

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Elaboración de un plan integral de actualización para el sistema de
abastecimiento de agua potable de la comunidad de Pacayas, Cartago**

Tesis Final de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Kevin Soto Víquez

Director del Proyecto de Graduación:

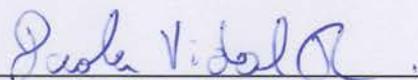
Ing. Antonio Sánchez Fernández

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

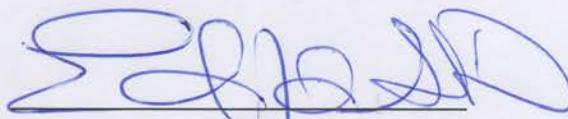
Hoja de aprobación



Ing. Antonio Sánchez Fernández, Lic.
Director



Ing. Paola Vidal Rivera, Lic.
Asesora



Ing. Edwin Solórzano Campos, M. Sc.
Asesor



Kevin Soto Víquez
Estudiante

Fecha: 2020, junio

El suscrito, Kevin Soto Víquez, cédula 2-0749-0680, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B46934**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Elaboración de un plan integral de actualización para el sistema de abastecimiento de agua potable de la comunidad de Pacayas, Cartago**, bajo la Dirección del **Ing. Antonio Sánchez Fernández**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); **“no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”**. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

A mi abuelo,

Otilio Viquez Quesada.

Agradecimientos

A Dios, en primera instancia, porque siempre ha representado mi fortaleza, mi auxilio y fuente de inspiración durante mis etapas educativas, principalmente la universitaria.

A mis padres, Jenny Víquez y Rodrigo Soto, porque desde pequeño me criaron con valores como el respeto, la humildad y la perseverancia. Ellos forjaron mi personalidad y me incitaron siempre a buscar mis metas tanto en el desarrollo personal, como profesional. Porque con su esfuerzo, amor y dedicación lograron entregarme la gran herencia de la educación.

A mis hermanos, Tony, Jere y Mari, que siempre se preocuparon porque en la casa no faltaran las risas, los momentos de ocio en familia, los juegos y los abrazos, así como su apoyo y comprensión en los momentos difíciles.

A mis abuelos, Amancia y Otilio, que siempre se preocuparon por mi avance en la carrera, porque con sus preguntas y dudas, me hacían ver que mis conocimientos de ingeniería no tenían comparación con su inmensa experiencia empírica y su sabiduría.

A mis padrinos, Lilliana y Sergio, que me apoyaron siempre como unos segundos padres.

A mis compañeros de la Universidad, que compartieron conmigo miles de alegrías y frustraciones. En especial a Mariela, por convertirse en mi apoyo más cercano, mi ánimo para seguir adelante, mi compañera de estudio y mi ayudante.

A Natali Quesada, por ser la precursora de este proyecto. Porque sin su ayuda no hubiese adquirido muchos conocimientos importantes, ni habría conocido el bello pueblo de Pacayas.

Al personal de la Municipalidad de Alvarado, especialmente a Kidier, Alex, Brenes y Erick, que me acompañaron en las arduas labores de campo y me instruyeron en el conocimiento del sistema.

A mi director y asesores, que siempre estuvieron presentes para ayudarme y colaborar con la realización de este proyecto. Sin su experiencia, basto conocimiento y su apoyo, este proyecto no sería una realidad.

Soto Víquez, Kevin

Elaboración de un plan integral de actualización para el sistema de abastecimiento de agua potable de la comunidad de Pacayas, Cartago

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:

K. Soto V., 2020

xviii, 198, [22]h; ils. col. – 37 refs.

Resumen

En el año 2016, la Contraloría General de la República examinó la gestión realizada por la Municipalidad de Alvarado sobre el acueducto del cantón de Pacayas y determinó una gestión deficiente, además de un importante rezago en infraestructura y herramientas de medición del consumo y cloración. Se propone desarrollar un plan integral de actualización para el sistema de abastecimiento de agua potable de Pacayas mediante la reestructuración de la configuración hidráulica, la optimización del manejo comercial y operativo y un plan de gestión del riesgo.

En primera instancia se realizó una recopilación de información perteneciente a la Municipalidad de Alvarado como registros históricos, bases de datos comerciales e información geográfica de infraestructura y usuarios. Debido a la escasa información existente, se procedió a estudiar la gestión comercial y administrativa, recolectar datos geográficos en campo con GPS y registrar parámetros hidráulicos con un caudalímetro y manómetros. Toda la información recolectada se utilizó para el desarrollo y calibración de un modelo hidráulico del acueducto con el software WaterGems. Se modelaron ocho diferentes escenarios a corto, mediano y largo plazo.

Los resultados de las modelaciones denotaron que, parámetros como las presiones dinámicas y estáticas, la velocidad y los diámetros mínimos, no cumplen con las regulaciones de la normativa nacional. Las mediciones reflejaron que los parámetros de calidad del agua, como cloro residual libre y combinado, tampoco cumplen con los límites definidos por la legislación. Además, se determina un deficiente manejo de los riesgos que podrían afectar el sistema de agua potable. Se proponen 112 lineamientos, que incorporan temas de gestión comercial, operacional e inversión en infraestructura para mejorar el estado del acueducto de Pacayas, igualmente un plan de seguridad del agua para asegurar un manejo adecuado de los riesgos. K.S.V.

MODELACIÓN HIDRÁULICA; GESTIÓN COMERCIAL Y OPERACIONAL DE UN ACUEDUCTO; INVERSIÓN EN INFRAESTRUCTURA; PLAN DE SEGURIDAD DEL AGUA.

Ing. Antonio Sánchez Fernández

Escuela de Ingeniería Civil

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación	1
1.1.1. Problema específico	2
1.1.2. Importancia	4
1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema	5
1.2. Objetivos	7
1.2.1. General	7
1.2.2. Específicos.....	7
1.3. Marco legal y reglamentación vigente	8
1.4. Delimitación del problema.....	11
1.4.1. Alcance	11
1.4.2. Limitaciones.....	12
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. Componentes de los sistemas de abastecimiento de agua potable	13
2.1.1. Obras de captación.....	14
2.1.2. Tuberías de conducción	14
2.1.3. Tanques de almacenamiento	15
2.1.4. Tuberías de distribución	16
2.1.5. Tomas domiciliarias	17
2.2. Gestión de un sistema de abastecimiento.....	18
2.2.1. Operacional	18
2.2.1.1. Macromedición	18
2.2.1.2. Micromedición	20
2.2.1.3. Presión	22
2.2.2. Sistema comercial	27

2.2.2.1.	Comercialización de los servicios	28
2.2.2.2.	Medición del consumo	29
2.2.2.3.	Catastro comercial	29
2.2.2.4.	Facturación y cobranza	31
2.3.	Demanda del servicio de agua potable	32
2.3.1.	Dotaciones	33
2.3.1.1.	Uso humano.....	33
2.3.1.2.	Agrícola	33
2.3.2.	Demanda futura	36
2.3.3.	Calidad del agua potable	38
2.3.3.1.	Métodos de desinfección.....	38
2.3.3.2.	Reglamento para calidad del Agua Potable en Costa Rica	40
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO		43
3.1.	Recopilación de información.....	43
3.2.	Levantamiento y análisis del sistema.....	44
3.3.	Análisis de resultados y entregables.....	45
CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN DEL ACUEDUCTO DE PACAYAS		48
4.1.	Caracterización de la zona de estudio	48
4.1.1.	Clima	50
4.1.2.	Hidrología.....	50
4.1.3.	Geología y edafología	51
4.1.4.	Usos del suelo.....	52
4.1.5.	Zonificación de riesgos.....	53
4.2.	Gestión comercial del acueducto de Pacayas.....	54
4.3.	Gestión operacional del acueducto de Pacayas.....	57
4.3.1.	Aprovechamientos	57

4.3.2.	Almacenamiento.....	59
4.3.3.	Conducción y distribución.....	63
4.3.4.	Tratamiento.....	68
CAPÍTULO 5: MODELO HIDRÁULICO UNIDIMENSIONAL DEL ACUEDUCTO DE PACAYAS.....		71
5.1.	Software de modelación	71
5.1.1.	Características del software	71
5.2.	Información indispensable para el modelo	72
5.2.1.	Línea base del acueducto	72
5.2.2.	Levantamiento y análisis de la información	72
5.2.3.	Coordenadas y elevaciones.....	78
5.2.4.	Consideraciones tomadas para la modelación	79
5.3.	Calibración del modelo	80
5.3.1.	Efecto de escala del modelo	80
5.3.2.	Dotaciones	81
5.3.3.	Presión.....	83
5.3.4.	Caudal	86
5.3.5.	Proyecciones poblacionales.....	89
5.4.	Escenarios de modelación.....	90
5.5.	Análisis de los resultados	92
5.5.1.	Captación Martín Montero	94
5.5.2.	Tanque Chico Orozco.....	96
5.5.3.	Tanque El Descanso	97
5.5.4.	Tanque La Compostera	100
5.5.5.	Tanque La Vuelta	102
5.5.6.	Tanque Lourdes	104
5.5.7.	Tanque Machón	106

5.5.8.	Tanque Martín Montero.....	108
5.5.9.	Tanque Noré.....	110
5.5.10.	Tanque Sergio	112
5.5.11.	Tanque Vicente Serrano.....	113
5.5.12.	Tanque Zenón	115
5.5.13.	Tanque Hidrante	117
5.5.14.	Resultados globales para el sistema	119
CAPÍTULO 6: PLAN DE ACTUALIZACIÓN DEL ACUEDUCTO		123
6.1.	Mejoras en infraestructura por zona de presión.....	123
6.2.	Propuestas de mejora operacional y de gestión comercial	132
6.3.	Plan de acción	138
CAPÍTULO 7: PLAN DE SEGURIDAD DEL AGUA		140
7.1.	Caracterización del sistema.....	141
7.2.	Análisis de vulnerabilidades.....	142
7.3.	Análisis de amenazas	149
7.4.	Valoración del riesgo y priorización	151
7.5.	Administración del riesgo.....	156
7.6.	Esfuerzos adicionales para cuantificar las amenazas sanitarias y de infraestructura.	160
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		164
8.1.	Conclusiones	164
8.2.	Recomendaciones	167
Bibliografía.....		169
Apéndice 1.....		173
Anexo 1.....		175
Anexo 2.....		177
Anexo 3.....		196

Tabla de Figuras

Figura 1. Elementos que forman parte de una estación completa de macromedición.....	20
Figura 2. Metodología del proyecto.....	47
Figura 3. Provincia, cantón y distrito donde se ubica el acueducto en estudio.....	48
Figura 4. Poblados que componen los subsistemas del acueducto de Pacayas	49
Figura 5. Quebradas y ríos importantes del distrito de Pacayas.....	51
Figura 6. Mapa de ubicación de las nacientes del sistema de Pacayas	58
Figura 7. Mapa de ubicación de los tanques del acueducto de Pacayas.....	60
Figura 8. Mapa con la delimitación de las zonas de presión del sistema de Pacayas	64
Figura 9. Fotografía de una rotura presentada en una conducción del acueducto de Pacayas	66
Figura 10. Paso elevado en la línea de conducción entre la naciente La Isla y el tanque La Vuelta.....	67
Figura 11. Trazado de las tuberías en el centro del distrito de Pacayas	68
Figura 12. Dispositivo para la disolución de pastillas de hipoclorito de calcio en el tanque La Compostera	69
Figura 13. Sitios del acueducto que no contaban con georreferenciación de usuarios.....	73
Figura 14. Curva de consumo semanal tomada a la salida del tanque Lourdes	75
Figura 15. Ubicación de los puntos de calibración y resultados de presión obtenidos en campo	84
Figura 16. Ubicación de los puntos de calibración y resultados de caudal obtenidos en campo	87
Figura 17. Nuevas zonas de presión definidas para el acueducto de Pacayas.....	93
Figura 18. Resultados de presión para la zona Captación Martín Montero	94
Figura 19. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Captación Martín Montero.....	95
Figura 20. Resultados de presión para la zona Tanque Chico Orozco.....	96
Figura 21. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Chico Orozco.....	97
Figura 22. Resultados de presión para la zona Tanque El Descanso	98
Figura 23. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque El Descanso	99

Figura 24. Resultados de presión para la zona Tanque La Compostera	100
Figura 25. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque La Compostera	101
Figura 26. Resultados de presión para la zona Tanque La Vuelta	102
Figura 27. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque La Vuelta	103
Figura 28. Resultados de presión para la zona Tanque Lourdes	104
Figura 29. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Lourdes	105
Figura 30. Resultados de presión para la zona Tanque Machón	106
Figura 31. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Machón	107
Figura 32. Resultados de presión para la zona Tanque Martín Montero	108
Figura 33. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Martín Montero	109
Figura 34. Resultados de presión para la zona Tanque Noré	110
Figura 35. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Noré	111
Figura 36. Resultados de presión para la zona Tanque Sergio	112
Figura 37. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Sergio	113
Figura 38. Resultados de presión para la zona Tanque Vicente Serrano	114
Figura 39. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Vicente Serrano	115
Figura 40. Resultados de presión para la zona Tanque Zenón	116
Figura 41. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Zenón	117
Figura 42. Resultados de presión para la zona Tanque Hidrante	118
Figura 43. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Hidrante	119
Figura 44. Resultados globales para el balance hídrico de cada escenario	121
Figura 45. Resultados de la velocidad en las líneas de conducción	122
Figura 46. Comparación de la presión mínima antes y después de la aplicación de las mejoras en infraestructura	131

Figura 47. Comparación de la presión media antes y después de la aplicación de las mejoras en infraestructura	131
Figura 48. Comparación de la presión máxima antes y después de la aplicación de las mejoras en infraestructura	132
Figura 49. Mapa de riesgos para el acueducto de Pacayas según la metodología GIRA.....	142
Figura 50. Amenazas consideradas por la metodología GIRA	150
Figura 51. Resultados del análisis por vulnerabilidad y amenaza para el acueducto de Pacayas	152
Figura 52. Valoración del nivel de probabilidad de impacto de una amenaza.	152
Figura 53. Valoración del nivel de probabilidad del grado de consecuencia de una amenaza	153
Figura 54. Valoración del nivel de riesgo asociado a una amenaza	153
Figura 55. Mapa de amenazas y peligros naturales del cantón de Alvarado.	176
Figura 56. Mejoras 1, 2 y 3 para la zona Captación Martín Montero.	178
Figura 57. Mejora 5 para la zona Captación Martín Montero.	178
Figura 58. Mejoras 6 y 7 para la zona Tanque Chico Orozco	179
Figura 59. Mejoras 8 y 9 para la zona Tanque Chico Orozco	179
Figura 60. Mejoras 12 y 13 para la zona Tanque Chico Orozco.	180
Figura 61. Mejoras 14 y 15 para la zona Tanque La Vuelta.	180
Figura 62. Mejora 16 para la zona Tanque El Descanso.....	181
Figura 63. Mejora 19 para la zona Tanque La Compostera.	181
Figura 64. Mejora 20 para la zona Tanque La Compostera.	182
Figura 65. Mejora 21 para la zona Tanque La Compostera.	182
Figura 66. Mejora 22 para la zona Tanque La Vuelta.	183
Figura 67. Mejora 23 para la zona Tanque La Vuelta.	183
Figura 68. Mejoras 24, 25 y 26 para la zona Tanque La Vuelta.	184
Figura 69. Mejoras 27 y 28 para la zona Tanque Lourdes.....	184
Figura 70. Mejoras 29, 30 y 31 para la zona Tanque Lourdes.	185
Figura 71. Mejoras 32 y 33 para la zona Tanque Lourdes.....	185
Figura 72. Mejoras 34, 35 y 36 para la zona Tanque Lourdes.	186
Figura 73. Mejora 37 para la zona Tanque Lourdes.	186
Figura 74. Mejora 38 para la zona Tanque Machón.....	187

Figura 75. Mejoras 39 y 40 para la zona Tanque Machón.	187
Figura 76. Mejora 41 para la zona Tanque Machón.	188
Figura 77. Mejora 42 para la zona Tanque Machón.	188
Figura 78. Mejora 43 para la zona Tanque Martín Montero.	189
Figura 79. Mejoras 44 y 45 para la zona Tanque Martín Montero.	189
Figura 80. Mejora 46 para la zona Tanque Martín Montero.	190
Figura 81. Mejoras 47 y 48 para la zona Tanque Noré.	190
Figura 82. Mejoras 52, 53 y 54 para la zona Tanque Sergio.	191
Figura 83. Mejora 55 para la zona Tanque Vicente Serrano.	191
Figura 84. Mejoras 56, 57 y 58 para la zona Tanque Zenón.	192
Figura 85. Mejora 59 para la zona Tanque Zenón.	192
Figura 86. Mejora 60 para la zona Tanque Hidrante.	193
Figura 87. Mejoras 61 y 62 para la zona Captación Martín Montero al largo plazo.	193
Figura 88. Mejoras 65 y 66 para la zona Tanque Lourdes al largo plazo.	194
Figura 89. Mejoras 67, 68 y 69 para la zona Tanque Machón al largo plazo.	194
Figura 90. Mejoras 70, 71, 72 y 73 para la zona Tanque Zenón al largo plazo.	195
Figura 91. Profundidad (exposición) de las tuberías del acueducto.	197
Figura 92. Edad de las tuberías del acueducto.	197
Figura 93. Propiedad por las que pasa el trazado de las tuberías del acueducto.	198
Figura 94. Pasos elevados presentes en el trazado de las tuberías del acueducto.	198

Tabla de Cuadros

Cuadro 1. Presión nominal de trabajo para distintos SDR comunes en el mercado nacional .	24
Cuadro 2. Coeficientes K para diferentes cultivos típicos de Costa Rica.	35
Cuadro 3. Parámetros de calidad del agua para el nivel de control N1	41
Cuadro 4. Frecuencia mínima de análisis y número de muestras	42
Cuadro 5. Principales actividades productivas del cantón de Alvarado.....	52
Cuadro 6. Tarifas para el servicio de agua potable de la Municipalidad de Alvarado	56
Cuadro 7. Total de servicios según categoría tarifaria	57
Cuadro 8. Caracterización de los manantiales del sistema de Pacayas	59
Cuadro 9. Caracterización de los tanques del sistema de Pacayas	60
Cuadro 10. Comparación entre volúmenes actuales de los tanques y los determinados por normativa de diseño.....	62
Cuadro 11. Longitud de tuberías de conducción y distribución de acuerdo con su diámetro y material	63
Cuadro 12. Caudales históricos y aforados de la producción de las nacientes del sistema de Pacayas	74
Cuadro 13. Comparación de los consumos promedio recolectados en campo y los registrados por la Municipalidad	76
Cuadro 14. Estadísticas de usuarios reproductivos facilitados por el MAG.....	77
Cuadro 15. Consumos registrados por importantes clientes reproductivos.....	78
Cuadro 16. Dotaciones iniciales para la modelación del acueducto de Pacayas.	81
Cuadro 17. Estadísticas provenientes del registro completo de los servicios domiciliarios con micromedición	82
Cuadro 18. Comparación entre las presiones reales y producto del modelo hidráulico	84
Cuadro 19. Cumplimiento de los criterios de validez de la calibración de la presión para el modelo hidráulico	86
Cuadro 20. Comparación entre los caudales reales y los determinados mediante el modelo hidráulico.....	87
Cuadro 21. Cumplimiento de los criterios de validez de la calibración del caudal para el modelo hidráulico.....	88
Cuadro 22. Resultados de las proyecciones poblacionales para diferentes métodos utilizados	89

Cuadro 23. Consumos para cada uno de los escenarios de la modelación	92
Cuadro 24. Volúmenes globales para el balance hídrico de cada escenario.....	120
Cuadro 25. Mejoras en infraestructura por zona de presión para el mediano plazo	124
Cuadro 26. Mejoras en infraestructura por zona de presión para el largo plazo.....	130
Cuadro 27. Propuestas para la mejora operacional del sistema de agua potable de Pacayas	133
Cuadro 28. Propuestas para la mejora de la gestión comercial del sistema de agua potable de Pacayas	136
Cuadro 29. Plan de acción para el acueducto de Pacayas	139
Cuadro 30. Cuestionario sanitario de Sello de calidad del agua para el acueducto de Pacayas	143
Cuadro 31. Evaluación de las líneas de conducción y distribución del acueducto de Pacayas según las guías SERSA	144
Cuadro 32. Evaluación de los tanques del acueducto de Pacayas según las guías SERSA...	145
Cuadro 33. Evaluación de las nacientes del sistema de Pacayas según las guías SERSA	146
Cuadro 34. Evaluación de la vulnerabilidad administrativa según la guía GIRA.....	148
Cuadro 35. Evaluación de la vulnerabilidad operativa según la guía GIRA	148
Cuadro 36. Evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura según la guía GIRA.....	149
Cuadro 37. Análisis de las amenazas del acueducto de Pacayas según la metodología GIRA	150
Cuadro 38. Evaluación de los preparativos ante emergencias que podrían afectar el acueducto de Pacayas según la guía GIRA	151
Cuadro 39. Valoración de los riesgos que representa cada amenaza para el sistema de Pacayas	154
Cuadro 40. Plan de acción de medidas correctivas para el acueducto de Pacayas	157
Cuadro 41. Riesgos posibles en las tuberías del acueducto de Pacayas.....	160
Cuadro 42. Resultados de las pruebas de cloración dentro de la red de distribución del acueducto de Pacayas	162
Cuadro 43. Parámetros del control N1 del Reglamento de Calidad de Agua Potable para algunos tanques del sistema de Pacayas	163

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

Muchos acueductos del país fueron construidos décadas atrás sin seguir una metodología adecuada; las rutas de conducción seguían prácticamente los patrones del crecimiento habitacional sin la correcta verificación de condiciones como la presión de servicio, presiones máximas o mínimas, velocidades, pérdidas hidráulicas o las propiedades óptimas de cloro libre, residual o pH. Se concebía el acueducto como una obra civil, que prácticamente se construye y no necesita de mantenimiento preventivo, ni de acompañamiento operativo. Por ende, con el paso del tiempo los sistemas de abastecimiento de agua potable han crecido y se actualizan en cobertura, ramales y nuevas conexiones, sin embargo, poseen un importante rezago en aspectos como la calidad del agua potable, la gestión comercial y financiera del servicio, la seguridad del recurso hídrico y la operación óptima y eficiente del sistema de abastecimiento. Tal es el caso del sistema de agua potable del municipio de Alvarado en Cartago.

A finales del año 2016 la Contraloría General de la República emitió un documento dirigido hacia las municipalidades de la provincia de Cartago, donde se les examina en el tema de la gestión realizada sobre el recurso hídrico del distrito. En el caso del municipio de Alvarado, los estudios demostraron una gestión deficiente, importantes necesidades en infraestructura y herramientas de medición del consumo y cloración.

Para el acueducto de Pacayas de Alvarado, los factores que acrecientan su problemática son variados; la geografía del cantón genera que las nacientes aprovechables se encuentren en zonas montañosas donde factores ambientales como la erosión, los deslizamientos o incluso las fallas tectónicas afecten la integridad de las conducciones hacia los poblados. La topografía montañosa genera fuertes diferencias de nivel altitudinal y, por ende, la dificultad de controlar las presiones del sistema. La actividad agrícola y ganadera, característica de la región, consume parte importante de la oferta del recurso, lamentablemente sin control, pues no se cuenta con micromedición, ni una tarifa regulatoria basada en los volúmenes de demanda.

Resulta urgente afrontar los problemas que presenta este acueducto, brindando soluciones técnicas, modernas y económicas que propicien la accesibilidad del recurso, pero unido a un consumo consciente. Es necesario gestionar correctamente el sistema de manera que la Municipalidad de Alvarado, como prestador del servicio de agua potable, pueda mantenerse

financieramente, haga un uso óptimo de sus recursos y sea capaz de invertir en el mejoramiento y actualización de su patrimonio.

Por medio de este proyecto de graduación se pretende generar un plan de actualización para el acueducto, que permita a la Municipalidad del Alvarado priorizar las intervenciones que deben realizarse para lograr una mejor administración. Es importante recordar que un gobierno local no solamente se debe encargar de brindar servicio de agua potable, sino que se ve recargado con tareas como la recolección de impuestos sobre bienes inmuebles, servicios de limpieza de calles, recolección de basura y mantenimiento de vías. Por lo tanto, si un proceso de actualización e inversión en el acueducto no se desarrolla de manera correcta y paulatina desde sus inicios, podría convertirse fácilmente en una pérdida de recursos, dinero y tiempo para la municipalidad.

1.1.1. Problema específico

La Contraloría General de la República, órgano constitucional auxiliar de la Asamblea Legislativa que fiscaliza el uso de los fondos públicos en Costa Rica, se dio a la tarea de realizar una Auditoría Operativa sobre el manejo de los acueductos municipales de la provincia de Cartago durante el período comprendido entre el 1° de enero y el 31 de diciembre de 2015. En este plazo analizó el cumplimiento de las condiciones que aseguren la calidad y cantidad del agua, así como el funcionamiento eficiente de la infraestructura del acueducto.

Como resultado final, dicha institución publicó el 1° de diciembre de 2016 el Informe acerca del servicio de abastecimiento de agua potable brindado por los sistemas de agua potable administrados por estos municipios, entre ellos el gestionado por la Municipalidad de Alvarado. En este documento se señalan los problemas de la gestión actual del acueducto y la necesidad de la remodelación de gran parte de la infraestructura existente (Contraloría General de la República, 2016).

Entre los puntos más relevantes del informe se destaca que la red de distribución se ve aquejada por problemas de presión, interrupciones del servicio de agua y fugas en las tuberías producto del creciente consumo residencial del cantón que no fue previsto al concebir el proyecto. Esta problemática se ha intentado subsanar a lo largo del tiempo mediante la sustitución de diámetros mayores para la conducción, arreglo de fugas o sustitución de conexiones, sin embargo, son medidas meramente paliativas que carecen de sustento técnico.

Por otra parte, la cloración del agua, con el fin de garantizar su potabilidad, no logra alcanzar los umbrales especificados por el Reglamento para la Calidad del Agua Potable del Ministerio de Salud en todos los puntos de consumo de la red. Algunas mediciones realizadas recientemente demostraron que los niveles de cloro en varias muestras de agua no eran detectables o se encontraban por debajo o por encima del parámetro exigido.

Es importante destacar que la administración municipal no ha contado históricamente con micromedición en los puntos de consumo, por lo que cobra los servicios de agua potable mediante una tarifa fija, independientemente del volumen utilizado. Lamentablemente, no contabilizar el consumo fomenta el uso desmedido del recurso hídrico. Por otra parte, la medición de la oferta en las captaciones no se realiza con una frecuencia adecuada. Por lo tanto, la incertidumbre en los datos de producción y la no contabilización del consumo hace difícil el desarrollo de un balance hídrico, y por ende la contabilización de las pérdidas totales del acueducto.

Según el Plan Regulador de la Municipalidad de Alvarado, aproximadamente el 53% de la cobertura del terreno del cantón está compuesta de cultivos anuales. Este tipo de agricultura genera una alta demanda de agua para riego, especialmente en época seca, y se abastece directamente del acueducto municipal.

De acuerdo con el artículo 37 de la ley No. 276 de Costa Rica, conocida como la Ley de Aguas, se consideran servicios domésticos a aquel suministro de agua utilizado para satisfacer las necesidades de los habitantes, el riego de cultivos de terrenos que no excedan de media hectárea, el lavado de atarjeas y el suministro de aguas para surtir bocas contra incendios. Es decir, que para zonas agrícolas de más de media hectárea de extensión, su uso no cabe dentro del aprovechamiento doméstico y por lo tanto debería separarse completamente del servicio brindado por el acueducto al no resultar un uso prioritario del recurso hídrico. A pesar de esto, un grupo importante de propietarios agrícolas de esta zona abastecen su demanda de agua para riego, limpieza de equipos y lavado de cultivos directamente de la red del acueducto. Este grupo de productores realmente debería contar con un sistema independiente, o bien una concesión de agua para dicho fin.

Por otra parte, el municipio no cuenta con la información necesaria para brindar un correcto servicio a sus usuarios; no posee una base de datos donde recopile todos los servicios, las

propiedades abastecidas, los usos que cada cliente realiza del servicio, ni una estructura tarifaria acorde con los costos de producción y potabilización en los que incurre. Tampoco se cuenta con un levantamiento completo y actualizado de la infraestructura hidráulica como tuberías, tanques, válvulas o hidrantes. Esta información es manejada por los colaboradores del acueducto que poseen, en algunos casos, hasta 10 años de experiencia en el puesto, pero no se transmite a una base de datos geográfica.

Finalmente, se desconoce acerca de la aplicación de los planes de seguridad del agua, por lo que no se cuenta con protocolos para evitar desastres naturales, químicos o humanos que puedan afectar el recurso hídrico.

1.1.2. Importancia

El agua impulsa el desarrollo humano, pues factores como el crecimiento económico de la sociedad, la sostenibilidad del ambiente y la salud humana se sustentan principalmente en dicho recurso. De un acceso adecuado al recurso se derivan actividades como la ingesta de agua para la hidratación, el aseo personal, la preparación de alimentos y la producción de bienes y servicios, el riego de cultivos y la ganadería. Así mismo se promueve el crecimiento económico de los pueblos, aunado al hecho de permitir la atención de emergencias causadas por incendios.

Costa Rica posee una disponibilidad hídrica exorbitante de aproximadamente 24.784 m³ por persona al año, lo que corresponde a más de tres veces el promedio mundial, de 7.000 m³ (Ballesteros, 2013). No obstante, se sabe a ciencia cierta que no es un recurso ilimitado.

En la actualidad, un recurso tan importante debe ser resguardado y utilizado de la mejor manera posible. Se debe hacer un uso consciente y acorde con las capacidades de restauración de las zonas de recarga. Los administradores del recurso deben velar por transportarlo de manera eficaz, cumpliendo a cabalidad con las necesidades humanas, evitando pérdidas considerables de su volumen y conservando los parámetros de calidad necesarios.

A través de este trabajo se podrán destacar puntos importantes de atención en la infraestructura del acueducto de Pacayas, que actualmente obstaculizan el buen funcionamiento hidráulico. Las propuestas igualmente considerarán el crecimiento poblacional de la zona que el sistema de agua potable debe soportar.

Se recomendarán acciones que propicien una mejor operación del sistema, un mejor control de los parámetros hidráulicos necesarios para el manejo ingenieril de un acueducto; se propondrán nuevas tecnologías alcanzables para la Municipalidad y que permitan agilizar sus procesos y, sobre todo, conservar estadísticas para medir su eficiencia.

Igualmente, se brindará una serie de recomendaciones sobre los pasos a seguir para construir una base de datos comercial, en la que la Municipalidad se pueda apoyar y finalmente llevar a cabo la introducción de equipos sumamente necesarios como los medidores de consumo.

Se pretenderá corregir aquellas características del sistema que no cumplan con las normativas nacionales como la Ley de Hidrantes necesaria para un desarrollo de las labores del Benemérito Cuerpo de Bomberos. De la misma forma se velará por el cumplimiento del Reglamento de Calidad del Agua Potable dictaminado por el Ministerio de Salud.

Como insumos de gran importancia se otorgará a la Municipalidad un catastro detallado de infraestructura y clientes, así como un modelo hidráulico que podrá utilizarse para la modelación de diferentes escenarios y toma de decisiones a futuro.

Finalmente, se pretende generar de la mano de los agentes del municipio un plan de seguridad del agua que reduzca la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento de agua potable.

1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema

En cuanto a investigaciones realizadas en el país en zonas semejantes al área de estudio, se encuentra el trabajo de graduación titulado "*Diagnóstico de los acueductos Cot, Potrero Cerrado y San Juan de Chicué en la parte alta de la cuenca del río Reventazón*" elaborado en el 2016 por la estudiante de la Universidad de Costa Rica, Jessica Monge S. Esta investigación se dirigió al diagnóstico de los acueductos mencionados pertenecientes al cantón de Oreamuno en la provincia de Cartago, región que colinda con la zona de Alvarado donde se encuentra el acueducto de Pacayas. A pesar de que la autora no hace énfasis en el diseño hidráulico del sistema, sí realiza un exhaustivo trabajo en el que evalúa dichos sistemas desde aspectos como la calidad del agua acorde a la legislación vigente, las medidas tomadas para la protección de las fuentes de abastecimiento y el estado de la infraestructura. A su vez realiza un análisis de la capacidad administrativa de cada acueducto, en términos de planificación, ejecución, mantenimiento y control. Estos datos son de ayuda para conocer la forma en que comunidades

vecinas, que poseen usos similares del recurso hídrico y aspectos topográficos, geográficos e hidrográficos semejantes, gestionan el servicio del bien.

En lo que respecta a las estructuras y procesos de cloración de un acueducto, Susan Mora C. describe en el año 2011 a través de su proyecto de graduación de la Universidad de Costa Rica, titulado ***"Evaluación de las principales tecnologías utilizadas en Costa Rica para la desinfección del agua"***, los métodos de cloración utilizados en algunos acueductos de la zona de Turrialba, cantón colindante también con Alvarado. Se detalla cómo se gestiona la cloración con hipoclorito de calcio en pastillas en estos acueductos; desde la instalación de los equipos necesarios, el control periódico que debe brindársele a esta tecnología, las recomendaciones de dosificación y mantenimiento brindados por el fabricante, entre otras. Resulta de utilidad dicha investigación dado que la desinfección en el sistema de Pacayas sigue esta misma metodología, además como conclusiones del trabajo de Mora (2011) se pueden extraer ventajas y desventajas que poseen los diversos tipos de cloración y cuáles son las metodologías que han dado mejores resultados para este tipo de acueductos en zonas rurales y de conducciones únicamente por gravedad.

Como estudio técnico asociado al diseño hidráulico de un acueducto, se encuentra el proyecto de graduación realizado en el año 2016 por el estudiante Cristian Amador S. denominado ***"Evaluación hidráulica y propuestas de mejora al sistema de abastecimiento de agua potable de Frailes y Bustamante"***. El autor realiza un análisis profundo de la situación existente en el acueducto, iniciando desde las visitas de campo para la observación del estado de la infraestructura y la comparación con los datos suministrados por el ente administrador del servicio hasta la propuesta de mejoras para el acueducto en términos de calidad del agua, de diseño hidráulico, de mantenimiento y sobre cómo lidiar con algunos problemas geológicos de la zona. La metodología empleada en esta investigación se encuentra sumamente completa y será de ayuda para establecer el rumbo de la investigación que se propone en este documento.

Una de las etapas más importantes dentro del trabajo de Amador (2016) fue la utilización del software EPANET para el análisis hidráulico unidimensional del acueducto estudiado. En dicha investigación se plantean distintos escenarios de crecimiento poblacional y por lo tanto del consumo hídrico. En cada uno de ellos se analiza la velocidad, presión y el tiempo de cierre de válvulas para el correcto funcionamiento del sistema, datos de los que parte el diseño formal de la red de abastecimiento. El trabajo previo para el montaje del modelo, la calibración de

este y el posterior análisis de resultados será una fuente valiosa de información para el desarrollo de estas mismas etapas en el proyecto descrito para el acueducto de Pacayas.

Finalmente, la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA), el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y el Instituto Regional de Sustancias Tóxicas (IRET) expusieron, en el año 2010, los resultados de una extensa investigación denominada "*Agroquímicos en ecosistemas hortícolas y pecuarios en la microcuenca de las quebradas Plantón y Pacayas en Cartago, Costa Rica*". En dicho estudio se realizaron gran cantidad de mediciones de temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad y en el laboratorio: sólidos suspendidos y totales, nitrato, nitrito, fosfato soluble y total, potasio y residuos de plaguicidas. Las muestras se obtuvieron de fuentes superficiales y en infraestructura de almacenamiento, como el caso del Tanque de Lourdes, que representa el tanque de mayor tamaño e importancia para el acueducto de Pacayas. Esta investigación presenta datos concisos que reflejan la necesidad del desarrollo de un plan de seguridad del agua adecuado.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Desarrollar un plan integral de actualización para el sistema de abastecimiento de agua potable de la comunidad de Pacayas de Alvarado, conformado por una propuesta de reestructuración de la configuración hidráulica, una guía de manejo comercial y operativo, así como un plan de gestión de riesgo que promuevan un mejor aprovechamiento y una correcta protección del recurso hídrico.

1.2.2. Específicos

- Plantear una propuesta de reestructuración del sistema hidráulico basada en la evaluación de la infraestructura actual, la cuantificación en sitio de parámetros hidráulicos, la estimación de la demanda existente y futura, y la modelación numérica del sistema por medio del software WaterGems.
- Realizar una descripción de la demanda agrícola de la comunidad mediante el catastro de los clientes mayoritarios y la estimación de su consumo, con el fin de determinar la necesidad de crear un sistema independiente del acueducto municipal para el abastecimiento de estos usuarios.

- Desarrollar un plan estratégico de manejo comercial y operativo para la Municipalidad, por medio de la priorización de tareas e inversiones a corto, mediano y largo plazo.
- Elaborar un plan de gestión de riesgo para el acueducto que tome en cuenta los aspectos sísmicos, volcánicos, y topográficos de la región, así como la afectación de la calidad del recurso hídrico por la alta actividad agrícola y ganadera de la zona.

1.3. Marco legal y reglamentación vigente

A nivel nacional existe gran cantidad de legislación que, desde distintas perspectivas, se involucran en el tema del recurso hídrico. Diversas instituciones y ministerios tienen injerencia dentro del manejo del agua y sus distintos usos, por ende, cada uno de ellos dicta los reglamentos y normas que atañen a su área de estudio.

En el año 1942, la Asamblea Legislativa de Costa Rica emitió la denominada Ley de Aguas cuyo fin era englobar en un solo documento los usos, permisos, concesiones, demandas, privilegios, deberes, tarifas y multas que debería de cumplir todo actor físico o jurídico involucrado en el uso del agua.

Es así como la Ley de Aguas, en sus tres primeros capítulos, realiza la diferenciación entre las aguas de consumo público y privado, además de definir los niveles de prioridad respecto a los distintos usos del bien. El capítulo 4 y 5 se dedican a la protección de ríos y servidumbres naturales, mientras que el capítulo 6 establece las directrices de la formación de sociedades de usuarios.

El capítulo 7, 8 y 9 abarcan brevemente el aprovechamiento mediante la energía hidráulica, la protección de zonas de manantiales y su vegetación. Finalmente, del capítulo 10 al 14 se especifican las penas, sanciones, juicios y resolución de los conflictos ocasionados por los distintos usuarios del recurso.

Por ende, hay importantes áreas que esta ley deja en descuido como los criterios técnicos para la construcción y mantenimiento de sistemas de acueductos, la sanidad y potabilización del agua para consumo humano, la disposición final de los fluidos sanitarios domésticos o industriales, entre otros.

Por esta razón, a lo largo de la evolución del país, han surgido entes gubernamentales como ministerios o instituciones que se han dado a la tarea de acaparar, bajo normativas mucho más específicas, la gran cantidad de aristas que engloban el uso del recurso hídrico.

Entre ellos destaca el Ministerio de Salud Pública, que vela por el cumplimiento de los parámetros fisicoquímicos que debe tener el agua potable a través del Reglamento para la Calidad del Agua Potable, cuya vigencia rige desde el 1 de setiembre del año 2015.

Según su artículo 1, el objetivo principal de este reglamento es **“establecer los límites máximos permisibles de parámetros físicos, químicos y microbiológicos para el agua potable, a fin de garantizar su inocuidad y la salud de la población”**. La inspección de estas características del agua se desarrolla a través de cuatro niveles detallados de control de calidad del agua, y un nivel del control operativo, tal y como lo establece el artículo 8.

Para cada uno de los niveles detallados de control, el reglamento establece la periodicidad y el tamaño de la muestra que debe recolectarse en función de la cantidad de habitantes abastecidos de un sistema de agua potable. Igualmente estipula los valores máximos y mínimos admisibles para cada uno de los parámetros mencionados.

Además, el reglamento agrega un nivel de control operativo, en el cual hace referencia a un procedimiento periódico para verificar los parámetros de turbiedad, olor y cloro residual, por lo que cada operador debe contar con el equipo de laboratorio o de monitoreo para el seguimiento de este programa.

Otra de las reglamentaciones fundamentales es la Norma Técnica para Diseño y Construcción de Sistemas de Agua Potable, de Saneamiento y Pluvial desarrollada el 21 de junio del año 2017. Su finalidad es establecer un marco técnico-normativo que oriente el diseño y construcción de proyectos de iniciativa pública o privada de sistemas ordinarios de agua potable, recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales.

Se incorporan aspectos técnicos ingenieriles que deben tomarse en cuenta durante el diseño de las distintas estructuras que componen los sistemas hidráulicos; desde las obras de captación en aprovechamientos superficiales o pozos, hasta las conexiones domiciliarias.

El capítulo 4 introduce el cálculo de la población de diseño, que incorpora tanto unidades habitacionales como otro tipo de edificaciones, transformando estas últimas a través de unidades equivalentes de consumo. Se especifican también los periodos de diseño para cada elemento que compone el sistema de agua potable; obras de captación, tanques, plantas potabilizadoras, estaciones de bombeo, tuberías de aducción, conducción y distribución.

Con respecto al consumo necesario para el diseño, se establecen dotaciones típicas para diferentes tipos de población, sea urbana, costera o rural, además volúmenes mínimos que deben de proporcionar los tanques para la satisfacción de la demanda y la atención de emergencias por incendios.

Para finalizar el capítulo 4 se especifican umbrales máximos y mínimos de presión y velocidad dentro de las redes del sistema, diámetros mínimos, así como valores típicos de coeficientes de rugosidad para el desarrollo de los cálculos durante el diseño. Los capítulos 5 y 6 presentan una similitud importante con los criterios y parámetros definidos en el capítulo anterior, pero con respecto a los sistemas de saneamiento y de flujo pluvial.

Un reglamento adicional atinente al manejo del recurso es el Manual Técnico del Departamento de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía, publicado en el año 2004. En él se determina la metodología de cálculo que se debe utilizar para estimar las necesidades hídricas de diferentes actividades, tanto humanas, agrícolas, industriales, comerciales, etc.

Su capítulo primero presenta las fórmulas para la determinación del volumen necesario para riego de cultivos, las cuales son dependientes de la evapotranspiración, la elevación sobre el nivel del mar, el tipo de cultivo y la eficiencia del método de riego. Así mismo, se presentan valores típicos del agua utilizada en usos pecuarios y en el lavado de instalaciones de esta índole.

Por último, podría destacarse la Ley 8641: **"Declaratoria del servicio de hidrantes como servicio público y reforma de leyes conexas"** que data del año 2008. En ella se dicta los requerimientos técnicos e hidráulicos que deben poseer los tanques de almacenamiento de los sistemas de agua potable para que sean capaces de asistir en el combate de un incendio, sin comprometer el consumo humano. Determina la distancia adecuada a la que se deben instalar hidrantes

dentro de desarrollos poblacionales y, además, establece la presión y el diámetro mínimo que debe cumplir una tubería donde se conecte un hidrante.

1.4. Delimitación del problema

1.4.1. Alcance

El Municipio de Alvarado posee bajo su cargo los acueductos de los distritos de Pacayas y Capellades. Dichos acueductos poseen estructuras separadas, incluso nacientes individuales, por lo que es posible realizar su estudio y modelación de forma individual. Para efectos de este estudio solamente se tomará en cuenta el acueducto de Pacayas. La extensión de ambos acueductos es bastante grande, así como el número de usuarios abastecidos, por lo que se considera que el sistema de Capellades merece el desarrollo de un estudio aparte.

Sin embargo, para el desarrollo del plan de gestión de riesgos se deberá considerar una zona más amplia como influyente sobre la vulnerabilidad del acueducto, prácticamente a nivel cantonal, pues la mayoría de la información documental a utilizar se encuentra a dicha escala.

Con el fin de realizar una caracterización de la zona de estudio se hará uso de información producida por la misma Municipalidad en su Plan Regulador Municipal, así como de información pública proveniente del Instituto Geográfico Nacional, el Instituto Tecnológico de Costa Rica, la Comisión Nacional de Emergencias, entre otros.

Para la estimación de la disponibilidad del recurso hídrico se realizarán aforos en cada una de las nacientes, ya sea manualmente o utilizando un caudalímetro ultrasónico. Sin embargo, dichas mediciones responderán únicamente a la época de estiaje, que se considera es la situación crítica para el sistema.

La estimación del consumo actual del sistema se basará en los registros de un grupo de medidores que ya fueron instalados por parte de la Municipalidad de Alvarado. Esta muestra de medidores está conformada por servicios domiciliarios, comerciales y reproductivos.

Con respecto a las pruebas de calidad del agua, es importante destacar que estas se limitarán a medir algunos de los parámetros determinados por el estudio N1 de la norma de Calidad de Agua Potable; se recopilarán, en algunos puntos de la red y tanques, datos como la turbiedad, olor, sabor, temperatura, pH, conductividad y cloro residual libre o combinado

El modelado hidráulico se realizará con el programa WaterGems, que es un software comercial de uso restringido creado por la agencia Bentley, capaz de realizar el análisis hidráulico de redes de tuberías a partir de las características físicas de las tuberías y dinámicas de los nudos para obtener la presión y los caudales. Para utilizar WaterGems se utilizará una licencia estudiantil, que cuenta con un límite de 10 000 nodos en una red de distribución, sin embargo, resulta suficiente para la modelación del acueducto en estudio. Esta versión puede obtenerse directamente de la página de internet oficial de la agencia Bentley.

El modelo que se desarrollará será estático, es decir, corresponderá a la hora de máxima exigencia para el acueducto, pues no se disponen de curvas horarias de consumo para establecer un análisis dinámico.

Una ventaja muy importante es que este software cuenta con una compatibilidad completa con el software de uso libre EPANET, por lo que podrá entregarse en este formato a la Municipalidad para facilitar su utilización.

Las recomendaciones que este documento brindará a la Municipalidad de Alvarado son de carácter técnico basadas en la recopilación y análisis detallado de información sobre el funcionamiento y estado del sistema de agua potable, sin embargo, se limitarán a describir el problema observado y proponer una posible solución, por lo tanto, no incluirán el costo detallado de su implementación, tampoco planos estructurales ni marcas comerciales o fichas técnicas de la instrumentación que se sugiera instalar.

Se presentarán escenarios a corto, mediano y largo plazo de las acciones que deben tomarse con respecto al funcionamiento del acueducto basado en la necesidad de ampliación del sistema por crecimiento poblacional. No se realizará un análisis detallado de las finanzas del Municipio, sin embargo, las acciones sugeridas se ajustarán a la capacidad de inversión municipal descrita por los administradores del sistema.

1.4.2. Limitaciones

- La Municipalidad de Alvarado no cuenta con mediciones en las tomas de agua que registren la disponibilidad del recurso hídrico, por lo que se deberá recurrir a aforos para obtener dicha información.

- La Municipalidad no posee un catastro actualizado de la red de agua potable del acueducto de Pacayas. Se recurrirá al basto conocimiento de los fontaneros para la definición del trazado de la red y un aparato GPS para la georreferenciación de elementos importantes del sistema, como tanques, válvulas, hidrantes y servicios.
- Los datos históricos de consumo son muy escasos. Solamente se cuenta con 100 medidores instalados en un total de 1745 servicios aproximadamente. Además, estos registros de lecturas datan del mes de agosto del 2018 y se prolongan hasta octubre del 2019.
- La ruta que sigue la tubería de conducción abarca en algunos casos propiedades privadas, por lo que será necesario conseguir la autorización del respectivo dueño para su levantamiento.
- Al recolectar datos de presión para la calibración del modelo, solamente es posible realizar mediciones en tomas que forman parte del sistema intradomiciliario. Debido a esta limitación, se debe tener en cuenta que los valores de presión podrían verse afectados por el consumo dentro del inmueble en dicho instante.
- El volumen de los tanques deberá ser calculado a través de medidas externas y el cálculo del espesor de paredes, pues por la sensibilidad del sistema no podría sacarse ningún tanque de funcionamiento para realizar una inspección en su interior.
- Las áreas de fincas agrícolas, ganaderas o lecherías serán recolectadas a partir de la información del catastro municipal o del Ministerio de Agricultura y Ganadería, ya que no se cuenta con los equipos necesarios para realizar mediciones de las áreas exactas de estas zonas.
- No es posible realizar un seguimiento prolongado de los parámetros de calidad, por lo tanto, las mediciones de calidad del agua serán datos puntuales que se recolectarán a través de muestreos simples.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Componentes de los sistemas de abastecimiento de agua potable

El Instituto de Acueductos y Alcantarillados de Costa Rica (AyA) describe en su *Norma Técnica para el Diseño y Construcción de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, de Saneamiento y Pluvial*, que los sistemas de abastecimiento de agua potable “deben considerarse como el conjunto de fuentes del recurso hídrico y de la infraestructura y equipamiento para su

captación, potabilización y distribución, lo cual incluye: plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento, líneas de aducción y conducción, estaciones de bombeo, pozos, redes distribución, hidrantes, hidrómetros y demás elementos necesarios para el suministro de agua **potable a un núcleo de población**" (AyA, 2017, p.6). Cada una de estas estructuras sigue una metodología y teoría hidráulica diferente debido a su función específica.

2.1.1. Obras de captación

Las obras de captación son aquellas estructuras que se colocan sobre fuentes superficiales o subterráneas con el fin de surtir una red de acueducto. El tipo de estructura de captación dependerá del volumen necesario, de restricciones de espacio del cuerpo de agua y economía. Algunos de los tipos usuales son la toma lateral, el lecho filtrante, la captación sumergida con dique y los reservorios de captación de manantiales que afloran en el terreno. Los pozos o excavaciones para la extracción igualmente se encuentran dentro de este grupo. (Corcho y Duque, 1993).

Además de la construcción de una obra de captación, se debe velar por proteger las áreas circundantes de actividad humana, industrial o agrícola, que podrían afectar la calidad y cantidad del recurso hídrico. Un evento de contaminación del manto acuífero o del cuerpo de agua podría generar grandes problemas como la afectación de la salud pública si se extendiera hasta las tomas domiciliarias del sistema.

2.1.2. Tuberías de conducción

Por otra parte, las obras de conducción son aquellas que transportan el recurso hídrico desde la captación hasta las estructuras potabilizadoras del sistema, ya sea una planta de tratamiento o un tanque de almacenamiento. Son líneas que no presentan conexiones directas de consumo. Su extensión dependerá del tamaño del acueducto, la capacidad financiera del ente operador, de condiciones topográficas, entre otros. Su comportamiento hidráulico puede presentarse como canal abierto, conductos cerrados con o sin presión o como conducciones mixtas (Ibidem).

El agua puede ser llevada desde sus fuentes de producción hacia los usuarios a través de dos metodologías principales: por gravedad o por bombeo. Los sistemas que funcionan por gravedad trasladan el recurso hídrico desde los manantiales hasta los tanques de

almacenamiento de forma natural, aprovechando las diferencias de elevación del terreno. Sin embargo, en sitios donde el terreno no favorece el flujo por gravedad se debe recurrir a la instalación de una estación de bombeo, es decir, hacer uso de un equipo especial capaz de aumentar la carga hidráulica del fluido (Conagua, 2019c).

En la medida posible, las líneas de conducción deben extenderse en terrenos de propiedad pública, además de evitar sitios propensos a deslizamientos, inundaciones o expuestos a un alto nivel freático. En el caso de que se necesite atravesar un río es preferible realizar la extensión de tubería por debajo del lecho de este antes de incorporar un paso elevado. López (1995) indica que, en general, la tubería debería encontrarse a una profundidad bajo el terreno de 0,6 m, mientras que en casos de altas cargas vehiculares debería aumentarse a 1,0 m.

Estas líneas usualmente presentan los diámetros de mayor tamaño del sistema debido al alto flujo que debe trasladarse a través de ellas de manera constante.

2.1.3. Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento son reservorios que tienen como función principal atender las variaciones de la demanda al almacenar el recurso en los periodos en que el suministro excede el consumo, así como lograr el suministro ante condiciones imprevistas. Los tanques deben ser diseñados con un determinado volumen de almacenamiento, capaz de cumplir ciertas funciones:

- Mantener un almacenamiento suficiente para compensar las variaciones en el consumo de agua a lo largo de un día.
- Asegurar el servicio de agua potable en situaciones de emergencia como fallas en la toma, cortes de energía eléctrica, roturas en las instalaciones de conducción o bombeo, entre otros.
- Disponer de un volumen de reserva para la atención de incendios.
- Reducir las fluctuaciones de presión en la red debido a las variaciones de consumo.

Usualmente los tanques poseen una configuración bastante sencilla, con tuberías de entrada, de salida, una tubería prevista para limpieza y ventilas para la incorporación de aire. Además, en algunos casos poseen mecanismos para vertido de los excedentes que el tanque no es capaz de almacenar. Sin embargo, la solución ideal para no incurrir en pérdidas debe ser la

instalación de válvulas de altitud, que a través de un mecanismo actuador cierren el paso del agua al alcanzarse el nivel máximo.

El mecanismo actuador corresponde a un flotador o boya sujeto de un extremo a una barra sencilla y ésta a un pivote. Una vez que el nivel del agua sube y empuja el flotador hacia arriba, hasta alcanzar el nivel máximo permitido por el pivote, la válvula de compuerta a la entrada del tanque es cerrada mecánicamente. En el caso de que el nivel baje, el flotador descenderá y la válvula accionará su apertura.

Por último, para realizar un mantenimiento o realizar alguna reparación, es indispensable que el tanque cuente con estructuras de *bypass* entre la tubería de entrada y de salida, con sus correspondientes válvulas de seccionamiento (Conagua, 2019c).

2.1.4. Tuberías de distribución

Se define como el conjunto de redes de tuberías encargadas de conducir el fluido hasta los nodos de consumo. En él se enlazan todas las demás estructuras del acueducto y resulta el componente de mayor extensión geográfica en la mayoría de los casos. La planta de las calles, la topografía y la localización de las obras de abastecimiento determinan el tipo de distribución, así como el flujo a través de él. (Fair, Geyer y Okun, 1995).

