determinado sistema de distribución de agua potable.

3.9 Comparación de las superficies de gradiente hidráulico y de presión

Para realizar la comparación entre las superficies de gradiente hidráulico y de presión, se utilizarán dos ecuaciones básicas que permiten determinar la diferencia porcentual de elevación en los nudos de la red, estas se emplearán para QMHx1 – QMHx2, QMHx1 – QMHx4 y QMHx1 – QMHx8, así:

Ecuación 22. Diferencia porcentual de elevación en la LGH

$$\frac{LGH_2 - LGH_1}{LGH_1} * 100$$

Ecuación 23. Diferencia porcentual de elevación en la Presión

$$\frac{P_2 - P_1}{P_1} * 100$$

3.10 Mapas de potencia específica de las redes

Para tener una mejor interpretación de la forma en que la energía se distribuye por los tubos de las redes, se presentará gráficamente el porcentaje de potencia específica que se produce por las tuberías. También, se evaluarán cambios porcentuales relativos con respecto a la cantidad de energía generada, utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 24. Cambio porcentual relativo de potencia específica

$$\frac{P_{sQMhx2} - P_{sQMhx1}}{\sum P_{sQMhx2}} * 100$$

4 RESULTADOS

4.1 Diseño optimizado de las RDAP

A continuación, se presentan las redes de distribución de agua potable optimizadas de acuerdo a cada aumento de demanda realizado, teniendo en cuenta las restricciones de los parámetros ya mencionados, como listado de diámetros comerciales, presión mínima e incremento uniforme de caudales.

4.1.1 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos

En la Figura 11 se muestran las superficies óptimas de gradiente hidráulico para cada uno de los escenarios propuestos (QMHx1, QMHx2, QMHx4, QMHx8). Fueron desarrolladas por la metodología mostrada en el capítulo 2.4.2.1, haciendo uso de los datos generados en el programa REDES®.

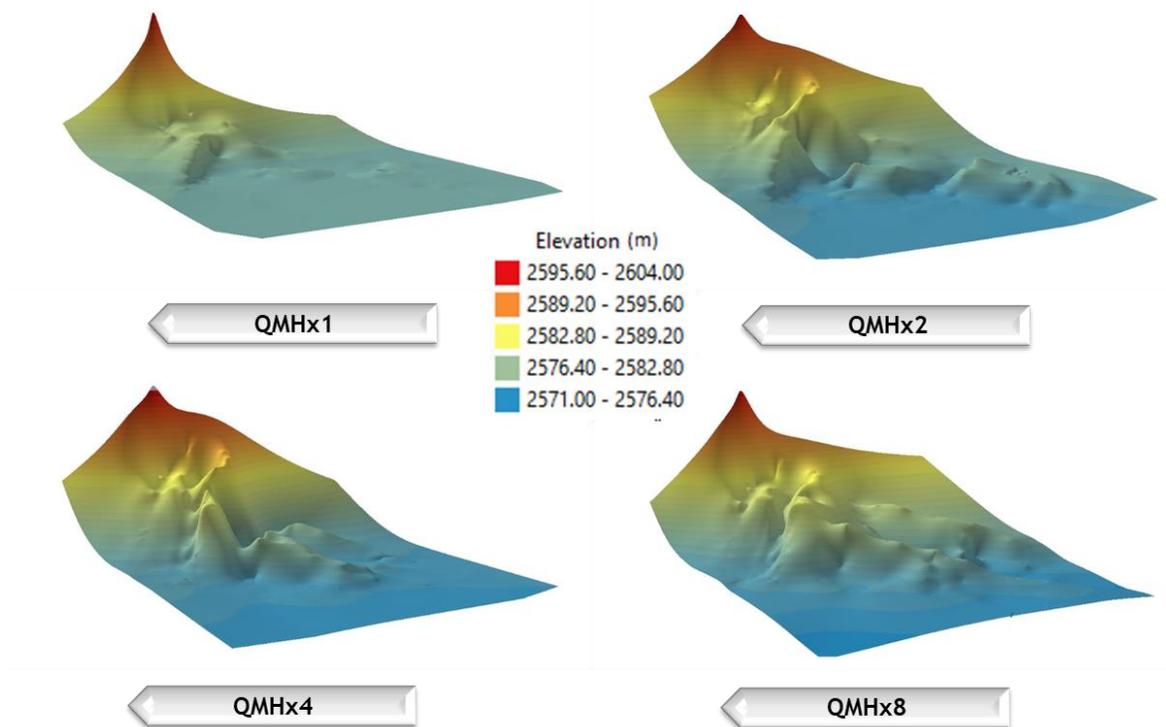


Figura 11. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

El modelado de las superficies presentado, se realizó mediante la creación de un ráster en ArcMap® (el cual es complemento del paquete de ArcGIS®) tomando las coordenadas de ubicación de cada nudo y la elevación de la línea de gradiente hidráulico – LGH respectivamente. Se generaron así curvas de nivel de acuerdo a estas elevaciones, para luego convertirlas en archivo tipo TIN, el cual

representa los datos geográficos digitales como vectores mediante la triangulación de los puntos o nudos dados. Finalmente, en ArcScene® (también complemento de ArcGIS®), se transforma el archivo TIN en una superficie de tres dimensiones.

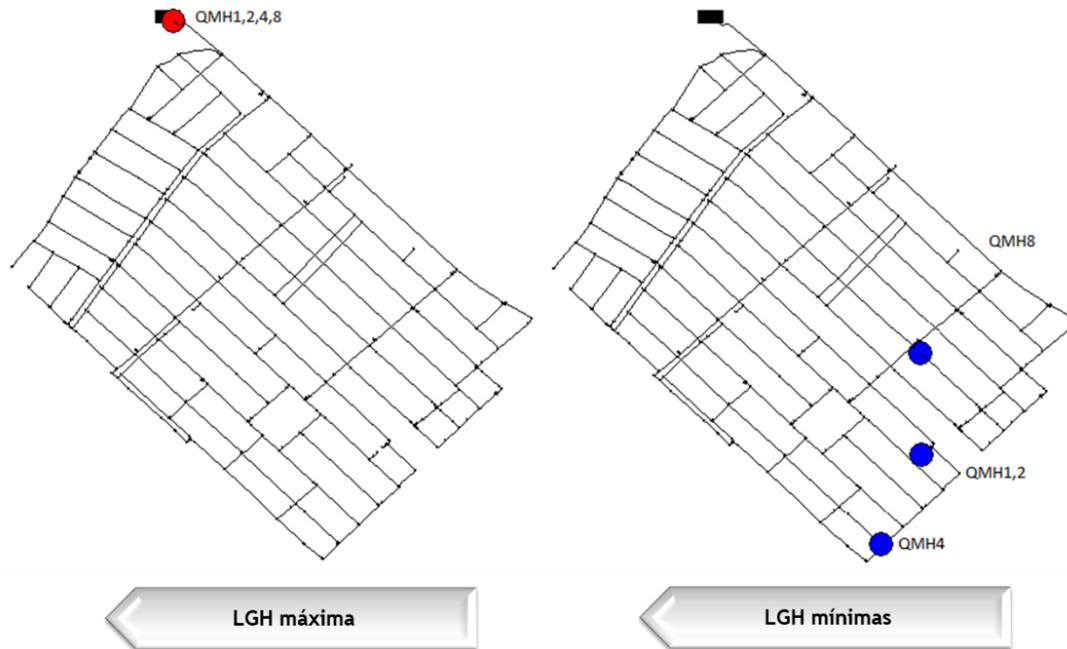


Figura 12. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

En la Figura 12 se indican los nudos donde se presentan las LGH máximas y mínimas para los distintos escenarios en la Red Sector 13 M453 B de Bogotá. La LGH máxima para todos los caudales demandados, se encuentra en el nudo 16418, el cual se sitúa inmediatamente después del tanque. Las LGH mínimas corresponden a los nudos 5056 para los QMHx1 y QMHx2, nudo 8259 para QMHx4 y nudo 5165 para QMHx8 respectivamente.

Al igual que las superficies presentadas en la Figura 11, la Figura 13 se muestra con la metodología descrita para la creación de modelos en ArcGIS®, para el caso, tomando las coordenadas X, Y de los nudos y Z para las elevaciones de presión.

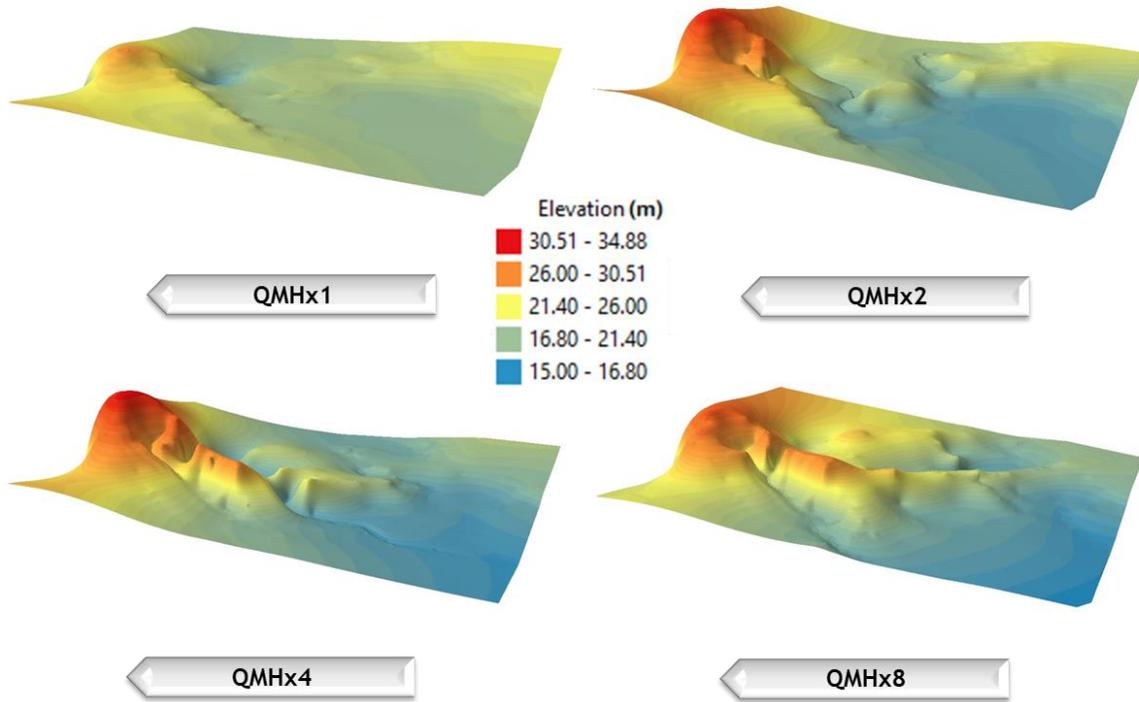


Figura 13. Superficies de Presión Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

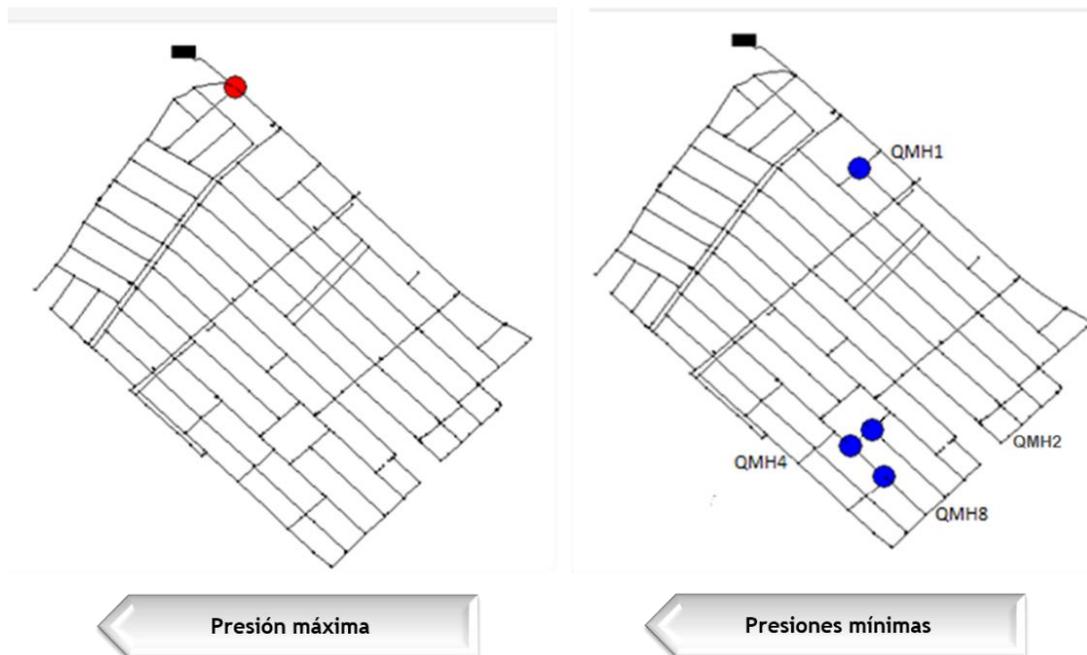


Figura 14. Presiones Máximas y Mínimas Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

La Figura 14 relaciona las presiones máximas y mínimas de la Red Sector 13 M453 B de Bogotá. La presión máxima se presenta en el nudo 5986. Las presiones mínimas en los nudos 5531 para QMHx1, 5634 para QMHx2, 5179 para QMHx4 y 5206 para QMHx8; estas varían por tan solo decimales.

4.1.2 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

En la Figura 15 se presentan las superficies óptimas de gradiente hidráulico para la Red Sector 8 Subsector 5 de Bogotá. En la superficie de QMHx1 la LGH mínima es de 2609.49 m; asimismo, es evidente como en el escenario de QMHx8 hay una depresión más grande con respecto a las demás superficies, pues la elevación de la LGH mínima arroja con un valor mínimo de 2599.48 m, como se muestra en la tabla de valores en color azul.

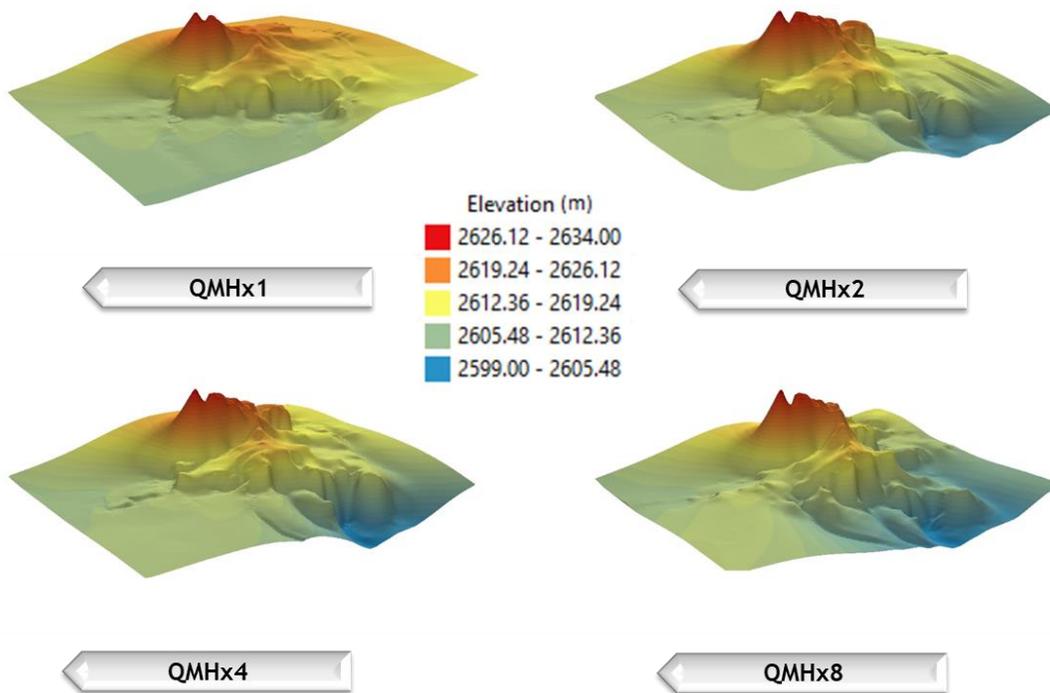


Figura 15. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

La LGH máxima para todos los escenarios, se encuentra inmediatamente después del tanque de abastecimiento, este nudo corresponde al 1443. En el caso de las LGH mínimas, están en el nudo 2539 para QMHx1 y nudo 3232 para QMHx2, QMHx4 y QMHx8, es decir, que se mantiene mínima en este nudo constantemente, así como lo muestra la Figura 16.

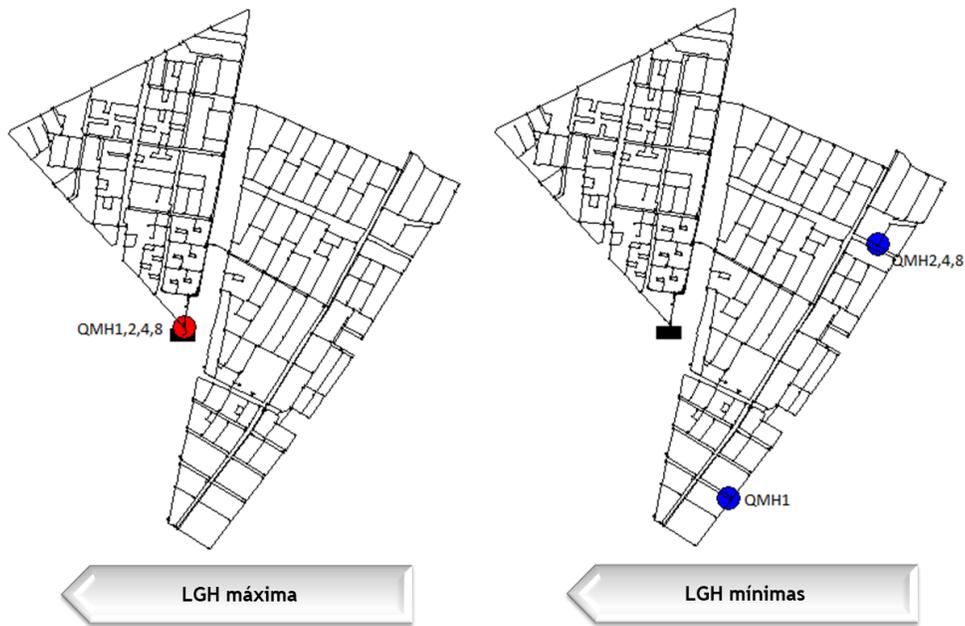


Figura 16. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

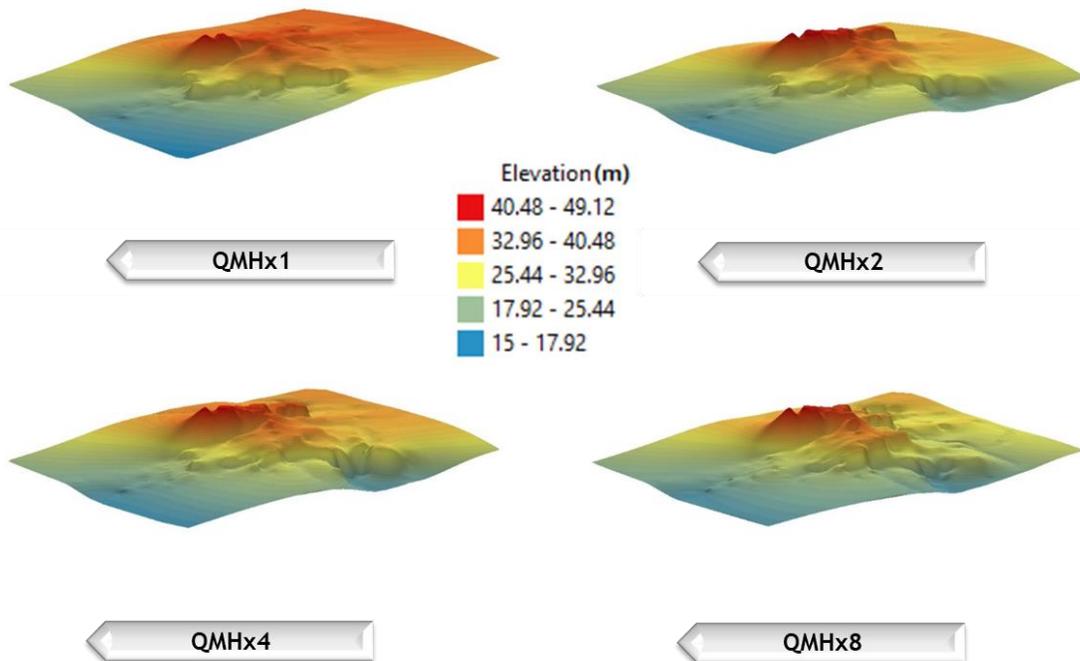


Figura 17. Superficies de Presión Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

La Figura 17 simula las superficies de presión de la red. Allí se mantiene una presión máxima en el nudo 2511, que oscila en 48.25 m, 49.12 m, 48.97 m, 48.71 m para los QMHx1, QMHx2, QMHx4 y QMHx8, correspondientemente.

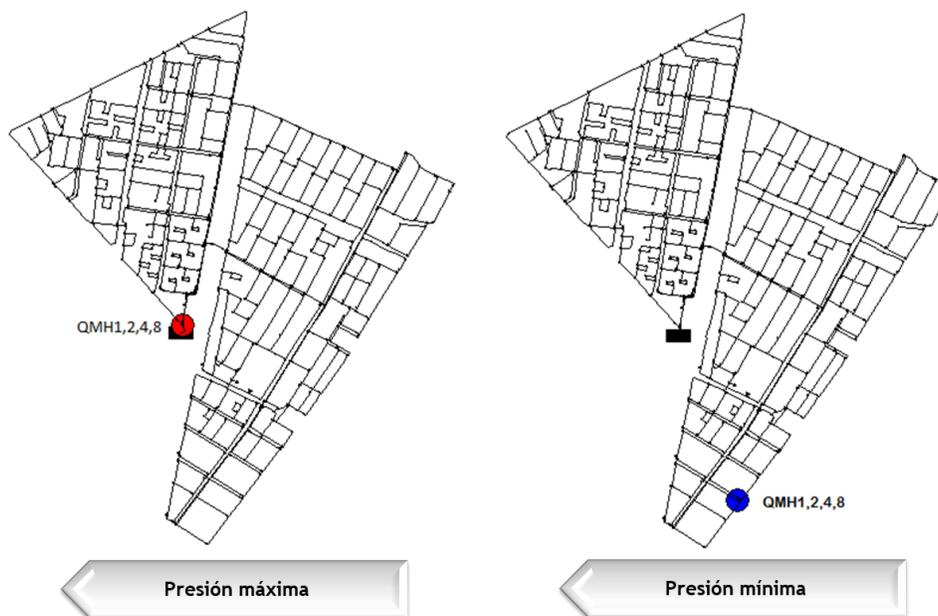


Figura 18. Presiones Máximas y Mínimas Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

Las presiones mínimas de todos los escenarios se sitúan en el nudo 2539; estos nudos comunes y/o cercanos a los nudos donde se encuentran las LGH mínimas. Esto se aprecia en la Figura 18.

4.1.3 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

En seguida, se relacionan las superficies para la red Troncal del Caribe, el cual presenta variaciones en la LGH desde 29 m hasta 95 m aproximadamente, como se aprecia en la Figura 19. Esta red se caracteriza por tener una tubería de alimentación bastante larga del tanque a zona mallada donde se distribuye el caudal directamente. La LGH máxima, por supuesto se encuentra en el nudo 8418, seguidamente del tanque y las LGH mínimas en los nudos 2791 para QMHx1, nudo 2774 para QMHx2, nudo 9276 para QMHx4 y 2814 para QMHx8, como se muestra en la Figura 20.

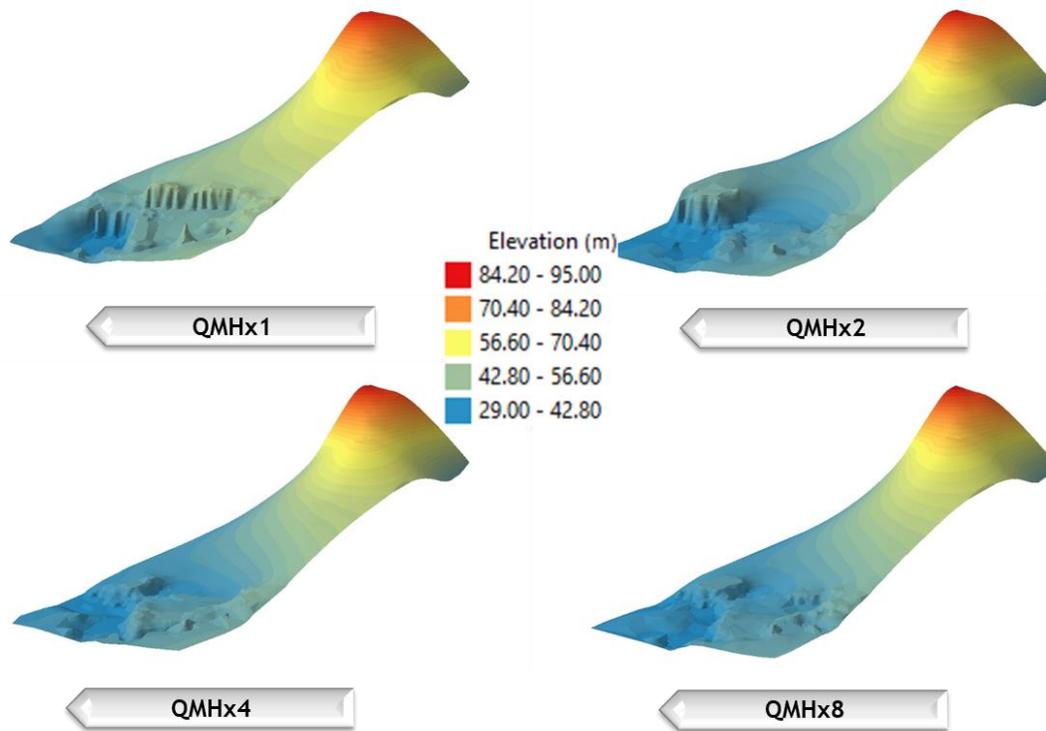


Figura 19. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

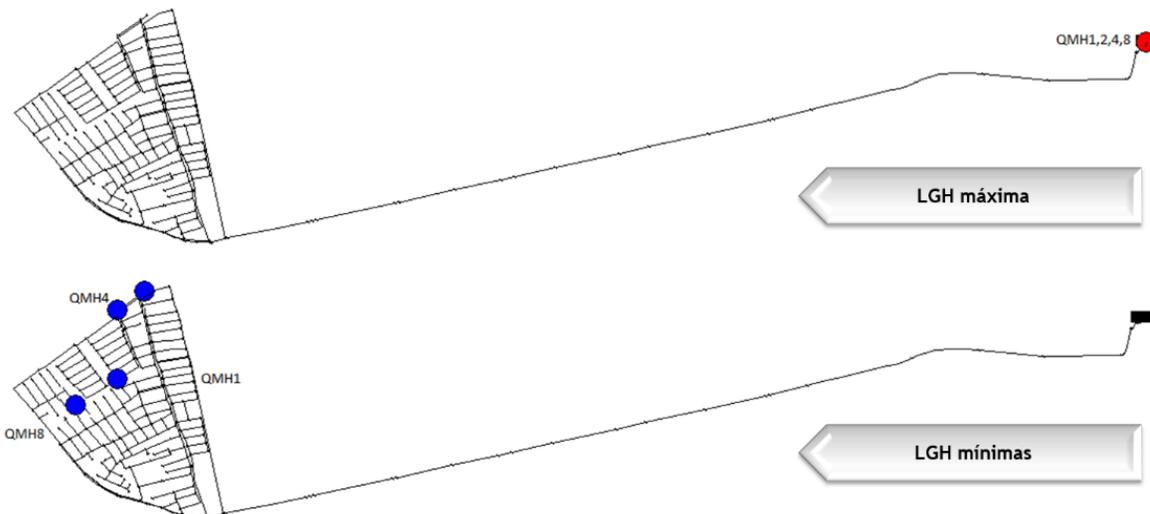


Figura 20. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

La Figura 21 enseña las superficies de presión de la red Troncal del Caribe para cada uno de los escenarios trabajados en esta tesis, esta es una de las redes que presenta mayor similitud tanto en las superficies de gradiente hidráulico como en las de presión.

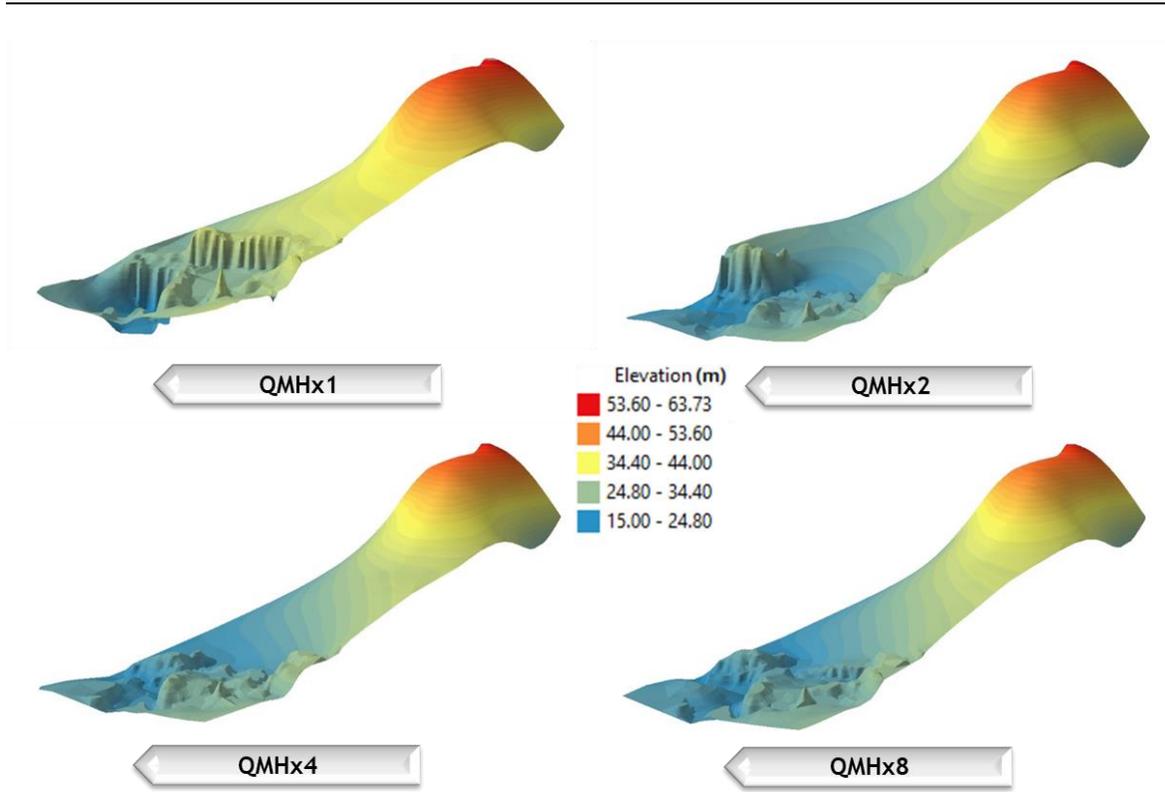


Figura 21. Superficies de Presión Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

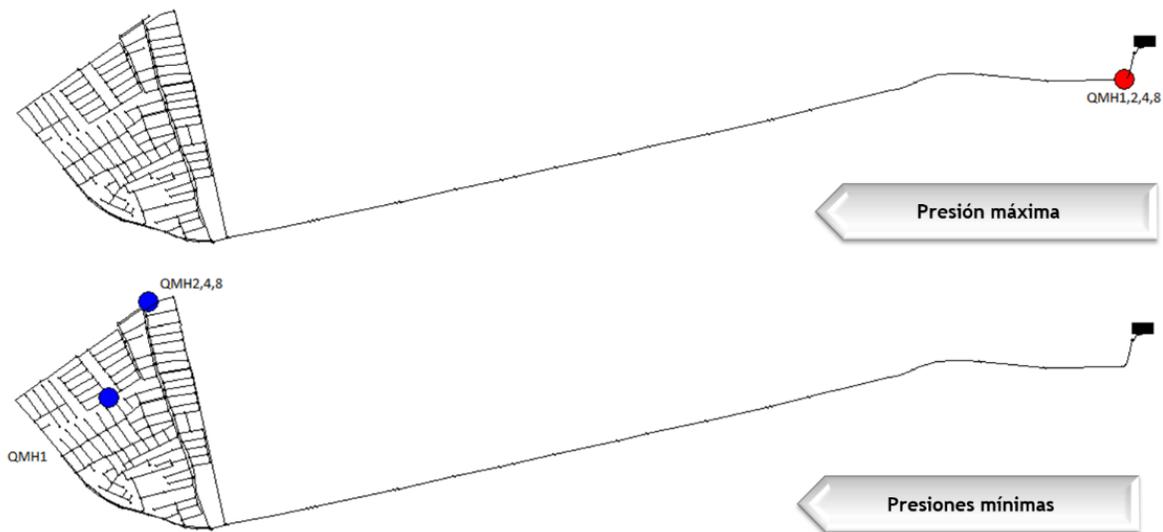


Figura 22. Presiones Máximas y Mínimas Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

La presión máxima de la red para todos los incrementos de caudal se encuentra en el nudo 213, muy cercano al tanque. Las presiones mínimas se manifiestan en los nudos 2802 para QMHx1 y en el nudo 2774 para los demás escenarios trabajados. Esto se ilustra en la Figura 22.

4.1.4 Red Morro Bajo (Bucaramanga)

Posteriormente, se ilustran las superficies de gradiente hidráulico para la red Morro Bajo, tal como se aprecia en la Figura 23. La superficie que presenta un valor máximo de la LGH es el QMHx8 en su nudo 829 con un valor de 1043.62 m; asimismo, este escenario halla un menor valor de la LGH con tan solo 904.10 m de elevación en su nudo 3016, resaltado la zona en azul. Es decir, que presenta los dos extremos.

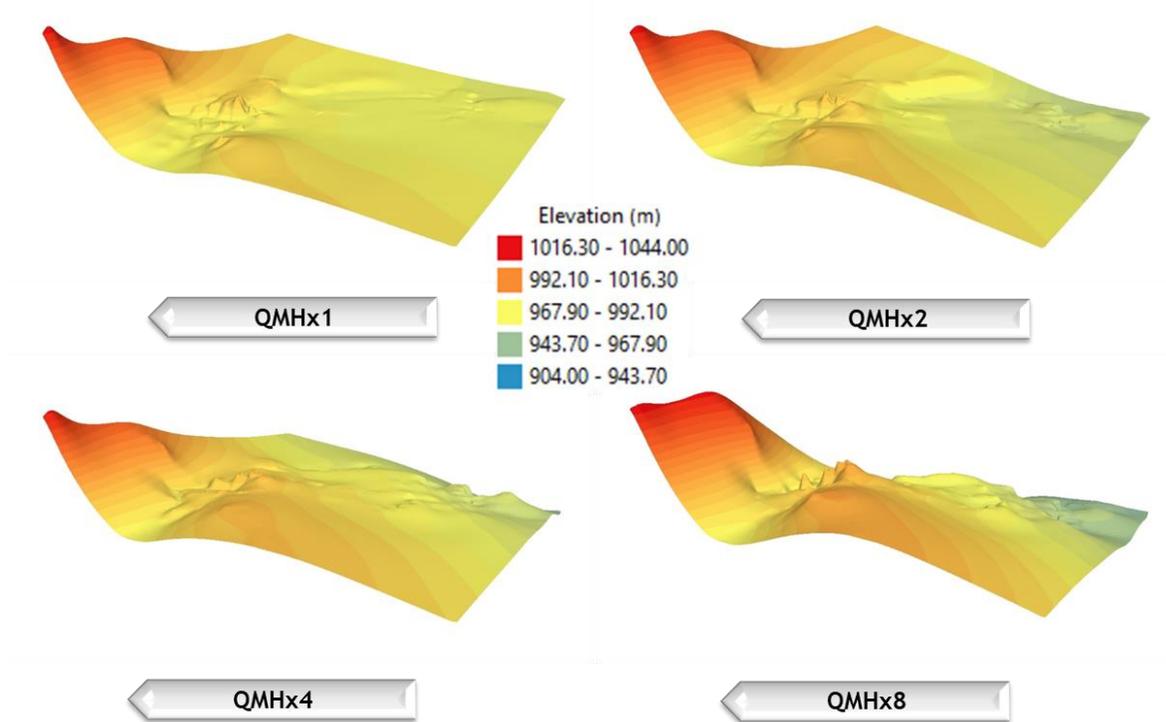


Figura 23. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Morro Bajo (Bucaramanga)

La Figura 24 define los nudos que presentan las LGH máximas y mínimas de la red de vista en planta. Se puede apreciar que el nudo 829 ubicado en seguida del tanque presenta la LGH máxima y, en consecuencia, en las zonas más alejadas del tanque se encuentran los nudos 7 y 3016 con los valores mínimos respectivamente.

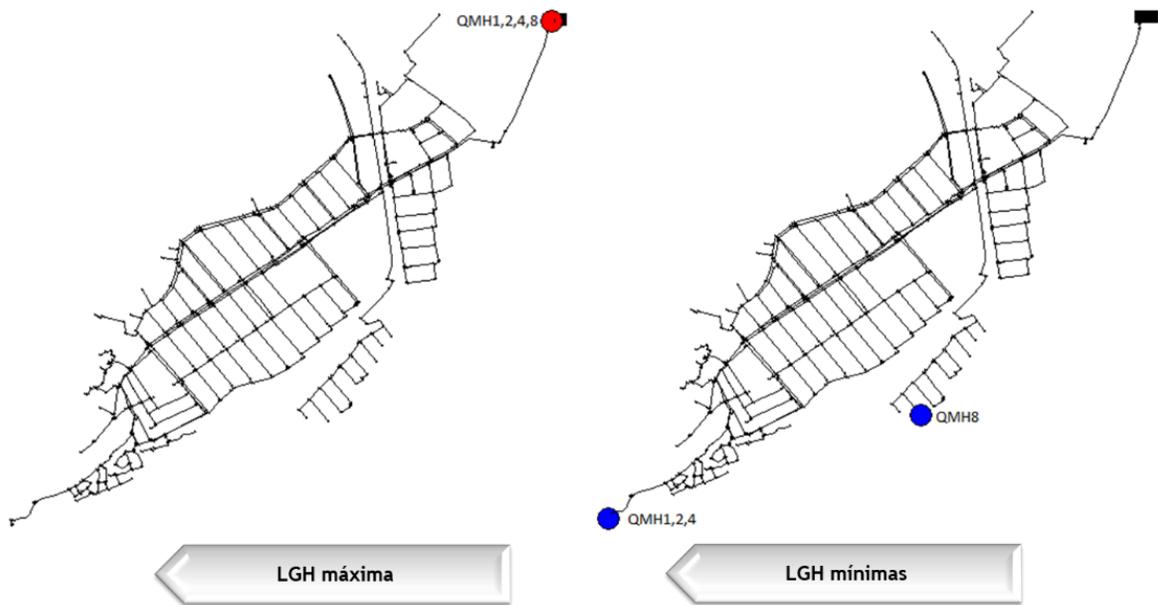


Figura 24. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Morro Bajo (Bucaramanga)

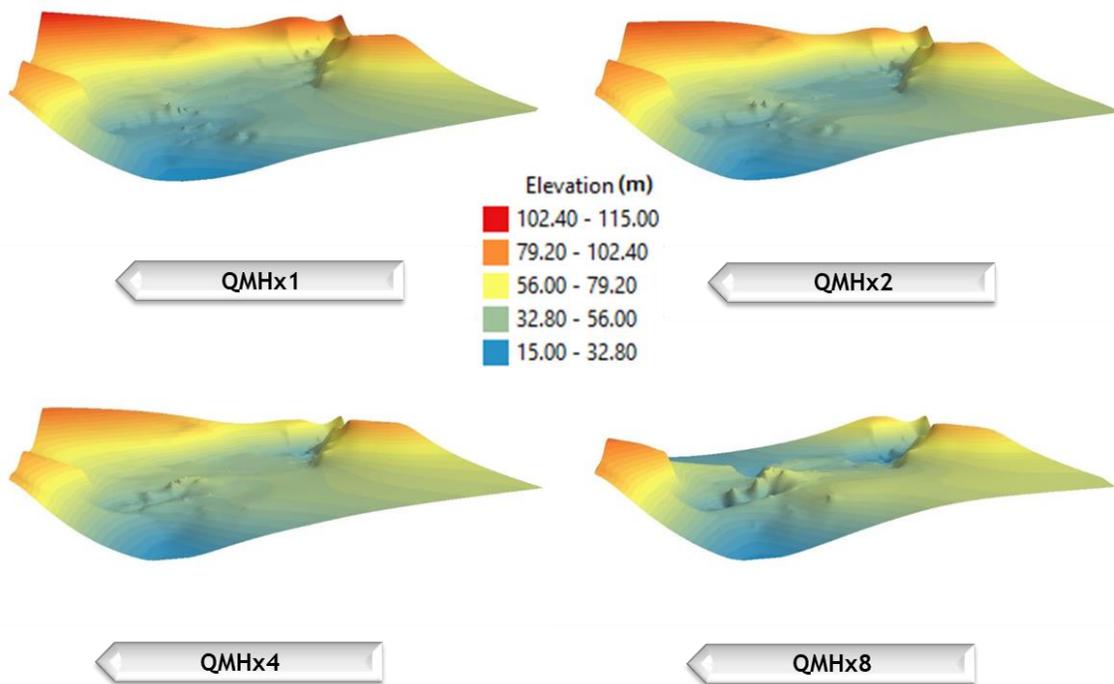


Figura 25. Superficies de Presión Red Morro Bajo (Bucaramanga)

La Figura 25 esquematiza las superficies de presión para cada uno de los incrementos de demanda implementados en la red Morro Bajo. De igual forma, la Figura 26 cita los nudos donde se sitúa la presión máxima de la red: nudo 7 para QMHx1 y QMHx2, nudo 3240 para QMHx4 y nudo 829 para QMHx8. A diferencia de las redes anteriores, esta presenta presiones máximas no sólo en nudos cercanos al tanque, sino también en los puntos extremos y más bajos de la zona, esto ocurre por ser una zona muy montañosa, por ejemplo, se tiene una diferencia de casi 110 m del nudo 829 al nudo 7 de la red.

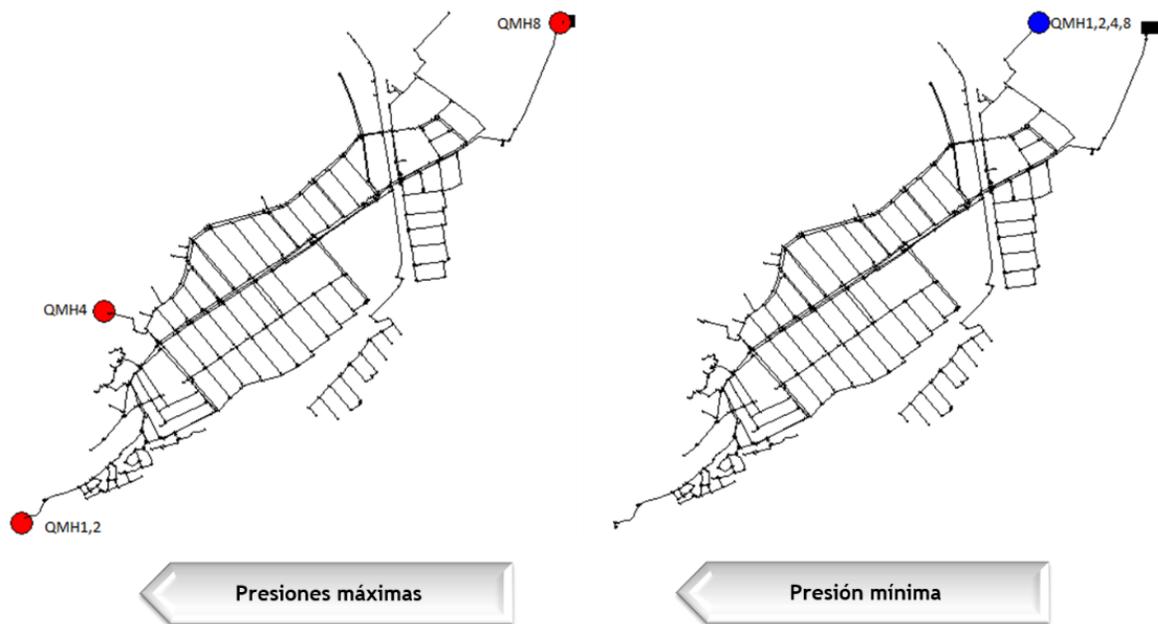


Figura 26. Presiones Máximas y Mínimas Red Morro Bajo (Bucaramanga)

4.1.5 Red Toro (Valle del Cauca)

A continuación, se presentan las superficies óptimas de gradiente hidráulico para cada uno de los aumentos de demanda dados en la red Toro. La Figura 27 ilustra estas condiciones para los QMHx1, QMHx2, QMHx4 y QMHx8. El escenario para QMHx1 se mantiene en un rango menor ya que presenta un valor de LGH máximo de 1011.33 m y un valor mínimo de 980.07 m. El segundo escenario mantiene un LGH máximo de 1011.29 m, pero desciende a un mínimo de 947.01 m. Para los escenarios QMHx4 y QMHx8 el valor máximo es casi constante a los anteriores y los valores mínimos están alrededor de 935 m, todos en el nudo 170 para valores máximos y nudo 313 para valores mínimos tal como lo ilustra la Figura 28. Sobresale que en el programa REDES® se define la condición de presión mínima (15 mca) y, asimismo, optimiza la red para obtener el más bajo costo cumpliendo con dicha restricción.

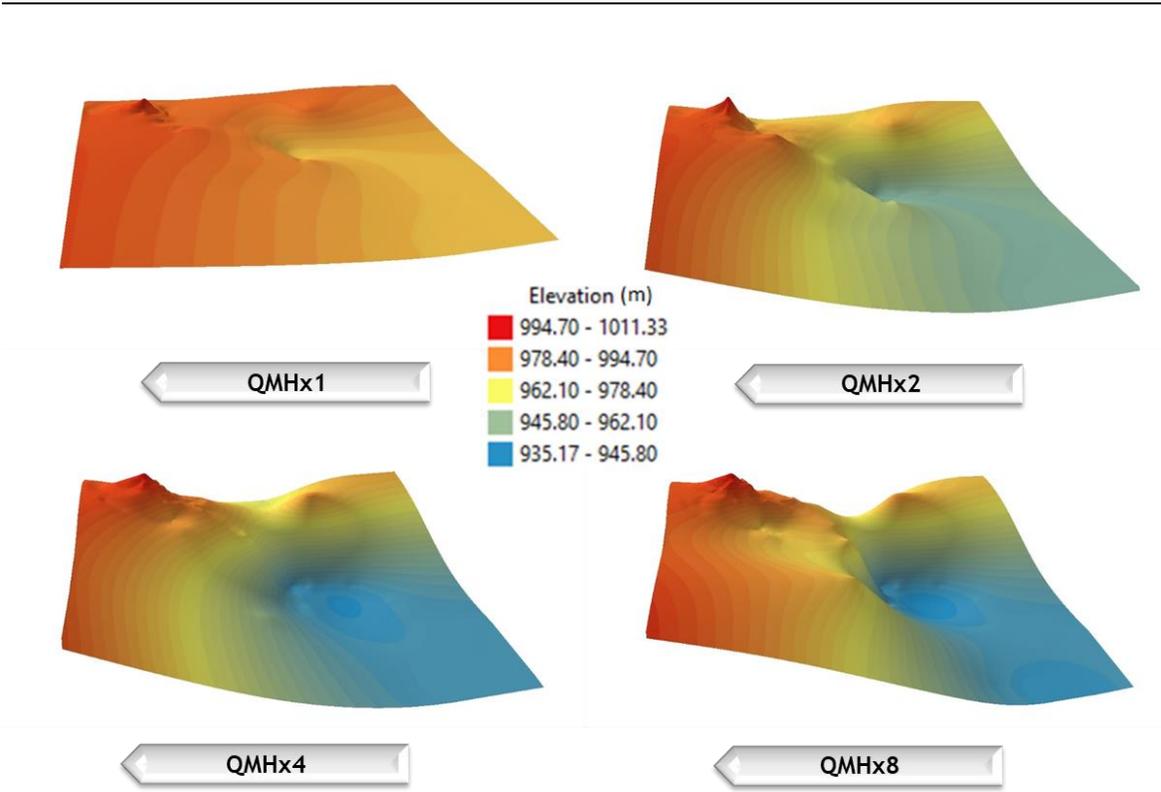


Figura 27. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Toro (Valle del Cauca)

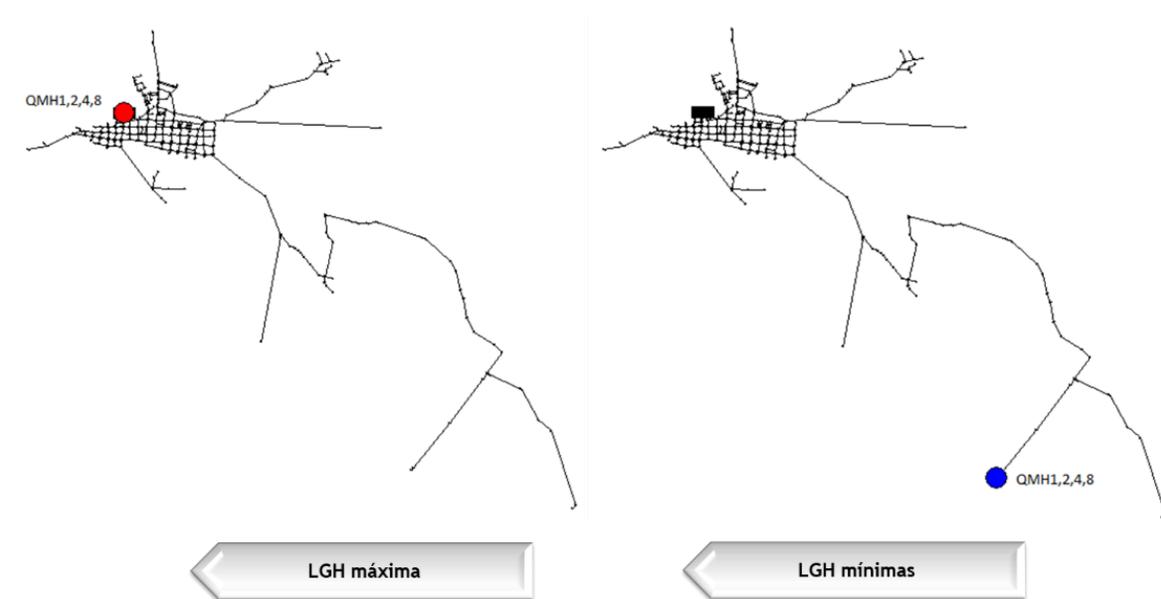


Figura 28. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Toro (Valle del Cauca)

Las superficies de presión ilustradas en la Figura 29 y la vista en planta de las presiones máximas y mínimas de la Figura 30, demuestran como las presiones más altas están en unos de los nudos más alejados del tanque. Sucede puesto que, Toro es un municipio bastante escarpado, las carreteras que conducen a estos puntos de demanda van por las cuchillas de las montañas y asimismo la tubería trata de hilar por estos caminos la conducción del caudal hasta los nudos más retirados.