Según la forma en que las tuberías se entrelazan y se extienden para abastecer las tomas domiciliarias, estas redes se pueden clasificar en abiertas, cerradas o mixtas. Basado en el Conagua (2019c) las redes abiertas son aquellas que sus tuberías se conectan formando al menos un circuito. La principal ventaja de estas redes es que, en casos de roturas de un tramo, el flujo podría seguir un camino alternativo para suplir los nodos que podrían verse afectados.

Al contrario, las redes abiertas se componen de ramificaciones que se extienden en forma de árbol, y que no se conectan entre ellas. Usualmente se desarrollan en sitios con planimetrías complicadas o poblaciones muy dispersas, y poseen la desventaja que un fallo afectaría por completo el ramal aguas abajo, causando desabastecimiento o reducciones en la presión. Finalmente, las redes mixtas representan una combinación de ambos esquemas.

Para el diseño y selección de los materiales de las tuberías de distribución se deben de tomar gran cantidad de aspectos en consideración como: la resistencia mecánica, durabilidad, resistencia a la corrosión, la capacidad hidráulica, la rugosidad y la economía.

Además, se deberá considerar la incorporación de válvulas, que son dispositivos mecánicos empleados para detener, iniciar o controlar las características del flujo a presión. En acueductos regidos por el comportamiento gravitacional y con topografías sinuosas, las válvulas son una herramienta indispensable para controlar las presiones en el sistema (Ibidem).

2.1.5. Tomas domiciliarias

El último componente del sistema de agua potable, sobre el cual los entes prestadores del servicio tienen injerencia, es la toma domiciliar. Esta tiene como función tomar agua de la red de distribución y llevarla hacia la instalación hidráulica intradomiciliaria. Este componente podría dividirse en dos partes: el ramal de conexión (o mejor conocido como acometida) y la caja del micromedidor (Ibidem).

Lo usual es que se realice una conexión por unidad habitacional, sin embargo, puede existir la modalidad de acometidas conjuntas. Estas son aceptables en zonas de baja capacidad económica y en el caso de predios unifamiliares, donde sería recomendable no superar una cantidad máxima de cuatro medidores (López ,1995).

El material utilizado para la acometida debe ser flexible o fácil de manipular a través de codos, uniones o reducciones, por lo que usualmente se utilizan las tuberías de polietileno de alta o baja densidad y el policloruro de vinilo (PVC). El diámetro de la conexión domiciliar dependerá del caudal solicitado por el bien inmueble al que se le brinda el servicio, no obstante, la mayoría de las tomas se realizan en diámetros de 13 o 19 mm.

La acometida se extiende desde la tubería de la red hasta el lindero de la propiedad abastecida, donde se instala una caja de seguridad para la colocación del micromedidor o hidrómetro. Este es el dispositivo contador del volumen consumido y, por ende, utilizado para el cálculo del cargo monetario por cobrar al usuario.

La micromedición, permite que el prestador del servicio mantenga un orden en la recaudación de ingresos, además de incentivar en los usuarios un mejor uso del recurso. Con la información estadística que se genera a partir de un registro constante de consumo se pueden realizar análisis, planeación, proyección de volúmenes y modelaciones que permitan al prestador un mejor manejo del sistema de agua potable.

2.2. Gestión de un sistema de abastecimiento

2.2.1. Operacional

2.2.1.1. Macromedición

El objetivo fundamental de los sistemas de macromedición es cuantificar y registrar los caudales y volúmenes de agua que se captan, potabilizan, conducen y distribuyen en un sistema de abastecimiento. Conagua (2019a) enumera gran cantidad de acciones de optimización del sistema que el registro de datos, mediante la implementación de la macromedición, permitiría realizar:

- Estudio continuo del comportamiento de las fuentes hídricas y su disponibilidad para observar su variación estacional, en situaciones de riesgos o a lo largo de todo el periodo de aprovechamiento
- Comparaciones entre la disponibilidad del recurso y la demanda, y así detectar las posibles necesidades de aumentar la producción
- Equilibrio del suministro y homogeneidad de presiones en los distintos subsistemas
- Cálculo de volúmenes no facturados, pérdidas físicas y pérdidas aparentes
- Evaluación de planes de instalación de micromedidores
- Sectorización y desarrollo de distritos hidrométricos

La macromedición puede realizarse de forma temporal o permanente, dependiendo de la naturaleza de los equipos utilizados. Existen macromedidores portátiles que realizan mediciones de manera no intrusiva en las tuberías a través de ultrasonidos, mientras que los más comunes son de carácter permanente y se instalan como un accesorio en la línea de interés.

Los puntos de un sistema donde se debe instalar macromedición son variados y dependerán de los objetivos y la posterior utilidad que se busque dar a dichas mediciones. Sin embargo, se considera indispensable la implementación de estos recursos en todas las fuentes de producción y tanto al ingreso como a la salida de plantas de tratamiento y tanques de almacenamiento. Igualmente se consideran determinantes en la sectorización de la red de distribución mediante distritos hidrométricos.

Además de los sitios permanentes de macromedición, se deberá designar puntos medios de la red para la creación de estaciones de medición temporal. Estos puntos deberán garantizar el espacio suficiente para la maniobrabilidad del personal, la instalación de los equipos portátiles y la seguridad de estos.

Los equipos disponibles en el mercado se diferencian principalmente por el método mediante el cual realizan su medición. Los más comunes son los de tipo mecánico, que a través de una hélice o turbina realizan un conteo del total de vueltas realizadas en un determinado tiempo. Por otra parte, los de tipo ultrasónico, poseen sensores que se colocan en el lomo superior de la tubería y emiten una onda, esta entra en la tubería, atraviesa el medio líquido, choca con la pared de la tubería y repite su camino de vuelta hasta el sensor receptor. De esta forma, la velocidad de tránsito de la onda en el recorrido es un indicador indirecto de la cantidad de fluido en el interior del tubo en un tiempo específico.

El caudalímetro electromagnético crea, a través de inductores, un campo electromagnético perpendicular al flujo del agua. Cuando las partículas atraviesan este espacio crean variaciones en el voltaje perceptibles por sensores alrededor del cuerpo del macro, que son directamente proporcionales a la velocidad del fluido (Conagua, 2019a).

Del método de medición dependerá la precisión de los registros y los umbrales máximos y mínimos de caudal entre los cuáles es óptimo su funcionamiento.

Para la selección del tipo de caudalímetro a utilizar se deben tener en cuenta importantes factores (Ibidem):

- Propiedades físicas y químicas del agua a medir como su dureza, conductividad, sólidos disueltos y presencia sustancias posibles causantes de colmatación.
- Rango de caudal esperado o requerido
- Rangos de temperatura y presión del agua
- Continuidad del flujo en los puntos de medición
- Seguridad del sitio por robo o vandalismo
- Precisión requerida
- Presupuesto para la adquisición

Además, cabe resaltar que una estación completa de macromedición no se compone únicamente del caudalímetro, sino del conjunto de sensores y recolectores de datos que además de medir, guardan los registros, los protegen y envían la información, mediante medios electrónicos, para ser aprovechada por los expertos administradores del acueducto. En la Figura 1 se muestra un esquema básico de los componentes de una estación de macromedición completa.

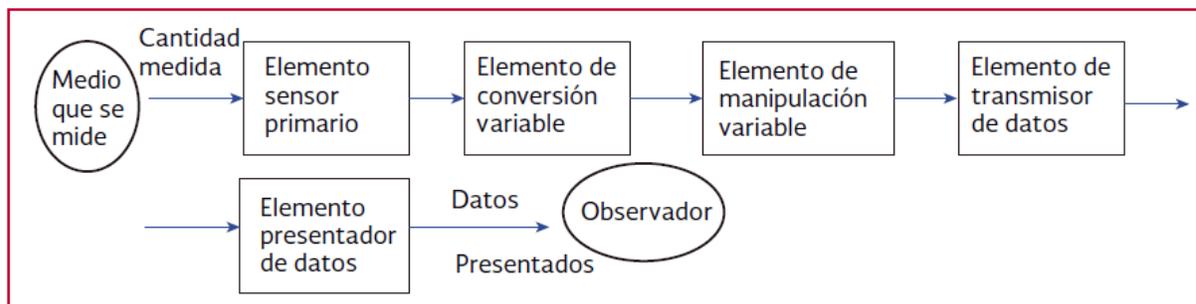


Figura 1. Elementos que forman parte de una estación completa de macromedición

Fuente: Conagua, 2019a

La macromedición no debe ser vista como una metodología adicional o una intervención tecnológica a futuro, sino un hecho de inmediata necesidad. Sin una correcta macromedición, al menos en los puntos de aprovechamiento, no es posible desarrollar tarifas adecuadas de consumo, indicadores de agua no facturada, costos de producción y cloración, balances hídricos ni campañas de prevención ante sequías, cambio climático o crecimiento poblacional y de demanda.

2.2.1.2. Micromedición

Los micromedidores son aquellos dispositivos utilizados para el conteo del volumen consumido por cada usuario del sistema, y a través de su registro mensual, realizar el cobro del servicio acorde con el volumen suministrado.

Al aplicar micromedición, tanto el usuario como el operador se ven beneficiados. El primero porque puede regular su consumo de acuerdo con la cantidad de agua que está dispuesto a pagar, mientras que el operador dispone de un caudal mayor que le permite incrementar la capacidad de su sistema y unir más clientes a él. Así mismo, se facilitarían la recuperación de los costos de inversión, administración y comercialización derivados de la prestación del

servicio. Incluso, los recursos a favor podrían utilizarse para inversión en nueva infraestructura, rehabilitar la existente o mejorar la operación con tecnología de punta.

Existen diferentes tipos de acuerdo con la tecnología o mecanismo interno que utilicen para contabilizar el consumo, entre ellos los mecánicos, volumétricos, electromagnéticos y ultrasónicos (Ibidem). Los mecánicos son los más utilizados comúnmente, y se subdividen en:

- Medidor de chorro único: Consiste en un rotor de turbina que gira alrededor de su propio eje, perpendicularmente al flujo del agua que pasa dentro del cuerpo del medidor. El flujo solo incide en un único punto sobre la periferia del rotor. La cantidad de vueltas al final de un periodo se asociará al volumen total que la turbina permitió pasar a través del medidor.
- Medidor de chorro múltiple: Posee el mismo mecanismo interno que el chorro único, pero el flujo es dispersado e impacta en varios puntos la periferia del rotor.
- Medidor de tipo hélice: En su interior consta de un rotor con álabes helicoidales que gira alrededor del eje del flujo interno del medidor.
- Medidor de velocidad: Medidor con un dispositivo inmerso que adquiere la misma velocidad del flujo y la traslada a un contador externo.

El medidor electromagnético y ultrasónico poseen un funcionamiento distinto, que fue explicado en la Sección 2.2.1.1. Igualmente fueron expuestos los criterios de selección para los macromedidores, que aplican de igual manera para los micromedidores.

Además, es deseable que el micromedidor cuente con la capacidad de detectar fugas en tuberías intradomiciliarias. Esta función extra consiste en reportar una alarma visual en pantalla cuando haya transcurrido un periodo mayor a 24 horas y el conteo de caudal no haya cesado por completo.

Los hidrómetros más comunes para diámetros entre 13 mm y 38 mm son los medidores mecánicos de chorro múltiple, que son menos sensibles y de menor costo. Mientras que, para diámetros iguales o superiores a 50 mm, los medidores electromagnéticos o ultrasónicos son más utilizados por su mayor precisión desde el rango de caudal mínimo hasta el máximo (López ,1995).

2.2.1.3. Presión

La mayoría de los sistemas de abastecimiento de agua potable funcionan bajo la teoría de flujos a presión. Es decir, los conductos se encuentran totalmente sellados y aislados del entorno, por lo que se mantiene una presión interna dentro de las tuberías distinta a la atmosférica y, bajo la suposición de que el agua posee el comportamiento de un fluido no compresible y permanente, resulta posible aplicar las ecuaciones de conservación de la energía entre distintos puntos de un sistema.

La ecuación de conservación de la energía se describe como:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g}\right) - H_f = \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}\right) \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

z_1, z_2 = Elevación de la conducción en las secciones 1 y 2 (m)

p_1, p_2 = Presión interna en las secciones 1 y 2 (N/m²)

γ = Peso específico del líquido (N/m³)

V_1, V_2 = Velocidad en las secciones 1 y 2 (m/s)

g = Gravedad (m/s²)

H_f = Pérdidas de energía (m)

En esta ecuación es posible determinar tres componentes globales que conforman la energía total del fluido: z que representa la carga energética de acuerdo con la posición del objeto con respecto a un punto de referencia, usualmente el nivel del mar, $\frac{p}{\gamma}$ que representa la carga de presión y $\frac{V^2}{2g}$ que representa la carga de velocidad o energía cinética del flujo.

A la suma parcial de los términos de carga por posición y presión ($z + \frac{p}{\gamma}$) se le denomina energía piezométrica, mientras que a la carga de presión y la de velocidad ($\frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$) se le denomina

presión total. El término H_f en la mayoría de los casos se debe a las pérdidas que genera el rozamiento de las partículas del fluido contra las paredes de la tubería y contra sí mismas.

Una de las ecuaciones más utilizadas para la definición del cálculo de dichas pérdidas es la denominada, ecuación de Hazen-Williams:

$$H_f = 10,67 \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \frac{L}{D^{4,87}} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde:

- Q = Caudal (m^3/s)
- C = Coeficiente de Hazen-Williams
- L = Longitud entre las secciones 1 y 2 (m)
- D = Diámetro de la tubería (m)

El coeficiente C es un indicador de la rugosidad de la superficie de transporte y, por ende, será dependiente del material que compone la tubería.

De acuerdo con las Ecuación 1, detallada anteriormente, la presión de una sección 2 localizada aguas abajo de un tramo de tubería se verá afectada por las condiciones de la sección 1, pero principalmente por las pérdidas durante el recorrido que las separa. Por lo tanto, en el diseño de redes de conducción y distribución, las pérdidas definirán los parámetros requeridos de diámetro y material, necesario para garantizar la suficiente carga de energía (presión) en secciones aguas abajo.

La presión resulta el indicador principal de la calidad del servicio de suministro de agua. Tanto así que las normativas, además de exigencias en cuanto a calidad de potabilización, delimitan los valores máximos y mínimos de presión total que un ente operador debe acatar. Por ende, un constante monitoreo de la presión en las redes y conducciones no solamente favorece el control operativo, sino que responde a un carácter legal del préstamo del servicio.

A nivel nacional, las tuberías más utilizadas son las construidas con policloruro de vinilo (PVC). Dependiendo de la relación entre espesor de pared y diámetro de la tubería, factor denominado SDR, la tubería será capaz de soportar diferentes límites de presión. De la norma estadounidense ASTM D2241 se extrae el Cuadro 1 donde se especifica la presión máxima de trabajo para las distintas relaciones SDR disponibles en el mercado.

Cuadro 1. Presión nominal de trabajo para distintos SDR comunes en el mercado nacional

SDR	Presión nominal de trabajo (psi)	Presión nominal de trabajo (mca)
41	100	70,0
32,5	125	87,5
26	160	112,0
21	200	140,0
17	250	175,0
13,5	315	220,5

La normativa nacional (AyA, 2017) especifica claramente que está prohibido utilizar SDR 41 o mayores, por lo que la presión nominal de trabajo máxima de las tuberías de agua potable sería de 87,5 mca como mínimo. No obstante, esta misma norma exige una presión máxima, en zonas de topografía quebrada, de 70 mca. Una tubería sometida a una presión que supere los valores anteriores tiene altas probabilidades de sufrir roturas y generar fugas en las redes. Por lo que un parámetro tan importante como la presión debe ser tanto registrado como regulado.

Los aparatos para medir presión se dividen según, su funcionamiento, en tres tipos de sensores (Conagua, 2019a):

- a. De tipo Bourdon: Consiste en un tubo de sección transversal aplanada con un extremo abierto y empotrado, mientras el otro se encuentra cerrado y libre para el movimiento. A este conducto se le da una forma curva, ya sea tipo C, en espiral o helicoidal, según los rangos de presión que quieran ser medidos. Al aumentar la presión dentro del tubo, se ejerce una fuerza sobre el extremo libre que busca enderezarse, lo que genera un desplazamiento que es directamente proporcional a la presión aplicada.
- b. De diafragma: Consiste en un disco, metálico o plástico, fabricado con corrugaciones circulares concéntricas. Este elemento se acopla dentro de una caja metálica de manera

que divide por completo la caja en dos compartimentos, uno de ellos abierto a la presión atmosférica y el otro con entrada del flujo a medir. La diferencia de presión genera una deformación en el diafragma, que en caso de ser metálico se encuentra calibrada y es proporcional a la presión aplicada, mientras que, en el caso de los diafragmas plásticos, la deformación es recibida por un resorte calibrado para esta función.

- c. Fuelle: Su funcionamiento es muy similar al Bourdon, pero en este caso el tubo es de sección circular completa y para permitir su flexibilidad se le fabrican una serie de corrugaciones en sus paredes.

Los manómetros pertenecientes a la clase a poseen un rango de medida entre los 0 y 70 000 kPa ($\approx 7\ 000$ mca), mientras que los de las clases b y c, entre los 0 y 7 000 kPa (≈ 700 mca).

Los diferentes sensores pueden ser instalados directamente en la red de distribución a través de pequeñas previstas, nipples o silletas. A pesar de esto, al igual que sucede con los macromedidores, un sensor de presión no es el único aparato necesario para mantener un registro constante, sino que se hacen necesarios transductores, que transformen la señal mecánica generada por el sensor en pulsos digitales, que sean captados por un tercer instrumento registrador. Sin estos complementos, los datos no tendrían la continuidad adecuada, los registros serían valores puntuales sumamente distanciados en el tiempo, que habría que obtener manualmente.

Para realizar un control eficaz de la presión, ingeniosamente el diseñador del sistema podría utilizar diferentes materiales, diámetros o accesorios para aumentar las pérdidas y, por lo tanto, reducir la presión. Pero, en sistemas antiguos ya construidos se hace necesaria la incorporación de válvulas de control hidráulico, que resultan elementos que se instalan en una red determinada, y sin variar el diseño hidráulico del sistema, sí modificarían su comportamiento.

Usualmente las válvulas se categorizan según la función que se necesita que desempeñen; de sectorización o corte, de expulsión o admisión de aire, de regulación del caudal y de regulación de la presión. Una única válvula podría incluso, cumplir varias de estas labores a la vez.

El modelo más utilizado entre las válvulas reguladoras de presión es la reductora. Su función es, como su nombre lo indica, reducir la presión entrante a una constante aguas abajo,

independientemente de la magnitud o cambios que existen aguas arriba de ella (Conagua, 2019c).

Su funcionamiento es bastante sencillo y sigue el principio de la Ecuación 1. La válvula en su interior posee una única apertura por la que pasa el fluido, esta apertura puede ser cerrada parcialmente mediante un vástago ascendente accionado por un simple tornillo. Cuando el paso del agua al interior se ve reducido, el área se minimiza y el caudal debe mantenerse invariable pues no existen pérdidas físicas. A su vez, ocurre un aumento súbito de la velocidad del flujo y, consecuentemente, para que la energía del conjunto se mantenga constante, ocurrirá una reducción en la presión aguas abajo.

En sitios de topografías complicadas, la instalación de válvulas reductoras se debe hacer en cascada, una tras otra sobre una misma línea de tubería porque no es aconsejable que una sola válvula realice reducciones de gran magnitud. Lo recomendable es que los valores de presión de entrada y de salida, guarden una relación de 3 a 1, es decir, que el rango de reducción total sea de una tercera parte de la condición aguas arriba. Aunque la práctica ideal es el acatamiento del rango de trabajo descrito en la ficha técnica de la válvula (Dorot, 2019).

Realizar una gestión adecuada de la presión trae consigo un beneficio adicional: la reducción de las pérdidas reales de agua. Disminuir presiones excesivas e innecesarias reduciría la cantidad de roturas dentro de las redes de distribución, además de disminuir el caudal que se pierde cuando se presenta una fuga. Es importante destacar que las fugas no son solo aquellas que se observan a simple vista sobre la carretera, o que son reportadas por los usuarios, sino las que permean a través del terreno o aquellas que se presentan como un leve goteo apenas perceptible (GIZ & VAG, 2010).

$$L_1 = L_0 \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^\alpha \quad \text{Ecuación 3}$$

donde:

L_1 = Caudal de fuga a presión ajustada P_1

L_0 = Caudal de fuga inicial a presión P_0

P_1 = Presión promedio ajustada de la zona

P_0 = Presión promedio inicial de la zona

α = Exponente de fuga (entre 1 y 2,5 para redes de distribución)

Si se observa la Ecuación 3 se notará que, por ejemplo, al disminuir a la mitad la variable P_1 y mantener los demás valores constantes, el término $\frac{P_1}{P_0}$ se reducirá también a la mitad, mientras que si α toma un valor de 2, el caudal de fuga ajustado L_1 correspondería apenas a una cuarta parte del caudal inicial que se perdía por la misma rotura.

Por lo tanto, sobran las razones por las que todo sistema de agua potable debería contar con puntos definidos para la medición constante de la presión, tanto en puntos donde se esperarían presiones altas, bajas e intermedios, además de contar con estrategias adecuadas para el control de esta propiedad hidráulica.

2.2.2. Sistema comercial

El sistema comercial tiene la responsabilidad de realizar la promoción y venta de los servicios, de manera eficiente, así como la recaudación respectiva con el fin de adquirir los ingresos necesarios para el buen funcionamiento del organismo operador y su autosuficiencia financiera. A su vez, esta ventaja le permitiría contar con los recursos necesarios para ampliar la cobertura del servicio y continuar con la inversión en el acueducto.

Para que un sistema comercial sea una herramienta eficiente debería poder concretar los siguientes objetivos:

- Micromedidores domiciliarios correctamente dimensionados e instalados
- Personal honesto y capacitado que realice las lecturas de los medidores
- Laboratorio, propio o subcontratado, que se encargue de la revisión y mantenimiento eventual de los medidores
- Plan tarifario adecuado a la realidad socioeconómica de los usuarios
- Sistema de facturación y cobro adecuado
- Catastro o padrón de usuarios confiable y actualizado
- Base de datos de los micromedidores actualizada

Estas tareas deben ser asignadas a los cuatro ejes principales en que se divide un sistema comercial: comercialización de servicios, medición del consumo, catastro comercial y facturación y cobranza (Conagua, 2019e).

2.2.2.1. Comercialización de los servicios

Este subsistema es uno de los encargados del contacto directo con los usuarios. Representa el **área de "ventas" de la empresa, que busca expandir el mercado actual y brindar soporte a los inconvenientes que surjan entre operador y cliente.**

Se debe encargar de las solicitudes de nuevos servicios, que deben ser analizadas tomando en cuenta gran cantidad de aspecto, entre ellos:

- a) Técnicos: capacidad hidráulica del sistema, presión de servicio suficiente, tipo de micromedidor según el caudal solicitado, cobertura del sistema y viabilidad de acuerdo con la ubicación del bien inmueble.
- b) Económicos: costo de la instalación de la acometida, costo de la instalación del servicio, tarifa aplicable a la solicitud y capacidad de pago del usuario.
- c) Normativos: permisos de construcción vigentes, permisos ambientales, estimación del consumo solicitado, regulación de desarrollos urbanísticos, información catastral de la propiedad, etc.
- d) Administrativos: presentación y acuerdo del contrato de servicio.

Los procesos, incluidos en el contrato, sobre la suspensión temporal de un servicio por impago y la reconexión de esta toma deben ser tarea de este subsistema. Igualmente, velar también por la atención de quejas o reclamos que los usuarios presenten en cuanto a calidad o continuidad del servicio.

A través de este departamento el usuario canalizará sus inconvenientes con respecto a fugas, cortas, reconexiones, problemas en el cobro, sobrestimación del consumo, entre otros. Mientras que el ente operador los recibirá, los almacenará con el fin de obtener estadísticas e indicadores del funcionamiento comercial y los trasladará al equipo operativo con el fin de que se solucionen físicamente en los casos en que aplica.

Finalmente, esta unidad deberá velar por la atención oportuna, según los periodos establecidos en el contrato, de las soluciones solicitadas al equipo operativo.

2.2.2.2. Medición del consumo

El área destinada a la medición de consumo será el encargado de establecer una metodología sistemática para determinar el volumen de todos los usuarios del sistema dentro de un periodo de facturación determinado. A su vez, le corresponde retroalimentar a los demás subgrupos comerciales pues serán los funcionarios que tendrán un contacto directo con los aparatos medidores y los inmuebles a los que se les presta el servicio.

Para lograr este objetivo, deberá contar con un mecanismo de lectura eficiente del consumo registrado por los micromedidores. Se puede utilizar la lectura directa, en la que una serie de colaboradores se movilizan servicio por servicio, dentro de una determinada zona, leyendo y transcribiendo el valor de consumo otorgado por los hidrómetros. La captura de este dato podría realizarse a través de una hoja y papel o mediante un dispositivo móvil (*hand held*) en el que se digitaliza la lectura y es enviada, por medio de redes telefónicas, a las oficinas del operador.

Estos métodos poseen un grado importante de error humano, que debe valorarse mediante políticas de subsanación. Por ejemplo, es muy frecuente que, debido al tamaño de los numerales del hidrómetro, se incurra en una lectura errónea que debe corregirse mediante una orden de relectura o mediante la ponderación del consumo de acuerdo con registros históricos para ese servicio en específico. Otras metodologías, como los medidores inteligentes de envío automático de las lecturas a una central, evitarían estos inconvenientes, pero requieren de una alta inversión.

Otra tarea para este departamento es la división del sistema en rutas de lectura. Estas corresponden a agrupaciones de medidores que se asignan al personal de lectura, de manera que el trabajador pueda realizar un traslado eficiente a través de ellas y recopilar la totalidad de los datos en una jornada de trabajo. Las rutas se determinan comúnmente de acuerdo con la localización o el tipo de usuario. Es una práctica ideal que los mayores consumidores detectados en un sistema cuenten con su propia ruta de lectura (Conagua, 2019a).

2.2.2.3. Catastro comercial

El catastro se destinará a registrar y almacenar las bases de datos comerciales necesarias para que los demás subsistemas realicen adecuadamente sus labores. La información usual de un

sistema comercial puede ser almacenada principalmente en dos bases de datos: una que almacene todos los servicios y otra que recopile las características de todo el parque de medidores.

La base de datos de servicios debe almacenar atributos como:

- Número de identificación de servicio.
- Número de hidrómetro.
- Georreferenciación (coordenadas de latitud y longitud).
- Propiedad (acorde con catastro estatal o municipal).
- Nombre del propietario del servicio.
- Número de identificación del propietario.
- Clase tarifaria.
- Medios de contacto (teléfono, correo electrónico).
- Ruta de lectura asignada.
- Barrio o localidad.
- Historial de medidores instalados.
- Registro histórico de consumos.

Por otro lado, los atributos del parque de medidores deben referirse a las condiciones técnicas del aparato medidor. La Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP) dictaminó en el **año 2008 la "Norma Técnica: Hidrómetros para servicio de acueducto"** en la que estandariza las características de los hidrómetros que deben ser utilizados por algunos operadores del servicio de agua potable en Costa Rica. En cuanto al parque de medidores sugieren abarcar como mínimo los siguientes atributos:

- Fabricante.
- Modelo.
- Clase metrológica.
- Número de serie.
- Caudal nominal.
- Diámetro.
- Número de expediente del proceso de adquisición.
- Fechas de instalación, reinstalación y retiro.

- Lecturas de instalación, reinstalación y retiro.
- Motivos del retiro del hidrómetro.
- Caudal promedio de la conexión donde se instaló.

Es valioso destacar que ambos registros de información (de usuarios y de medidores) deben tener la capacidad de compenetrarse y actualizarse de manera conjunta. La forma más sencilla de unificar estas dos bases de datos es mediante el número de hidrómetro o número de serie, que se mantiene invariable a lo largo del tiempo y es un atributo indispensable en ambos grupos de datos.

Para el correcto ordenamiento de estas bases de datos y el enlace con demás información operativa del sistema la utilización de tecnologías SIG es una poderosa herramienta. La georreferenciación de los usuarios y sus medidores facilitaría enormemente las labores del subsistema de medición de consumos en la determinación de las rutas de lectura, por ejemplo.

2.2.2.4. Facturación y cobranza

Como parte de las funciones de este eje del sistema comercial se incorpora principalmente la atención al cliente, ya que son los encargados de procesar los cobros y sus respectivos pagos para cada usuario del acueducto. Según Conagua (2019e) entre sus ocupaciones se destaca:

- Mantener un registro actualizado de todas las cuentas de los usuarios activos.
- Obtener, del subsistema de medición de consumos, las lecturas correspondientes a cada servicio, calcular el volumen utilizado y su tarifa correspondiente.
- Emitir facturas o avisos periódicos con los importes a ser cobrados, a través de los medios de comunicación almacenados en la base de datos de servicios del subsistema de catastro comercial.
- Mantener un seguimiento a las deudas no pagadas oportunamente, de acuerdo con el reglamento establecido por el subsistema de comercialización de los servicios.
- Desarrollar indicadores financieros de utilidad para la administración del acueducto sobre las recaudaciones totales, por periodo, por tipo de usuario, sobre cuentas con impago, costo medio del m³ facturado, etc.

Si la información necesaria para realizar los procesos de facturación y cobro, que es aportada por los demás subsistemas, es de calidad, la recaudación del sistema tendrá una alta eficiencia, lo que generará la sostenibilidad en el tiempo de todo el sistema comercial.

2.3.Demanda del servicio de agua potable

Para realizar un diseño adecuado de un acueducto es necesario conocer el caudal que será transportado por las tuberías en cada una de las etapas del sistema de abastecimiento. Este caudal estará directamente relacionado con el consumo humano individual, que se conoce también con el nombre de dotación. La dotación se expresa usualmente en litros por habitante por día.

La determinación del consumo humano total se debe realizar según datos estadísticos de consumo pasado y presente de la población (en el caso de que se cuente con esta información), sino podría basarse en datos de poblaciones cercanas que compartan características similares en cuanto a los factores determinantes del consumo. Según López (1995), los factores determinantes son:

- Temperatura de la región: La mayoría de las actividades humanas utilizarán más agua conforme la temperatura aumente. Por ejemplo, el aseo personal será más frecuente, se beberá más agua, se emplearán sistemas de aire acondicionado y el riego de jardines será más intenso.
- Calidad del agua: La certeza de que el agua proviene de fuentes confiables y cuenta con los parámetros de calidad adecuados, hará crecer el consumo humano.
- Características sociales y económicas: El consumo depende en buena parte del nivel de educación e ingresos de las comunidades. Comúnmente en pequeños poblados el volumen utilizado es mucho menor al de grandes ciudades.
- Presión en la red de distribución: Las altas presiones generarán mayores desperdicios en el consumo doméstico al abrir las llaves de lavamanos, regaderas o mangueras para lavar el auto. Igualmente se puede presentar un mayor número de rupturas con altos caudales de fuga.
- Medidores y tarifas: La implementación de medidores reduce drásticamente el consumo poblacional, así mismo la implementación o alza de las tarifas.

Finalmente, si no se contara con estadísticas de poblaciones vecinas, con similitud en los factores presentados anteriormente, deberán utilizarse valores típicos de dotaciones humanas, que han sido puntos de investigación importantes por entidades que estudian o regulan los sistemas de abastecimiento de agua potable a lo largo de todo el mundo.

2.3.1. Dotaciones

2.3.1.1. Uso humano

La Norma Técnica para Diseño y Construcción de Sistemas de Agua Potable, de Saneamiento y Pluvial define, como método principal, la utilización de datos reales sobre patrones de consumo y demandas de la localidad en estudio. Como segunda opción, la utilización de distintas dotaciones según el tipo de población (AyA, 2017):

- a. Costeras: 375 lpd
- b. Urbanas: 300 lpd
- c. Rurales: 200 lpd, en caso de zonas rurales cerca de la costa, debe aplicarse la dotación para poblaciones costeras.
- d. Área metropolitana: 375 lpd

Es importante resaltar que las dotaciones que se indican corresponden a consumo humano, por lo que no aplicaría para necesidades que utilizan el agua como materia prima o insumo de procesos industriales, agroindustriales u otros.

2.3.1.2. Agrícola

El Departamento de Aguas, junto con el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) desarrollaron, en el año 2004, un Manual Técnico que pretende dotar de herramientas al público en general para realizar la determinación de sus requerimientos de agua en las diferentes actividades o proyectos. Además, define las condiciones técnicas bajo las cuales será evaluada toda solicitud de concesión para la resolución del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE).

Este documento propone una metodología para el cálculo de las dotaciones para riego basada en las necesidades consuntivas de los cultivos y sus características de retención del agua. Para ello, inicialmente se calcula un valor de evapotranspiración real representativo de la zona de estudio.

Según Chow (1994), la evapotranspiración es la combinación de los efectos de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. Este fenómeno se ve dominado por los mismos principios que rigen la evaporación en cualquier otra superficie; el suministro de energía y el transporte de vapor. Además, debe considerarse el suministro de humedad a la superficie. Para ciertas condiciones climáticas dadas, la tasa básica se calcula de acuerdo con el "cultivo de referencia", que representa la tasa de evapotranspiración desde una superficie extensa cubierta de pasto verde de altura uniforme entre 8 y 15 cm que crece de forma normal, cubre completamente el suelo con su sombra y no carece de agua.

Por lo tanto, la evapotranspiración de cualquier otro cultivo se obtiene multiplicando la evapotranspiración del cultivo de referencia por un coeficiente de cultivo (K), cuyo valor cambia con el estado de crecimiento de este último, y varía normalmente entre 0,2 y 1,3 (Chow, 1994).

Este mismo principio es aplicado en la norma técnica, la cual presenta la siguiente metodología para el cálculo del caudal requerido para riego:

- a. Inicialmente se determina con la Ecuación 4 la evapotranspiración para la región en estudio.

$$Et_0 = \frac{(2120 - 0,294 * h)}{360} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde:

- Et_0 = Evapotranspiración (mm)
- h = Elevación del sitio en estudio sobre el nivel del mar (m)

- b. Posteriormente, el uso consuntivo o evapotranspiración del cultivo en estudio se calcula de acuerdo con la Ecuación 5.

$$U_c = K * Et_0 \quad \text{Ecuación 5}$$

donde:

- U_c = Uso consuntivo (mm)
- Et_0 = Evapotranspiración (mm)

K = Coeficiente de consumo para los cultivos

Algunos de los valores para el coeficiente K se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Coeficientes K para diferentes cultivos típicos de Costa Rica.

Cultivo	Coeficiente K
Aguacate	0,53
Arroz	1,05
Banano	0,90
Cacao	0,73
Café	0,75
Caña de azúcar	0,85
Cebolla	0,90
Frijoles	0,65
Frutales	1,00
Hortalizas	0,70
Maíz	0,70
Papa	0,70
Tomate	0,70
Tubérculos	0,70

Fuente: Manual Técnico del Departamento de Aguas, 2004

- c. De acuerdo con la eficiencia del método utilizado para el riego de las plantaciones, se calcula el Módulo de Riego (Ecuación 6).

$$M_r = \frac{U_c}{Ef} * 0,116 \quad \text{Ecuación 6}$$

donde:

- M_r = Módulo de riego (l/s/ha)
 Ef = Eficiencia del sistema de riego
0,116 = Factor de conversión de unidades

Las eficiencias para distintos tipos de riego son:

- Aspersión o presurizado = 70%

- Microaspersión = 70%
- Goteo = 90%
- Gravedad = 50%

d. Finalmente, el caudal de riego se obtendría mediante el módulo de riego y el área total del cultivo sembrado (Ecuación 7).

$$Q = M_r * A \quad \text{Ecuación 7}$$

donde:

Q = Caudal de riego (l/s)

M_r = Módulo de riego (l/s/ha)

A = Área de riego (ha)

Adicional a esta información, el documento especifica las dotaciones típicas para los abrevaderos, lavado de instalaciones agropecuarias y algunas otras actividades industriales.

2.3.2. Demanda futura

Con el fin de determinar el consumo que tendrá la población en el año de diseño usualmente se conservan las dotaciones, tal y como se explicaban en la sección anterior, pero se varía la población de acuerdo con metodologías de proyección. Es importante destacar que los diferentes métodos deben utilizar como base la información real de censos detallados, a nivel de región o pueblo, en el caso de Costa Rica, a nivel de distrito. Es recomendable utilizar toda la información demográfica histórica disponible, con el fin de aumentar la precisión de las proyecciones.

Algunos de los métodos más comunes y sencillos se muestran a continuación. Sus expresiones matemáticas utilizarán la siguiente simbología:

P_{ci} = Población del censo inicial

T_{ci} = Año del censo inicial

P_{uc} = Población del último censo realizado

- T_{uc} = Año del último censo realizado
- P_t = Población del tiempo proyectado
- t = Año de la proyección
- k = Pendiente de la recta
- r = Tasa de crecimiento

- a. Crecimiento aritmético: Este método sugiere la adición de un número fijo de habitantes para cada periodo en el futuro. Resulta representativo para pequeñas localidades en especial rurales, o ciudades grandes con crecimiento muy estabilizado y que poseen áreas de futuro desarrollo prácticamente nulas (Corcho y Duque, 1993). Se obtiene mediante la Ecuación 8.

$$P_t = P_{uc} + k(t - T_{uc}) \quad \text{Ecuación 8}$$

donde:

$$k = \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}} \quad \text{Ecuación 9}$$

- b. Crecimiento geométrico: El crecimiento geométrico si es dependiente del tamaño de la población; conforme la población aumenta su tamaño, el crecimiento disminuirá (López, 1995). Esta proyección se calcula según la Ecuación 10.

$$P_t = P_{uc}(1 + r)^{t - T_{uc}} \quad \text{Ecuación 10}$$

donde:

$$r = \left(\frac{P_{uc}}{P_{ci}}\right)^{\left(\frac{1}{T_{uc} - T_{ci}}\right)} - 1 \quad \text{Ecuación 11}$$

- c. Crecimiento exponencial o logarítmico: Es muy semejante al geométrico, sin embargo, asume el tiempo como una variable continua, estimando así una tasa instantánea. Resulta útil en aquellas ciudades que no han alcanzado su desarrollo por completo y crecen manteniendo un porcentaje uniforme (Corcho y Duque, 1993). Su expresión matemática se muestra en la Ecuación 12.

$$P_t = P_{uc} * e^{rt}$$

Ecuación 12

donde:

$$r = \frac{\ln\left(\frac{P_{uc}}{P_{ci}}\right)}{T_{uc} - T_{ci}}$$

Ecuación 13

Existen gran cantidad de metodologías adicionales, no obstante, necesitan de más de dos censos poblacionales anteriores para su estimación. En Costa Rica el Instituto Nacional de Estadística y Censos presenta la información de censos con cobertura nacional realizados cada diez años, y su primera intervención fue realizada en el año 2000, por lo que a la fecha se cuenta con apenas dos estudios detallados de la demografía del país.

2.3.3. Calidad del agua potable

2.3.3.1. Métodos de desinfección

La desinfección, en la mayoría de los acueductos rurales, se aplica como único tratamiento de aguas naturales (ya sean subterráneas o de manantial) para garantizar principalmente la ausencia de indicadores de contaminación fecal entre el punto de aplicación y la entrega al usuario. Sin embargo, la desinfección debe contar con la capacidad de combatir contaminantes eventuales a través de todo el sistema de distribución.

Mora (2011) desarrolla, en su tesis de obtención del grado de licenciatura, una evaluación de las principales tecnologías de cloración existentes en el mercado nacional. Toma en cuenta los beneficios económicos de adquisición, de transporte, aplicación y eficacia, así mismo los posibles problemas o puntos débiles de cada metodología. Las principales metodologías utilizadas en el país son:

a. Cloro – Gas

Consiste en la disolución del cloro gaseoso (Cl_2) en un flujo pequeño de agua y posteriormente la inyección de esta solución a todo el volumen restante. El cloro reacciona con el agua y forma ácido hipocloroso (HOCl) y ácido clorhídrico (HCl). El HOCl se descompone, y el ion resultante de hipoclorito (ClO^-) es el agente que cumple realmente la tarea de desinfección. El ácido

clorhídrico generado por la reacción, que representa el 50% de la concentración de cloro inicial, no es un agente desinfectante por lo que la eficiencia de la reacción es muy baja.

Este método requiere de energía eléctrica para su operación y un lugar seguro, libre de humedad, para el almacenamiento del cloro gaseoso. No es recomendable para sistemas que traten caudales menores a 500 m³/día, ni para sistemas de abastecimiento muy pequeños pues su instalación, capacitación del personal y operación adecuada es muy costosa.

b. Hipoclorito de sodio

Este sistema consiste en la producción de hipoclorito de sodio mediante un proceso electrolítico simple y seguro a partir de una solución de salmuera. La salmuera se prepara adicionando una cantidad adecuada de sal al agua. A continuación, se introduce una corriente eléctrica en la celda con salmuera, causando la disociación de la sal (NaCl) y el agua (H₂O), y la consiguiente formación de hipoclorito de sodio y gas hidrógeno como subproducto.

Su costo es de intermedio a elevado para un sistema hidráulico rural. Además, requiere un mantenimiento adecuado a la celda para que no llegara a fundirse y también es indispensable la energía eléctrica en el sitio de dosificación. Finalmente, su instalación, calibración y puesta en marcha resulta una tarea de cierta complejidad.

c. Hipoclorito de calcio en pastillas

La reacción de degradación de las pastillas produce la hidrólisis del hipoclorito de calcio. A su vez generará ácido hipocloroso (HOCl) que realizará la neutralización de compuestos orgánicos e inorgánicos, completando el tratamiento necesario para la producción de agua de calidad potable. La dosificación se realiza a través de cloradores diseñados calibrados para la liberación del hipoclorito de calcio al 65% de cloro disponible.

La eficiencia de este método radica en que los dosificadores de erosión disuelven gradualmente las tabletas de hipoclorito a una tasa predeterminada mientras fluye una corriente de agua alrededor de ellas. Este mecanismo proporciona la dosificación necesaria de cloro para desinfectar el agua, y a medida que las tabletas se van diluyendo, se reemplazan con otras nuevas que caen por gravedad en la cámara.

Sin embargo, la efectividad de este método no es destacable pues la dosificación no siempre sigue un patrón constante. Necesita de una calibración sumamente específica y constante que garantice su efectividad de desinfección. Además, esta tecnología podría presentar incrustaciones en las tuberías.

d. Hipoclorito de calcio en forma granular

Este método es similar al presentado anteriormente, sin embargo, la adición del hipoclorito debe realizarse a través de dosificadores volumétricos o gravimétricos, que dejan caer una cantidad medida (en volumen o peso) en un pequeño tanque de disolución, que luego es adicionado al flujo del agua de consumo humano. La utilización de este sistema no es muy común, pues para poblaciones de gran tamaño es preferido el método de Cloro – Gas, mientras que para comunidades pequeñas es mucho más versátil la dosificación a través de pastillas.

Para un correcto funcionamiento, se requiere realizar gran cantidad de pruebas de cloro residual deseado, tanto en el tanque como en la red, y asociar este valor a la dosificación. No obstante, gran cantidad de factores externos podrían afectar los valores de la calibración.

2.3.3.2. Reglamento para calidad del Agua Potable en Costa Rica

El Ministerio de Salud de Costa Rica es el organismo encargado de velar por que los distintos operadores de sistemas de abastecimiento cumplan con una serie de parámetros fisicoquímicos que garantizan su estándar de agua potable. Para ello, se estableció el Reglamento de Calidad del Agua Potable.

Este documento determina niveles específicos de control que deben seguir los operadores de acuerdo con el tamaño de la red que administran, más específicamente con la cantidad de usuarios abastecida. El programa de control al Nivel 1 deberá de ser desarrollado por todos los acueductos del país sin excepción. El Nivel 2 se considera necesario en aquellos sistemas que posean más de 10 000 habitantes, mientras que el Nivel 3 es aplicado en poblaciones mayores a 50 000 habitantes. Los diferentes niveles que estipula la norma se resumen en:

- El control de calidad básico (N1) evalúa la operación, el mantenimiento, el almacenamiento, y la distribución del agua potable a través de la cuantificación de: coliformes fecales, *Escherichia Coli*, color aparente, turbiedad, olor, sabor, temperatura, pH, conductividad y cloro residual libre o combinado.

- El segundo nivel (N2) amplía la inspección sanitaria de los puntos de abastecimiento y la red de distribución al incorporar parámetros adicionales como aluminio, calcio, cloruro, cobre, dureza total, fluoruro, hierro, magnesio, manganeso, potasio, sodio, sulfato y zinc.
- Así mismo, el tercer nivel (N3) complementa el estudio anterior con las mediciones de amonio, antimonio, arsénico, cadmio, cromo, mercurio, níquel, nitrato, nitrito, plomo y selenio.
- Finalmente, el último nivel (N4) corresponde a programas ocasionales en situaciones especiales, de emergencia o cuando inspecciones anteriores del Ministerio de Salud han identificado un riesgo eminente de contaminación.

Para el Nivel N1 se muestran los parámetros de calidad de más relevancia (Cuadro 3).

Cuadro 3. Parámetros de calidad del agua para el nivel de control N1

Parámetro	Unidad	Valor recomendado	Valor máximo admisible
Coliforme Fecal	NMP/100 mL o UFC/100 mL	Ausente	Ausente
Escherichia Coli	NMP/100 mL o UFC/100 mL	Ausente	Ausente
Temperatura	°C	18	30
pH	Valor de pH	6,5	8,5
Conductividad	µS/cm	400	-
Cloro residual libre	mg/L	0,3	0,6
Cloro residual combinado	mg/L	1,0	1,8

Fuente: Reglamento de Calidad de Agua Potable, 2005

Los puntos de dosificación de desinfectantes son exigidos a la salida de los procesos de tratamiento de las plantas. Además, los puntos de redesinfección pueden ser:

- Al final de una línea larga de alimentación dentro del sistema de distribución.
- En un punto donde la tubería principal deriva agua hacia otra comunidad próxima.
- En un punto del sistema donde exista una estación de bombeo y en un tanque de almacenamiento.

Los puntos de recolección de las muestras de calidad deberán cumplir las siguientes indicaciones:

- Deben ser seleccionados de modo que sean representativos de las zonas de abastecimiento, iniciando con la fuente, almacenamiento y terminando en la red de distribución. El grifo de muestreo debe estar ubicado lo más cercano posible a la conexión domiciliaria, libre de la influencia de un posible tanque elevado propiedad del cliente.
- Deben ser uniformemente distribuidos en cada zona de abastecimiento.
- El número de muestras bacteriológicas y fisicoquímicas, en la red de distribución, debe ser proporcional al número de habitantes atendidos en cada zona de abastecimiento.
- Deben ser realizados en la salida de tanques, plantas de tratamiento, fuentes subterráneas, pozos, en la red primaria y secundaria.

Finalmente, la frecuencia de los muestreos dependerá del nivel de control y de la cantidad de habitantes que se abastecen del sistema, tal y como se ejemplifica en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Frecuencia mínima de análisis y número de muestras

Población abastecida (Base del cálculo 200 lpd)	Análisis N1^a		Análisis N2^b	Análisis N3^c
	Frecuencia / Número de muestras		Frecuencia / Número de muestras	Frecuencia / Número de muestras
	Fuentes	Redes		
Menos de 2 000	Semestral	Semestral/3	Anual/1	Anual/1
De 2 001 a 5 000	Trimestral	Trimestral/3	Anual/1	Anual/1
5 001 a 10 000	Mensual	Mensual/3	Semestral/1	Anual/1
10 001 a 15 000	Mensual	Quincenal/3	Semestral/1	Anual/1
15 001 a 20 000	Mensual	Quincenal/6	Semestral/1	Anual/1
Más de 20 000	Mensual	Quincenal/ ^d	Trimestral/1	Semestral/1
Más de 100 000	Mensual	Diario/ ^e	Trimestral/1	Semestral/1

Fuente: Reglamento de Calidad de Agua Potable, 2005

^a En cada visita se deberá recolectar muestras bacteriológicas en las fuentes, el almacenamiento y la red de distribución. Los puntos de análisis fisicoquímicos en la red de distribución son los mismos de los

bacteriológicos, pero con frecuencia semestral o trimestral, cuando se tenga identificada la línea base de calidad. El procedimiento de recolección en estructuras de almacenamiento debe asegurar la representatividad de la muestra.

^{b c} En estos niveles solamente se recolectan muestras en las fuentes de abastecimiento, a no ser que la inspección sanitaria lo establezca, para la red de distribución.

^d Una muestra adicional por cada 5 000 habitantes.

^e Una muestra adicional por cada 10 000 habitantes.

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Recopilación de información

Como primera fase para la realización del proyecto se llevó a cabo una recopilación de información útil para evaluar el funcionamiento actual del acueducto y los puntos de debilidad en dónde deben hacer énfasis las propuestas de mejora y el plan de gestión de riesgo. Para ello se recurrió a información básica propiedad de la Municipalidad con respecto al servicio brindado; lecturas de hidrómetros realizadas durante el año 2019 y 2020, detalles técnicos de las estructuras hidráulicas y registro de mediciones de cloro residual en bitácoras, etc.

Se realizó un análisis exhaustivo de la bibliografía y recursos existentes que suministraron información de importancia en las diversas áreas que abarca el estudio. Diferentes proyectos de graduación de las universidades estatales realizaron labores semejantes en ASADAS o acueductos rurales, incluso con metodologías muy similares.

La búsqueda de información sobre las actividades de agricultura y ganadería de la zona, de las que la Municipalidad de Alvarado prácticamente no tiene conocimiento, permitieron recopilar estudios agrícolas de contaminantes en el suelo y en zonas de recarga dentro de las cuencas en estudio.

Además, se consultó toda aquella normativa referente a la gestión del recurso hídrico que debe acatar una entidad autónoma prestadora del servicio como la Municipalidad de Alvarado.

Al finalizar la etapa de recopilación, se realizó un balance sobre la información disponible y aquella faltante. Se identificaron los puntos en que era necesario fortalecer, o del todo recopilar

la información mediante giras en campo, mediciones, georreferenciación o consulta a entes gubernamentales.

3.2. Levantamiento y análisis del sistema

En esta segunda etapa del proyecto, se procedió a obtener la información necesaria para desarrollar tanto el modelo hidráulico del sistema, como el Plan de Gestión del Riesgo. Los insumos de la modelación incluyen información de la infraestructura del acueducto y de los usuarios abastecidos y su tipología. Además, fueron necesarios parámetros iniciales para introducir al modelo como el volumen de almacenamiento del sistema, la producción de los manantiales captados, el consumo promedio de los servicios y la elevación sobre el nivel del mar de todos los puntos de interés del modelo.

Para obtener estos parámetros, se desarrollaron mediciones de la producción del recurso en las zonas de captación. Estas se realizaron mediante un caudalímetro ultrasónico portátil, modelo ChronoFLO 430 de la marca Hydreka, propiedad de la entidad ProDUS UCR. Cada una de las nacientes fue cuantificada con este dispositivo o con aforos manuales en los casos en que la configuración del sitio no permitiera su instalación. Con este mismo dispositivo se realizó una medición de la curva de demanda a la salida del tanque principal del sistema durante una semana completa. De esta forma se obtendrían datos confiables que proporcionarían la hora y día de la semana en que la demanda del recurso hídrico es máxima. Este punto fue considerado el escenario más crítico para el funcionamiento del acueducto, en cuanto a la demanda del recurso hídrico, y por lo tanto fue utilizado como base de la modelación.

Con el apoyo de los fontaneros de la Municipalidad, se procedió a realizar el levantamiento, mediante un dispositivo GPS, de aquellos puntos de infraestructura que no se encontraban dentro del catastro municipal; válvulas reguladoras de presión, tanques, válvulas de cierre y aproximadamente 700 servicios. Para cerrar esta etapa, se recurrió a las curvas de nivel a escala 1:5 000 y 1:25 000 de acceso público del Instituto Geográfico Nacional (IGN), a partir de las cuáles se obtuvieron las elevaciones de cada uno de los nodos que formarían el modelo hidráulico.

Toda la información adquirida fue almacenada en una base de datos SIG, que resultó de gran utilidad para su ordenamiento y traslado al software de modelación WaterGems. En este programa se desarrolló un modelo hidráulico estático que representaría la condición base, es

decir, la situación actual del acueducto. Esta condición base debía ser calibrada, por lo que se desarrollaron campañas de medición del caudal en puntos estratégicos de la red, así como mediciones de presión en las tomas domiciliarias mediante un manómetro de tipo Bourdon.

Una vez que la validación de los datos fue correcta, o sea, se obtuvo un grado adecuado de concordancia entre las mediciones y los parámetros resultado del modelo, se procedió a simular escenarios futuros que podrían representar el funcionamiento del acueducto municipal; se tomó en cuenta el crecimiento demográfico de la zona, que genera un aumento en la demanda, y la introducción de la micromedición, factor que variaría los hábitos de consumo de los usuarios. Se modelaron igualmente intervenciones en el sistema con el fin de solucionar los problemas hidráulicos que se presentaron en los distintos escenarios.

Cabe destacar que, conforme se visitaron los diferentes componentes de infraestructura del acueducto, se recopilaban fotografías y se llenaban fichas técnicas sobre el estado, el mantenimiento, la seguridad y los posibles riesgos a los que cada elemento podría estar sujeto, con el fin de elaborar el Plan de Gestión de Riesgo. Las herramientas de recolección de información en campo se basaron en las metodologías SERSA y Guías GIRA, del Ministerio de Salud y AyA.

Finalmente, gracias a la colaboración del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica, se contó con un medidor multiparámetros, modelo HI 9829 de la marca Hanna Instruments, para realizar mediciones de turbidez, conductividad, temperatura y pH. Además de un fotómetro, modelo HI 96734 de la misma marca, para las mediciones de cloro libre y residual. Estos datos corresponden una base importante para la definición del Plan de Seguridad del Agua.

3.3. Análisis de resultados y entregables

A partir de los resultados obtenidos de la etapa anterior y de su respectivo análisis se procedió a plantear aquellas propuestas de cambio en el sistema que pretenden asegurar su funcionamiento óptimo tanto actualmente como en el futuro. Dichas recomendaciones se dividirían en cuatro ejes con el fin de ser mejor atendidas por la Municipalidad: a) inversión en infraestructura b) en cuánto a la operación, control y mantenimiento del sistema, c) con respecto a la actualización comercial y administrativa y d) con respecto al plan de seguridad del recurso hídrico.