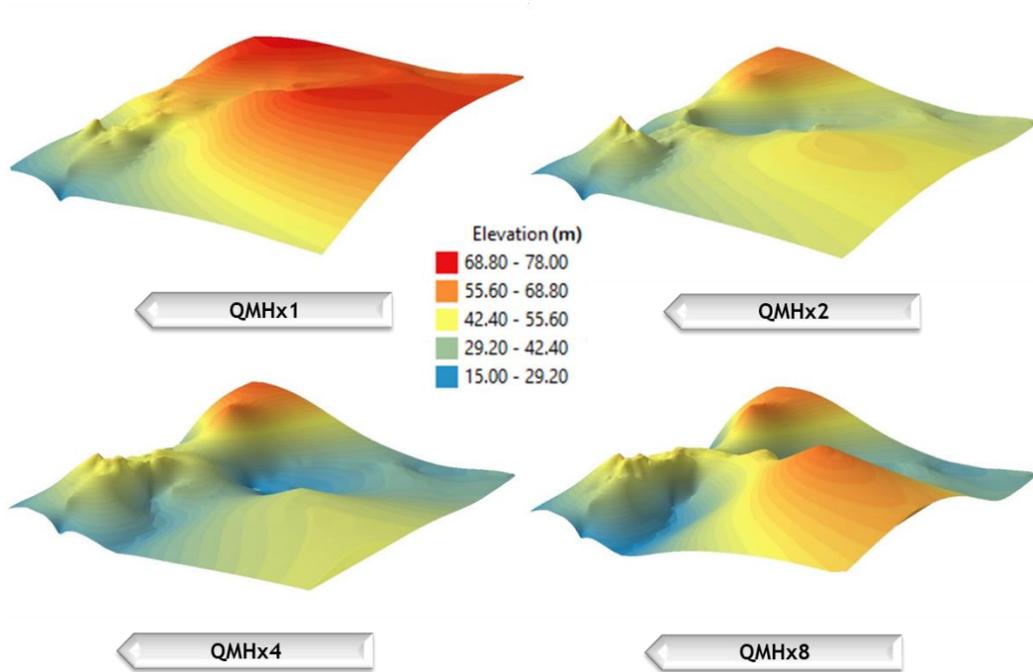


Figura 29. Superficies de Presión Red Toro (Valle del Cauca)

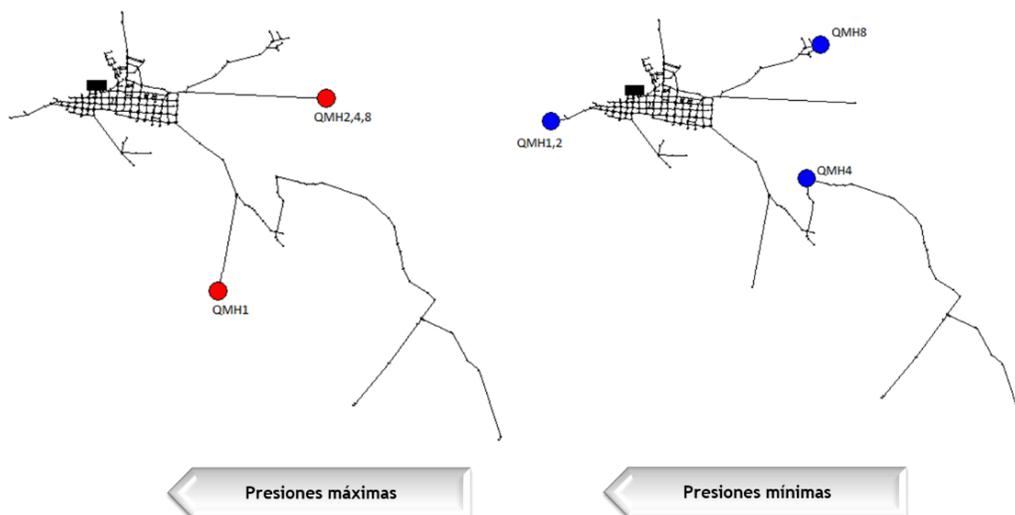


Figura 30. Presiones Máximas y Mínimas Red Toro (Valle del Cauca)

4.1.6 Red Bolívar (Valle del Cauca)

La red Bolívar se caracteriza por tener gran cantidad de circuitos cerrados; para el caso de los tramos que son abiertos, se encuentran las tuberías que tienen más longitud. A continuación, la Figura 31 presenta las superficies óptimas de gradiente hidráulico para las distintas demandas utilizadas. La zona que más presenta cambios de elevación es en la que se encuentran los circuitos cerrados de la red.

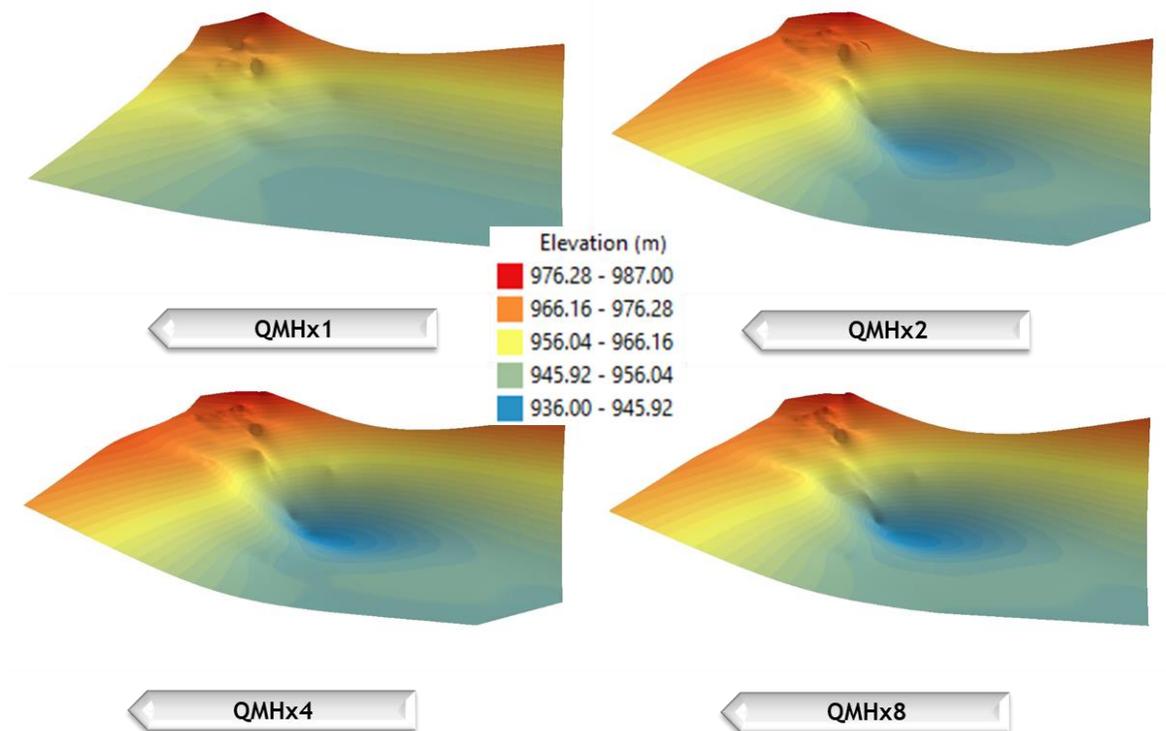


Figura 31. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Bolívar (Valle del Cauca)

La Figura 32 enseña las LGH máximas y mínimas de la red Bolívar. La LGH máxima se encuentra en el nudo 29 con un valor aproximado de 986.99 m en todos los escenarios, la variación que experimentan es al centímetro. Para las LGH mínimas el nudo 249 tiene un valor de 945.16 m en el QMx1 y el nudo 257 valores de 940.16 m, 936.26 m, 936.51 m para QMx2, QMx4 y QMx8 respectivamente.

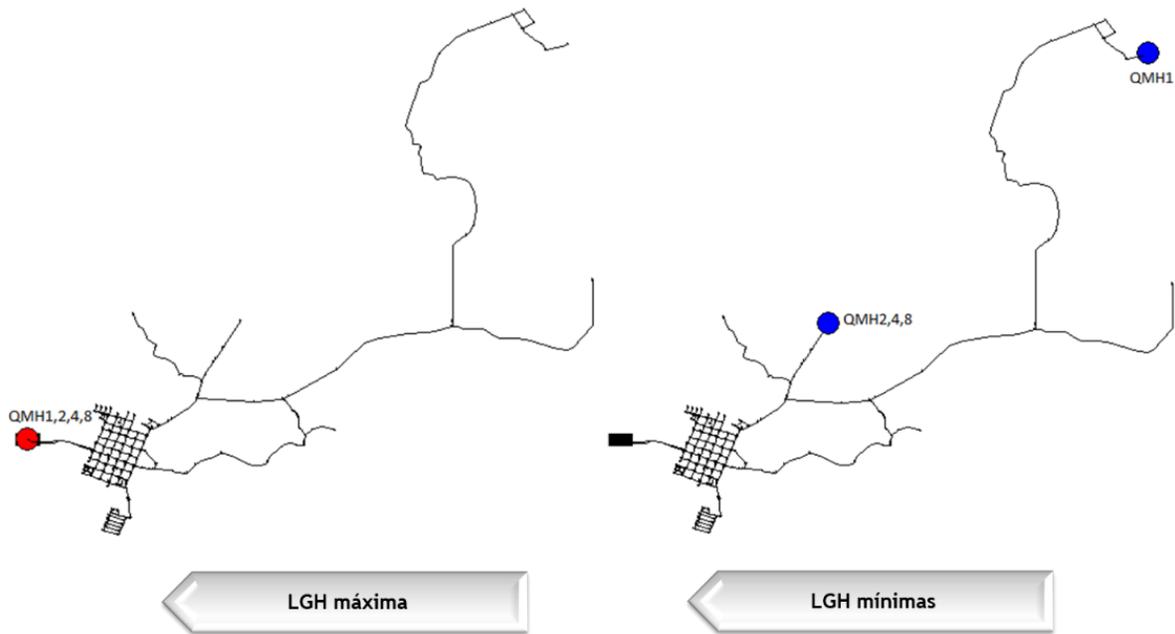


Figura 32. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Bolívar (Valle del Cauca)

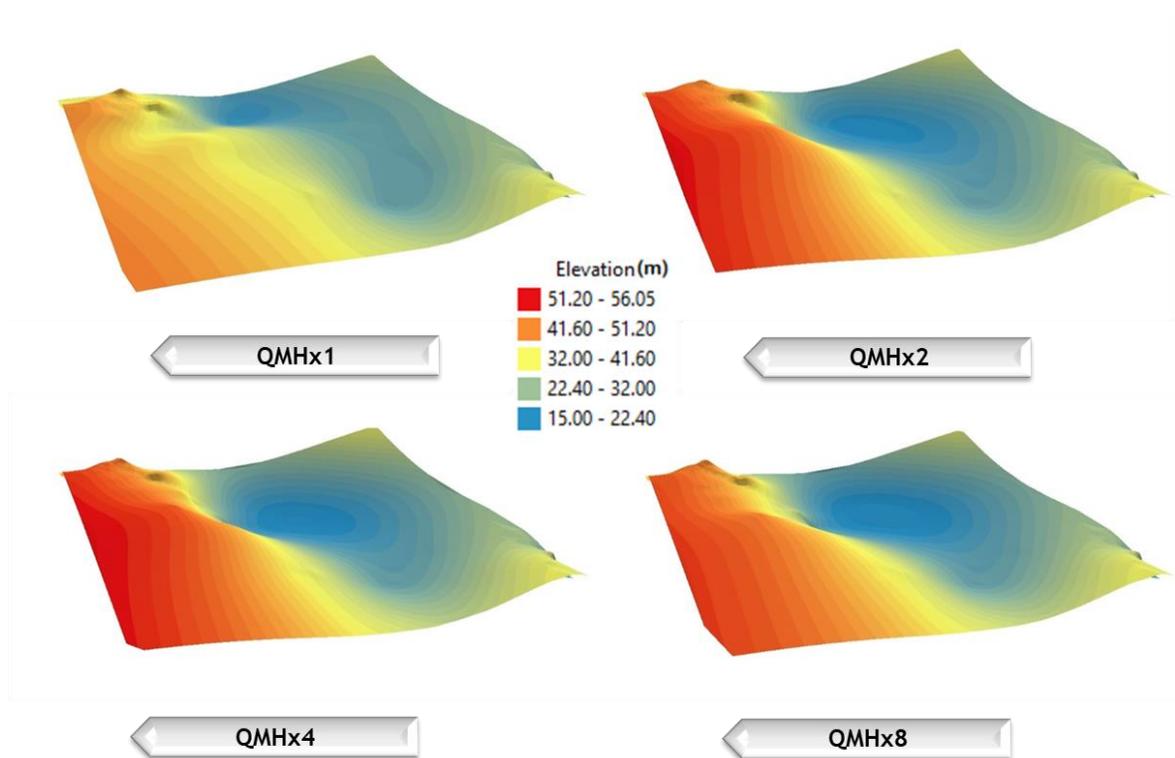


Figura 33. Superficies de Presión Red Bolívar (Valle del Cauca)

Al igual que Toro, Bolívar es un municipio abundantemente montañoso, dado ello, las presiones máximas no se encuentran precisamente cercanas al tanque. La Figura 33 representa las superficies de presión de cada escenario. La Figura 34 muestra las presiones máximas en los nudos 242 para QMHx1 y QMHx8; en el nudo 27 para los QMHx2 y QMHx4. La presión mínima para todas las demandas se encuentra en el nudo 7.

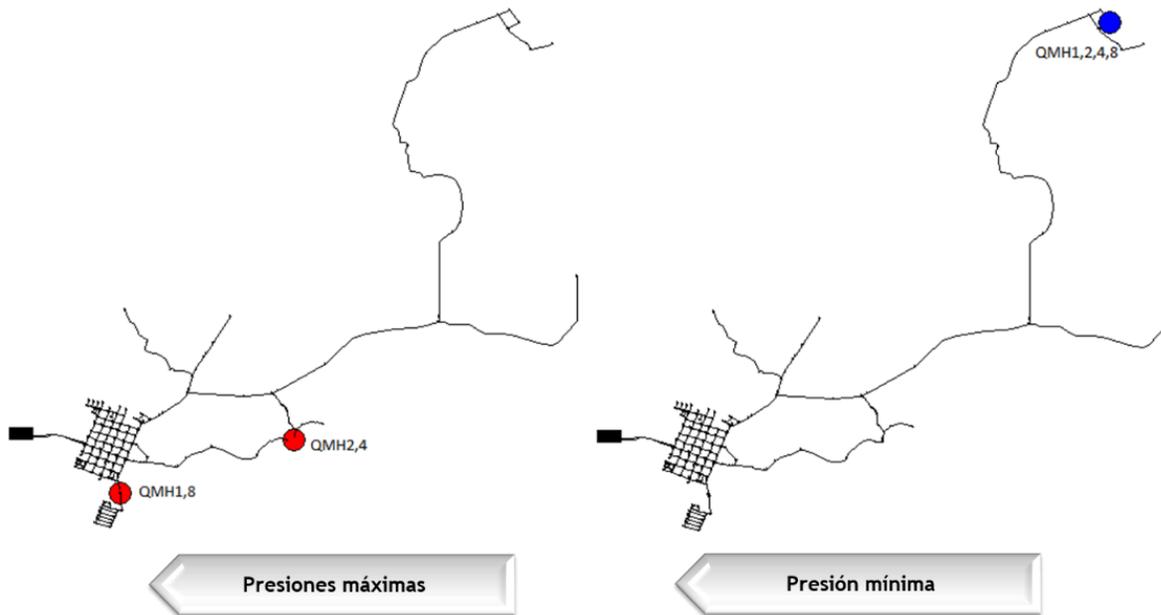


Figura 34. Presiones Máximas y Mínimas Red Bolívar (Valle del Cauca)

4.1.7 Red Modena

La red Modena, considerada como patrón internacional se caracteriza por ser una red mallada compuesta por cuatro tanques. La Figura 35 presenta las superficies óptimas de gradiente hidráulico para los distintos escenarios propuestos. Esta es la red con mayor demanda, para QMHx1 se tienen 406.94 lps, QMHx2 813.88 lps, QMHx4 1627.76 lps y QMHx8 3255,82 lps.

En el nudo 209 se presentan las LGH máximas para los QMHx1, QMHx2 y QMHx4, con un valor constante de 73.79 m, el nudo 136, ubicado inmediatamente después del tanque más elevado de la red, presenta la LGH máxima para el QMHx8 con 74.08 m, esto se ilustra en la Figura 36.

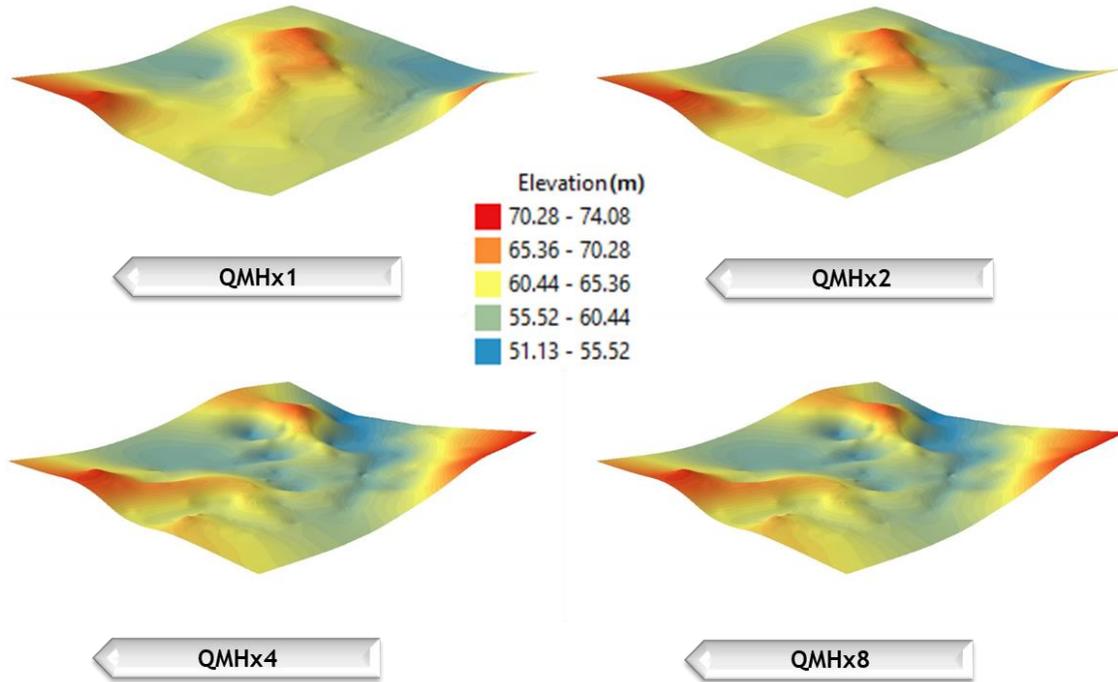


Figura 35. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Modena

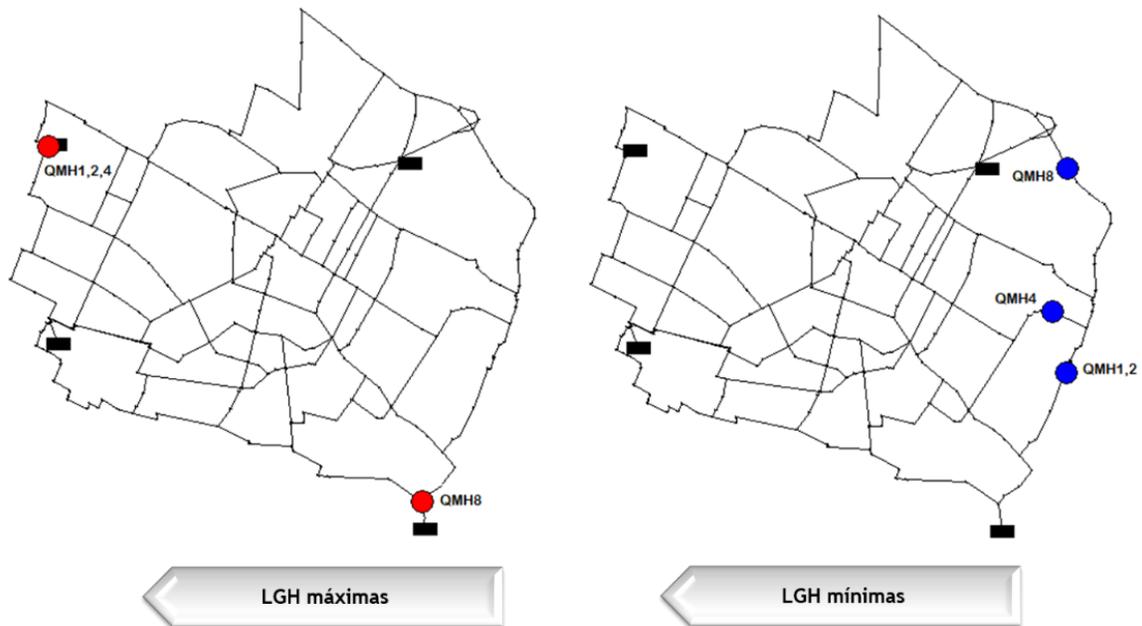


Figura 36. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Modena

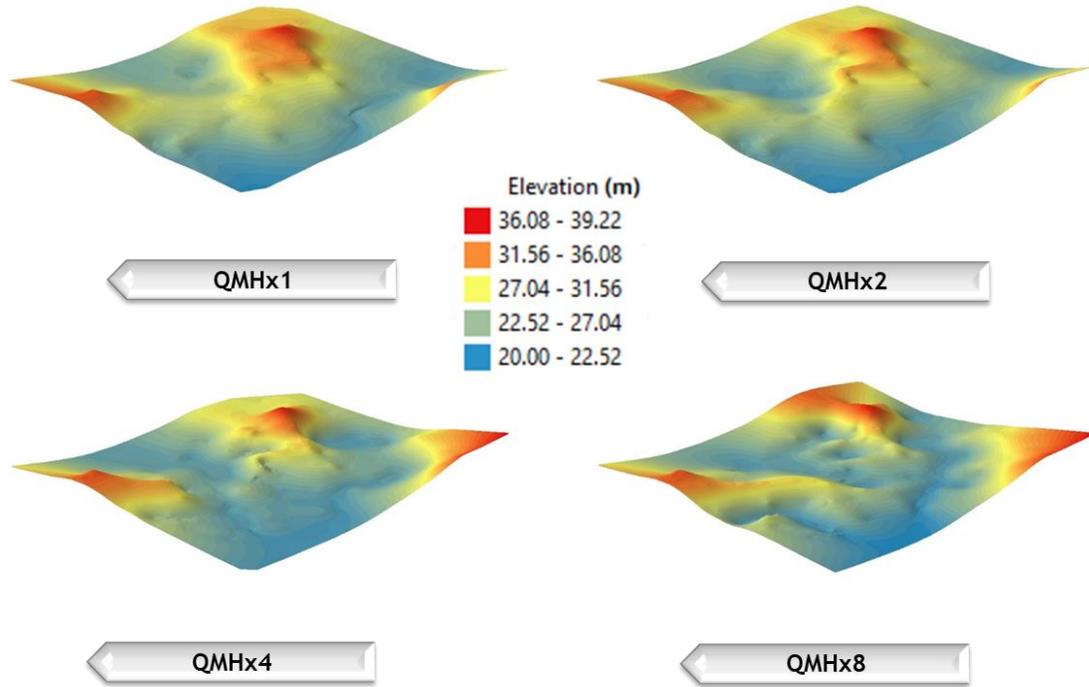


Figura 37. Superficies de Presión Red Modena

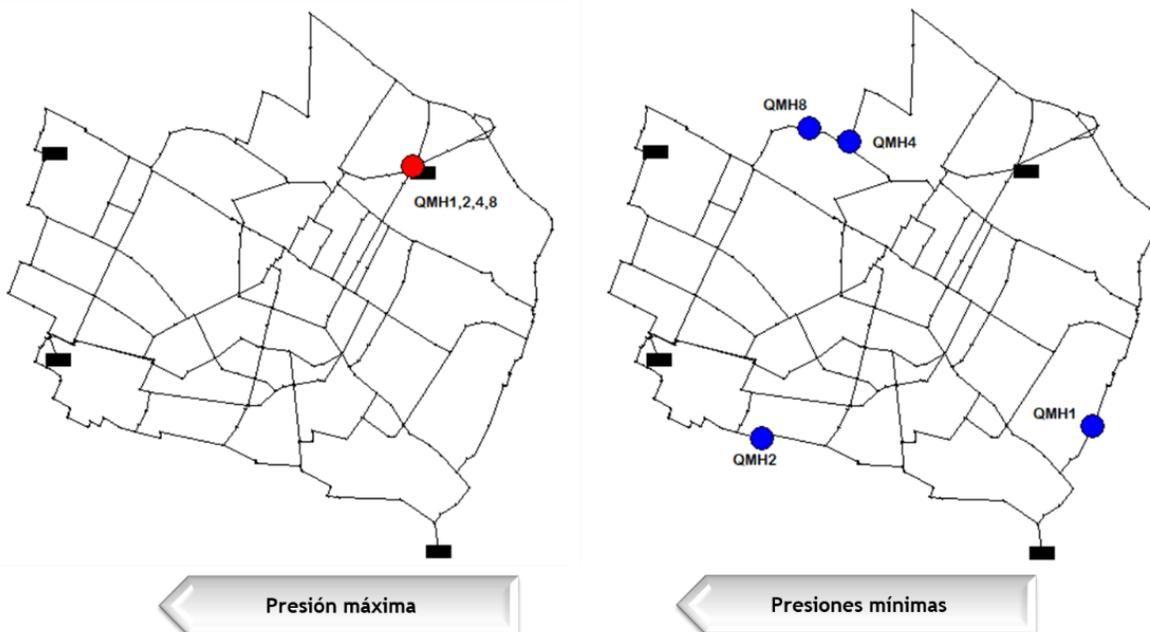


Figura 38. Presiones Máximas y Mínimas Red Modena

La Figura 37 muestra las superficies de presión de la red Modena, teniendo en cuenta una presión mínima de 20 m, a diferencia de las otras 6 redes analizadas. La presión máxima para todos los escenarios presentados de la red se sitúa en el nudo 52 con un valor constante de 39.21 m como se enseña en la Figura 38.

4.1.8 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos

La red Sector 13 M453 B de la ciudad de Bogotá, presenta un rango menor de las elevaciones de las LGH con diámetros continuos, como se muestra en la Figura 39; para el caso de los diámetros discretos se tuvo un valor máximo de 2603.59 m y mínimo de 2571.38 m (esto se puede apreciar nuevamente en la Figura 11).

La Figura 40 enseña que las LGH máximas para todos los escenarios se ubican en el nudo 16418, este se encuentra inmediatamente después del tanque. La LGH mínimas sí presentan una variabilidad con valores de 2578.82 m para QMHx1, 2576.33 m QMHx2, 2574.05 m QMHx4 y, finalmente, 2572.64 QMHx8.

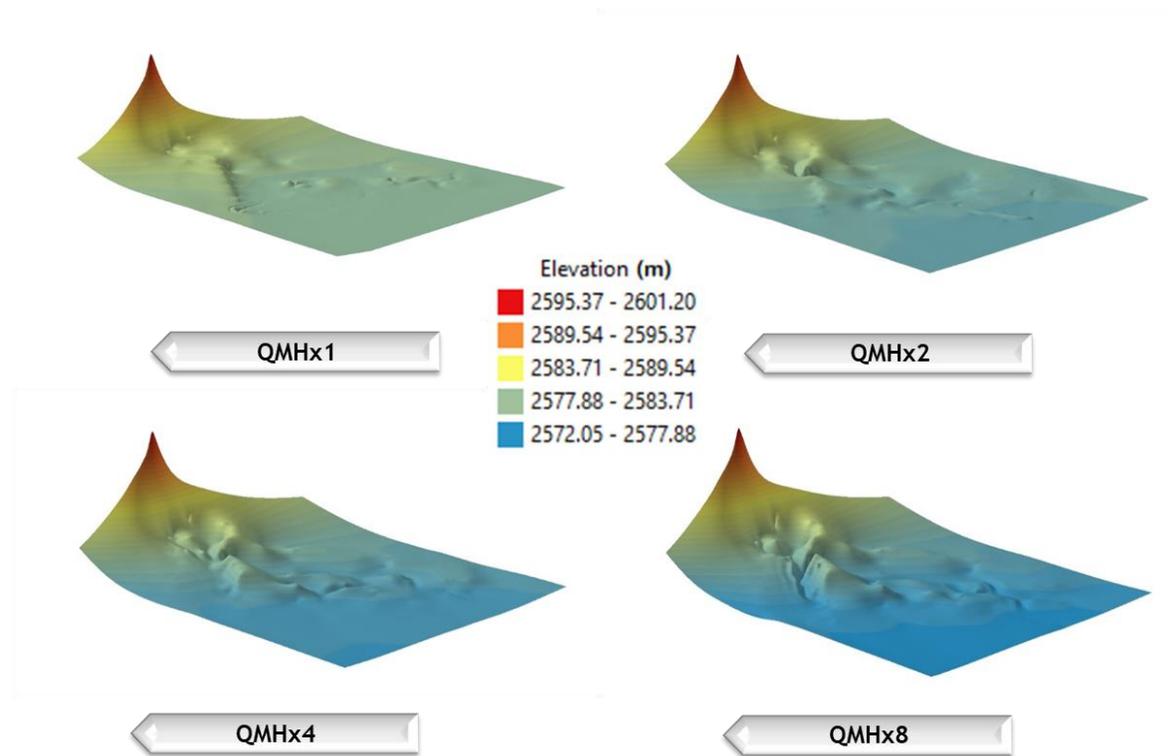


Figura 39. Superficies Óptimas de Gradiente Hidráulico Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos

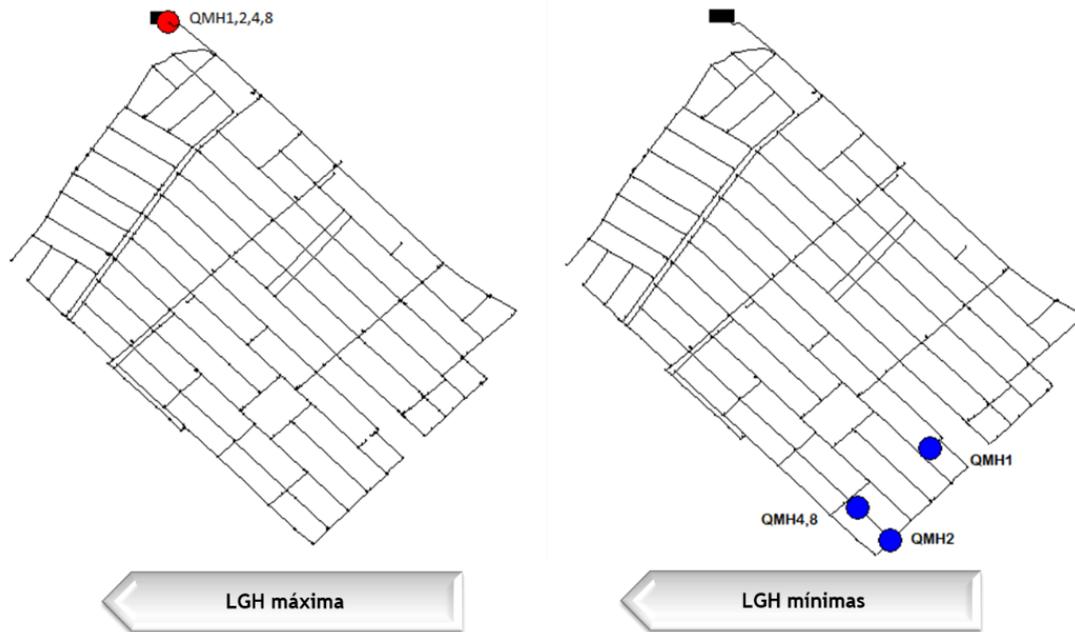


Figura 40. Líneas de Gradiente Hidráulico Máximas y Mínimas Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos

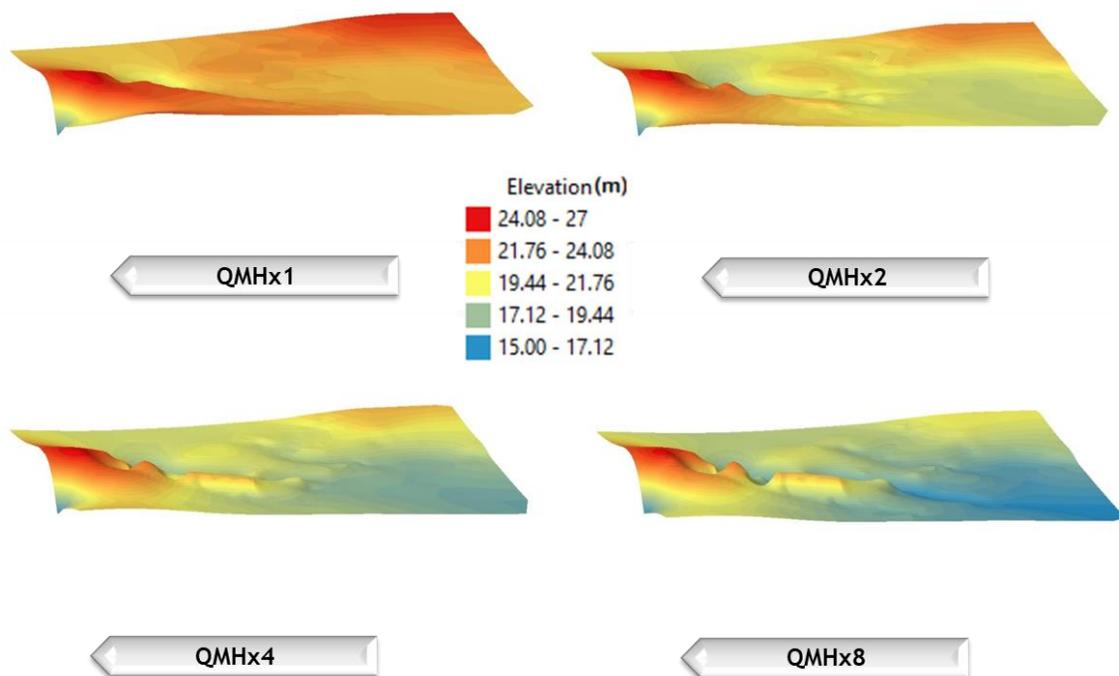


Figura 41. Superficies de Presión Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos

Las superficies de presión oscilan en 26.96 m y 15 m ilustrados en la Figura 41, estos valores son constantes para todos los escenarios y se presentan en los nudos 5986 y 16418 de la red. La Figura 42 indica cómo estos permanecen invariables a pesar del incremento de demanda que se tiene para los diferentes escenarios.

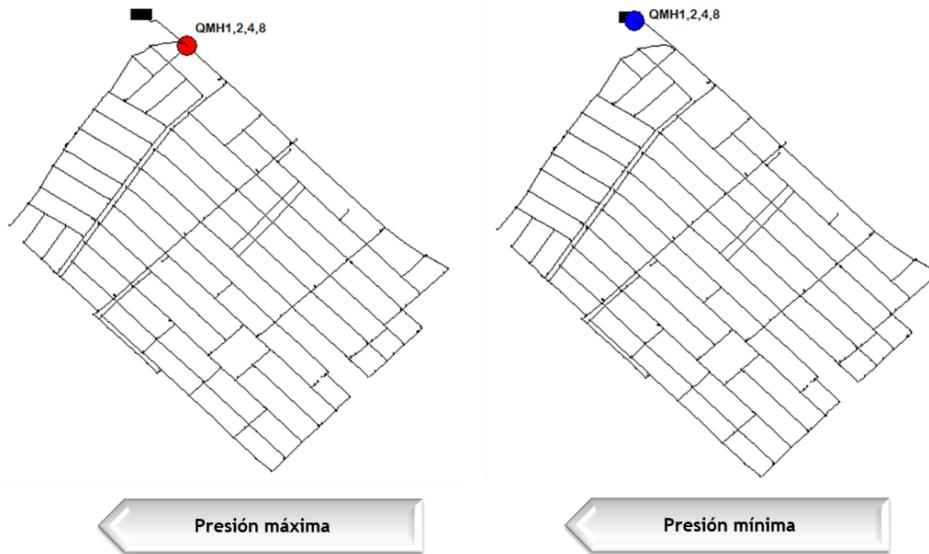


Figura 42. Presiones Máximas y Mínimas Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos

4.2 Índices geométricos

4.2.1 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos

En seguida, se encuentran los resultados obtenidos para los índices geométricos que se definieron en el capítulo 2.5. La Tabla 10 contiene las coordenadas de los centroides equivalentes a los cuatro escenarios de demanda, teniendo en cuenta que el centroide de potencia es el único que no varía estas condiciones para el aumento de demanda.

Tabla 10. Índices geométricos Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

	CENTROIDE DE VOLUMEN (m)		CENTROIDE DE POTENCIA ESPECÍFICA		CENTROIDE DE POTENCIA (m)		CENTROIDE DE DIÁMETRO (m)	
	COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
QMHx1	94396	100998	94333	101334	94449	100870	94426	100872
QMHx2	94394	101010	94348	101262			94425	100878
QMHx4	94384	101044	94351	101229			94422	100894
QMHx8	94383	101062	94357	101254			94420	100912

4.2.2 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

A continuación, la Tabla 11 presenta los resultados obtenidos para la red Sector 8 Subsector 5 de la ciudad de Bogotá. En el capítulo 5 se muestran los centroides ya georreferenciados en cada una de las redes de distribución de agua potable.

Tabla 11. Índices geométricos Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

	CENTROIDE DE VOLUMEN (m)		CENTROIDE DE POTENCIA ESPECÍFICA (m)		CENTROIDE DE POTENCIA (m)		CENTROIDE DE DIÁMETRO (m)	
	COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
QMHx1	101977	108116	101944	107973	102049	108079	101969	108104
QMHx2	101980	108107	101956	108027			101968	108098
QMHx4	101975	108106	101967	108022			101961	108089
QMHx8	101975	108103	101974	108024			101958	108089

4.2.3 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

De igual forma, la Tabla 12 presenta los resultados hallados para la red Troncal del Caribe, ubicada en la ciudad de Santa Marta.

Tabla 12. Índices geométricos Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

	CENTROIDE DE VOLUMEN (m)		CENTROIDE DE POTENCIA ESPECÍFICA		CENTROIDE DE POTENCIA (m)		CENTROIDE DE DIÁMETRO (m)	
	COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
QMHx1	988314	1732813	989223	1732796	987961	1732865	988046	1732797
QMHx2	988359	1732800	989416	1732829			988088	1732784
QMHx4	988421	1732793	989444	1732842			988126	1732775
QMHx8	988477	1732793	989397	1732825			988163	1732776

4.2.4 Red Morro Bajo (Bucaramanga)

En la Tabla 13 se ilustran los resultados obtenidos para la red Morro Bajo de la ciudad de Bucaramanga.

Tabla 13. Índices geométricos Red Morro Bajo (Bucaramanga)

	CENTROIDE DE VOLUMEN (m)		CENTROIDE DE POTENCIA ESPECÍFICA		CENTROIDE DE POTENCIA (m)		CENTROIDE DE DIÁMETRO (m)	
	COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
QMhx1	106249	76983	106743	77424	106266	77007	106194	76925
QMhx2	106262	76996	106682	77377			106203	76935
QMhx4	106273	77019	106693	77408			106216	76965
QMhx8	106284	77035	106592	77325			106222	76979

4.2.5 Red Toro (Valle del Cauca)

Seguidamente, en la Tabla 14 se encuentran los índices geométricos hallados para la red del municipio de Toro. Los resultados de cada red están definidos para los distintos escenarios propuestos: QMhx1, QMhx2, QMhx4 y QMhx8.

Tabla 14. Índices geométricos Red Toro (Valle del Cauca)

	CENTROIDE DE VOLUMEN (m)		CENTROIDE DE POTENCIA ESPECÍFICA		CENTROIDE DE POTENCIA (m)		CENTROIDE DE DIÁMETRO (m)	
	COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
QMhx1	1111898	1000861	1110620	1001616	1111067	1001488	1111249	1001364
QMhx2	1111894	1000863	1110756	1001512			1111245	1001365
QMhx4	1111855	1000887	1111026	1001425			1111232	1001360
QMhx8	1111803	1000929	1111056	1001411			1111201	1001381

4.2.6 Red Bolívar (Valle del Cauca)

En la Tabla 15 se presentan los índices geométricos de la red Bolívar del departamento de Valle del Cauca. Al igual que en las redes anteriores, se determinaron las coordenadas X y para cada incremento de demanda utilizado.

Tabla 15. Índices geométricos Red Bolívar (Valle del Cauca)

	CENTROIDE DE VOLUMEN (m)		CENTROIDE DE POTENCIA ESPECÍFICA		CENTROIDE DE POTENCIA (m)		CENTROIDE DE DIÁMETRO (m)	
	COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
QMHx1	1100460	972459	1099093	971643	1099745	971827	1099460	971666
QMHx2	1100353	972362	1099452	971767			1099436	971646
QMHx4	1100285	972291	1099545	971789			1099439	971639
QMHx8	1100247	972237	1099435	971723			1099446	971633

4.2.7 Red Modena

La Tabla 16 presenta los índices geométricos de la red Modena, considerada como red patrón internacional.

Tabla 16. Índices geométricos Red Modena

	CENTROIDE DE VOLUMEN (m)		CENTROIDE DE POTENCIA ESPECÍFICA		CENTROIDE DE POTENCIA (m)		CENTROIDE DE DIÁMETRO (m)	
	COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
QMHx1	1652670	4945227	1653094	4945409	1652666	4945206	1652673	4945225
QMHx2	1652687	4945246	1653107	4945368			1652654	4945233
QMHx4	1652495	4945211	1652939	4945352			1652426	4945182
QMHx8	1652552	4945211	1652801	4945370			1652546	4945182

4.2.8 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos

Finalmente, se presentan los índices geométricos de la última red analizada, la red del Sector 13 M453 B de Bogotá, con diámetros continuos. Al igual que en las redes anteriores, se determinaron las coordenadas X y para cada incremento de demanda utilizado.

Tabla 17. Índices geométricos Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos

	CENTROIDE DE VOLUMEN (m)		CENTROIDE DE POTENCIA ESPECÍFICA		CENTROIDE DE POTENCIA (m)		CENTROIDE DE DIÁMETRO (m)	
	COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA		COORDENADA	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
<i>QMHx1</i>	94401	100985	94325	101352	94449	100870	94426	100876
<i>QMHx2</i>	94399	101006	94329	101336			94427	100884
<i>QMHx4</i>	94397	101026	94334	101320			94428	100893
<i>QMHx8</i>	94395	101042	94338	101310			94430	100900

4.3 Índices de confiabilidad y eficiencia energética

Los índices de confiabilidad y eficiencia energética fueron calculados con las ecuaciones descritas en el capítulo 2.6. Ahora se presentan los resultados para cada una de las redes y sus escenarios:

4.3.1 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos

Es notable que el índice de resiliencia es considerablemente bajo en la Tabla 18 para la primera red; aun así, los aumentos de demanda hacen disminuir más este valor, a excepción del último escenario, el de la Tabla 21 para un QMHx8, donde se obtienen los valores más altos de resiliencia.

Tabla 18. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos

<i>QMHx1</i>	
CMRI	0.297
RI	0.135
MRI	0.256
PPC	19.366

Tabla 19. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos

<i>QMHx2</i>	
CMRI	0.264
RI	0.120
MRI	0.228
PPC	17.981

Tabla 20. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos

QMHx4	
CMRI	0.247
RI	0.112
MRI	0.212
PPC	17.230

Tabla 21. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos

QMHx8	
CMRI	0.324
RI	0.147
MRI	0.279
PPC	20.519

4.3.2 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

La red del Sector 8 Subsector 5 presenta valores bastante superiores a la anterior red, al tener un valor de RI mayor a 0.5 se podría considerar resiliente, sin embargo, a medida que se aumentan los caudales, la resiliencia va disminuyendo hasta casi un 30% del escenario de la Tabla 22 al de la Tabla 25.

Tabla 22. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

QMHx1	
CMRI	1.228
RI	0.519
MRI	0.932
PPC	57.613

Tabla 23. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

QMHx2	
CMRI	1.034
RI	0.437
MRI	0.784
PPC	50.366

Tabla 24. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

QMHx4	
CMRI	1.042
RI	0.441
MRI	0.791
PPC	50.690

Tabla 25. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

QMHx8	
CMRI	0.855
RI	0.361
MRI	0.649
PPC	43.705

4.3.3 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

La red Troncal del Caribe es la menos resiliente de todas las redes analizadas en esta investigación, podría relacionarse con que es un terreno muy plano y por ello se produce una eficiencia energética demasiado baja.

Tabla 26. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

QMHx1	
CMRI	0.784
RI	0.092
MRI	0.684
PPC	11.768

Tabla 27. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

QMHx2	
CMRI	0.473
RI	0.110
MRI	0.413
PPC	13.949

Tabla 28. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

QMHx4	
CMRI	0.464
RI	0.108
MRI	0.404
PPC	13.737

Tabla 29. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

QMHx8	
CMRI	0.430
RI	0.100
MRI	0.375
PPC	12.980

4.3.4 Red Morro Bajo (Bucaramanga)

Morro Bajo, también es una de las redes con los valores más bajos de resiliencia, tal como se ilustra en la Tabla 30. Los resultados oscilan ya que en cada incremento de demanda se elevan estos valores y vuelven a disminuir, no hay un crecimiento o un decrecimiento constante.

Tabla 30. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Morro Bajo (Bucaramanga)

QMHx1	
CMRI	1.619
RI	0.219
MRI	0.249
PPC	55.309

Tabla 31. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Morro Bajo (Bucaramanga)

QMHx2	
CMRI	1.382
RI	0.187
MRI	0.212
PPC	53.467

Tabla 32. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Morro Bajo (Bucaramanga)

QMHx4	
CMRI	1.597
RI	0.216
MRI	0.245
PPC	55.137

Tabla 33. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Morro Bajo (Bucaramanga)

QMHx8	
CMRI	1.163
RI	0.158
MRI	0.179
PPC	51.766

4.3.5 Red Toro (Valle del Cauca)

Para el caso de los índices de confiabilidad y eficiencia energética, en la Tabla 35 se observa como disminuye un 30% el índice de resiliencia de la red para el aumento de QMHx2 con respecto a la Tabla 34; sin embargo, al continuar incrementando la demanda por QMHx4 en la Tabla 36 y QMHx8 Tabla 37 nuevamente aumenta la resiliencia, es decir, incrementa la confiabilidad de la red.

Tabla 34. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Toro (Valle del Cauca)

QMH1	
CMRI	2.183
RI	0.672
MRI	0.565
PPC	82.568

Tabla 35. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Toro (Valle del Cauca)

QMH2	
CMRI	1.549
RI	0.477
MRI	0.401
PPC	72.197

Tabla 36. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Toro (Valle del Cauca)

QMH4	
CMRI	1.719
RI	0.529
MRI	0.445
PPC	74.986

Tabla 37. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Toro (Valle del Cauca)

QMH8	
CMRI	1.768
RI	0.544
MRI	0.458
PPC	75.792

4.3.6 Red Bolívar (Valle del Cauca)

La red Bolívar presenta los índices más altos de la investigación, es decir, que es la red con mayor capacidad de respuesta ante diferentes eventualidades en el sistema. Como el RI se encuentra superior a 0.5 en todos los escenarios, se podría considerar una red confiable. Es de resaltar que los valores más altos de resiliencia se encuentran en la red con QMHx2 y QMHx4 de la Tabla 39 y Tabla 40, respectivamente.

Tabla 38. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Bolívar (Valle del Cauca)

QMHx1	
CMRI	1.593
RI	0.522
MRI	0.765
PPC	64.741

Tabla 39. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Bolívar (Valle del Cauca)

QMHx2	
CMRI	1.954
RI	0.641
MRI	0.938
PPC	73.469

Tabla 40. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Bolívar (Valle del Cauca)

QMHx4	
CMRI	1.965
RI	0.644
MRI	0.943
PPC	73.739

Tabla 41. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Bolívar (Valle del Cauca)

QMHx8	
CMRI	1.818
RI	0.596
MRI	0.873
PPC	70.195

4.3.7 Red Modena

La red Modena, es una de las redes que presenta menor variabilidad en sus índices de confiabilidad y eficiencia energética, los RI presentan un cambio mínimo del 2% y máximo aproximado del 12%.

Tabla 42. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Modena

QMHx1	
CMRI	0.807
RI	0.499
MRI	0.609
PPC	58.241

Tabla 43. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Modena

QMHx2	
CMRI	0.769
RI	0.476
MRI	0.581
PPC	56.298

Tabla 44. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Modena

QMHx4	
CMRI	0.680
RI	0.421
MRI	0.514
PPC	51.732

Tabla 45. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Modena

QMHx8	
CMRI	0.666
RI	0.412
MRI	0.503
PPC	51.002

4.3.8 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos

Posteriormente, se encuentran los índices de confiabilidad y eficiencia energética para le red Sector 13 M453 B de Bogotá, optimizada con diámetros continuos. Casi la totalidad de estos indicadores presentaron una mejora con respecto a los determinados optimizando la red con diámetros discretos. Se presentó un progreso de hasta el 43% de estos índices.

Tabla 46. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx1 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos

QMHx1	
CMRI	0.525
RI	0.238
MRI	0.452
PPC	29.002

Tabla 47. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx2 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos

QMHx2	
CMRI	0.399
RI	0.181
MRI	0.343
PPC	23.652

Tabla 48. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx4 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos

QMHx4	
CMRI	0.300
RI	0.136
MRI	0.259
PPC	19.503

Tabla 49. Índices de confiabilidad y eficiencia energética QMHx8 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos

QMHx8	
CMRI	0.232
RI	0.105
MRI	0.199
PPC	16.603

4.4 Mapas de potencia específica para cada tubo de las redes

La potencia específica se considera una medida energética del sistema y representa la energía disponible que se utiliza para satisfacer la demanda. Se determinó la potencia específica para cada uno de los tubos de las redes y se expresó en porcentaje, esto con el fin de analizar la potencia total y cómo se distribuye a lo largo de la red.

4.4.1 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos

La Figura 43 enseña el porcentaje de potencia específica de cada tubo determinado por cuatro rangos, donde el escenario con QMHx1 tiene un valor máximo del 71.91% de la potencia específica de toda la red, con dos tramos en el rango más alto de porcentaje; para QMHx2 se tiene un valor máximo de 38,65% con cinco tramos resaltados en rojo; QMHx4 con 38.03% de mayor valor y 4 tramos en dicho rango; QMHx8 con tan sólo dos tramos en el rango superior y valor máximo de 48.76%.

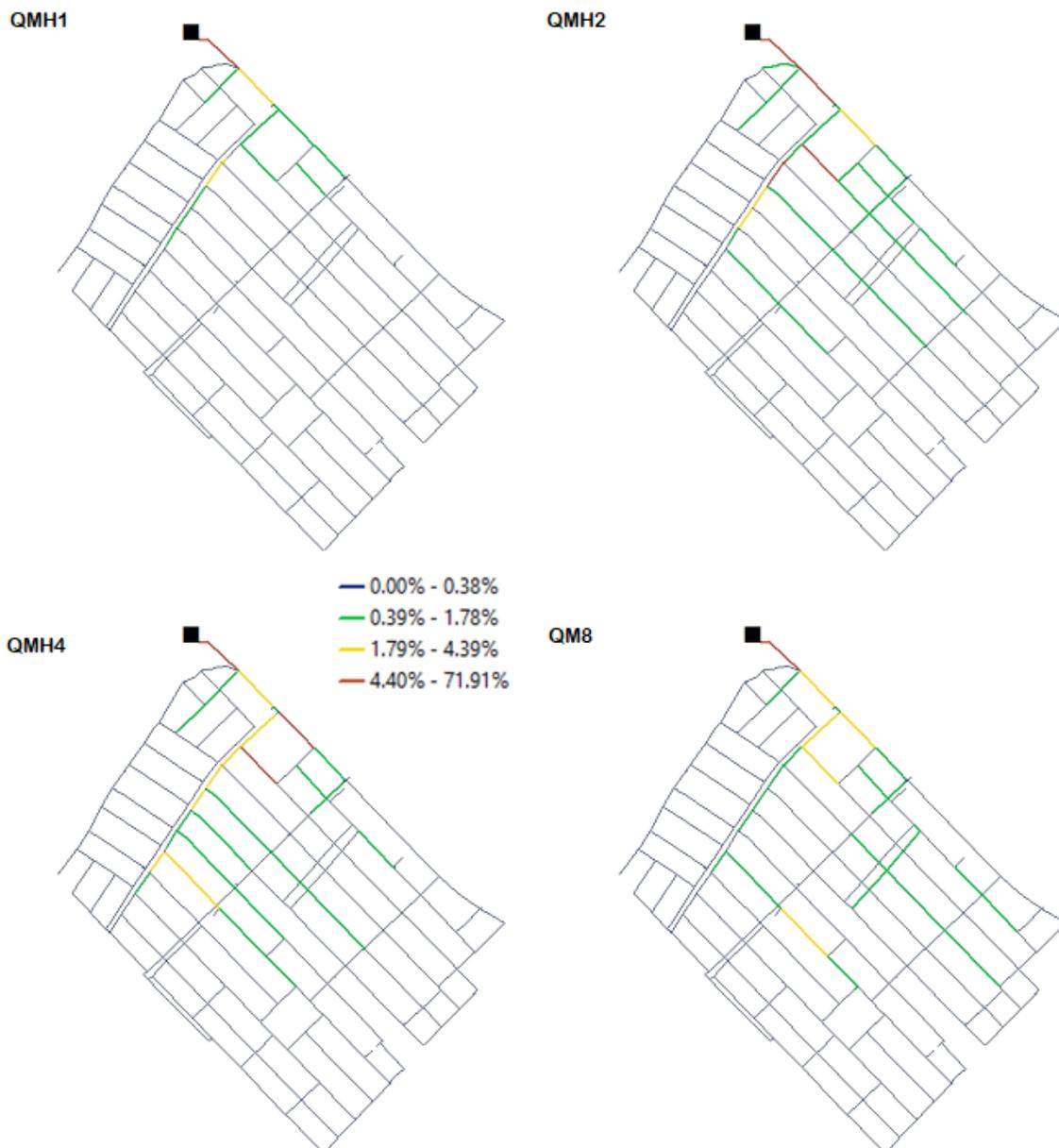


Figura 43. Porcentaje de potencia específica para Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

En promedio, el 93.4% de las tuberías se encuentra en el rango más bajo, 4,5% de estas en el segundo rango, 1.3% en el tercero y 0.8% en el rango más alto. más adelante, se realiza un análisis comparativo entre los cuatro escenarios para cada una de las redes de distribución de agua potable utilizadas en esta investigación.

4.4.2 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

Para la red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá), se presenta una mayor distribución de la potencia específica, esto comparado a la red anterior, ya que se tiene como valor máximo un porcentaje del 16.13. En el primer rango de la Figura 44 se encuentran en promedio aproximadamente el 96.8% de las tuberías, los otros tres rangos se componen por el 3.2% restante.

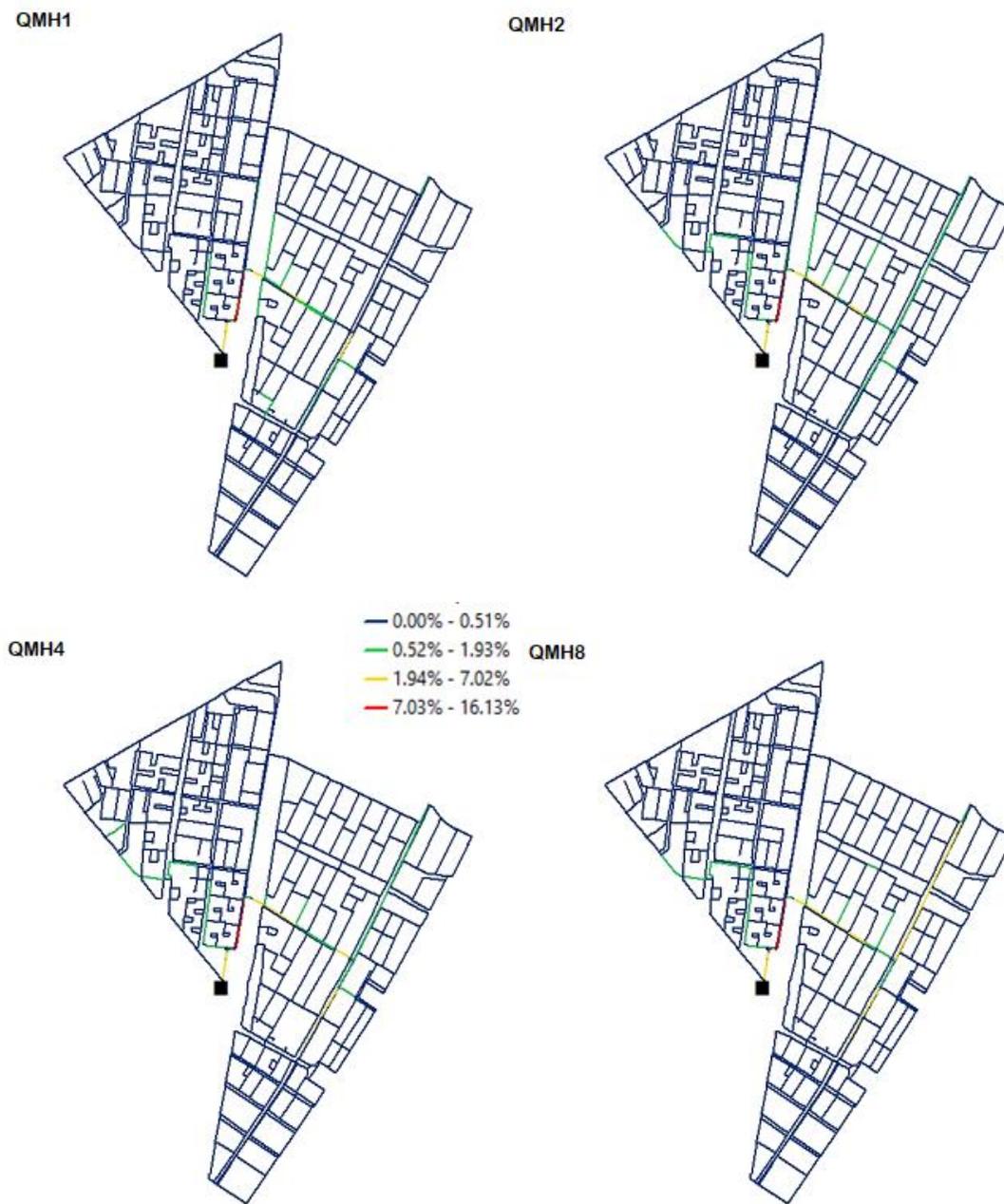


Figura 44. Porcentaje de potencia específica para Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

4.4.3 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

La red Troncal del Caribe de la ciudad de Santa Marta, presenta pocos cambios en la tubería de alimentación y la red mallada. Como lo muestra la Figura 45, la cantidad de tuberías en los rangos indicados tienden a permanecer constantes; en el capítulo 5.3 se presentarán en cifras los cambios producidos en la potencia específica por los incrementos de demanda.

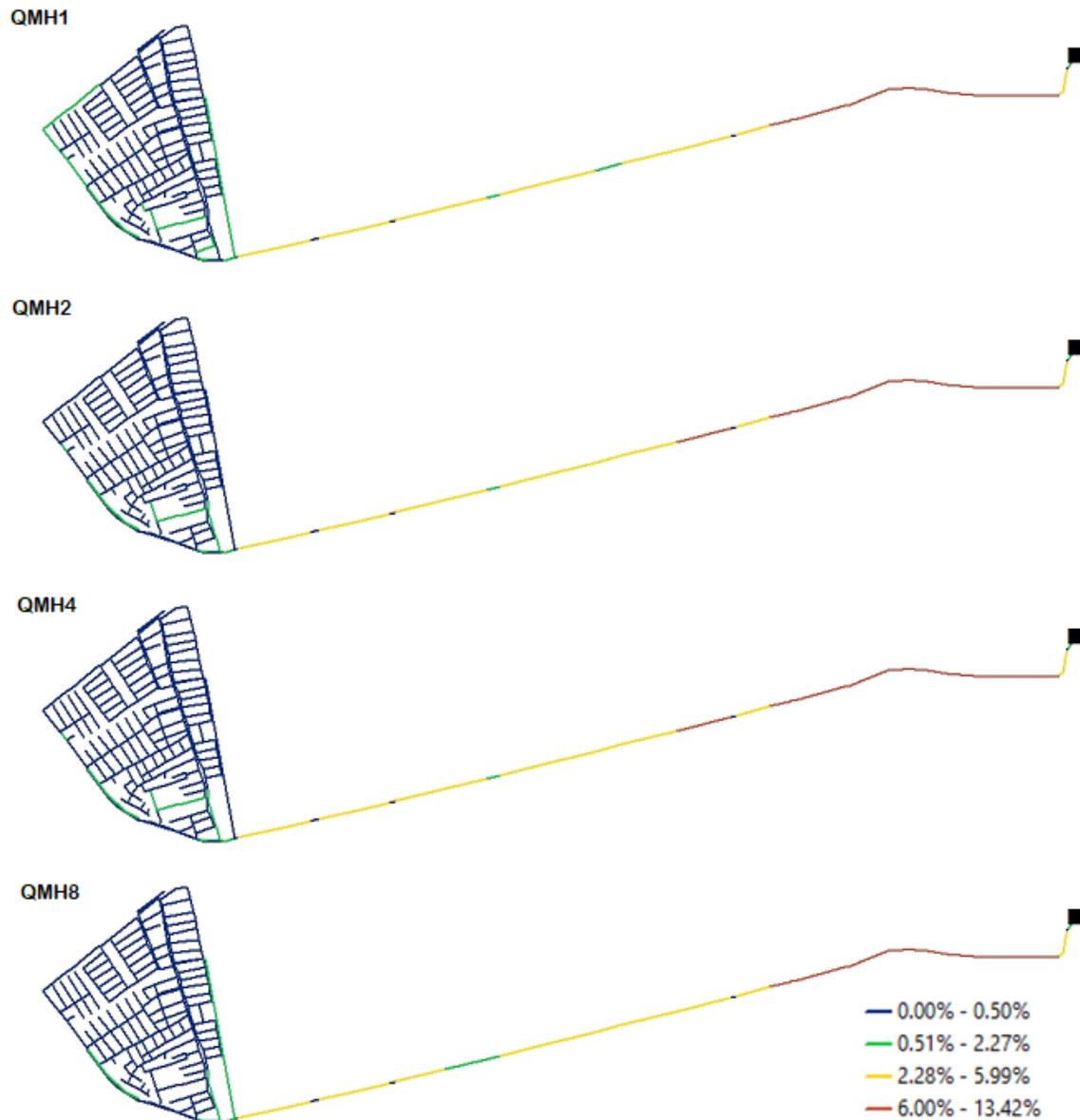


Figura 45. Porcentaje de potencia específica para Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

4.4.4 Red Morro Bajo (Bucaramanga)

En la Figura 46 se presentan los mapas de potencia específica expresados en porcentaje, donde se tiene un valor máximo de 44.48% que se presenta en el QMHx8. El 98.6% de las tuberías se ubican en el primer rango y el 1.4% restante en los siguientes rangos.

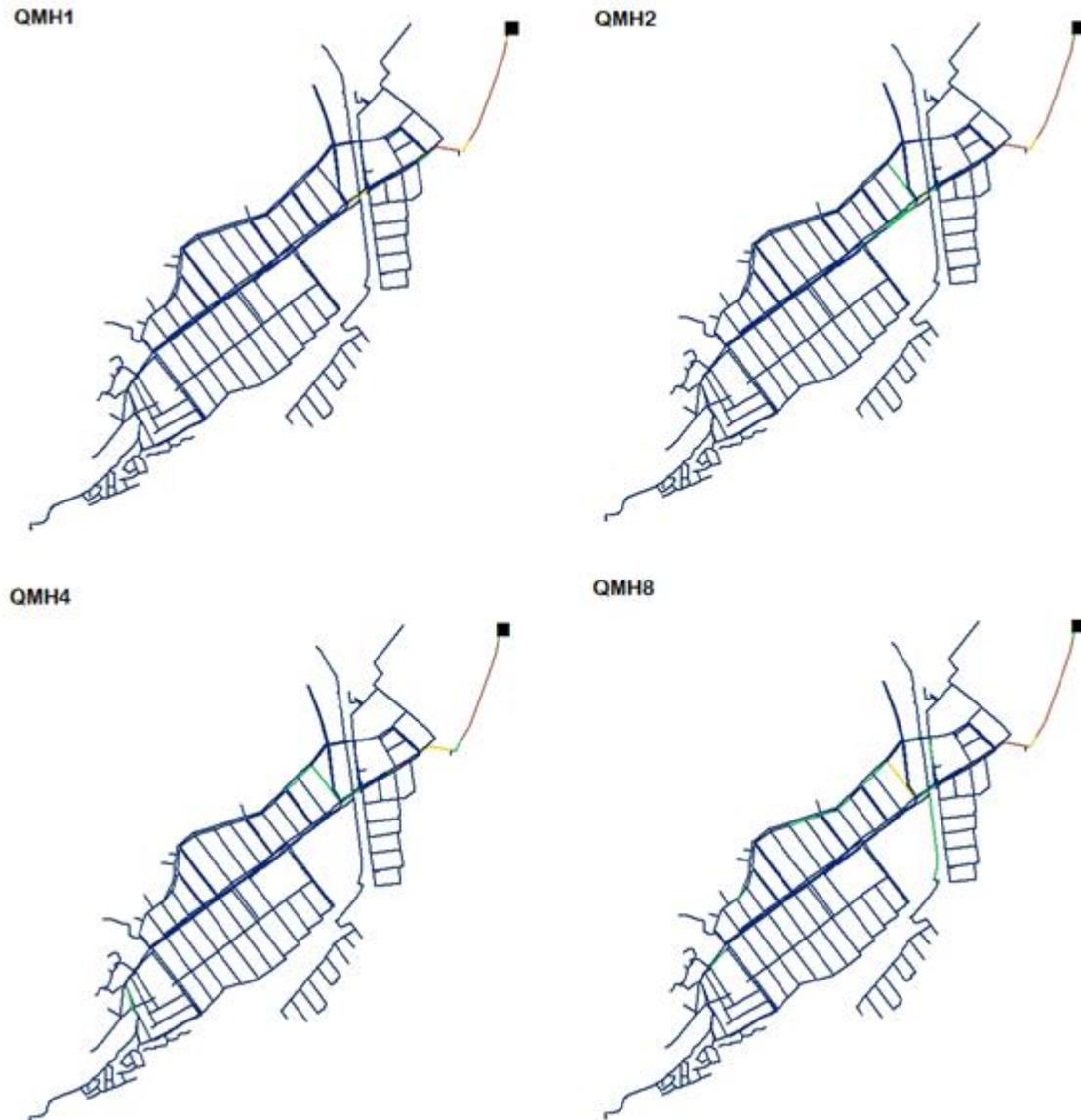


Figura 46. Porcentaje de potencia específica para Red Morro Bajo (Bucaramanga)

4.4.5 Red Toro (Valle del Cauca)

La red del municipio de Toro, presenta en el primer escenario el mayor valor de los indicadores, con un 45.45% en uno de los tubos cercanos al tanque, teniendo en cuenta que es el único que pertenece a este rango. En los demás escenarios únicamente se presentan tubos clasificados en los rangos menores al 12.23%.

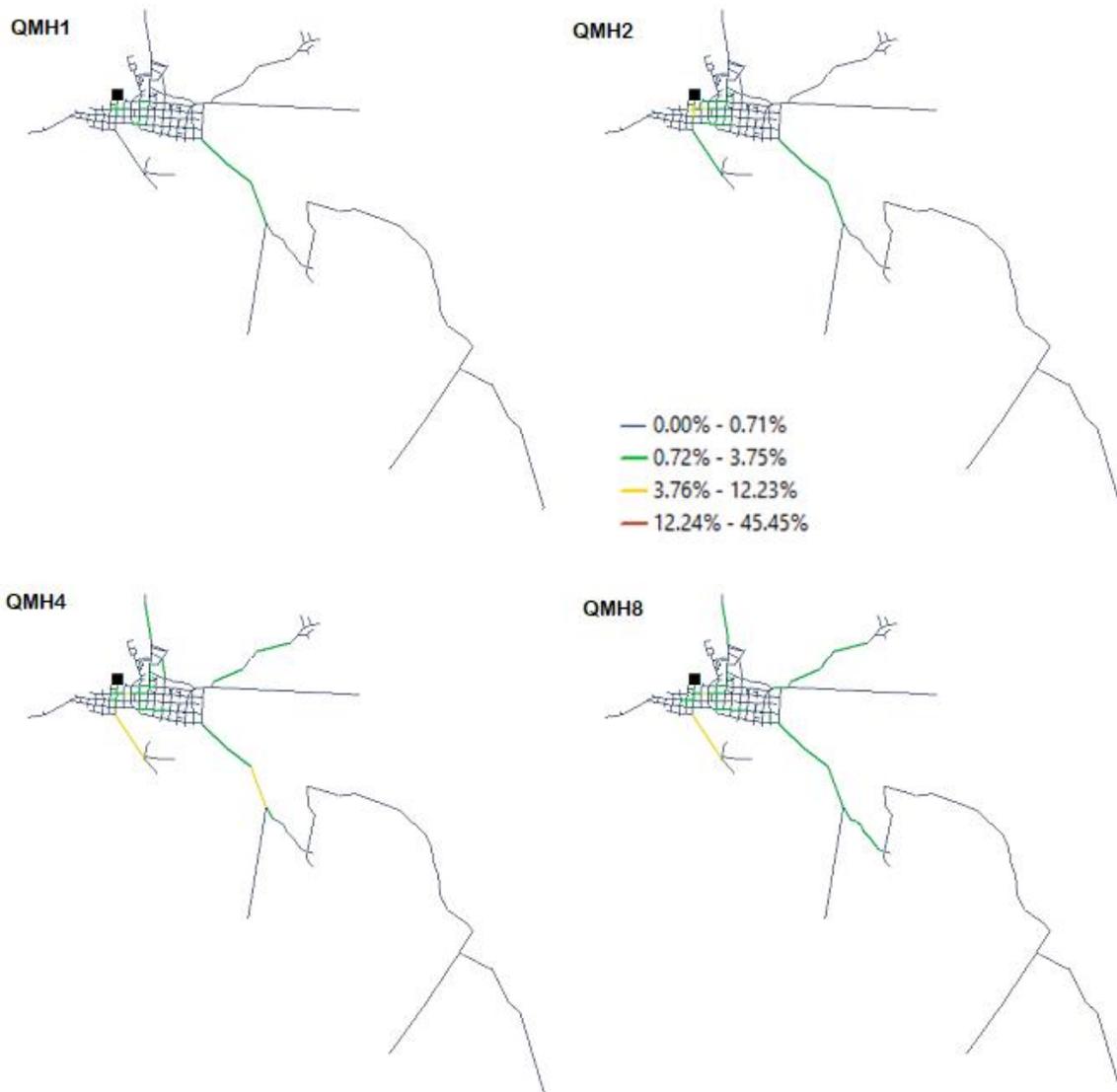


Figura 47. Porcentaje de potencia específica para Red Toro (Valle del Cauca)

4.4.6 Red Bolívar (Valle del Cauca)

El municipio de Bolívar, Valle del Cauca, tiene una de red con porcentaje máximo en un solo tubo de 33.58%. En promedio el 88.9% de las tuberías están por debajo del 0.52% de potencia específica, 8.1% de las tuberías entre 0.53% y 2.26%, 2.6% de estos tramos entre 2.27% y 6.61% y finalmente, 0.5% de las tuberías pertenecen al rango entre 6.62% y 33.58% de porcentaje de potencia específica.

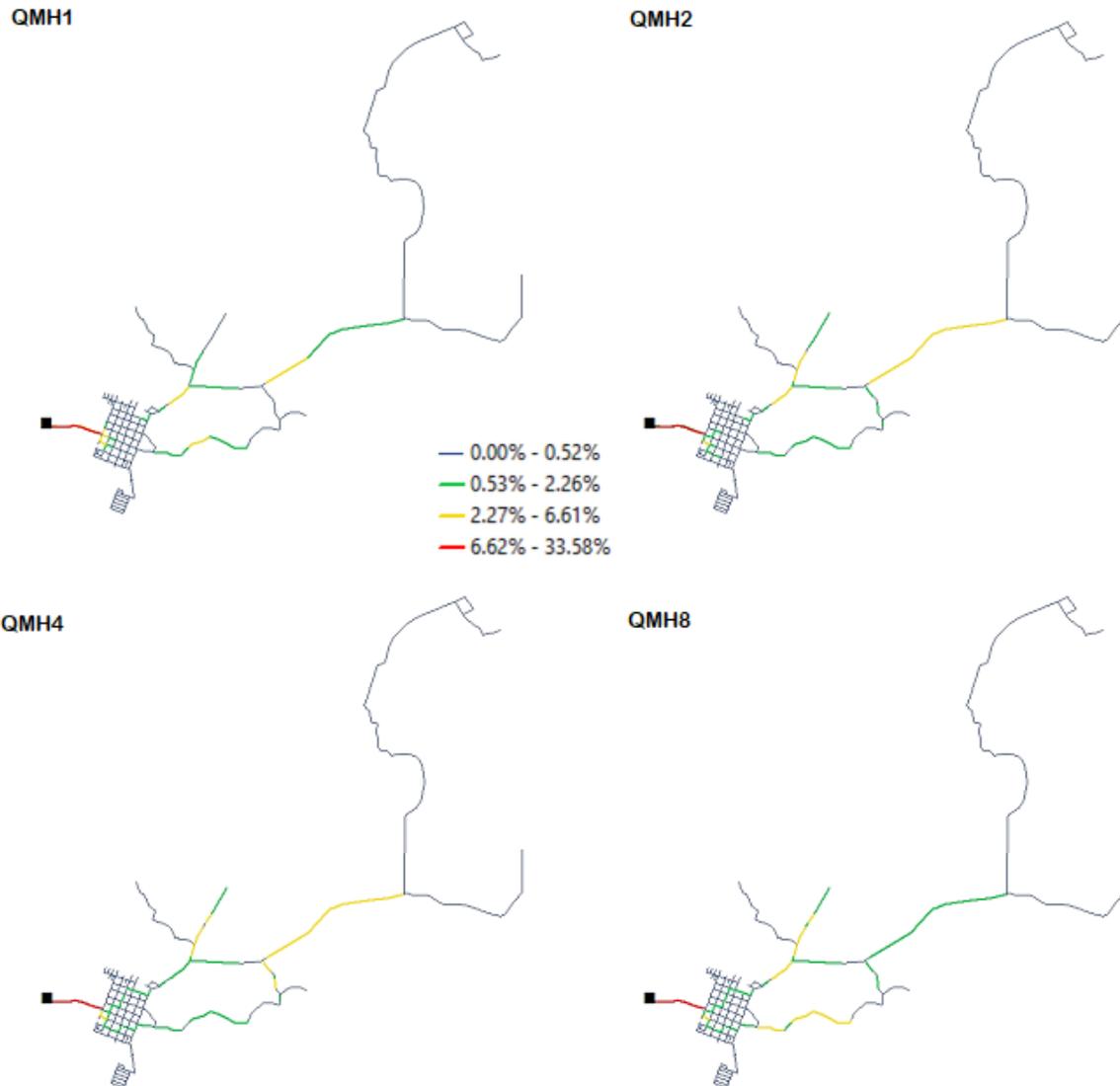


Figura 48. Porcentaje de potencia específica para Red Bolívar (Valle del Cauca)

4.4.7 Red Modena

La red Modena, presenta una máxima potencia específica del 8.86% focalizada en un solo tubo, esto se refiere a una distribución más constante que la de las demás redes. Es de destacar, que esta red es la única red con más de un tanque de abastecimiento. El 83.28% de los tubos se encuentran en el primer rango, el 16.72% restante pertenece a los otros tres rangos presentados en la Figura 49.

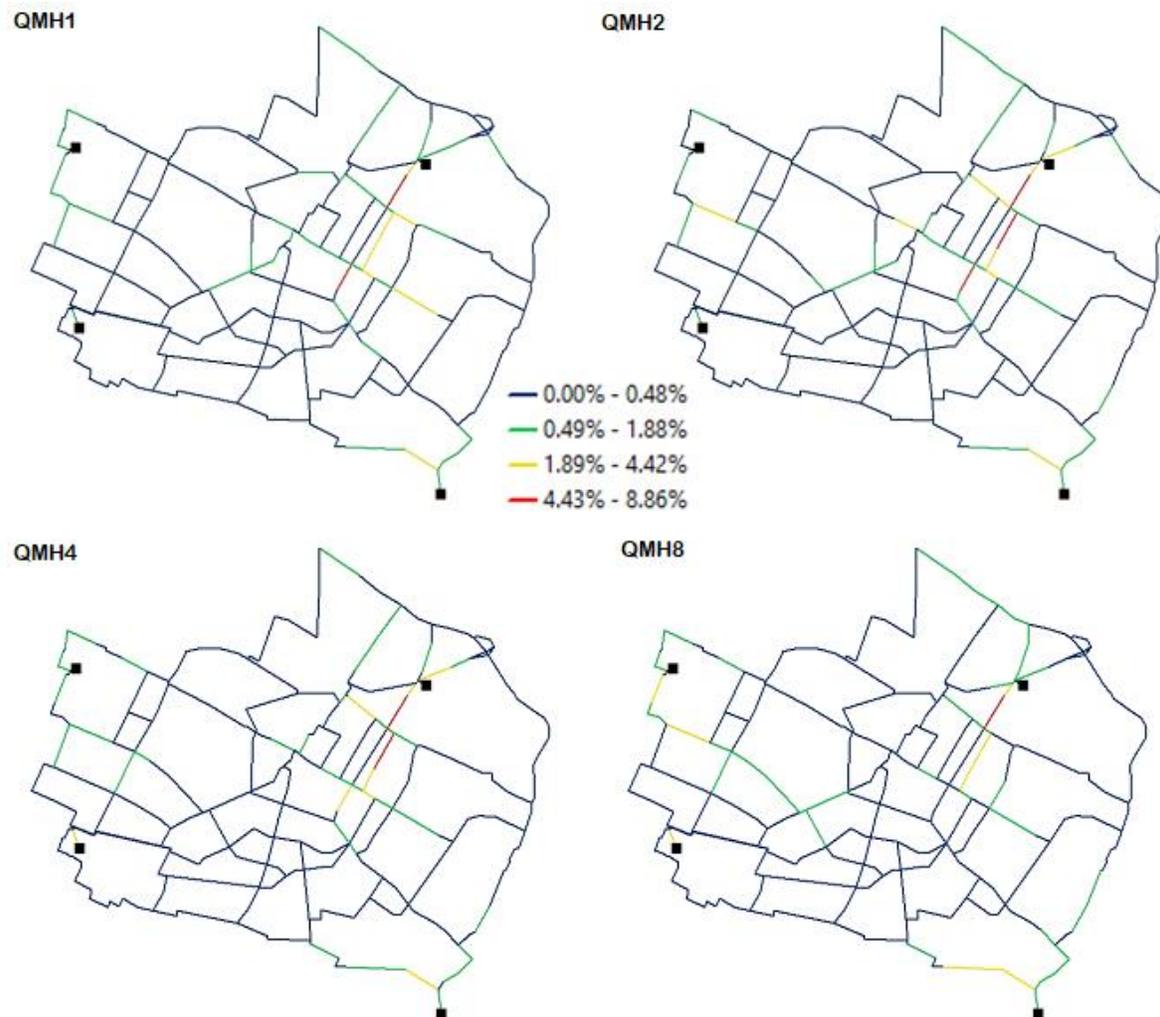


Figura 49. Porcentaje de potencia específica para Red Modena

4.4.8 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

El porcentaje de potencia específica en cada escenario de la red Sector 13 M453 B con diámetros continuos, presenta menos cambios que con diámetros discretos, es decir, se mantiene más invariable la forma en cómo se gasta la energía de la red.

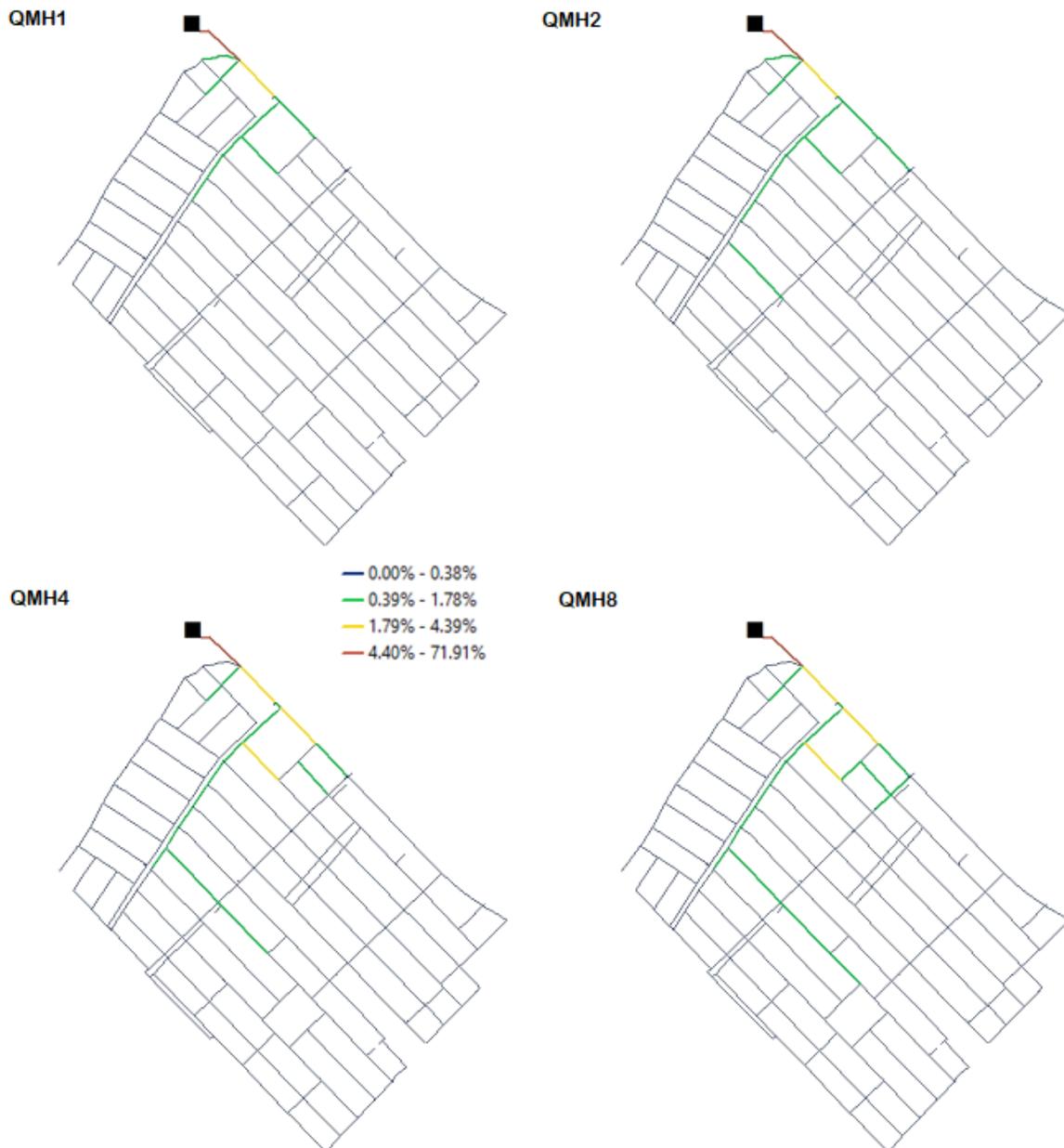


Figura 50. Porcentaje de potencia específica para Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Continuos

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos para cada una de las redes seleccionadas en esta investigación:

5.1 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros discretos

La Figura 51 ilustra la distribución de diámetros en las redes de acuerdo a la demanda y el listado de diámetros comerciales disponibles con los cuales fueron optimizadas estas.

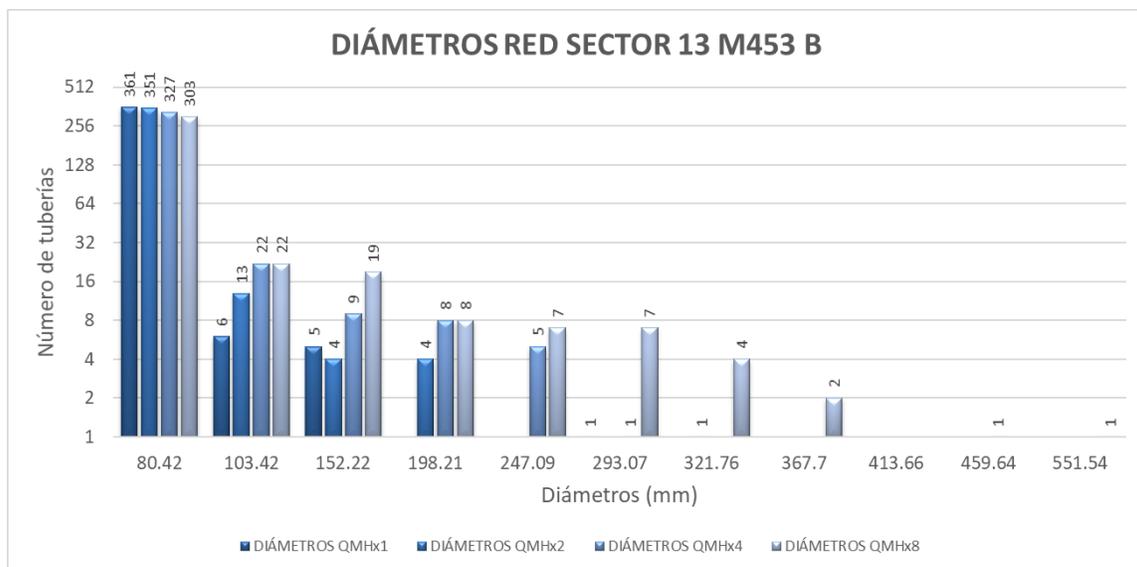


Figura 51. Diámetros de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos para (a) QMHx1 = 44.75 lps, (b) QMHx2 = 89.50 lps, (c) QMHx4 = 178.99 lps y QMHx8 = 357.99 lps.

La mayor parte del esquema en la Figura 51 está representada por las tuberías con diámetro de 82.42 mm, el cual indica que para la red QMHx1 el rango de diámetros entre este valor y 152.22 mm equivale a un 99.73% de las mismas, este porcentaje va disminuyendo a medida que incrementa la demanda, hasta llegar a un 92.23% de las tuberías en el QMHx8 aproximadamente, tal como lo ilustra la Figura 52.

La Figura 53 representa gráficamente la localización de los centroides geométricos. En todas se ubicaron los siguientes indicadores: centroide de potencia específica como C_{pe} , centroide de volumen como V , centroide de diámetro como D y centroide de potencia ilustrado con el diamante azul (este no cambia su ubicación a pesar del incremento de la demanda). La distancia máxima entre los indicadores tomando como referencia el escenario QMHx1 no supera los 107 m, para los centroides de potencia específica. Los centroides de diámetro presentan las menores distancias entre sí.

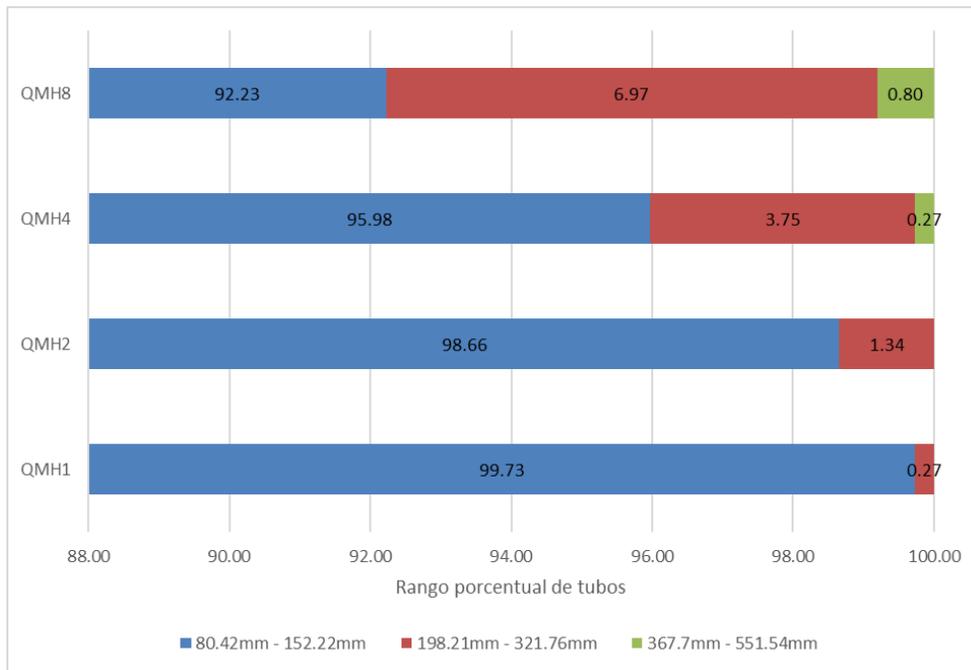


Figura 52. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

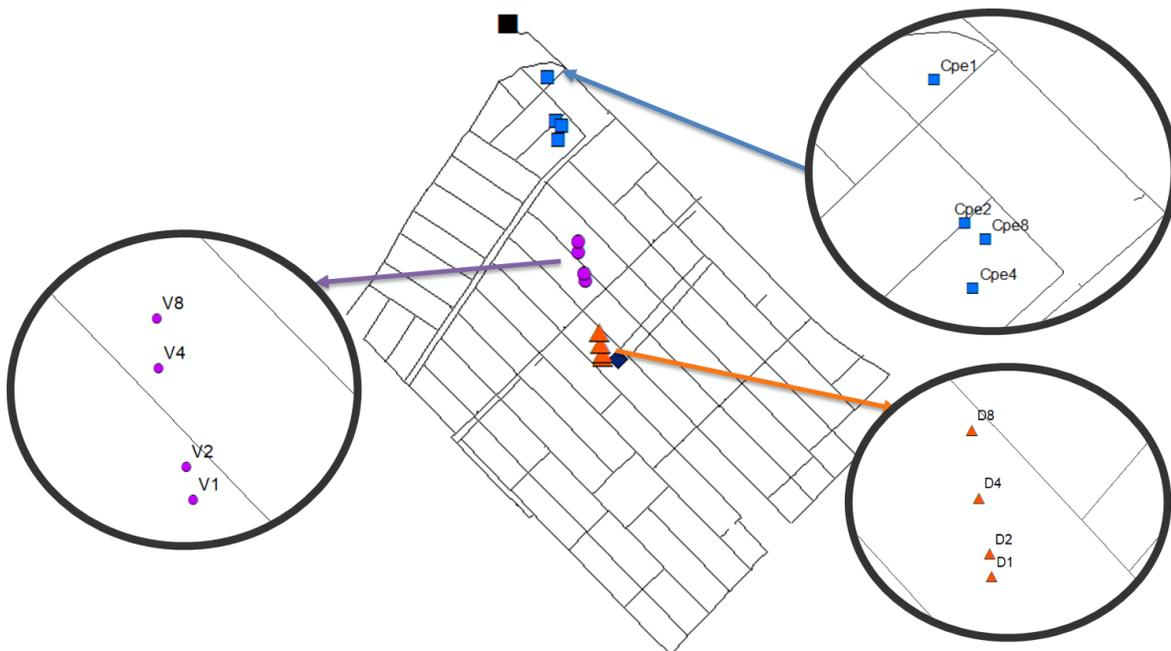


Figura 53. Localización de centroides geométricos de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos. V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.

La Figura 54 muestra una tendencia clara en las redes con demanda aumentada dos y cuatro veces, en la que los valores de los índices tienden a disminuir parcialmente con respecto al caudal inicial tomado en la red. En el escenario de QMHx8, por el contrario, aumenta un 9.18% con respecto al QMHx1 en IR; para el caso del %PPC la diferencia máxima es del 19%.

La variabilidad de los cuatro índices de confiabilidad y eficiencia energética evaluados, se determinaron con los datos obtenidos en el capítulo 4.3.1, teniendo en cuenta los incrementos de demanda QMHx1, QMHx2, QMHx4 y QMHx8 para la red Sector 13 M453 B de Bogotá.

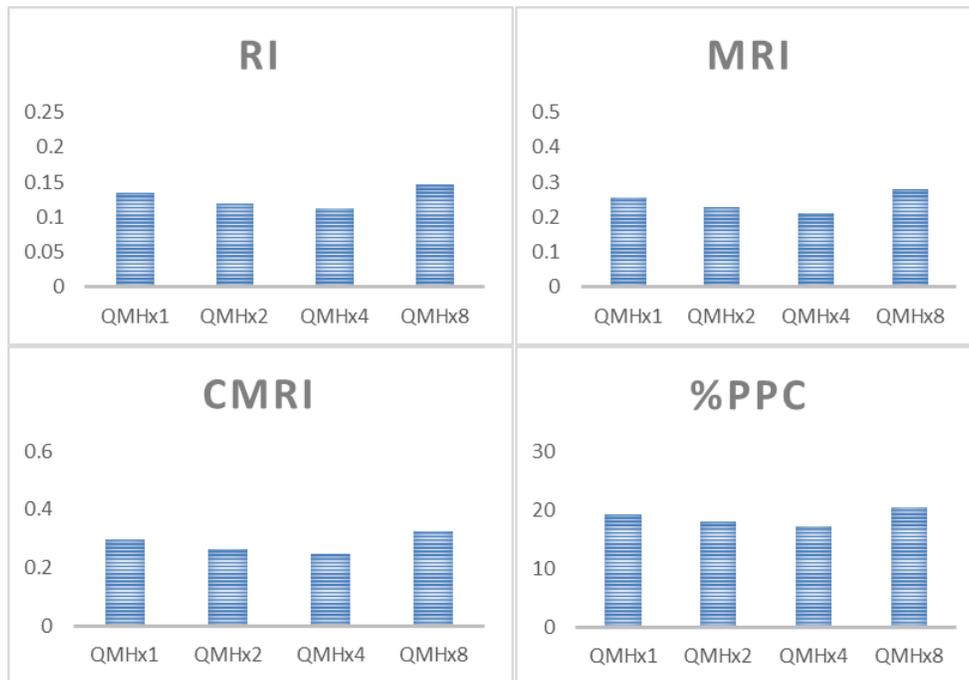


Figura 54. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos. (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico

Seguidamente, se enseñan las diferencias de las superficies óptimas de gradiente hidráulico de la red Sector 13 M453 B de Bogotá. Para tener una primera aproximación de los cambios que se producen en las superficies de gradiente hidráulico, se halló la diferencia porcentual de elevaciones de las redes. Con ayuda de la herramienta de álgebra de mapas de ArcMap®, se utilizó la Ecuación 22, tomando las dos superficies determinadas y generando una nueva, proporcional a los cambios porcentuales obtenidos, tanto de las superficies de gradiente hidráulico, como de las superficies de presión de la red.