Dado que las inversiones en infraestructura debían ser acotadas claramente en su ubicación geográfica, estas fueron divididas según las zonas de presión existentes. Mientras que las demás recomendaciones se extenderían para todo el sistema en general. Para estructurar el Plan de Acción, todas las propuestas fueron organizadas por prioridad según su prioridad, al considerar el correcto funcionamiento hidráulico del sistema y la capacidad de inversión de la Municipalidad de Alvarado. De esta manera, se definieron tres horizontes de inversión: el corto, mediano y largo plazo.

Los entregables finales para la Municipalidad de Alvarado serán: los registros completos SIG, el modelo hidráulico, el Plan de Seguridad del Agua y finalmente el Plan Estratégico de Inversión.

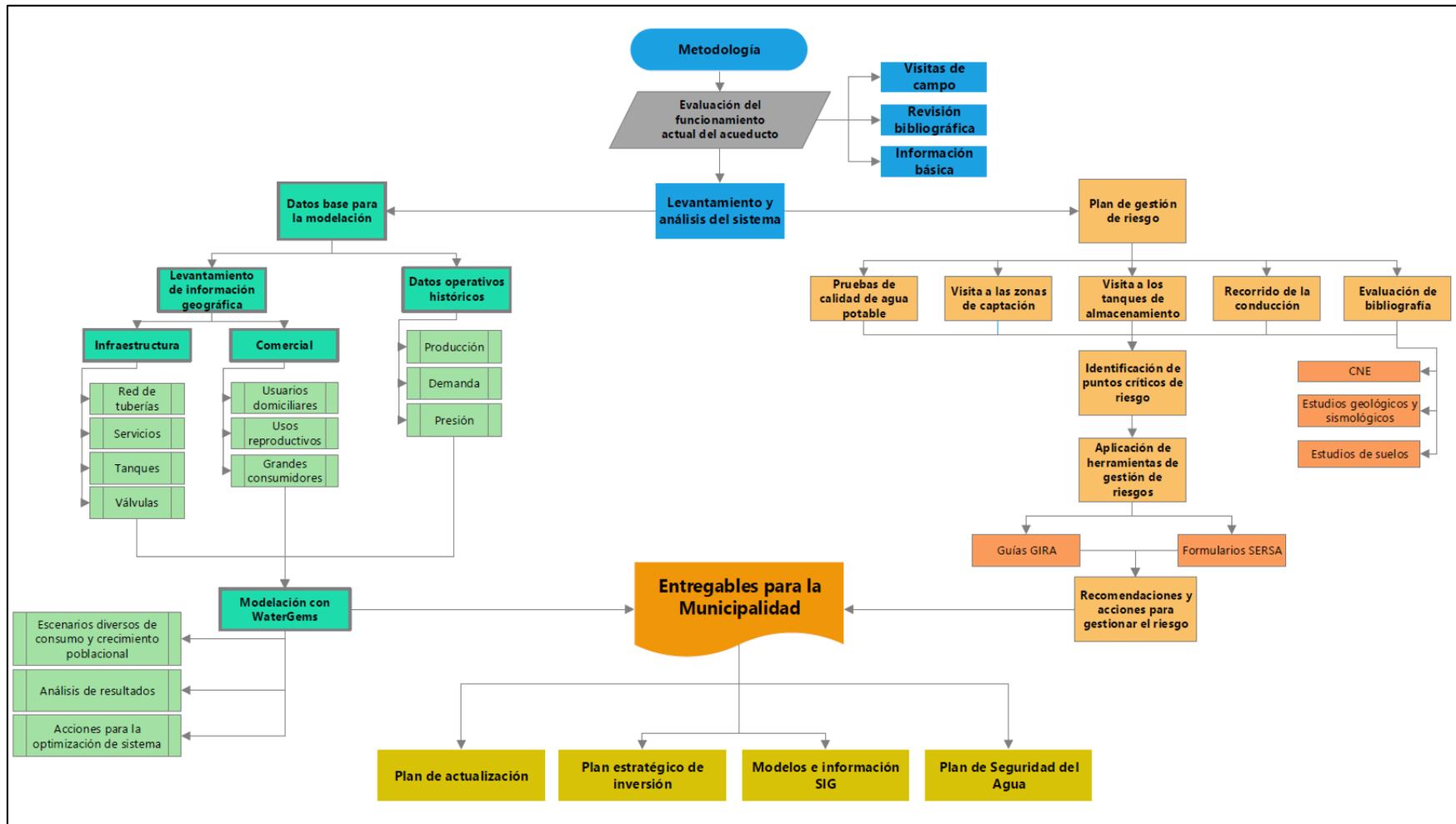


Figura 2. Metodología del proyecto.

CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN DEL ACUEDUCTO DE PACAYAS

4.1. Caracterización de la zona de estudio

Alvarado corresponde al cantón número seis de la provincia de Cartago y el segundo más pequeño en extensión territorial. Se sitúa al noroeste de la provincia y colinda al noroeste con el cantón de Oreamuno, al noreste con Turrialba, al sur con Paraíso y al oeste con el cantón de Jiménez.

Pacayas, como cabecera de cantón, posee un área de 30,39 km² y una población de 5800 habitantes aproximadamente. Se encuentra a 17 km del centro de Cartago y a 35 km de San José a través de carreteras principales y secundarias. La Figura 3 muestra las divisiones territoriales de la provincia, cantón y distrito donde se localiza el acueducto en estudio.

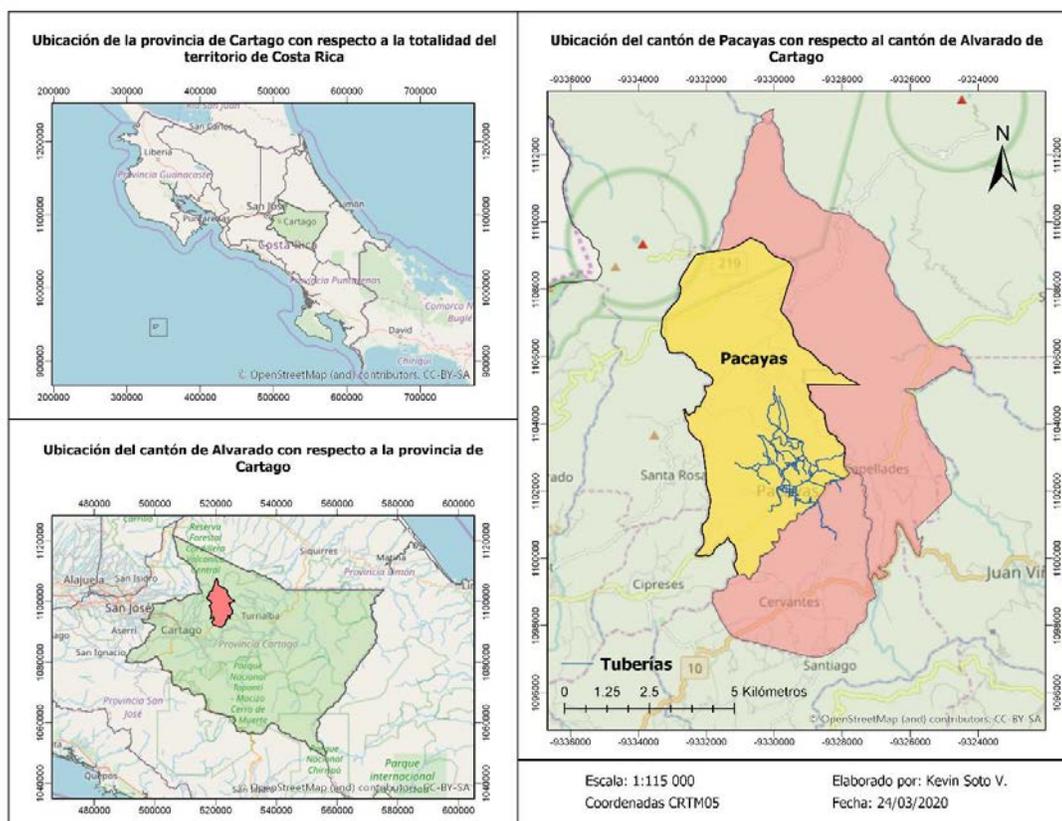


Figura 3. Provincia, cantón y distrito donde se ubica el acueducto en estudio

Fuente: Atlas Digital del Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2014

El sistema de agua potable de Pacayas se divide en dos subsistemas principales: el Subsistema Este, que incluye los poblados de Lourdes, Patalillo, Encierrillo, Buenos Aires, Las Gallinitas, Los Brenes, El Descanso y Villas del Bosque, y el Subsistema Oeste que incorpora los poblados de Los Gómez, Llano Grande y Los Ángeles (ver Figura 4).

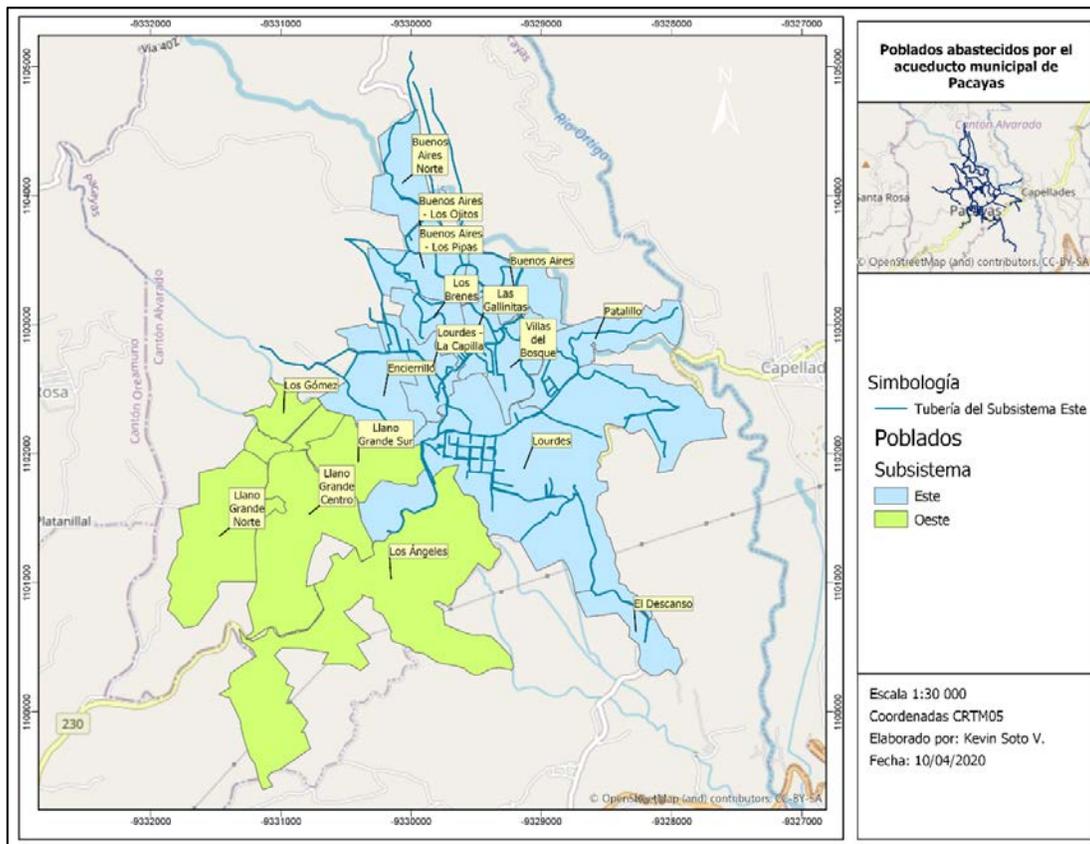


Figura 4. Poblados que componen los subsistemas del acueducto de Pacayas

Fuente: Información geográfica de la Municipalidad de Alvarado

El área de estudio de esta investigación será el Subsistema Este, que representa prácticamente un 80% del acueducto de Pacayas. Dado que no existe conexión entre las estructuras hidráulicas de ambos subsistemas, es posible independizar su estudio y su modelación.

Para mayor facilidad y comprensión, dentro del documento se referirá con el nombre “acueducto de Pacayas” a la zona de alcance del proyecto, es decir solamente el Subsistema Este,

4.1.1. Clima

El clima de la zona es sumamente cambiante. Se puede describir como mayormente lluvioso, nublado y con presencia de neblina. Las temperaturas suelen ser bajas y se presenta una marcada estacionalidad entre la época seca y lluviosa.

Respecto a la precipitación, de acuerdo con los datos climáticos aportados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) provenientes de la estación meteorológica de Pacayas, se afirma que el distrito cuenta con un promedio anual de 2277,6 mm, de los cuáles, marzo representa el mes más seco con apenas 66,2 mm mientras que octubre aporta 275,1 mm.

Su temperatura promedio es de 16,7 °C. La máxima es registrada en los meses de junio y setiembre con un valor de 17,3°C, mientras que la mínima llega a 15,9°C en enero. La humedad relativa en la mayoría de los meses es de 89%, no obstante, en el mes de enero se reporta un mínimo de 83%. Además, Pacayas cuenta con 4,4 horas/día de brillo solar en promedio, donde su máximo de 6 horas/día se presenta en marzo mientras que en noviembre apenas alcanza las 3,2 horas/día.

4.1.2. Hidrología

La cuenca del río Birrís abarca prácticamente todo el distrito de Pacayas y sus principales subcuencas son Caris, Plantón, Pacayas y Lajas. Entre las quebradas más importantes del distrito destacan Pacayas, Presidio, Lajas, Caris, Central y González (ver Figura 5).

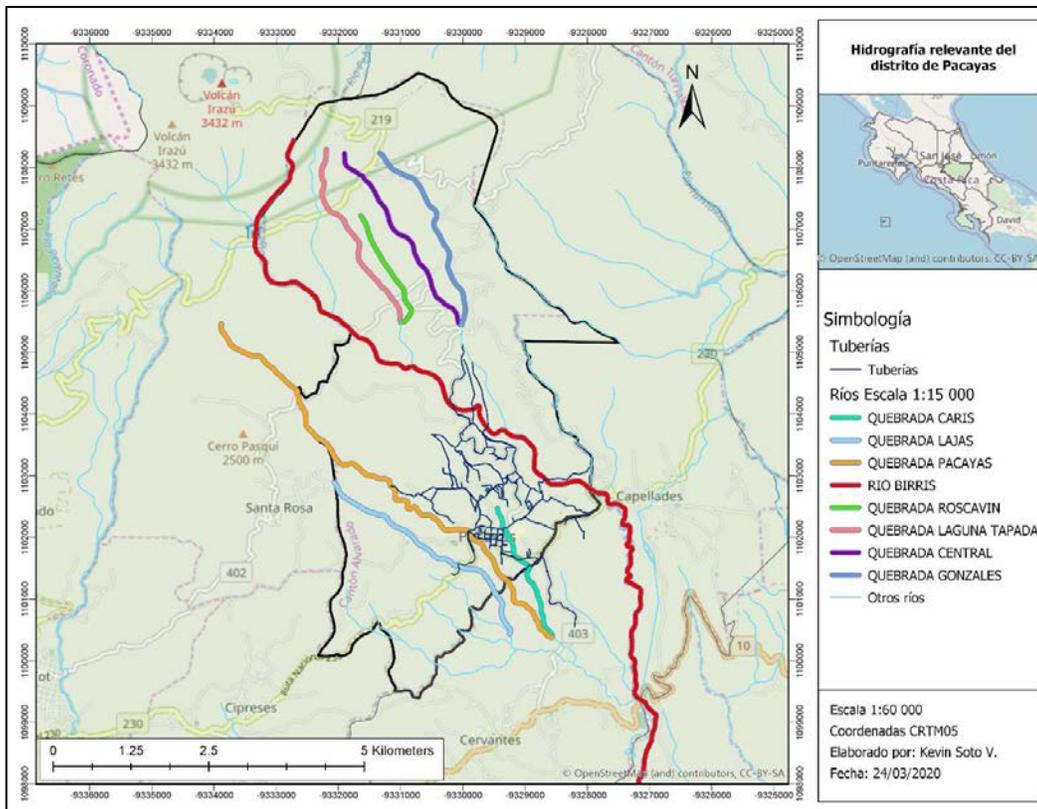


Figura 5. Quebradas y ríos importantes del distrito de Pacayas

Fuente: Atlas Digital del Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2014

Los ríos de la zona se caracterizan por tener márgenes reducidas pero cañones de profundidad importante, por lo que surge la necesidad de construir pasos elevados para el traslado del recurso hídrico a la población. Son poco caudalosos y poseen cortos recorridos sin la presencia de meandros, sin embargo, la fuerte pendiente del terreno genera cascadas de importante tamaño.

4.1.3. Geología y edafología

La zona abarcada dentro del estudio se encuentra en las estribaciones del volcán Irazú, las cuales se caracterizan por presentar "una serie de lomeríos con laderas erosionadas y coluvio erosionables, cuya topografía varía de ligeramente ondulada a fuertemente escarpada, con pendientes desde el 3 - 5% hasta llegar a más de 90%" (Gómez, 2004, p.10).

Como parte de un estudio detallado de algunas nacientes captadas por el acueducto municipal, el departamento de geología de la Federación de Municipalidades de Cartago (FEDEMU),

describió los suelos como depósitos volcánicos con espesores métricos de lava escorácea color rojizo, intercalados con bloques de lava masiva de color gris. Además, estas formaciones se encuentran cubiertas en su gran mayoría por suelos limoso-arcillosos y gran cantidad de materia orgánica (Serrano, 2017).

Usualmente estos depósitos presentan grados de alteración avanzados, lo que facilita la generación de desprendimientos y derrumbes. Según Gómez (2004) prácticamente todos los suelos presentan un importante riesgo de erosión, debido a las fuertes pendientes y a las altas precipitaciones que favorecen la escorrentía superficial. La erosión se convierte en uno de los problemas más graves para la producción agropecuaria, la sedimentación de embalses y la obstrucción de carreteras.

4.1.4. Usos del suelo

A través de su estudio de suelos y la relación con las actividades agrícolas en las subcuencas de Pacayón y Plantón, Gómez (2004) describe que se pueden destacar tres tipos de suelo según su capacidad y utilidad agrícola: aquellos de vocación agrícola intensiva que representan aproximadamente un 32,5% del cantón, un 37,6% que presenta vocación para cultivos perennes¹ y un 29,9% del territorio que debe dedicarse a áreas de protección con bosque, debido a limitaciones como pendientes abruptas, riesgo de erosión, pedregosidad y altas precipitaciones durante la mayor parte del año.

El Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) mantiene estadísticas bastantes detalladas sobre las actividades agrícolas del distrito. En el Cuadro 5 se detallan los datos promedios de producción de las principales productivas de esta zona.

Cuadro 5. Principales actividades productivas del cantón de Alvarado.

Categoría	Área por año (ha/año)	Rendimiento promedio
Papa	500	18 t/ha
Cebolla	100	12 t/ha
Zanahoria	200	35 t/ha

¹ Cultivos de ciclo largo, es decir que su periodo vegetativo se extiende más allá de los doce meses y por lo regular una vez establecida la plantación, se obtienen varias cosechas (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015).

Cuadro 5. Principales actividades productivas del cantón de Alvarado (Cont.)

Categoría	Área por año (ha/año)	Rendimiento promedio
Repollo	300	30 t/ha
Brócoli	50	10 t/ha
Leche	600	7 600 kg/ha/año

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2019

4.1.5. Zonificación de riesgos

La Comisión Nacional de Emergencias (CNE) realizó una amplia descripción de los riesgos a los que se ve expuesto el cantón de Alvarado en cuanto a factores hidrometeorológicos, sísmicos, volcánicos y deslizamientos.

En el informe de Amenazas de Origen Natural del Cantón de Alvarado, se destaca, con respecto a los riesgos hidrometeorológicos, que la afluencia de algunas quebradas y ríos ha aumentado sustancialmente y, por lo tanto, el periodo de recurrencia de inundaciones se ha acortado. Los factores principales de este cambio en el comportamiento hidrológico han sido los desarrollos agropecuarios, la ocupación de planicies de inundación y el desarrollo urbano en forma desordenada y sin planificación. A esto se suma la acumulación de desechos sólidos en los cauces de algunos ríos que provoca la reducción de la sección hidráulica y un riesgo latente de inundaciones.

Con respecto al riesgo sísmico, se hace énfasis en la existencia de fuentes sísmicas a los alrededores del cantón, que han demostrado en repetidas ocasiones tener una actividad importante. Son ejemplos de ello los sismos del año 1993 en Turrialba, a unos 28 km del cantón, con una intensidad de 5,2 Mw y el sismo ocurrido en Capellades en el año 2016 de 5,5 Mw de magnitud.

Además, algunos factores geológicos incrementan la vulnerabilidad de la región ante un evento sísmico (CNE, 2006):

- Ampliaciones de la intensidad sísmica en sitios por la presencia de rellenos poco compactos o suelos poco cohesivos.

- Altas pendientes y suelos fácilmente erosionables que generan deslizamientos principalmente en la parte norte del cantón
- Terrenos poco compactos, como los aluviones, que pueden generar asentamientos importantes en edificaciones.
- Fracturas en el terreno presentes en prácticamente todo el cantón

Acerca de los riesgos por actividad volcánica, se debe destacar que el volcán Irazú se encuentra a 8,3 km, en línea recta, al noroeste de Pacayas, mientras que el volcán Turrialba a 12,5km al noreste.

Los principales riesgos a los que se expone el distrito son (Ibidem):

- Caída de cenizas, que generaría problemas de salud a los pobladores y posibles pérdidas de los cultivos.
- Corrientes de barro en la mayoría de los cauces de ríos o quebradas anteriormente mencionados.
- Emanación de gases que podrían causar trastornos respiratorios a los habitantes e incluso a los animales.
- Posible caída de lluvia ácida.

Todos estos parámetros son recopilados en un mapa de riesgos a nivel cantonal desarrollado por la CNE que se incorpora en el Anexo 1.

4.2. Gestión comercial del acueducto de Pacayas

La zona abarcada dentro del estudio corresponde aproximadamente al 80% del acueducto total administrado por la Municipalidad de Alvarado. Dentro de esta zona, se abastecen alrededor de 1210 conexiones.

El acueducto se gestiona a través del Departamento de Administración del Acueducto, unidad que consta de 3 colaboradores: un especialista administrativo, un asistente administrativo y un ingeniero. Este departamento se encarga de procesos comerciales como la gestión de disponibilidades, la atención de solicitudes de nuevas conexiones, desconexiones, problemas tarifarios y cobros. Así mismo, en la parte administrativa se encarga del reporte de labores y pruebas solicitados por entes fiscalizadores.

Por su naturaleza de gobierno local, la Municipalidad de Alvarado brinda no solo el servicio de agua a la población del cantón, sino también el mantenimiento de vías, recolección de residuos, permisos de construcción, mantenimiento de infraestructura pública, entre otros. El porcentaje de morosidad en el pago del servicio mensualmente oscila entre un 10% y 15%, lo que corresponde a un promedio de 150 servicios.

El Sistema Tributario Municipal (SITRIMU) es la plataforma utilizada para esta gestión del cobro de los servicios públicos, sin embargo, como base de datos comercial para el servicio de agua potable tiene muy poca utilidad. El SITRIMU tiene registrados apenas 5 atributos que caracterizan un servicio:

- Cédula de la persona propietaria del servicio.
- Nombre de dicha persona.
- Número de finca abastecida.
- Concepto (Domiciliar, comercial o reproductivo).
- Estado del servicio (activo o inactivo).

La base de datos asocia directamente al propietario con su terreno y su identificación, sin embargo, no existe un código de identificación del servicio, que pueda ser utilizado de manera práctica para la asociación de parámetros de gran importancia como las características del aparato medidor, un registro del volumen consumido, la facturación mensual, las fechas de lectura, entre otros.

Contrario a la identificación de una persona física, datos como el número de finca, el concepto y el estado de servicio requieren una frecuente actualización. No obstante, el departamento no cuenta con una metodología definida de actualización catastral.

El personal operativo, por su experiencia de años trabajando en la operación del sistema y por residir en la zona, reconoce la ubicación geográfica de la mayoría de los usuarios. De esta manera realiza labores de atención de quejas, reparación de fugas, cortas y reconexiones. Lamentablemente, no se ha realizado la tarea de trasladar todo este conocimiento a un mapa físico o digitalizado.

Podría pensarse que, de manera alternativa, la asignación de la ubicación geográfica de la finca, y por ende del servicio, se obtendría de la información del departamento de catastro

municipal, ya que cada servicio está asociado a un número de finca en el SITRIMU. Sin embargo, el catastro municipal de propiedades se encuentra igualmente desactualizado; no se cuenta con la georreferenciación precisa del inmueble ni su extensión, tampoco con la información de las actividades agrícolas, pecuarias o de producción de alimentos que se desarrolla en cada terreno.

Una de las razones principales por la que no se ha recurrido a una base de datos más extensa, de mayor utilidad para el desarrollo comercial del acueducto, es la inexistencia de micromedición. Mensualmente se realiza el cobro de una tarifa fija, independiente del volumen consumido en el periodo, factor que incentiva el uso desmedido del agua y que perjudica la economía de la Municipalidad.

A pesar de no contar con medidores, se realiza una diferenciación básica de los usuarios de acuerdo con el tipo de uso del recurso. En el Cuadro 6 se presentan las tarifas aprobadas por el Concejo Municipal de Alvarado el 30 de julio del 2018, vigentes hasta la actualidad.

Cuadro 6. Tarifas para el servicio de agua potable de la Municipalidad de Alvarado

Categoría	Tarifa (¢)
Domiciliaria	4 293,00
Ordinaria	8 586,00
Reproductiva	12 879,00
Preferencial	4 293,00
Gobierno	6 439,50
Derecho de instalación	19 080,00
Conexión de agua	5 725,00
Reconexión	12 725,00

El hecho de no contar con un catastro detallado de los usuarios imposibilita la creación de tarifas más específicas basadas en las actividades productivas; por ejemplo, la categoría Reproductiva aplica para todos aquellos usuarios que utilizan el agua como parte indispensable de su materia prima, o durante el proceso de elaboración de su producto final. Se encuentran incluidos los usos agrícolas, del ganado bovino, porcino, lavado de cultivos, producción de alimentos, entre otros. Pero, se desconocen realmente las áreas de riego agrícola, las cabezas de ganado, los sistemas de riego o los cultivos específicos de cada propiedad.

Se presenta en el Cuadro 7 el total de servicios según su categoría tarifaria.

Cuadro 7. Total de servicios según categoría tarifaria

Categoría	Cantidad de usuarios	Porcentaje del total (%)
Domiciliaria	991	81,9
Ordinaria	-	
Reproductiva	212	17,5
Preferencial	6	0,5
Gobierno	1	0,1
Total	1210	100

El Departamento de Administración del Acueducto reconoce que la micromedición es sumamente necesaria por lo que durante el año 2018 y 2019, a manera de plan piloto, adquirió aproximadamente 250 micromedidores mecánicos de la marca ARAD. Procedió a la instalación de 56 unidades en diferentes servicios del sistema de Pacayas y programó su lectura mensual con el fin de contar con un aproximado del consumo de los usuarios. De ellos, 22 se encuentran instalados en servicios Domiciliares, 31 en servicios Reproductivos y 3 en servicios de Gobierno.

Por último, cabe destacar que el departamento pone a disposición del usuario medios telefónicos para el reporte de averías, así mismo la posibilidad de enviar el reporte personalmente a la Municipalidad a través del llenado de un formulario disponible en su página web. A través de este formulario se les informa a los fontaneros la situación y ellos proceden a realizar la reparación. Empero, pese a que se recopilan estos reportes, el departamento no los archiva ni utiliza estos informes para el cálculo de indicadores de daños o eficiencia en la atención de inconformidades.

4.3. Gestión operacional del acueducto de Pacayas

4.3.1. Aprovechamientos

El sistema de abastecimiento de agua potable de Pacayas se construyó a inicios del siglo XX como un acueducto de tipo gravitacional, propiedad que la mantiene hasta la actualidad. Las fuentes de abastecimiento corresponden a manantiales captados a través de galerías, construidas en mampostería, donde el flujo se almacena momentáneamente y se dirige en tuberías de conducción hacia su distribución. Estas galerías cuentan con tuberías de

excedencias por las cuáles el volumen en exceso captado fluye y se convierte en pequeñas quebradas montaña abajo.

Estos manantiales se localizan en la parte alta de la microcuenca Plantón-Pacayas, en zonas de pendientes pronunciadas y propensas a deslizamientos, por lo que el acceso del personal operativo es muy complicado. Además, se encuentran en reservas forestales o extensas fincas privadas bastante alejadas de las zonas de abastecimiento. En la Figura 6 se puede observar la localización de las nacientes con respecto al resto del sistema.

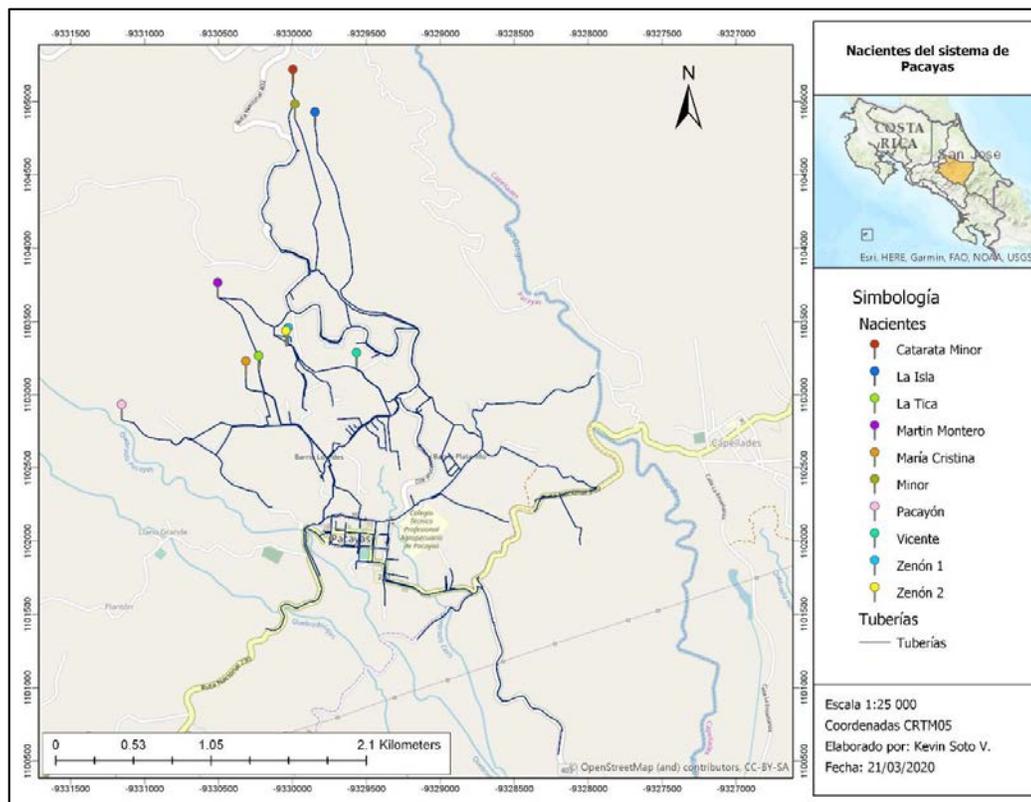


Figura 6. Mapa de ubicación de las nacientes del sistema de Pacayas

La producción de las fuentes es aforada, de forma manual, esporádicamente por personal de la Municipalidad. De esta forma, se cuenta con un registro desde el año 1988 hasta el 2019 de los caudales aportados por cada uno de los manantiales. Según esta estadística, la producción total es de 2 056 464.57 m³ al año, aportado por 9 manantiales debidamente concesionados.

Se presenta a continuación en el Cuadro 8 una caracterización de cada fuente incluyendo su elevación, distancia de conducción hasta su respectivo almacenamiento, caudal promedio producido por la fuente y el concesionario. En el caso de las nacientes La Tica y Vicente, la

distancia de conducción es nula dado que el tanque en que se almacena su producción está inmediatamente contiguo a ellas.

Cuadro 8. Caracterización de los manantiales del sistema de Pacayas

Nombre	Elevación (msnm)	Distancia de conducción (m)	Caudal promedio (l/s)	Caudal concesionado (l/s)
La Isla	2030	1 764,8	8,96	1,19
María Cristina	1907	215,3	2,25	1,90
Martín Montero	2044	570,4	18,68	10,60
Noré Gómez	2127	464,7	2,78	0,95
Pacayón	1909	374,5	7,23	2,37
La Tica	1910	-	2,79	1,42
Minor	2106	1 094,4	13,73	1,42
Zenón Leandro	1952	18,4	6,25	0,95
Vicente	1893	-	2,55	1,42
Total			65,21	22,22

Los empleados del municipio tienen certeza de que las variaciones estacionales de algunas nacientes como Noré Gómez, Minor y Vicente son muy drásticas, sin embargo, la frecuencia de los datos recolectados con los aforos no es suficiente para validar el comportamiento de los manantiales.

Así mismo, como se observa en el Cuadro 8, la mayoría de las concesiones sobre las nacientes son sobrepasadas por las necesidades del acueducto, probablemente debido a la inexistencia de campañas de medición o equipos de macromedición que permitan mantener un registro continuo del caudal sustraído. Tampoco se tiene un control de las aguas que rebozan o se escapan de las captaciones.

Los aspectos de infraestructura que buscan garantizar la seguridad del recurso hídrico en las captaciones serán abarcados posteriormente en la Sección 7.1.

4.3.2. Almacenamiento

El sistema cuenta con 13 reservorios, 12 de ellos pensados para trabajar como tanques reguladores y uno de ellos incorporado al sistema para abastecer la demanda de un hidrante. En conjunto, los tanques brindan al sistema un volumen de almacenamiento de

aproximadamente 359 m³. En la Figura 7 se muestra la ubicación de cada uno de ellos dentro del sistema de Pacayas.

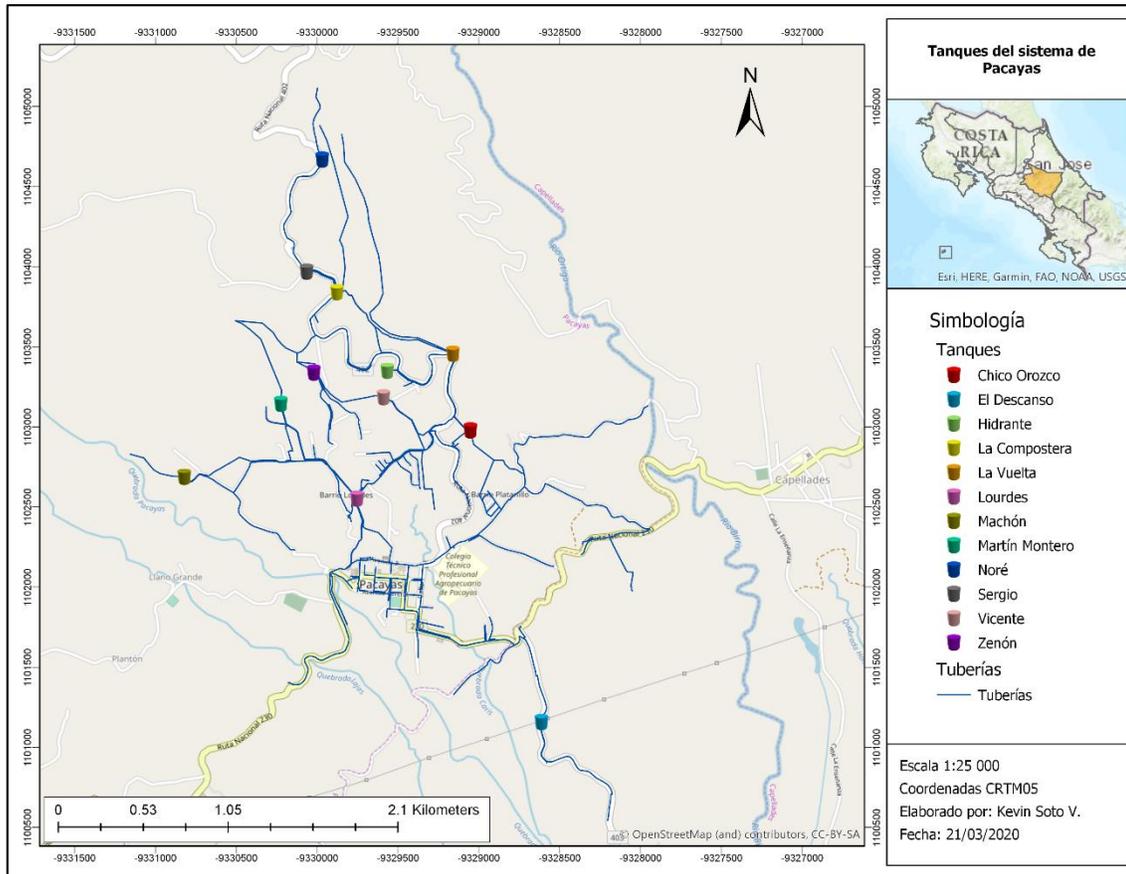


Figura 7. Mapa de ubicación de los tanques del acueducto de Pacayas

La estructura de los tanques más antiguos está conformada por mampostería mientras que los más recientes, instalados hace menos de 5 años, corresponden a tanques bicapa de polietileno de alta densidad (PEAD) adquiridos en el mercado nacional. Los detalles de cada uno de ellos se agrupan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Caracterización de los tanques del sistema de Pacayas

Nombre del tanque	Elevación (msnm)	Material	Volumen (m ³)
Lourdes	1810	Concreto	172,3
Chico Orozco	1796	Concreto	33,3
Sergio	2052	Concreto	33,7
Martín Montero	1903	PEAD	22,0
Noré	2125	PEAD	10,0

Cuadro 9. Caracterización de los tanques del sistema de Pacayas (Cont.)

Nombre del tanque	Elevación (msnm)	Material	Volumen (m³)
La Compostera	2026	Concreto	0,15
La Compostera 2	2026	PEAD	10,0
Hidrante	1915	PEAD	22,0
La Vuelta	1842	Concreto	0,83
Machón	1931	Concreto	2,85
Vicente	1895	PEAD	22,0
Zenón Leandro	1948	Concreto	8,2
Total			359,3

Cabe destacar que los tanques de Sergio y Noré no se utilizan actualmente debido a la baja producción de la naciente que lo abastece (Noré Gómez). Además, el tanque del Hidrante se encuentra aislado del flujo continuo del sistema, lleno a su máxima capacidad en espera de la atención de una emergencia. Igualmente debe resaltarse el caso de los tanques La Compostera y La Compostera 2 que se encuentran interconectados y por lo tanto funcionan como un único reservorio.

Los volúmenes de almacenamiento reales difieren considerablemente de lo estipulado por la Norma Técnica para Diseño y Construcción de Sistemas de Agua Potable, de Saneamiento y Pluvial. Según esta normativa el volumen total de un tanque se compone del volumen de regulación del consumo, el volumen de reserva por interrupciones y el volumen de reserva para incendios. El primero de ellos se puede aproximar como un 14% del volumen promedio diario, el segundo como el correspondiente a cuatro horas del caudal promedio diario, mientras que la reserva mínima para incendios, en poblaciones rurales, es de 15 m³ según lo determinado por la Ley 8641.

En el Cuadro 10 se pueden observar los resultados del cálculo del volumen idóneo según la normativa nacional, de acuerdo con la cantidad de usuarios abastecidos. Si se desea explorar más a profundidad el cálculo para cada reservorio referirse al Apéndice 1.

Cuadro 10. Comparación entre volúmenes actuales de los tanques y los determinados por normativa de diseño

Nombre del tanque	Cantidad de usuarios abastecida	Volumen actual (m³)	Volumen de diseño según normativa (m³)
Lourdes	453	172,3	210,0
Chico Orozco	121	33,3	67,0
Martín Montero	121	22,0	67,0
El Descanso	13	22,0	21,0
La Compostera	49	10,0	36,0
La Vuelta	51	0,83	37,0
Machón	27	2,85	27,0
Vicente	63	22,0	42,0
Zenón Leandro	33	8,2	29,0
Total	991	359,3	573,5

Según lo muestra el Cuadro 10 el único tanque que cumple al límite con la normativa es El Descanso. No obstante, cabe destacar que dentro de la población abastecida únicamente se tomaron en cuenta servicios domiciliarios, por lo que un cálculo más afinado de los consumos podría incluso sugerir la necesidad de volúmenes mayores de almacenamiento.

Debe destacarse que las dimensiones de los tanques, con excepción del Tanque Lourdes, principal almacenamiento del sistema, son muy reducidas lo que dificulta al personal el ingreso a su interior y por ende el mantenimiento interno adecuado.

Por otra parte, se constató que la mayoría de ellos no cumplen una correcta función de regulación; al visitarlos se observó que se encontraban en su tope de nivel, incluso en las horas en que se supone un consumo máximo, además sus sistemas de rebalse se encontraban desalojando un caudal prácticamente constante a lo largo de todo el día. Todos los tanques cuentan con una tubería de rebalse por la que permiten salir el exceso de flujo almacenado. Algunos de estos rebalses son conducidos hacia otros tanques con el objetivo de no desaprovechar el recurso, como es el caso del tanque La Compostera que envía su sobrante hacia el tanque La Vuelta a través de una línea de aproximadamente 870 m de longitud y un diámetro de 50 mm.

Ninguno de los tanques del sistema posee by-pass o tubería de desfogue de fondo, por lo que su mantenimiento o su salida de operación en caso de una emergencia se vuelven sumamente complicadas. Tampoco se cuenta con válvulas de control de nivel que automaticen el cierre de las tuberías de carga o macromedidores que registren los caudales de entrada y de salida de ellos.

Finalmente es importante destacar que algunas de estas estructuras de almacenamiento se encuentran en propiedades privadas, situación que hasta el momento no ha generado inconvenientes a la Municipalidad, pero no se puede descartar que los genere a futuro.

4.3.3. Conducción y distribución

Las líneas de conducción y distribución del sistema abarcan una extensión territorial de aproximadamente 5,12 km² y poseen una longitud total de 41,32 km. Si se realiza una distinción de las tuberías de acuerdo con su función se obtiene que la longitud de aquellas utilizadas para conducción es de 6,04 km, mientras que la distribución corresponde a 35,28 km.

La distribución de la longitud de las tuberías de acuerdo con su diámetro y material se presenta en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Longitud de tuberías de conducción y distribución de acuerdo con su diámetro y material

Diámetro nominal (mm)	Manguera PEAD	PVC	Hierro dúctil	Total General	Porcentaje del total (%)
13	-	1 048,4	-	1 048,4	2,5
19	-	1 424,4	-	1 424,4	3,4
25	-	7 711,9	-	7 711,9	18,7
38	-	15 398,0	-	15 398,0	37,3
50	140,5	5 654,5	-	5 795,0	14,0
63	-	766,3	266,6	1 032,9	2,5
75	-	5 004,4	-	5 004,4	12,1
100	-	3 900,7	-	3 900,7	9,4
Total	140,5	40 908,6	266,6	41 315,7	100,0

Tal y como se observa en el cuadro anterior, el diámetro nominal de 38 mm es el predominante en la red, además tan solo un 9,4% corresponde a tubería de 100 mm, que según la Ley 8641

es el diámetro necesario para la conexión de un hidrante. Es importante añadir que en la estadística presentada no se incorporan las conexiones domiciliarias, por lo que las tuberías menores a 25 mm, que suman un 24,7% del total del sistema, son diámetros muy pequeños para ser utilizados en tuberías de distribución y conducción.

Estos diámetros tan reducidos generan un aumento considerable de la velocidad de flujo, y a su vez pérdidas de energía importantes en tramos muy cortos. El reglamento de diseño según la legislación nacional (AyA, 2017) define que la velocidad máxima en redes de distribución no debe sobrepasar los 3 m/s, situación que se incumple en algunas líneas del acueducto.

Con respecto a las redes de distribución, los 12 tanques de almacenamiento distribuidos a lo largo de todo el sistema, cada uno con la función de suplir sectores poblacionales distintos, determina la existencia de 12 zonas de zonas de presión o subsistemas, tal y como se observa en la Figura 8. A cada una de estas zonas se les asigna el nombre del tanque que las abastece.

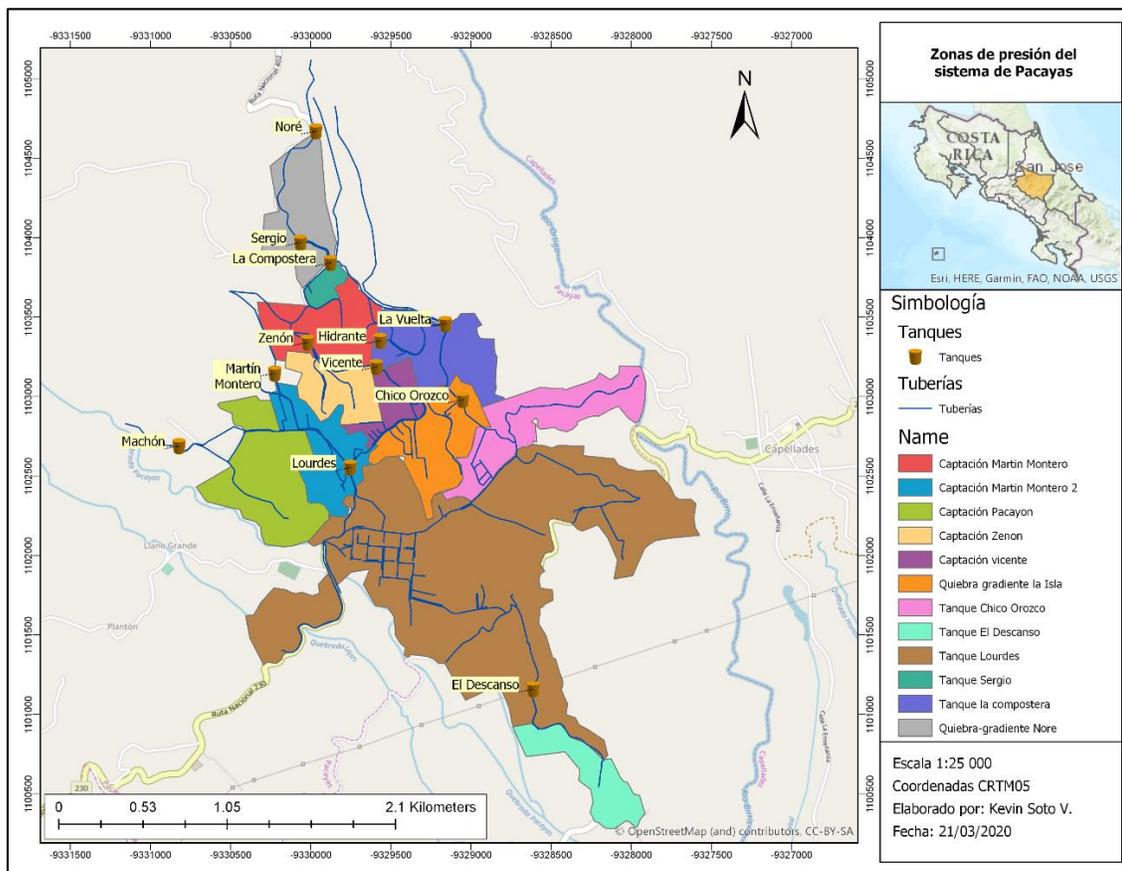


Figura 8. Mapa con la delimitación de las zonas de presión del sistema de Pacayas

Fuente: Información geográfica de la Municipalidad de Alvarado

Realmente la hermeticidad de dichas regiones no se garantiza debido a la existencia de válvulas de cierre que se encuentran expuestas, situación que los usuarios aprovechan para accionarlas manualmente y regular el caudal y presión que llega a sus hogares.

En la mayor parte del sistema no se cuenta con válvulas de control hidráulico que permitan el manejo de los parámetros de presión y caudal. Únicamente se cuenta con ocho válvulas instaladas, de las cuales seis son reductoras de presión mientras que las dos restantes son válvulas de aire. Sin embargo, la metodología de la instalación de estos accesorios no es la adecuada y, por ende, no favorece su correcto funcionamiento; se observaron casos en que las válvulas se encuentran enterradas sin ninguna caja de protección o se encuentran instaladas con su cabezote en posición horizontal (cuando el traslado normal del eje del cabezote debe ser vertical). Igualmente, la instalación de estas válvulas reguladoras de presión se realiza sin un estudio previo de las presiones en la zona ya que no se cuenta con dispositivos registradores de presión de forma continua, ni con una modelación hidráulica de la red.

Dado que la presión en las tuberías no es cuantificada de forma constante por el departamento a cargo del acueducto, ciertos puntos críticos de la red presentan presiones superiores a los 70 mca, que representa el máximo permitido en tuberías de distribución donde la topografía resulta muy quebrada (AyA, 2017). Aunado a este factor, no se tiene certeza de los espesores de pared de las tuberías que componen el sistema, aun cuando su instalación haya sido relativamente reciente. Se observó en algunos sitios tubería de color diferente al típico verde utilizado para la fabricación de tubos de policloruro de vinilo (PVC), por lo que su relación entre diámetro y espesor (SDR) no es el adecuado para soportar las altas presiones que se presentan.

En la Figura 9 se puede observar una rotura en una tubería de distribución posiblemente generada por los factores comentados anteriormente; altas presiones y la utilización de tubería inadecuada para flujo a presión de agua potable (el color blanco corresponde a tubos comúnmente utilizados para sistemas pluviales).



Figura 9. Fotografía de una rotura presentada en una conducción del acueducto de Pacayas

Fuente: Sitio web de la Municipalidad de Alvarado

Asimismo, se puede apreciar en la Figura 9 que la tubería se encuentra expuesta, prácticamente al nivel del terreno. Esto sucede con frecuencia a lo largo de toda la red, donde el 82% de las tuberías se encuentran a profundidades menores de 60 cm bajo la rasante, y dentro de este porcentaje, el 33% se encuentra a profundidades de 20 cm o menos. Por lo tanto, la realidad encontrada dista de forma evidente por lo sugerido en la norma técnica de diseño que determina una profundidad mínima de 80 cm en tuberías ubicadas bajo vías públicas terciarias (Ibidem).

Es importante destacar que la instalación de la tubería en la mayoría de los casos visualizados se realiza directamente sobre el suelo del sitio, sin disponer de un encamado de arena que normalmente se utiliza para permitir una ligera movilidad de la tubería ante cargas importantes como el tránsito vehicular.

Con respecto al trazado de la tubería, los sobresaltos en la topografía obligan en ciertos puntos a recurrir a pasos elevados, como el mostrado en la Figura 10, que, por la complejidad del terreno y su acceso, carece de estructuras soportantes que puedan restringir las deflexiones de la tubería. Muchos otros trayectos se encuentran dentro de propiedades privadas, situación que la administración del acueducto es consciente que debe resolver.



Figura 10. Paso elevado en la línea de conducción entre la naciente La Isla y el tanque La Vuelta

La práctica común en las redes de distribución del acueducto de Pacayas es la bifurcación de las líneas de manera que se conduzcan tuberías paralelas en ambos sentidos de la carretera, esto con el fin de abastecer los servicios localizados a izquierda y derecha de la vía. A pesar de que la práctica usual es la utilización de una sola línea de conducción en el sentido norte u oeste de la vía y las derivaciones del lado contrario a la carretera se dirijan por debajo de la estructura de ruedo.

Finalmente, cabe destacar que la condición de las tuberías del centro de la ciudad no sigue un patrón acorde al desarrollo urbano. A pesar de que el centro de Pacayas presenta marcados cuadrantes, los trazados de las tuberías no forman una red densa que permita la creación de circuitos y la redundancia del flujo del agua, sino que se extiende como ramales individuales y se presenta una gran cantidad de reducciones y ampliaciones de diámetro en distancias cortas (ver Figura 11).

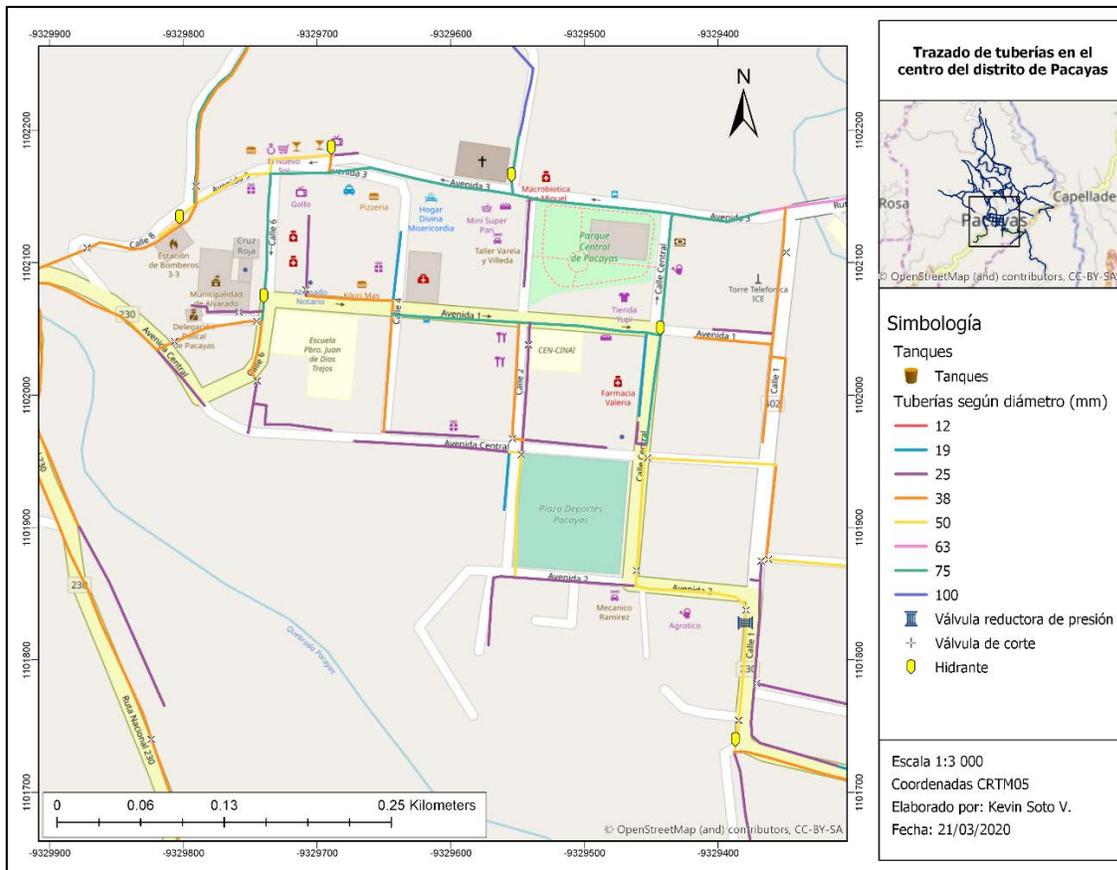


Figura 11. Trazado de las tuberías en el centro del distrito de Pacayas

4.3.4. Tratamiento

El agua proveniente de las captaciones, en casi todos los casos, es trasladada a un tanque de almacenamiento en donde se realiza la cloración. En el caso de la captación Martín Montero, y la zona de presión de su mismo nombre (ver **iError! No se encuentra el origen de la referencia.**), el proceso de desinfección se realiza en la misma galería donde se almacena la naciente. Mientras que, para los servicios abastecidos por la naciente Noré Gómez, la desinfección es nula pues su suministro proviene directamente del manantial.

En los puntos de cloración, esta se realiza utilizando pastillas de hipoclorito de calcio y cloradores construidos por el mismo personal operativo del acueducto, como el que se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Dispositivo para la disolución de pastillas de hipoclorito de calcio en el tanque La Compostera

El clorador se compone de un trozo de tubería con una longitud de 60 cm aproximadamente que se conecta en paralelo a la tubería de salida del tanque. La parte superior es cubierta por un tapón formando un cilindro para el almacenamiento de las pastillas. A través de una silleta localizada a una cuarta parte de la altura del cilindro, se introduce un flujo continuo de agua cruda (agua que pasa a través de un by-pass sin entrar al tanque de almacenamiento). Una vez realizado el montaje, para realizar la cloración simplemente se extrae el tapón de la parte superior y se depositan las pastillas en forma apilada. El flujo de agua se encargará de la disolución de las pastillas localizadas en el fondo del recipiente y el agua clorada se combinará con el aquella procedente del tanque.

Según lo expresa Mora (2011), en su tesis "Evaluación de las principales tecnologías utilizadas en Costa Rica para la desinfección del agua", la cloración por hipoclorito de calcio en pastillas

es un mecanismo muy importante en la desinfección de abastecimientos de agua para comunidades pequeñas y familiares, ya que los equipos son muy fáciles de manipular y mantener, además de ser baratos y duraderos. Además, las tabletas son más seguras que las soluciones de hipoclorito o el cloro gaseoso y son más fáciles de transportar y de almacenar.

Sin embargo, el equipo una vez instalado debe ser calibrado adecuadamente, con el fin de determinar la profundidad de inmersión de la columna de tabletas y la velocidad o caudal que se hará pasar por la cámara de disolución. De estos parámetros dependerá la cantidad de cloro disuelta que se incorporará a la red y que, según la normativa de calidad de agua nacional, debe de mantener una cantidad de cloro residual libre entre 0,3 y 0,6 mg/l (Ministerio de Salud, 2005).

El Departamento de Administración del Acueducto realiza una labor correcta al realizar un control operativo tal y como lo establece la normativa; se lleva un registro quincenal de los parámetros de olor, sabor, pH y cloro residual libre en el punto de cloración y en un sitio representativo de la red de distribución, para cada una de las zonas de presión. Para ello cuenta con tiras reactivas que cambian de color al entrar en contacto con el agua, y a través de comparación visual con una escala modelo, se pueden definir los valores medidos en sitio. Para la Municipalidad no ha sido posible la adquisición de un turbidímetro con el fin de complementar las mediciones y obtener un control operativo completo, según lo demandado por el Ministerio de Salud.

De acuerdo con pruebas de cloro residual y cloro libre realizadas a distintos puntos considerados como críticos del sistema, se logró determinar que los niveles de cloro no cumplen con el umbral anteriormente descrito; en servicios cercanos a los tanques las mediciones se encuentran por encima de los niveles permitidos, mientras que en extensos ramales en puntos finales de la red de distribución los trazos de cloro residual son prácticamente imperceptibles. Aunque, si se hace una interpretación estricta de la normativa, el departamento cumple adecuadamente pues su punto de medición quincenal está localizado adecuadamente dentro del sistema y sus parámetros medidos se encuentran dentro del rango establecido.

CAPÍTULO 5: MODELO HIDRÁULICO UNIDIMENSIONAL DEL ACUEDUCTO DE PACAYAS

5.1. Software de modelación

5.1.1. Características del software

El software utilizado en este proyecto para llevar a cabo la modelación hidráulica fue WaterGems, creado por la empresa Bentley como una herramienta de ayuda para la toma de decisiones completa y fácil de usar para los profesionales que diseñan, planifican y operan sistemas de distribución de agua. Esta herramienta permite desde simulaciones de flujos de agua hasta análisis de calidad, de costos críticos y energéticos.

WaterGems es un software de uso restringido, por lo que debe gestionarse sus licencias que van desde los \$195 hasta los \$25 000 dependiendo de los módulos que se consideren adquirir. Sin embargo, sus motores de procesamiento son muy similares a los del programa gratuito Epanet dado que ambos utilizan el método de gradiente hidráulico para solucionar la red hidráulica modelada. (Tzatchkov et al., 2007).

Las principales diferencias radican en la avanzada interacción que posee WaterGems con los sistemas de información geográfica (SIG). Además, su interfaz de dibujo y las tablas dinámicas para la manipulación de los atributos del modelo facilitan de gran manera el montaje de redes extensas de acueductos. Estas fueron las principales razones para su elección dentro de este proyecto.

Cabe destacar que la versión utilizada representa una muestra comercial, que si bien es cierto no cuenta con todas las bondades de la versión completa, posee restricciones de nodos y tuberías muy superiores a los necesarios para el modelo del acueducto de Pacayas. Además, una característica importante es la exportación inmediata que podría realizarse de un modelo WaterGems a Epanet, por lo que podría ser posteriormente aprovechado por el Departamento de Administración del Acueducto.

5.2. Información indispensable para el modelo

5.2.1. Línea base del acueducto

Como acción inmediata al informe de auditoría operativa desarrollado por la Contraloría General de la República en el año 2016, la Municipalidad de Alvarado se asoció con el Instituto de Fomento y Asesoría Municipal (IFAM) mediante una Oferta de Servicios de Asistencia Técnica (OSAT) que incorpora la realización de un diagnóstico del estado actual del acueducto y el desarrollo de un Plan de Acción para resolver las disposiciones de acatamiento obligatorio descritas por la Contraloría.

Es así como a partir del 2017 el IFAM y la Municipalidad unen esfuerzos para realizar visitas de campo y levantamiento de información de infraestructura que no se encontraba digitalizada. Sin embargo, la metodología poco eficiente del IFAM y los retrasos en la entrega de productos terminados deterioraron seriamente la relación entre las partes, al punto de que el proyecto prácticamente se desvaneció.

Por esta razón, el Departamento de Administración del Acueducto contaba con cierta información geográfica digitalizada, sin embargo, no del todo completa en cuanto a extensión y a atributos recolectados en campo. La información exacta con la que contaban se resume en:

- Coordinadas de la ubicación de nacientes y tanques de almacenamiento.
- Trazado georreferenciado de las tuberías de conducción y distribución.
- Puntos georreferenciados de cambios de diámetro y material en tuberías.
- Coordinadas geográficas de aproximadamente 542 servicios del acueducto con su división tarifaria como único atributo.
- Ubicación con coordenadas de los hidrantes conectados al acueducto.
- Datos de consumo mensual de 56 hidrómetros instalados en servicios.
- Datos históricos, no continuos, de producción desde el año 1988 hasta el 2018.

5.2.2. Levantamiento y análisis de la información

Se contaba con la ubicación georreferenciada del trazado de las tuberías sin embargo estas capas geográficas carecían de atributos como diámetro, material y profundidad. Por lo tanto, con ayuda del personal operativo del acueducto, que tras años de experiencia conoce a fondo

el sistema, se realizaron sesiones de repaso exhaustivo de todo el acueducto mediante sistemas de información geográfica (SIG) en las que se adjudicaba a la capa la información faltante. Así mismo, se visitaron puntos específicos que presentaban cierta dificultad con el fin de obtener un mayor detalle de los enlaces entre las tuberías. La información recopilada fue presentada anteriormente en el Cuadro 11.

Durante las inspecciones virtuales del sistema se marcaban puntos de interés como válvulas de control hidráulico, de corte, de limpieza y tapones, al mismo tiempo que se le asignaban atributos de diámetro y material a cada una de estas capas subyacentes. La información detallada en oficina pasaba posteriormente a una validación en sitio.

Se procedió igualmente a recopilar información de 668 usuarios ubicados principalmente en las zonas de Patalillo, Chanco Rey, Toro Loco, Los Gemelos, cercanías de la plaza de Pacayas y Villas del Bosque (ver Figura 13), donde no se habían logrado georreferenciar los usuarios por parte del IFAM. Los atributos recolectados fueron las coordenadas geográficas y el tipo de usuario según las clases tarifarias establecidas por la Municipalidad.

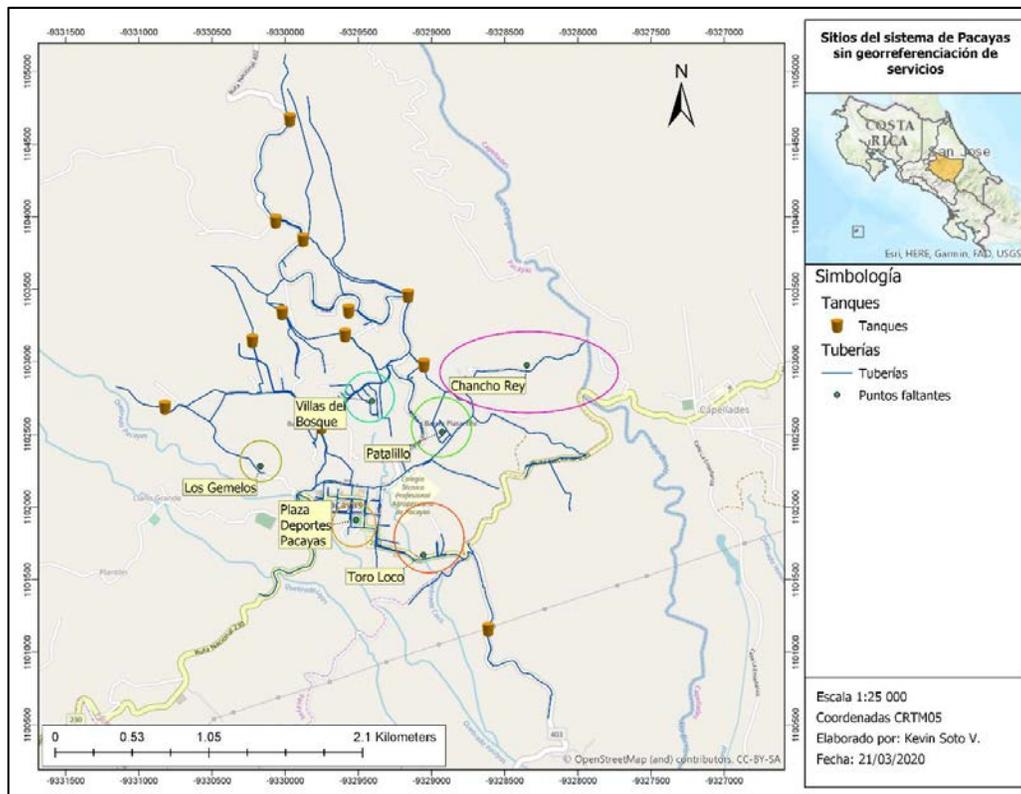


Figura 13. Sitios del acueducto que no contaban con georreferenciación de usuarios

Con respecto a los tanques de almacenamiento se recopiló información de sus dimensiones de ancho, largo, espesor de pared y profundidad con el fin de obtener su volumen exacto. Asimismo, se midieron directamente, con respecto a la base del tanque, los niveles de las tuberías de salida y rebalse, parámetros necesarios para la modelación hidráulica. En el caso de los tanques de PEAD se recurrió a la ficha técnica correspondiente provistas por el fabricante. Estos datos fueron presentados anteriormente en el Cuadro 9.

Por otra parte, los datos de producción de las nacientes fueron obtenidos gracias a la utilización de un caudalímetro ultrasónico portátil modelo ChronoFLO 430, de la marca Hydreka, solicitado a manera de préstamo a ProDUS UCR. Los caudales fueron medidos directamente en las tuberías aguas abajo de las galerías de captación de las nacientes, donde se aseguraba la acumulación de flujo total. Las mediciones se llevaron a cabo durante diez minutos mientras que el dispositivo registraba datos cada 30 segundos en su memoria interna. Solamente la naciente Noré Gómez debió ser aforada manualmente pues las ondas de flujo intermitentes de agua y aire en la conducción no permitieron el correcto funcionamiento del dispositivo. Las mediciones se realizaron en el mes de mayo del año 2019. Los valores obtenidos se muestran en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Caudales históricos y aforados de la producción de las nacientes del sistema de Pacayas

Nombre	Caudal promedio (l/s) *Según registros municipales desde 1988 hasta 2018	Caudal aforado (l/s)
La Isla	8,96	13,5
María Cristina	2,25	3,0
Martín Montero	18,68	21,3
Noré Gómez	2,78	3,2
Pacayón	7,23	5,3
La Tica	2,79	2,8
Minor	13,73	0,9
Zenón Leandro	6,25	3,1
Vicente	2,55	1,3

Los caudales aforados presentan cierta cercanía con los registros municipales, con excepción de la naciente Noré Gómez, que prácticamente decayó un 90% su producción. Sin embargo, por la precisión del aparato utilizado en comparación con los aforos manuales realizados por personal operativo, y la actualidad de los datos recolectados, se tomaron las producciones aforadas como punto de partida para la modelación hidráulica.

Posteriormente con el mismo aparato, se procedió a medir el consumo durante una semana completa a la salida del tanque de Lourdes, que representa el de mayor tamaño y población abastecida del sistema. El fin fue identificar una curva típica del consumo semanal, así como el día y las horas de máximo consumo, punto crítico en la modelación de un sistema estático. La curva obtenida se muestra en la Figura 14.

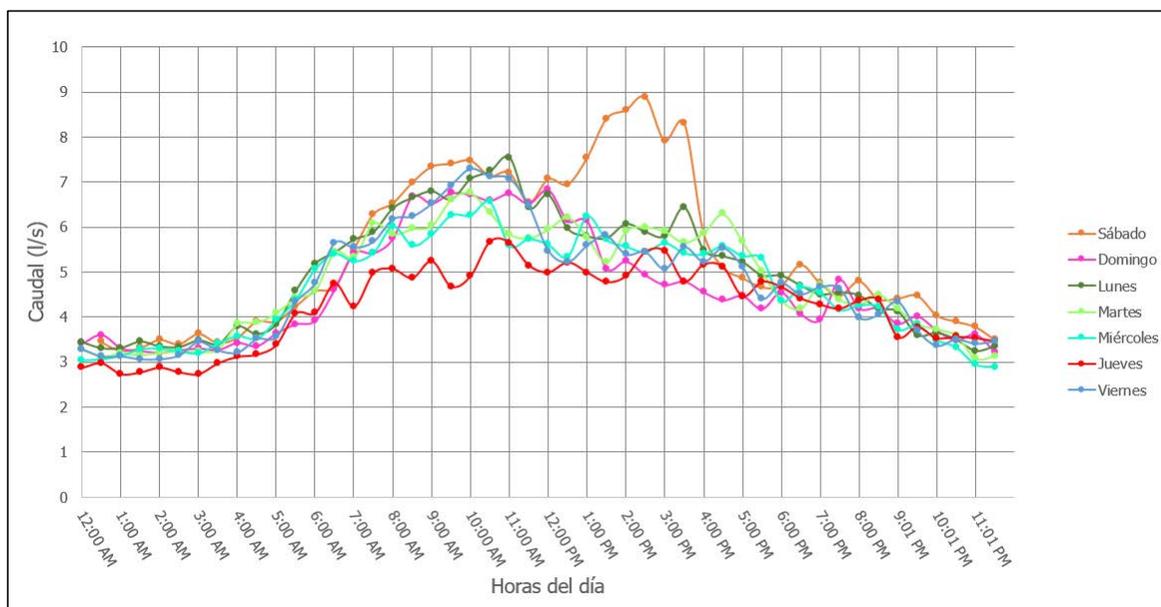


Figura 14. Curva de consumo semanal tomada a la salida del tanque Lourdes

Tal y como se observa en la figura anterior, el punto de mayor consumo ocurre el día sábado entre la 1 pm y 4 pm. Se determinó mediante la observación de los hábitos humanos comunes que este día casi todos los productores agrícolas regresan de las ferias del agricultor y se dedican a limpiar los productos sobrantes y a lavar los vehículos utilizados para el transporte de mercadería. Este punto fue definido como el instante crítico en el funcionamiento del sistema y, por ende, la base para el planteamiento del modelo estático.

Finalmente, con el fin de obtener datos reales para el escenario de máximo consumo, se visitó el acueducto en sábado con el fin de registrar las lecturas de una determinada ruta de hidrómetros y determinar el consumo de usuarios domiciliarios. Para ello se seleccionaron 6 puntos aleatorios y uniformemente distribuidos dentro de la zona de presión del tanque Lourdes. Finalmente, durante la gira de campo se lograron obtener al menos seis lecturas distribuidas entre las 8 a.m. y las 5 p.m.

Los datos de esta campaña se presentan en el Cuadro 13. Se muestra una comparación entre los datos recolectados, que resultan el promedio de seis mediciones diarias, y el promedio del registro de lecturas de la Municipalidad, que alberga datos de todo el año 2019 y finales del 2018, ambos para la misma muestra de medidores.

Cuadro 13. Comparación de los consumos promedio recolectados en campo y los registrados por la Municipalidad

Punto	Cliente	Promedio muestra sábado (m³/día)	Promedio según registro de lecturas de la Municipalidad (m³/día)
1	Lucía Rivas	2,06	0,93
2	Marcos Serrano	5,44	2,36
3	Manuel Mora	4,08	1,54
4	Jose Adulio	0,77	0,94
5	Jose Adolfo	1,17	3,26
6	Enrique Loaiza	1,58	1,32
Promedio		2,52	1,73

Al analizar los datos recolectados, los registros del sábado presentan valores mayores a los presentes en la estadística municipal. Este efecto posiblemente es resultado de un factor de escala dado que, en un registro extenso, los altos consumos de los días sábado se ven opacados en el resultado promedio por aquellos días de consumo habitual (días entre semana).

Al realizar una simple conversión, el valor promedio domiciliar de la muestra adquirida sábado (2,52 m³/día) equivale 614 lpd, utilizando una ocupación por vivienda de 4,1 personas para el distrito de Pacayas (INEC, 2011). Se considera que este dato representa un valor excesivo, si se toma en cuenta que el reglamento de diseño de la normativa nacional establece para sitios

rurales sin micromedición un valor de 375 lpd. Este se calcula a partir de la dotación usual de sitios rurales de 250 lpd más un 50% adicional debido a la ausencia de medidores (AyA, 2017).

Al analizar la base de datos completa del departamento encargado del acueducto se obtiene un valor promedio para todos los usuarios domiciliarios de 2,14 m³/día, que representan 552 lpd. A pesar de encontrarse por encima del valor sugerido por la norma, se utilizó como base inicial para el desarrollo del modelo.

En el caso de los usuarios comerciales se asumió la mitad del consumo domiciliario dado que se desconocen con detalle las actividades productivas de cada uno y la mayoría de los comercios se encuentran contiguo a las casas de habitación del mismo propietario.

Por otra parte, para afinar los datos de los usuarios reproductivos se recurrió a la colaboración del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), más específicamente con la oficina de Pacayas perteneciente a la Región Central Oriental. Esta unidad aportó importante información sobre el catastro detallado de fincas agrícolas y ganaderas, que según sus registros se encuentran abastecidas del acueducto municipal. En cuanto a los terrenos de uso agrícola se obtuvieron los datos de ubicación georreferenciada, extensión de terreno y cultivos sembrados. En los casos de actividades ganaderas se recopiló igualmente la ubicación, las cabezas de ganado del último censo realizado y la principal actividad desarrollada. Una estadística descriptiva de la información adquirida se presenta en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Estadísticas de usuarios reproductivos facilitados por el MAG

Tipo de actividad	Cultivo / Actividad	Cantidad de fincas	Área de extensión (Hectáreas)
Agrícola	Cebolla	3	1,18
	Frutales	1	0,71
	Hortalizas	3	0,82
	Papa	42	1,31
	Papa / Cebolla	6	2,82
	Zanahoria	2	1,76
Mixto	Mixto	1	1,41
Pecuaría	Leche	12	1,82
Total		71	6,08

En el cuadro anterior se presenta una estadística de la información recopilada, sin embargo, es importante destacar que para el modelo hidráulico desarrollado se calculó de forma individual el consumo estimado para cada uno de los 71 servicios reproductivos. Es decir, a cada servicio ya anteriormente georreferenciado y categorizado como reproductivo, se le asignó su consumo estimado específico, de acuerdo con su actividad, su extensión territorial y su elevación, según lo determinado por el Manual Técnico del Departamento de Aguas, explicado en la Sección 2.3.1.2.

Finalmente cabe destacar que el Departamento de Administración del Acueducto llevó a cabo un seguimiento detallado durante un mes del consumo de cinco clientes especiales que, por sus actividades económicas se esperaba que sobrepasen el consumo promedio reproductivo. Se realizó día a día (de lunes a viernes) una lectura de los medidores que se instalaron en sus acometidas y se constató que realmente su gasto semanal es muy alto pues sobrepasan incluso los 150 m³. Los datos recopilados se presentan en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Consumos registrados por importantes clientes reproductivos

Propietario	Promedio de consumo entre lunes y viernes (m³/día)	Promedio de consumo fines de semana (m³/día)	Consumo semanal total (m³)
William Montero	57,20	111,65	509,30
Alfredo y Mercedes Gallegos S.A.	16,38	35,89	153,65
Desarrollo Urbanístico Ramírez & Tinoco S.A.	26,30	55,31	242,12
Chanco Rey S.A.	21,42	48,21	203,52
Lavandería Rosa Elena Montero	35,12	52,45	280,50
Promedio	31,28	60,70	277,82

Dado que la ubicación de estos importantes clientes estaba registrada por la Municipalidad y representan una pequeña muestra se procedió a incluir su consumo real en la modelación hidráulica.

5.2.3. Coordenadas y elevaciones

La ubicación geográfica de toda la información recolectada se realizó utilizando un dispositivo GPS de la marca Garmin serie 64s, propiedad de la Municipalidad de Alvarado. Además, se desarrolló un registro fotográfico georreferenciado utilizando la aplicación celular LocusMap.

Con el fin de que el error al momento de la captura del punto fuera lo menor posible se tomaron previsiones como el encendido anticipado del dispositivo al menos 10 minutos antes de la llegada al sitio para mejorar la precisión de este. Además, al tomar un punto se esperó un tiempo de dos minutos antes y después. Las coordenadas fueron adecuadamente revisadas y trasladadas al sistema CRTM05, proyección oficial de los catálogos de objetos geográficos en el país. La transformación de estos valores resulta un paso sencillo en las aplicaciones SIG utilizadas.

Para la obtención de la elevación sobre el nivel del mar de toda infraestructura del acueducto que debe ser introducida en el modelo hidráulico se utilizaron las curvas de nivel proporcionadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Como parte de los servicios OGC (Open Geospatial Consortium) este instituto ha puesto a disposición de cualquier usuario ciertas capas de información geográfica de suma importancia, entre ellas las curvas de nivel de todo el territorio costarricense en la escala 1:25 000.

Esta capa de información presenta curvas cerradas que delimitan zonas de una misma elevación y la separación entre ellas es de 10 m. De esta forma se construyó un modelo de elevación digital, que interpola las elevaciones de puntos entre dos líneas basado en la distancia con respecto a ellas. Esta interpolación se convierte en un cálculo sencillo para cualquier aplicación SIG.

5.2.4. Consideraciones tomadas para la modelación

Dado que en una modelación hidráulica resulta muy difícil la recopilación del cien por ciento de los parámetros solicitados, muchos de ellos tienen que asumirse o simplificarse. Algunos parámetros tienen implicaciones poco significativas en los resultados o su determinación requeriría mucho tiempo y pruebas adicionales que retrasarían el proyecto.

Algunas de las simplificaciones tomadas en la modelación del acueducto fueron:

- Dado que se constató que los tanques se encontraban la mayoría del tiempo en su máxima capacidad, el nivel inicial de los tanques en la modelación corresponde a un 90% del almacenamiento total. Indicar un 100% del nivel total significaría un flujo nulo entre las captaciones y los tanques, por lo que no permitiría observar el comportamiento de ciertas conducciones.

- Se utilizaron los diámetros nominales dado que se desconocen las cédulas (SDR) de las tuberías y por ende los diámetros comerciales.
- Se utilizó una constante de pérdidas C (según la metodología de Hazen-Williams) de 150 para PVC según lo establece como predeterminado el software WaterGEMS.
- No se incluyeron las pérdidas locales generadas por accesorios como codos, válvulas de corte, derivaciones, reducciones o ampliaciones.
- Las nacientes fueron modeladas como reservorios infinitos, es decir, fuentes de producción inagotable que suministran al modelo únicamente lo solicitado por el consumo.
- La longitud de las tuberías fue obtenida del SIG como una proyección horizontal sobre el mapa sin tomar en cuenta las elevaciones del terreno.
- En las válvulas introducidas como recomendación al modelo se asumió el mismo diámetro que la tubería en donde se realizaría su instalación. Sin embargo, es común y aconsejable instalar válvulas reductoras de presión de diámetro menor al de la conducción.
- Dado que se desarrolló un modelo estático no es posible realizar un modelo de calidad del agua.
- La categorización de los servicios se adaptó para únicamente cuatro categorías: domiciliar, comercial, reproductivo y grandes consumidores.

5.3. Calibración del modelo

5.3.1. Efecto de escala del modelo

Inicialmente se decidió la unificación de una cierta cantidad de servicios en nodos de consumo, con el fin de que facilitara la introducción de datos y que redujera la necesidad de procesamiento computacional. Se recurrió a la unión de servicios abastecidos por un mismo tramo de tubería en una longitud no mayor a los 25 m y cuyas elevaciones no presentaran una diferencia mayor a los 10 m. Se adjuntó la elevación de los servicios con mayor y menor altitud a los atributos del nodo, con el objetivo de tener presente que, al observar los resultados de presiones mínimas y máximas de un nodo de consumo, debía verificarse la presión máxima en el punto de menor elevación y al contrario, con el fin de cumplir con los umbrales de la normativa.

La metodología anteriormente descrita arrojó gran cantidad de inconvenientes al ejecutar el modelo, principalmente en la determinación de las presiones. Se observó el efecto de que al unir en un nodo de consumo diferentes servicios (principalmente varios reproductivos) los

caudales solicitados resultaban excesivos para tuberías de diámetros tan pequeños como los del acueducto en estudio, por ende, las velocidades del flujo aumentaban por encima de los 3m/s y las pérdidas por fricción, incluso en tramos muy cortos, resultaban sumamente altas. En algunos sitios incluso se registraban presiones negativas.

Por esa razón, fue necesario desligar por completo la mayoría de los nodos (principalmente en zonas de diámetros menores a 50 mm y usuarios reproductivos) y establecer como unidad de consumo cada uno de los servicios, incorporando incluso la distancia real de separación entre ellos. De esa forma el modelo aumentaba su tamaño y necesidad computacional, pero lograba un ajuste real de los parámetros de presión, velocidad y caudal dentro de la red. El modelo finalmente se compuso de 823 nodos y 952 tramos de tubería.

5.3.2. Dotaciones

Como segunda etapa, ya con la red definida adecuadamente, se procedió a introducir los consumos para cada nodo según su categoría. Las dotaciones base para el modelado, como se comentaba anteriormente en la sección 5.2.2, provienen tanto de datos del registro municipal como recolectados en campo. Los valores iniciales y su procedencia se destacan en el Cuadro 16:

Cuadro 16. Dotaciones iniciales para la modelación del acueducto de Pacayas.

Categoría tarifaria	Dotación (m³/día)	Fuente
Domiciliar	2,14	Promedio de todo el registro municipal
Comercial	1,26	La mitad del promedio domiciliar de todo el registro municipal
Reproductiva	Valores desde 5,9 hasta 141,2	Datos obtenidos mediante el MAG
Grandes clientes	Valores desde 35,8 hasta 111,7	Datos recopilados por campaña de medición del departamento a grandes consumidores

Una vez que se introdujeron estos valores y se computó el modelo, se presentaron problemas similares a los comentados en la sección 5.3.1, sin embargo, ya no correspondían a un efecto de escala del modelo que ya se había solucionado ni a errores en el catastro entero del acueducto que fue extensamente revisado. Por consiguiente, los únicos valores de los que no se tenía completa certeza resultaban ser las dotaciones domiciliarias o comerciales utilizadas.

Seguidamente se realizó un análisis detallado de los registros de lecturas históricas para aquellos servicios domiciliarios con medidor instalado y se notó la existencia de una cantidad importante de datos extremos que equivocan el promedio. Tal y como se muestra en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Estadísticas provenientes del registro completo de los servicios domiciliarios con micromedición

Número de medidor	Propietario del servicio	Consumo promedio (m3/día)
18-183	Luis Fernando Varela	1,26
033-16	Edgar Calvo	3,90
10043	Almasigos Pacayas Casa	1,87
031-16	Maria Libia	1,28
155861	Laura Montenegro	0,65
003-16	Extarlin Obando Serrano	0,48
18183	Liz Varela	1,25
024-16	Jose Adulio	0,94
019-16	Allan Jiménez	0,69
018-16	Manuel Mora Carvajal	1,54
061-16	Maritza Rivera Leandro	1,55
15-58-72	Alvaro Serrano	4,13
15-58-55	Marcos Serrano	2,36
053-16	Marta Alvarez	6,22
010-16	Lizeth Obando	0,29
051-16	Lucia Rivas	0,93
18-186	Enrique Loaiza	1,32
18-184	Jose Adolfo Obando	3,06
18-194	Carlo Magno Gutiérrez	4,28
15-5875	Yanina Jiménez	4,46
100404	Chanchera Casa	2,49
Promedio		2,14
Desviación estándar		1,61
Mediana		1,54

Nótese que la desviación estándar es muy alta, prácticamente de un 75% del valor promedio, indicador claro de que el promedio no es realmente la medida estadística idónea para una variación tan alta entre los datos. No obstante, la mediana del registro tiene un valor de 1,54

m³/día que equivalen exactamente a 375,6 lpd, valor coincidente con la metodología propuesta por la normativa nacional.

Esta dotación fue utilizada para el consumo domiciliario y comercial, este último calculado como el 50% del domiciliario, es decir 188 lpd. Los resultados de la nueva modelación no presentaron problemas de presiones negativas y se observó un comportamiento hidráulico mucho más estable del sistema.

5.3.3. Presión

Una vez que se ajustó la modelación cuánto a escala y dotaciones, se procedió a realizar mediciones en campo de la presión con el fin de verificar la similitud entre los valores matemáticos del modelo y el comportamiento real.

Dado que el único instrumento disponible para realizar las comprobaciones fue un manómetro Bourdon conectado a una manguera y rosca de 13 mm, los puntos debían ser llaves de la tubería intradomiciliaria. Se tiene claro la incertidumbre que el consumo a lo interno de la vivienda podría generar en la presión al momento de la medición, sin embargo, la inexistencia de puntos de control o medición directa de las tuberías primarias no permitió el uso de una tecnología como los registradores de presión.

Se seleccionaron puntos específicos de las diferentes zonas de presión; cercanos al tanque de almacenamiento, puntos medios en las líneas de distribución y los ramales finales. Los resultados de las mediciones en campo se detallan en la Figura 15.

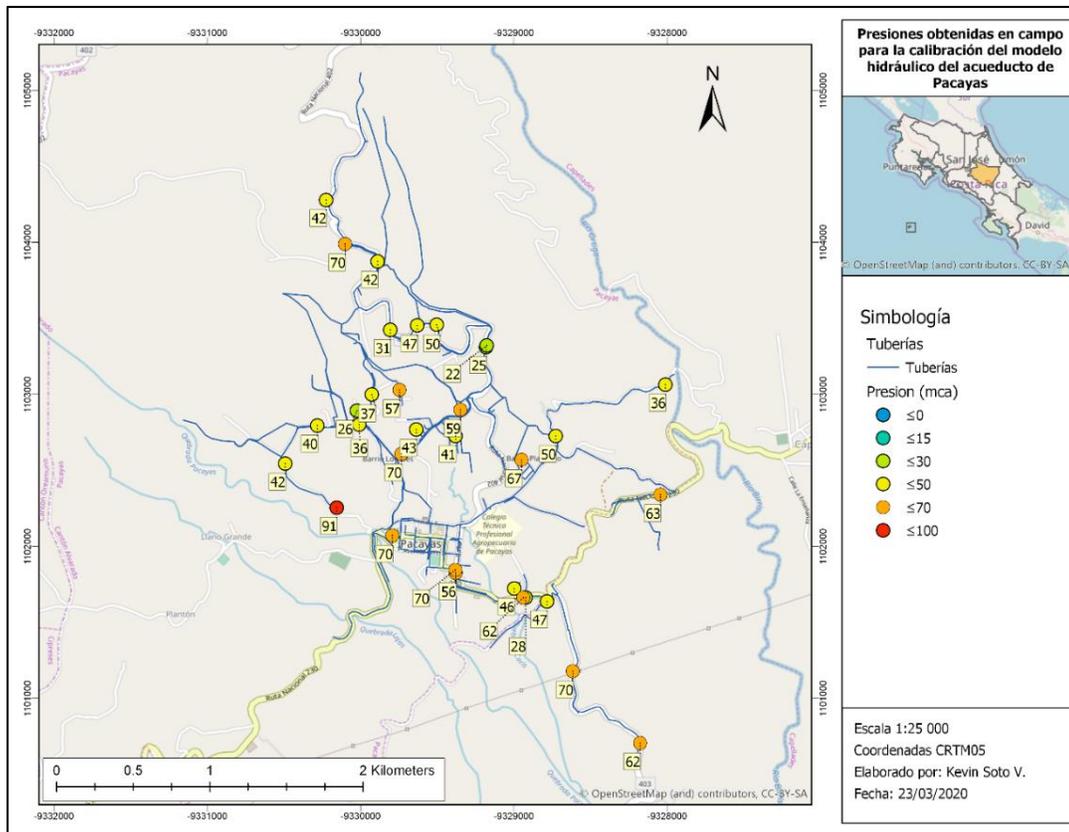


Figura 15. Ubicación de los puntos de calibración y resultados de presión obtenidos en campo

En el Cuadro 18 se realiza una comparación entre el registro completo donde se puede observar una similitud importante entre los datos teóricos y experimentales.

Cuadro 18. Comparación entre las presiones reales y producto del modelo hidráulico

Punto	Zona de presión	Presión real (mca)	Presión del modelo (mca)	% de diferencia
1	Captación Martín Montero	26,0	29,2	12,3
2	Captación Martín Montero	36,0	34,0	5,6
3	Captación Martín Montero	70,0	78,1	11,6
4	El Descanso	62,0	71,6	15,5
5	La Isla	41,0	38,2	6,8
6	Lourdes	47,0	41,8	11,1

Cuadro 18. Comparación entre las presiones reales y producto del modelo hidráulico (Cont.)

Punto	Zona de presión	Presión real (mca)	Presión del modelo (mca)	% de diferencia
7	Lourdes	46,0	39,6	13,9
8	Lourdes	63,0	62,4	1,0
9	Lourdes	70,0	72,0	2,9
10	Lourdes	70,0	69,6	0,6
11	Lourdes	28,0	23,9	14,6
12	Lourdes	62,0	63,4	2,3
13	Lourdes	70,0	79,5	13,6
14	Martín Montero	31,0	29,3	5,5
15	Martín Montero	47,0	47,8	1,7
16	Pacayón	42,0	37,0	11,9
17	Pacayón	91,0	89,0	2,2
18	Pacayón	40,0	35,8	10,5
19	Quebra gradiente Noré	42,0	38,6	8,1
20	Quebra gradiente Noré	42,0	47,1	12,1
21	Quebra gradiente Noré	70,0	64,7	7,6
22	Tanque Chico Orozco	50,0	57,3	14,6
23	Tanque Chico Orozco	36,0	34,7	3,6
24	Tanque Chico Orozco	67,0	67,9	1,3
25	Tanque La Compostera	25,0	23,7	5,2
26	Tanque La Compostera	50,0	49,0	2,0
27	Tanque La Compostera	22,0	18,9	14,1
28	Vicente	43,0	39,5	8,1
29	Vicente	59,0	57,0	3,4
30	Zenon	37,0	35,8	3,2
31	Zenon	57,0	54,8	3,9
Promedio				8,5

De acuerdo con el "Tomo 13: Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Distribución" parte del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (Conagua, 2019d) para aceptar una modelación hidráulica se deben cumplir una serie de criterios que aseguren la veracidad del modelo. Se debe cumplir al menos uno de los siguientes requisitos:

- a. Hasta 0,50 mca o 5% de variación en la carga de presión para 85% de las mediciones.

- b. Hasta 0,75 mca o 7,5% de variación en la carga de presión para 95% de las mediciones.
- c. Hasta 2 mca o 15% de variación en la carga de presión para el 100% de las mediciones.

Por ende, al unificar los resultados de acuerdo con su porcentaje de variación el criterio c) representa el más cercano a su cumplimiento, tal y como lo muestra el Cuadro 19.

Cuadro 19. Cumplimiento de los criterios de validez de la calibración de la presión para el modelo hidráulico

Criterios	< 5% de diferencia	< 7,5% de diferencia	< 15% de diferencia
Mediciones dentro del rango	12	16	30
Mediciones totales	31	31	31
Dentro del rango	39%	52%	97%

Dado que un único dato no cumple con el porcentaje de diferencia esperado por tan solo 0,5% se toma como válida la calibración de presión del modelo hidráulico.

5.3.4. Caudal

Para realizar la validación del caudal se seleccionaron 11 puntos del sistema que presentaban alguna problemática o situación especial, como la ubicación cercana de una válvula cerrada parcialmente, un conjunto de válvulas de corte del que se desconocía su estado de operación y diámetros mayores a 50 mm que facilitarían la medición, dado que las pruebas se realizarían con el caudalímetro ultrasónico portátil ChronoFlo 430. Además, la tubería debía encontrarse relativamente expuesta para no incurrir en grandes excavaciones para realizar la medición.

La ubicación de los sitios de medición se presenta en la Figura 16.

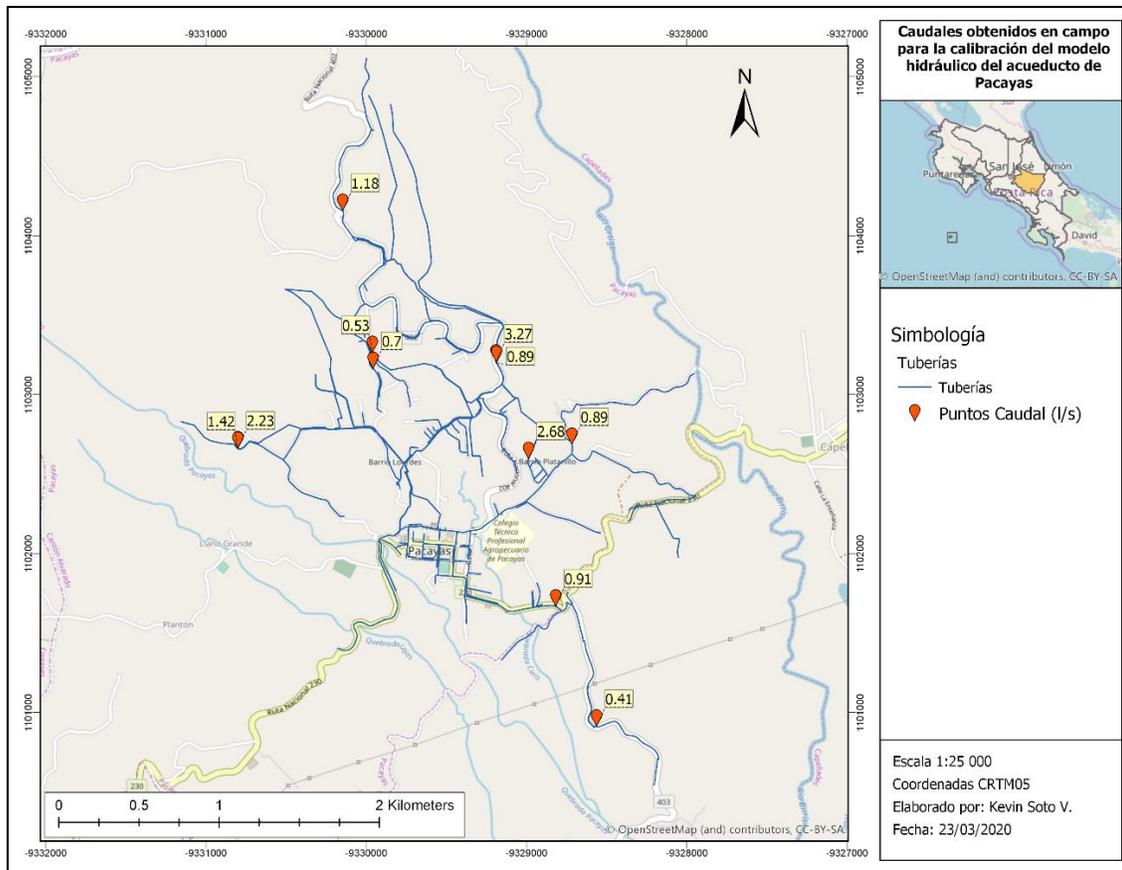


Figura 16. Ubicación de los puntos de calibración y resultados de caudal obtenidos en campo

En el Cuadro 20 se presenta el registro completo de los caudales medidos con el dispositivo ultrasónico y los calculados por el modelo.

Cuadro 20. Comparación entre los caudales reales y los determinados mediante el modelo hidráulico

Punto	Zona de presión	Caudal real (l/s)	Caudal del modelo (l/s)	Diferencia	% de diferencia
1	Pacayón	2,23	2,19	0,04	1,8
2	Pacayón	1,42	1,56	0,14	9,9
3	Zenon	0,70	0,81	0,11	15,7
4	Zenon	0,53	0,56	0,03	5,7
5	Tanque La Compostera	0,89	0,97	0,08	9,0
6	Tanque La Compostera	3,27	3,36	0,09	2,7
7	Tanque Chico Orozco	2,68	2,54	0,14	5,2
8	Tanque Chico Orozco	0,89	0,92	0,03	3,4

Cuadro 20. Comparación entre los caudales reales y los determinados mediante el modelo hidráulico (Cont.)

Punto	Zona de presión	Caudal real (l/s)	Caudal del modelo (l/s)	Diferencia	% de diferencia
9	Tanque Lourdes	0,91	0,99	0,08	9,0
10	Quebragradiente Noré	1,18	1,10	0,08	6,8
11	Tanque El Descanso	0,41	0,38	0,03	7,3

De acuerdo con Conagua (2019d), al menos uno de los siguientes requisitos debe cumplirse con el fin de aceptar como correctas las calibraciones de caudal:

- a. Para modelos estáticos, los caudales deben coincidir hasta 5% con el caudal medido en campo.
- b. Los caudales con tolerancia de 10% o más deberán representar menos del 10% del total de la demanda.

Al agrupar los datos del Cuadro 20 que no cumplen con una tolerancia de 0,1 y calcular el caudal real de esta muestra se obtiene un valor de 4,80 l/s, que representa un 10,14% del caudal total demandado (ver Cuadro 21).

Cuadro 21. Cumplimiento de los criterios de validez de la calibración del caudal para el modelo hidráulico

Parámetro	Caudal (l/s)
Demanda total	47,35
Valores fuera de tolerancia	1,42
	0,70
	2,68
Total del caudal real fuera de tolerancia	4,80
% del total demandado	10,14%

El valor recomendado por el criterio b) de un 10% o menos de la demanda total es prácticamente alcanzado, por lo que se considera correcta la validación de los parámetros de caudal.

5.3.5. Proyecciones poblacionales

Con respecto al cálculo de la demanda poblacional a futuro se procedió a realizar proyecciones de la población, según las distintas metodologías descritas en la sección 2.3.2. Los censos poblacionales son desarrollados por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). Esta institución pone a disposición del público los datos de los censos a nivel país de los años 2001 y 2011. Por lo tanto, estos se utilizaron como base para las proyecciones futuras. Los resultados de los distintos métodos calculados se muestran en el Cuadro 22.

Cuadro 22. Resultados de las proyecciones poblacionales para diferentes métodos utilizados

Método de proyección	Tasa de crecimiento	Año				
		2020	2030	2035	2040	2050
Geométrico	0.00400	5834	6071	6194	6319	6576
Aritmético	0.00408	5835	6065	6180	6295	6525
Exponencial	0.00399	5834	6072	6194	6319	6577
Promedio	0.00403	5834	6069	6189	6311	6559

Es importante destacar que, según las normas de diseño nacionales, la infraestructura como tanques y líneas de conducción debe responder a un periodo de diseño mínimo de 25 años, mientras que las tuberías de distribución son diseñadas para un periodo de 20 años (AyA, 2017). Por esta razón, el 2050 fue elegido como el año de diseño final bajo el supuesto de que las acciones que tome la Municipalidad no serán completamente inmediatas, sino que necesitan de un periodo de búsqueda del presupuesto inicial.

Los resultados obtenidos permiten apreciar que prácticamente todos los métodos presentan variaciones muy pequeñas en lapsos de 10 años, por lo que se decidió seleccionar un periodo medio, el año 2035, para observar su comportamiento y tomar decisiones de cara al periodo de diseño final. Además, entre los distintos métodos los resultados de la población para un mismo año son prácticamente iguales, por lo que se creyó adecuado utilizar los valores medios.

5.4. Escenarios de modelación

Al disponer de un modelo calibrado, es posible desarrollar simulaciones del sistema de agua potable frente a cambios que este podría sufrir. Los escenarios desarrollados para el modelo de Pacayas se relacionan principalmente con 3 situaciones posibles: el crecimiento poblacional, la introducción de micromedición y el desligue de las actividades reproductivas de alto consumo del acueducto. El crecimiento poblacional es un aspecto incuestionable, mientras que las restantes situaciones responden a cambios a futuro que la administración deberá implementar de una u otra forma.

La Municipalidad de Alvarado se encuentra en la obligación de incorporar medidores en la totalidad de sus servicios, lo que provocará que grandes consumidores y clientes reproductivos no se encuentren de acuerdo con las altísimas tarifas que deberían pagar si la cantidad de agua que consumen se mantuviera constante. Esto generará importantes conflictos para la administración, pero más allá, la búsqueda por parte de los interesados de fuentes alternas de abastecimiento de su demanda, dado que bien lo establece la Ley de Aguas, este tipo de usos no son prioritarios frente al consumo humano.

Estas dos situaciones generarían una disminución considerable de la demanda y por ende menores caudales trasladándose por las mismas tuberías. A su vez una disminución de la velocidad y de las pérdidas por fricción, por lo que las presiones dinámicas subirían abruptamente. Sin embargo, el crecimiento poblacional generaría el efecto inverso. Por lo tanto, a través de modelaciones se pretende descubrir qué factor pesa más en el comportamiento futuro del acueducto, qué cambios deben realizarse para optimizar su funcionamiento y en qué periodo sería ideal realizar estas modificaciones.

Finalmente, al combinar las tres situaciones posibles, comentadas al inicio de esta sección, con los dos periodos futuros de interés, los 7 escenarios que se modelarán son:

A. Escenario para el 2020:

A.1. Instalación de la micromedición antes de finalizar este año, manteniendo el mismo catastro de usuarios

Este escenario modelará el caso en que la Municipalidad de Alvarado, tras una gran inversión inicial, logre la instalación de micromedidores en todos sus servicios antes de finalizar el año

2020. No se incorporaría crecimiento poblacional, simplemente se verían afectadas las dotaciones de usuarios domiciliarios. Dado que es muy difícil predecir el comportamiento de los servicios reproductivos o grandes clientes, estos mantendrán su dotación base.

B. Escenario para el año 2035

B.1. Crecimiento poblacional sin incorporar micromedición.

Como segundo escenario, se plantea la situación en que, al finalizar el año 2035, la micromedición no se incorporó en los servicios del acueducto, por retrasos en la gestión municipal. No obstante, la población del cantón aumentó y, por lo tanto, variaría la dotación de los servicios domiciliarios, pero no las dotaciones de usuarios reproductivos o grandes clientes por la situación comentada anteriormente.

B.2. Crecimiento poblacional e instalación de la micromedición antes de finalizar este año.

Como tercer escenario se hace referencia a la situación en que, al finalizar el año 2035, la micromedición fue instalada satisfactoriamente. Además, se considera, mediante la variación de las dotaciones domiciliarias, el crecimiento poblacional del cantón.

B.3. Crecimiento poblacional, instalación de la micromedición antes de finalizar este año y desligue de los servicios categorizados como grandes clientes y reproductivos.

El cuarto escenario corresponde al caso en que, al finalizar el año 2035, la micromedición fue instalada satisfactoriamente. Se incorpora el crecimiento poblacional en los servicios domiciliarios, y adicionalmente se supone que los clientes reproductivos y grandes consumidores, por su alto consumo y por ende un impacto importante en su economía, no se verían beneficiados por la micromedición. Se verán obligados a organizarse como sociedad productiva y buscar formas alternas para satisfacer su consumo.

Se pretende con la modelación de este escenario, que la Municipalidad cuente con un estimado del consumo reproductivo que se presenta en el acueducto y, en caso de ser necesario aislarlo, tenga claras las razones y los cambios que podrían generarse en el comportamiento hidráulico de su sistema.

C. Escenario para el año 2050

C.1. Crecimiento poblacional sin incorporar micromedición.

C.2. Crecimiento poblacional e instalación de la micromedición antes de finalizar este año.

C.3. Crecimiento poblacional, instalación de la micromedición antes de finalizar este año y desligue de los servicios categorizados como grandes clientes y reproductivos.

Los escenarios C.1, C.2 y C.3 son equivalentes a los B.1, B.2 y B.3 respectivamente, únicamente dentro del horizonte temporal del año 2050.

Cabe destacar que la dotación domiciliar, para escenarios sin micromedición, se mantendría en 375 lpd según el escenario actual ya cuantificado y calibrado. En el caso de escenarios donde se instale micromedición la dotación domiciliar se reduciría a 200 lpd según lo establecido en la normativa de diseño para poblaciones rurales (AyA, 2017). Las dotaciones agrícolas y de grandes consumidores se mantendrían intactas para escenarios futuros, dado que en reuniones con especialistas del MAG se comentó que las fronteras agrícolas del distrito se encuentran prácticamente agotadas (B. Molina, comunicación personal, 14 de febrero del 2020).

Dado que predecir la ubicación de nuevos desarrollos domiciliarios dentro del distrito necesita de procedimientos más avanzados, se optó por conservar la misma ubicación de los servicios domiciliarios, pero aumentar su consumo para equiparar las necesidades hídricas que generarían aquellos nuevos usuarios. Es decir, distribuir el volumen que consumiría la nueva población en los mismos nodos ya establecidos. De esta manera, los consumos para cada escenario serían los expuestos en el Cuadro 23.

Cuadro 23. Consumos para cada uno de los escenarios de la modelación

Consumo (m³/día)	Base	A.1	B.1	B.2 y B.3	C.1	C.2 y C.3
Domiciliar	1,54	0,82	1,63	0,87	1,72	0,92
Comercial	0,77	0,41	0,81	0,43	0,86	0,46

5.5. Análisis de los resultados

En primera instancia, se presentarán los parámetros de funcionamiento normales del acueducto, con el fin de que sirva como escenario base y sea posible realizar una comparación directa con los escenarios planteados en la sección anterior.

Basado en el estudio realizado del sistema, se ejecutó una modificación en las distintas zonas de presión, donde se incorpora la puesta en funcionamiento de los tanques Sergio y del tanque del Hidrante. Según lo comentado por los funcionarios operativos del acueducto de Pacayas, estas modificaciones se realizarán en el corto plazo pues las acciones son sencillas; apertura de válvulas de cierre y salida de funcionamiento de tramos cortos de tubería. La nueva definición de las zonas de presión se muestra en la Figura 17.