En la Figura 55 se aprecia la diferencia de LGH1 y LGH2, esta diferencia arroja tanto valores positivos como negativos, ya que el valor de la LGH puede ser mayor o menor dependiendo el aumento de caudal y la variación de la presión, además, si el diámetro permanece constante o aumenta de esta

manera. También, se resalta en la franja roja, la zona donde la superficie de gradiente hidráulico tiende a no presentar cambios al incrementar la demanda, esto de extremo a extremo central de la red.

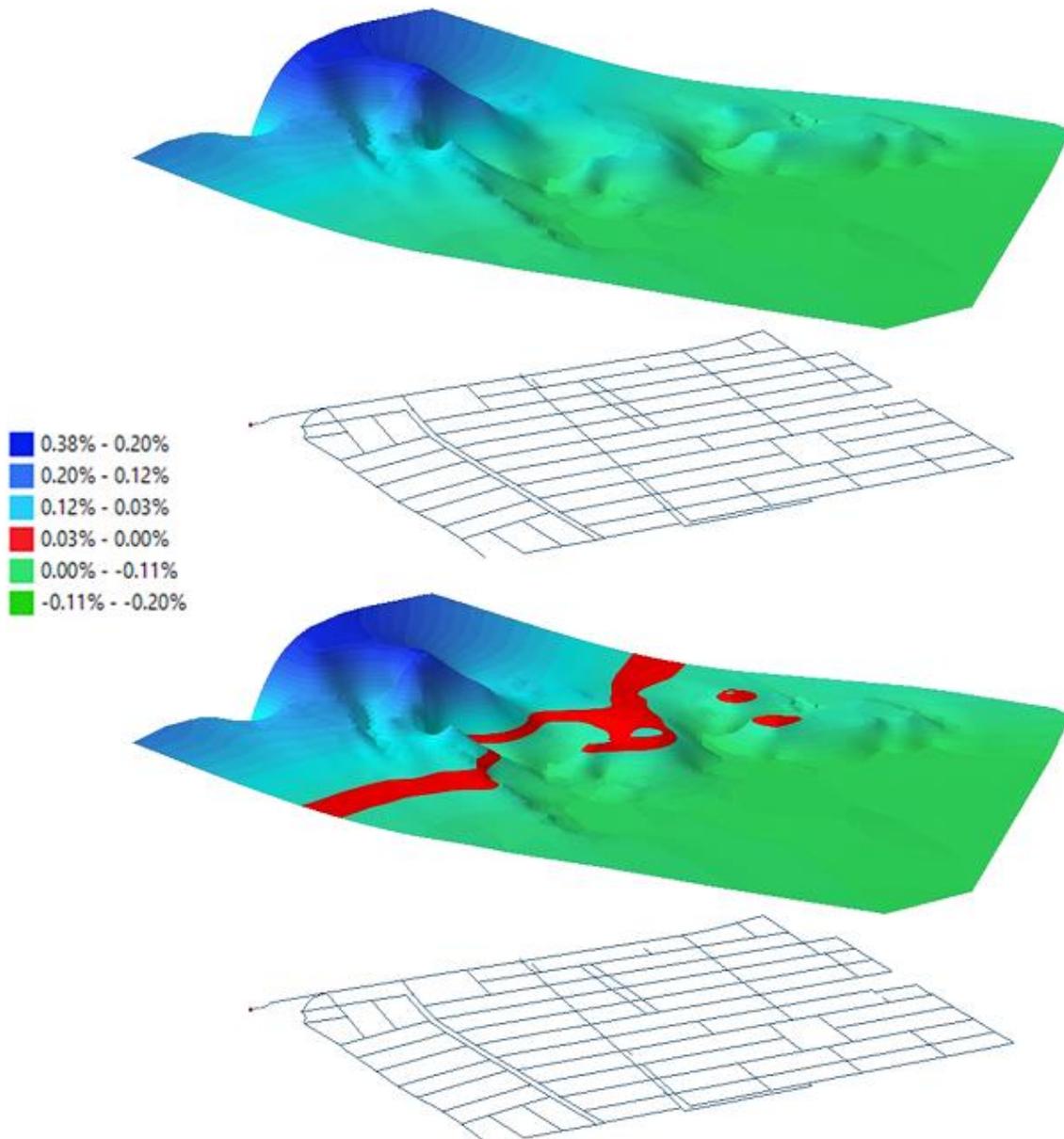


Figura 55. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

El máximo incremento de la línea de gradiente hidráulico del primer escenario QMHx1 con respecto a los restantes es del 0.38%, es un valor pequeño puesto que se está teniendo en cuenta la altura topográfica de los nudos de la red. El sector 13 M453 B, ubica su nudo más bajo en los 2554.3 m.

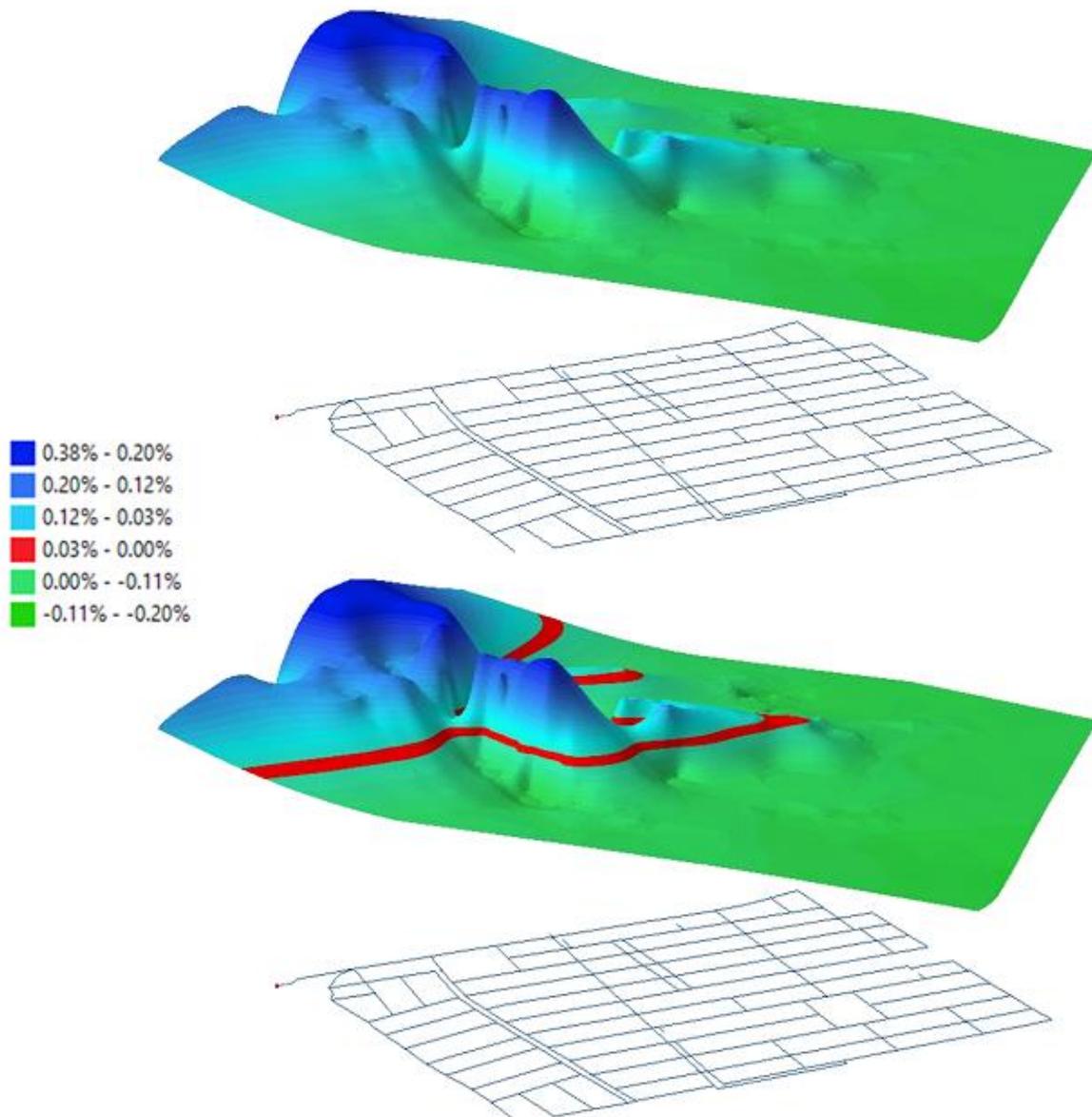


Figura 56. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

A medida que se van incrementando los caudales en la red, la diferencia del LGH1 con los demás aumentos de demanda hacen que se altere el rango de valores de cada una de las superficies. Finalmente, en la Figura 57 se muestra una diferencia porcentual de la LGH1 y LGH8.

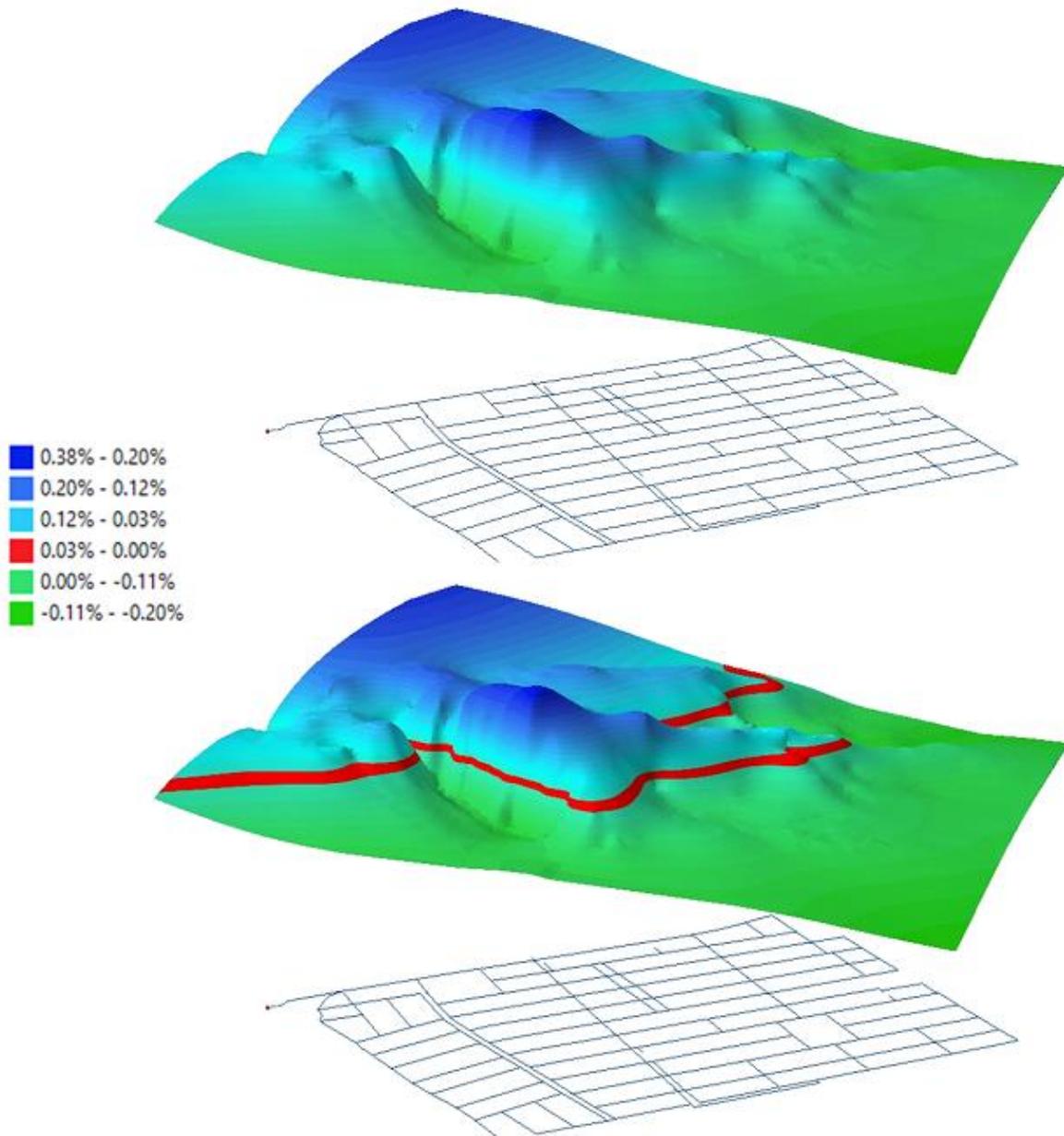


Figura 57. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

En la Figura 58, se presentan los cambios ocurridos con respecto a la presión de la red, es evidente que al no tener en cuenta la altura topográfica de los nudos, el porcentaje de diferencia se eleva hasta un 47.21%. Su valor menor llega a los -27.21%, refiriéndose a que la altura de presión también decrece a pesar del aumento de la demanda.

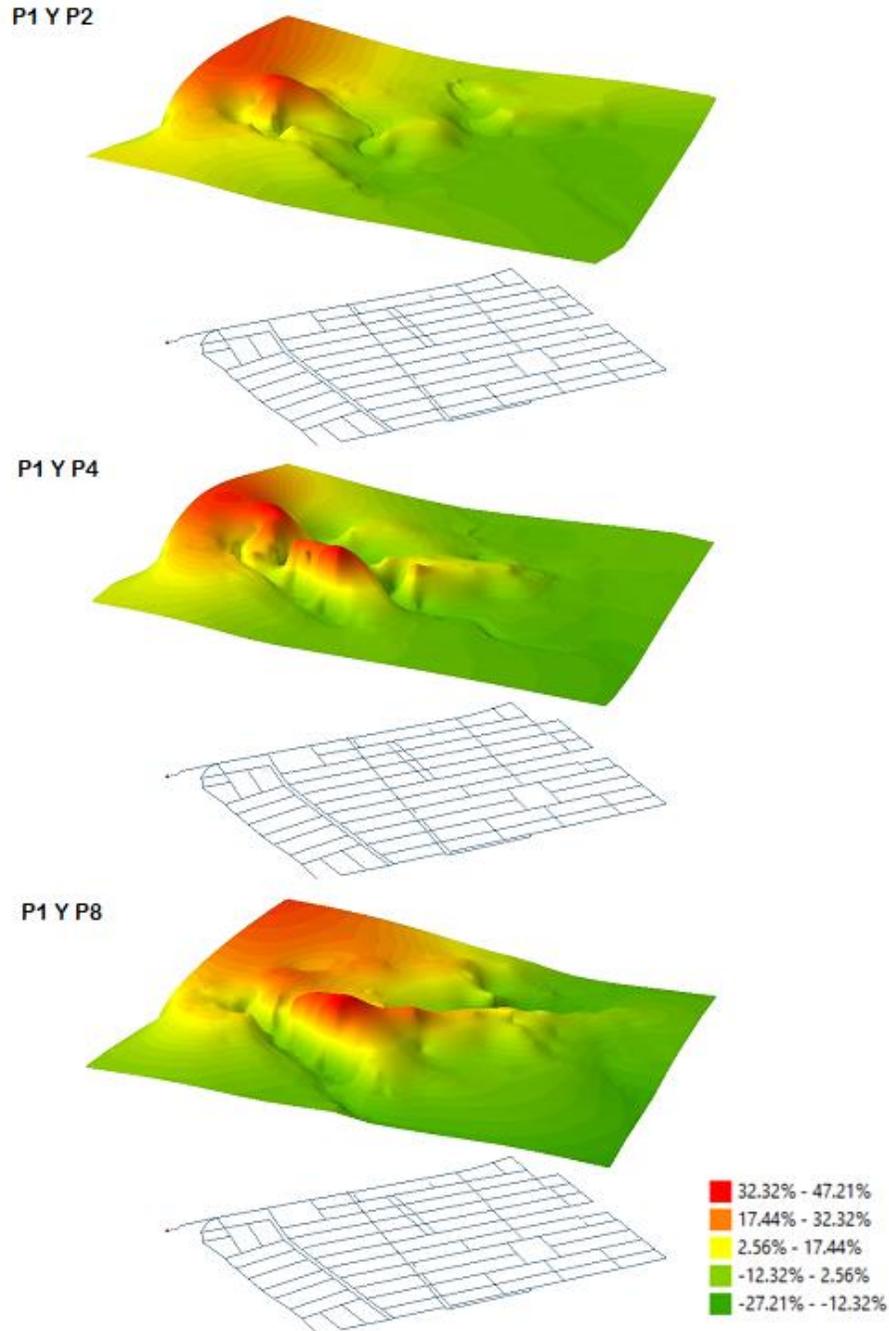


Figura 58. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

Para el análisis de la potencia específica, se determinó el cambio porcentual relativo mencionado en la metodología, la red Sector 13 M453 B con diámetros discretos tiene hasta un 39.64% de incremento relativo en la potencia específica. En la Figura 59 se tiene un valor máximo mayor puesto

que se tomó la misma escala de rangos para esta red diseñada con diámetros discretos, con el fin de realizar el análisis comparativo, esta permite apreciar que el número de tubos que presentan cambios de rango son pocos. En el rango de 8.37% a 55.26% se tiene un tubo en el cambio QMHx1 y QMHx4 y dos tubos para la diferencia de QMHx1 y QMHx8.

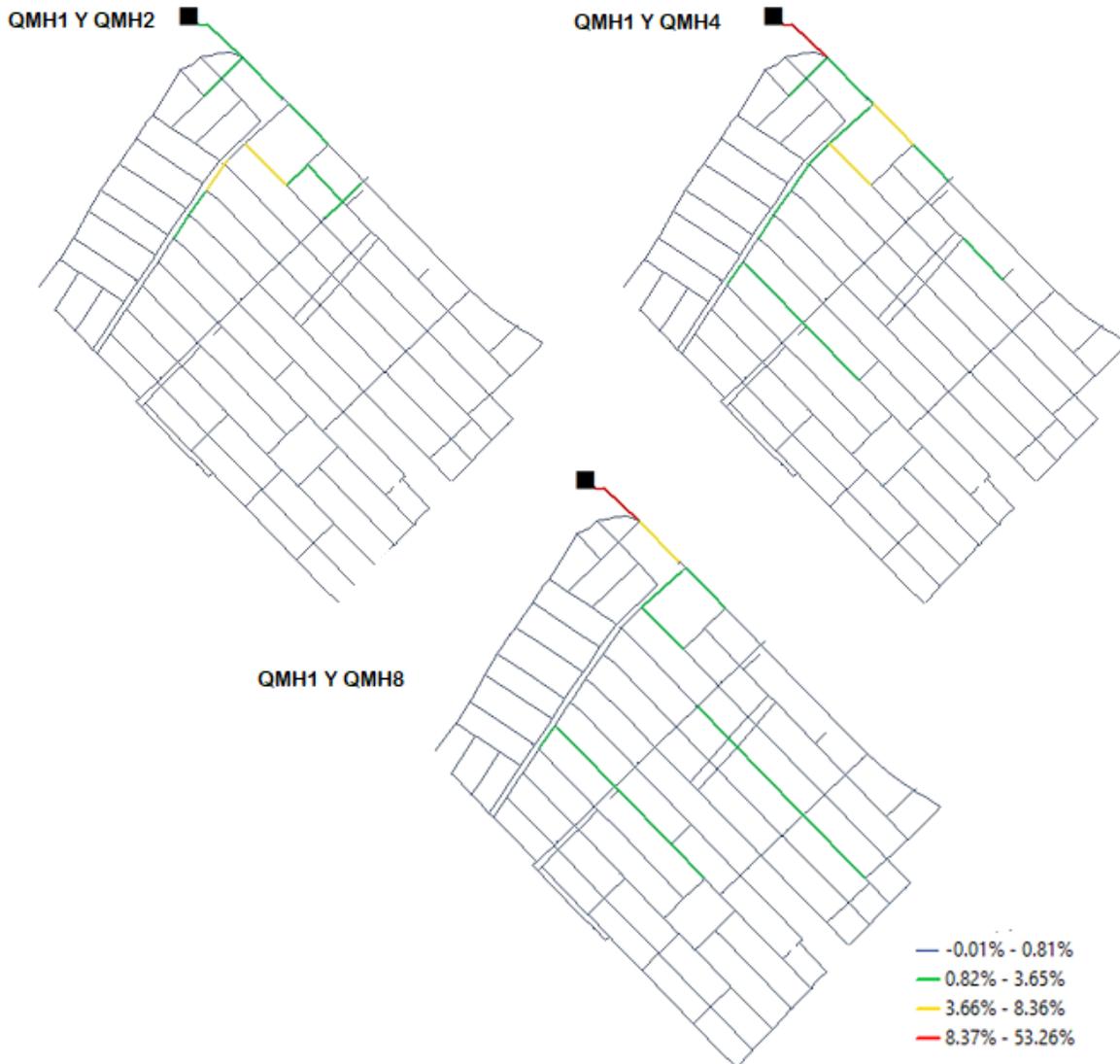


Figura 59. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

La Figura 60 presenta las pendientes de nudo a nudo con respecto a la LGH de cada escenario teniendo en cuenta el incremento de demanda. En la medida en que se aumenta la demanda y la altura del tanque permanece constante, la pendiente del tubo que se ubica inmediatamente después del tanque disminuye, en otras zonas de la red este porcentaje aumenta sobre el 16.70%.

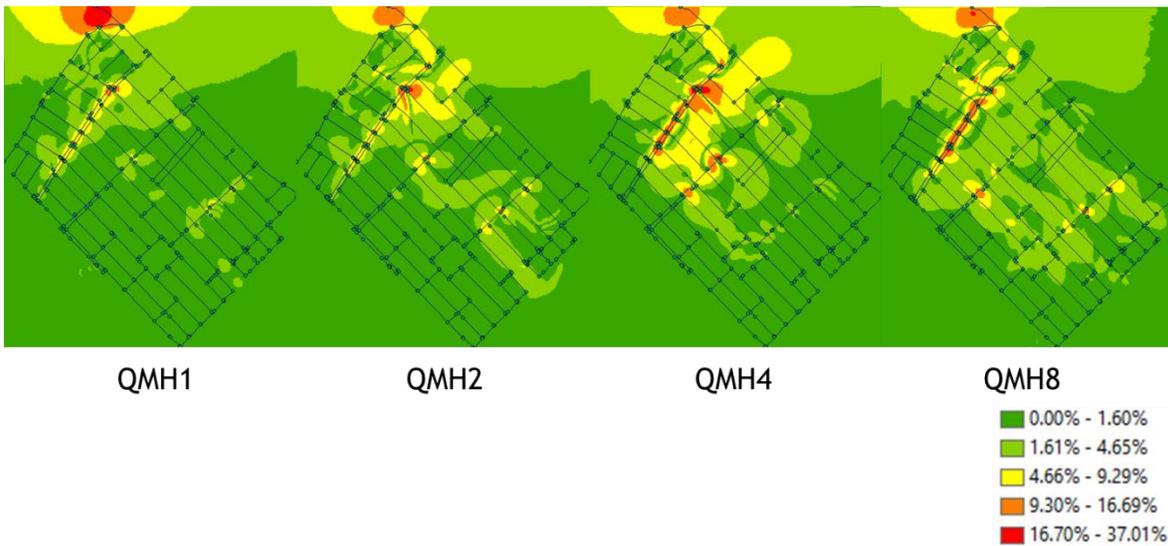


Figura 60. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros Discretos

5.2 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

En seguida, se presenta el análisis de los parámetros utilizados en la investigación de esta tesis para la red del Sector 8 Subsector 5 de la ciudad de Bogotá.

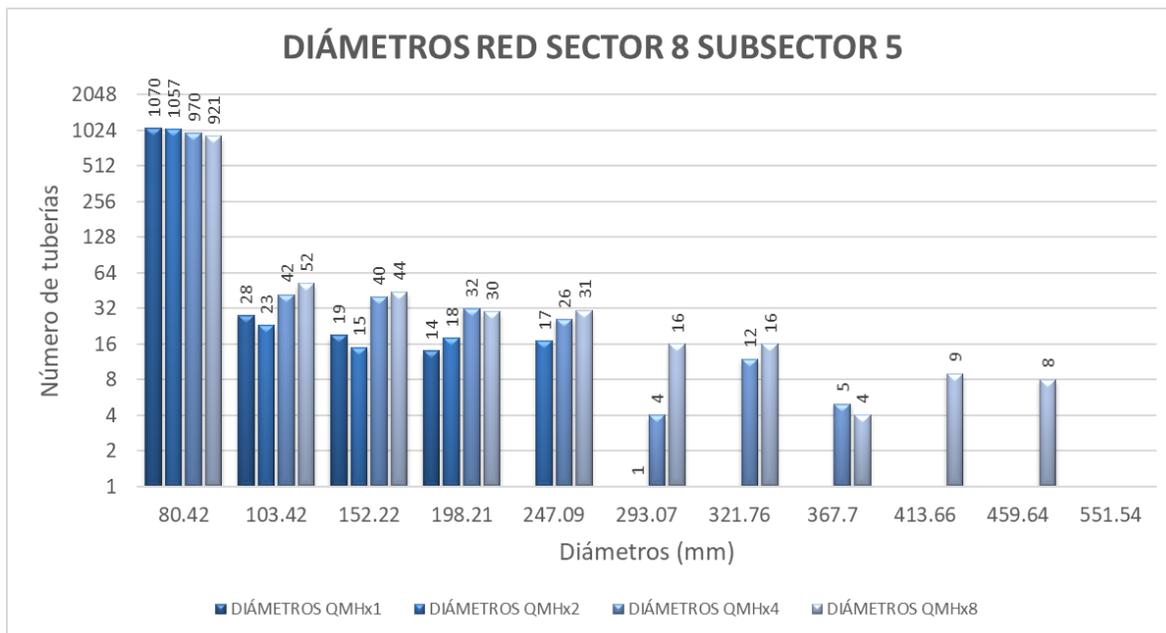


Figura 61. Diámetros de la Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá) para (a) QMh1 = 98.65 lps, (b) QMh2 = 197.29 lps, (c) QMh4 = 394.58 lps y QMh8 = 789.16 lps.

En la Figura 61 se encuentra la distribución de diámetros de tuberías en los distintos escenarios analizados, sólo el QMHx8 alcanza los diámetros de 413.66 mm y 459.64 mm. El 98.76% de las tuberías del QMHx1 representa los diámetros entre 80.42 mm y 152.22 mm. Los escenarios con QMHx1 y QMHx2 no alcanzan el último rango de 367.7 mm y 551.54 mm, tal como se enseña en la Figura 62.

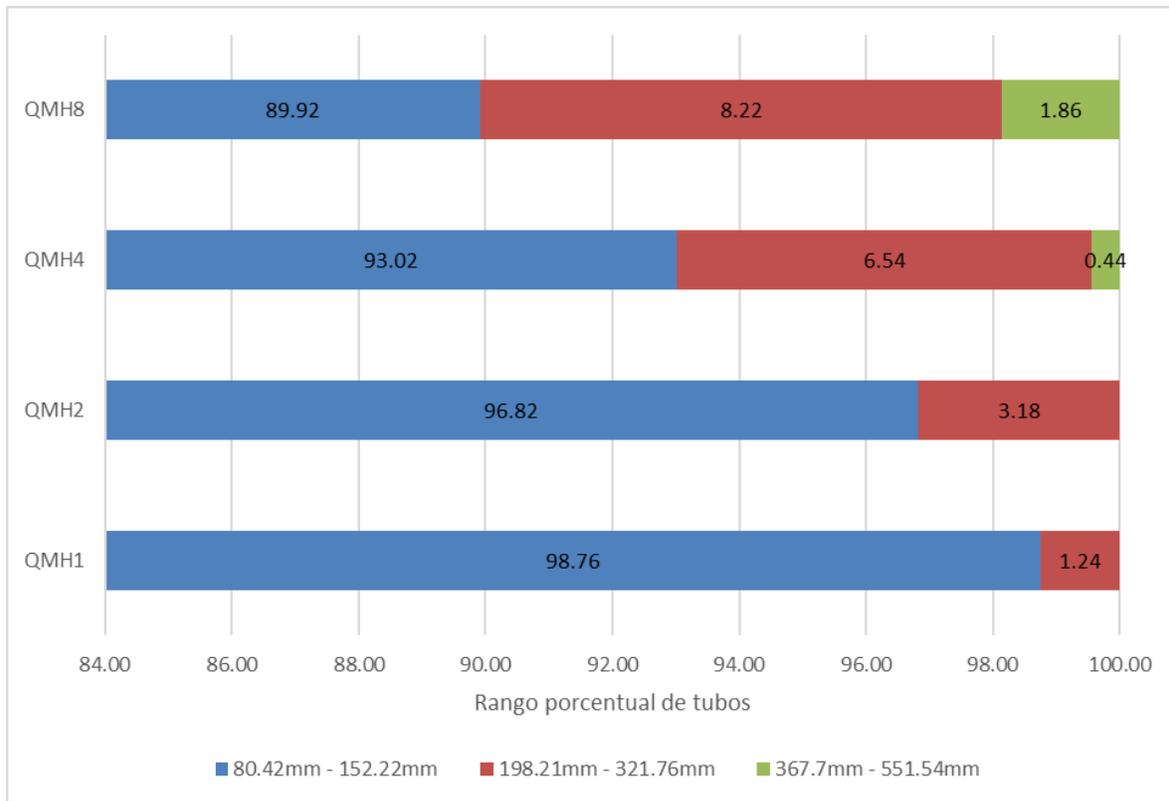


Figura 62. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

La Figura 63 visualiza la ubicación de cada uno de los índices geométricos hallados, esta red se caracteriza por tener distancias muy pequeñas entre estos indicadores a pesar del incremento de demanda que se efectuó. La distancia más grande tiene un valor de 59 m con respecto al centroide de potencia específica entre el QMHx1 y el QMHx8.

La red del Sector 8 Subsector 5 presenta valores relativamente altos con respecto a la mayoría de las demás redes analizadas, hay disminución de los valores de los índices de confiabilidad y eficiencia energética, sin embargo, los valores más bajos en el escenario QMHx8 no exceden una disminución del 30% con respecto al primer escenario. Así se presenta en la Figura 64.

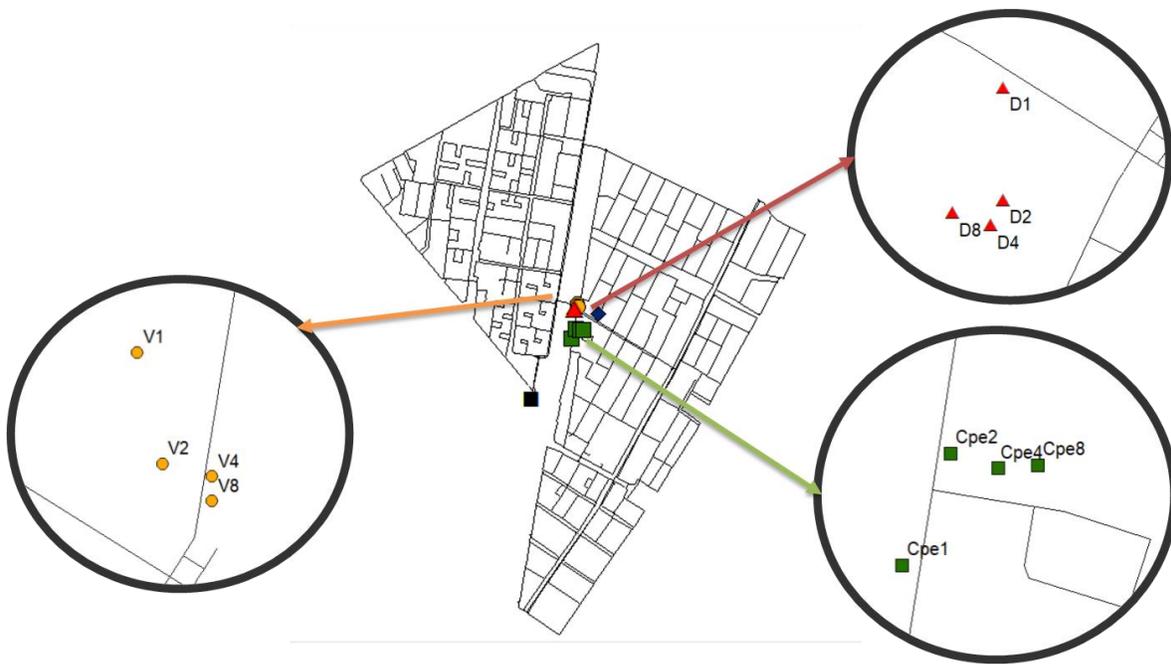


Figura 63. Localización de centroides geométricos de la Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá). V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.

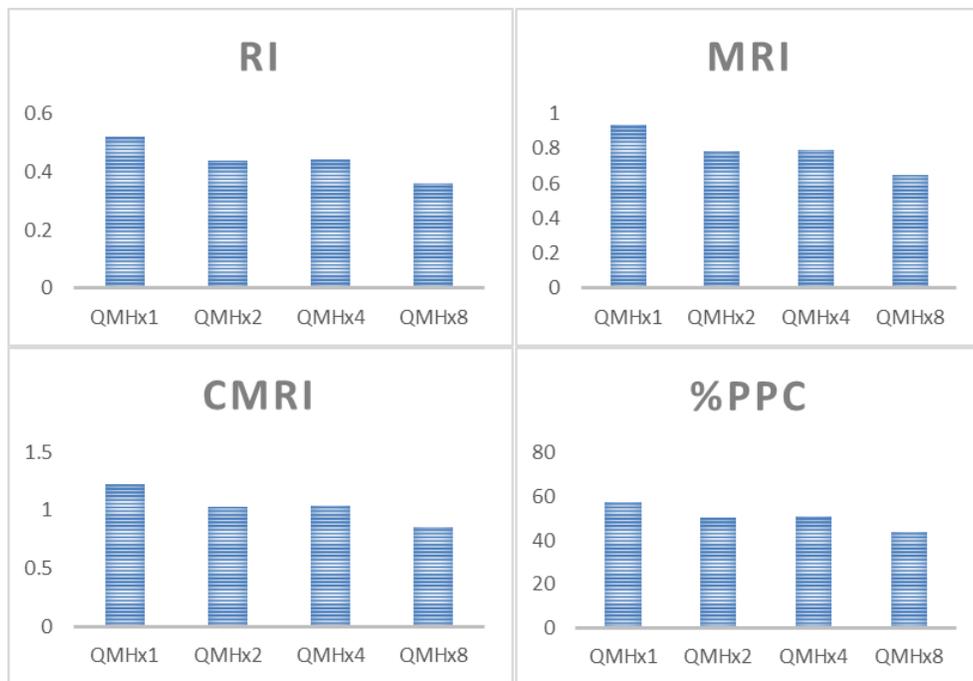


Figura 64. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá). (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico

Al realizar la comparación de la superficie de gradiente hidráulico LGH1 y LGH2 los cambios oscilan en rangos con tan solo decimales, esto por tener en cuenta la altura topográfica de los nudos considerando que la red se encuentra en la ciudad de Bogotá, a una altura mínima de 2578.75 m. La parte izquierda de la red mostrada en la Figura 65 tiende a no presentar cambios mayores de elevación de las líneas de gradiente hidráulico, pues se asemeja a la zona que experimenta menos variaciones en su hidráulica.

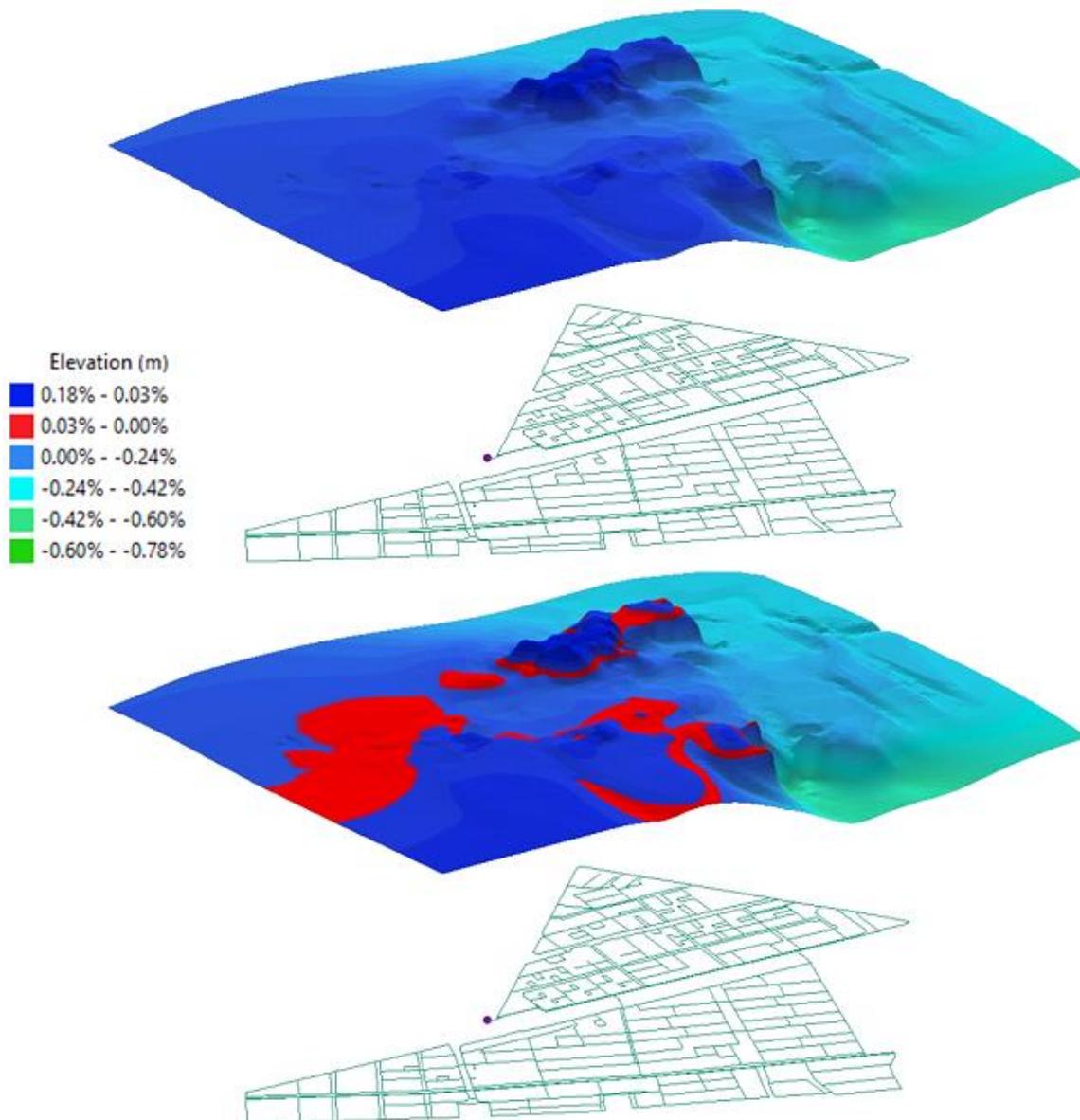


Figura 65. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

La Figura 66 va generando cambios mayores en su LGH, esto evidenciado en la escala de colores compuesta por los rangos porcentuales demarcados para la gráfica. La franja roja disminuye al igual que en la Figura 67, mostrando las consecuencias de incrementar la demanda en grandes cantidades para las redes estudiadas.

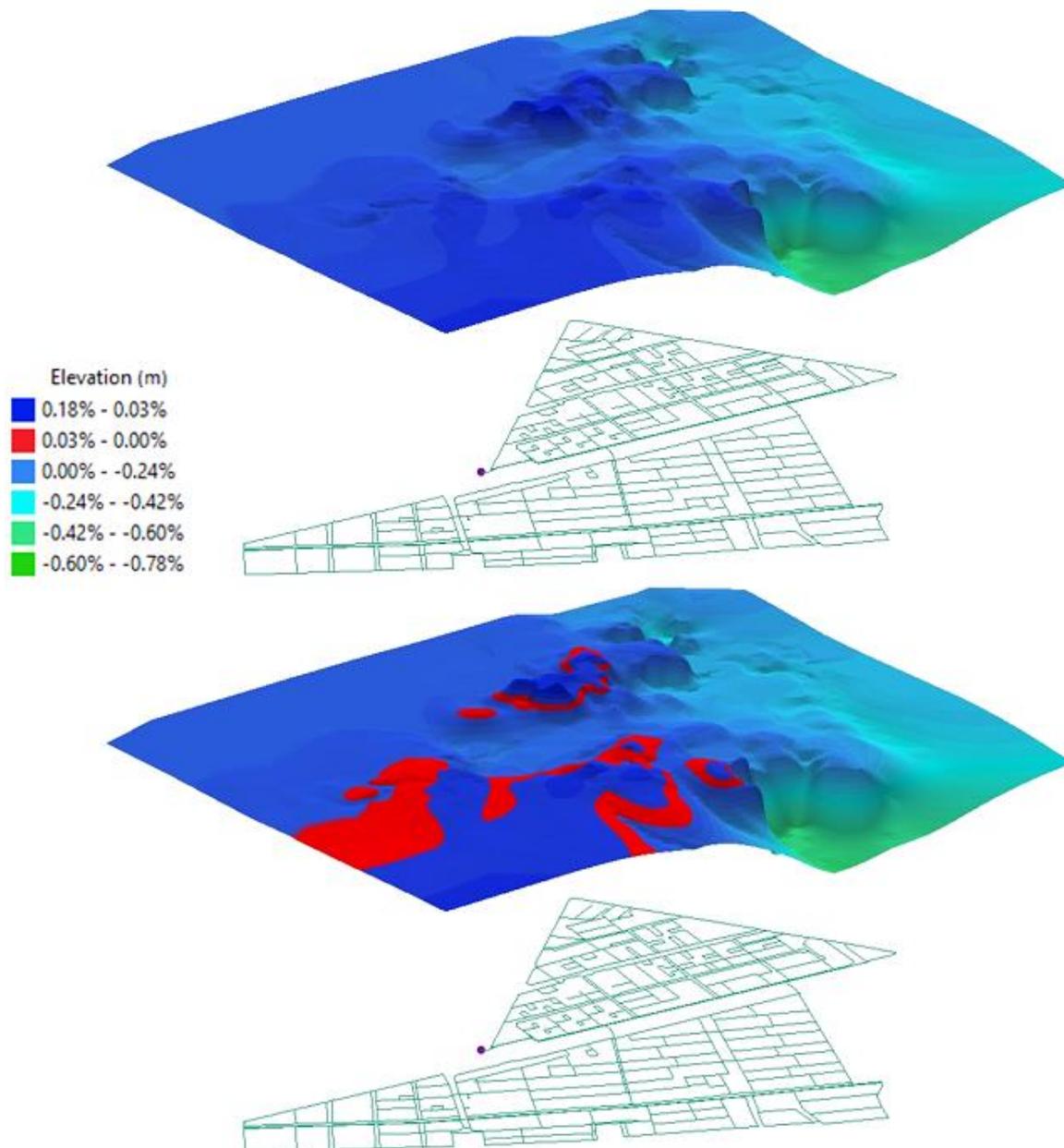


Figura 66. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

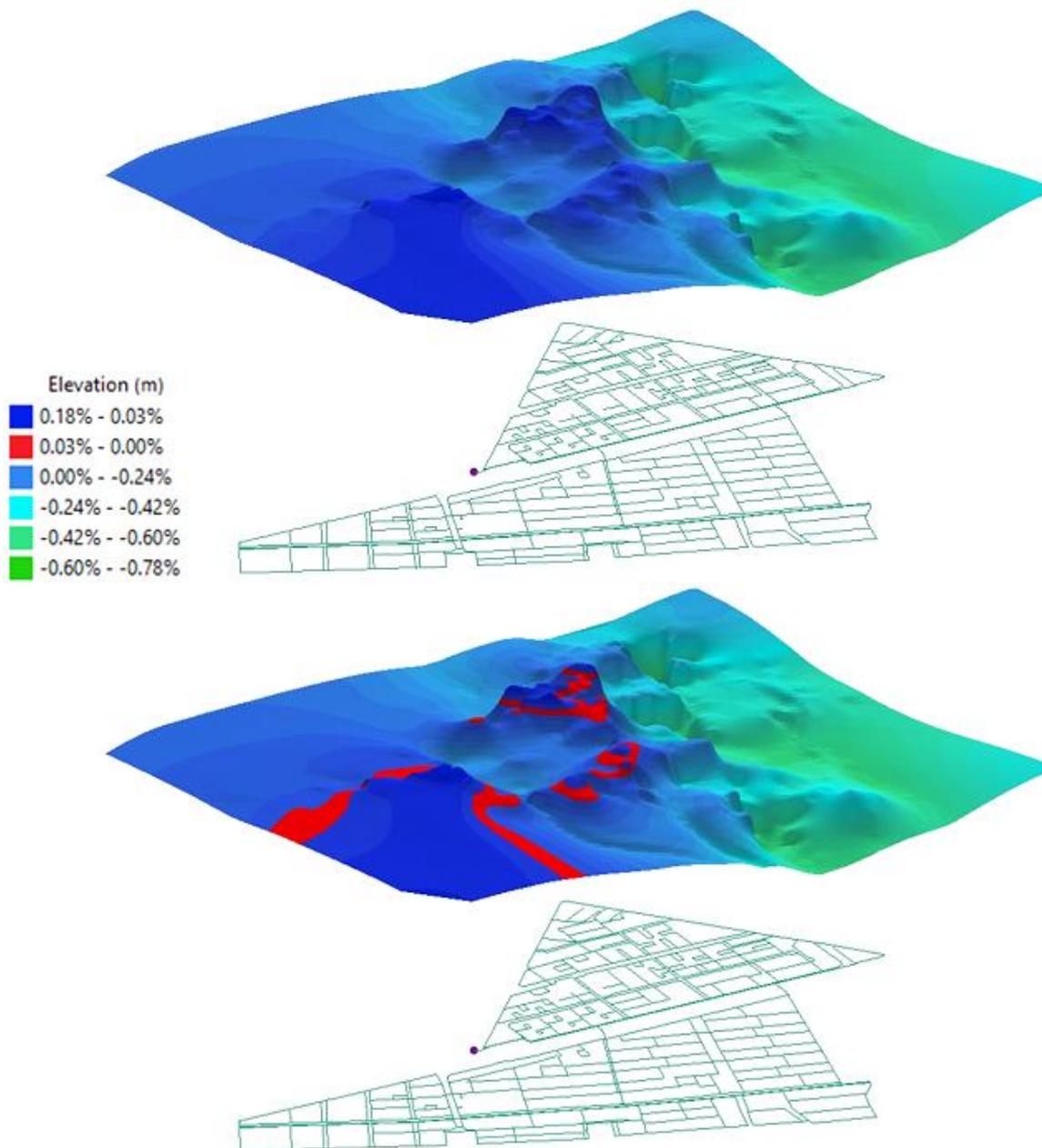
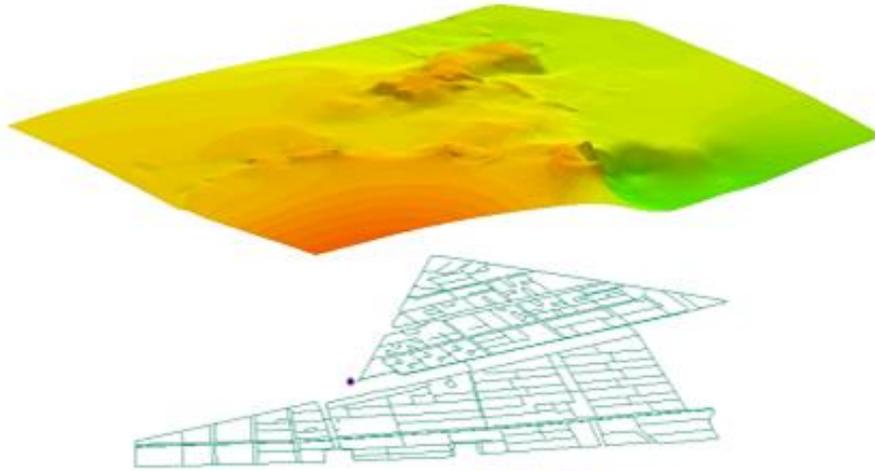


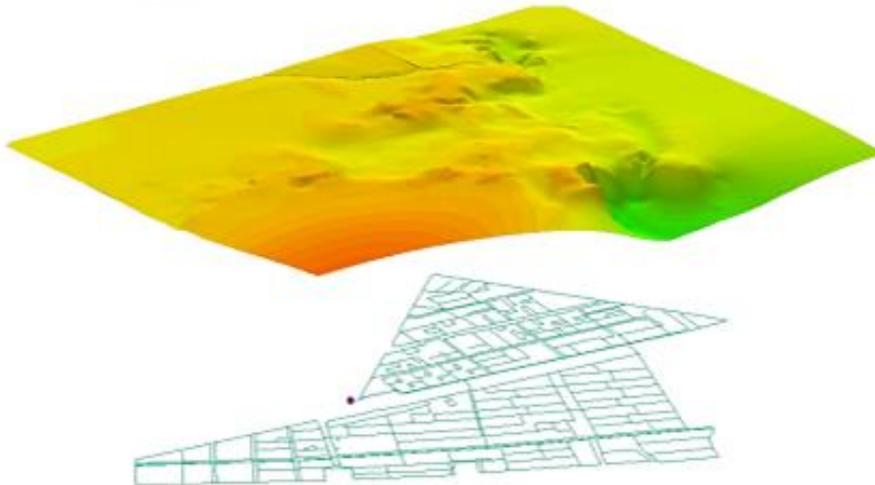
Figura 67. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

Como se expresa en la Figura 68, los cambios porcentuales de presión en la red son mucho mayores, teniendo en cuenta que la mínima altura de presión será de 15 m. Hay un valor en el extremo negativo de 57.50%, esto refiriéndose a que en la parte derecha de la red tiende a disminuir la presión en gran escala, debido a los aumentos de diámetro por el incremento de la demanda en el sistema.