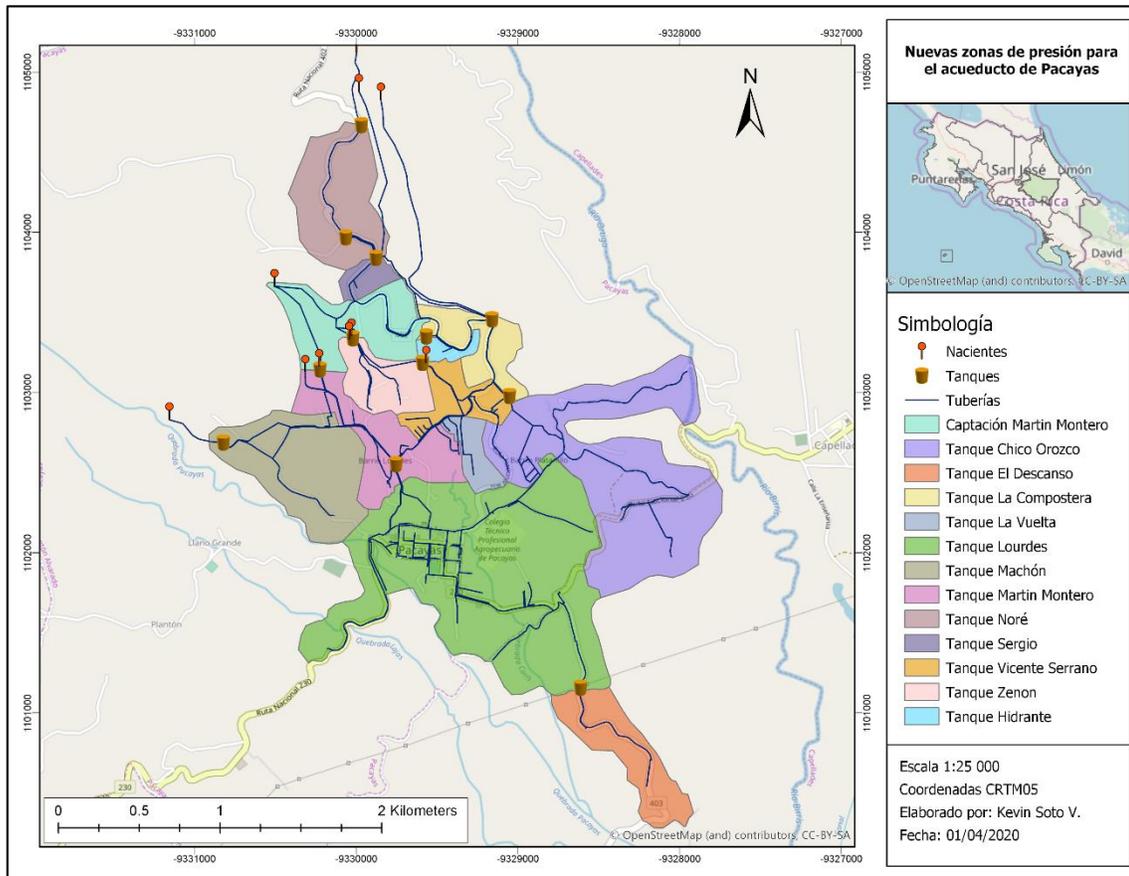


Figura 17. Nuevas zonas de presión definidas para el acueducto de Pacayas

Se presentarán los resultados en torno a tres ejes principales: a) presiones y b) velocidad en las tuberías y c) producción, disponibilidad, consumo y almacenamiento del recurso hídrico. En el caso de los resultados a) y b) se agruparán según zonas de presión, con el fin de que la variación en el comportamiento hidráulico del sistema sea fácilmente apreciable y posteriormente se pueda realizar un seguimiento más detallado de las acciones de mejora recomendadas. Los resultados globales del sistema c) se detallarán en una sección aparte.

5.5.1. Captación Martín Montero

Esta zona de presión abarca un área de 0,33 km² y abastece a un total de 47 servicios, de los cuales 32 de ellos son clientes domiciliarios y 13 reproductivos. Se encuentra en la parte alta del sistema y no posee un tanque de almacenamiento, sino que suministra directamente el fluido desde la naciente del mismo nombre.

De acuerdo con los escenarios comentados, se presenta en la Figura 18 la presión dinámica mínima y máxima que se registró en algún nodo de consumo de la zona de presión, además de la presión estática del nodo más crítico. La presión media reportada hace referencia a la cabeza piezométrica promedio de los 47 servicios conectados. Por último, se presenta el límite máximo de presión estática (70 mca) y el mínimo de presión dinámica (15 mca) para una red de distribución de agua potable según la reglamentación nacional (AyA, 2017).

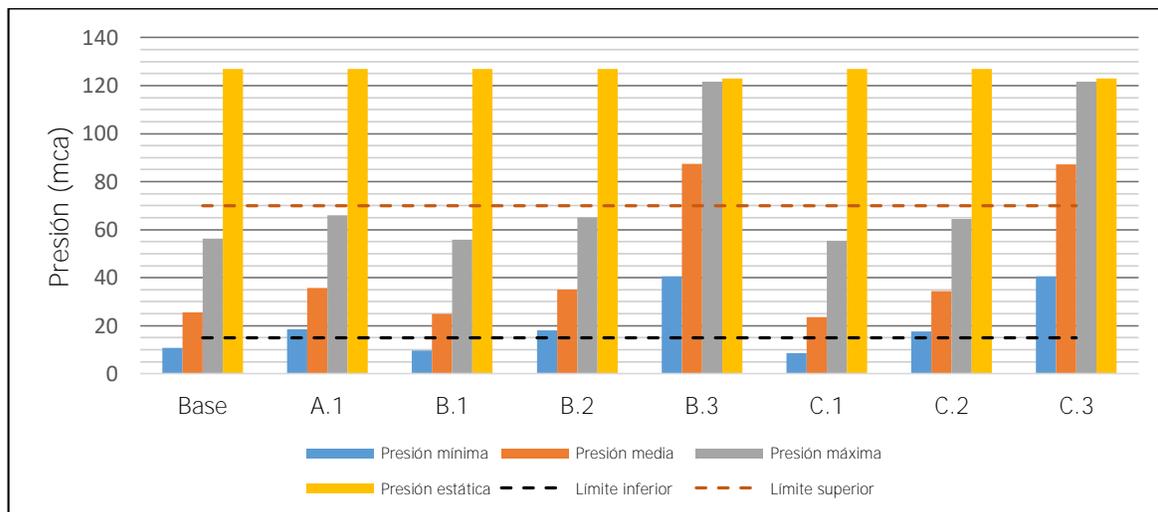


Figura 18. Resultados de presión para la zona Captación Martín Montero

Los resultados anteriores muestran que en los escenarios de consumo sin micromedición (Base, B.1 y C.1) la presión mínima no alcanza los 15 mca en al menos un nodo de consumo por lo que no se cumple con la reglamentación. Se observa que para los restantes escenarios que sí incorporan la micromedición, esta tecnología permitiría el aumento de la presión mínima de manera que cumpliría con la regulación.

En esta zona de presión 28% de los clientes son reproductivos, por lo que su desconexión, planteada en los escenarios B.3 y C.3, aumentaría significativamente la presión media y máxima, sobrepasando los 70 mca permitidos. Este es un indicador de que tan solo incorporar

la micromedición en este sector generaría una mejoría en la gestión de la presión. No obstante, se debe resaltar que la presión estática del nodo más crítico supera los 120 mca por lo que se necesitará la inclusión de válvulas reductoras en uno o más puntos de este subsistema.

En cuanto a las tuberías, se hace énfasis principalmente en la velocidad mínima, media y máxima de la red de distribución. Se destaca un máximo de 3 m/s como límite superior, mientras que la velocidad mínima corresponde a 0,6 m/s, no obstante, cuando se presenten valores menores al mínimo, prevalecerá el criterio del diámetro mínimo, que corresponde a 75 mm, permitido en sitios de desarrollo limitado. En conducciones y aducciones, se considera diámetro mínimo al determinado por el cálculo hidráulico (AyA, 2017). Los resultados para Captación Martín Montero se muestran en la Figura 19.

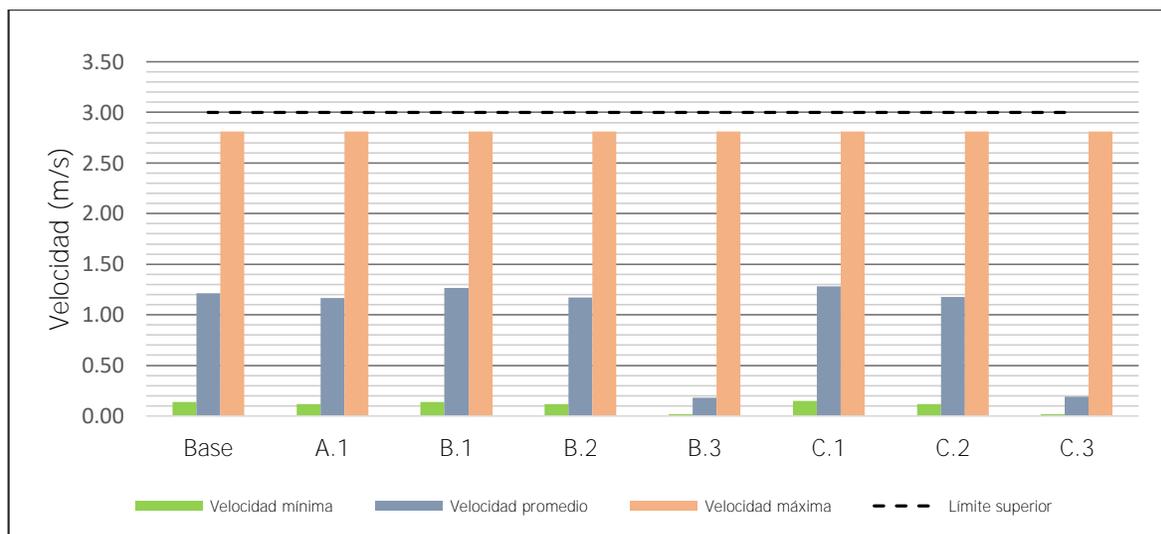


Figura 19. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Captación Martín Montero

Se puede observar que las velocidades mínimas y máximas de la red varían muy poco entre un escenario y otro, mientras que la velocidad promedio si se reduce considerablemente para los escenarios B.3 y C.3 donde los consumos reproductivos se desligan del sistema.

Se debe resaltar que toda la red de esta zona de presión cumple con las velocidades máximas establecidas por la norma, por lo que los diámetros parecieran ser los adecuados para el flujo. Sin embargo, todas las tuberías de este sector se componen de diámetros menores a los 50 mm, por lo que no se cumple con lo establecido en la reglamentación nacional del diámetro mínimo.

Finalmente, dentro de esta zona no se encuentran hidrantes actualmente, pero se recomendó por parte del Cuerpo de Bomberos la instalación de uno, por lo que debería realizarse la sustitución de un tramo importante de tubería.

5.5.2. Tanque Chico Orozco

La zona de presión definida por el Tanque Chico Orozco abarca un área de 1,04 km² y abastece a un total de 120 servicios, de los cuales 108 de ellos son clientes domiciliarios, 9 reproductivos, 2 grandes consumidores y tan sólo un servicio comercial. Este subsistema se localiza al límite este del distrito, contiguo a Capellades. Los resultados del comportamiento de la presión en los diferentes escenarios se presentan en la Figura 20.

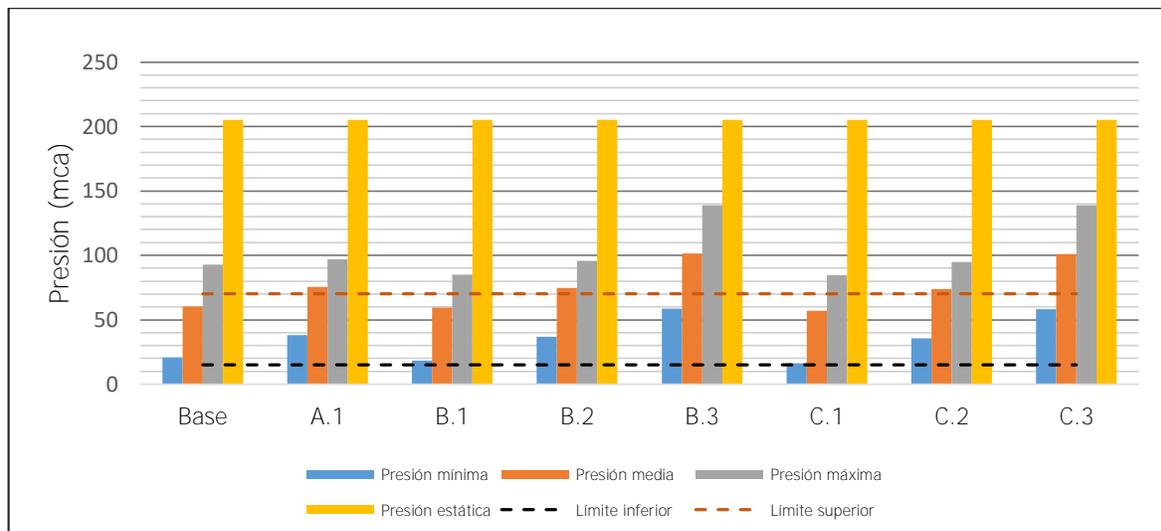


Figura 20. Resultados de presión para la zona Tanque Chico Orozco

Los resultados muestran que en todos los escenarios la presión mínima se encuentra al menos en el límite establecido. En los escenarios donde se introduce la micromedición (A.1, B.2, B.3, C.2 y C.3) la presión máxima, incluso la media, sobrepasan los 70 mca límite. Este fenómeno se hace aún más evidente con la salida de los consumos reproductivos, en los casos B.3 y C.3. La presión estática es sumamente alta, superior a los 200 mca, por lo que se deberá recurrir a un control urgente de la presión mediante válvulas.

Respecto a la velocidad en las líneas de distribución, la Figura 21 muestra los resultados.

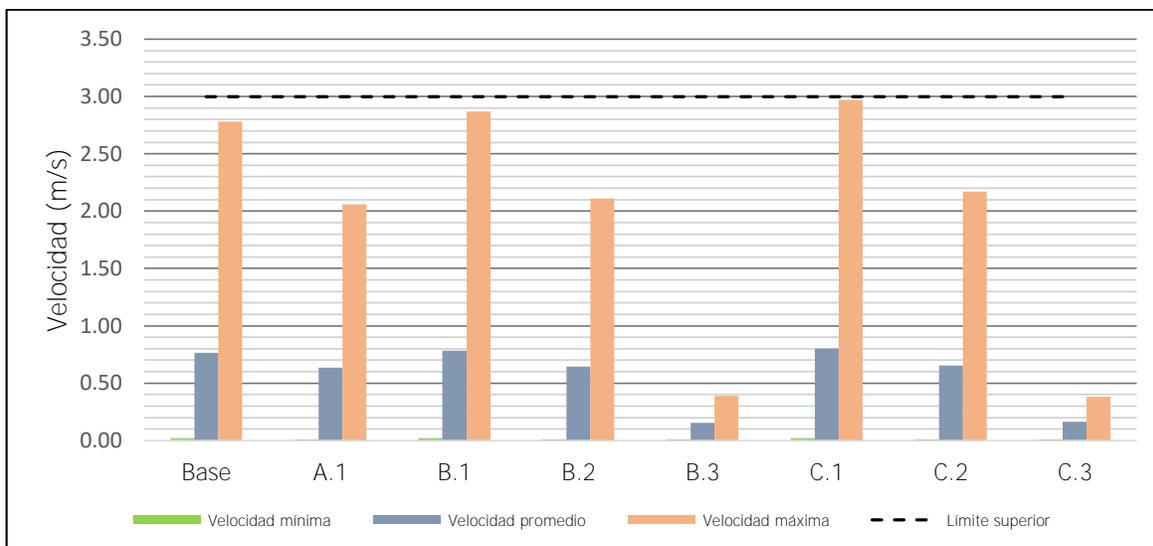


Figura 21. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Chico Orozco

Según la figura anterior ningún escenario excede los 3 m/s por lo tanto cumplen con la normativa. Se nota una tendencia de reducción de la velocidad máxima conforme disminuye el consumo, notable en los escenarios secuenciales B.1, B.2 y B.3. Este fenómeno es sinónimo del caudal excesivo que se transporta a través de tuberías de diámetro muy pequeño, lo que genera altas velocidades en la red.

Las velocidades mínimas son muy bajas en prácticamente todos los escenarios, sin embargo, no existe ninguna limitación para la velocidad mínima para redes de distribución.

En este subsector, la red posee una longitud de 4,8 km y su diámetro mayor es de 50 mm. Un 65% de esta consta de tubería de 38 mm, que se encuentra en conflicto con los diámetros mínimos normados. Finalmente, dentro de esta zona no se encuentran hidrantes actualmente y no se recomendó ninguna instalación futura por parte del Cuerpo de Bomberos.

5.5.3. Tanque El Descanso

La zona de presión definida por el Tanque El Descanso corresponde a la cola final del sistema en la parte baja, localizada al sur del distrito. Abarca un área de 0,27 km² y abastece apenas 11 servicios, de los cuales 9 son clientes domiciliarios y 2 reproductivos. Es una zona apta para el crecimiento habitacional por lo que se previó la instalación de este tanque.

En la Figura 22 se detallan los resultados de presión para cada uno de los escenarios.

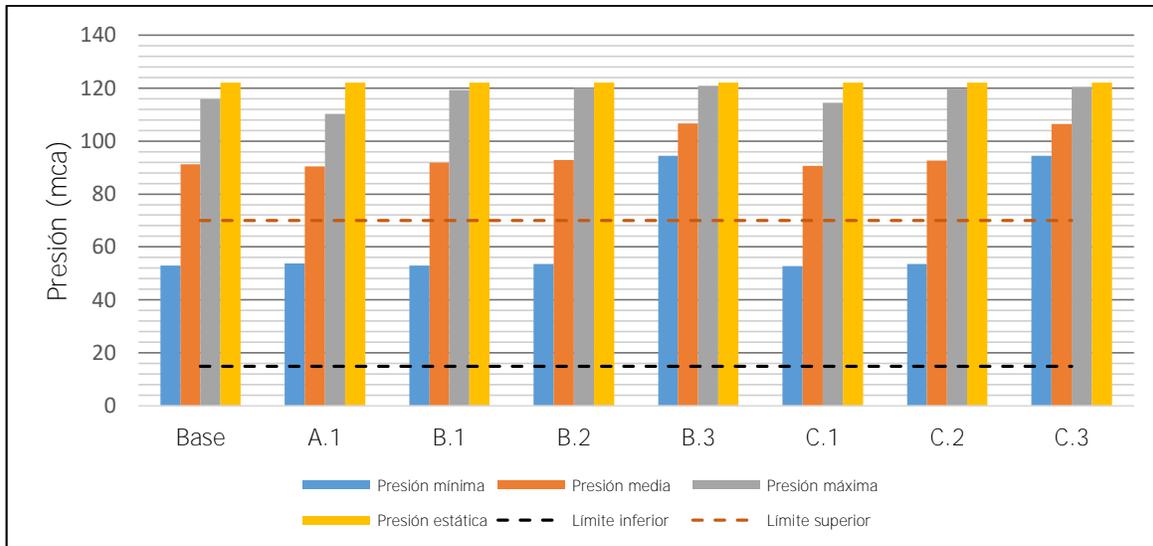


Figura 22. Resultados de presión para la zona Tanque El Descanso

Los resultados muestran que en todos los escenarios la presión mínima se encuentra muy por encima del límite establecido. La presión media y máxima superan lo establecido en la normativa. Al centrar la atención en los escenarios B.1, B.2, C.1 y C.2 se deduce que el crecimiento poblacional, o la micromedición, tienen un efecto prácticamente imperceptible en el comportamiento de la presión, mientras que para los casos B.2 y B.3 o C.2 y C.3 si se nota un aumento importante, en el que la presión mínima supera los 70 mca. Esta situación indica que el comportamiento de la presión de este sector se ve gobernado por los consumos reproductivos. Además, es evidente que deben gestionarse las altas presiones debido a las grandes diferencias de elevación entre el tanque y los nodos de consumo.

En cuanto a la red de distribución de este subsistema, el diámetro mayor corresponde a 38 mm que representan un 63% de la longitud de la red, de un total de 1,2 km. Por lo que sus diámetros se encuentran por debajo de lo permitido por la norma.

Las velocidades del flujo en las líneas se muestran en la Figura 23.

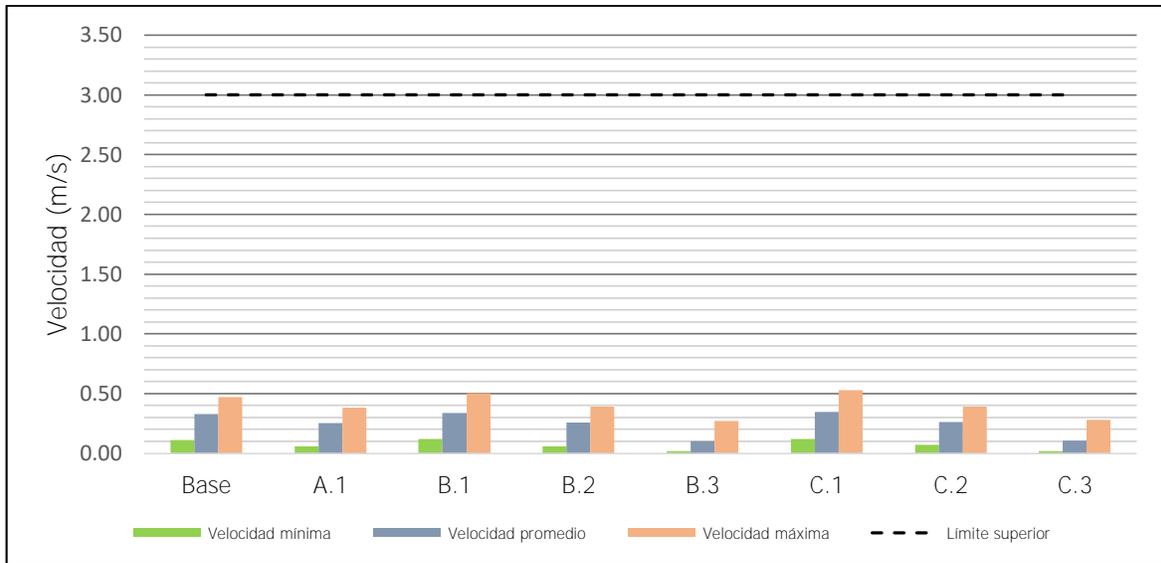


Figura 23. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque El Descanso

Es notable que las velocidades son muy bajas para todos los casos; no superan los 0,5 m/s por lo que se encuentran dentro del límite máximo permitido. Sin embargo, todos los escenarios se encuentran por debajo del umbral inferior a pesar de que la tubería de esta zona de presión se compone mayoritariamente de un diámetro de 38 mm. La razón de este comportamiento tan particular se debe a la existencia de tan solo 12 servicios domiciliarios y uno reproductivo que se abastecen de un tramo que posee una longitud de 950 metros, es decir, el caudal transportado resulta muy bajo incluso para una tubería de diámetro tan pequeño.

Se debe destacar que el comportamiento a lo largo del tiempo casi no se ve afectado por los cambios en la medición del consumo, el crecimiento poblacional o el desligue de clientes agropecuarios.

Esta zona necesita sustitución de tuberías para el cumplimiento normativo y no realmente porque el comportamiento de las existentes genere problemas. Cabe destacar que en esta zona no existen ni se propone la instalación de hidrantes a futuro. Por lo tanto, las acciones de atención deberían priorizarse en la gestión de la presión, mientras que la sustitución de tuberías podría ejecutarse a futuro de acuerdo con el desarrollo urbanístico de la zona, si no se generan desarrollos constructivos en esta zona, la tubería no debería aumentarse de diámetro pues reduciría aún más la velocidad, generando incluso problemas de acumulación de sedimentos.

5.5.4. Tanque La Compostera

El Tanque La Compostera posee una línea de conducción de 50 mm de diámetro y aproximadamente 575 m de longitud hasta su zona de abastecimiento, distancia que representa casi 110 m de diferencia de elevación.

Los servicios totales son 50 y se dividen en 44 domiciliarios, 3 reproductivos y 3 comerciales. Este subsistema abarca 0,19 km² y se localiza en el extremo noreste del acueducto. El comportamiento de la presión de acuerdo con los diferentes modelos desarrollados se muestra en la Figura 24.

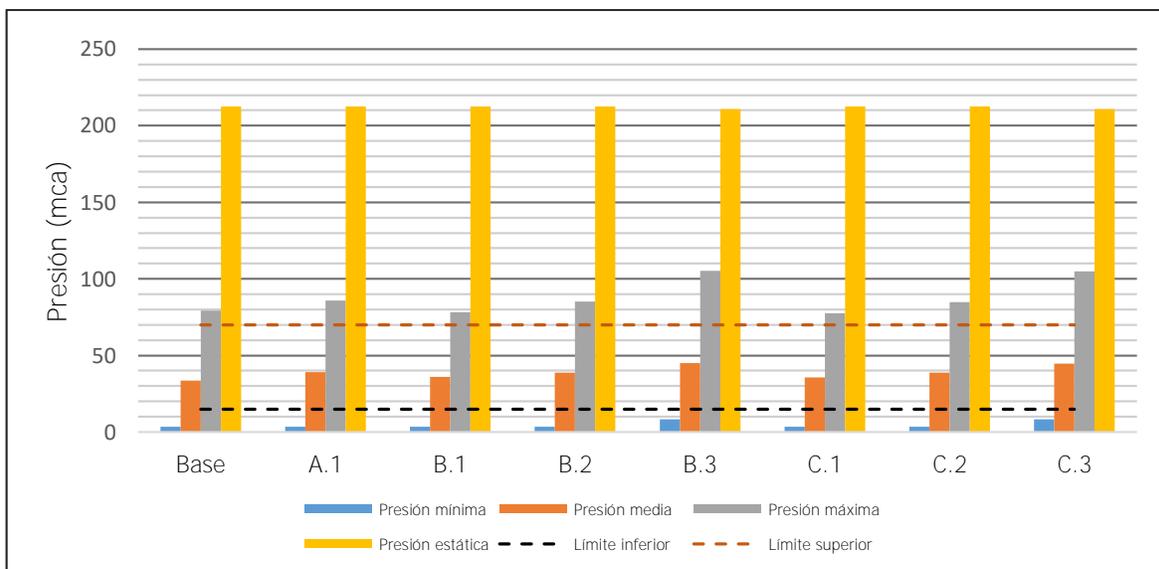


Figura 24. Resultados de presión para la zona Tanque La Compostera

Los resultados muestran que en todos los escenarios la presión mínima es inferior al límite establecido, situación debido a la cercanía física entre ciertos servicios con la ubicación del tanque. Igualmente, la presión máxima supera el valor determinado en la normativa. Los escenarios B.1 y B.2 demuestran que la introducción de la micromedición no generaría variaciones significativas, así mismo la variación poblacional (escenario B.1 y C.1). Mientras que, el recorte de los servicios agrícolas sí propiciaría un aumento de al menos 20 mca (escenario B.2 y B.3, o C.2 y C.3).

La diferencia tan marcada entre la carga estática y dinámica máxima es un indicador de pérdidas importantes en la red de distribución, ya sea pérdidas por fricción que se magnifican en diámetros muy reducidos o pérdidas físicas del fluido a lo largo del trayecto.

La presión estática sobrepasa los 70 mca en todos los casos por lo que se requieren acciones para su control, al igual que debe evaluarse la forma de incrementar la presión de servicio en los nodos cercanos al reservorio.

Con respecto a la red de distribución, La Compostera cuenta con una longitud total de 1,04 km, con un 24% de tubería de 19 mm, 43% de 25 mm y un 33% de 38 mm de diámetro. Evidentemente ninguno de ellos cumple con lo estipulado en la legislación nacional. En cuanto a las velocidades arrojadas por la modelación hidráulica, los resultados se describen a continuación (ver Figura 25).

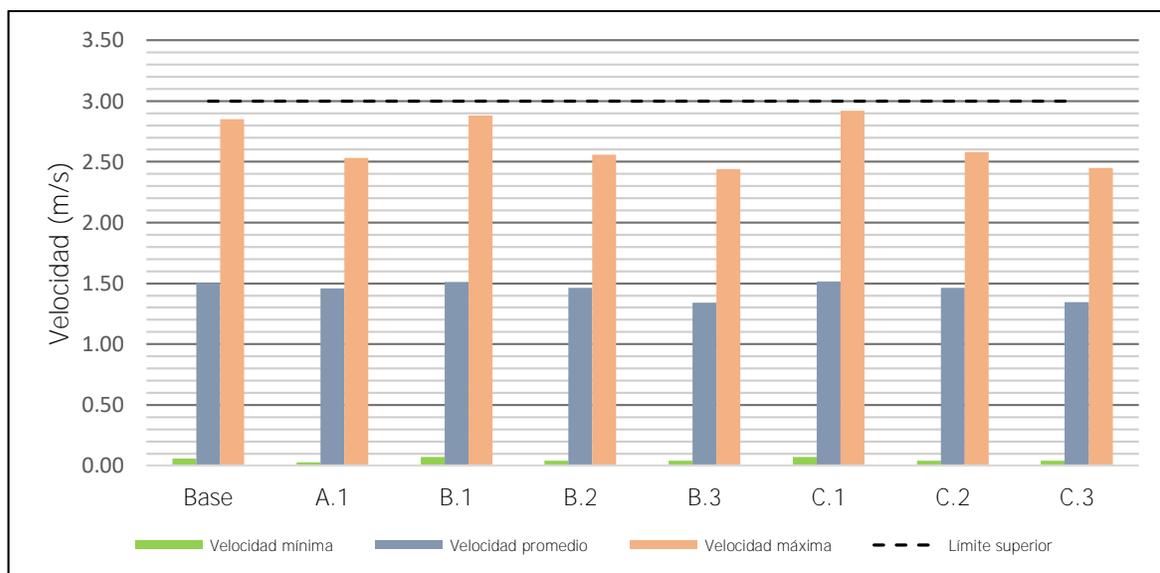


Figura 25. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque La Compostera

Los rangos de velocidad son aceptables para todos los escenarios. La inclusión de micromedición y la reducción de los usos reproductivos del agua favorecen el descenso de las velocidades. En esta sección del acueducto no se cuenta con hidrantes, ni se ha declarado su necesidad por parte del Cuerpo de Bomberos.

Al igual que el subsistema anterior, la intervención de la red de tuberías podría relegarse a un segundo plano dada la urgencia que posee el manejo de la presión del sector.

5.5.5. Tanque La Vuelta

La zona de presión del Tanque La Vuelta suministra el servicio a un área aproximada de 0,09 km² y un total de 79 servicios, de los cuales 74 corresponden a uso domiciliario, 4 a actividades productivas y un gran consumidor.

Su tanque se une a la red de distribución mediante una conducción de 750 m de longitud, a través de una tubería de 75 mm. La diferencia de elevación entre el almacenamiento y el primer nodo de consumo es de 40 m, por lo que las presiones estáticas podrían ser muy altas en nodos aguas abajo del sistema. Los resultados del parámetro presión se muestran en la Figura 26.

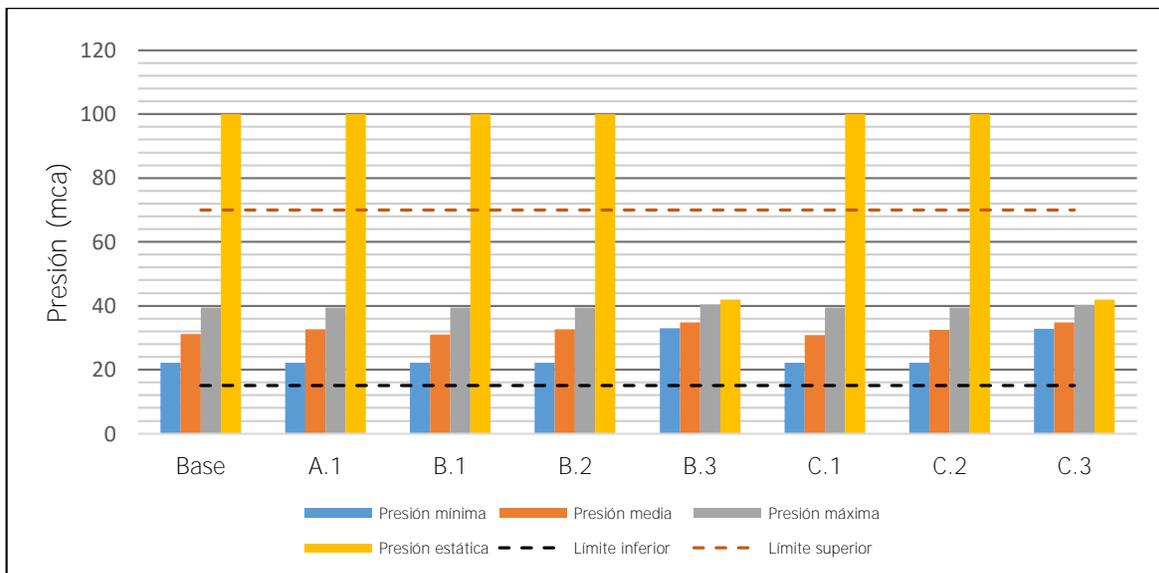


Figura 26. Resultados de presión para la zona Tanque La Vuelta

Tanto la presión mínima como la máxima se encuentran de los límites normados. Además, no se aprecia un cambio considerable entre los escenarios futuros, ni al incorporar los medidores. El resultado más notorio se presenta en los escenarios B.3 y C.3 donde la presión estática disminuye considerablemente. Este efecto no indica realmente una mejoría causada por la salida de los clientes reproductivos, sino tan sólo denota que éstos son los que presentan cargas estáticas mayores y su desligue generaría en la estadística un descenso del indicador.

Al observar con detalle, la carga dinámica máxima no supera los 40 mca en las distintas modelaciones, que anteriormente se explicó es justamente la diferencia de elevación entre el

tanque de almacenamiento y el nodo más cercano. Con este ejemplo se nota claramente que las pérdidas a lo largo de la red de distribución son significativas, posiblemente causadas por diámetros pequeños o roturas en las tuberías que reducen la presión aguas abajo.

El factor velocidad obtenido en las modelaciones presentó un comportamiento muy constante para esta zona de presión (ver Figura 27).

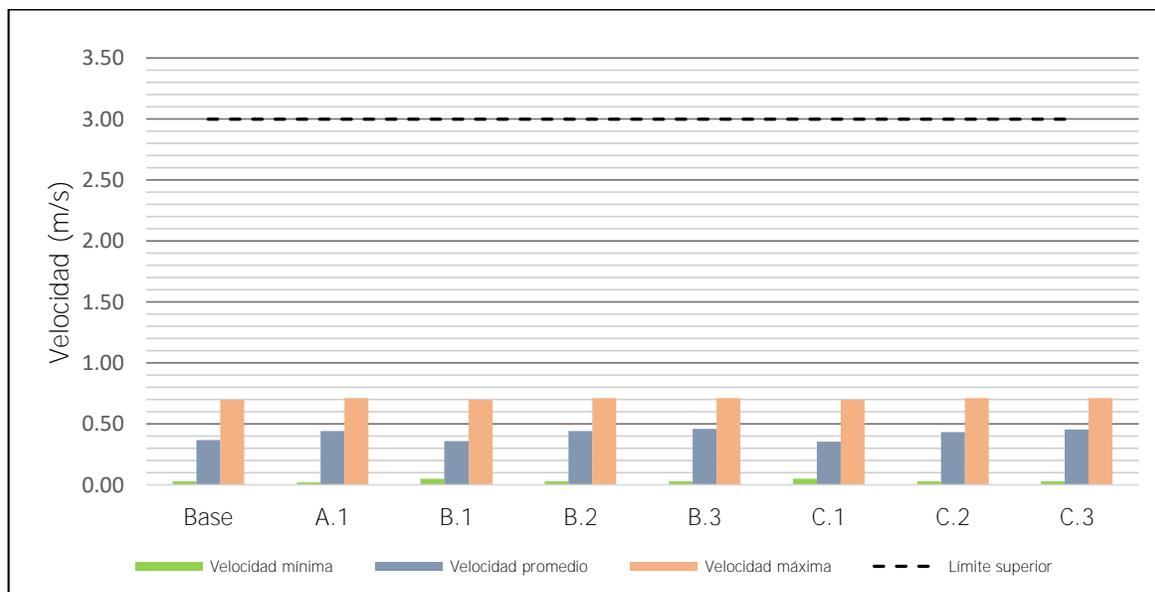


Figura 27. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque La Vuelta

En la totalidad de las modelaciones realizadas el valor de velocidad máxima no sobrepasa el límite de la reglamentación (3 m/s) por lo que los diámetros son adecuados para transportar el caudal solicitado por la población abastecida. Esta zona posee una longitud de redes de 731 m, de los cuáles un 67% corresponde a tubería de 75 mm, mientras que el restante 33% representa tubería de 100 mm. Ambas denominaciones cumplen adecuadamente con el diámetro mínimo determinado por la norma.

Por lo tanto, para el subsistema de La Vuelta es necesario encargarse de la reducción de la presión estática, y debe establecerse una búsqueda del causante de la disminución súbita de la presión dinámica. Por otra parte, las tuberías se encuentran correctamente dimensionadas y existe en la zona un único hidrante unido a la tubería de 100 mm tal y como lo dicta la reglamentación.

5.5.6. Tanque Lourdes

El Tanque Lourdes es el reservorio de mayor tamaño del sistema de Pacayas. El área que abastece representa 1,59 km² y abarca el centro de desarrollo del distrito. Su zona de influencia atiende a un total de 583 usuarios que representan un 47% del total de los adscritos al acueducto. Los usos se dividen en 511 tomas domiciliarias (88%), 18 reproductivas (3%), 53 comerciales (9%) y un solo gran consumidor.

La presión determinada para los diferentes escenarios de desarrollo se muestra en la Figura 28.

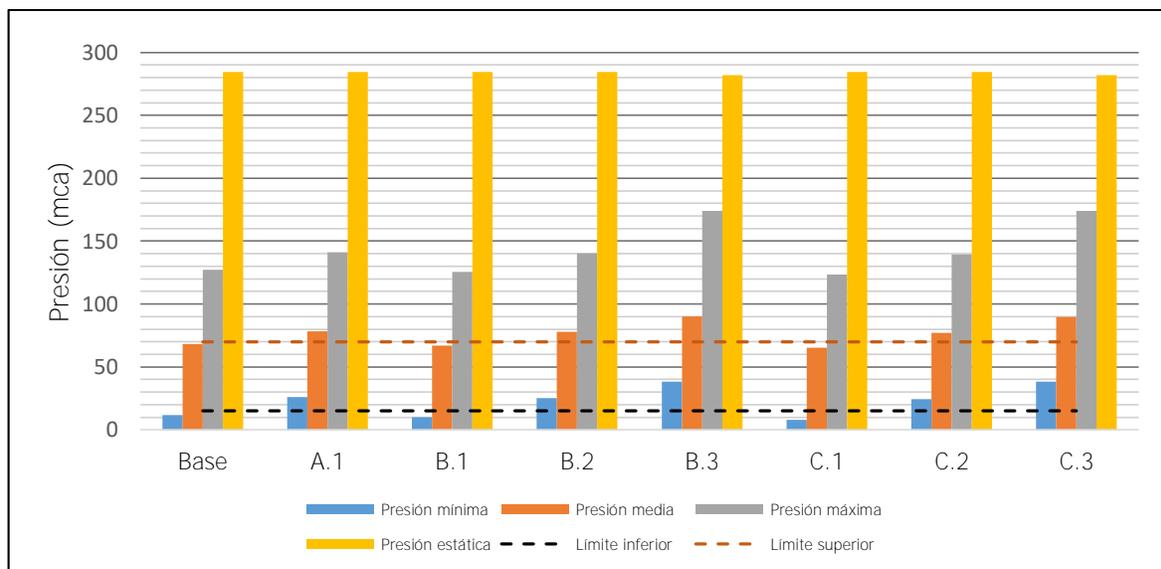


Figura 28. Resultados de presión para la zona Tanque Lourdes

Se puede apreciar en la Figura 28 la sensibilidad del comportamiento de esta zona ante los cambios de crecimiento poblacional e incorporación de hidrómetros, por ejemplo, los escenarios que no poseen registro del consumo (Base, B.1 y C.1) presentan presiones de servicio menores a los 15 mca establecidos por la legislación como mínimo, mientras que con la incorporación de la tecnología de micromedición, en los escenarios A.1, B.2 y C2, las presiones aumentarían sobrepasando dicho límite. Sin embargo, así como ocurre un aumento en la presión mínima, también se da en el promedio y máxima, generando cargas que irrumpen la presión máxima admisible de 70 mca.

Además, los escenarios B.2 y B.3, o C.2 y C.3, indican que la salida de grandes consumidores y usuarios agropecuarios tiene gran impacto en la presión dinámica máxima del subsistema, generando un incremento de al menos 30 mca.

También se destaca una diferencia importante entre la cargas estáticas y dinámica máxima, que puede ser un indicador de diámetros incorrectamente dimensionados, o fugas constantes en la red.

Con respecto a la velocidad, los valores extraídos de las diferentes modelaciones se recopilan en la Figura 29.

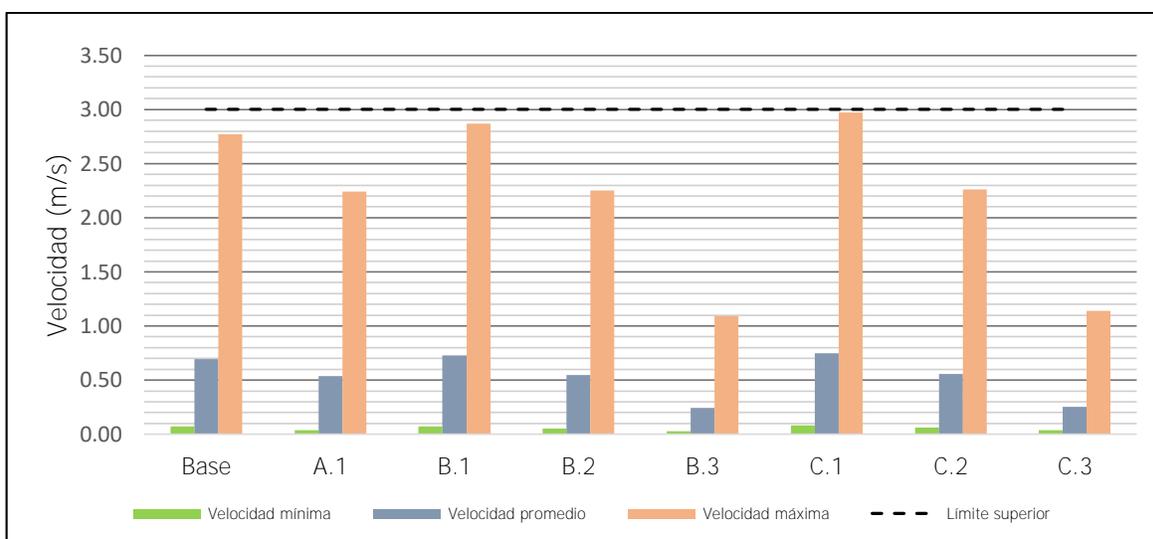


Figura 29. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Lourdes

En los casos modelados no se excede la velocidad límite de 3 m/s. Se puede apreciar que un aumento de la solicitud de caudal de consumo, provocado por el crecimiento humano (ver casos Base, B.1 y C.1) genera un aumento de las velocidades de flujo, mientras que la disminución del consumo debido a la reducción del catastro de usuarios o de la incorporación de medición, propicia más bien su declive. Este comportamiento, según la hidráulica básica, es obvio para las redes de distribución, por lo que representa meramente un indicador de los resultados.

Los diámetros dentro de esta zona de abastecimiento son variados; van desde los 75 mm hasta los 19 mm. Lo más frecuente son las tuberías de 38 mm, que corresponden a un 34% del total, y las de 19 mm que representan un 31%. La longitud total de la red es de 10,3 km.

En esta zona se condensa mayormente la población y servicios básicos del distrito por lo que se encuentran instalados 8 hidrantes en tuberías de 75 mm o 50 mm y se propone la instalación de 3 adicionales según el Cuerpo de Bomberos. Sin embargo, la ubicación de los puntos designados por los bomberos corresponde a líneas inferiores a los 75 mm.

5.5.7. Tanque Machón

El Tanque Machón se localiza en el extremo oeste del área de estudio y abarca un área de 0,48 km². Suministra el servicio a un total de 52 usuarios en los que se encuentran 42 domiciliarios, 9 reproductivos y un gran consumidor.

Se presenta en la Figura 30 el comportamiento de la presión de acuerdo con los diferentes escenarios modelados para esta zona.

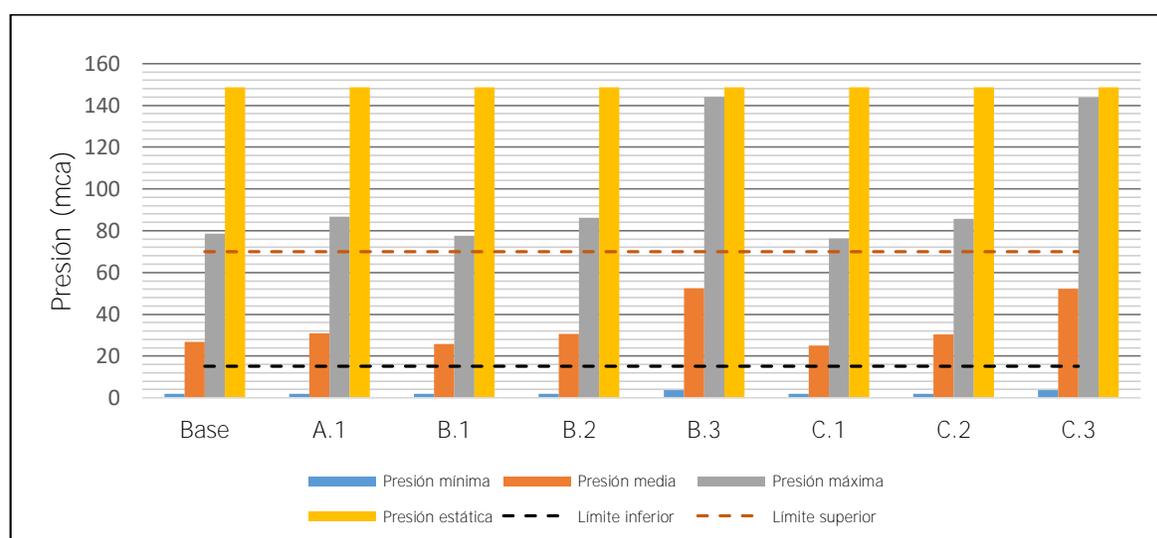


Figura 30. Resultados de presión para la zona Tanque Machón

En primera instancia se debe resaltar que la presión mínima no cumple en ninguno de los escenarios para algún punto de la red de distribución. Por otro lado, la presión máxima excede el umbral permitido por la normativa. Los escenarios B.3 y C.3 señalan que el desligue del consumo del recurso debido a actividades agropecuarias provocaría un aumento súbito de la presión dinámica máxima. Este incremento muy probablemente se produzca debido a la

disminución de gasto y reducción de velocidad en las tuberías, que generaría un aumento de la carga dinámica en servicios domiciliarios localizados en la parte más baja de la zona de suministro del tanque.

La presión estática del subsistema debe ser controlada mediante válvulas reguladoras, y por ende también las presiones dinámicas que se encuentran fuera del rango permitido.

Los resultados de la velocidad en las líneas de distribución para cada una de las diferentes modelaciones se exponen en la Figura 31.

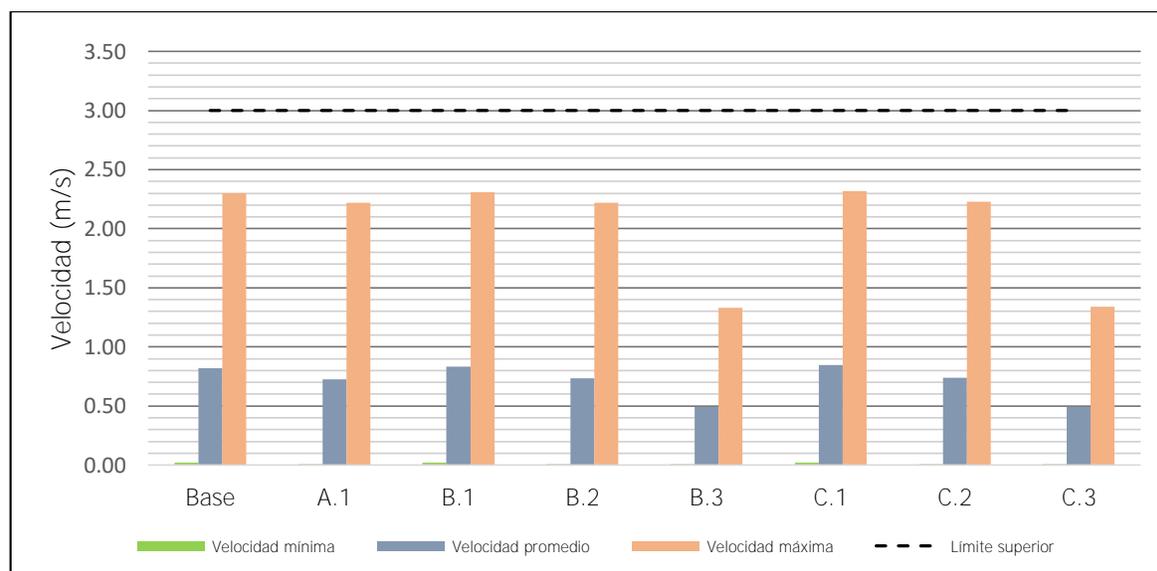


Figura 31. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Machón

Es posible observar en la figura anterior que en todas las modelaciones la velocidad se encuentra en el rango adecuado según la regulación. La velocidad mínima es muy cercana a cero, causado por nodos de consumo conectados directamente al tanque y con un caudal solicitado muy bajo.

Tal y como se comentaba en párrafos anteriores, los escenarios B.3 y C.3 presentan una caída de al menos 1 m/s en su velocidad máxima con respecto a los casos B.2 y C.2 respectivamente.

El total de tuberías de la red posee una longitud de 1,9 km, de los cuales un 47% se estructura en diámetros de 38 mm, mientras que un 34% corresponde a 25 mm de diámetro. Además, un ramal de aproximadamente 170 m consta de tubería de 13 mm. Por lo tanto, la red de

distribución de la zona Tanque Machón, en su totalidad, incumple con los diámetros mínimos. Dentro de la zona de suministro no se encuentran, ni se propone instalar hidrantes.

5.5.8. Tanque Martín Montero

El recurso hídrico que llena el Tanque Martín Montero proviene de la naciente del mismo nombre. Al contrario de la zona de presión Captación Martín Montero, el flujo si es almacenado por un reservorio y de ahí distribuido a toda la red de servicios, que representan 128 en total. Estos se dividen en 118 domiciliarios, 6 comerciales y 4 reproductivos, distribuidos en un área total de 0,34 km².

La modelación hidráulica generó los siguientes resultados (Figura 32) con respecto al parámetro presión.

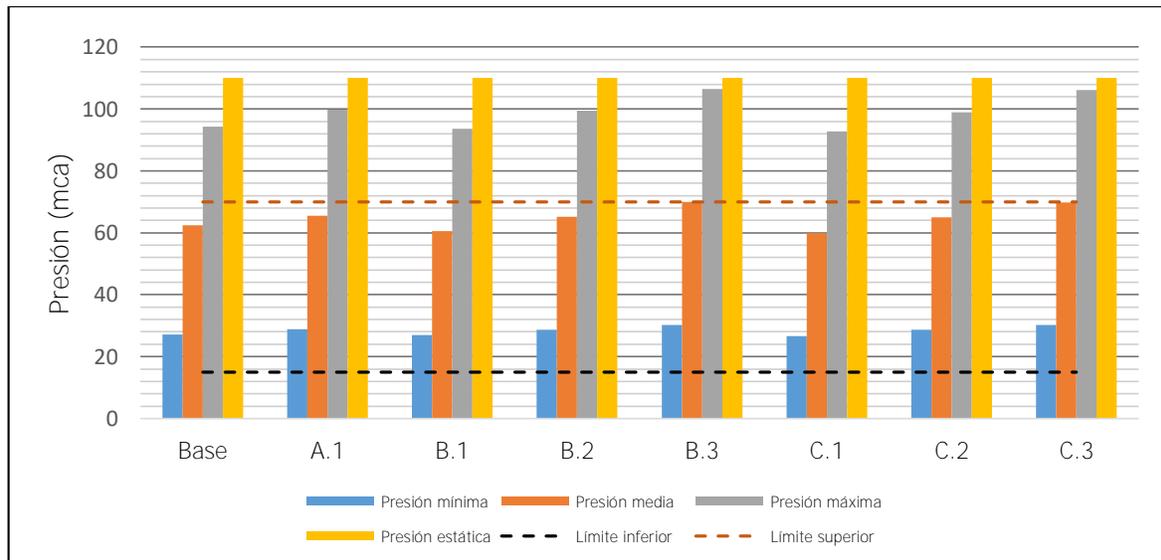


Figura 32. Resultados de presión para la zona Tanque Martín Montero

Se observa en la Figura 32 que para todos los escenarios estudiados la presión mínima supera los 15 mca, límite inferior para la carga de servicio. Pese a ello, la presión dinámica máxima y la estática superan el máximo permitido por la regulación de 70 mca. Este problema se manifiesta en el escenario Base (situación actual) y se nota, en los casos B.2, B.3, C.2 o C.3, que las diferentes acciones desarrolladas de un escenario a otro generan leves cambios en la presión máxima, sin embargo, no son suficientes y deben tomarse acciones específicas para la gestión adecuada de la presión.

La cercanía entre los valores de presión dinámica máxima y presión estática sugieren que las pérdidas físicas o por fricción en la red de distribución son pocas, por lo que los diámetros podrían ser eficientes para el transporte del caudal solicitado. Además, los altos picos de presión media del sistema sugieren que las acciones de reducción y gestión no solamente deberían aplicarse en las partes bajas del subsistema, sino también en sitios cercanos a la elevación media.

Con respecto a la velocidad, los valores arrojados por las diferentes modelaciones se detallan a través de la Figura 33.