P1 Y P2



P1 Y P4



P1 Y P8

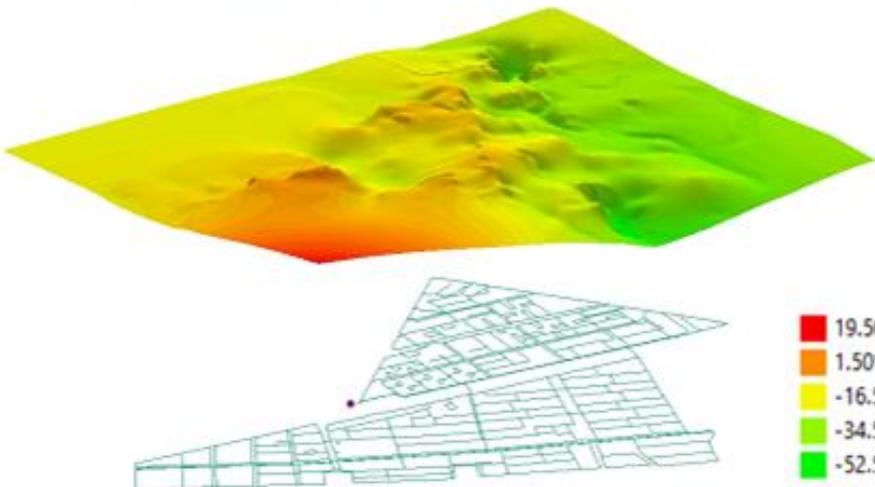


Figura 68. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

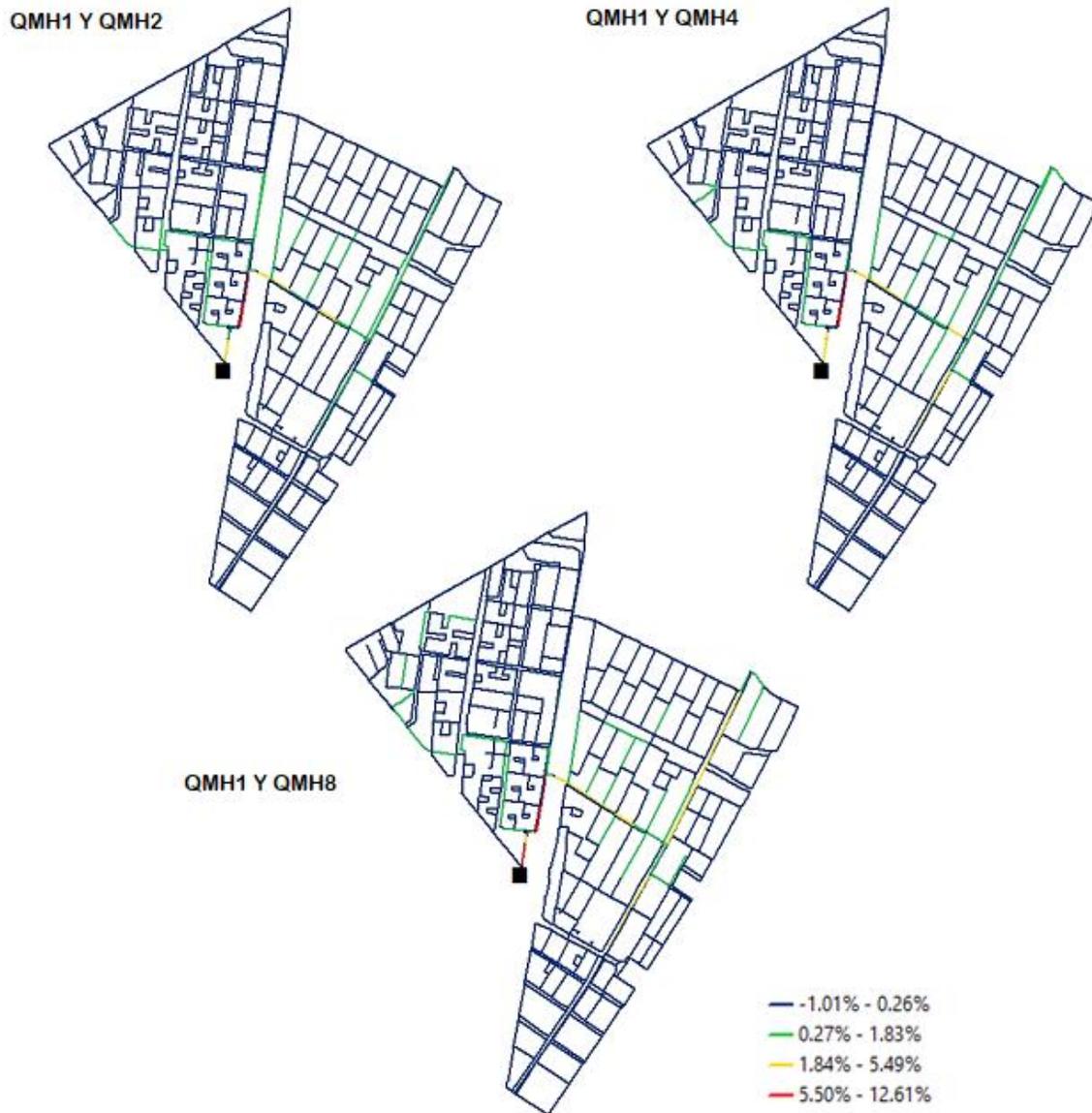


Figura 69. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

Con respecto a la Figura 69, los cambios que ocurren de la potencia específica en orden porcentual son relativamente bajos, a diferencia de otras redes. Además, al comparar los tres escenarios, los tubos tienen a permanecer con los mismos cambios porcentuales. Esto permite identificar que los incrementos de demanda hacen la potencia específica crezca directamente proporcional a esta, en la mayoría de las tuberías.

Asimismo, se tienen las pendientes de las elevaciones de las LGH para cada escenario, con un valor máximo de 25.38% para las zonas mostradas así en la Figura 70:

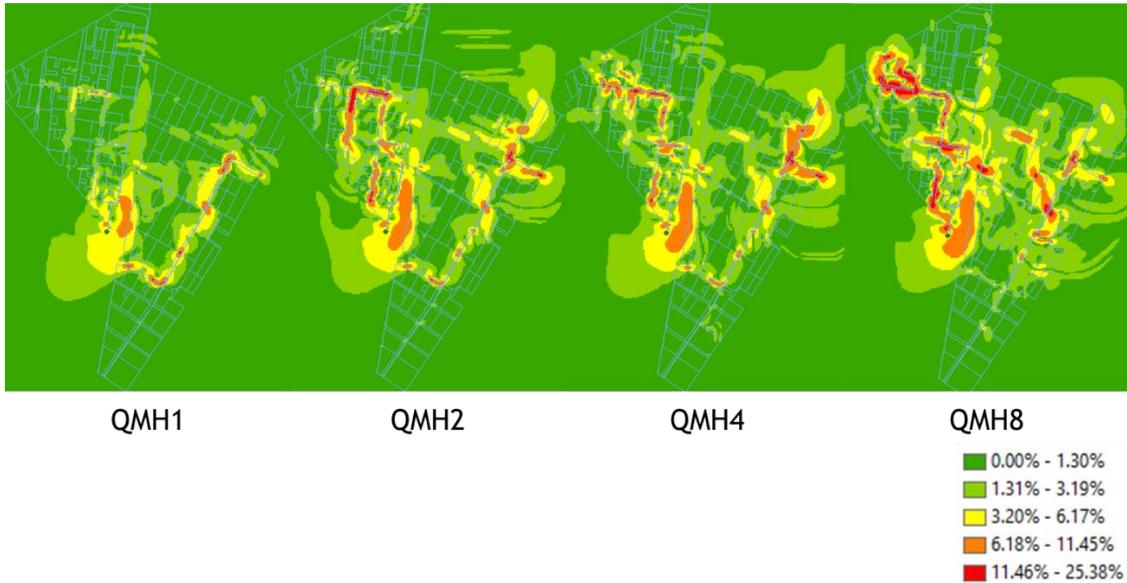


Figura 70. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Sector 8 Subsector 5 (Bogotá)

5.3 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

Al igual que en las demás redes, el mayor número de tuberías se encuentran designadas por el diámetro discreto mínimo disponible de 80.42 mm.

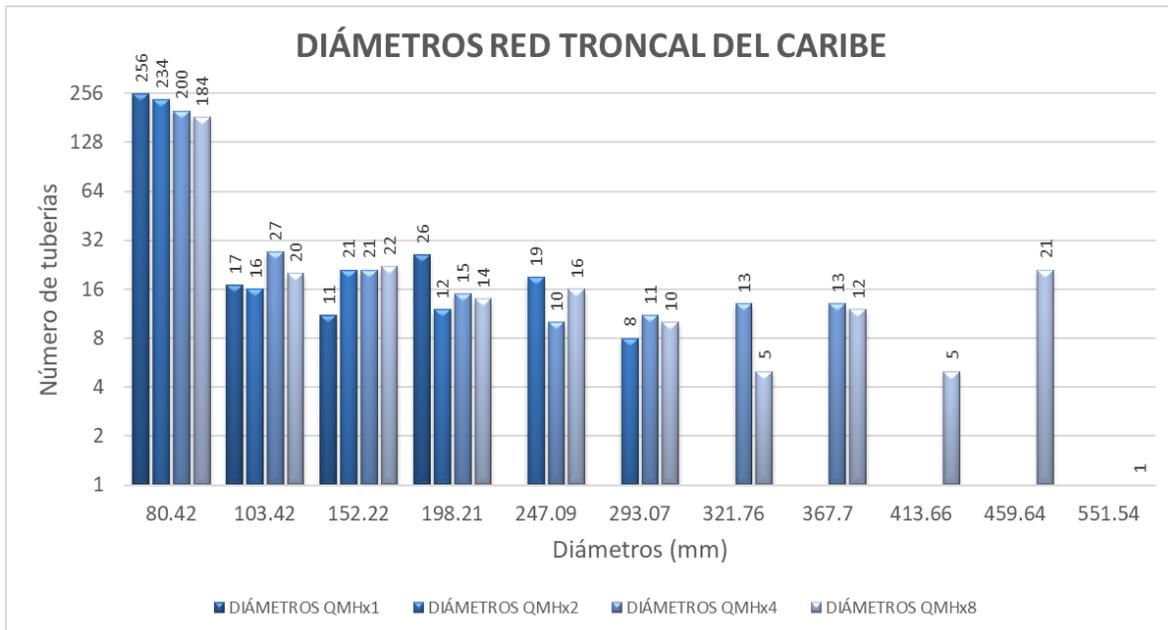


Figura 71. Diámetros de la Red Troncal del Caribe (Santa Marta) para (a) QMh1 = 56.48 lps, (b) QMh2 = 112.96 lps, (c) QMh4 = 225.92 lps y QMh8 = 451.84 lps.

La Figura 71 ilustra esta distribución de diámetros y número de tuberías correspondientes. Es de resaltar que, un número alto de tuberías en el escenario de QMHx8 determinaron un diámetro de 459.64, esto con un valor numérico de 21; en la Figura 72, se indica un 12.58% de tuberías, que en representan un diámetro igual o superior a 367.7 mm.

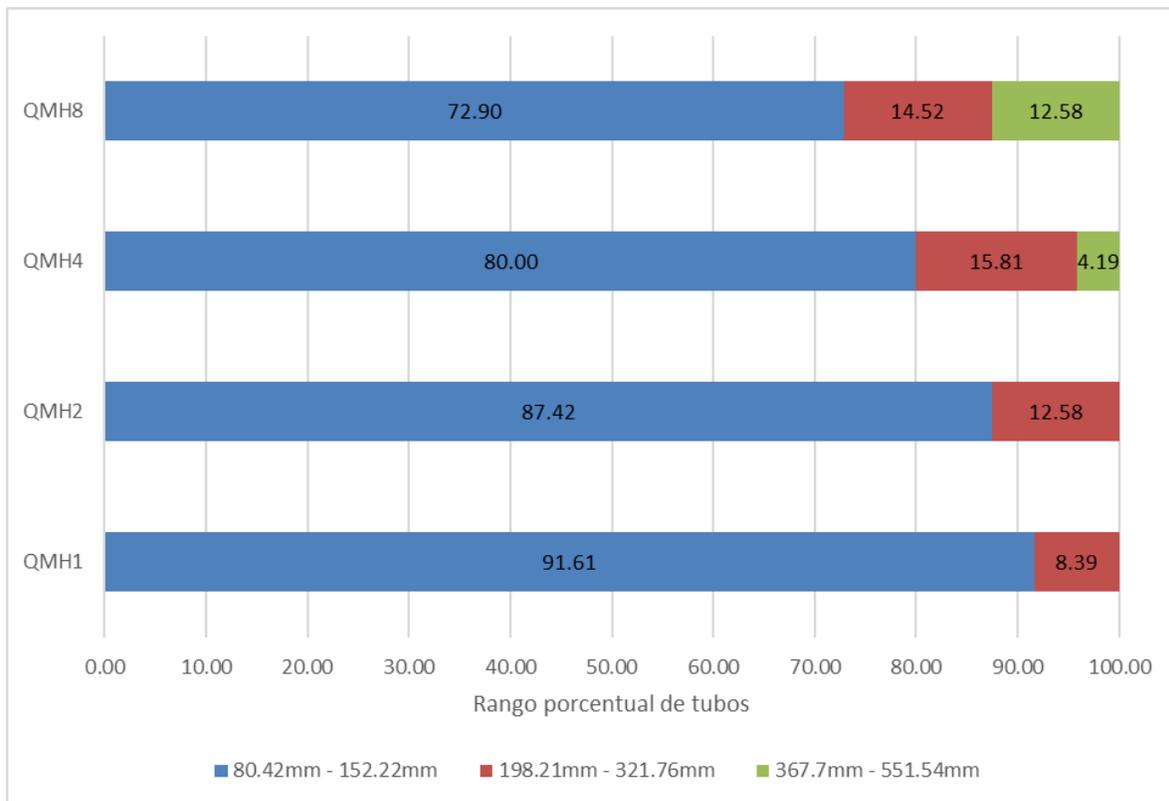


Figura 72. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

Para la actual red, la localización de los centroides geométricos exhibe distancias mucho mayores a partir del sistema con QMHx1, pues al tener una tubería de alimentación del tanque a la red mallada tan extensa, el centroide de potencia específica está separado hasta 195 m de distancia. Para el centroide de volumen su máximo valor es de 164 m y centroide de diámetro 118 m respectivamente. Lo anterior se señala en la Figura 73.

La Figura 74, enseña los índices de confiabilidad y eficiencia energética que se obtuvieron en el capítulo 4.3.3. Esta red es la que generó menos confiabilidad, y así mismo, los índices de potencia específica más bajos de la investigación; ocurre por ser una red tan plana y tener poca disponibilidad de energía al momento de confrontar diferentes demandas.

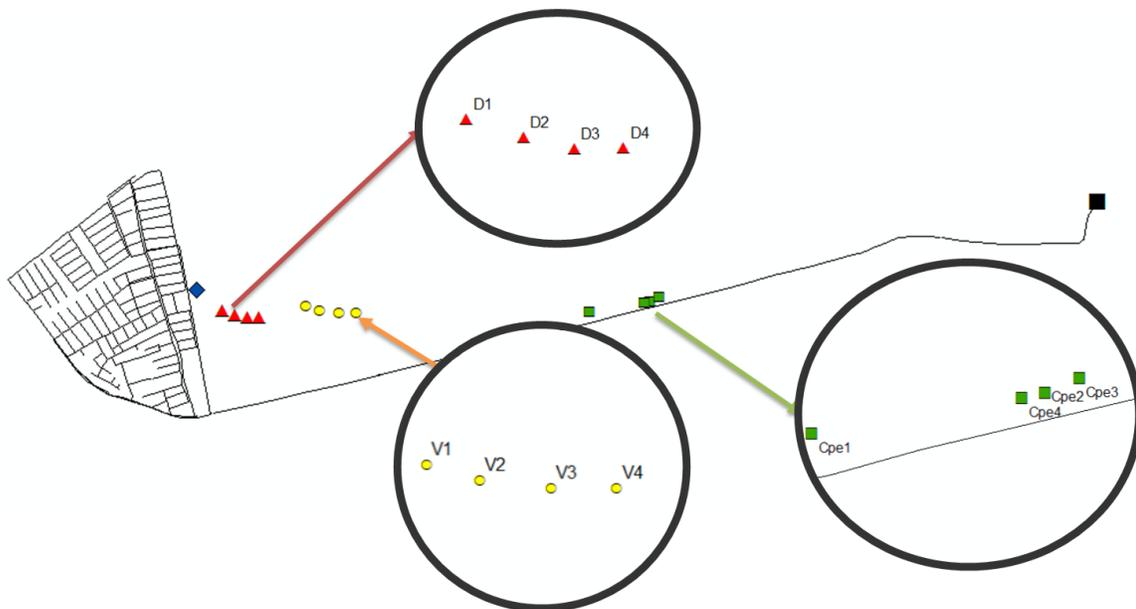


Figura 73. Localización de centroides geométricos de la Red Troncal del Caribe (Santa Marta). V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.

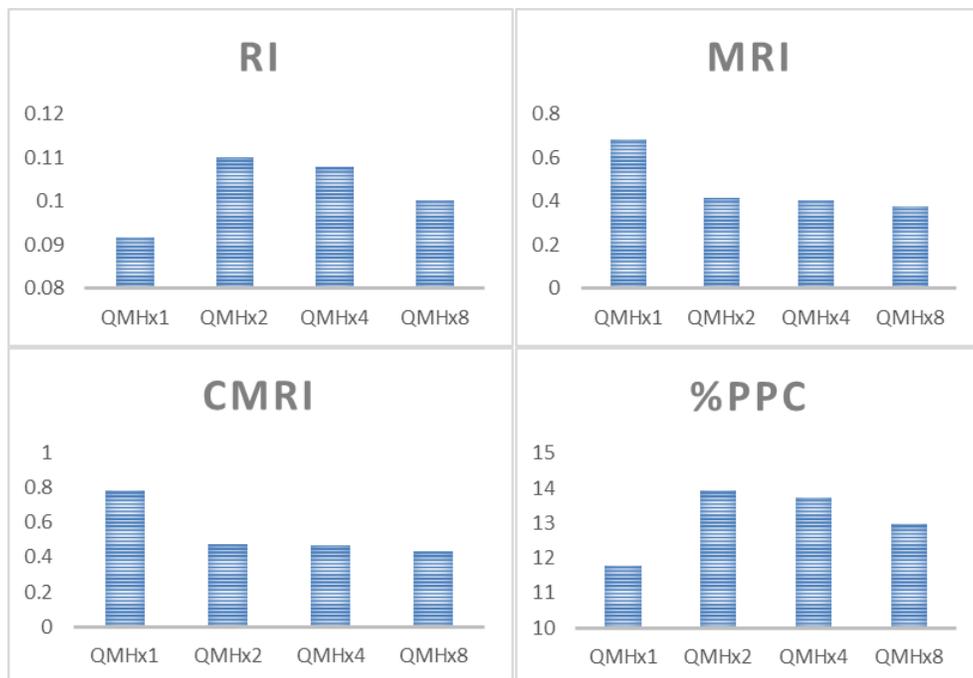


Figura 74. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Troncal del Caribe (Santa Marta). (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico

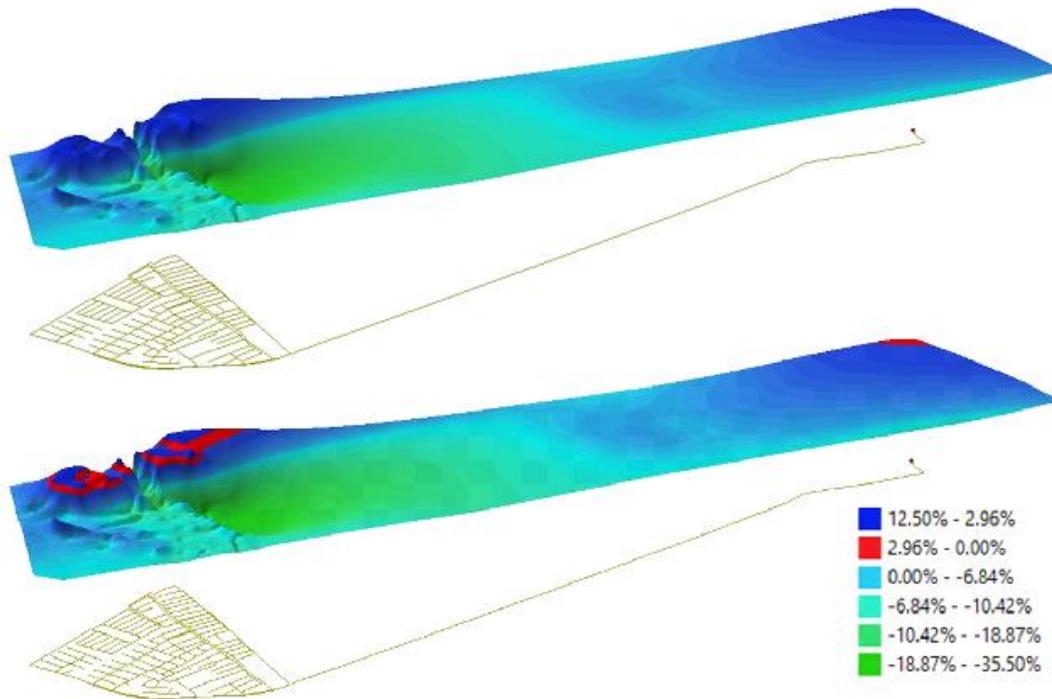


Figura 75. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

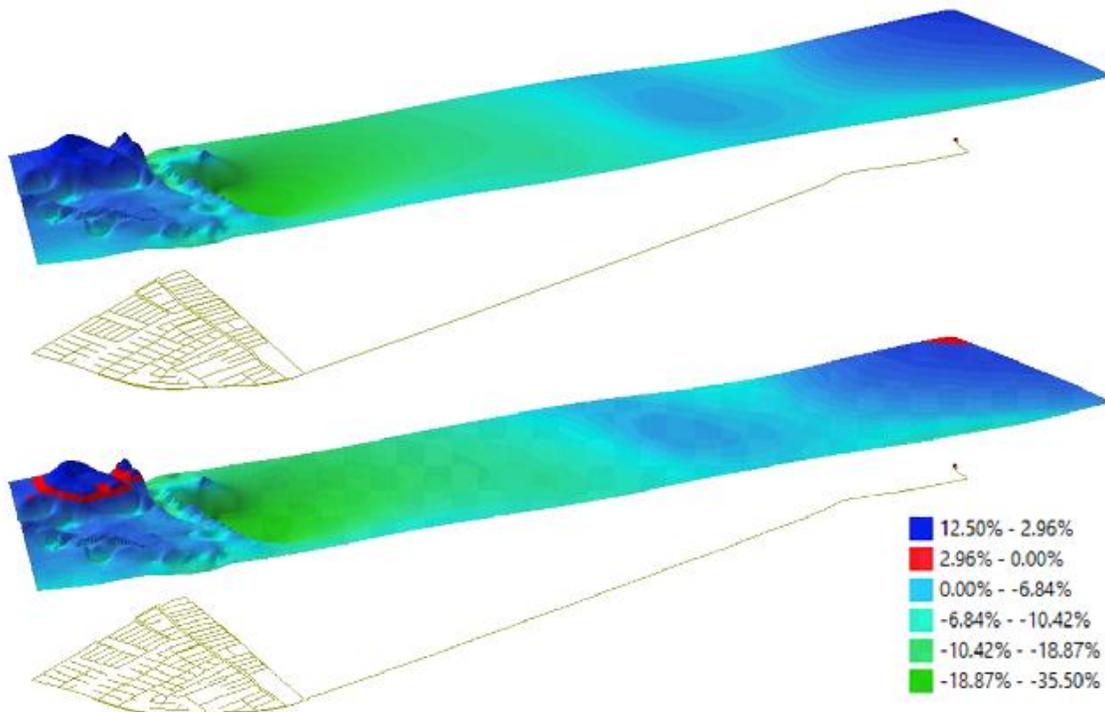


Figura 76. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

Los cambios porcentuales en las superficies de gradiente hidráulico, según la tabla de colores, son más altos con respecto a las redes de Bogotá, pues aquí se tiene una altura topográfica mínima de 13.36 m y máxima de 53.08 m, aproximadamente 2550 m por debajo de las redes ya mencionadas.

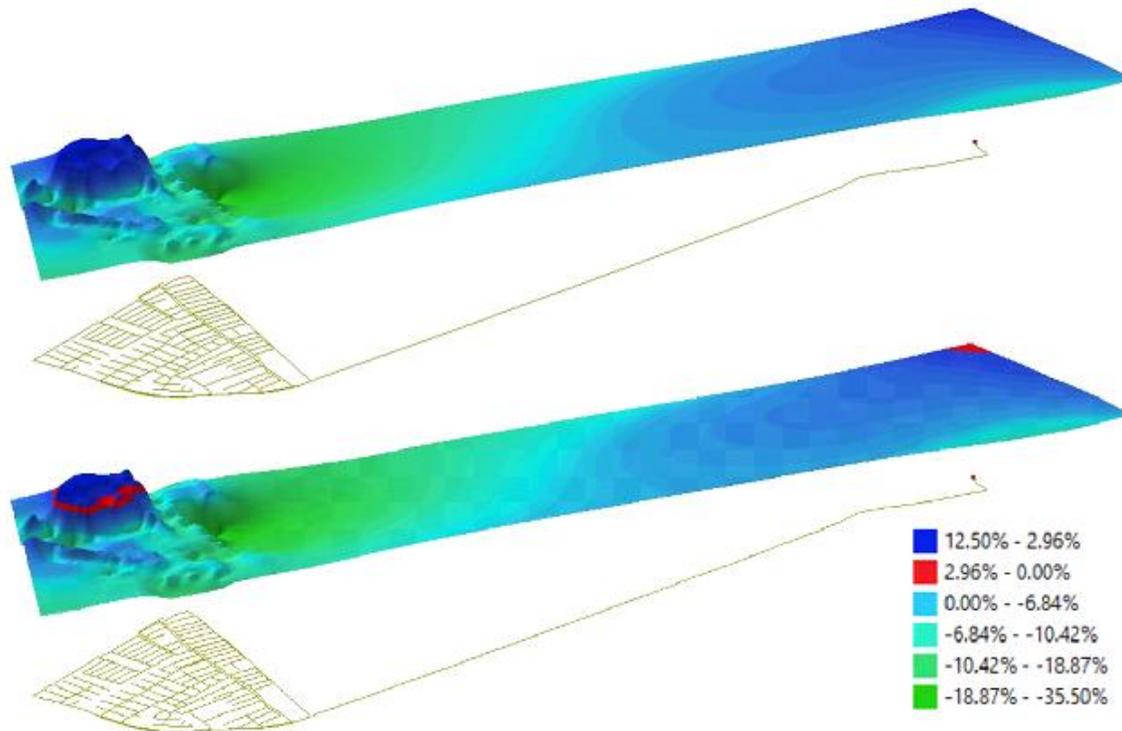


Figura 77. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

La tendencia es que a medida que se aumenta las demandas, se están generando valores más bajos de las LGH, que incrementos en las mismas. El rango de cambio porcentual ca desde -35.50% hasta 12.50%, esto se aprecia en la Figura 77. Las zonas donde hay poca variabilidad se ubican en el tubo que está inmediatamente después del tanque y en el centro de la red mallada.

Por otro lado, la Figura 78, indica las diferencias en las superficies de presión de la red teniendo en cuenta que la altura mínima de 15 m. La tabla de valores por la que se rige, no es muy distinta a la de los cambios porcentuales de las superficies de gradiente hidráulico, y su modelo de 3 dimensiones es semejante al de la presente figura, puesto que, los picos más altos de cambio se presentan en la red mallada.

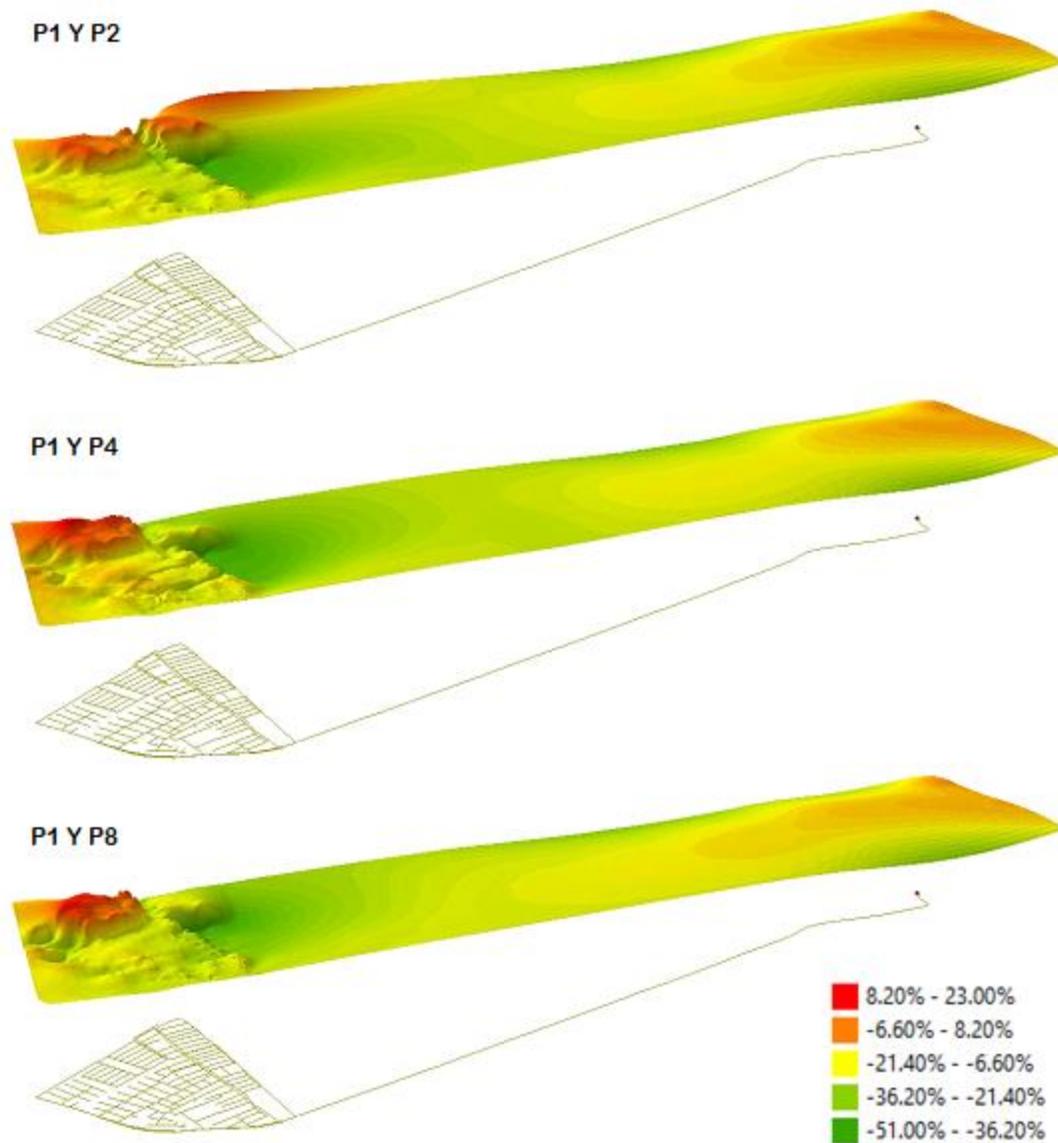


Figura 78. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

Para el análisis de los mapas de cambio en la potencia específica de la red Troncal del Caribe, se tuvo una diferencia de hasta tan solo el 11.10%, la cual se presentó únicamente en la tubería de alimentación, pues en la red mallada, los cambios ocurren bajo los rangos uno y dos, como lo muestra la Figura 79. Posteriormente, se encuentra la Figura 80 con las pendientes generadas por las LGH, las cuales no sobrepasan el 33.56%. Las pendientes más altas se encuentran en la parte superior y lateral derecha de la red mallada, mientras que, en la tubería de alimentación, están las inferiores.

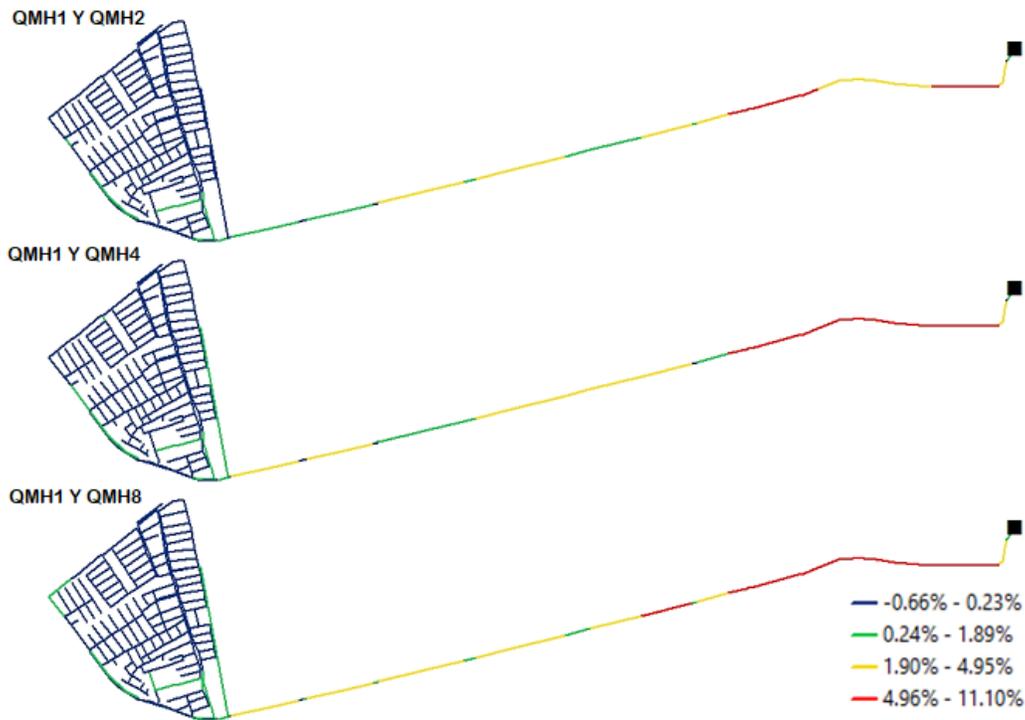


Figura 79. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

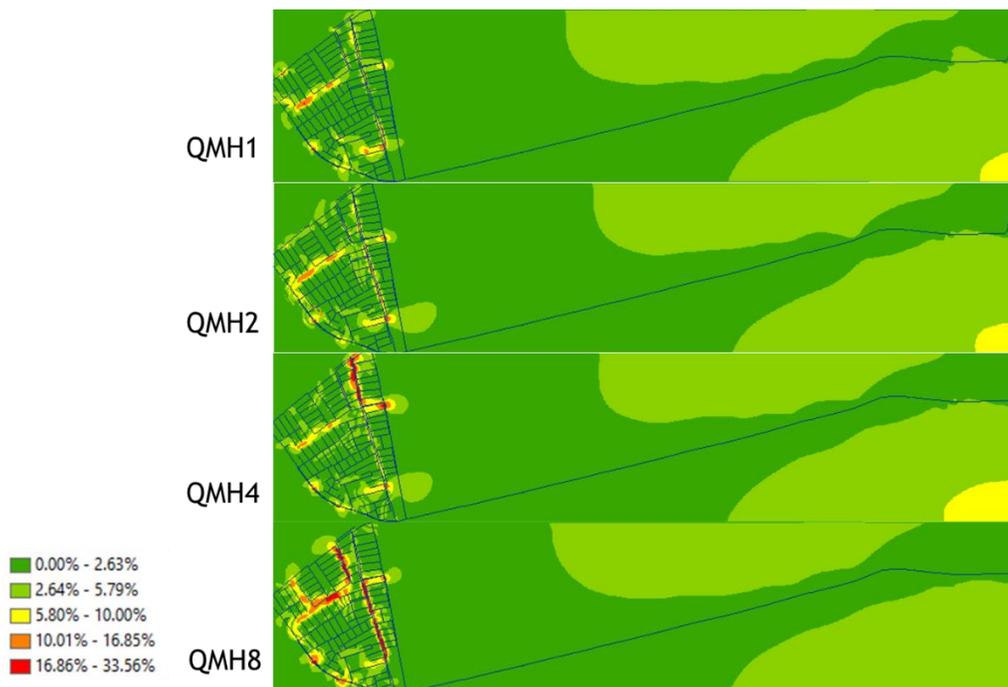


Figura 80. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Troncal del Caribe (Santa Marta)

5.4 Red Morro Bajo (Bucaramanga)

En la Figura 81 se ilustra la distribución de diámetros en las tuberías de la red de Morro Bajo.

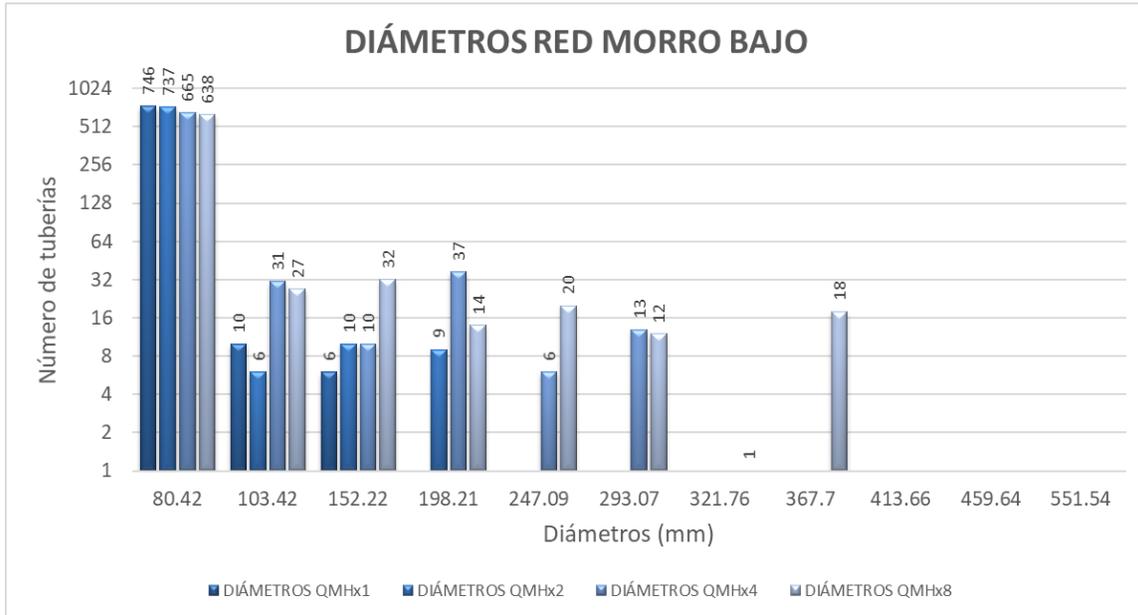


Figura 81. Diámetros de la Red Morro Bajo (Bucaramanga) para (a) QMHx1 = 60.78 lps, (b) QMHx2 = 121.56 lps, (c) QMHx4 = 243.12 lps y QMHx8 = 486.24 lps.

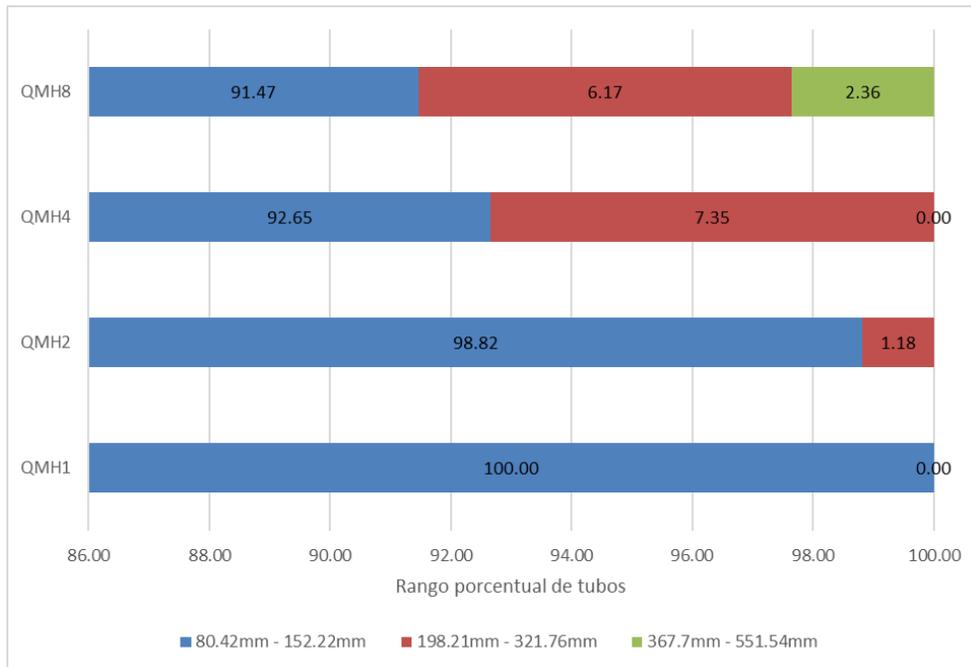


Figura 82. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Morro Bajo (Bucaramanga)

El 100% de las tuberías en el primer escenario QMHx1, pertenecen a un diámetro mayor o igual a 80.42 mm y menor o igual a 152.22 mm, tal como lo enseña la Figura 82. El diámetro utilizado más alto en el escenario de QMHx8 es de 367.7 mm, con un equivalente al 2.36% aproximadamente. Al tener un caudal moderadamente bajo, la red no necesita utilizar diámetros muy grandes en su diseño óptimo.



Figura 83. Localización de centroides geométricos de la Red Morro Bajo (Bucaramanga). V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.

La Figura 83 presenta los índices geométricos que se analizaron para cada una de las redes de distribución. Los centroides de potencia específica se sitúan en la zona cercana al tanque, teniendo como distancia máxima 180 m del QMHx1 al QMHx8. Para los centroides de volumen y de diámetro, la distancia máxima fue de tan solo 63 m. El centroide de potencia se sitúa en el centro de la red, al igual que los centroides de volumen y diámetro, pues tienden a tener poca variabilidad por sus coordenadas definidas en el capítulo 4.2.4.

Los índices de confiabilidad y eficiencia energética de la red Morro Bajo no tienen una decadencia constante, pues disminuyen un 15% para el segundo escenario, pero para el siguiente QMHx4 aumenta nuevamente el mismo porcentaje. La Figura 84 muestra la comparación de los cuatro índices hallados.

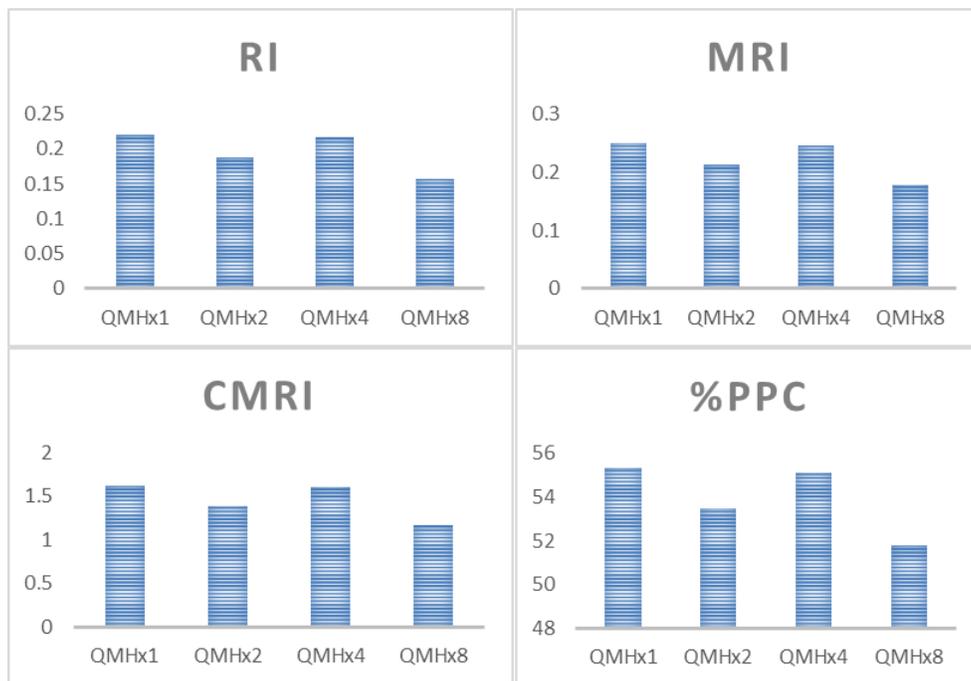


Figura 84. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Morro Bajo (Bucaramanga). (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico

Nuevamente, las diferencias de superficies de gradiente hidráulico oscilan en valores relativamente pequeños para los rangos de datos tomados, con 2.59% máximo y -9.31% como mínimo, pues la altura topográfica de los nudos de la red Morro Bajo está entre los 841.67 m y 951 m.

La Figura 85 representa el cambio porcentual que se produjo al aumentar la demanda al doble. Posterior a la tubería de alimentación de la red y en la parte superior de la malla, se enseñan los menores cambios.

En las diferencias porcentuales con respecto a QMhx2 y QMhx4, prácticamente no ocurren cambios menores a -5.34%. En la medida en que se incrementa la demanda a un QMhx8, ya se presentan los valores más bajos de hasta -9.31%. Esto se puede observar en la Figura 87.