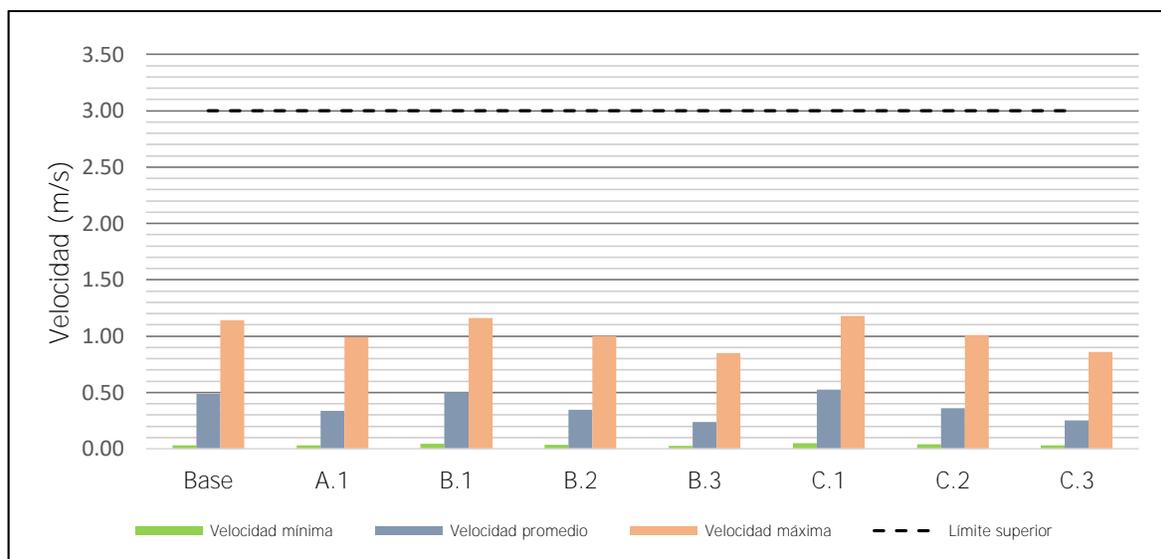


Figura 33. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Martín Montero

De acuerdo con la Figura 33 la velocidad no excede el umbral máximo de la normativa nacional. Se nota un patrón de reducción en la velocidad máxima en los escenarios consecutivos B.1, B.2 y B.3 o C.1, C.2 y C.3, que está directamente ligado con la reducción del consumo.

La longitud total de la red es de 2,2 km y los diámetros que la conforman son muy variados; van desde los 100 mm hasta los 25 mm. El diámetro más recurrente es el de 75 mm que representa un 30% de la red, mientras la tubería de 38 mm corresponde a un 24% y la de 25 mm a un 21%. Por lo tanto, una parte importante de la zona de presión no cumple con los diámetros mínimos establecidos por la normativa, a pesar de que presenten velocidades acordes para el traslado del caudal solicitado.

Cabe destacar que existen 5 hidrantes dentro de este sector y todos ellos se encuentran conectados a líneas de 75 o 100 mm, de acuerdo con la legislación.

5.5.9. Tanque Noré

Esta zona de presión se localiza en la parte más alta del sistema, en su extremo norte. Brinda servicio a tan solo 14 servicios, divididos en 7 domiciliarios y 7 reproductivos, que se distribuyen en un área total de 0,38 km².

En la Figura 34 se muestran los resultados de la presión en los nodos de consumo para los ocho escenarios estudiados.

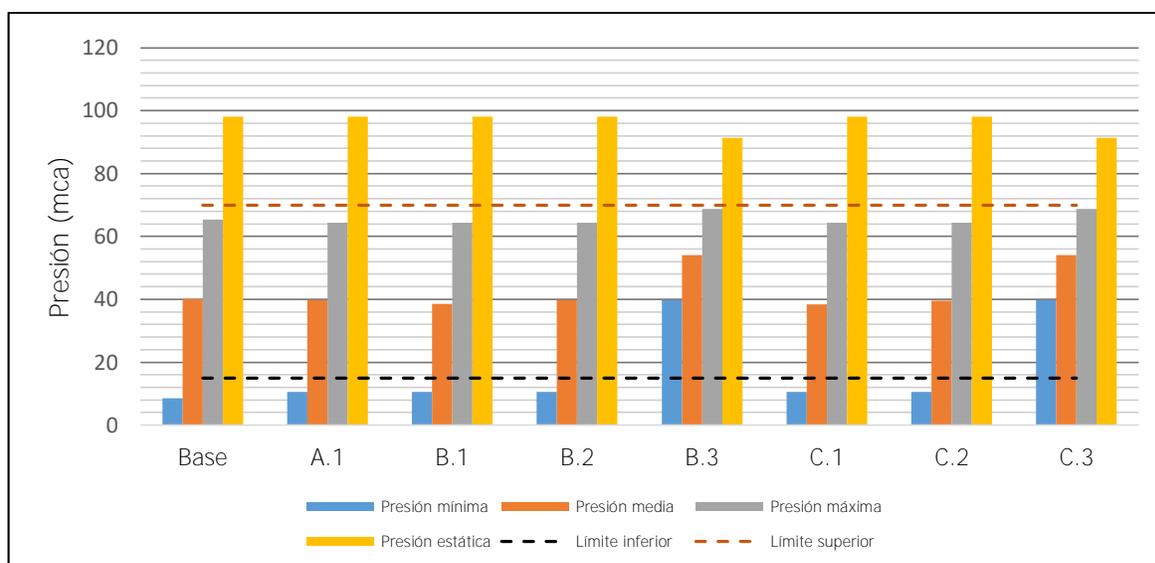


Figura 34. Resultados de presión para la zona Tanque Noré

La figura presentada indica un comportamiento bastante homogéneo en los distintos escenarios, con excepción de los casos B.3 y C.3. Como anteriormente se indicaba, los clientes reproductivos representan un 50% de los usuarios totales de este subsistema, por lo que su salida incrementaría la presión en los servicios domiciliarios restantes.

Por otra parte, la carga dinámica máxima se mantiene por debajo de los 70 mca, pero la carga estática de algunos nodos si superan este límite normado. Nótese que el crecimiento poblacional (Base, B.1 y C.1) no genera cambios relevantes, así como tampoco la incorporación de la micromedición (Base y A.1). Por lo tanto, la gran cantidad de servicios reproductivos y

principalmente, la diferencia considerable entre la dotación domiciliar y reproductiva, genera que esta zona de presión se vea regida por el comportamiento de los usuarios agropecuarios.

Por otra parte, la velocidad modelada para los diferentes escenarios se muestra mediante la Figura 35.

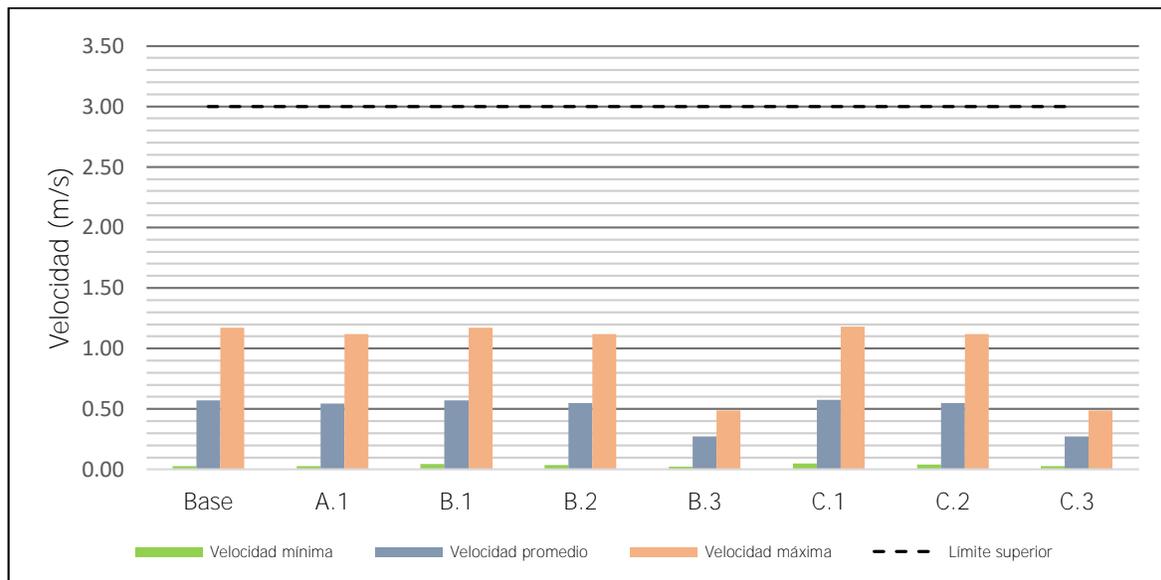


Figura 35. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Noré

Una situación similar a la comentada anteriormente con la presión ocurre con la velocidad; los únicos cambios perceptibles ocurren en los escenarios B.3 y C.3 que prevén el desligue de los usos reproductivos del sistema de agua potable. Cabe resaltar que todas las velocidades se encuentran dentro del límite establecido, inferior a 3 m/s.

La longitud total de la red de este subsistema es de 1,12 km. Todos los diámetros existentes son inferiores a los 50 mm y el diámetro más utilizado es de 38 mm, que representa un 48% de la longitud total de la red.

Por lo tanto, prácticamente toda la zona de presión incumple con los diámetros mínimos establecidos por la normativa, pese a que presentan velocidades aptas para el traslado del caudal de consumo. Para este subsistema sería adecuado realizar inicialmente un control de la presión y realizar poco a poco la sustitución de tuberías de manera que sean labores factibles financiera y operativamente para la Municipalidad.

5.5.10. Tanque Sergio

El tanque Sergio es el segundo tanque de mayor tamaño del acueducto, no obstante, abastece una de las zonas con menor cobertura del sistema, con tan solo 0,06 km² y apenas 12 servicios: 11 domiciliare y uno solo reproductivo.

Su gran capacidad de almacenamiento se inutiliza debido a que la inestable producción de la naciente Noré, debida a deslizamientos que dañan las tuberías de conducción, no logra completar el llenado del tanque, además de que se desconoce si existe en él alguna fuga estructural, ya que se encuentra semi enterrado.

La modelación hidráulica generó los siguientes resultados con respecto a la presión de los nodos de consumo de este sector (Figura 36):

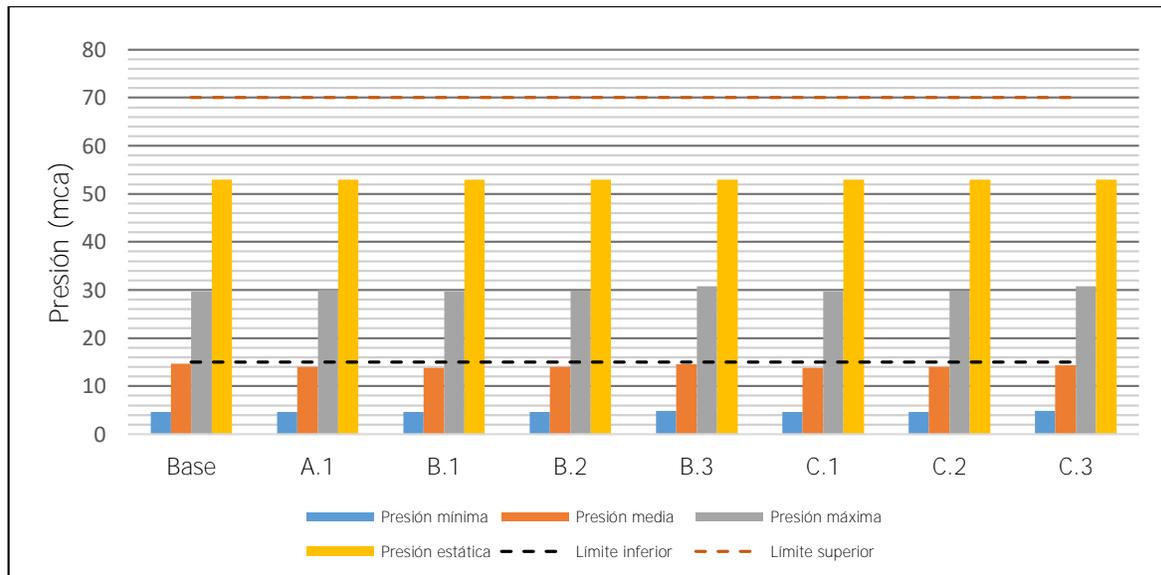


Figura 36. Resultados de presión para la zona Tanque Sergio

Los parámetros modelados en distintos escenarios parecen no tener influencia significativa en el comportamiento de la presión de este subsistema, es decir, ni la introducción de medidores, ni el crecimiento poblacional y tampoco la salida del único cliente reproductivo generaron variaciones considerables. Se observa que la presión mínima, incluso la presión media, no alcanzan los umbrales mínimos establecidos por la reglamentación. Sin embargo, la presión dinámica máxima y estática si se encuentran dentro del rango de valores aceptables.

Por lo tanto, en este subsistema las acciones deberán orientarse a mejorar el funcionamiento del tanque Sergio o a variar la configuración del sistema para que las cargas dinámicas mínimas puedan llegar correctamente a los nodos de consumo.

Con respecto a la velocidad, los valores extraídos de las diferentes modelaciones se recopilan en la Figura 37.

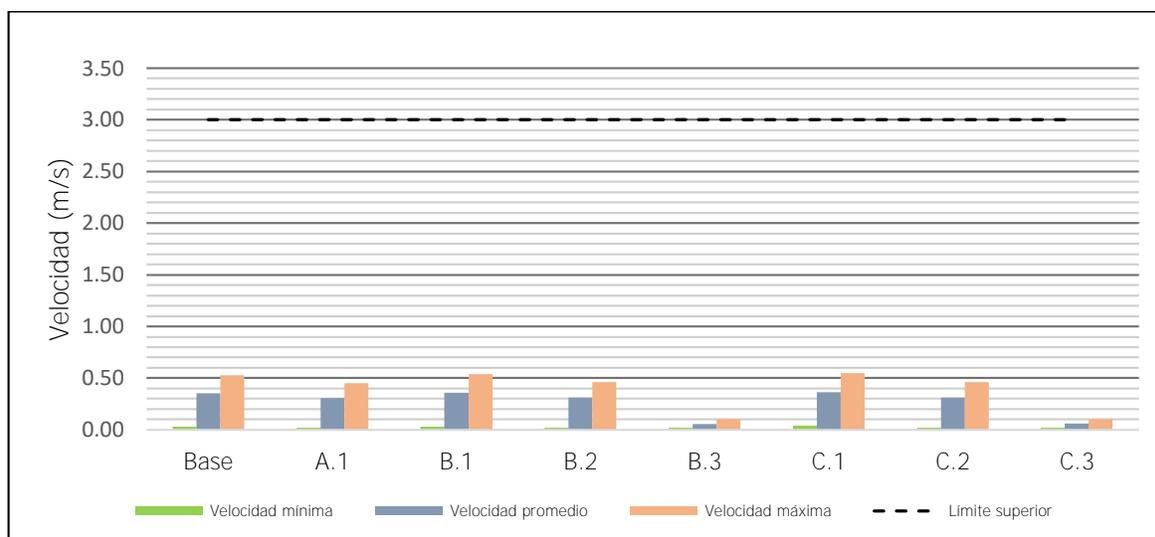


Figura 37. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Sergio

De acuerdo con la Figura 37 la velocidad no excede el valor máximo de la normativa nacional. Los escenarios B.3 y C.3 son aquellos que presentan una disminución considerable debido a la salida del único uso agropecuario del subsistema. En general, las velocidades de flujo son muy bajas en toda la red, debido a que las solicitudes de caudal de consumo son muy reducidas también.

Este pequeño sector solamente cuenta con tubería de diámetro de 38 mm y una longitud de 255 m. A pesar de que este sector no cumple con el diámetro mínimo solicitado por la reglamentación nacional, la sustitución de este pequeño tramo no representa una labor complicada ni de alto costo. En esta zona no se localiza ningún hidrante.

5.5.11. Tanque Vicente Serrano

La zona de presión definida por el tanque Vicente Serrano cubre un área de 0,15 km² y abastece un total de 87 servicios, de los cuales 81 son clientes domiciliarios y 6 reproductivos.

Se presenta en la Figura 38 el comportamiento de la presión de acuerdo con los diferentes escenarios modelados para esta zona.

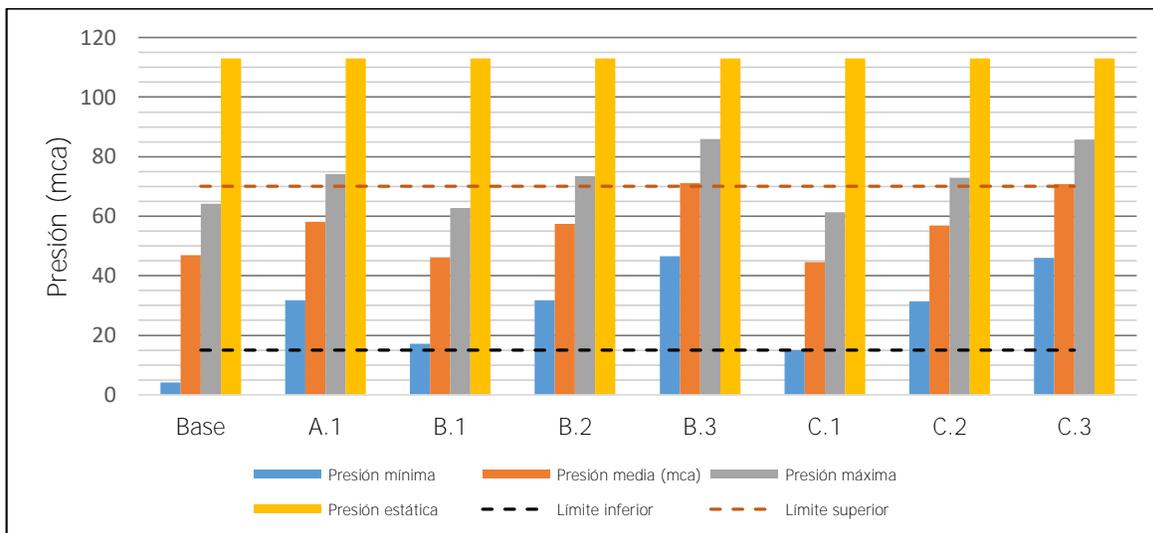


Figura 38. Resultados de presión para la zona Tanque Vicente Serrano

Se observa en la Figura 38 que la presión de la zona es bastante susceptible a los cambios en los escenarios de la modelación. Por ejemplo, el escenario Base y A.1 muestran que la incorporación de los medidores aumentaría la presión mínima hasta en 25 mca. Los escenarios consecutivos B.1, B.2 y B.3 presentan una tendencia creciente de la presión conforme se reduce el consumo de los nodos del sistema, a tal punto que se incumpliría el límite de 70 mca para las presiones dinámicas máximas. Por lo tanto, dependiendo del escenario futuro que se pueda desarrollar, es necesario gestionar la presión mínima o la máxima, mientras que la estática deberá ser tratada de inmediato.

Respecto a la velocidad, los resultados obtenidos se detallan en la Figura 39.

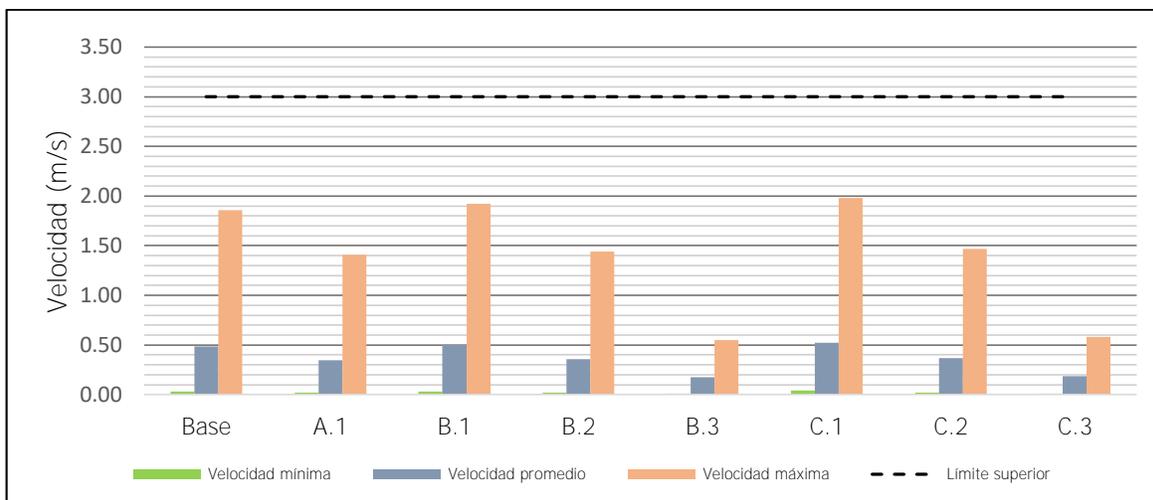


Figura 39. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Vicente Serrano

En ninguno de los escenarios se excede el valor máximo de la normativa nacional. El total de los casos se desarrollan según el comportamiento esperado, en el que conforme disminuye la dotación de consumo humano o reproductivo, igualmente se reducen las velocidades (nótese en los escenarios B.1, B.2 y B.3, o C.1, C.2 y C.3).

Este subsistema posee en sus redes de distribución un total de 1,9 km de longitud, con diámetros que van desde los 50 mm hasta los 19 mm. Del total de la red, un 77% corresponde a tubería de 38 mm. Por ende, esta zona tampoco satisface las normas que rigen el diámetro mínimo de tuberías de distribución. En esta zona no se localiza ningún hidrante.

5.5.12. Tanque Zenón

La zona de abastecimiento definida por el tanque Zenón se abastece de dos nacientes con este mismo nombre (Zenón 1 y Zenón 2) que se almacenan en este reservorio y de ahí suministran agua potable a un sector de 0,19 km². Les brinda servicio a 34 usuarios en total, entre ellos 28 domiciliarios y 6 reproductivos.

La presión determinada para los diferentes escenarios de desarrollo se muestra en la Figura 40.

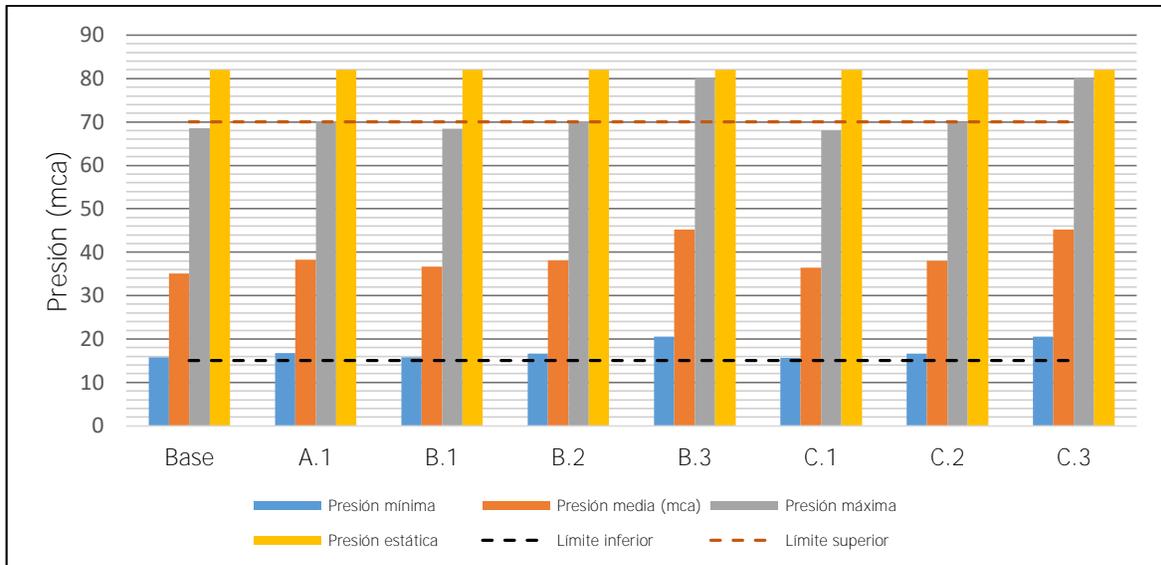


Figura 40. Resultados de presión para la zona Tanque Zenón

La presión mínima se encuentra apenas por encima del límite solicitado de carga de servicio en la totalidad de los modelos. Por otra parte, la presión dinámica máxima sobrepasa los 70 mca en los escenarios B.3 y C.3, a causa de la reducción del consumo humano y la supresión del reproductivo. En el caso de la presión estática, se encuentra levemente por encima de la norma (10 mca) por lo que su reducción y control se podría realizar a través de acciones sencillas.

Si se observa con detalle, las diferencias entre la presión mínima, media y máxima de un solo escenario son muy marcadas, que indica la existencia de dos concentraciones de servicios de elevaciones muy distintas; la parte alta y baja de la zona de presión. Por lo que las soluciones podrían enfocarse en controlar las altas presiones de la zona de menor elevación colocando válvulas en las tuberías que se encuentran entre un sector y el otro.

Los resultados de la velocidad en las líneas de distribución para cada una de las diferentes modelaciones se exponen en la Figura 41.

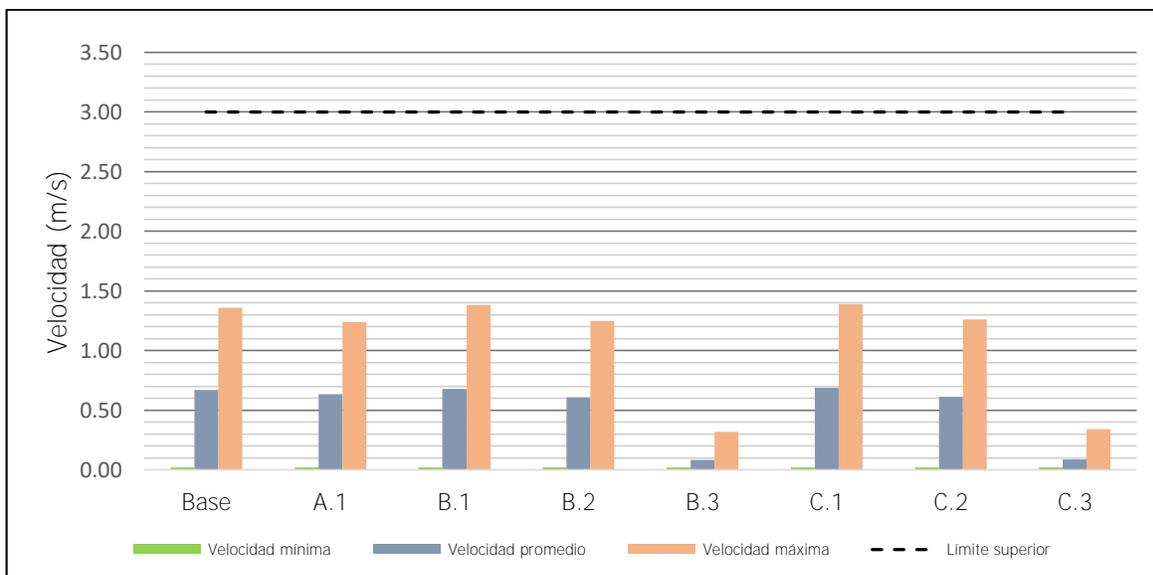


Figura 41. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Zenón

Se debe resaltar que todas las velocidades se encuentran dentro del límite establecido, inferior a 3 m/s. En este subsistema ocurre una situación similar a la de muchas zonas de presión comentadas anteriormente; solo se presentan cambios considerables en los escenarios B.3 y C.3 que prevén el desligue de los usos reproductivos del sistema de agua potable y la micromedición.

Las tuberías que componen la red de distribución poseen una longitud de 1,6 km, que incorporan diámetros entre los 19 mm y 50 mm. El diámetro más común es el de 38 mm que se encuentra en un 64% del total de los trazados. Actualmente no se encuentran hidrantes conectados a la red, pero el Benemérito Cuerpo de Bomberos solicitó la instalación de uno. Se deberán tomar acciones de sustitución de tuberías con el fin de instalar el hidrante e igualmente cumplir con la política nacional de diseño de sistemas de agua potable.

5.5.13. Tanque Hidrante

Este tanque de polietileno de alta densidad se colocó dentro de la zona de presión del Tanque La Compostera con el fin de suministrar a un hidrante cercano, en el caso de un incendio, el volumen y presión necesarios para la correcta atención del siniestro. Sin embargo, desde su instalación años atrás, se ha encontrado lleno en su totalidad en espera de la atención de una emergencia.

Por lo tanto, se sugirió su puesta en funcionamiento como tanque de quiebra-gradiente. Los nodos de consumo y tuberías que se presentan pertenecen actualmente al subsistema de La Compostera, sin embargo, pasarían a formar parte de la zona Tanque Hidrante al realizar la apertura del almacenamiento y el cierre de algunas válvulas de sectorización. Este subsistema correspondería a un área de 0,04 km² y brindaría servicio a 20 usuarios en total, 17 domiciliarios y 3 reproductivos.

La modelación hidráulica generó los siguientes resultados con respecto a la presión de los nodos de consumo de este sector (Figura 42):

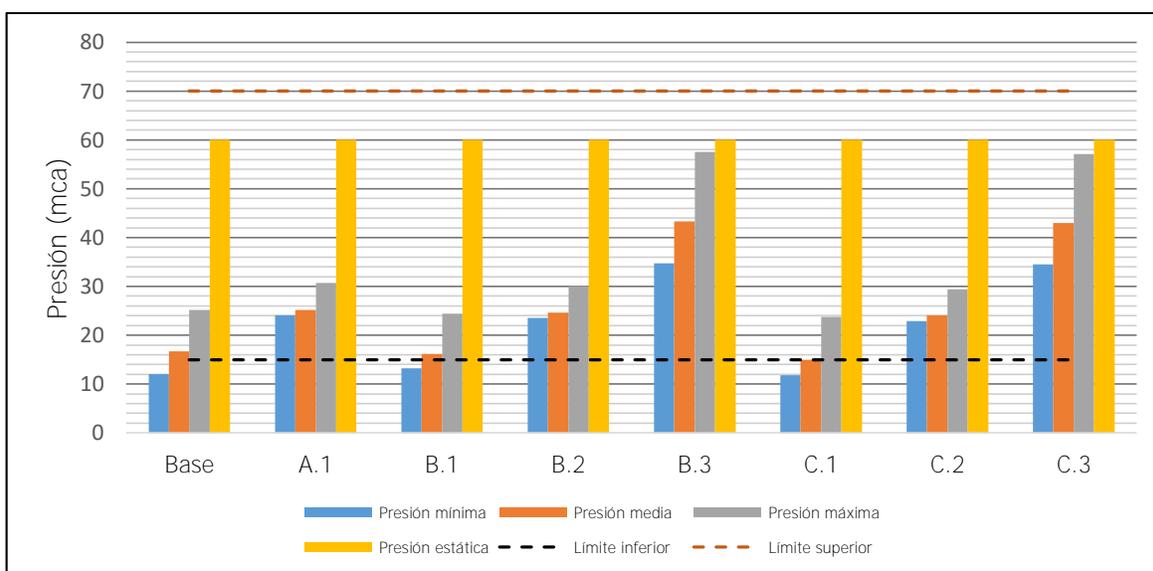


Figura 42. Resultados de presión para la zona Tanque Hidrante

Según se observa en la figura, la presión dinámica máxima y la estática se encuentran dentro de los límites establecidos para todos los escenarios. Además, la carga dinámica mínima superaría los 15 mca en los casos en que se incorpora la micromedición (escenarios A.1, B.2, B.3, C.2 y C.3). Por lo tanto, si se incorporara la micromedición y se realizaran los ajustes para habilitar este tanque, no sería necesaria ninguna otra acción para la gestión de la presión.

Con respecto a la velocidad, los resultados de las diferentes modelaciones se recopilan en la Figura 43.

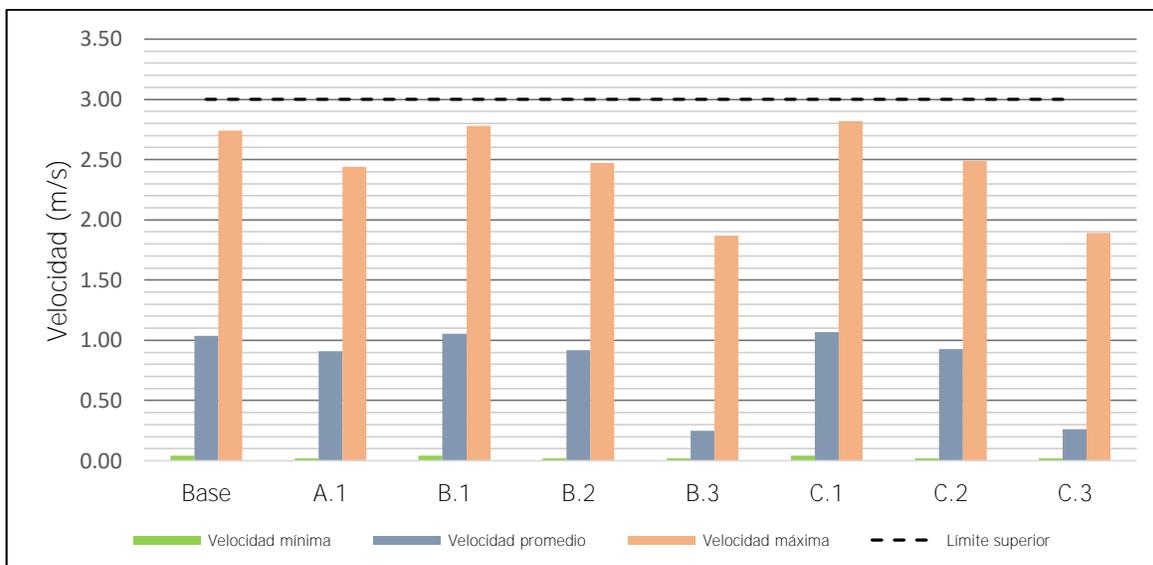


Figura 43. Resultados de velocidad en tuberías de distribución para la zona Tanque Hidrante

En todos los escenarios modelados, la velocidad del flujo dentro de este subsistema se encuentra por debajo de los 3 m/s por lo que cumple con la reglamentación establecida. Como era de esperar, conforme disminuye el gasto humano y agropecuario la velocidad del flujo se reduce, mientras se produce un ascenso de la presión al mismo tiempo (Figura 42, escenarios B.1, B.2 y B.3).

Las tuberías que componen la red de distribución poseen una longitud de apenas 0,34 km, que incorporan diámetros entre los 19 mm y 100 mm. Las tuberías de 100 mm representan un 36% de la red, y en ellas se encuentra conectado el hidrante de la zona, mientras que un 44% corresponde a tubería de 19 mm de diámetro.

5.5.14. Resultados globales para el sistema

Finalmente, los parámetros de producción del recurso hídrico, consumo y almacenamiento se presenta de manera global para todo el acueducto de Pacayas, separados según los escenarios modelados. La idea principal es realizar un balance hídrico muy simplificado al comparar los datos reales de la producción aforada con la demanda total de cada escenario, además de comparar los datos de almacenamiento del modelo con la capacidad total del sistema actual.

A continuación, el Cuadro 24 detalla los resultados numéricos de los flujos para el balance hídrico de cada una de las modelaciones desarrolladas.

Cuadro 24. Volúmenes globales para el balance hídrico de cada escenario.

Escenario	Producción aforada (m³/día)	Demanda total (m³/día)	Caudal almacenado en tanques (m³/día)	Caudal sobrante (m³/día)
Base	4 700,16	4 135,64	564,52	474,52
A.1		3 303,54	1396,62	1306,62
B.1		4 240,76	459,40	369,40
B.2		3 360,88	1339,28	1249,28
B.3		1 006,47	3693,69	3603,69
C.1		4 348,76	351,40	261,40
C.2		3 419,26	1280,90	1190,90
C.3		1 064,85	3635,31	3545,31

Entre los parámetros mostrados en el cuadro anterior se destaca la producción aforada, que corresponde al caudal medido directamente de las nacientes que abastecen el total del sistema de Pacayas. La demanda total proviene del cálculo del software WaterGems según las dotaciones definidas para cada tipo de usuario. El caudal almacenado hace referencia al flujo total de entrada que el software determinada para cada tanque, es decir un caudal resultante que no fue consumido y que es conducido a algún reservorio aguas abajo. Y finalmente el caudal sobrante se refiere a la parte del caudal almacenado que, por restricciones reales de los volúmenes de los tanques del sistema de Pacayas, no es posible almacenar.

Se debe recordar que como datos iniciales del modelo se definió un nivel inicial del tanque, según lo observado en campo, de un 75% del nivel máximo. Por lo tanto, el volumen de almacenamiento total del sistema es 360 m³, pero el volumen de arranque de las modelaciones corresponde a 270 m³. La diferencia entre estos dos valores (90 m³) sería la capacidad total del sistema para recibir más flujo y llenar por completo los tanques. Por lo tanto, el caudal sobrante representa la resta entre el caudal almacenado menos la capacidad real disponible de almacenamiento, esos 90 m³.

La Figura 44 se muestran los mismos resultados del balance global del acueducto en forma gráfica.

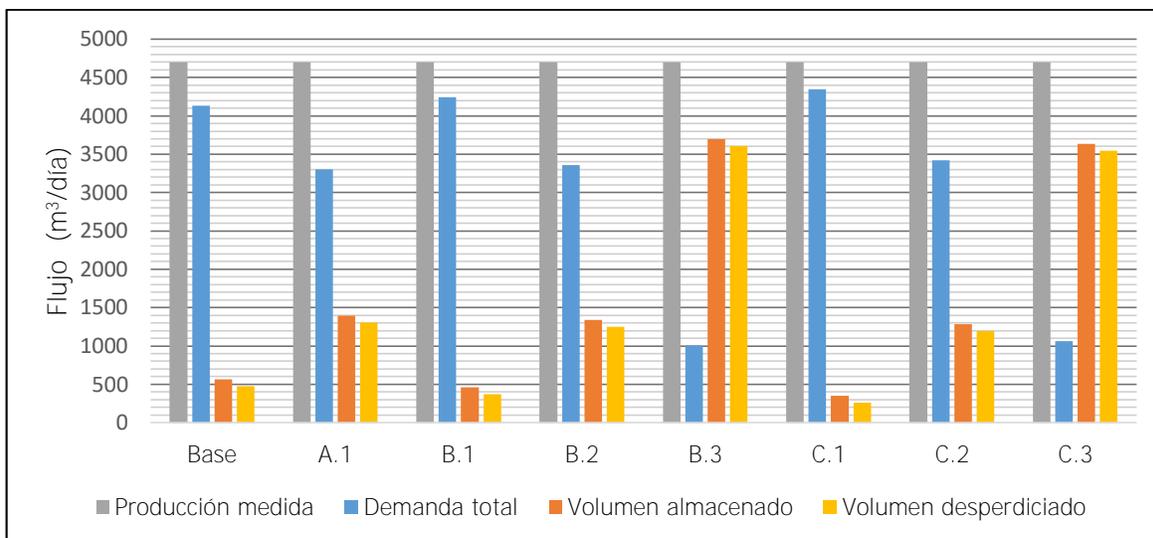


Figura 44. Resultados globales para el balance hídrico de cada escenario

Al observar con detalle los resultados se puede observar que en ninguno de los escenarios planteados la demanda total supera la producción media. Es decir, si la disponibilidad del recurso hídrico actual se mantuviera a través del tiempo, incluso en el año 2050 alcanzaría para suplir el crecimiento poblacional proyectado. Sin embargo, existen muchos factores que pueden afectar la disponibilidad del agua como lo son el cambio climático, la sobre explotación de mantos acuíferos, la contaminación de nacientes, la ocurrencia de desastres naturales, entre otros.

Al observar la Figura 44, los escenarios B.2 y C.2 muestran que para los años 2035 y 2050, respectivamente, la producción es suficiente para dar abasto a los servicios reproductivos y grandes consumidores y mantener estable el consumo domiciliario. Es decir, no existiría un conflicto entre los usos del agua por la priorización del consumo humano. Sin embargo, esto no significa que no sea estrictamente necesario colocar en sus servicios hidrómetros para regular su consumo y concientizar a los propietarios.

Además, es importante hacer notar que en los escenarios en que se instala la micromedición y el consumo se reduce (A.1, B.2 y C.2), el volumen desperdiciado sería prácticamente un 30% de la producción total diaria. Este volumen podría estar representado por distintas pérdidas como fugas visibles, no visibles, por goteo, fugas en tanques, rebases de tanques o conexiones ilícitas. Por lo tanto, la instalación de la tecnología de medición del consumo debe estar acompañada de diferentes soluciones que permitan reducir estas pérdidas.

Finalmente, al igual que se inspeccionó la velocidad en las redes de distribución de cada zona de presión, se presenta en la Figura 45 los resultados de la velocidad en las líneas de conducción para las distintas modelaciones.

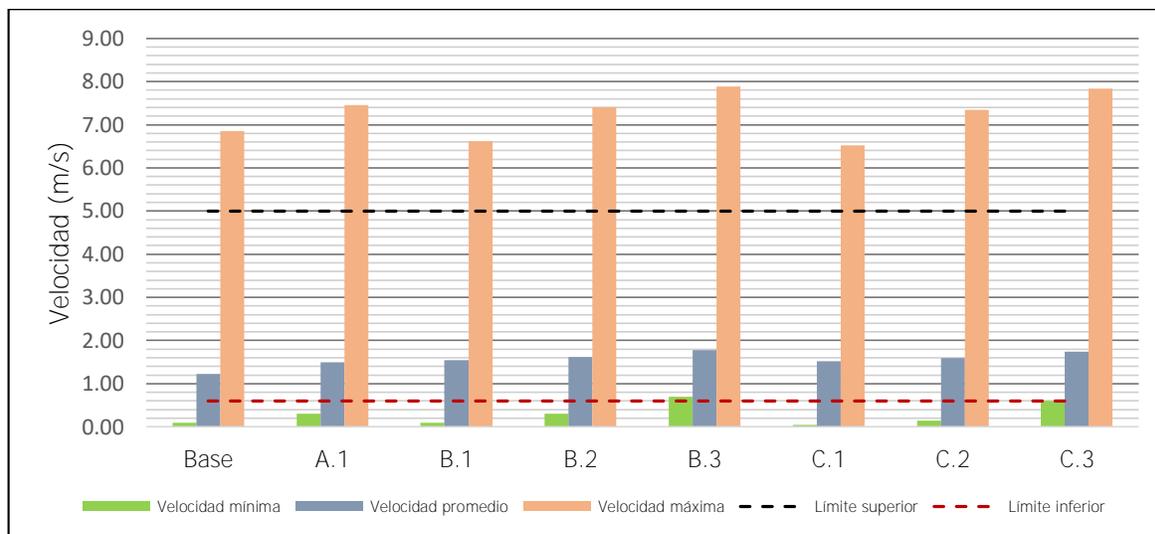


Figura 45. Resultados de la velocidad en las líneas de conducción

Según el reglamento de diseño de sistemas de agua potable (AyA, 2017) la velocidad en líneas de conducción no debe sobrepasar los 5 m/s y debe ser superior a 0,6 m/s. Por lo tanto, los resultados muestran que la velocidad máxima de al menos una conducción del acueducto supera el umbral superior, y por ende debería aumentarse los diámetros donde esta situación sucede para generar un descenso de la velocidad.

En cuanto al límite inferior, se observa que únicamente en los casos B.3 y C.3 se cumple con la velocidad mínima según la normativa. Este efecto posiblemente es causado por el exceso de almacenamiento en los tanques, que genera velocidades muy bajas o incluso la detención del flujo que proviene desde las nacientes a través de la conducción. En este caso el rebalse ocurriría en la captación y el fluido volvería a entrar en movimiento hasta que el tanque tenga la capacidad para recibirlo.

Por lo tanto, las acciones para evitar los rebales en los tanques o en las captaciones son de suma importancia. Además, se deben sustituir paulatinamente aquellas tuberías de conducción que no permiten el correcto traslado del caudal solicitado y por ende generan altas velocidades.

CAPÍTULO 6: PLAN DE ACTUALIZACIÓN DEL ACUEDUCTO

De acuerdo con los resultados mostrados en la Sección 5.5 el escenario más probable y favorable para el acueducto Municipal es el planteado por los casos B.2 y C.2, es decir la situación de incorporación de la micromedición como punto límite al año 2035 y el mantenimiento del sistema hasta el año 2050 sin variar su catastro de usuarios reproductivos y grandes consumidores.

Los escenarios donde se considera la salida de estos clientes representan un desgaste importante para la Municipalidad, pues se debería realizar una fuerte inversión para el control de las sobrepresiones, además de establecer una política de abastecimiento de agua no potabilizada de la mano de instituciones como el SENARA, MAG y MINAE. Por lo tanto, si la producción es suficiente incluso para suplir esta demanda dentro de 30 años, entonces lo ideal sería aprovechar la infraestructura ya existente, promover el uso adecuado del agua mediante la micromedición, establecer tarifas accesibles para los usos agropecuarios del agua y utilizar los recursos del recaudo del servicio en favor de la optimización del sistema.

Se presentará un listado de acciones que se le aconseja desarrollar a la Municipalidad de Alvarado para mejorar de manera integral el funcionamiento del acueducto. En primera instancia se recomendarán cambios en la infraestructura específicos para cada zona de presión. Seguidamente se presentarán una serie de recomendaciones con respecto a la operación del sistema y la gestión comercial. Por último, estas medidas se agruparán y se presentarán en un orden cronológico para formar el Plan de Acción.

6.1. Mejoras en infraestructura por zona de presión

Los cambios en infraestructura buscan tres objetivos sencillos: una gestión adecuada de la presión estática y dinámica en la red de distribución, la mejora de los parámetros de velocidad en las tuberías del sistema y la ampliación de la capacidad hidráulica de la red para la conexión de hidrantes o prever el crecimiento poblacional. Se proponen cambios necesarios en el mediano plazo (del 2020 hasta el 2035) y a largo plazo (del 2035 al 2050).

Las medidas recomendadas para cada subsistema en el mediano plazo se muestran en el Cuadro 25, mientras que en el Cuadro 26 se muestran las medidas a largo plazo. Así mismo se indica el Anexo en el que se puede visualizar la localización exacta y la justificación técnica.

Cuadro 25. Mejoras en infraestructura por zona de presión para el mediano plazo

Zona de Presión	Mejora	Anexo
Captación Martín Montero	1. Sustitución de 725 m de tubería (50 mm y 38 mm) por una línea de 75 mm para la instalación de un hidrante recomendado por el Cuerpo de Bomberos de Pacayas. 2. Instalación de 3 válvulas reductoras de presión en la línea principal de distribución. 3. Instalación del hidrante en el punto designado.	Figura 56.
	4. Incorporar un tanque de reunión de almacenamiento aguas debajo de la captación para realizar una correcta cloración.	-
	5. Instalación de 2 válvulas reductoras de presión en la conducción desde la captación hasta el tanque de almacenamiento Martí Montero.	Figura 57.
Tanque Chico Orozco	6. Sustitución de 1 500 m de tubería (38 mm y 25 mm) por una línea de 50 mm para la correcta regulación de velocidades y presiones en la zona de Chancho Rey. 7. Instalación de 3 válvulas reductoras de presión en la línea principal de distribución, que mejorarían la presión en los ramales de Chancho Rey, Patalillo y hacia Barrio Los Gómez.	Figura 58.
	8. Instalación de una válvula de cierre en la entrada del barrio Patalillo para definición adecuada de la zona de presión. 9. Cierre de válvula de seccionamiento cerca de la entrada de Barrio Los Gómez para definición adecuada de la zona de presión.	Figura 59.
	10. Realizar mantenimiento a válvula reductora colocada en la parte alta del Barrio Patalillo y definir su consigna de presión en 20 mca.	-

Cuadro 25. Mejoras en infraestructura por zona de presión para el mediano plazo (Cont.)

Zona de Presión	Mejora	Anexo
Tanque Chico Orozco	11. Realizar mantenimiento a válvula reductora colocada en Barrio Los Gómez y definir su consigna de presión en 20 mca. 12. Sustitución de 275 m de tubería (12 mm) por una línea de 25 mm para la reducción de la velocidad del flujo. 13. Instalación de una válvula reductora en la línea sustituida anteriormente.	Figura 60.
Tanque El Descanso	14. Cierre de la tubería de conducción procedente del tanque Lourdes mediante la instalación de una válvula de cierre. 15. Reconexión con dicha línea de conducción aguas abajo del tanque El Descanso para la definición adecuada de la zona de presión.	Figura 61.
	16. Instalación de una válvula reductora de presión en la línea de distribución principal del tanque La Compostera.	Figura 62.
Tanque La Compostera	17. Cierre completo de la línea de rebose del tanque La Compostera hacia el tanque La Vuelta. El caudal es mínimo, la conducción es muy larga y los diámetros reducidos por lo que las pérdidas son considerables. 18. Instalación de válvula de cierre en la línea que abastece el tanque La Compostera procedente del tanque Noré.	-
	19. Instalación de 3 válvulas reductoras de presión en la línea de distribución principal, desde el tanque hacia la Escuela de Buenos Aires.	Figura 63.

Cuadro 25. Mejoras en infraestructura por zona de presión para el mediano plazo (Cont.)

Zona de Presión	Mejora	Anexo
Tanque La Compostera	20. Instalación de 2 válvulas reductoras de presión en la zona de distribución, camino hacia el Tanque La Vuelta.	Figura 64.
	21. Construir cajas de seguridad para las válvulas de cierre aguas abajo del tanque La Vuelta. Cerrar dichas llaves para la correcta determinación de las zonas de presión.	Figura 65.
Tanque La Vuelta	22. Instalación de 2 válvulas reguladoras de presión la tubería de conducción desde captación La Isla hasta el tanque El Descanso.	Figura 66.
	23. Cierre de la válvula de seccionamiento localizada en la entrada de Villas del Bosque para una adecuada definición de la zona de presión.	Figura 67.
	24. Cierre de la válvula de seccionamiento localizada en la interconexión con el sistema Vicente para una adecuada definición de la zona de presión.	Figura 68.
	25. Realizar mantenimiento a válvula reductora colocada cercana a dicha interconexión. Definir su consigna de presión en 20 mca.	
26. Instalación de hidrante propuesto por Bomberos en la línea de 75 mm existente.		
Tanque Lourdes	27. Sustitución de 900 m de tubería (63 mm, 50 mm y 38 mm) por una línea de 75 mm para la correcta instalación de 3 hidrantes.	Figura 69.
	28. Instalación de una válvula reductora de presión en la línea anterior, frente al Colegio Técnico de Pacayas.	
	29. Sustitución de 1 500 m de tubería (38 mm) por una línea de 75 mm para la disminución de velocidades excesivas en la línea que sale del tanque hacia Calle Cementerio.	Figura 70.

Cuadro 25. Mejoras en infraestructura por zona de presión para el mediano plazo (Cont.)

Zona de Presión	Mejora	Anexo	
Tanque Lourdes	30. Instalación de la nueva línea sobre vía pública y evitar el paso elevado actual sobre el río Pacayas.	Figura 70.	
	31. Instalación de dos válvulas reductoras en la nueva línea comentada.		
	32. Instalación de cuatro válvulas reductoras en las líneas que abastecen el centro de Pacayas.	Figura 71.	
	33. Instalación de una válvula de seccionamiento para la separación de la red de distribución en sector este y oeste.		
Tanque Lourdes	34. Sustitución de 650 m de tubería (38 mm) por una línea de 75 mm para la correcta instalación de un hidrante propuesto por Bomberos cerca del sector de Toro Loco.	Figura 72.	
	35. Reubicación de las válvulas colocadas en dicha línea para el correcto manejo de la presión.		
	36. Instalación de una válvula reductora de presión en ramal al sureste del centro de Pacayas (cercano a la casa de Kidier Obando).		
	37. Instalación de una válvula reductora de presión en la línea de conducción hacia el tanque El Descanso.	Figura 73.	
Tanque Machón	38. Cierre de la tubería de conducción procedente del tanque Martín Montero mediante la instalación de una válvula de cierre. Dicha línea se localizada en propiedad privada.	Figura 74.	
	39. Sustitución de 950 m de tubería (38 mm, 25 mm y 12 mm) por una línea de 50 mm para el manejo de presión y velocidades.	Figura 75.	
	40. Instalación de dos válvulas reductoras de presión en dicha línea.		
	41. Conversión de la línea Machón – Lourdes en tubería de conducción únicamente mediante la instalación una válvula de seccionamiento en la línea que se dirige hacia Villas del Bosque.	Figura 76.	

Cuadro 25. Mejoras en infraestructura por zona de presión para el mediano plazo (Cont.)

Zona de Presión	Mejora	Anexo
Tanque Machón	42. Instalación de dos válvulas reductoras de presión en esa línea Machón – Lourdes.	Figura 77.
Tanque Martín Montero	43. Desconectar los servicios que se encuentran conectados a tubería de distribución de 25 mm entre el tanque Lourdes y Villas del Bosque. Unirlos a la línea de 75 mm.	Figura 78.
	44. Sustitución de 350 m de tubería (38 mm) por una línea de 75 mm para el manejo de presión y velocidades en la conducción entre el tanque Martín Montero y tanque Lourdes.	Figura 79.
Tanque Martín Montero	45. Instalación de dos válvulas reductoras de presión en dicha línea.	Figura 79.
	46. Instalación de una válvula reductora de presión en la línea de distribución hacia el Barrio Lourdes.	Figura 80.
Tanque Noré	47. Reubicación del tanque Noré, debido a los desastres naturales y fallos en la línea de conducción.	Figura 81.
	48. Sustitución de 450 m de tubería (38 mm y 50 mm) por una línea de 100 mm para la reducción de la velocidad entre el tanque Noré y tanque Sergio. Reubicar la tubería por vía pública en dicha línea y evitar el paso elevado existente.	
	49. Darle mantenimiento a la válvula reductora de presión localizada en la línea del tanque Noré hacia La Compostera. Calibrarla a una presión de salida de 20 mca.	-
Tanque Sergio	50. Realizar una prueba de estanqueidad al tanque Sergio para determinar posibles fugas estructurales. Habilitar su salida de abastecimiento en el caso de encontrarse en correcto estado. Sino proceder a su reparación.	-

Cuadro 25. Mejoras en infraestructura por zona de presión para el mediano plazo (Cont.)