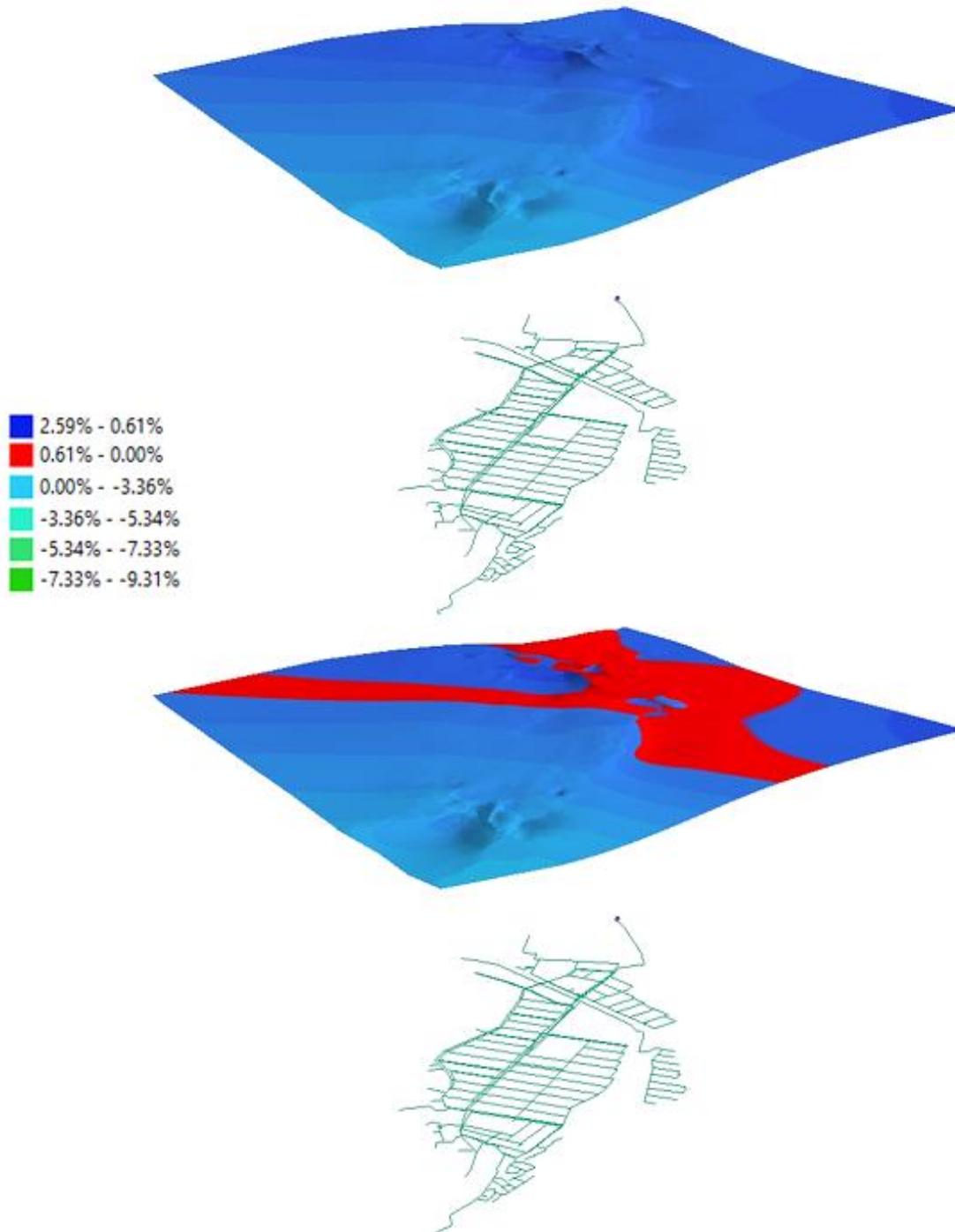


Figura 85. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Morro Bajo (Bucaramanga)

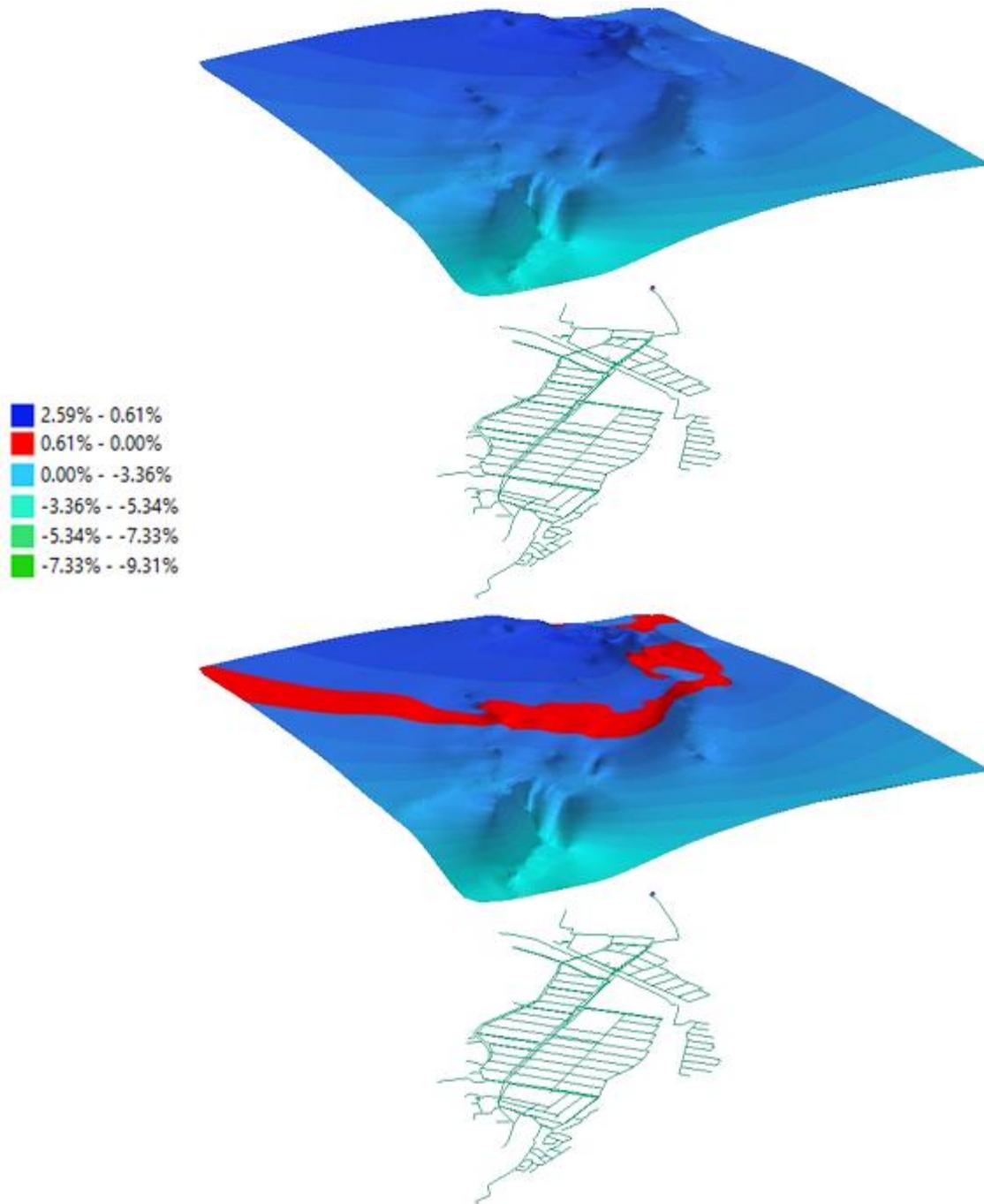


Figura 86. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Morro Bajo (Bucaramanga)

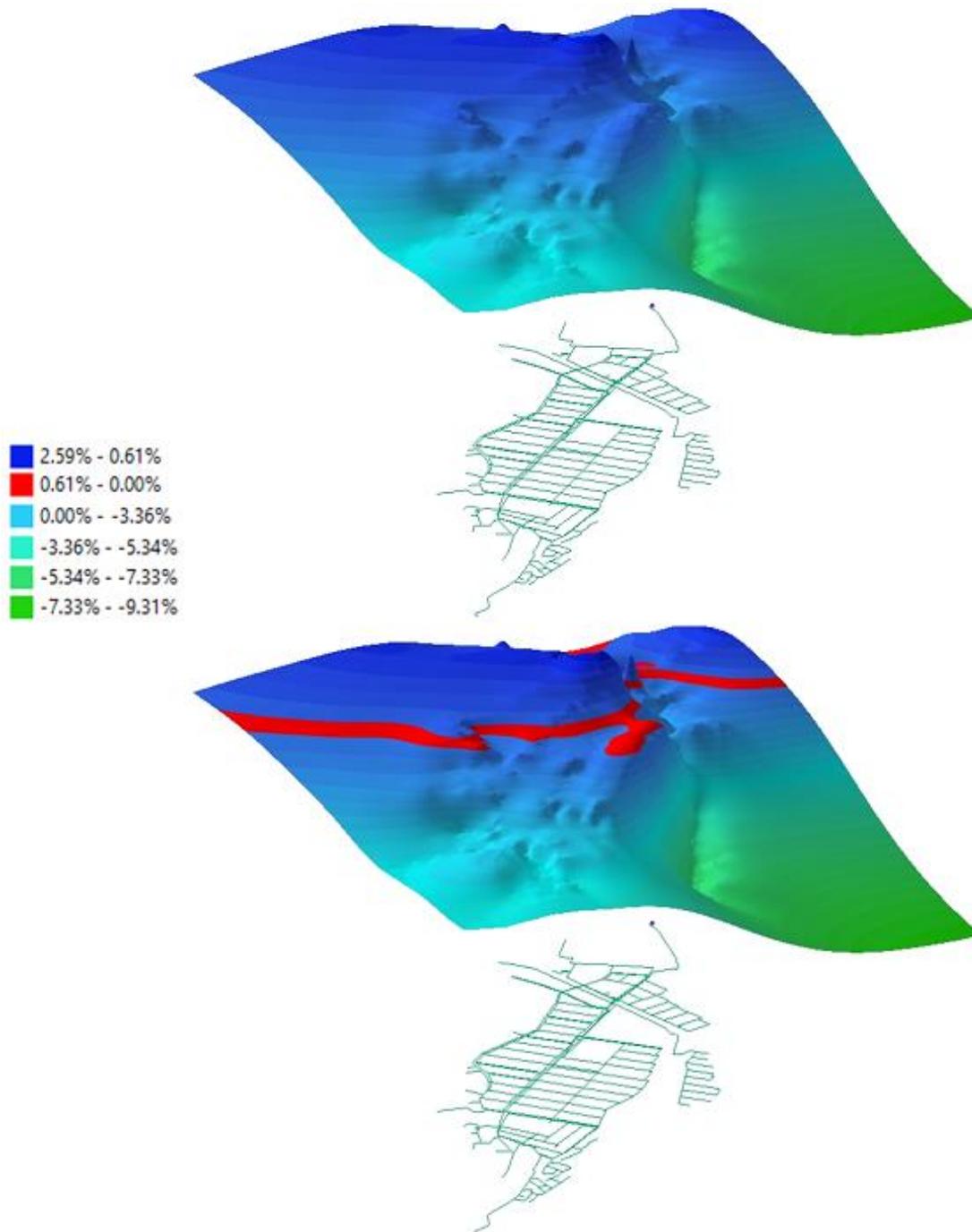


Figura 87. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Morro Bajo (Bucaramanga)

Figura 88 enseña los cambios ocurridos en la presión del sistema, en el escenario P1 y P2 la red presenta diferencias aproximadas del 50%, para las siguientes dos superficies, ya se manifiestan valores de -80% hasta 86%.

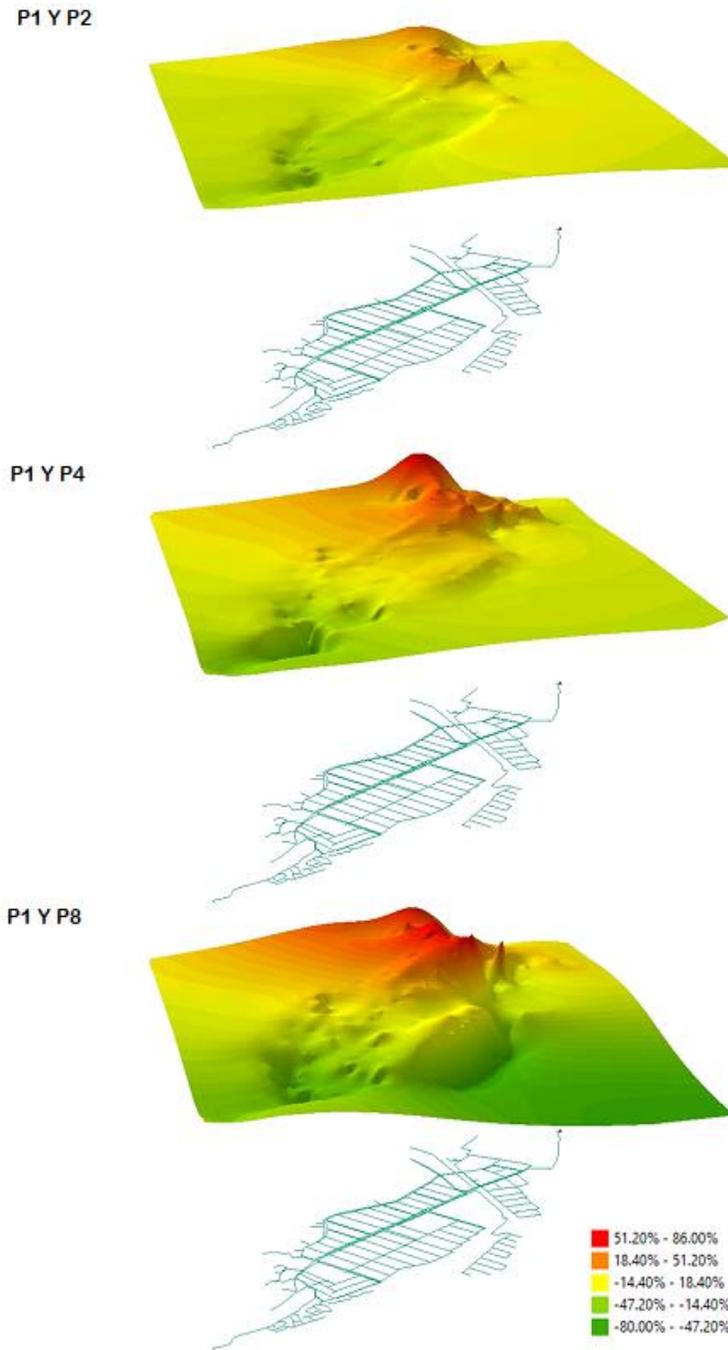


Figura 88. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Morro Bajo (Bucaramanga)

La red Morro Bajo tiende a experimentar los mismos cambios porcentuales relativos, ya que la Figura 89 presenta poca diferenciación de colores en los tubos, según el rango dado de -1.81% como valor mínimo y 44.36% como valor máximo.

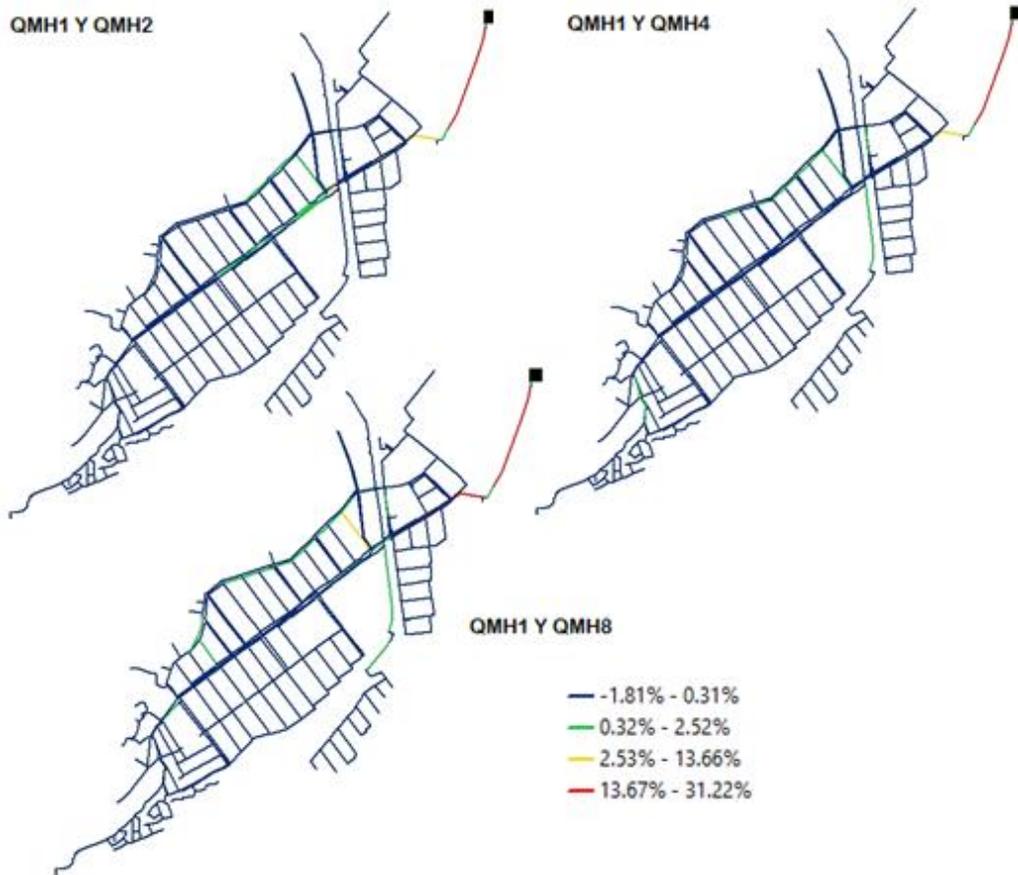


Figura 89. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Morro Bajo (Bucaramanga)

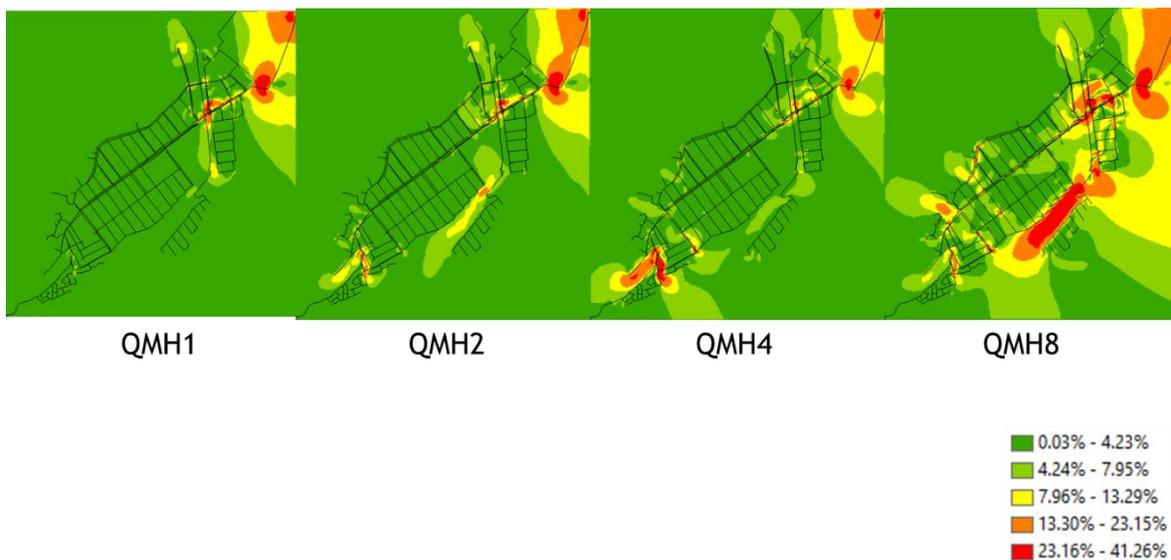


Figura 90. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Morro Bajo (Bucaramanga)

En la Figura 90 se ilustran las pendientes de las LGH del sistema, los gráficos para QMHx1 y QMHx2 sitúan las pendientes de rango de 23.16% y 41.26% cercanas al tanque y en el inicio de la red mallada, los siguientes dos escenarios QMHx4 y QMHx8 acentúan estos valores en la zona inferior de la misma.

5.5 Red Toro (Valle del Cauca)

La Figura 91 muestra la distribución de diámetros comerciales utilizados en el diseño optimizado de la red Toro. Es de resaltar que, de las 423 tuberías de esta red, el 98% arrojaron un diámetro de 80.42 mm y al aumentar la demanda ocho veces, se reduce a un 86% aproximadamente. En el QMHx8 se llega a tener una única tubería con diámetro de 367.7 mm y 413.66 mm, siendo estos los máximos utilizados en los diseños.

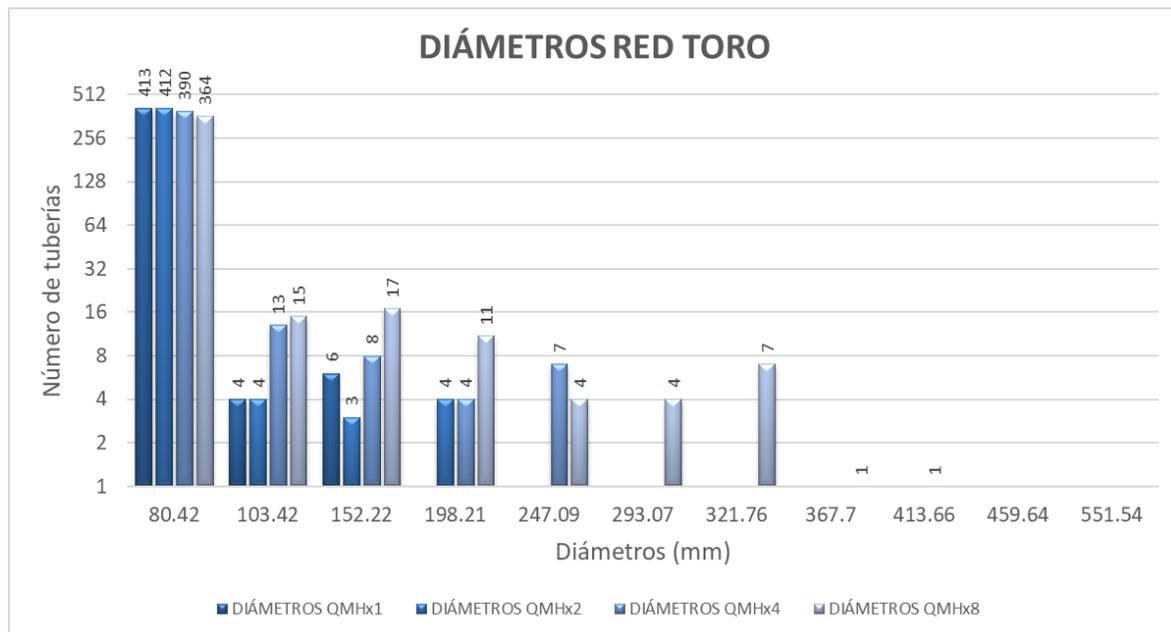


Figura 91. Diámetros de la Red Toro (Valle del Cauca) para (a) QMHx1 = 30.02 lps, (b) QMHx2 = 60.04 lps, (c) QMHx4 = 120.08 lps y QMHx8 = 240.16 lps.

La Figura 92 describe los porcentajes de diámetros en los tubos de acuerdo a rangos de 80.42 mm y 152.22 mm, 198.21 mm y 321.76 mm, finalmente, 367.7 mm y 551.54 mm. El QMHx1 no superó el diámetro de 152.22 mm, esto por el caudal bajo que maneja la red. Para QMHx4 y QMHx8 el porcentaje del tercer rango se mantuvo en un 0.24%.

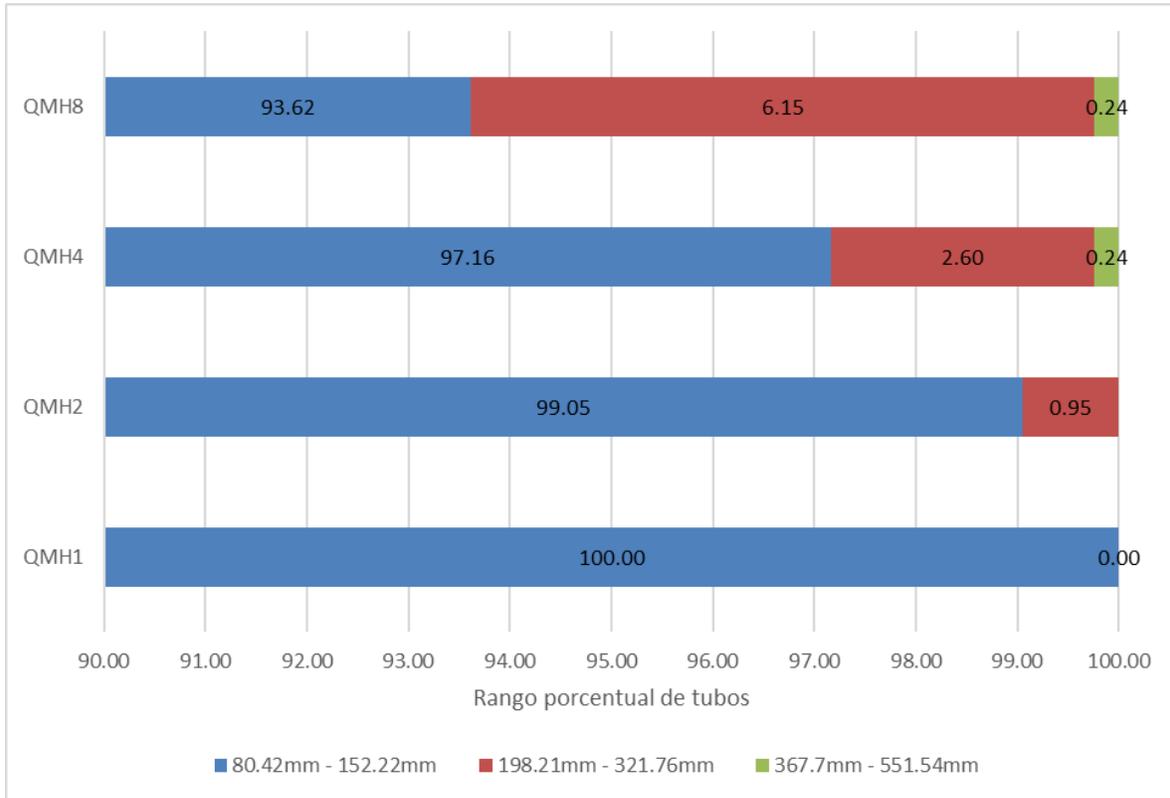


Figura 92. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Toro (Valle del Cauca)

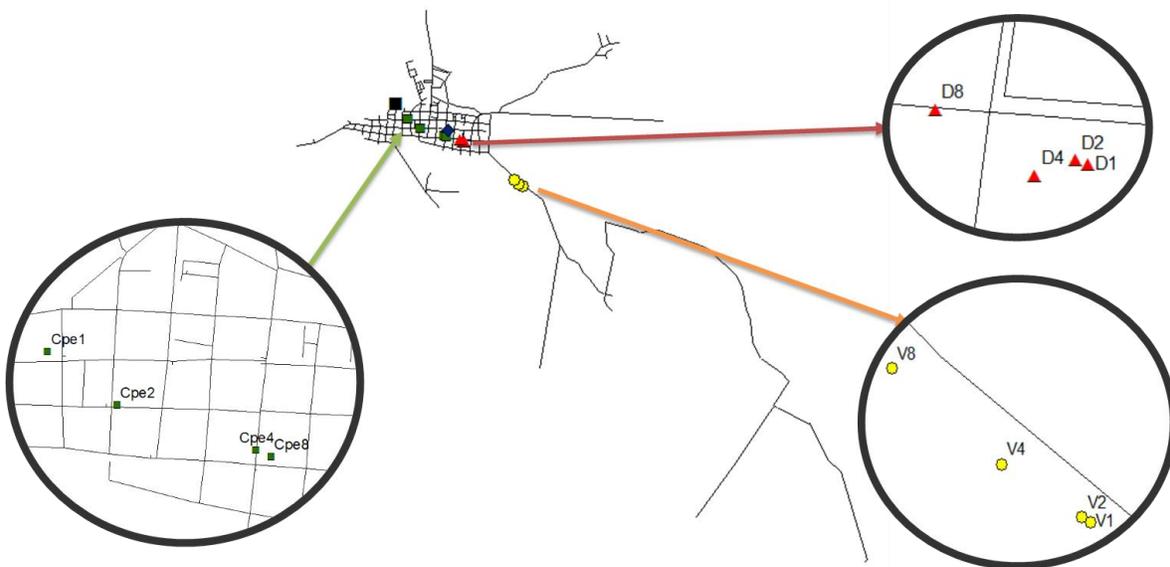


Figura 93. Localización de centroides geométricos de la Red Toro (Valle del Cauca). V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.

La localización de los índices geométricos evaluados se encuentra en la Figura 93, ubicando los centroides de potencia específica cercanos al tanque; estos índices son los que presentaron la mayor lejanía con respecto a todas las redes de la investigación, esta fue de hasta 481 m. Se debe a la particularidad de red, compuesta en su parte central por una malla que desprende largos tramos de tubería en sus extremidades. Los centroides de volumen tuvieron una separación de hasta 116 m y los centroides de diámetros de 50 m.

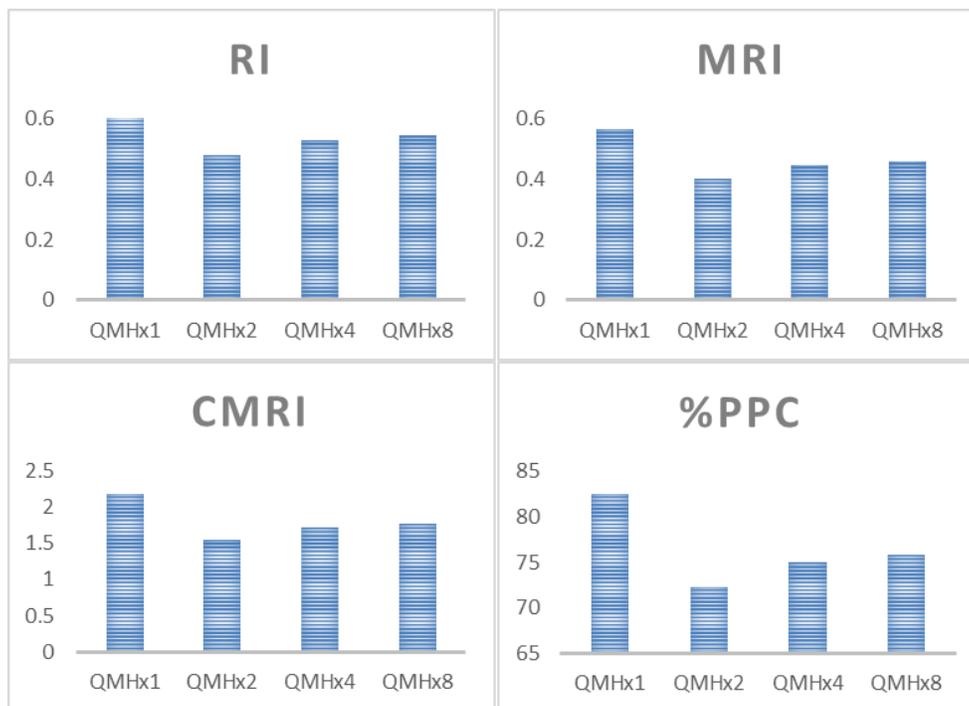


Figura 94. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Toro (Valle del Cauca). (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico.

La Figura 94 presenta los resultados de los índices de confiabilidad y eficiencia energética de la red Toro. El RU tiene un valor de 0.672 en el QMHx1, posteriormente, disminuye hasta un 30%. Esta es una de las redes con mejores resultados con respecto a la confiabilidad del sistema.

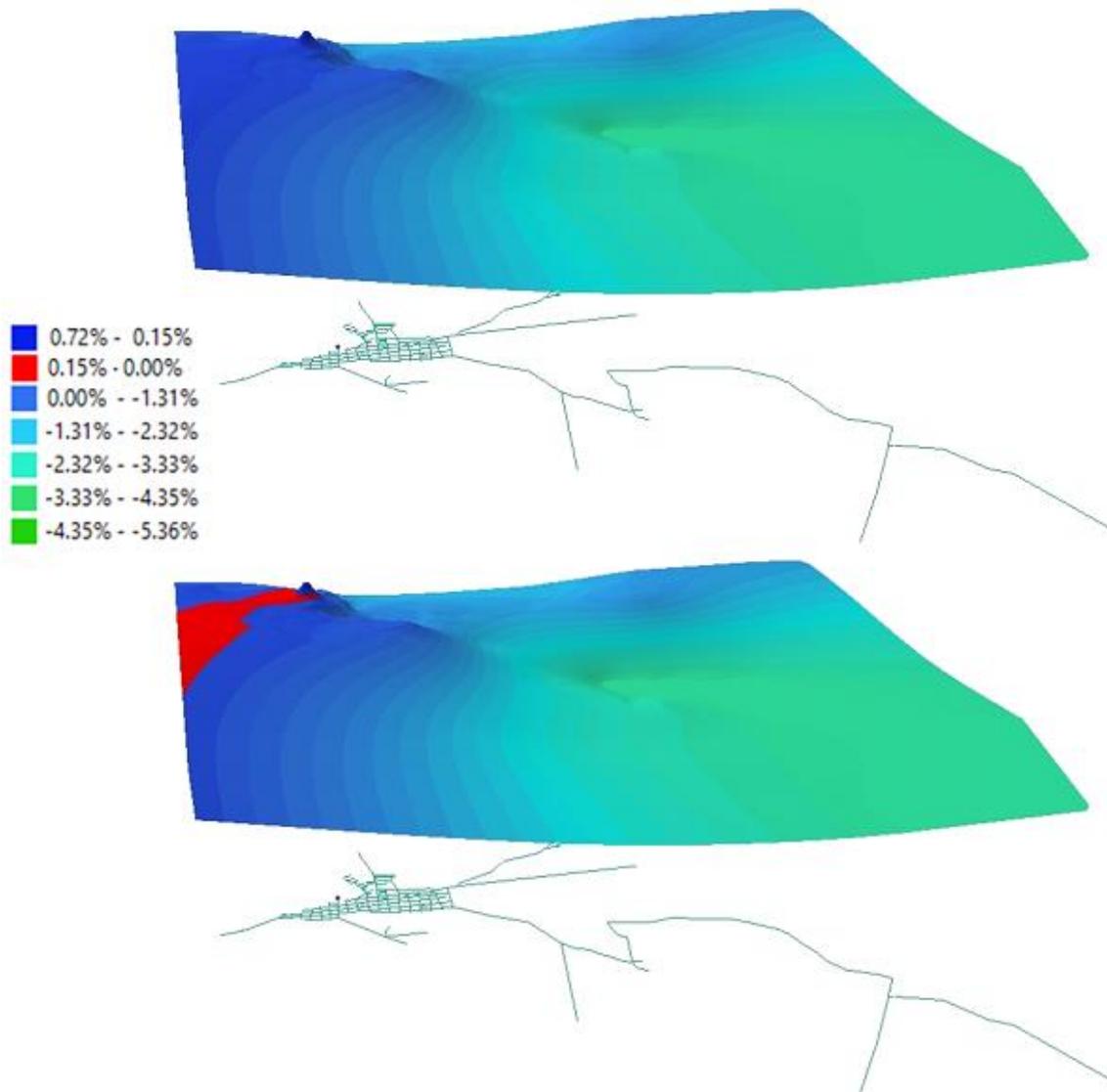


Figura 95. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Toro (Valle del Cauca)

La superficie de gradiente hidráulico de la Figura 95 presenta la diferencia porcentual para los primeros dos escenarios mostrados la página 39, la zona superior izquierda de la red es a que generó los menores cambios y se resalta en color rojo, con un rango de 0.00% a 0.15%.

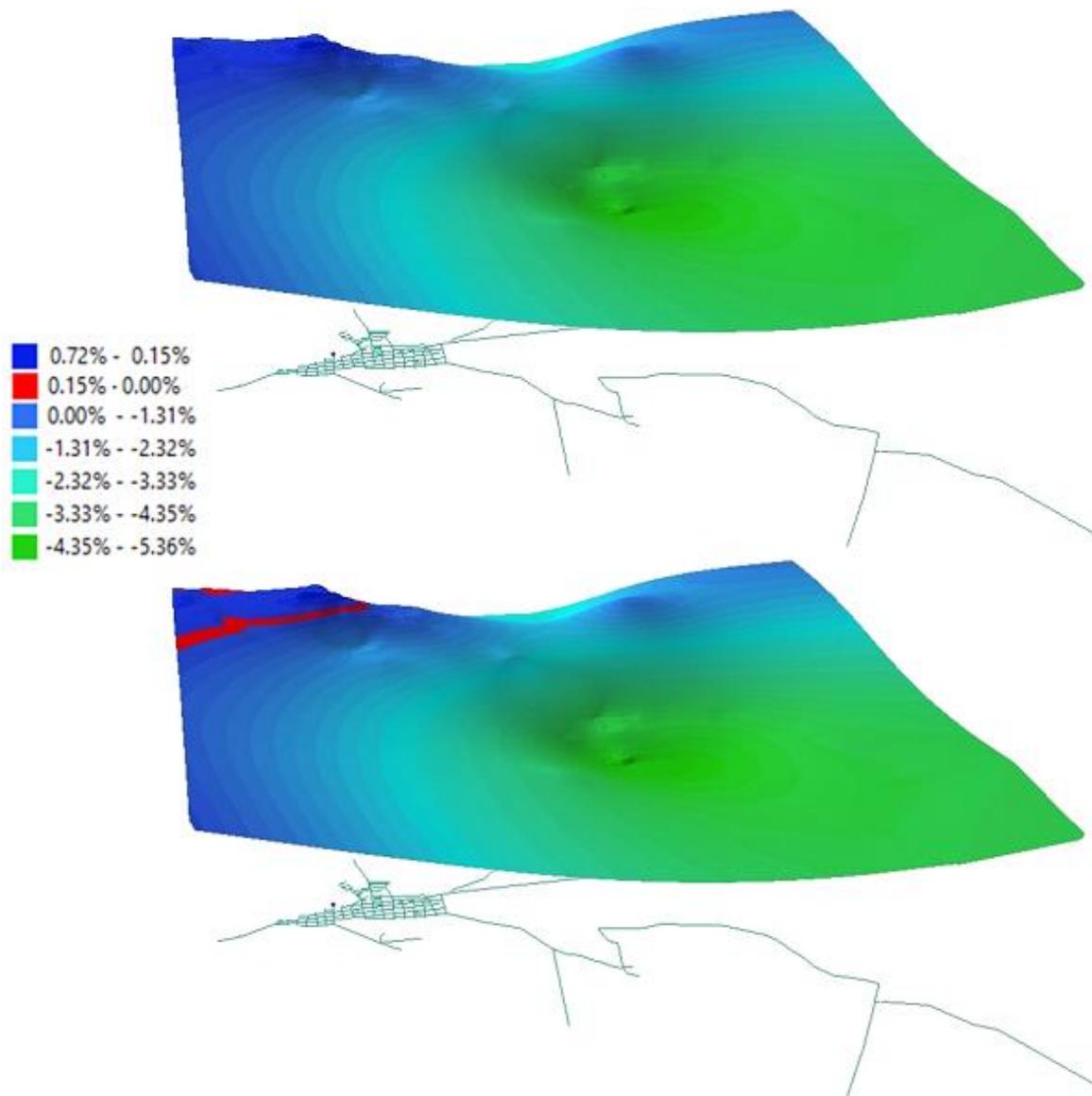


Figura 96. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Toro (Valle del Cauca)

La tabla de valores presentada tiene un valor mínimo de -5.36% y máximo de 0.72%. Hay un patrón continuo en la Figura 95, Figura 96 y Figura 97, ya que es notable como aumenta el rango de diferencias entre las superficies a medida que incrementa la demanda.

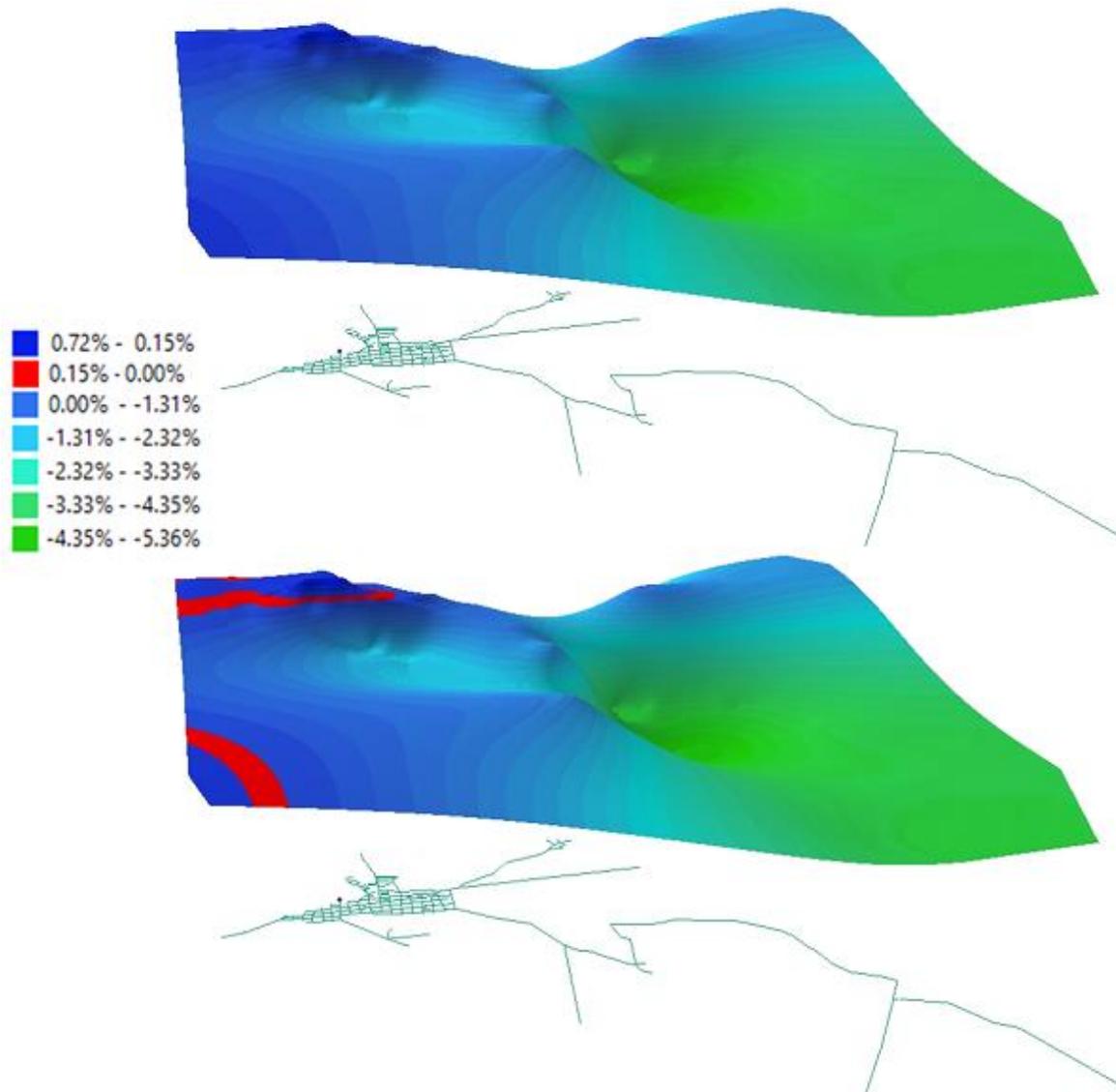


Figura 97. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Toro (Valle del Cauca)

La Figura 98 relaciona los cambios porcentuales generados de las elevaciones en las superficies de presión, hay un mayor enfoque hacia que la presión disminuya en los incrementos de caudal ya que alcanza un valor de -78%, esto porque los tramos más extensos de tuberías ampliaron su diámetro en el momento de optimizar la redes.

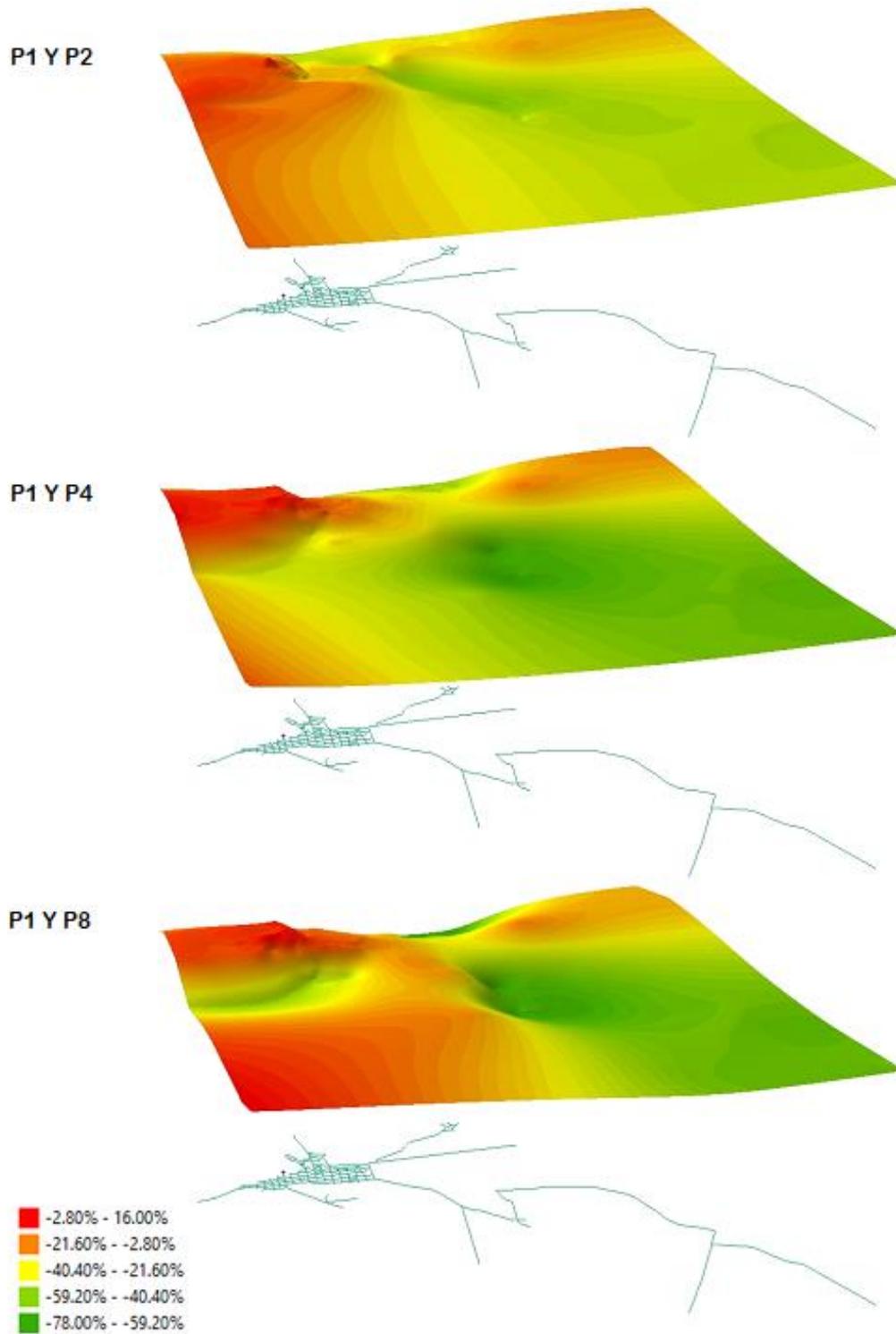


Figura 98. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Toro (Valle del Cauca)

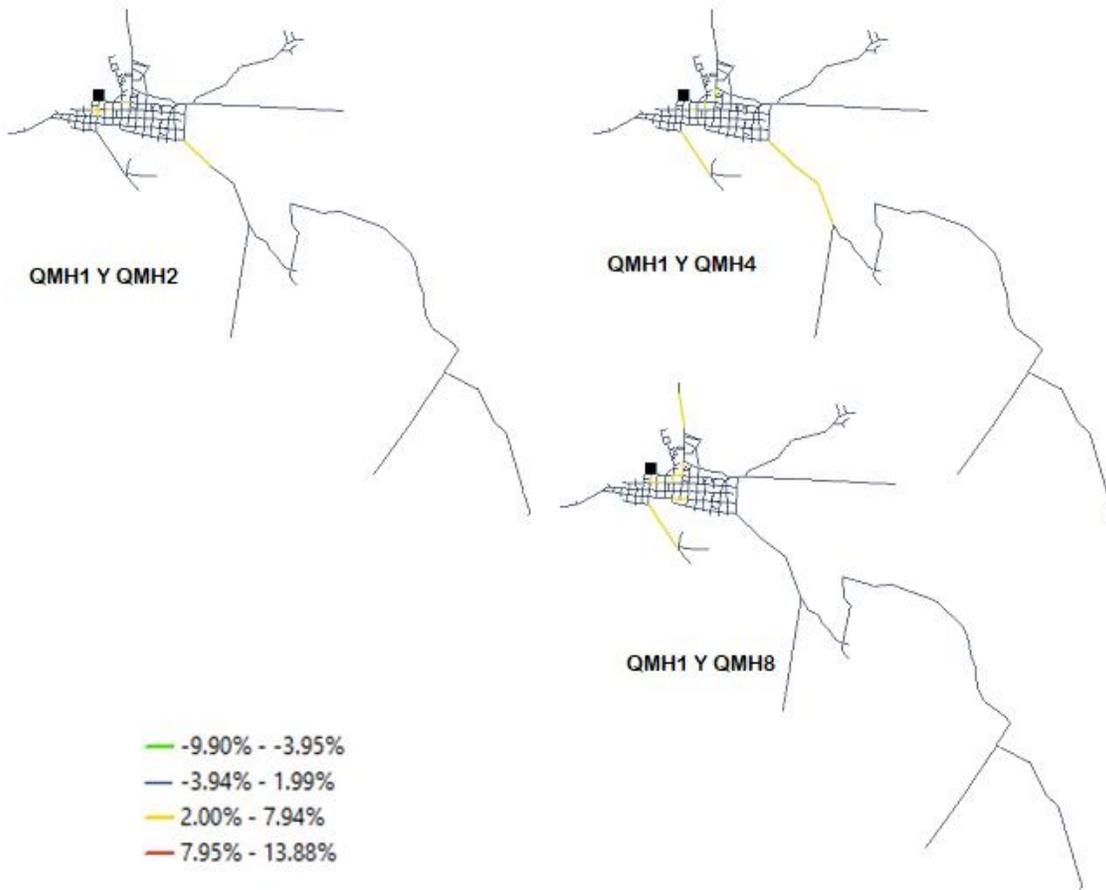


Figura 99. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Toro (Valle del Cauca)

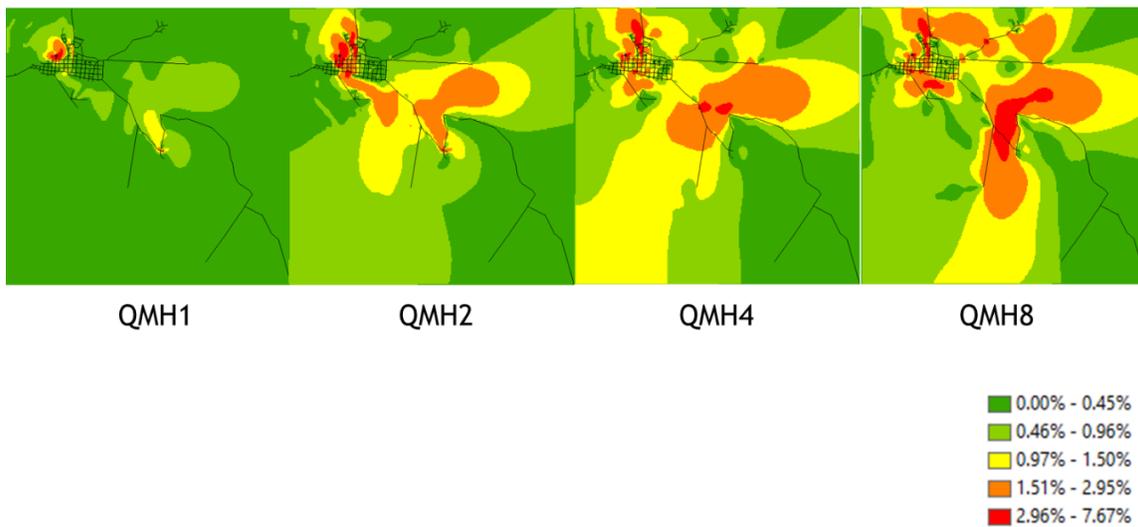


Figura 100. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Toro (Valle del Cauca)

La red del municipio de Toro, es una de los sistemas que presentó menos cambios porcentuales con respecto a la potencia específica, nuevamente, los cambios más significativos se dan en las tuberías largas que se desprenden de la red mallada. Esto se ilustra en la Figura 99.