Zona de Presión	Mejora	Anexo
Tanque Sergio	51. Desconectar el rebalse del tanque Sergio que se dirige hacia el tanque La Compostera.	-
	52. Cerrar la conducción del tanque La Compostera hacia las casas que se encuentran al pie del tanque mediante una válvula de cierre. Abastecer estos servicios del tanque Sergio.	Figura 82
	53. Cambiar trazado de la tubería que pasa por propiedad privada en el ramal final.	
	54. Instalar una válvula reductora de presión en esta misma línea.	
Tanque Vicente Serrano	55. Instalar una válvula reductora en la línea de distribución principal.	Figura 83.
Tanque Zenón	56. Sustitución de 245 m de tubería (38 mm) por una línea de 75 mm para la instalación de un hidrante solicitado por el Cuerpo de Bomberos.	Figura 84.
	57. Sustitución de 270 m de tubería (25 mm y 19 mm) por tubería de 50 mm.	
	58. Instalación de una válvula reductora de presión en la línea mencionada anteriormente.	Figura 85.
59. Instalación de una válvula reductora de presión en el segundo ramal abastecido por el tanque Zenón.		
Tanque Hidrante	60. Instalación de dos válvulas de cierre en la línea del tanque Hidrante que le permita la entrada de flujo y el abastecimiento de servicios aguas abajo en una zona de presión independiente.	Figura 86.

Cuadro 26. Mejoras en infraestructura por zona de presión para el largo plazo.

Zona de Presión	Mejora	Anexo
Captación Martín Montero	61. Corrección del trazado de 210 m de tubería (25 mm), que se encuentran en terreno privado, por una línea de 50 mm que se dirija por vía pública. 62. Instalación de una válvula reductora de presión sobre esa misma línea.	Figura 87.
Tanque Chico Orozco	63. Reubicar línea de distribución que paso bajo algunas casas (en propiedad privada) en Patalillo (70 m de tubería de 38 mm).	-
Tanque La Vuelta	64. Evaluación de un trazado distinto para la conducción desde la naciente La Isla debido al riesgo de deslizamiento, difícil acceso y condiciones hidráulicas complicadas que la ruta actual posee.	-
Tanque Lourdes	65. Sustitución de 670 m de tubería (38 mm y 25 mm) por tubería de 75 mm en la línea del tanque Lourdes hacia el tanque El Descanso. 66. Instalación de una válvula reductora de presión en esa misma línea.	Figura 88.
Tanque Machón	67. Reubicar línea de conducción que se dirige por propiedad privada hacia el tanque Lourdes y así evitar paso a desnivel de 70 m aproximadamente. 68. Ampliar la línea de distribución a 50 mm (una longitud total de 430 m). 69. Instalación de una válvula reductora de presión en esa misma línea.	Figura 89.
Tanque Zenón	70. Corrección del trazado de todas las tuberías que salen del tanque Zenón, trasladarlas a vía pública. 71. Sustitución de 260m de tubería (25 mm y 19 mm) por una sola línea de 50 mm en el primer ramal de la zona de presión. 72. Corrección del trazado del segundo ramal. Unir al primer ramal y conducirlo por vía pública hasta las zonas de abastecimiento. 73. Instalación de una válvula reductora de presión en esta nueva línea de abastecimiento.	Figura 90.

A continuación, en la Figura 46, Figura 47 y Figura 48, se muestran los cambios en las presiones mínimas, medias y máximas, respectivamente, para cada una de los subsistemas antes y después de aplicar las medidas recomendadas en el modelo hidráulico.

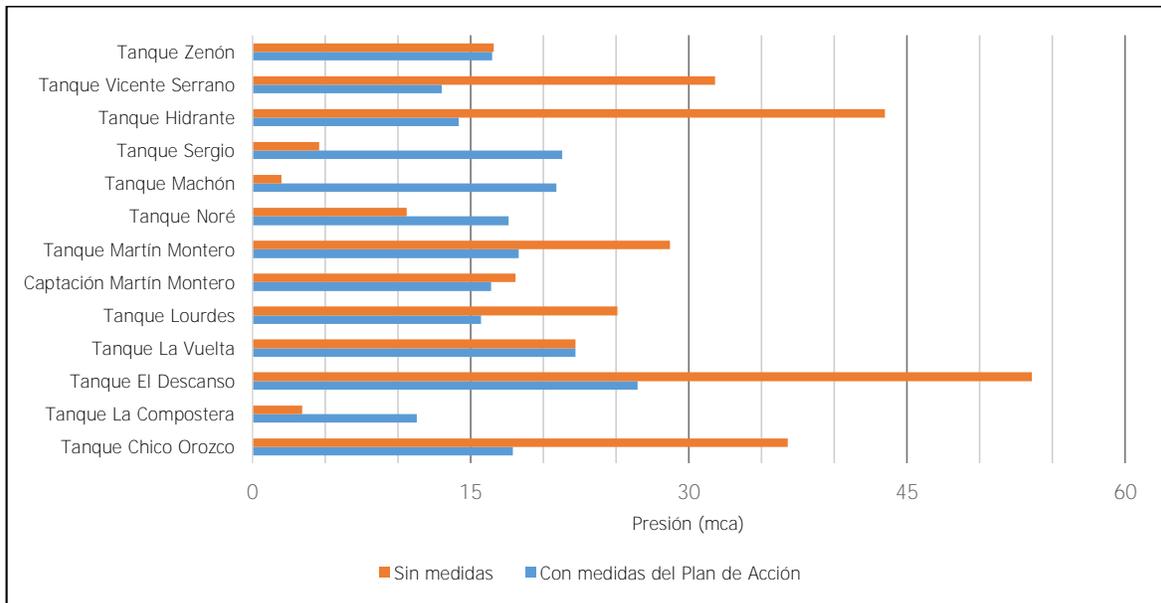


Figura 46. Comparación de la presión mínima antes y después de la aplicación de las mejoras en infraestructura

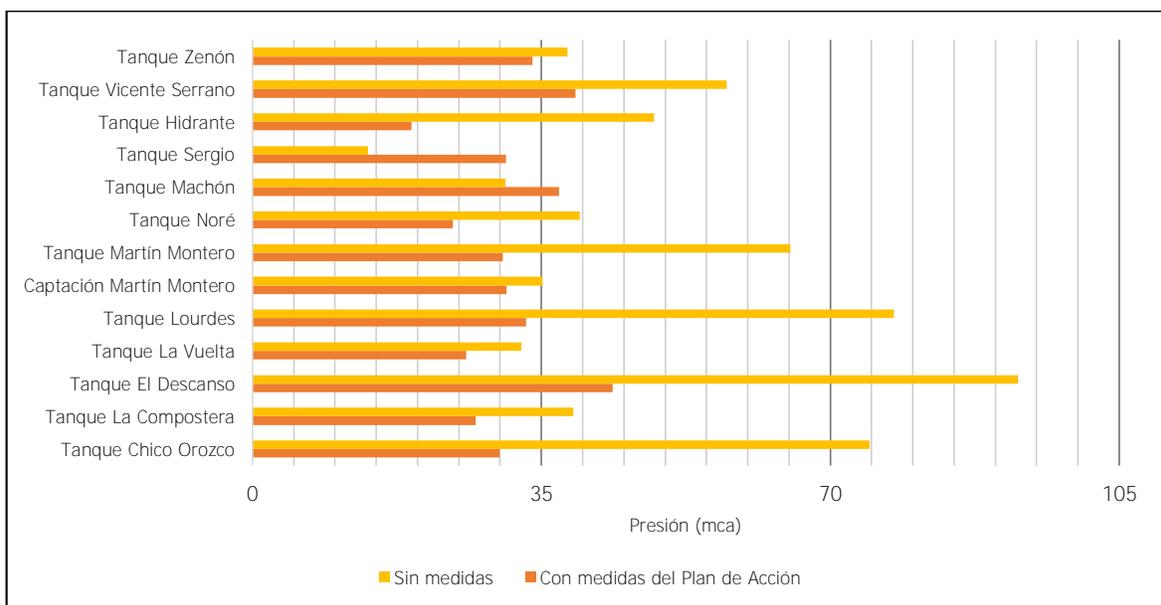


Figura 47. Comparación de la presión media antes y después de la aplicación de las mejoras en infraestructura

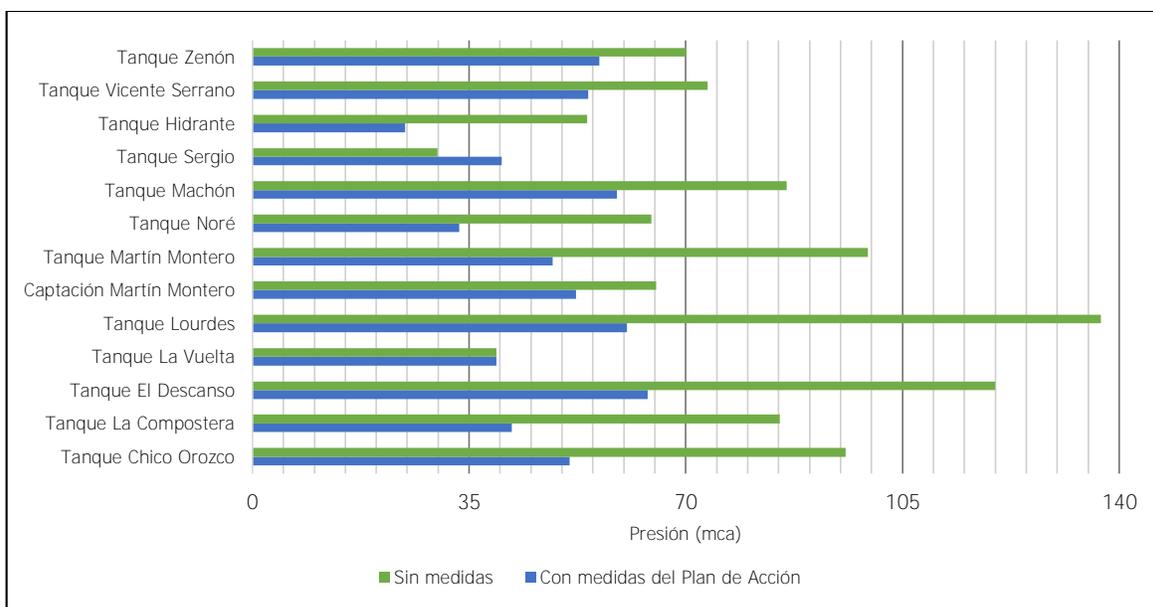


Figura 48. Comparación de la presión máxima antes y después de la aplicación de las mejoras en infraestructura

Al analizar los resultados, se muestra que la aplicación de las medidas permite mantener las cargas de presión dentro de los umbrales determinados por la normativa (15 mca como presión mínima y 70 mca como máxima). Además, la presión media se mantiene entre 25 mca y 35 mca, lo que favorece enormemente la reducción de fugas en las tuberías y la disminución del caudal de fugas de fondo o por goteo ya existentes.

Es importante resaltar que los resultados anteriores muestran únicamente la presión dinámica, por lo tanto, para verificar que verdaderamente la carga estática también cumple con los límites se debe referir a los Anexos de cada una de las mejoras sugeridas, dado que las líneas de gradiente hidráulico varían completamente con la introducción de válvulas reguladoras.

6.2. Propuestas de mejora operacional y de gestión comercial

A continuación, en el Cuadro 27 y Cuadro 28 se detallan una serie de recomendaciones a corto, mediano y largo plazo para mejorar el funcionamiento operacional del acueducto, en el entendido que el corto plazo se refiere a un periodo menor a un año, pues las tareas asignadas no conllevan a una inversión importante, ni la sobrecarga del personal. El mediano plazo hace referencia a acciones que pueden ser iniciadas inmediatamente, pero se pretende terminar antes del 2035 (escenario B) y al largo plazo pertenecen aquellas medidas que se deben implementar desde el 2035 hasta el 2050 (escenario C).

Cuadro 27. Propuestas para la mejora operacional del sistema de agua potable de Pacayas

Componente	Plazo	Propuesta
Producción	Corto	74. Realizar una campaña de aforos mensuales de las nacientes.
		75. Crear mecanismos de evacuación de los rebales en las nacientes / Verificación de la afectación que podrían tener las quebradas aguas abajo al realizar la devolución del caudal de rebalse (caudal ecológico).
		76. Resguardar los sitios de captación con cerramiento perimetral.
	Mediano	77. Instalar macromedidores en los sitios de producción, entrada y salida de tanques y sitios críticos de la red.
Conducción y Distribución	Corto	78. Crear un manual de buenas prácticas en los procesos de reparación: encamado de las tuberías, evitar forzar o calentar la tubería para generar una curvatura, utilizar SDR adecuados, utilizar juntas de reparación, etc. / Utilizar el manual como una guía a cumplir por parte del personal operativo.
		79. Realizar seguimiento e inspección a las reparaciones, sustituciones e instalación de nuevos servicios.
		80. Construir cajas de seguridad para todas las válvulas de seccionamiento que cumplen funciones importantes en la división de zonas de presión o cierre de ramales.
	Mediano	81. Construir cajas de registro con previstas para toma de presión y espacio adecuado para la medición de caudal - Sitios de medición operativa.
		82. Instalar válvulas de aire en sitios de cruces de ríos, salidas de tanques que cuentan con válvulas de cierre, puntos altos aguas abajo de depresiones, etc.

Cuadro 27. Propuestas para la mejora operacional del sistema de agua potable de Pacayas (Cont.)

Componente	Plazo	Propuesta
Conducción y Distribución	Mediano	83. Brindar mantenimiento a las válvulas reductoras de presión.
		84. Eliminar en la medida de lo posible pasos a desnivel. En el caso de ser necesario utilizar un correcto diseño de las estructuras de sostén.
	Largo	85. Enterrar a una profundidad de al menos 60 cm tuberías que se encuentren a profundidades menores.
		86. Sustituir tuberías de acuerdo con su antigüedad.
Tanques	Corto	87. Instalar mecanismos para el control de nivel en los tanques (cierre por boya).
		88. Construcción de sistemas de aireación debidamente sellados.
	Mediano	89. Instalar tuberías de limpieza, rebalse y by-pass.
	Largo	90. Aumentar el volumen de almacenamiento de los tanques considerando los volúmenes de reserva para demanda y atención de incendios.
		91. Instalar macromedidores a la salida y entrada de tanques para facilitar el cálculo del balance hídrico del sistema.
Operación	Corto	92. Instalar válvula de cierre a todos los hidrantes.
		93. Actualizar continuamente el catastro de redes.
	Mediano	94. Instalar micromedición.
		95. Desarrollar un plan para la georreferenciación de fugas.
	Largo	96. Desarrollar un balance hídrico anual o mensual para el acueducto, así como el cálculo de indicadores de Agua No Facturada.

Cuadro 27. Propuestas para la mejora operacional del sistema de agua potable de Pacayas (Cont.)

Componente	Plazo	Propuesta
Calidad del agua	Corto	97. Aumentar los sitios para mediciones de calidad del agua potable.
	Mediano	98. Desarrollar pruebas para determinar la correcta calibración de la cloración.
Modelación hidráulica	Mediano	99. Generar un modelo dinámico del acueducto.
	Largo	100. Actualizar continuamente el modelo hidráulico del acueducto.
		101. Utilizar el modelo hidráulico para la generación de escenarios y toma de decisiones.

Cuadro 28. Propuestas para la mejora de la gestión comercial del sistema de agua potable de Pacayas

Componente	Plazo	Propuesta
Contrato con el usuario	Corto	102. Desarrollar un contrato del servicio para el usuario que incluya al menos: <ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento de las anomalías • Refacturaciones • Estimaciones de consumo • Deberes del usuario • Plazos de atención • Tarifa • Cortas y reconexiones / Montos • Nuevos servicios / Disponibilidades • Servicio ligado a la propiedad / No al usuario • Arreglos de pago • Presiones mínimas • Calidad del agua • NIS (número de identificación del servicio)
	Mediano	103. Mantener un mecanismo de actualización continua de dicha base de datos.
Base de datos comercial	Corto	104. Generar una base de datos comercial que incluya al menos: <ul style="list-style-type: none"> • Georreferenciación • Identificación de la propiedad • Nombre del cliente • Identificación del cliente (cédula)

Cuadro 28. Propuestas para la mejora de la gestión comercial del sistema de agua potable de Pacayas (Cont.)

Componente	Plazo	Propuesta
Base de datos comercial	Corto	<ul style="list-style-type: none"> • Clase tarifaria • Teléfono • Correo electrónico • Barrio o localidad • Ruta de lectura • Número de hidrómetro • Historial de medidores • Fecha de instalación / Cambio / Retiro
	Mediano	105. Mantener un mecanismo de actualización continua de dicha base de datos.
Rutas de lectura	Corto	106. Establecer un cronograma de lectura y facturación para un grupo de servicios. Podrían utilizarse las zonas de presión para su estructuración.
		107. Establecer rutas especiales para grandes consumidores.
	Mediano	108. Realizar campañas de actualización del catastro de usuarios.
		109. Estadísticas y contabilización del estado de los medidores.
Largo	110. Métodos digitales de lectura.	
Introducción de micromedición	Corto	111. Realizar por un par de meses un periodo de prueba o transición para que el usuario aprenda a regular su consumo.
		112. Negociar con los grandes consumidores una tarifa especial debido al importante volumen que consumen.

6.3. Plan de acción

Finalmente, para unificar todas las medidas propuestas es necesario desarrollar un plan de acción que proponga el orden en que se deben desarrollar las medidas para que se logren los resultados tal y como se prevén. Muchas de las acciones a tomar no se pueden desarrollar si la acción precedente no se ha completado o algunas deben desarrollarse justo en el mismo tiempo que otras.

Este plan se basa en la teoría estudiada y la realidad observada en el acueducto de Pacayas, pero no significa que sea una verdad absoluta, es decir existirán restricciones que permitirán a la Municipalidad de Alvarado desarrollar o no una propuesta, y por ende se incorporarán ajustes al plan de acción con la consigna de conseguir igualmente el objetivo final, que es la optimización del sistema de agua potable.

En el Cuadro 25, Cuadro 26, Cuadro 27 y Cuadro 28 se numeraron cada una de las acciones desde el 1 hasta el 113. Esta numeración se incluye en el plan de acción mostrado en el Cuadro 29. Allí se muestra el desarrollo del plan de acción para el acueducto de Pacayas en el horizonte temporal desde el año 2021 hasta el 2050. Para cada año se especifica el área en que se centrarán las labores de optimización, ya sea el sistema general o las diferentes zonas de presión. La numeración mostrada como cuerpo del Cuadro 29 corresponde al número o código de acción a realizar. Estas se ordenan según su prioridad en forma vertical.

Las áreas de acción fueron seleccionadas según como se conforma geográficamente el acueducto, por lo que se inició con las zonas de presión más al norte del sistema y progresivamente se abarcarán las zonas del sur. Además, se priorizan las actividades de optimización de la infraestructura para luego intervenir con la micromedición, que como lo han expresado los resultados de la modelación, generaría variaciones significativas en la presión y velocidad del flujo en el sistema.

Una vez completado el periodo de instalación de medidores, se realizarían esfuerzos importantes por optimizar el funcionamiento del sistema con tecnologías más avanzadas y costosas como la macromedición, la lectura digitalizada de medidores, los controles de nivel en tanques, entre otros. Por lo tanto, para estas intervenciones se plantea un horizonte más amplio hasta el 2050.

Cuadro 29. Plan de acción para el acueducto de Pacayas

Año	2021	2022 - 2023	2024 - 2025	2026 - 2027	2028 - 2029	2030 - 2031	2032 - 2033	2034 - 2035	2040	2045	2050
Área de acción	Sistema en General	Noré y Sergio	Captación Martín y Tanque Martín	La Compostera, Hidrante y La Vuelta	Chico Orozco	Vicente y Zenón	Machón y Lourdes Oeste	Lourdes Este y El Descanso	Sistema en General		
Orden de prioridad ↓	103	47	1	17	6	55	38	27	61	67	86
	105	48	2	18	7	81	39	28	62	68	87
	113	49	81	81	81	56	40	81	63	69	91
	79	81	3	19	8	57	81	32	64	81	92
		50	4	81	81	58	41	81	65	70	
		51	5	20	9	81	42	34	66	71	
		52	81	81	10	59	81	35	76	72	
		53	43	21	81	81	29	81	81	73	
		54	44	60	11	95	30	36	82	76	
		81	45	22	81	80	31	81	83	85	
		95	81	81	12	104	81	37	84	90	
		80	46	23	13	106	33	81	88	100	
		104	81	24	81	107	32	14	89	101	
		106	95	25	95	112	81	15	93	102	
		107	80	81	80	75	95	16	94	111	
		112	104	26	104	76	80	81	96		
		75	106	95	106	98	104	95	97		
		76	107	80	107		106	80	99		
		98	112	104	112		107	104	108		
			75	106	75		112	106	109		
		76	107	76		75	107	110			
		98	112	98		76	112				
			75			98	75				
			76				76				
			98				98				

CAPÍTULO 7: PLAN DE SEGURIDAD DEL AGUA

“La forma más eficaz de garantizar sistemáticamente la seguridad de un sistema de abastecimiento de agua de consumo es aplicando un planteamiento integral de evaluación de los riesgos y gestión de los riesgos que abarque todas las etapas del sistema de abastecimiento, desde la cuenca de captación hasta su distribución al consumidor. Este tipo de planteamientos se denominan, en el presente documento, planes de seguridad del agua (PSA)” (Organización Mundial de la Salud, 2009, p.6).

La cita referida anteriormente proviene de un documento desarrollado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la International Water Association (IWA) denominado Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua. Este escrito tiene como objetivo concientizar a los prestadores del servicio y orientarlos en la creación, organización y desarrollo de dicha metodología. Este mismo esfuerzo ha sido desarrollado por la Organización Panamericana de la Salud y por el Ministerio de Salud de Costa Rica. Sin embargo, hasta el momento no se ha oficializado a través de alguna ley o reglamento el procedimiento de introducción de los PSA en los acueductos.

A inicios del 2020, algunas entidades como el Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), AyA y MINAE desarrollaron un sistema automatizado para el desarrollo de PSAs para las ASADAS de todo el territorio nacional. Este sistema, conocido como GIRA (Gestión Integral de Riesgo en ASADAS) unifica cierta documentación existente, utilizada para el manejo adecuado de los riesgos y calidad sanitaria del recurso hídrico en Costa Rica, y la convierte en una hoja de cálculo programada de gran versatilidad, fácil y rápido llenado y capaz de desarrollar por completo un Plan de Seguridad del Agua para un sistema de abastecimiento pequeño como lo es una ASADA.

Por lo tanto, se consideró que la invención de GIRA sería una herramienta de utilidad para la elaboración del PSA del acueducto de Pacayas, que, aunque no corresponde a una ASADA, presenta ciertas similitudes a este tipo de prestador del servicio. Aunado al desarrollo de esta metodología, se llevó a cabo un mapeo detallado de los atributos que podrían poner en riesgo la seguridad de las tuberías del sistema, así como pruebas de calidad del agua en distintos puntos para verificar el cumplimiento de la normativa nacional.

Las secciones siguientes detallarán el paso a paso llevado a cabo para la creación del PSA según la guía GIRA.

7.1. Caracterización del sistema

En la primera etapa se realiza una descripción detallada de los componentes de infraestructura del sistema, así como un mapa que grafica la ubicación de estos puntos respecto al entorno natural y de la comunidad.

Entre los aspectos solicitados para la descripción del sistema se encuentran:

- Tipo de servicio brindado: Acueducto, hidrante o saneamiento.
- Número de abonados.
- Número de subsistemas.
- Conteo de obras de infraestructura por subsistema: cuantas captaciones, líneas de conducción, redes de distribución o tanques componen dicha zona.
- Información de las fuentes de captación: Tipo de la fuente, nombre, cuenca y subcuenca en la que se localizan.

Por otra parte, el mapa de riesgos propuesto por esta metodología GIRA se muestra en la Figura 49. La idea de este esquema es identificar las amenazas que rodean la infraestructura del acueducto y cuáles podrían generar una situación de riesgo eminente.

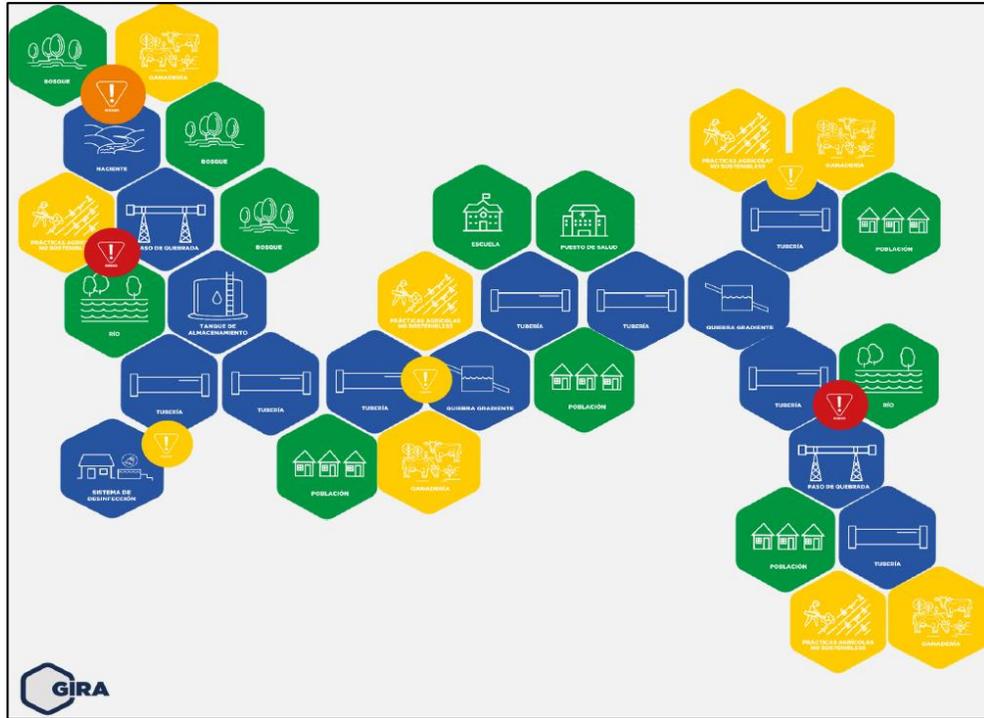


Figura 49. Mapa de riesgos para el acueducto de Pacayas según la metodología GIRA

Los cuadros en azul representan elementos de la infraestructura del sistema como nacientes, tuberías, pasos elevados, tanques o sistemas de desinfección. Las figuras verdes hacen referencia a componentes del ambiente o la comunidad que se relacionan de alguna u otra forma con el servicio y que podrían verse afectados por un desastre o situación de peligro que sufriera el acueducto, entre ellos: zonas de bosque, parques, viviendas, puestos de salud, escuelas, ríos, etc. Finalmente, los cuadros amarillos representan amenazas antropogénicas que podrían afectar el acueducto, en el caso de Pacayas las dos utilizadas fueron las prácticas agrícolas no sostenibles y la ganadería.

7.2. Análisis de vulnerabilidades

En la segunda sección de análisis de vulnerabilidades se procede a una evaluación de las labores desarrolladas por el prestador del servicio dentro de cuatro categorías:

- a. Sanitaria:** Valora los componentes del sistema desde dos perspectivas, el Sello de Calidad del Agua y el Análisis de componentes del Sistema.

Para evaluar esta categoría, la guía GIRA presenta un cuestionario del Sello de Calidad del Agua, iniciativa desarrollada por el Laboratorio Nacional de Aguas. El detalle del cuestionario y las respuestas para el acueducto de Pacayas se muestran en el Cuadro 30.

Cuadro 30. Cuestionario sanitario de Sello de calidad del agua para el acueducto de Pacayas

No.	Pregunta	Respuesta	Evaluación
1	¿Posee planes de mantenimiento planificados y realizados para cada una de las fuentes de agua? (15 pts)	No	0
2	¿Posee planes de mantenimiento planificados y realizados para la limpieza de tanques y redes? (10 pts)	No	0
3	¿Se realizan estudios diarios del cloro residual en la red para mantenerla dentro de los parámetros de la norma, con su respectiva bitácora? (10 pts)	No	0
4	¿Se organizan anualmente programas de educación ambiental a la comunidad como: talleres, campañas de limpieza de calles o ríos, videos informativos, reforestación, entre otras? (10 pts)	Si	10
5	¿Se informa a la comunidad los resultados del control de calidad de agua potable por medios como: boletines, recibos de cobro mensual, oficina de acueducto, sitios públicos o redes sociales? (2,5 pts)	No	0
6	¿Realiza el Control Operativo con la frecuencia establecida en el Reglamento para la Calidad de Agua Potable (Decreto Ejecutivo N.38924-S)? (20 pts)	Si	20
7	¿Todas las fuentes y los tanques se encuentran rotulados y con pintura en buen estado? (Puntuación para la gradación de estrellas)	Si	N/A
Resultado			30
Evaluación			44%
Vulnerabilidad			Baja

De manera semejante, para evaluar cada uno de los componentes del sistema, se presentaban formularios basados en las Guías SERSA para los diferentes tipos de infraestructura. En el Cuadro 31 se presenta la caracterización de las líneas de conducción y distribución y los resultados del acueducto.

Cuadro 31. Evaluación de las líneas de conducción y distribución del acueducto de Pacayas según las guías SERSA

No.	Pregunta	Respuesta	Evaluación
1	¿Existe alguna fuga en la línea de conducción?	Si	10
2	¿Carecen los tanques quiebra gradientes de tapas sanitarias?	No	0
3	¿En los tanques quiebra gradientes se observan rajaduras, grietas, fugas, raíces?	No	0
4	¿Se observan fugas visibles en alguna red de distribución?	No	0
5	¿Existen variaciones significativas de presiones en la red de distribución?	Si	10
6	¿Carece de cloro residual alguna zona de la red principal de distribución?	Si	10
7	¿Existen interrupciones constantes en el servicio de distribución de agua?	No	0
8	¿Carece de sistemas para purgar la tubería de distribución?	No	0
9	¿Carece de un fontanero o encargado de mantenimiento de la red?	No	0
10	¿Carece de un esquema del sistema de distribución (planos o croquis)?	Si	10
Resultado			40
Vulnerabilidad			Moderada

Para cada uno de los tanques de almacenamiento también se llevó a cabo una inspección según lo dictaminado por el cuestionario. Los resultados se muestran en el Cuadro 32.

Cuadro 32. Evaluación de los tanques del acueducto de Pacayas según las guías SERSA

Pregunta	Zenón	Sergio	Chico Orozco	Vicente	Hidrante	El Descanso	Martín Montero	Machón	Lourdes	La Compostera	Noré	La Vuelta
¿Están las paredes agrietadas (concreto) o herrumbadas (metálico)?	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
¿Están las tapas del tanque de almacenamiento, construida en condiciones no sanitarias?	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si
¿Carece la estructura externa de mantenimiento (pintura, limpieza, libre de hojas, musgo)?	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
¿Está ausente o fuera de operación el sistema de cloración?	No	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	No	No	Si	No
¿Está el nivel de agua menor que un cuarto que el volumen del tanque y las escaleras internas herrumbadas?	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
¿Existen sedimentos, algas, hongos dentro del tanque?	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
¿Está ausente o defectuosa la malla de protección?	No	Si	Si	No	Si	No	Si	No	No	No	No	No
¿Carece la tapa de un sistema de cierre seguro (candado, cadena, tornillo)?	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	Si	No	Si
¿Carece el tanque de respiraderos o tuberías de rebalse con rejillas de protección?	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Cuadro 32. Evaluación de los tanques del acueducto de Pacayas según las guías SERSA (Cont.)

Pregunta	Zenón	Sergio	Chico Orozco	Vicente	Hidrante	El Descanso	Martín Montero	Machón	Lourdes	La Compostera	Noré	La Vuelta
¿Existe alguna fuente de contaminación alrededor del tanque (letrinas, animales, viviendas, basura)?	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si	No	No
Resultado	10	40	30	20	30	20	20	20	10	30	20	30
Vulnerabilidad	Baja	Media	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja

Esta misma herramienta fue contestada para cada una de las nacientes de las que se abastece el sistema de agua potable de Pacayas (ver Cuadro 33).

Cuadro 33. Evaluación de las nacientes del sistema de Pacayas según las guías SERSA

Pregunta	Martín Montero	Catarata Minor	Minor	La Isla	María Cristina	La Tica	Pacayón	Vicente	Zenón
¿Está la naciente sin malla de protección que impide el acceso de animales y personas?	No	Si	No	Si	No	Si	No	No	No
¿Está la naciente desprotegida, abierta a la contaminación ambiental (sin caseta o sin tanque de captación)?	No	Si	No	Si	No	No	No	No	No
¿Está la tapa de captación construida en condiciones no sanitaria y sin cierre seguro (candado o tornillo)?	No	No	No	No	No	No	No	No	No
¿Están las paredes y la loza superior de captación con grietas?	No	No	No	No	No	No	No	No	No

Cuadro 33. Evaluación de las nacientes del sistema de Pacayas según las guías SERSA (Cont.)

Pregunta	Martín Montero	Catarata Minor	Minor	La Isla	María Cristina	La Tica	Pacayón	Vicente	Zenón
¿Carece de canales perimetrales para desviar el agua de escorrentía?	Si	No	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si
¿Carece la captación de respiraderos o tubería de rebalse con rejilla de protección?	Si	No	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si
¿Se encuentran plantas, raíces, hojas, algas dentro de la captación de la naciente?	No	No	No	No	No	No	No	No	No
¿Existen aguas estancadas sobre o alrededor de la captación?	No	No	No	No	No	No	No	No	No
¿Existe alguna fuente de contaminación alrededor de la captación (letrinas, animales, viviendas, basura)?	No	No	No	No	No	No	No	No	No
¿Se encuentra la captación ubicada en zonas con actividad agrícola o industrial?	Si	No	No	No	Si	Si	Si	No	No
Resultado	30	20	20	20	30	40	30	20	20
Vulnerabilidad	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Media	Baja	Baja	Baja

b. Administrativa: valora la gestión administrativa y las vulnerabilidades que limitan a prevenir, atender y mitigar posibles riesgos.

Para la evaluación de la gestión administrativa se respondieron una serie de preguntas en cuanto a las finanzas y el manejo de ellas por parte del ente operador del servicio (ver Cuadro 34).

Cuadro 34. Evaluación de la vulnerabilidad administrativa según la guía GIRA

No.	Pregunta	Respuesta	Evaluación
1	¿Cuenta con estados financieros actualizados?	No	12,5
2	¿El dinero de la ASADA es custodiado en una cuenta bancaria?	Si	0,0
3	¿Se poseen fondos de capitalización (dinero acumulado para utilizarse en reparación y ampliación del sistema)?	Si	0,0
4	¿El porcentaje de morosidad de los abonados es menor a 10%?	No	12,5
5	¿La ASADA ofrece el servicio de pago por Internet o depósito bancario?	No	12,5
6	¿Cuenta con Sistemas Informáticos de Gestión para las ASADAS?	No	12,5
7	¿La ASADA sigue un plan de trabajo anual?	Si	0,0
8	¿Cuenta con un Plan de Transparencia y Rendición de Cuentas?	No	12,5
Resultado			63
Vulnerabilidad			Moderada

c. Operativa: valora el nivel de control del mantenimiento y operación del sistema, el manejo de procedimientos adecuados y bitácoras de control.

En esta categoría, el cuestionario se compone de las preguntas mostradas en el Cuadro 35. Igualmente se muestra el resultado para el acueducto municipal de Pacayas.

Cuadro 35. Evaluación de la vulnerabilidad operativa según la guía GIRA

No.	Pregunta	Respuesta	Evaluación
1	¿Existe más oferta de agua que la demandada por la comunidad, o al menos está balanceada?	Si	12,5
2	¿El acueducto cuenta con desinfección continua?	Si	12,5
3	¿Se conoce la zona de recarga de las fuentes de agua subterráneas?	No	0,0
4	¿Se poseen procedimientos operativos de control de presiones?	No	0,0
5	¿Se poseen procedimientos operativos de control de fugas?	No	0,0
6	¿Se poseen procedimientos operativos de control de las instalaciones de tuberías y nuevas conexiones?	No	0,0
7	¿Se llevan bitácoras con fecha, lugar y fotografía, de las mejoras o mantenimientos realizados al sistema?	No	0,0

Cuadro 35. Evaluación de la vulnerabilidad operativa según la guía GIRA (Cont.)

No.	Pregunta	Respuesta	Evaluación
8	¿Se busca mejorar los procedimientos de control y mantenimiento en el sistema?	Si	12,5
Resultado			63
Vulnerabilidad			Alta

d. Infraestructura: se enfoca en las condiciones físicas de los elementos de infraestructura, el cumplimiento de su vida útil y si se conocen las especificaciones técnicas de sus partes.

Para determinar las condiciones básicas del estado de infraestructura la metodología GIRA desarrolla el cuestionario mostrado en el Cuadro 36.

Cuadro 36. Evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura según la guía GIRA

No.	Pregunta	Respuesta	Evaluación
1	¿Posee el detalle del catastro de los componentes del sistema (ubicación, profundidad, especificaciones técnicas)?	No	14
2	¿Conoce el material, edad y condición de las tuberías y otros elementos del sistema?	No	14
3	¿Todos los componentes del sistema se encuentran dentro su vida útil?	Si	0
4	¿Tiene identificadas las áreas dentro del sistema propensas a inundaciones?	Si	0
5	¿Tiene identificadas dentro del sistema posibles fuentes de materia fecal que se encuentren cerca de la tubería o fuentes?	Si	0
6	¿El sistema está libre de fugas?	No	14
7	¿Los componentes del sistema están localizados en zonas de baja vulnerabilidad, y si no es así, se ha identificado que la ubicación correcta del componente para proyectar su traslado?	No	14
Resultado			57
Vulnerabilidad			Baja

7.3. Análisis de amenazas

En esta sección se identifica la existencia de amenazas, la probabilidad de afectación sobre las subcuencas donde se ubica el sistema de agua potable y el nivel de consecuencia de estas amenazas sobre los componentes de infraestructura y servicios. Además, se evalúa el grado de preparación del operador ante una emergencia.

Entre las amenazas consideradas por GIRA se encuentran la mostradas en la Figura 50.



Figura 50. Amenazas consideradas por la metodología GIRA

Fuente: Guías GIRA, 2019

Entre ellas se seleccionaron los sismos, deslizamientos, erupciones volcánicas y rotura de tuberías como los más representativos para el acueducto de Pacayas. Una vez elegidas estas opciones se procedería a la estimación del nivel de consecuencia o impacto de cada una. Para ello se recopiló la información mostrada en el Cuadro 37.

Cuadro 37. Análisis de las amenazas del acueducto de Pacayas según la metodología GIRA

Amenaza	Terremoto / Sismo	Erupciones volcánicas	Deslizamiento	Rotura en tuberías
Costo del impacto en la infraestructura (Reparación o sustitución)				
Fuentes de abastecimiento de agua	Entre Q5 y Q15 millones	Entre Q1 y Q5 millones	Entre Q5 y Q15 millones	Ninguno
Líneas de conducción y distribución	Entre Q1 y Q5 millones	Entre Q1 y Q5 millones	Entre Q1 y Q5 millones	Entre Q1 y Q5 millones
Tanques de almacenamiento	Entre Q1 y Q5 millones	Entre Q1 y Q5 millones	Entre Q1 y Q5 millones	Ninguno
Edificio o bodega de materiales	Menor a Q1 millón	Ninguno	Entre Q1 y Q5 millones	Ninguno
Estimación del impacto en el servicio de agua				
Porcentaje de abonados sin servicio de agua	Entre 50% - 75%	Entre 75% - 100%	Entre 25% - 50%	Menos del 25%
Días aproximados sin servicio de agua	7 a 15 días	15 días o más	7 a 15 días	1 a 2 días
Consecuencias				
Costo aproximadamente de daños en infraestructura	Q16 750 000	Q10 750 000	Q13 000 000	Q3 000 000
Pérdidas comerciales	Q1 461 000	Q2 272 000	Q812 000	Q32 500
Nivel de consecuencia resultante	Grave	Grave	Grave	Leve

Las pérdidas comerciales están basadas en la tarifa domiciliar vigente de $\$4$ 293 multiplicado por el porcentaje aproximado de usuarios afectados y el número de días que se mantuvo la afectación. Además, como parte de esta sección se revisó la preparación que posee el departamento administrativo del acueducto ante la ocurrencia de una emergencia (ver Cuadro 38).

Cuadro 38. Evaluación de los preparativos ante emergencias que podrían afectar el acueducto de Pacayas según la guía GIRA

No.	Pregunta	Respuesta	Evaluación
1	¿Se tienen identificadas las fuentes alternativas de agua en caso de un desastre?	No	0
2	¿Realiza el Control Operativo con la frecuencia establecida en el Reglamento para la Calidad de Agua Potable (Decreto Ejecutivo N.38924-S)?	Si	10
3	¿Se dispone de un stock de materiales suficientes para reparar posibles daños?	Si	10
4	¿Se tiene un plano actualizado del sistema y sus accesorios?	No	0
5	¿Están identificadas las zonas más vulnerables del sistema?	No	0
6	¿Las instalaciones eléctricas son a prueba de agua?	No	0
7	¿Posee mecanismos alternativos de generación eléctrica?	No	0
8	¿Se tiene un plan de comunicación en caso emergencias con: el usuario, AYA, CNE, ORAC, otros?	No	0
9	¿Forma parte del comité comunal de emergencias?	No	0
10	¿Ha desarrollado alianzas con ASADAS vecinas para coordinar apoyo mutuo en caso de una emergencia?	Si	10
Resultado			30
Nivel de preparación			Moderada

7.4. Valoración del riesgo y priorización

En este apartado se analizan los resultados obtenidos de los estudios anteriores y se propone la priorización de los riesgos según su probabilidad de ocurrencia y el grado de consecuencia de la amenaza. Los resultados finales para el sistema de agua potable de Pacayas administrado por la Municipalidad de Alvarado se muestran en la Figura 51.

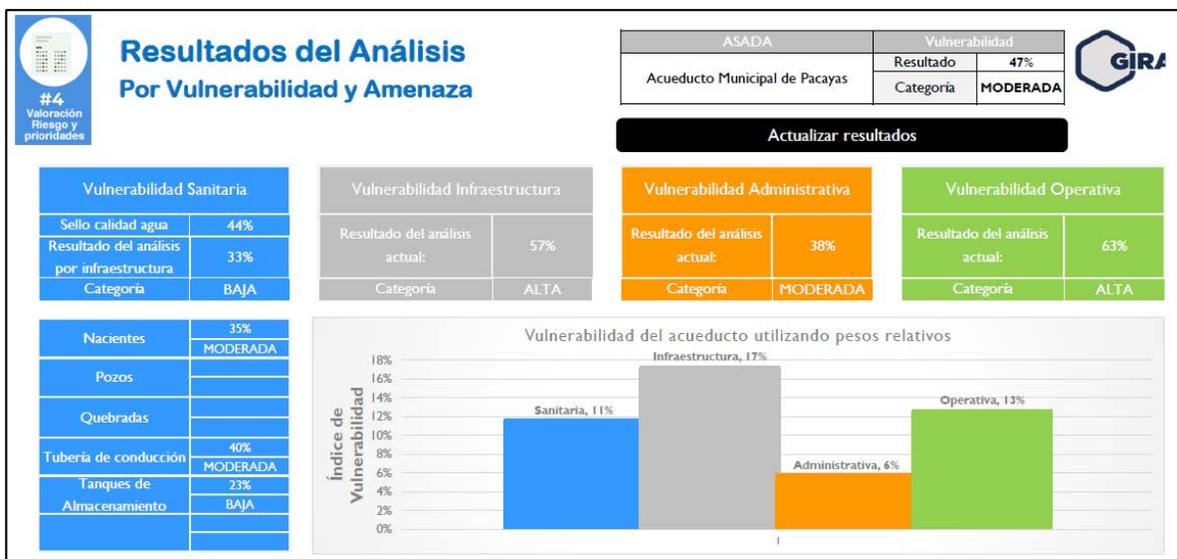


Figura 51. Resultados del análisis por vulnerabilidad y amenaza para el acueducto de Pacayas

Fuente: Guías GIRA, 2019

Según los resultados anteriores la vulnerabilidad en infraestructura y operativa son las que afectan mayoritariamente al acueducto, principalmente por la ausencia de protocolos, bitácoras o registros de control del mantenimiento y operación del sistema; prácticamente ninguna acción realizada por las cuadrillas operativas es documentada con fotografías, localización o detalles de las maniobras. Para la valorización de los riesgos se debe tomar en cuenta la probabilidad de impacto de la amenaza, al mismo tiempo que el grado de consecuencia de esta. El sistema GIRA propone la utilización de las siguientes tablas de valoración para la definir el nivel de riesgo (Figura 52 y Figura 53).

Nivel de probabilidad	NP	Significado
Muy alta (MA)	40 y 24	Situación deficiente con exposición continuada, o muy deficiente con exposición frecuente. Es casi un hecho que el evento ocurrirá (un evento cada 12 a 18 meses).
Alta (A)	20 y 10	Situación deficiente con exposición frecuente u ocasional, o bien situación muy deficiente con exposición ocasional o esporádica. Es probable que ocurra el evento en la mayoría de los casos (un evento cada 18 meses a dos años).
Media (M)	8 y 6	Situación deficiente con exposición esporádica, o bien situación mejorable con exposición continuada o frecuente. El evento ocurrirá en algún momento (un evento cada 2 a 5 años).
Baja (B)	4 y 2	Situación mejorable con exposición ocasional o esporádica. El evento podría ocurrir en algún momento (un evento cada 5 a 10 años).

Figura 52. Valoración del nivel de probabilidad de impacto de una amenaza.

Fuente: Guías GIRA, 2019

Nivel de consecuencia	Significado			
	NC	Daños acueducto	Daños edificios	Daños personales
Catastrófico (C)	100	Interrupción de varios meses. Destrucción total del sistema (difícil renovarlo).	Destrucción total (difícil renovarlo).	1 muerto o más.
Muy grave (MG)	60	Interrupción de varias semanas a un mes. Destrucción parcial del sistema (compleja y costosa reparación).	Destrucción parcial (compleja y costosa reparación).	Lesiones graves que pueden ser irreparables.
Grave (G)	25	Interrupción de varios días a una semana. Se requiere paro del sistema para reparación.	Se requiere paro de funciones para efectuar reparación.	Lesiones con incapacidad laboral transitoria.
Leve (L)	10	Interrupción de varias horas a un día. Reparable sin necesidad de paro del sistema.	Reparable sin necesidad de paro de funciones.	Pequeñas lesiones que no requieren hospitalización.

Figura 53. Valoración del nivel de probabilidad del grado de consecuencia de una amenaza

Fuente: Guías GIRA, 2019

De acuerdo con los puntos de probabilidad y consecuencia asignados para una amenaza, su nivel de riesgo se obtendría como la multiplicación de los dos puntajes. La Figura 54 muestra el nivel de riesgo asociado al resultado obtenido.

Nivel de riesgo	NR	Significado
Muy severo (I)	4000 - 600	Situación crítica. Corrección urgente.
Severo (II)	500-200	Corregir y adoptar medidas de control.
Moderado (III)	150-40	Mejorar si es posible. Sería conveniente justificar la intervención y su rentabilidad.
Aceptable (IV)	20	No intervenir, salvo que un análisis más preciso lo justifique. Riesgo controlado.

Figura 54. Valoración del nivel de riesgo asociado a una amenaza

Fuente: Guías GIRA, 2019

Los resultados de la valoración de los riesgos para cada amenaza detectada se presentan en el Cuadro 39.

Cuadro 39. Valoración de los riesgos que representa cada amenaza para el sistema de Pacayas

Tipo Vulnerabilidad	Tipo de componente	Amenaza	Probabilidad de impacto de la amenaza	Grado de consecuencia de la amenaza	Nivel de Riesgo
Sanitaria	Líneas de Conducción y Distribución	Contaminación por fuga en la línea de conducción	Moderada	Grave	Moderado (III)
Sanitaria	Líneas de Conducción y Distribución	Contaminación por falta de cloro residual en la red	Alta	Grave	Severo (II)
Sanitaria	Líneas de Conducción y Distribución	Riesgo operativo por carecer de planos y croquis del sistema de distribución	Moderada	Leve	Moderado (III)
Sanitaria	Naciente	Contaminación por acceso de animales y personas	Moderada	Grave	Moderado (III)
Sanitaria	Naciente	Contaminación por falta de seguridad (candado o tornillo)	Moderada	Grave	Moderado (III)
Sanitaria	Naciente	Contaminación por acceso de agua superficial aledaña	Moderada	Grave	Moderado (III)
Sanitaria	Naciente	Contaminación por falta de rejilla de protección en la tubería de rebalse	Moderada	Grave	Moderado (III)
Sanitaria	Naciente	Contaminación por aguas estancadas aledañas	Moderada	Grave	Moderado (III)
Sanitaria	Naciente	Contaminación por cercanía de actividad agrícola	Alta	Grave	Severo (II)
Sanitaria	Tanque de Almacenamiento	Contaminación por falta de rejilla de protección en la tubería de rebalse.	Moderada	Grave	Moderado (III)

Cuadro 39. Valoración de los riesgos que representa cada amenaza para el sistema de Pacayas (Cont.)

Tipo Vulnerabilidad	Tipo de componente	Amenaza	Probabilidad de impacto de la amenaza	Grado de consecuencia de la amenaza	Nivel de Riesgo
Sanitaria	Tanque de Almacenamiento	Contaminación por falta de candado, cadena o tornillo en el cierre de la tapa.	Moderada	Grave	Moderado (III)
Infraestructura	Registro de infraestructura	Deterioro de la calidad del sistema por utilizar componentes que sobrepasen su vida útil	Alta	Grave	Severo (II)
Operativa	Procedimientos	Procedimientos de control y mantenimiento desactualizados	Alta	Leve	Moderado (III)
Sello de Calidad	Cambio climático	Desinterés de la comunidad por cuidar el ambiente, mal manejo de los recursos naturales	Moderada	Grave	Moderado (III)
Sello de Calidad	Calidad de agua	Problemas en la salud de la población, demandas legales, entre otros	Moderada	Muy Grave	Severo (II)
Emergencias	Financiero	Poca o nula capacidad financiera para atender los desastres	Moderada	Muy Grave	Severo (II)
Emergencias	Planificación	Desabastecimiento de materiales para reparar daños, largas esperas de abastecimiento	Moderada	Muy Grave	Severo (II)
Administrativa	Financiero	Poca o nula capacidad financiera para atender los desastres	Moderada	Muy Grave	Severo (II)
Administrativa	Recurso Humano	Desactualización de nuevas opciones de gestión de la ASADA	Alta	Leve	Moderado (III)

7.5. Administración del riesgo

Finalmente, para los riesgos presentados anteriormente se debe definir una ruta de acción clara, que guíe al operador en cómo atacar las posibles amenazas y se disminuya la vulnerabilidad global del sistema. De acuerdo con la metodología GIRA, el plan de administración del riesgo debe incluir aspectos como el monto de inversión aproximada, la fuente de financiamiento y la fecha de inicio y finalización de las acciones propuestas. Sin embargo, el financiamiento de un acueducto municipal es mucho más complicado que el de una ASADA; los montos destinados dependerán de la autorización del concejo municipal, de la distribución de los fondos y necesidades de otras partidas financieras, etc. Por esta razón, el alcance de este plan de gestión del riesgo se mantendrá abierto desde el punto de vista financiero y temporal, para ser ejecutado una vez que el departamento administrativo del acueducto tenga claridad con respecto a su fondo de financiamiento.

Es importante destacar que la introducción de micromedición en la totalidad de servicios del acueducto acrecentaría el ingreso por la venta del servicio de forma considerable, por lo que esta podría ser una forma de financiar a través del tiempo las mejoras operativas, comerciales, administrativas y de gestión de riesgos que se proponen.

Se muestran en el Cuadro 40 las medidas correctivas recomendadas para cada una de las amenazas detectadas según el sistema GIRA. Muchas de las acciones también fueron recomendadas dentro del plan de acción para la optimización del acueducto en el CAPÍTULO 6: PLAN DE ACTUALIZACIÓN DEL ACUEDUCTO por lo que su puesta en marcha no solo generaría una mejora operacional del sistema, sino que acarrearía un beneficio en la gestión de posibles amenazas.

Cuadro 40. Plan de acción de medidas correctivas para el acueducto de Pacayas

Tipo Vulnerabilidad	Tipo de componente	Amenaza	Pasos a seguir para la solución propuesta
Sanitaria	Líneas de Conducción y Distribución	Contaminación por fuga en la línea de conducción	a) La regulación de la presión disminuiría de manera considerable las roturas en las tuberías, además de que favorecería a la reducción del caudal de fugas no visibles. c) La sustitución de tuberías de espesor no adecuado o de mucha antigüedad favorecerá la reducción de las roturas.
Sanitaria	Líneas de Conducción y Distribución	Contaminación por falta de cloro residual en la red	a) El monitoreo del cloro residual en la red debe ser más extenso, los puntos de toma de muestras deben aumentarse. b) Los cloradores utilizados para la cloración por hipoclorito de calcio en tabletas deben ser calibrados.
Sanitaria	Líneas de Conducción y Distribución	Riesgo operativo por carecer de planos y croquis del sistema de distribución	a) Se debe de contar con un plano o croquis actualizado de la red, que sea de conocimiento de todo el personal. b) Esta herramienta se debe mantener en constante actualización.
Sanitaria	Naciente	Contaminación por acceso de animales y personas	a) A las nacientes que no poseen cerramiento perimetral se les debe instalar con urgencia. b) En la medida de lo posible, el cerramiento perimetral debe de abarcar un distanciamiento adecuado con actividades agrícolas, ganaderas o humanas.
Sanitaria	Naciente	Contaminación por falta de seguridad (candado o tornillo)	a) Todas las tapas de captaciones y tanques deben de contar con un candado para asegurar su seguridad. b) Se deberá dar un adecuado mantenimiento a estos dispositivos de seguridad.
Sanitaria	Naciente	Contaminación por acceso de agua superficial aledaña	a) Las nacientes deben incorporar canales por los cuáles evacuar el agua de escorrentía. b) Las captaciones deben contar con tuberías o mecanismos para el desfogue de los rebalses. c) Debe existir un mecanismo para el desfogue en caso de contaminación de la naciente.
Sanitaria	Naciente	Contaminación por falta de rejilla de protección en la tubería de rebalse	a) Todos los tanques y captaciones deben contar con respiraderos correctamente sellados con alguna malla para evitar la entrada de animales pequeños o contaminación.
Sanitaria	Naciente	Contaminación por aguas estancadas aledañas	a) Las nacientes deben incorporar canales por los cuáles evacuar el agua de escorrentía. b) Las captaciones deben contar con tuberías o mecanismos para el desfogue de los rebalses. c) Debe existir un mecanismo para el desfogue en caso de contaminación de la naciente.