La Figura 100, es evidente que las pendientes más pronunciadas de las LGH de la red se presentan inmediatamente después del tanque y en la zona media de la tubería más larga. Aun así, es una de las redes con las pendientes más bajas.

5.6 Red Bolívar (Valle del Cauca)

Consecutivamente, se presentan los diámetros que se obtuvieron después de la optimización de la red Bolívar con los distintos aumentos de demanda. Al igual que en las redes analizadas anteriormente, se presenta una mayor concentración en las tuberías con diámetro de 80.42 mm, que va disminuyendo según se incrementa el caudal en los escenarios correspondientes, como lo enseña la Figura 101.

Para QMHx1 todas las tuberías se encuentran entre 80.42 mm y 152.55 mm. Además, sólo el escenario QMHx8 presentó un 1.5% de tuberías en diámetros iguales o superiores a 367.7 mm, esto se puede identificar en la Figura 102.

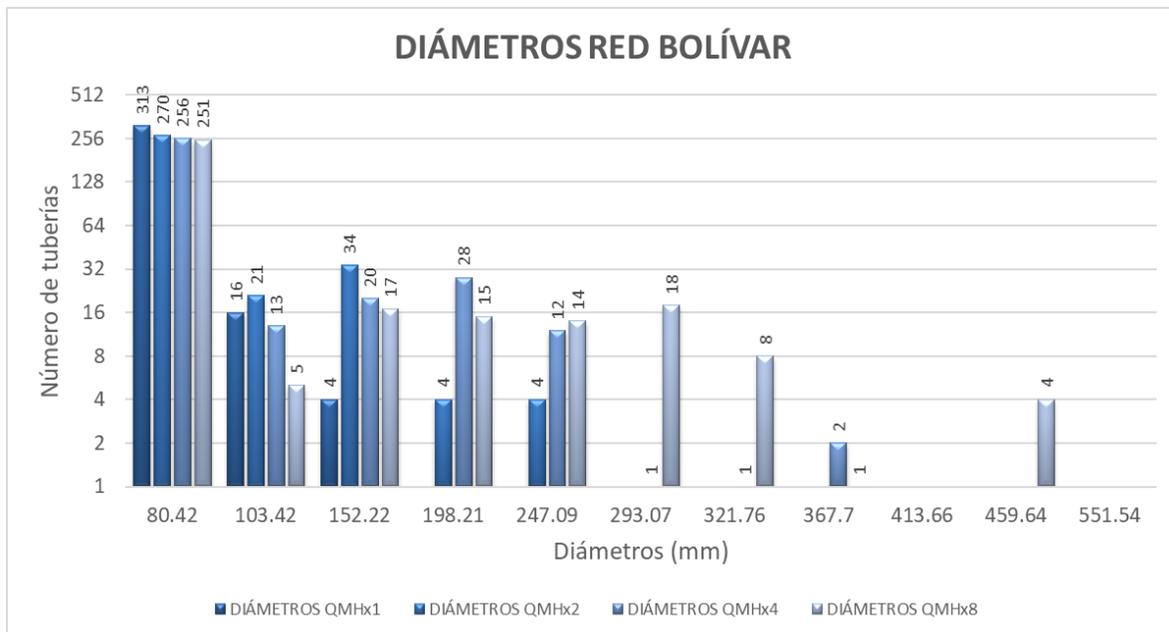


Figura 101. Diámetros de la Red Bolívar (Valle del Cauca) para (a) QMHx1 = 35.85 lps, (b) QMHx2 = 71.70 lps, (c) QMHx4 = 143.40 lps y QMHx8 = 286.60 lps.

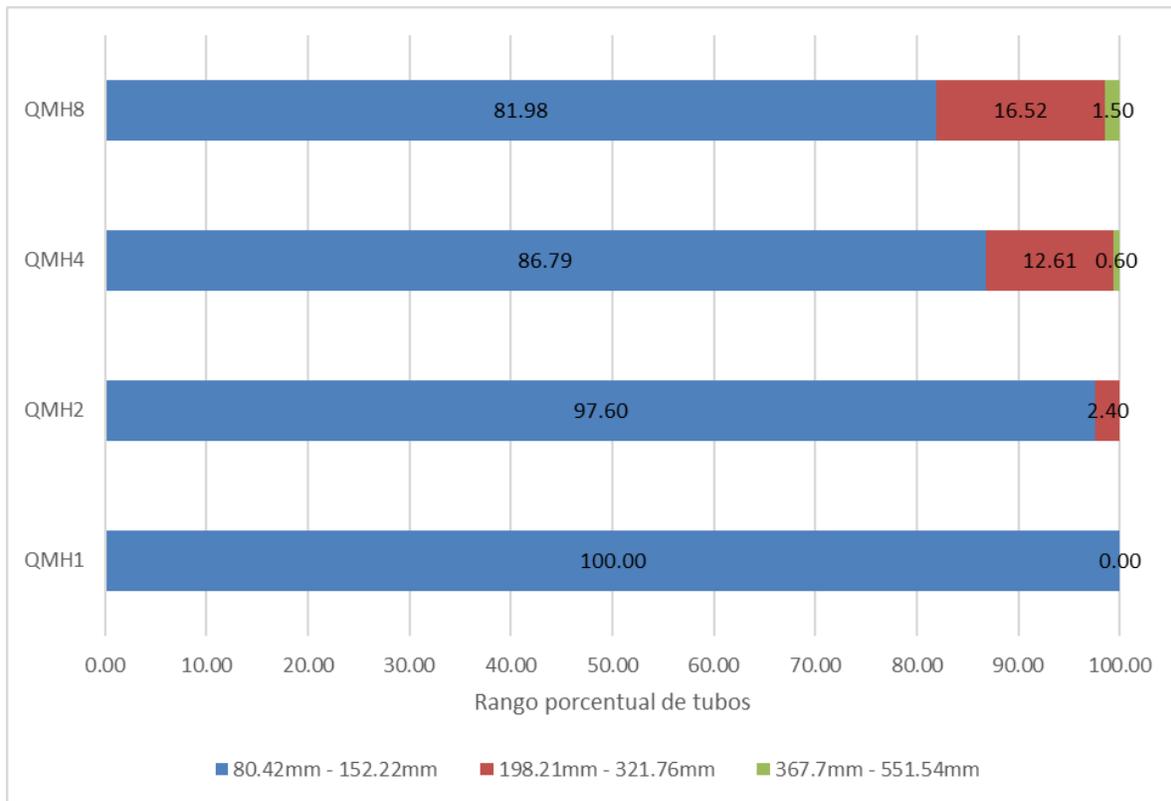


Figura 102. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Bolívar (Valle del Cauca)

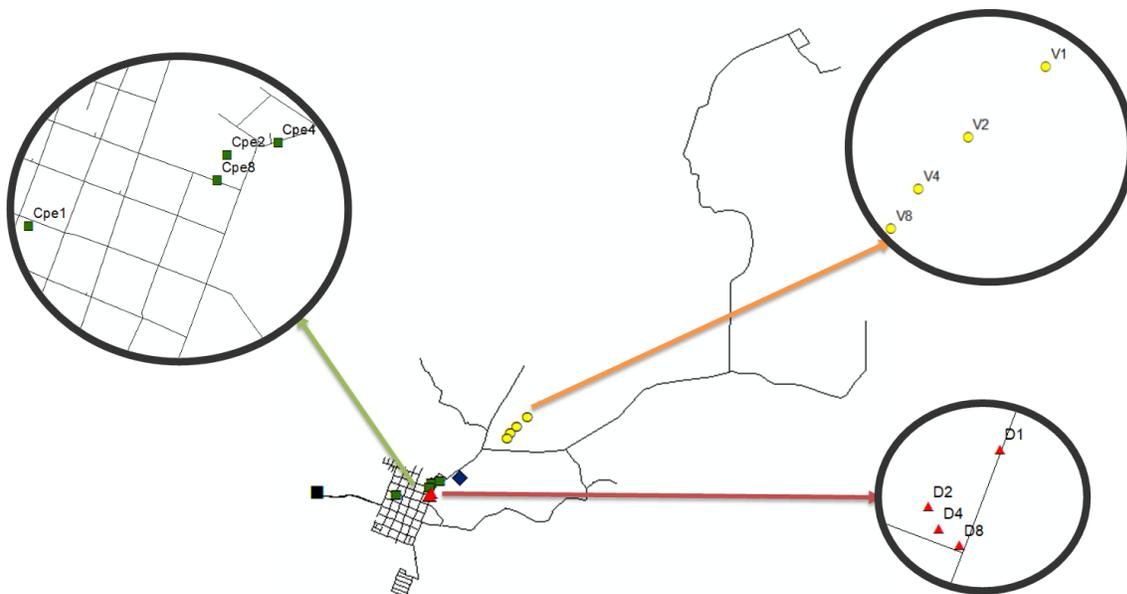


Figura 103. Localización de centroides geométricos de la Red Bolívar (Valle del Cauca). V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.

La Figura 103 representa la ubicación de los centroides geométricos según las coordenadas determinadas en el capítulo 4.2.6. La red Bolívar, se caracteriza por tener una red mallada luego del tanque y posteriormente tuberías bastante extensas, al igual que la red Toro. Estos municipios del Valle del Cauca son pueblos montañosos, y por tener mayormente zonas rurales es que existen puntos de abastecimiento de agua supremamente alejados de la zona urbana.

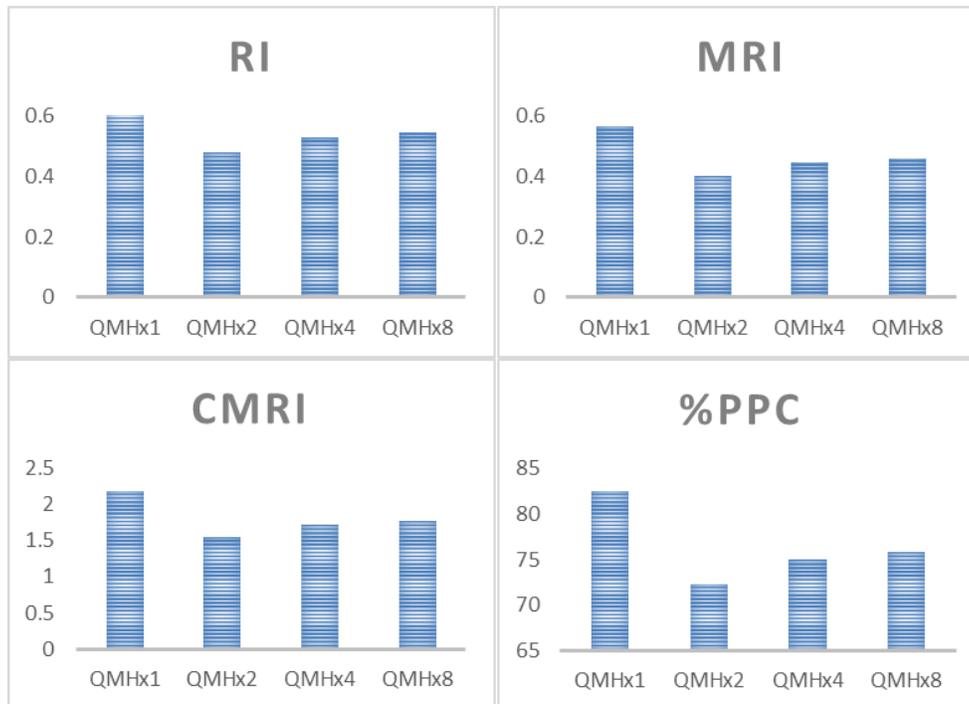


Figura 104. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Bolívar (Valle del Cauca). (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico

De acuerdo a los datos suministrados en los resultados del capítulo 4.3.6 se presenta la Figura 104. Esta red, presenta unos índices bastante favorables en comparación a las demás redes, ubicando todos los RI superiores a 0.5 y con aumento de los mismos a pesar de los incrementos de demanda.

En los cambios porcentuales de superficies de gradiente hidráulico hallados para la red Bolívar, la Figura 105 expresa que los extremos más alejados del tanque tienden a permanecer constantes, la tabla de valores presenta datos muy pequeños puesto que, a pesar de existir cambios en las elevaciones de la LGH, por tener una altura topográfica mínima de 910 m.

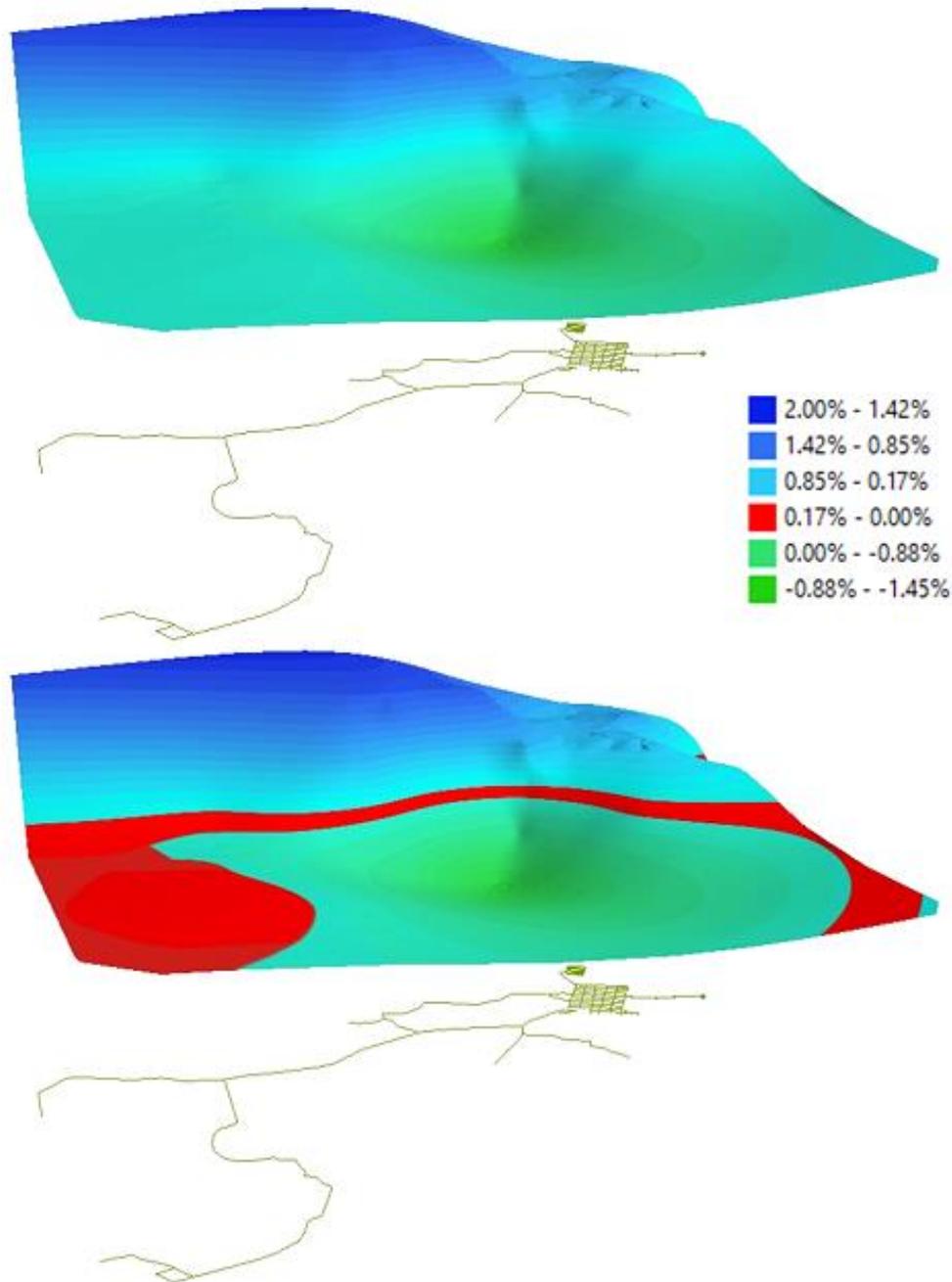


Figura 105. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Bolívar (Valle del Cauca)

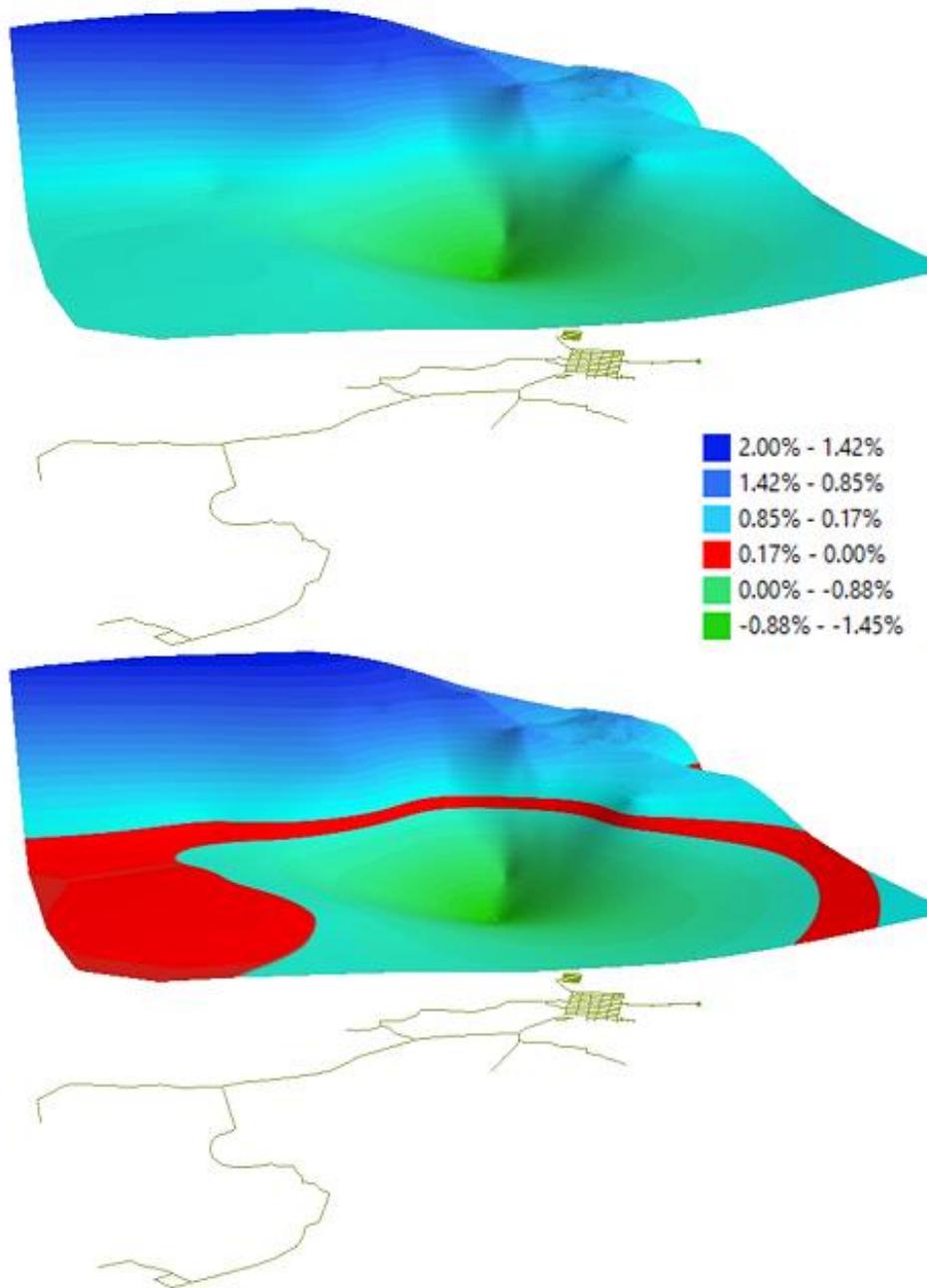


Figura 106. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Bolívar (Valle del Cauca)

La Figura 107 y Figura 108, de igual forma presentan las diferencias porcentuales de elevación. A pesar de que la comparación de las elevaciones de las LGH siempre se toma en función del escenario con QMHx1, los resultados que se obtuvieron fueron supremamente similares.

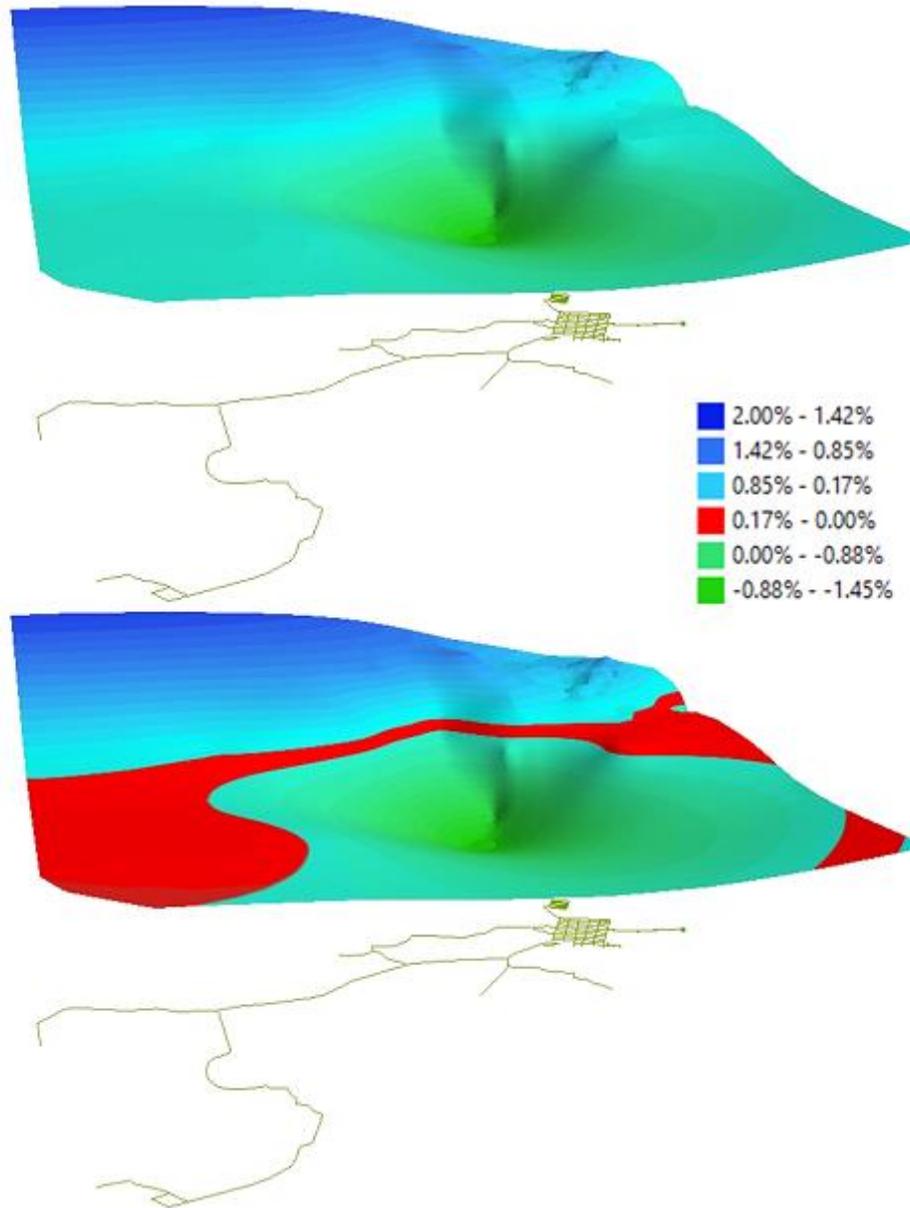


Figura 107. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Bolívar (Valle del Cauca)

De igual forma la Figura 108 demuestra la poca variabilidad que se da al comparar las diferencias de superficies de presión de la red Bolívar con base en el QMHx1. El rango de valores para los cambios presentados se encuentra desde -49.60% hasta 38.40%.

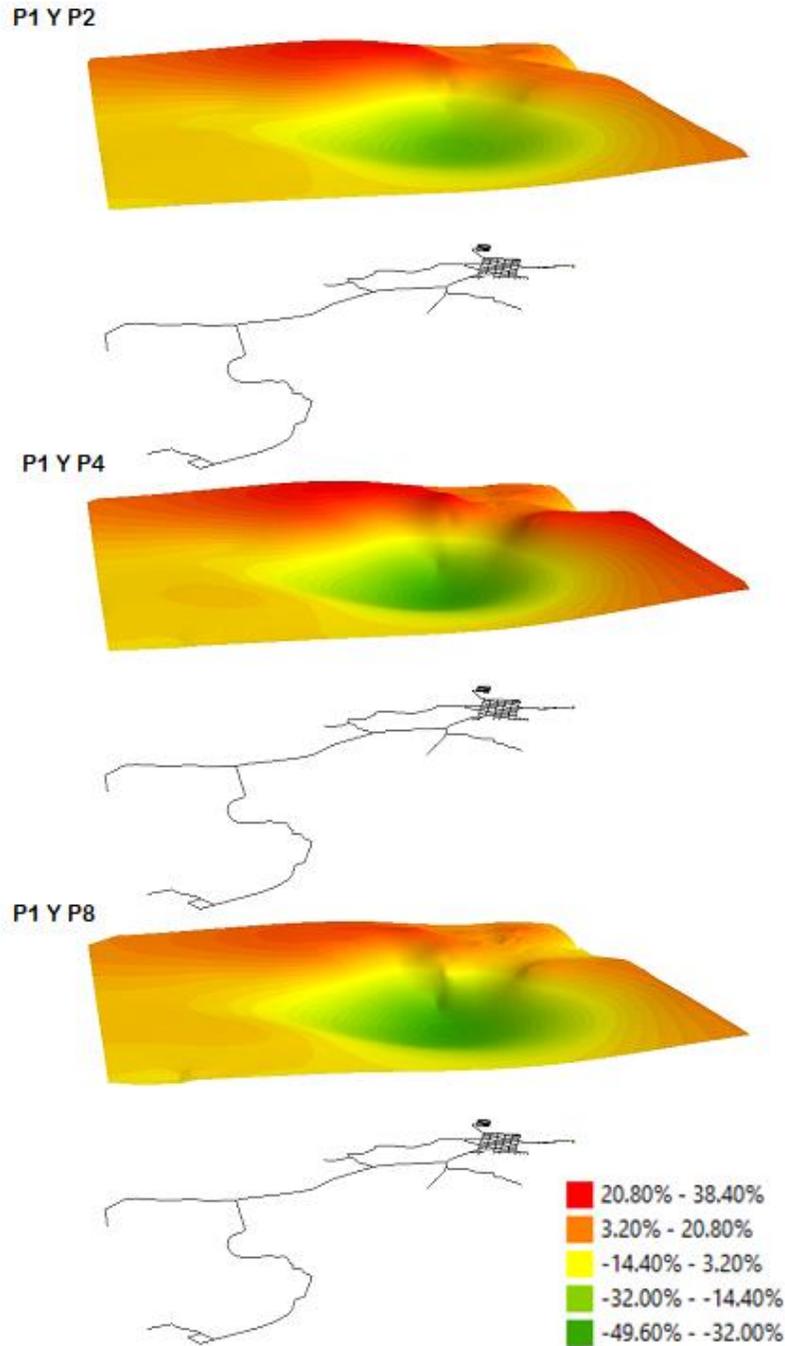


Figura 108. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Bolívar (Valle del Cauca)

La Figura 109 indica los mapas de cambio de porcentaje relativo para la potencia específica de la red, las diferencias se encuentran marcadas por la tubería que conduce del tanque a la red mallada y en las tuberías que nuevamente surgen a los extremos de la red.

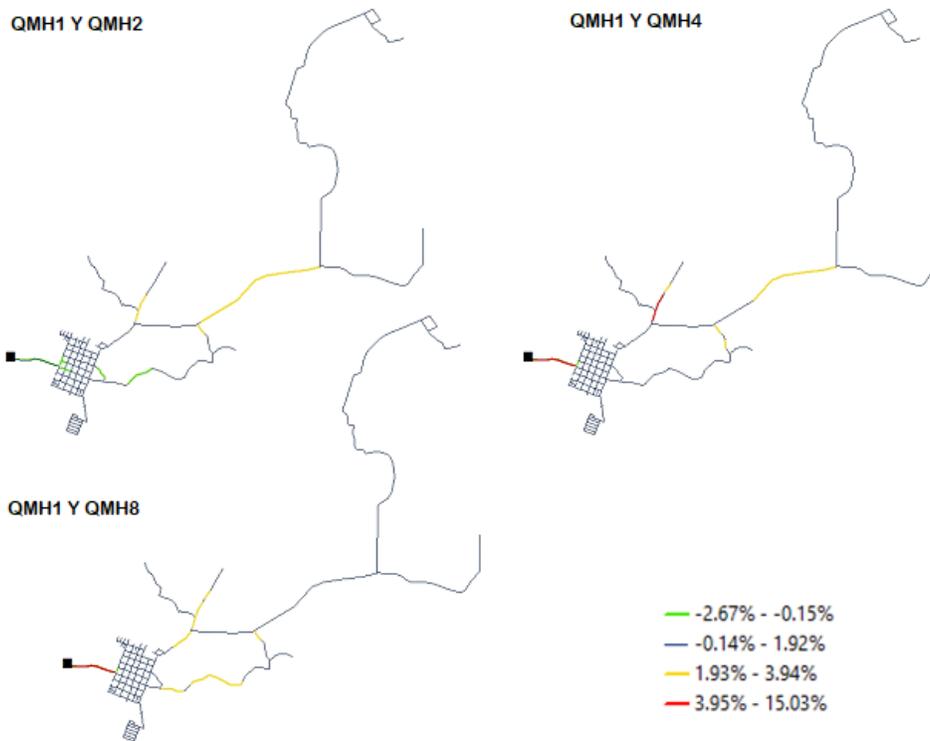


Figura 109. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Bolívar (Valle del Cauca)

Las menores pendientes generadas por las elevaciones de las LGH del sistema las tiene la red del municipio de Bolívar, con tan sólo un máximo del 3.31%, además, los valores superiores al 1.75% ocurren en la bifurcación que existe de la gran tubería que nace de la red mallada.

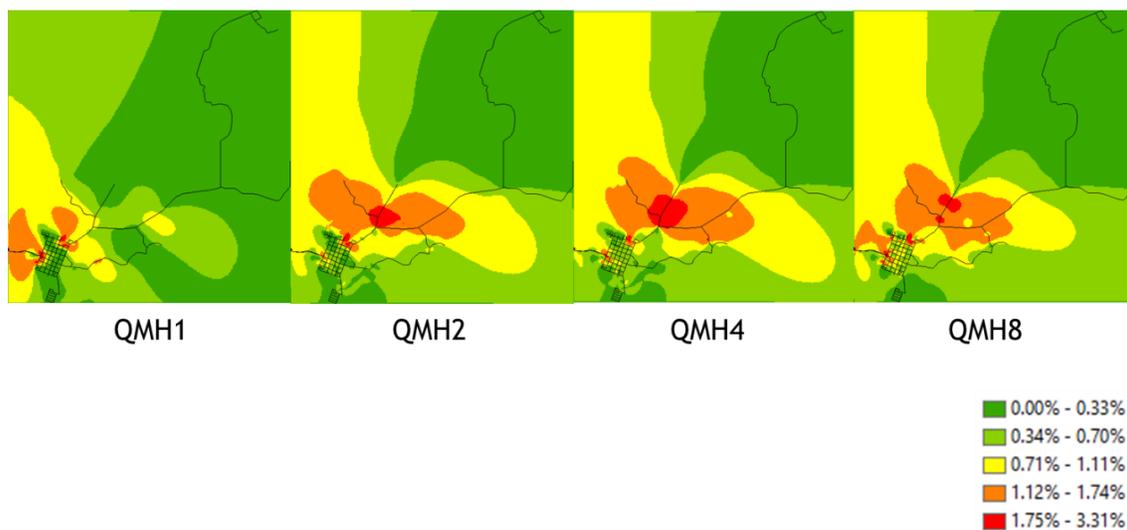


Figura 110. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Bolívar (Valle del Cauca)

5.7 Red Modena

Modena, es la red con mayor demanda, en su escenario QMHx8 cuenta con 3255.52 lps. Dado que es una red considerada patrón internacional, la tabla de diámetros discretos utilizada fue distinta a la de las demás redes, esto se menciona en el capítulo 3.4.1.

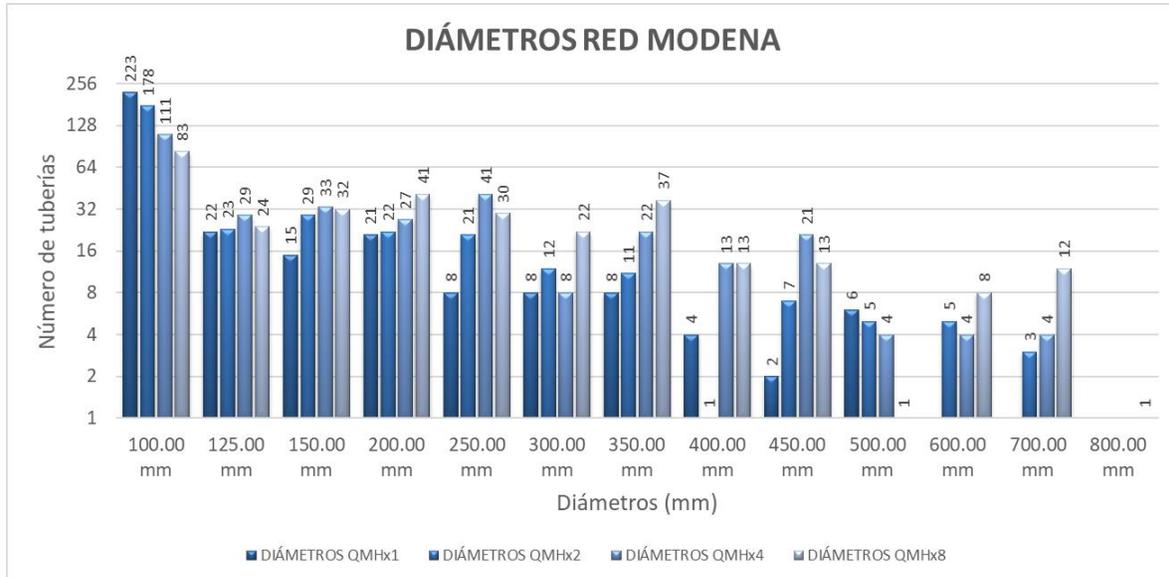


Figura 111. Diámetros de la Red Modena para (a) QMHx1 = 406.94 lps, (b) QMHx2 = 813.88 lps, (c) QMHx4 = 1627.76 lps y QMHx8 = 3255.52 lps.

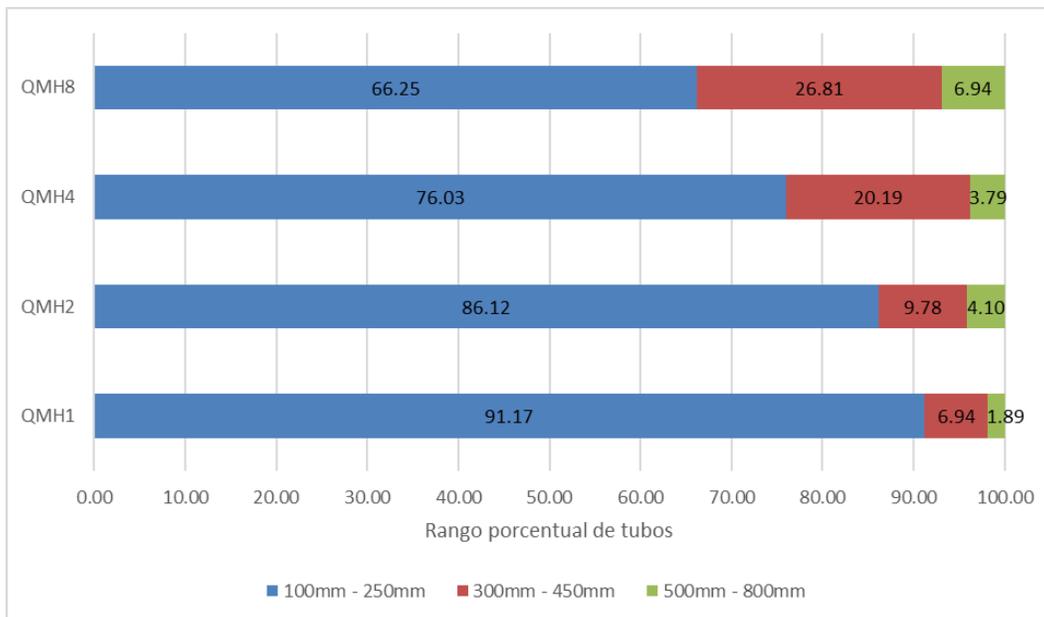


Figura 112. Comparación porcentual de diámetros en los tubos de la Red Modena

El escenario QMHx8 es el único que presentó un tubo con diámetro mayor disponible de 800 mm. Para el rango de diámetros entre 100 mm y 250 mm hay un porcentaje inicial de 91.17%, el cual disminuye hasta un 66.25% como se presenta en la Figura 112.

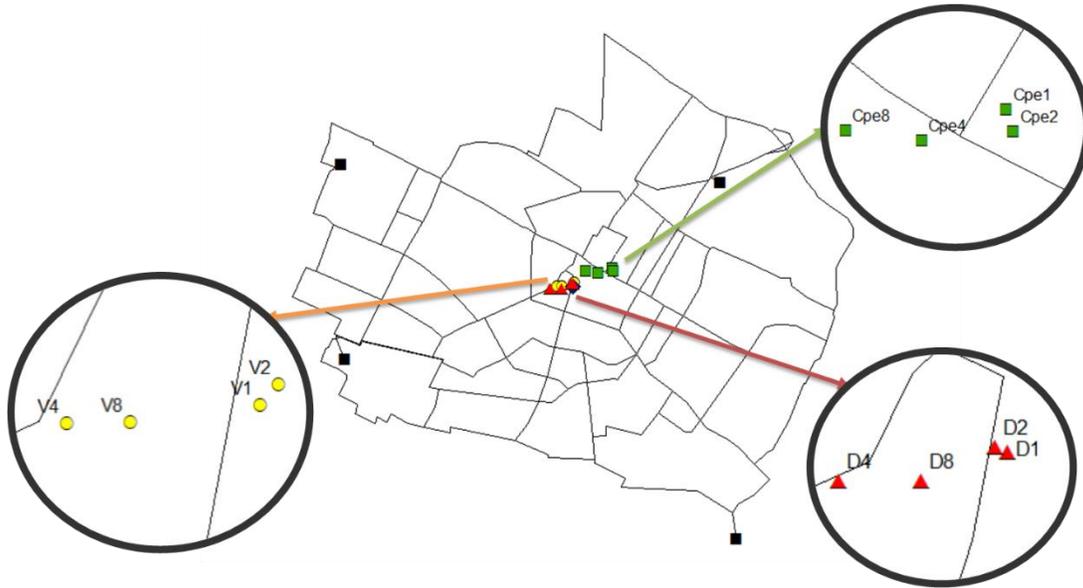


Figura 113. Localización de centroides geométricos de la Red Modena. V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.

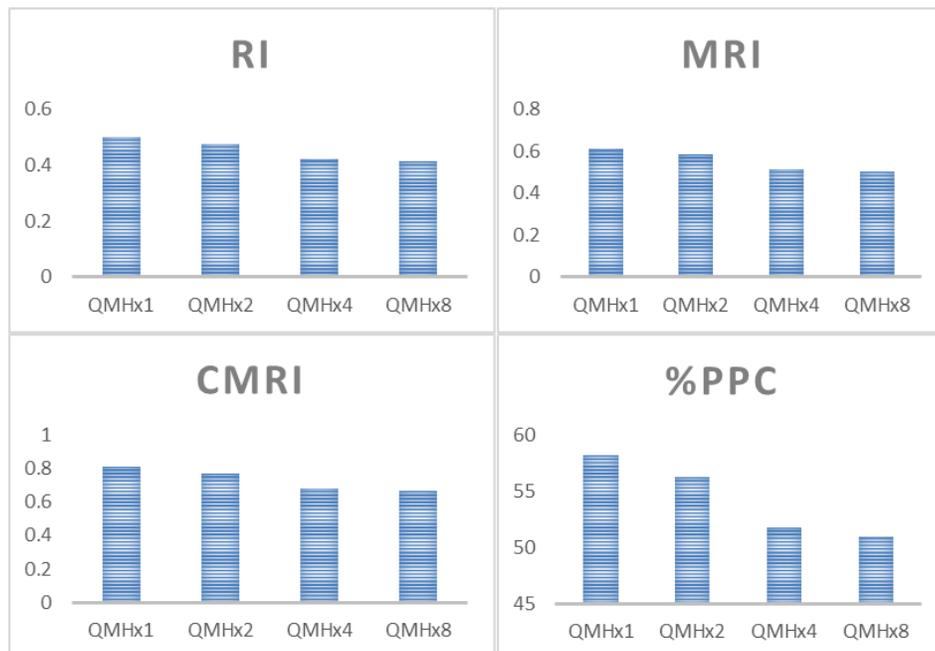


Figura 114. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Modena. (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico

La Figura 113 presenta la localización de los índices geométricos, para el caso de los centroides de diámetro, presentan las mayores distancias en comparación a las demás redes, teniendo una máxima distancia de 250 m. Los centroides de potencia específica se ubican en el centro de la red y no cercanos a algún tanque, puesto que el sistema cuenta con cuatro tanques situados al alrededor de la malla.

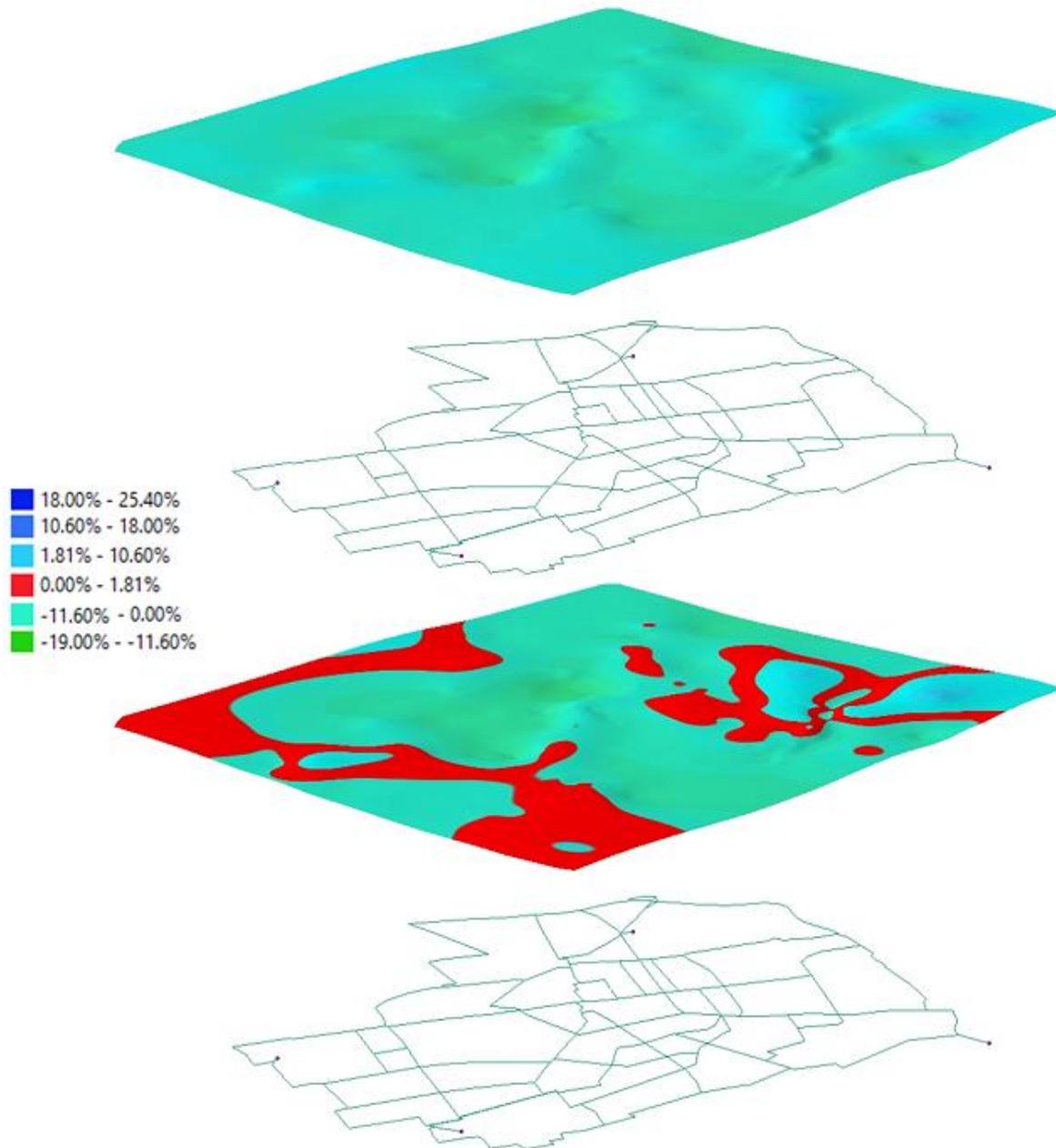


Figura 115. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Modena

Las diferencias porcentuales en la elevación de las LGH se ilustran en la Figura 115, Figura 116 y Figura 117. El rango de cambio se basa en un -19% y 25.40%. el tanque de la zona derecha de la red es el que presenta las mayores diferencias, pues quiere decir que la LGH2, LGH4 y LGH8 son directamente proporcionales al aumento de la demanda, mientras que en la zona central de la red las LGH disminuyen en la medida que se incrementa el caudal.

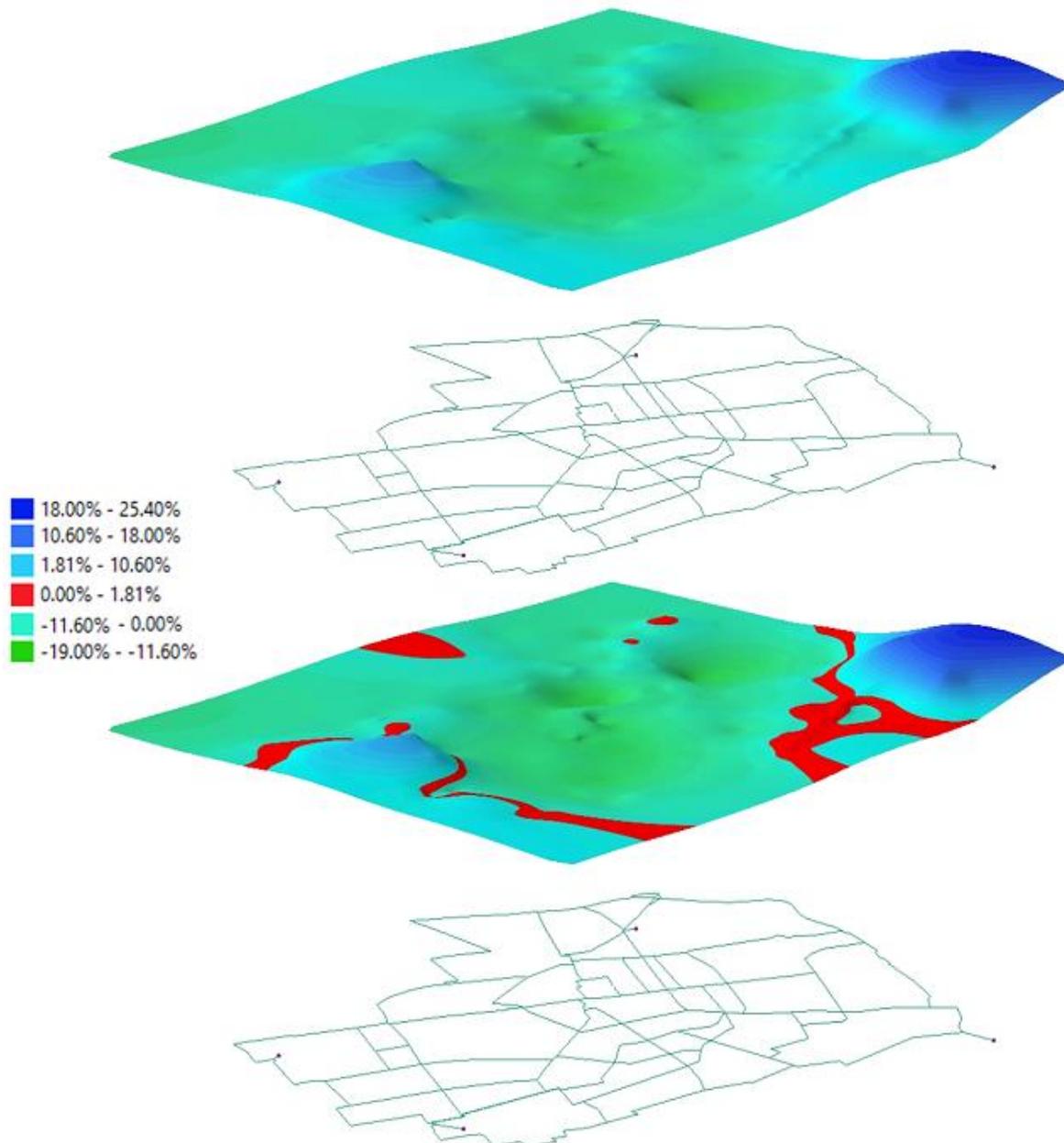


Figura 116. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Modena

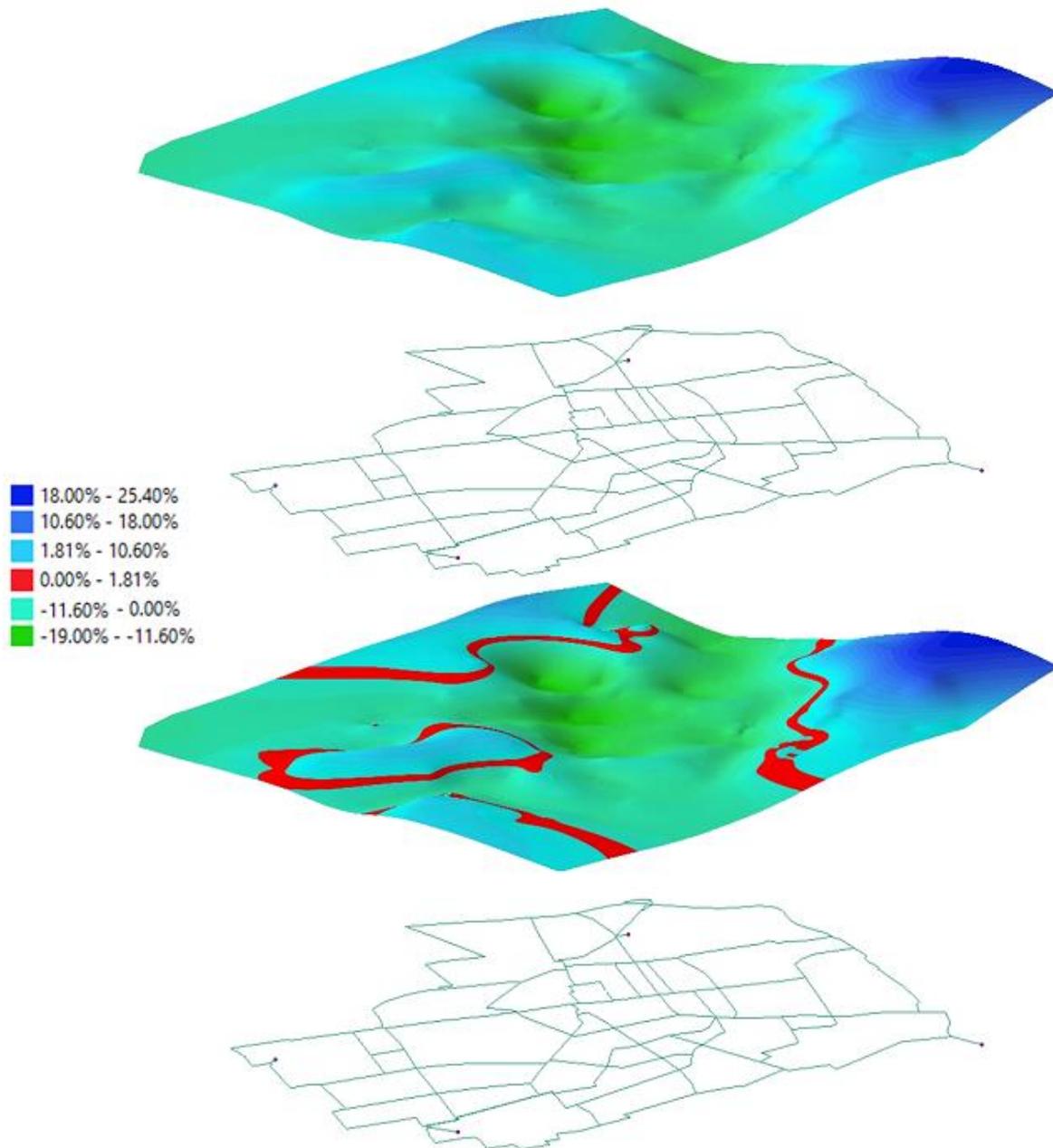


Figura 117. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Modena

Para las superficies de presión de la red Modena indicadas en la Figura 118, se presentaron cambios desde el -39% hasta el 64.50%. La diferencia entre el escenario QMHx1 y QHx2 no sobrepasa el 23.10%, mientras que en los dos siguientes escenarios se presentan los picos más altos, tanto resultados positivos como negativos.

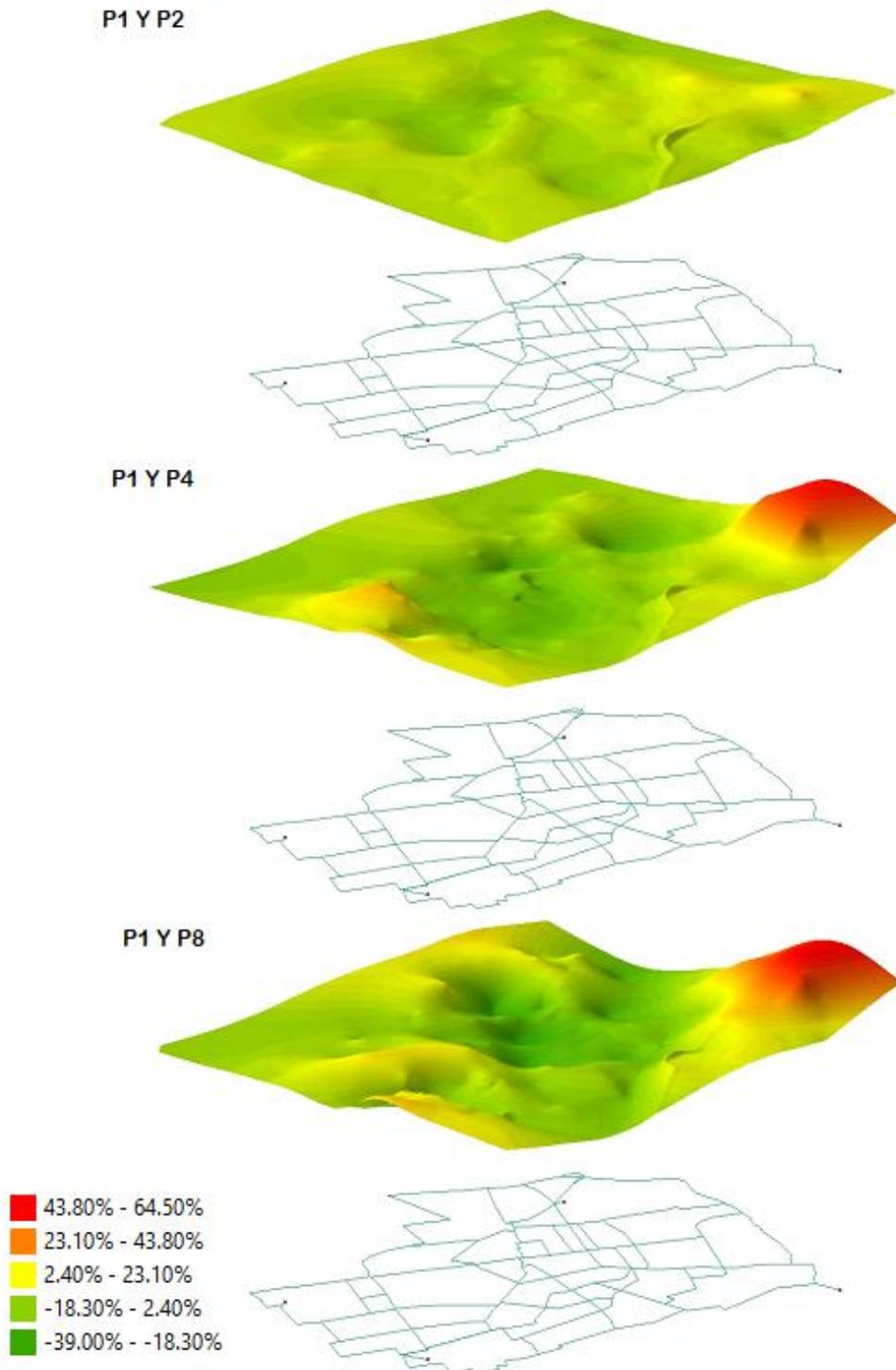


Figura 118. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Modena

En la Figura 119 se indican los cambios presentados en la potencia específica de la red, la cual representa la forma en que la energía se distribuye. Los cambios significativos se dan en los tubos cercanos a los tanques. Estos tres mapas conservan gran similitud, resaltando que, a pesar del importante incremento de demanda, se tienden a asumir los mismos patrones de distribución.

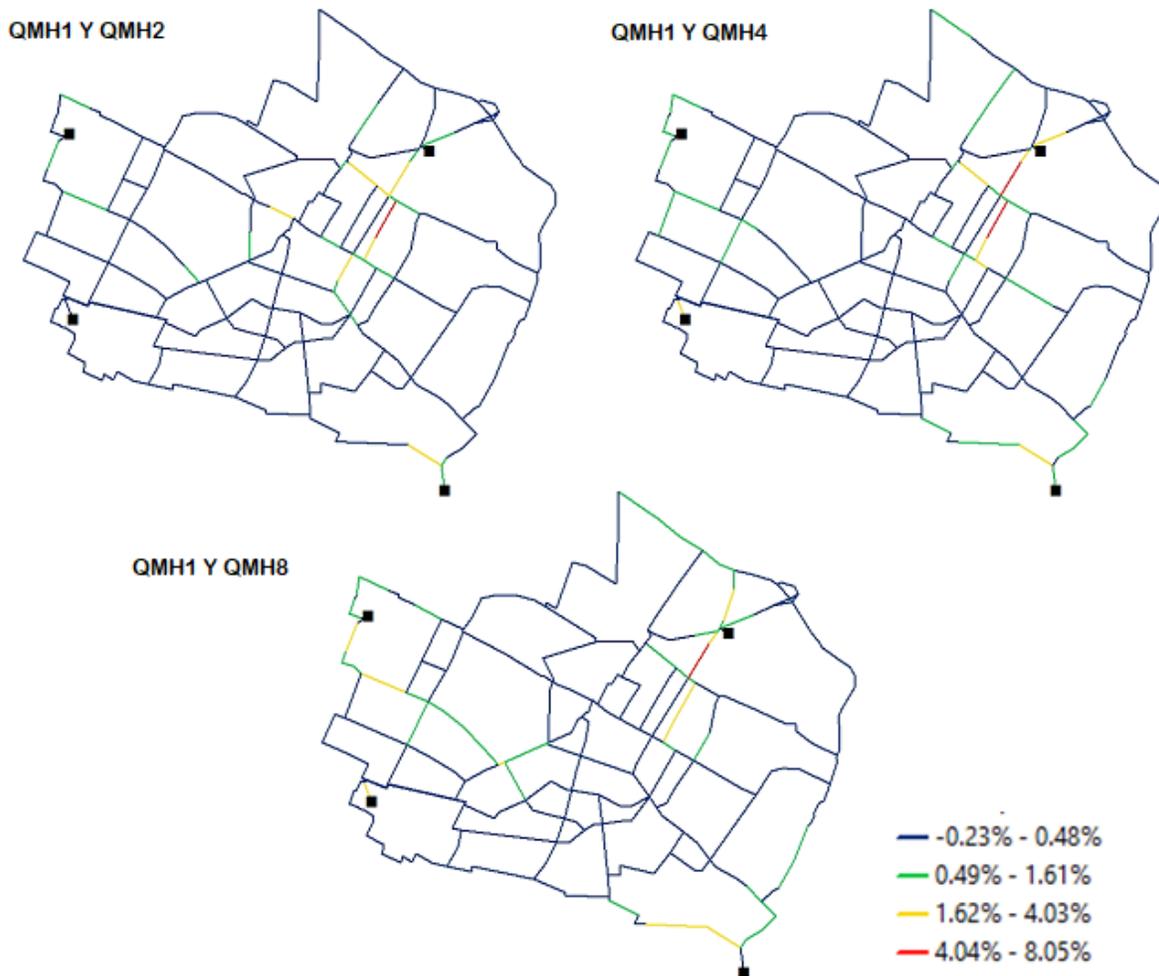


Figura 119. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Modena

La red Modena, presenta los valores de las pendientes de las LGH casi tan bajos como los de la red Bolívar que se describen en la página 115. Las pendientes más empinadas se sitúan cercanas al tanque superior derecho, el cual tiene una altura de 72, siendo el tanque más bajo de la red.

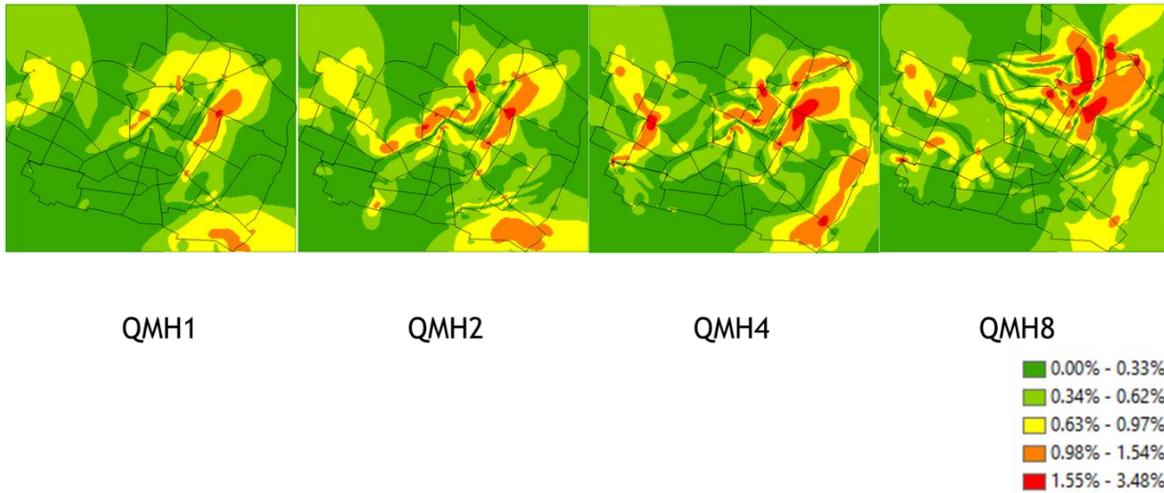


Figura 120. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Modena

5.8 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos

Finalmente, se presenta el análisis de los datos obtenidos para la red Sector 13 M453 B optimizada con diámetros continuos. Inicialmente, en la Figura 121 se tienen los índices geométricos, estos presentan una cercanía mucho mayor entre sí, que la que se obtuvo en la optimización con diámetros discretos. El valor máximo de separación es de 57 m. Los centroides de potencia específica se encuentran cercanos al tanque y los demás indicadores en la parte central de la red.

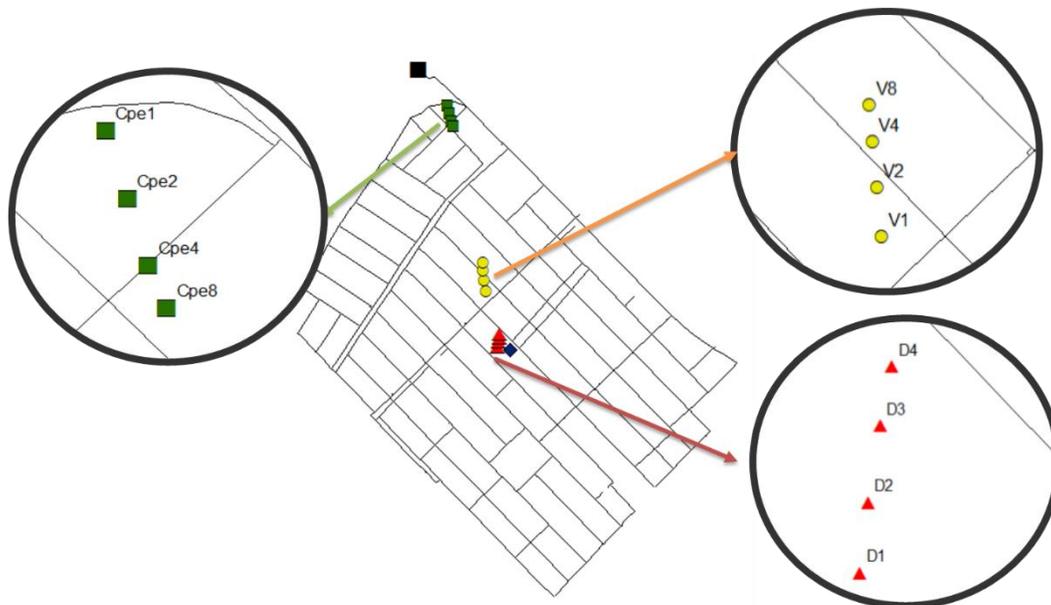


Figura 121. Localización de centroides geométricos de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos. V: centroide de volumen, Cpe: centroide de potencia específica, D: centroide de diámetro.

A pesar que los índices de confiabilidad y eficiencia energética disminuyen con respecto al incremento de la demanda, se obtuvieron resultados mejores a los determinados en la red diseñada con diámetros discretos. En la Figura 122 se presentan los valores de resiliencia de la red, demostrando que los cambios no superan el 26%.

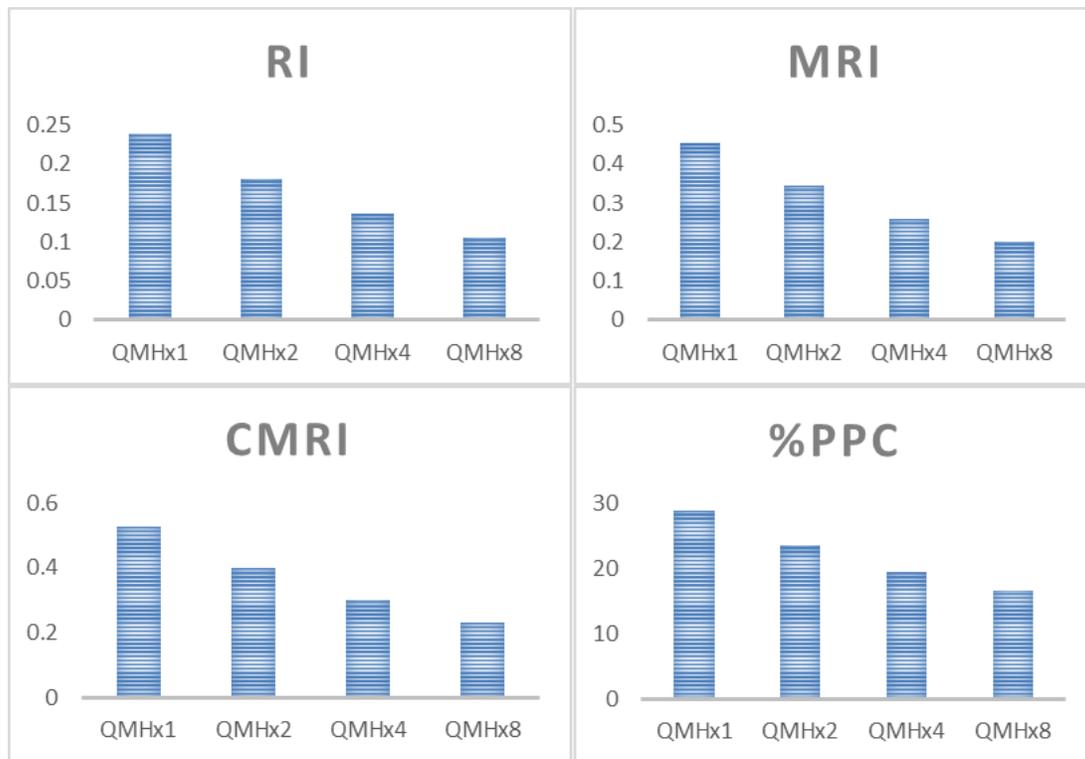


Figura 122. Índices de confiabilidad y eficiencia energética Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos. (a) IR: índice de resiliencia, (b) MRI: índice de resiliencia modificado, (c) CMRI: índice de resiliencia centralizado y (d) PPC: índice de potencia específico

De igual manera, el rango de los cambios porcentuales obtenidos en las superficies de gradiente hidráulico para diámetros continuos tiene un menor intervalo que el de la red con diámetros discretos, pues la actual oscila en -0.28% y 0.03%, recordando que la altura topográfica de los nudos sobrepasa los 2550 m.

En la Figura 123, Figura 124 y Figura 125 se puede identificar que en la zona más cercana al tanque los cambios son mínimos con respecto a un margen de 0% a 0.01%.

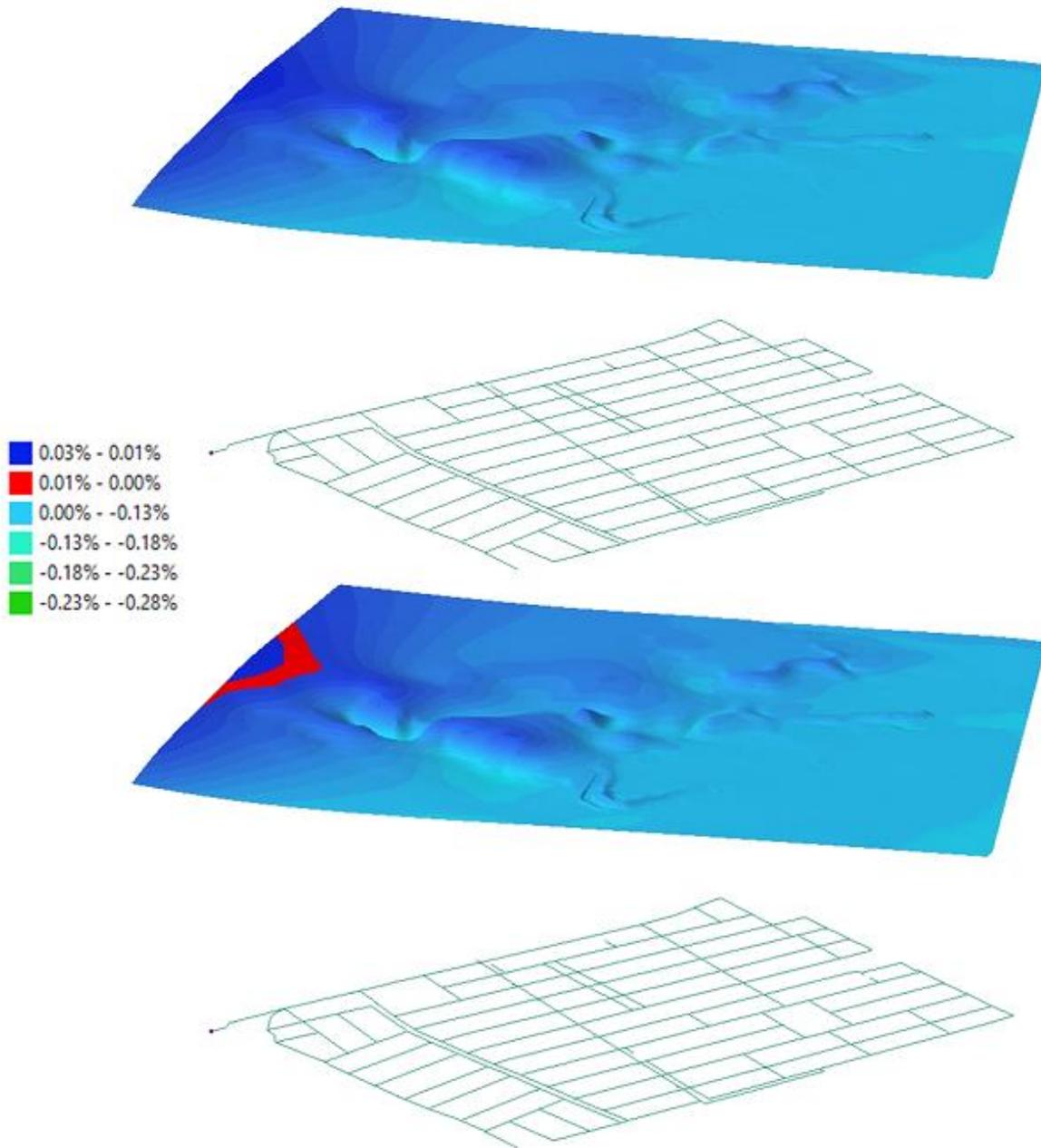


Figura 123. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH2 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos

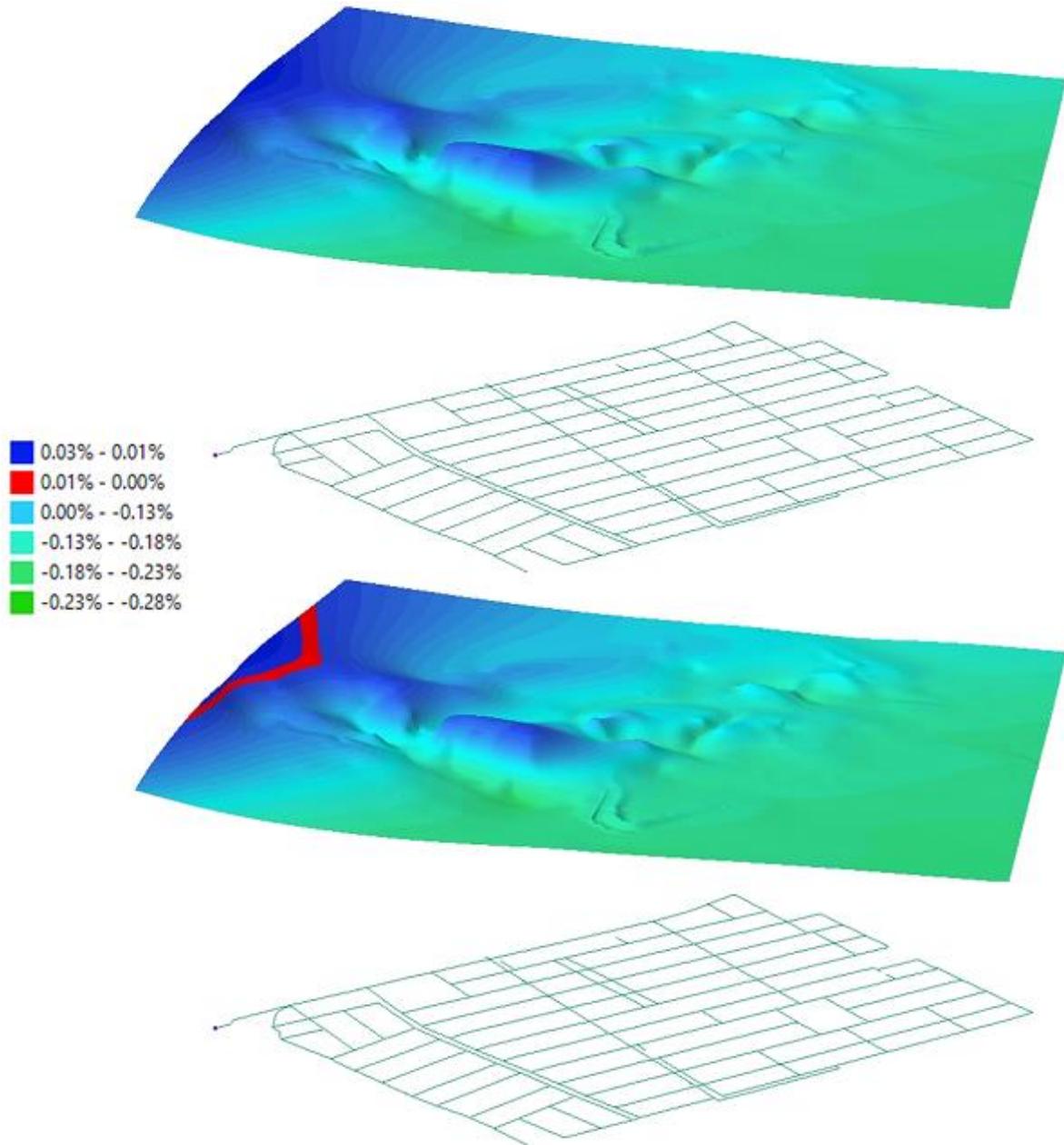


Figura 124. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH4 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos

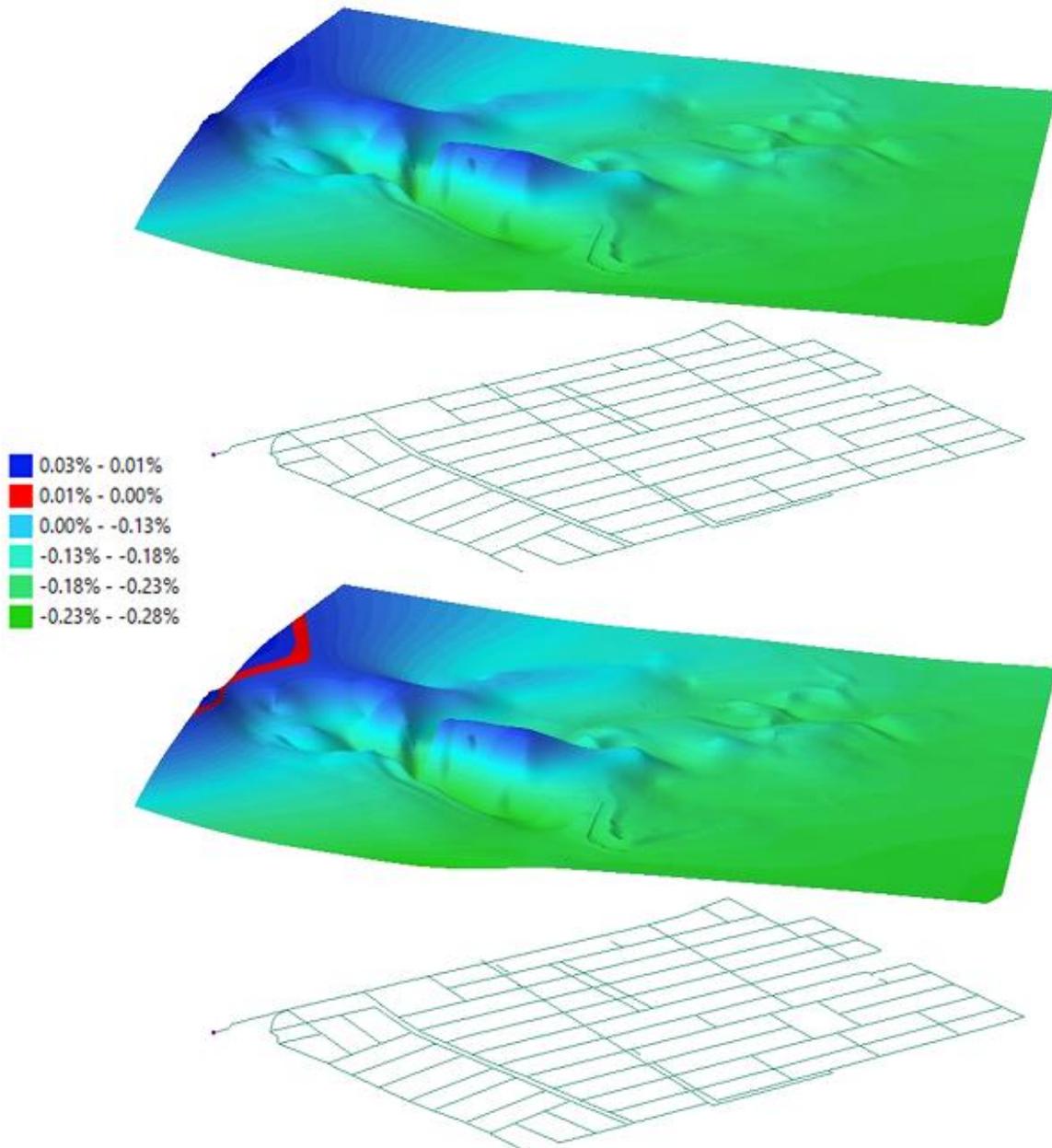


Figura 125. Diferencia porcentual de elevación en la LGH1 y LGH8 Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos

En el comparativo del escenario uno y escenario dos de la red de la Figura 126, se estima que la presión tiende a generar cambios superiores al -12.72%. Para las gráficas restantes, ocurren diferencias de hasta el -32.40%. El comportamiento de la presión en la red con diámetros continuos fue mucho más constante que la de diámetros discretos, pues esa alcanzó hasta el 47.21% de cambio, un 44.21% demás.

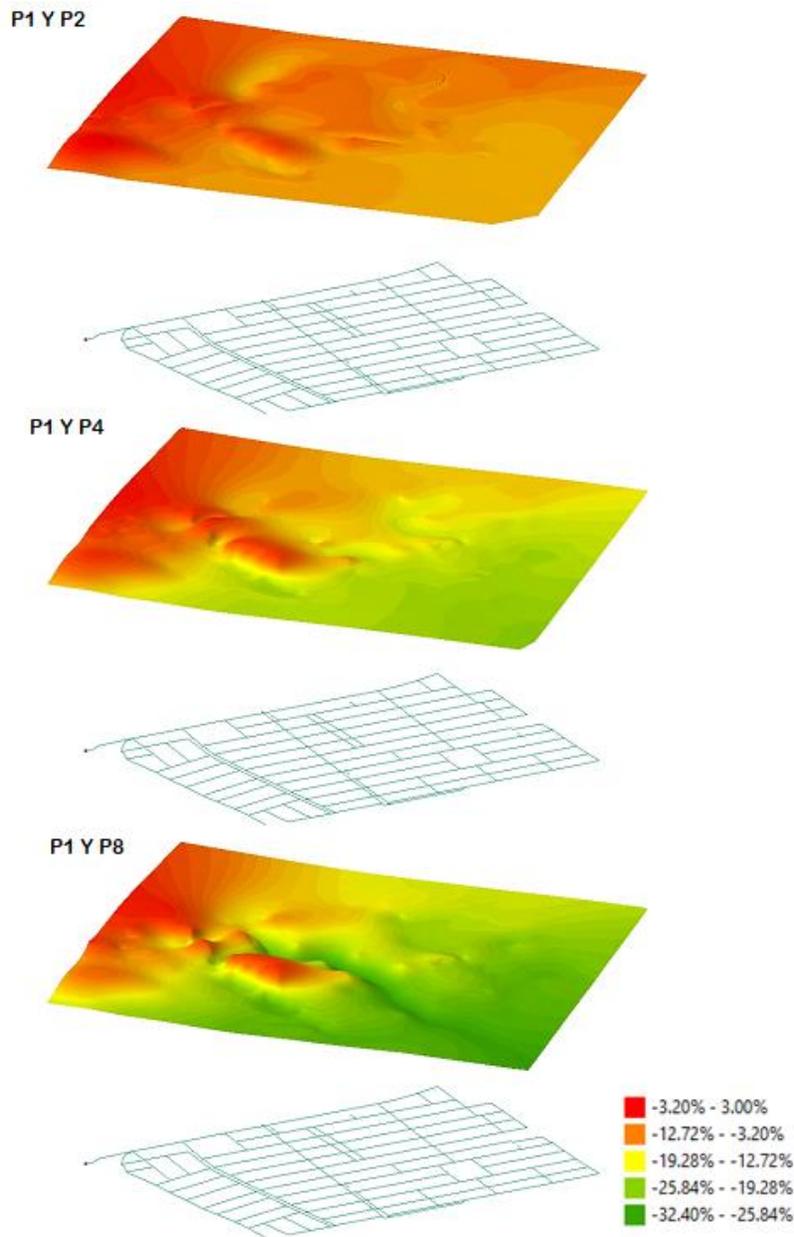


Figura 126. Diferencia porcentual de elevación en la Presión de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos

En la Figura 127, se enseñan los cambios porcentuales que se produjeron para la red teniendo en cuenta diámetros continuos. En comparación a los diámetros discretos, este escenario presenta un menor número de tramos en los que hay una diferencia superior al 0.81%. De igual manera, la pendiente máxima de las LGH se redujo a casi la mitad, con un máximo del 20.18%.

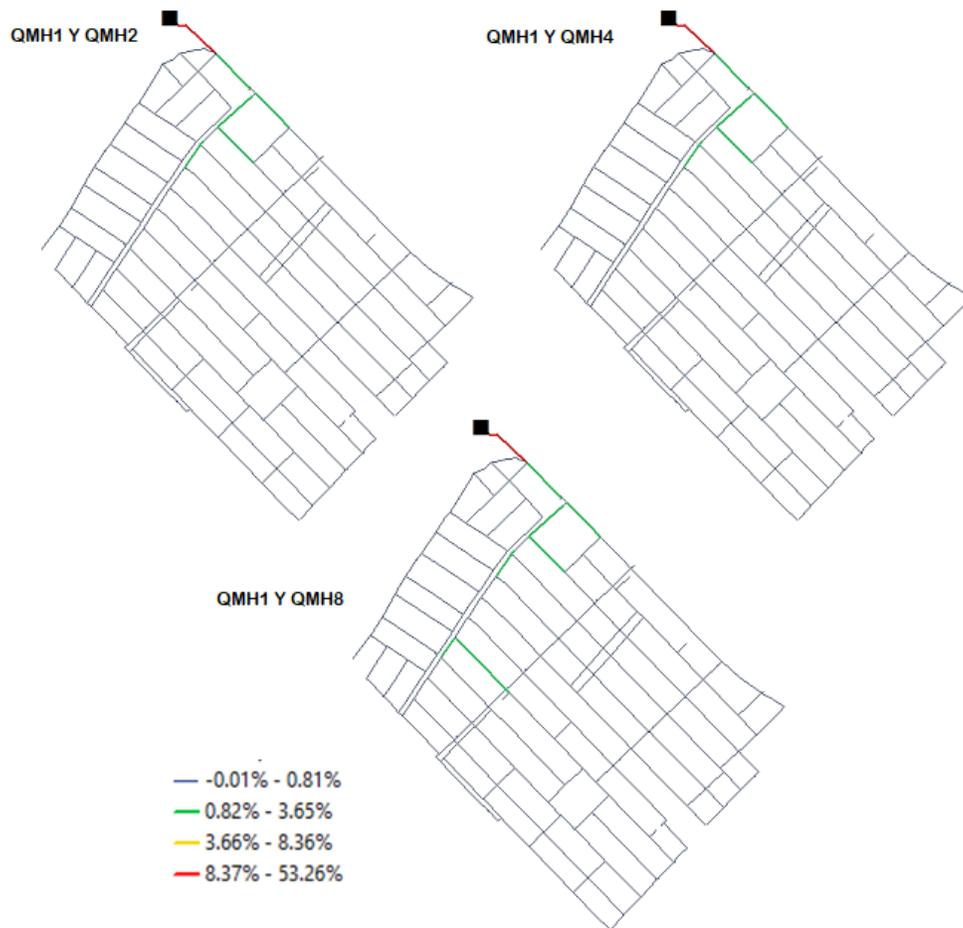


Figura 127. Cambio porcentual relativo de potencia específica para la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos

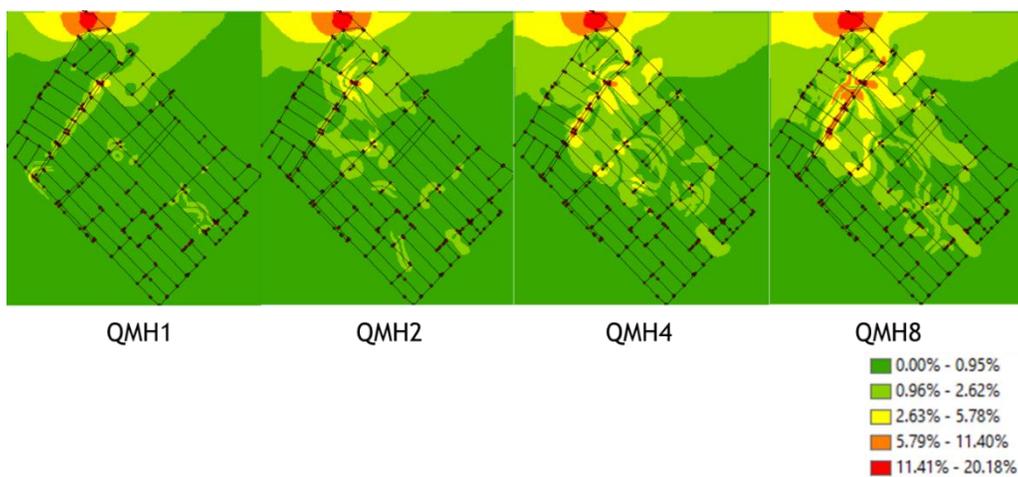


Figura 128. Diferencia de pendientes de las LGH de la Red Sector 13 M453 B (Bogotá) – Diámetros continuos

6 CONCLUSIONES

Se realizó la comprobación de diseño de cada una de las redes elegidas, con el fin de verificar y garantizar las restricciones que fueron establecidas con respecto a los diámetros continuos o discretos, las presiones mínimas y los caudales de cada tramo que hace parte del sistema de distribución de agua potable.

La optimización de las redes de distribución de agua potable se efectuó por medio de la ejecución del programa REDES® y su metodología OPUS, la cual demostró ser idónea para el cumplimiento de las restricciones establecidas; se obtuvieron los resultados de cada red con un tiempo de cálculo bastante rápido, garantizando la red de mínimo costo y el correcto funcionamiento del sistema.

Se determinaron los índices geométricos de las redes de agua potable según cada escenario regido por el aumento de demanda, esto para QMHx1, QMHx2, QMHx4 y QMHx8; donde se obtuvieron las coordenadas X y Y de las redes, estableciendo que los cambios topológicos en las redes ocasionaron los mayores cambios en los centroides de potencia específica. A pesar de esto, se consideraron como independientes a los cambios de densidad poblacional.

En cuanto a la capacidad de respuesta de las redes frente a una eventualidad, Bolívar presentó los mayores índices de resiliencia, estableciéndola como la red más confiable; además, al aumentar la demanda, estos indicadores se elevaron, contrario a otras redes en las que disminuía notablemente. Esta red y la del municipio de Toro se caracterizan por tener una topología similar, por lo que la segunda también tuvo índices propicios. Para el caso de la red del Sector 13 M453 B, se obtuvieron unos índices más favorables en los escenarios optimizados con diámetros continuos. Las redes con una conducción larga entre el tanque y la red mallada presentaron los índices de confiabilidad y eficiencia energética más bajos, como la red Troncal del Caribe y Morro Bajo.

La mayor cantidad de tramos de tuberías en las redes analizadas obtuvieron el diámetro comercial mínimo disponible de 80.42 mm, ya que no se tuvieron caudales demandados demasiado grandes para transportar (a excepción de Modena que trabajó con una tabla de diámetros discretos distintos); además, se encontraron nudos con demanda de 0 en la mayoría de las redes, por lo que estas demandas permanecieron constantes.

Se hallaron las diferencias de elevaciones de las superficies de gradiente hidráulico y de presión, entre QMHx1 y QMHx2, QMHx1 y QMHx4, QMHx1 y QMHx8; se visualizaron en tres dimensiones dando como resultado cambios de elevación mayores a medida que la diferencia de caudal máximo horario aumentaba.

Independientemente de la demanda, los indicadores referidos a la potencia específica de la red tienden a permanecer constantes. La forma en cómo se gasta la energía en la red es algo

preconcebido, ya que propende a ser muy uniforme. No hay efecto en cómo se distribuye la energía en el sistema, teniendo en cuenta su comportamiento dinámico en términos de la ecuación de la conservación de la energía.

La forma en que se consume la energía en la red diseñada con diámetros continuos es casi constante a pesar del incremento de demanda; si se tienen diámetros discretos hay una mayor variabilidad en los tramos que concentran un porcentaje de potencia específica superior al 0.38%, siendo estos aproximadamente el 5% de los tubos de la red.

7 RECOMENDACIONES

Obtener redes de distribución de agua potable más actualizadas, con el fin de aplicar la metodología desarrollada a lo largo de la investigación.

Profundizar en la utilización de la ecuación de costos, evaluando otros coeficientes y exponentes para el uso de la misma.

Diseñar las redes óptimamente, utilizando otros parámetros de presión mínima y distintas tablas de diámetros discretos.

Analizar las redes con un comportamiento dinámico, haciendo las simulaciones en distintas horas a lo largo del día.

Aplicar otras metodologías de diseño de REDES. Por ejemplo. algoritmos genéticos.

Intentar detectar redes que tengan problemas operativos causados por superficies de gradiente hidráulico que no sean las apropiadas o presenten alteraciones.

8 REFERENCIAS

- Bartolín, H. (2013). *Confección de modelos de redes de distribución de agua desde un SIG y desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones* (Universidad Politécnica de Valencia). <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/33152>
- Berardi, L., Laucelli, D., & Giustolisi, O. (2010). A tool for preliminary WDN topological analysis. *Water Distribution System Analysis*, 241–262. [https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uniandes.edu.co:8443/10.1061/41203\(425\)23](https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uniandes.edu.co:8443/10.1061/41203(425)23)
- Hernández, F., Saldarriaga, J., Takahashi, S., & Escovar, M. (2010). Diseño Optimizado de Sistemas de Distribución de Agua: Una Nueva Perspectiva. *Revista de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 226(October 2017), 29–39.
- Jayaram, N., & Srinivasan, K. (2008). Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing. *Water Resources Research*, 44(1), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2006WR005316>
- Moreno, C., Rojas, D., & Saldarriaga, J. (2018). Relation between population density and topology in potable water distribution networks methodology optimal design of RDAP. *WDSA / CCWI 2018 Joint Conference Proceedings*, 1., 1–16. Retrieved from <https://ojs.library.queensu.ca/index.php/wdsa-ccw/article/view/12351>
- Paez, D., & Filion, Y. (2017). Generation and Validation of Synthetic WDS Case Studies Using Graph Theory and Reliability Indexes. *Procedia Engineering*, 186, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.220>
- Saldarriaga, J., Páez, D., Cuero, P., & León, N. (2012). Optimal power use surface for design of water distribution systems. *14th Water Distribution Systems Analysis Conference 2012, WDSA 2012*, 1(August 2017), 468–480.
- Saldarriaga, Juan. (2016). *Hidráulica de tuberías* (Tercera ed). Bogotá: Alfaomega Colombiana.
- Saldarriaga, Juan, Hernández, F., Escovar, M., & Páez, D. (2012). Superficie de uso óptimo de potencia para el diseño de redes de distribución de agua potable. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 10.
- Saldarriaga, Juan, Lopez, L., Paez, D., Luna, D., & Gonzalez Hernandez, S. (2018). Optimized Design of Water Distribution Networks (Software REDES). *SSRN Electronic Journal*, 1–9. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3112868>
- Saldarriaga, Juan, Ochoa, S., Moreno, M., Romero, N., & Óscar, C. (2010). *Renovación Priorizada de Redes de Distribución Utilizando el Concepto de Potencia Unitaria*. 31, 7–15. <https://doi.org/10.1080/15730620903447621>
- Savić, D. A., Mala-Jetmarova, H., & Sultanova, N. (2018). History of Optimization in Water

Distribution System Analysis. *WDSA / CCWI Joint Conference Proceedings*. Retrieved from <https://ojs.library.queensu.ca/index.php/wdsa-ccw/article/view/11973>

Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water Journal*, 2(2), 115–122. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00049-2)

Villalba, G., & Saldarriaga, J. (2005). Algoritmos de Optimización Combinatoria (AOC) aplicados al diseño de redes de distribución de agua potable. *Revista de Ingeniería*, unknown(22), 118–125. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i22.393>