Cuadro 40. Plan de acción de medidas correctivas para el acueducto de Pacayas (Cont.)

Tipo Vulnerabilidad	Tipo de componente	Amenaza	Pasos a seguir para la solución propuesta
Sanitaria	Naciente	Contaminación por cercanía de actividad agrícola	a) A las nacientes que no poseen cerramiento perimetral se les debe instalar con urgencia. b) En la medida de lo posible, el cerramiento perimetral debe de abarcar un distanciamiento adecuado con actividades agrícolas, ganaderas o humanas.
	Tanque de Almacenamiento	Contaminación por falta de rejilla de protección en la tubería de rebalse	a) Todos los tanques y captaciones deben contar con respiraderos correctamente sellados con alguna malla para evitar la entrada de animales pequeños o contaminación.
	Tanque de Almacenamiento	Contaminación por falta de candado, cadena o tornillo en el cierre de la tapa.	a) Todas las tapas de captaciones y tanques deben de contar con un candado para asegurar su seguridad. b) Se deberá dar un adecuado mantenimiento a estos dispositivos de seguridad.
Infraestructura	Registro de infraestructura	Deterioro de la calidad del sistema por utilizar componentes que sobrepasen su vida útil	a) Debe realizarse un plan de sustitución de las tuberías y accesorios que hayan sobrepasado su vida útil (más de 20 o 25 años).
Operativa	Procedimientos	Procedimientos de control y mantenimiento desactualizados	a) Realizar una constante actualización a los procedimientos de control operativo y mantenimiento, si no existen se deberán crear. b) Deben extenderse estos programas a todo el personal operativo para que sea de su conocimiento, incluso involucrarlos en el proceso para el ajuste de estos documentos.
Sello de Calidad	Cambio climático	Desinterés de la comunidad por cuidar el ambiente, mal manejo de los recursos naturales	a) Organizar reuniones y consejos municipales en los que se concientice a la población sobre la reducción de su consumo y se informe las medidas de instalación de micromedición. b) Organizar programas anuales de educación ambiental en la comunidad como: talleres, campañas de limpieza, videos informativos, reforestación, entre otros.
	Calidad de agua	Problemas en la salud de la población, demandas legales, entre otros	a) El monitoreo del cloro residual en la red debe ser más extenso, los puntos de toma de muestras deben aumentarse. b) Los cloradores utilizados para la cloración por hipoclorito de calcio en tabletas deben ser calibrados.
Emergencias	Financiero	Poca o nula capacidad financiera para atender los desastres	a) Crear un asiento contable dedicado a generar un ahorro, el cual servirá como respaldo al ser afectado por un desastre
Emergencias	Planificación	Desabastecimiento de materiales para reparar daños, largas esperas de abastecimiento	a) Identificar los materiales pertinentes a mantener en bodega para atención a emergencias

Cuadro 40. Plan de acción de medidas correctivas para el acueducto de Pacayas (Cont.)

Tipo Vulnerabilidad	Tipo de componente	Amenaza	Pasos a seguir para la solución propuesta
Emergencias	Planificación	Desabastecimiento de materiales para reparar daños, largas esperas de abastecimiento	a) Identificar los materiales pertinentes a mantener en bodega para atención a emergencias
Administrativa	Financiero	Poca o nula capacidad financiera para atender los desastres	a) Las mejoras tarifarias y la introducción de la micromedición seguramente generarán beneficios económicos que podrán ser utilizados para la inversión en mantenimiento y actualización del sistema.
	Recurso Humano	Desactualización de nuevas opciones de gestión de la ASADA	a) Validar las necesidades de formación del personal y programar capacitaciones anuales según las mismas.

7.6. Esfuerzos adicionales para cuantificar las amenazas sanitarias y de infraestructura

A pesar de que la herramienta GIRA resulta una excelente ayuda para la elaboración de un PSA, su concepción como una aplicación para el uso generalizado de prestadores del servicio de agua potable no permite ahondar en la ubicación exacta de los riesgos dentro del área geográfica del acueducto. Por ende, junto con los operadores del sistema se llevó a cabo un mapeo detallado de aquellas características de las líneas de conducción o distribución que pudieran amenazar el correcto funcionamiento del sistema o la calidad del agua potable.

Cada uno de los riesgos analizados se asoció a una de estas características de las tuberías que podría aumentar la vulnerabilidad del sistema en caso de presentarse. Se estudiaron tramos de aproximadamente 500 m de largo en toda la red del acueducto y se caracterizó cada uno de acuerdo con los factores del riesgo definidos en el Cuadro 41.

Cuadro 41. Riesgos posibles en las tuberías del acueducto de Pacayas

Riesgos	Nivel de consecuencia	Nivel de probabilidad		
		Baja	Media	Muy Alta
Que el tubo sufra roturas o intrusión de contaminantes por su EXPOSICIÓN	Grave	Enterrado (>60cm)	Semi expuesto (60<x<20cm)	Expuesto por completo (20cm o menos)
Que se presenten roturas por la ANTIGÜEDAD de las tuberías	Grave	x < 5 años	5 años < x < 20 años	20 años < x
Que se presente riesgo de DESLIZAMIENTO	Muy Grave	Bajo	Medio	Alto
Que se presentes fugas y la ACCESIBILIDAD al sitio genere retrasos o problemas en la atención	Grave	Fácil acceso a pie o en vehículo	Acceso solo caminando en zonas quebradas	Acceso muy difícil aún caminando
Que se generen fugas o problemas en tuberías dentro de terrenos de PROPIEDAD privada y se retrase la reparación por esta razón	Leve	Público	-	Privado totalmente cerrado
Que la existencia de CONEXIONES ILÍCITAS genere contaminación al agua	Leve	Baja (no se han descubierto conexiones ilícitas)	Media (se ha descubierto alguna conexión ilícita)	Alta (se conocen varias conexiones ilícitas recurrentes)

Cuadro 41. Riesgos posibles en las tuberías del acueducto de Pacayas (Cont.)

Riesgos	Nivel de consecuencia	Nivel de probabilidad		
		Baja	Media	Muy Alta
Que la CLORACIÓN sea incompleta o nula y no se puedan atender los problemas de contaminación mediante desinfección	Muy Grave	Cloración completa	-	Servicios sin cloración
Que la tubería sufra problemas de ESTANQUEIDAD que puedan afectar la calidad del agua	Grave	Tubería de conducción continua	Tubería con llaves semicerradas o de cierre eventual	Tubería con tapones o sin flujo continuo
Que existan SISTEMAS DE PURGA para la eventual atención de un caso de contaminación del agua	Grave	Existencia de una o más llave para la purga	Existencia de llaves de purga a una distancia mayor a 500 m	No existen llaves de purga
Que la existencia de un PASO ELEVADO pueda generar inconvenientes o fallos en la conducción del flujo	Muy Grave	No existen pasos elevados	-	Si existen pasos elevados

Para cada riesgo determinado se asignó un nivel de consecuencia de acuerdo con las afectaciones que estos podrían generar al acueducto o a usuarios según la Figura 53. Por otra parte, el nivel de probabilidad se asocia con las distintas categorías en que el factor generador de riesgo se podría presentar (estos factores de riesgo se señalan con letra negrita y escritos en mayúsculas en la primera columna del Cuadro 41).

Al asignar a cada tramo de tubería estas características se otorga no solo una idea de los riesgos y amenazas que podrían sufrir, sino que se determina su ubicación con el fin de que el operador sepa exactamente dónde priorizar sus recursos. Se podrían relacionar los factores generadores de riesgo, como profundidad o edad de las tuberías, con parámetros técnicos como diámetro o material y dar un criterio más amplio con respecto a las acciones de sustitución de tuberías, por ejemplo. Algunos mapas con la ubicación de estos riesgos en la red se adjuntan como Anexo 3.

Por otra parte, se desarrolló una campaña de medición del cloro residual libre y cloro total en 11 distintos puntos del sistema con el fin de determinar la eficiencia del sistema de cloración a través de hipoclorito de calcio en pastillas. Igualmente se midieron distintos parámetros, según lo indica el nivel N.1 del Reglamento de Calidad de Agua Potable (Ministerio de Salud, 2005),

para 6 tanques del acueducto de Pacayas. Los resultados de las pruebas de cloración se muestran en el Cuadro 42.

Cuadro 42. Resultados de las pruebas de cloración dentro de la red de distribución del acueducto de Pacayas

No.	Sitio	Cloro residual libre (mg/L)	Cloro total (mg/L)	Cloro residual combinado (mg/L)
1	Panadería y Cafetería María Auxiliadora	0,15	1,13	0,98
2	Entrada a Patalillo	0,10	1,06	0,96
3	Casa cercana al Tanque Chico Orozco	0,30	1,54	1,24
4	Tanque Chico Orozco	0,54	1,58	1,04
5	Tanque La Vuelta	0,21	1,10	0,89
6	Aguas arriba del Tanque La Vuelta	0,20	0,97	0,77
7	Cerca de la Escuela Buenos Aires	0,19	1,15	0,96
8	Aguas abajo Tanque La Compostera	0,23	1,62	1,39
9	Tanque La Compostera	0,41	1,05	0,64
10	Tanque Lourdes	0,81	1,81	1,00
11	Municipalidad de Alvarado	0,33	1,24	0,91
Rango permitido por la normativa		0,3 – 0,6	-	1,0 – 1,8

De acuerdo con el rango permitido que establece el Reglamento de Calidad de Agua Potable solamente dos de los once puntos cumplen con los umbrales de cloro residual libre y cloro residual combinado. Los restantes 9 sitios se encuentran por debajo de los límites inferiores de ambos parámetros.

Durante el proceso de cloración, se añade al agua hipoclorito de calcio en forma de pastillas que al entrar en contacto con el agua sufre una descomposición en moléculas de ácido hipocloroso o iones hipoclorito. Estos serán los componentes desinfectantes que de inmediato inhibirán los contaminantes como compuestos orgánicos o bacterias y se consumirán por completo. A medida que se añade más hipoclorito de calcio, los componentes desinfectantes habrán erradicado por completo los contaminantes y comenzarán a acumularse, lo que se conoce como cloro libre residual.

Si la concentración de cloro libre residual supera el umbral límite de desinfección, producirá la creación de cloraminas (monocloraminas, dicloraminas o tricloraminas) a partir de la reacción

del ion hipoclorito con el amoníaco presente en el agua. A estas cloraminas se les conoce también como cloro combinado residual (HACH & LANGE, 2014)

Por lo tanto, los resultados que incumplen la normativa indican que la dosificación de hipoclorito de calcio es suficiente para que se presenten rastros de ácido hipocloroso o ion hipoclorito, incluso para producir monocloraminas (cloro combinado), sin embargo, no es suficiente para la atención de una emergencia de contaminación en el agua, tal y como lo prevén los rangos establecidos por la normativa. Ante una variación repentina de los contaminantes en la red de agua potable, la concentración de componentes desinfectantes sería insuficiente. Por lo tanto, se debe prestar atención al procedimiento de cloración realizado en la mayoría de los tanques de almacenamiento del acueducto de Pacayas, de manera que las pruebas en los puntos cercanos al tanque y críticos de la red cumplan con los rangos establecidos. Se debe incluso valorar la opción de realizar re-cloración en algunos reservorios que actualmente no cuentan con la instalación de un clorador.

Del mismo modo se estudiaron en algunos tanques de almacenamiento los parámetros de conductividad, pH y temperatura que el nivel de control N1 regula. Los resultados y su valor máximo admisible se muestran en el Cuadro 43.

Cuadro 43. Parámetros del control N1 del Reglamento de Calidad de Agua Potable para algunos tanques del sistema de Pacayas

No.	Tanque	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
1	Chico Orozco	125	4,79	17,33
2	La Vuelta	139	4,94	17,14
3	La Compostera	174	5,01	18,46
4	Zenón	156	5,08	16,48
5	Machón	120	5,07	16,97
6	Lourdes	139	5,36	16,74
Valor máximo admisible		400	8,5	30

Los resultados indican que los valores medidos en los tanques cumplen con los valores máximos admisibles de la normativa. Pese a esto, el reglamento indica un pH de 6,5 como valor recomendado por lo que se debe mantener un seguimiento continuo para asegurar que sitios como el tanque Chico Orozco no presenten valores todavía menores que puedan afectar la calidad del agua potable.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

Las conclusiones principales que se obtuvieron al realizar este proyecto son:

- La deficiencia de información sobre el manejo del acueducto es significativa, ya que el municipio no contaba formalmente con un catastro georreferenciado de infraestructura de sus redes, componentes hidráulicos ni de sus servicios. La poca información recabada sobre las redes se encontraba desactualizada y carecía de atributos como material, diámetro, profundidad y SDR. Tampoco se mantiene un registro de parámetros operacionales como presión, caudal, frecuencia de roturas o consumo. Todas estas deficiencias conllevan a un retraso en el desarrollo de acciones de optimización del acueducto como la implementación de balances hídricos, estudios de la disponibilidad futura, la demanda o la determinación de pérdidas.
- Los clientes reproductivos del acueducto de Pacayas representan tan solo el 17,5% del total, sin embargo, su consumo total corresponde a unos 3 170 m³/día, que equivale a un 67,5% del volumen total demandado. Por lo tanto, se determinó que el comportamiento hidráulico del acueducto se encuentra regido por el consumo reproductivo.
- Solamente uno de los tanques (El Descanso) que conforman el sistema de agua potable de Pacayas se encuentra adecuadamente dimensionado según la norma técnica de diseño del AyA. Los restantes 11 reservorios no cumplen adecuadamente con los volúmenes de regulación, reserva por interrupciones e incendios. Se destaca la necesidad de reestructuración de los tanques pues no cuentan con sistemas para el desfogue de fondo, by-pass o control de nivel.
- Aproximadamente el 79% de los diámetros que conforman la red de distribución y conducción tienen un diámetro inferior a los 75 mm. Esto dificulta la incorporación de hidrantes que cumplan con la normativa nacional del Benemérito Cuerpo de Bomberos. Además, estos diámetros tan reducidos son causantes de altas velocidades y caídas de presión importantes en la red de distribución.
- El acueducto únicamente cuenta con 6 válvulas reductoras de presión, de diámetros inferiores a los 50 mm. Se comprobó que su ubicación no resulta adecuada para la gestión de las cargas de presión, además de no ser suficientes para todo el sistema. Se

determinó que la metodología utilizada por la Municipalidad para la instalación de dichas válvulas no es adecuada, pues en su mayoría se encontraban enterradas bajo material asfáltico o suelo.

- Las pruebas iniciales para el desarrollo del modelo hidráulico del acueducto denotaron que los pequeños diámetros, grandes pendientes y altas velocidades dentro de la red de distribución no permitieron la agrupación de diferentes servicios en nodos de consumo. Se determinó que la sensibilidad del modelo ante variaciones en el consumo hace necesario un detallado profundo de los nodos individuales para cada servicio.
- La medición de la curva de consumo comprobó que la mayor solicitud ocurre el sábado, entre 1 y 4 pm. Este fenómeno se produce por los hábitos de lavado de autos, limpieza de las bateas de los vehículos y lavado de productos sobrantes al finalizar la jornada de trabajo de la Feria del Agricultor, actividad de venta de productos agrícolas abierta al público comúnmente realizada a lo largo del país.
- Por medio de la modelación se determinó que, de un total de 13 zonas de presión estudiadas, 11 de ellas sobrepasan la presión estática máxima de 70 mca determinada por el reglamento de AyA. Igualmente, estas 11 zonas de presión poseen más de un 60% de sus redes corresponden a diámetros menores a 50 mm. Por otra parte, solo para cinco de los ocho escenarios modelados, la velocidad máxima en tuberías de distribución sobrepasa los 3 m/s únicamente en la zona de presión del Tanque La Vuelta. Finalmente, todos los escenarios modelados mostraron que la velocidad en líneas de conducción excede los 5 m/s determinados por la normativa de diseño de AyA.
- En ninguno de los escenarios planteados la demanda total supera la producción media de las nacientes captadas. Por lo tanto, se descarta la hipótesis de que los servicios reproductivos y grandes clientes deberían desligarse del acueducto pues no existiría un conflicto entre los usos del agua en búsqueda de la priorización del consumo humano.
- El volumen desperdiciado, que supera la capacidad de almacenamiento actual de los tanques del acueducto, representaría un 30% de la producción total diaria para los escenarios donde se introduce la micromedición. Por esta razón las acciones para mejorar el control de nivel en los tanques, la detección de pérdidas, la creación de estructuras de rebalses en tanques y captaciones, cobran una gran importancia.

- Dentro del Plan de Acción se destaca, en el corto plazo, la aplicación de medidas comerciales y operacionales, sin la inclusión de medidas de actualización de infraestructura, pues se considera necesaria la correcta planificación de las bases de datos, de protocolos de mantenimiento y actualización, antes de la fuerte inversión en construcción y equipos. Para el mediano plazo se incorporan 63 mejoras en infraestructura, acompañadas de pocas muy pocas medidas operacionales y comerciales. En el largo plazo se mantienen 11 acciones de mantenimiento de infraestructura y una mayor importancia en las recomendaciones operacionales, como medidas que pretenden alargar la vida útil de los equipos, infraestructura y la introducción de tecnologías avanzadas y costosas. Finalmente, hasta el año 2050 se cuenta con 112 acciones por cumplir.
- Se demostró que, para el largo plazo, las medidas aplicadas generarían una disminución promedio de la presión máxima en un 40,5% dentro de las 13 zonas de abastecimiento del sistema.
- La cloración se realiza en 12 de las 13 zonas de presión del acueducto mediante cloradores, desarrollados por el personal de la municipalidad, que utilizan pastillas de hipoclorito de calcio. Las muestras de cloro residual libre y cloro residual combinado, recolectadas en 11 puntos distribuidos en todo el sistema, determinaron que solamente dos de los sitios cumplieron los umbrales mínimos definidos por la normativa del Ministerio de Salud de Costa Rica. En cuanto a los parámetros de conductividad, pH y temperatura todos los tanques de almacenamiento muestreados cumplieron a cabalidad.
- El Plan de Seguridad del Agua determinó que la mayor vulnerabilidad del acueducto se encuentra en los aspectos de infraestructura y operación, que fueron catalogados con vulnerabilidad alta. Los riesgos más significativos, catalogados como severos, fueron asociados con la calidad del agua como la contaminación por actividades agrícolas y la deficiencia de cloro residual en la red de distribución. Asimismo, en el aspecto administrativo destaca la poca o nula capacidad de la Municipalidad para atender los posibles desastres y el desabastecimiento de materiales para reparar los daños causados. Para la gestión de estos riesgos se plantearon medidas como el mejoramiento del sistema de cloración, su calibración y el control de los parámetros de calidad.

8.2.Recomendaciones

Las recomendaciones que surgen del desarrollo de este proyecto se agrupan en los ámbitos de gestión comercial, operacional y administrativa:

A. Gestión comercial

A.1.Recurrir a empresas desarrolladoras de software especializado para el manejo de las bases de datos de prestadores del servicio de agua potable. Este tipo de software unifica el control de lecturas, el cobro del servicio, la generación de órdenes de reparación o atención al usuario, el mantenimiento del parque de hidrómetros, la facturación e incluso el cálculo de indicadores de gestión comercial.

Sería ideal velar porque el software a adquirir cuente, al menos, con los parámetros definidos en las secciones 2.2.2.3 y 2.2.2.4.

A.2.Promover el uso de software libre referente a sistemas de información geográfica en la Municipalidad, no solo en el departamento del acueducto sino también en el departamento de catastro de la propiedad. Se debe capacitar al personal su utilización y ejercer presión, a nivel del Concejo Municipal, para estandarizar y unificar la información geográfica y su utilización. Se recomienda recurrir a una muy buena alternativa de software libre como lo es QGis.

A.3.Incentivar en el personal del departamento el uso de programas de modelación hidráulica como Epanet mediante la capacitación, presentación de las bondades y herramientas que ofrece este software. Se debe recalcar la importancia que los modelos hidráulicos calibrados poseen en la toma de decisiones en la actualidad y la predicción del comportamiento del acueducto ante escenarios futuros.

B. Gestión operacional

B.1.Realizar un seguimiento adecuado a las labores de las cuadrillas, con el fin de establecer un control de calidad que fomente las buenas prácticas. Una de las medidas podría ser un control a distancia mediante la solicitud de informes de reparación y evidencias fotográficas a los funcionarios de campo, sin embargo, se considera más adecuado el seguimiento presencial aleatorio en las labores, con una frecuencia semanal.

B.2.Promover la capacitación constante del personal en temas como válvulas hidráulicas, sistemas de medición de presiones, medidores de caudal, etc. Diferentes proveedores

de este tipo de accesorios y equipos constantemente realizan charlas y presentaciones didácticas de las soluciones que ofrecen. Introducir al personal del acueducto en este tipo de capacitaciones permitiría el crecimiento técnico y profesional del personal, además de otorgar valor a las labores de estos funcionarios.

C. Gestión administrativa

- C.1.** Desarrollar campañas de información a la población sobre los cambios que se realizarán en la infraestructura del acueducto, con el fin de que se genere un entendimiento de la población y una concientización de las arduas labores que conllevan brindar el servicio de agua potable. Además, se considera necesaria la concientización de la población con respecto al consumo eficiente del recurso hídrico.
- C.2.** Demostrar a los directivos municipales, por medio del desarrollo de un plan de inversión detallado, la necesidad de actualización que tiene el acueducto y así se destine una parte importante de la partida presupuestaria al mejoramiento del sistema. En este plan se deberá incluir un análisis financiero y un análisis de costo-beneficio que involucre la gran cantidad de beneficios indirectos del proyecto.
- C.3.** Desarrollar alianzas con el Ministerio de Agricultura y Ganadería, el Cuerpo de Bomberos y demás entes del distrito para fortalecer las acciones de protección al recurso hídrico. Estas entidades deberían involucrarse como participantes activos de la actualización del Plan de Seguridad del Agua una vez que sea aplicado por la Municipalidad. Además, la relación cercana con estas instituciones permitiría la obtención importante de información geográfica, dado que sus labores usualmente modifican o se relacionan con la prestación del servicio del agua potable.
- C.4.** Promover el desarrollo de proyectos de graduación similares al realizado en este proyecto para abarcar aquellas zonas del sistema total de Pacayas que se dejaron fuera de estudio, o para el sistema de Capellades que se encuentra igualmente bajo la administración de la Municipalidad de Alvarado. Diferentes disciplinas como la geografía, topografía, ingeniería ambiental, ingeniería civil, ingeniería agrícola o administradores públicos podrían desarrollar sus proyectos universitarios y favorecer de gran manera la gestión municipal.

Bibliografía

- Amador, C. (2016). Evaluación hidráulica y propuestas de mejora al sistema de abastecimiento de agua potable de Frailes y Bustamante. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- American Society for Testing and Materials Internacional. (2015). *ASTM D2241-15: Standard Specification for Poly Vinyl Chloride (PVC) Pressure-Rated Pipe (SDR Series)*. Extraído el 21 de agosto, 2019 de la base de datos de SIBDI.
- Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP). (2008). *Norma Técnica: Hidrómetros para el Servicio de Acueducto*.
- Ballesteros, M. (2013). *Agenda del Agua de Costa Rica*. Costa Rica.
- Chow, V. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGRAW-HILL.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2019a). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Sistemas de Medición del Agua: Producción, Operación y Consumo*. México.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2019b). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Conducciones*. México.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2019c). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable*. México.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2019d). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Distribución*. México.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2019e). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Mejora de Eficiencia Comercial. Distribución*. México.

Comisión Nacional de Emergencias (CNE). (2006). Informe de Amenazas de origen Natural del Cantón de Alvarado. Tomado de https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenzas/mapas_de_amaneza/cartago/Alvarado%20-%20descripcion%20de%20amenazas.pdf

Contraloría General de la República. (2016). Informe acerca del servicio de abastecimiento de agua potable brindado por los acueductos municipales de la provincia de Cartago. (Informe N.º DFOE-DL-IF-00009-2016). Recuperado de http://www.munialvarado.go.cr/images/adjuntos/02_Informe_auditoria_operativa_DFOE_DL_IF_00009_2016.pdf

Corcho, F. & Duque, J. I. (1993). *Acueductos teoría y diseño*. Medellín: Universidad de Medellín.

Dorot (2019). Seminario: Válvulas de control hidráulico y válvulas de aire. [Notas del Seminario] San José, Costa Rica.

Decreto N° 32327-S (2005). Reglamento para la Calidad del Agua Potable, Diario Oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 3 de mayo del 2005.

Fair, G.; Geyer, J. & Okun, D. (1995). *Abastecimiento de agua y remoción de aguas residuales*. México D.F: Editorial Limusa.

Fournier, M.; Ramírez, F.; Rupert, C.; Vargas, S. & Echeverría, S. (2010). *Agroquímicos en ecosistemas hortícolas y pecuarios en la microcuenca de las quebradas Plantón y Pacayas en Cartago, Costa Rica*. Heredia: Universidad Nacional.

GIZ & VAG (2010). Guía para la Reducción de las pérdidas de agua. Eschborn: Alemania.

Gómez, O. (2004). Estudio detallado de suelos de la microcuenca Plantón-Pacayas, pacayas de Alvarado, Cartago. San José, Costa Rica.

HACH & LANGE. (2014). *Curvas de Cloro y Cloromidación*. [YouTube]. Tomado de <https://youtu.be/Jtbi-tr3D4Q>

Instituto de Acueductos y Alcantarillados de Costa Rica (AyA). (2017). *Norma Técnica para el Diseño y Construcción de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, de Saneamiento y Pluvial*. Tomado de <https://www.aya.go.cr/Noticias/Documents/Norma%20dise%C3%B1o%20y%20construccion%20sistemas%20agua,%20saneamiento%20y%20pluvial.pdf>

Instituto de Acueductos y Alcantarillados de Costa Rica. (AyA) & Ministerio Nacional de Ambiente y Energía (MINAE). (2020). *Gestión Integral de Riesgo en ASADAS (GIRA)*. Costa Rica.

Instituto Geográfico Nacional (IGN). (2020). *Servicios en línea* http://www.snitcr.go.cr/servicios_ogc_completo

Instituto Meteorológico Nacional (2004). *Manual Técnico del Departamento de Aguas*. San José, Costa Rica.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2000). *Censo Poblacional 2000*. Tomado de <https://www.inec.cr/censos/censos-2000>

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2011). *Censo Poblacional 2011*. Tomado de <https://www.inec.cr/censos/censos-2011>

Ley 276. (1942). *Ley de Aguas*, Diario Oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 28 de agosto de 1942.

Ley 8641. (2008). *Declaratoria del servicio de hidrantes como servicio público y reforma de leyes conexas*, Diario Oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 11 de junio de 2008.

López C. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. (2^{nda} ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Ministerio de Ambiente y Energía. (2004). *Manual Técnico del Departamento de Aguas*. Tomado de <http://www.dse.go.cr/es/02ServiciosInfo/Legislacion/PDF/Ambiente/Aguas/ManualTecnicoDpto.pdf>

- Monge, J. (2016). Diagnóstico de los acueductos Cot, Potrero Cerrado y San Juan de Chicué en la parte alta de la cuenca del río Reventazón. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Mora, S. (2011). Evaluación de las principales tecnologías utilizadas en Costa Rica para la desinfección del agua. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Organización Mundial de la Salud. (2009). Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua: Metodología pormenorizada de gestión de riesgos para proveedores de agua de consumo. Ginebra, Suiza.
- Organización Panamericana de la Salud. (2012). *Manual Simplificado para el Desarrollo de Planes de Seguridad del Agua*. Tomado de https://www.paho.org/hon/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=desarrollo-humano-sostenible-y-estilos-de-vida-sal&alias=333-manual-simplificado-para-el-desarrollo-de-planes-de-seguridad-del-agua-psa-parte-1&Itemid=211
- Serrano, S. (2017). Valoración de zonas de riesgo en Nacientes, Cantón de Alvarado.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de México (2015). Cultivos perennes, garantía de alimentación. México: *Portal oficial del Gobierno de México*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/cultivos-perennes-garantia-de-alimentacion>
- Tzatchkov, V.; Alcocer, V.; Bourguett, V. & Arreguin, F. (2014). Avances en la hidráulica de redes de distribución de agua potable. Morelos, México: IMTA.

Apéndice 1.

De acuerdo con la norma de diseño de AyA, el volumen de almacenamiento se debe calcular como la suma de:

- Volumen de regulación del consumo: Representa el 14% del volumen promedio diario.
- Volumen de reserva para incendios: Establecido por la ley 8641, que para una ocupación residencial horizontal el volumen mínimo de reserva es de 15 m³.
- Volumen de reserva por interrupciones: Correspondiente a un periodo de cuatro horas del caudal promedio diario.

A continuación, se muestra el ejemplo de cálculo para el tanque La Compostera:

$$\text{Población total} = \text{Factor de hacinamiento} * \text{Número de servicios}$$

$$\text{Población total} = 4,1 * 49 = 201 \text{ personas}$$

$$\text{Caudal promedio diario (QPD)} = \text{Dotación} * \text{Población total}$$

$$\text{QPD} = 200 \text{ lpd} * 201 \text{ personas} = 0,47 \text{ l/s}$$

$$\text{QPD real} = \frac{\text{QPD}}{(1 - \%ANC)}$$

$$\text{QPD real} = \frac{0,47 \text{ l/s}}{(1 - 10\%)} = 0,52 \text{ l/s}$$

$$\text{Volumen promedio diario (VPD)} = \text{QPD real} * \frac{86400 \text{ s}}{1000}$$

$$\text{VPD} = 0,52 \frac{\text{l}}{\text{s}} * \frac{86400 \text{ s}}{1000} = 44,6 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de regulación (VR)} = \text{VPD} * 14\%$$

$$\text{VR} = 44,6 \text{ m}^3 * 14\% = 6,3 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de reserva por interrupciones (VI)} = \text{QPD real} * \frac{3600 \text{ s} * 4 \text{ horas}}{1000}$$

$$\text{VI} = 0,52 \text{ l/s} * \frac{3600 \text{ s} * 4 \text{ horas}}{1000} = 7,4 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total} = \text{VI} + \text{VR} + V_{\text{reserva}} = 7,4 \text{ m}^3 + 6,3 \text{ m}^3 + 15,0 \text{ m}^3 = \mathbf{29,0 \text{ m}^3}$$

Anexo 1.

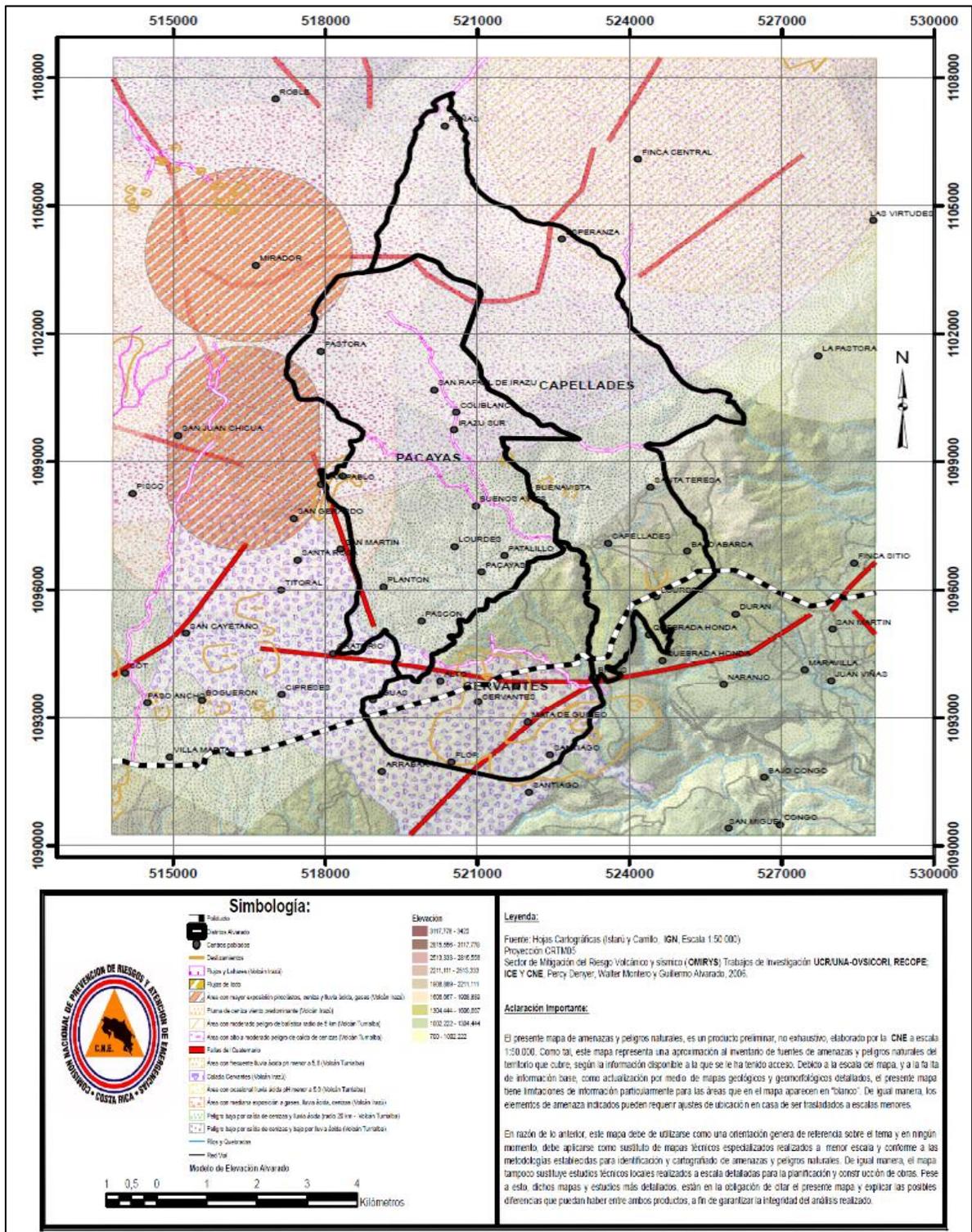


Figura 55. Mapa de amenazas y peligros naturales del cantón de Alvarado.

Fuente: CNE, 2006

Anexo 2.

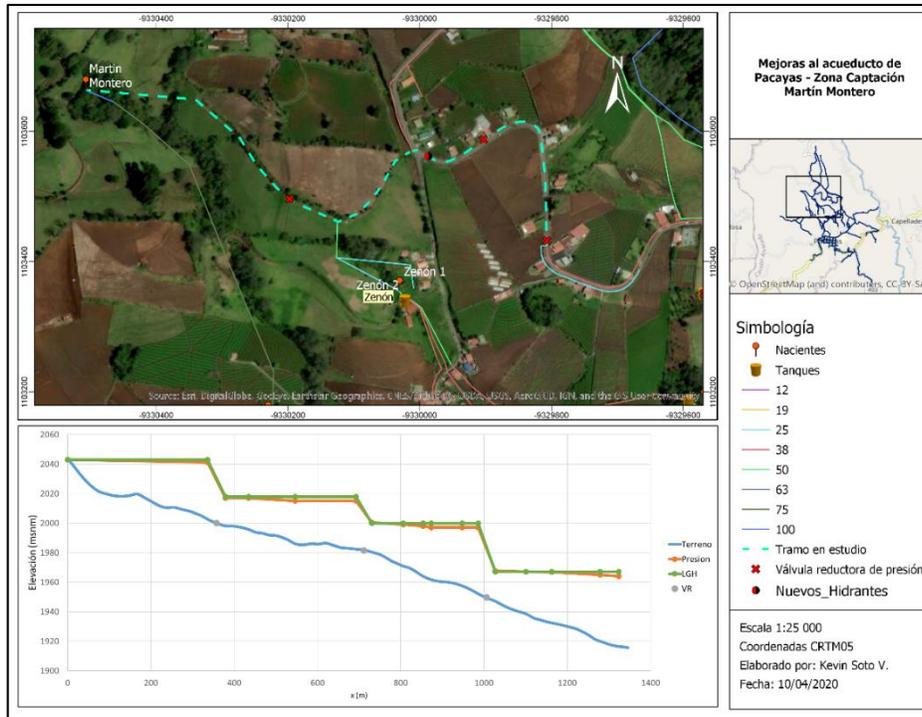


Figura 56. Mejoras 1, 2 y 3 para la zona Captación Martín Montero.

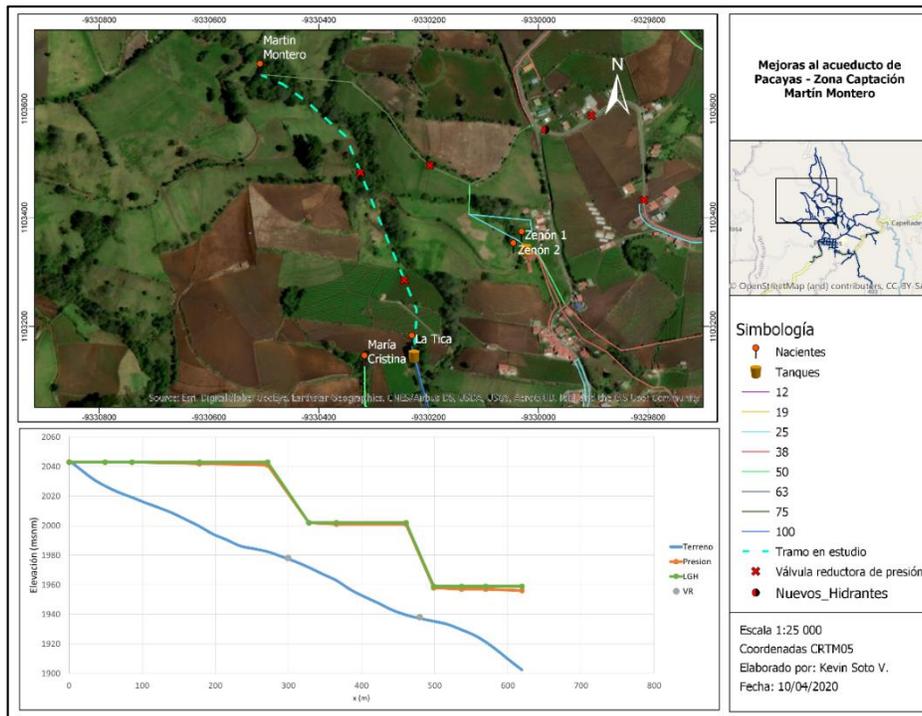


Figura 57. Mejora 5 para la zona Captación Martín Montero.

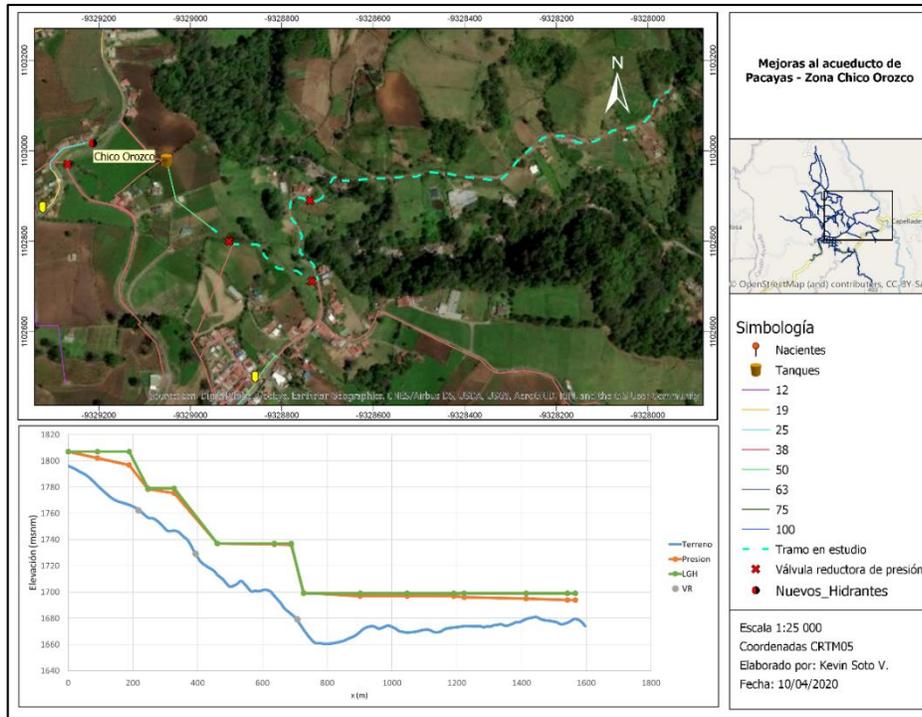


Figura 58. Mejoras 6 y 7 para la zona Tanque Chico Orozco



Figura 59. Mejoras 8 y 9 para la zona Tanque Chico Orozco

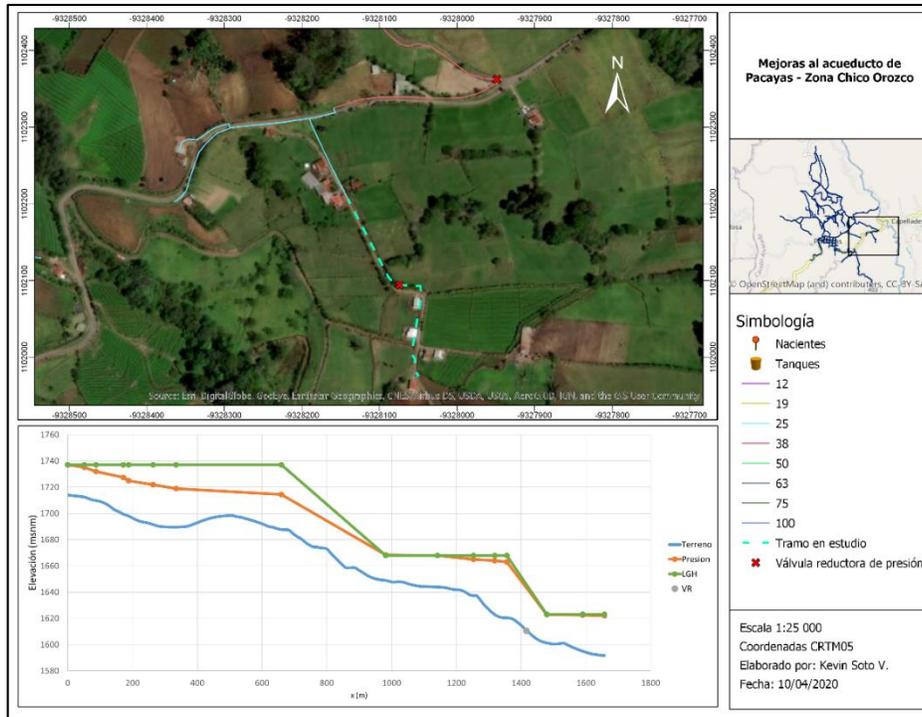


Figura 60. Mejoras 12 y 13 para la zona Tanque Chico Orozco.

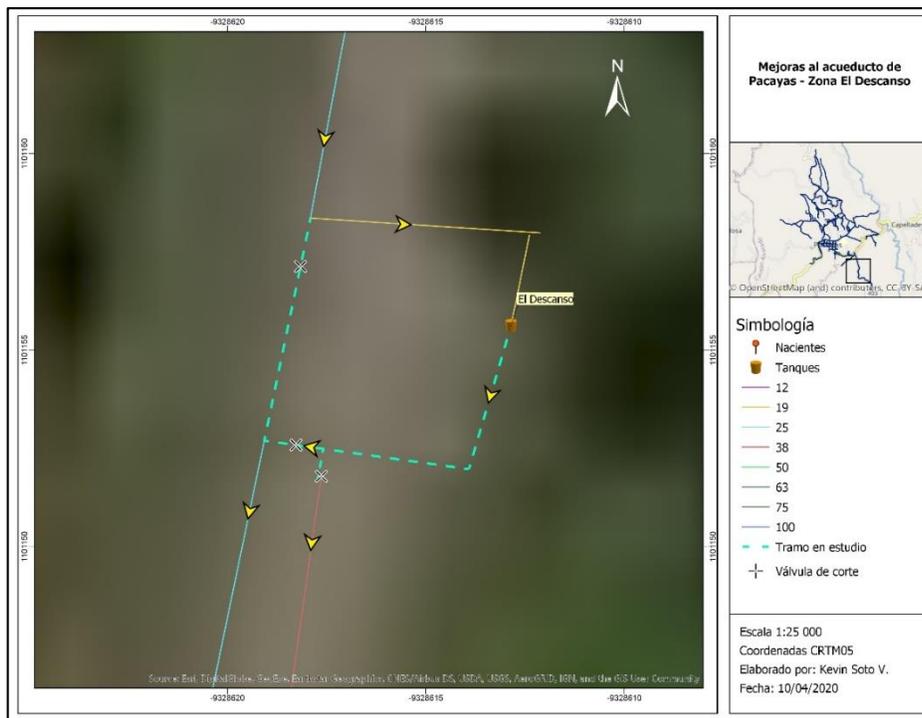


Figura 61. Mejoras 14 y 15 para la zona Tanque La Vuelta.

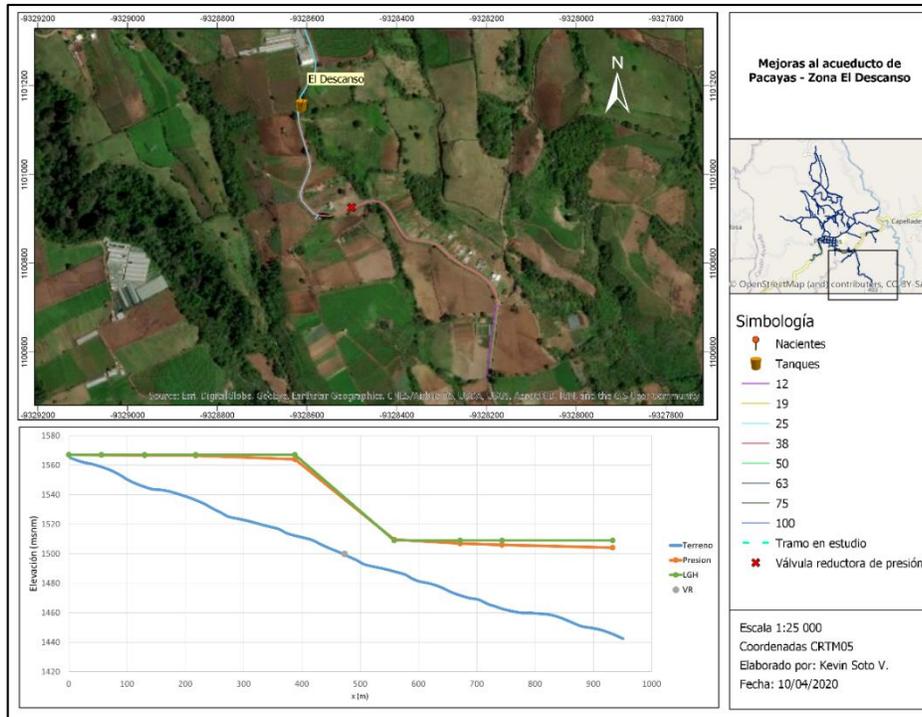


Figura 62. Mejora 16 para la zona Tanque El Descanso.



Figura 63. Mejora 19 para la zona Tanque La Compostera.



Figura 64. Mejora 20 para la zona Tanque La Compostera.

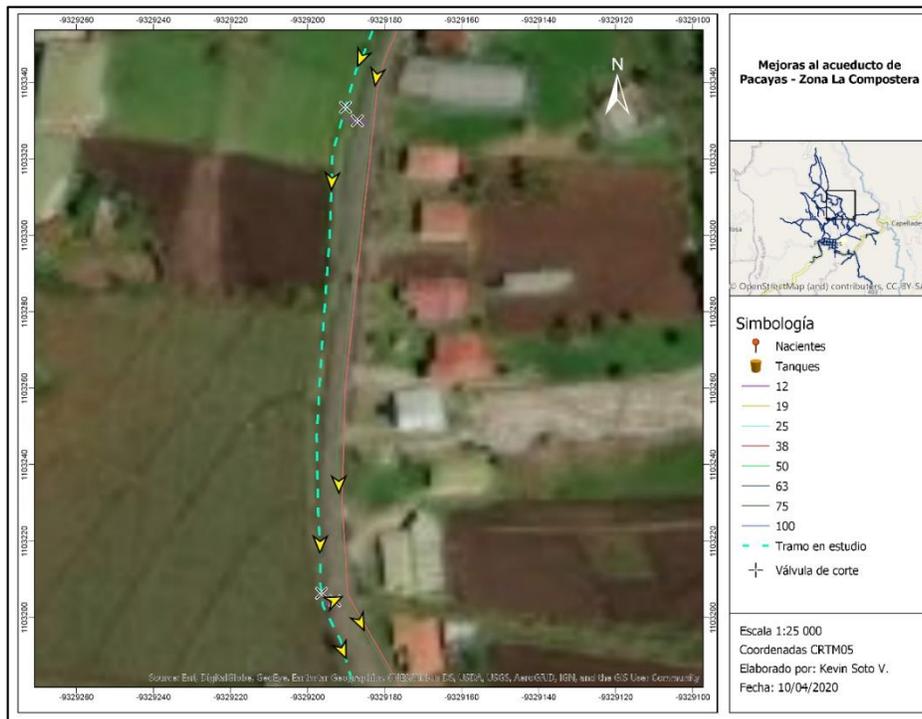


Figura 65. Mejora 21 para la zona Tanque La Compostera.

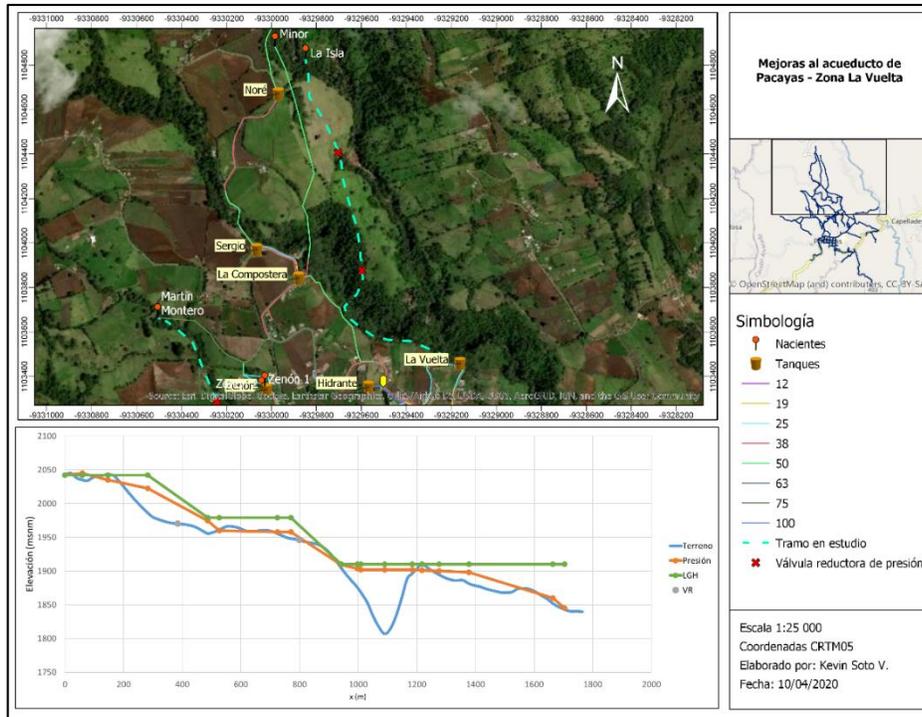


Figura 66. Mejora 22 para la zona Tanque La Vuelta.

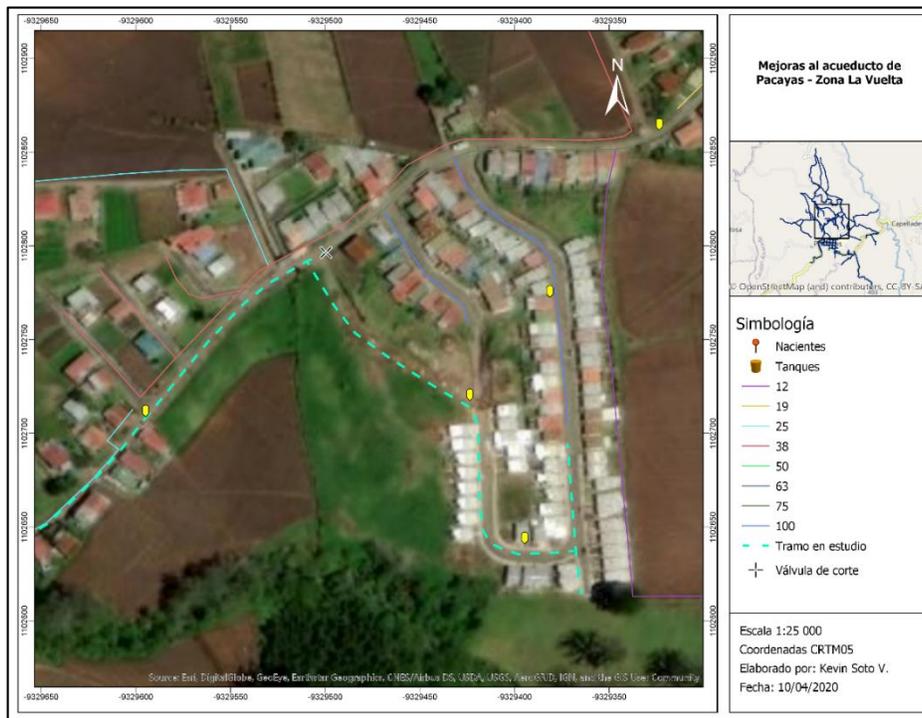


Figura 67. Mejora 23 para la zona Tanque La Vuelta.



Figura 68. Mejoras 24, 25 y 26 para la zona Tanque La Vuelta.

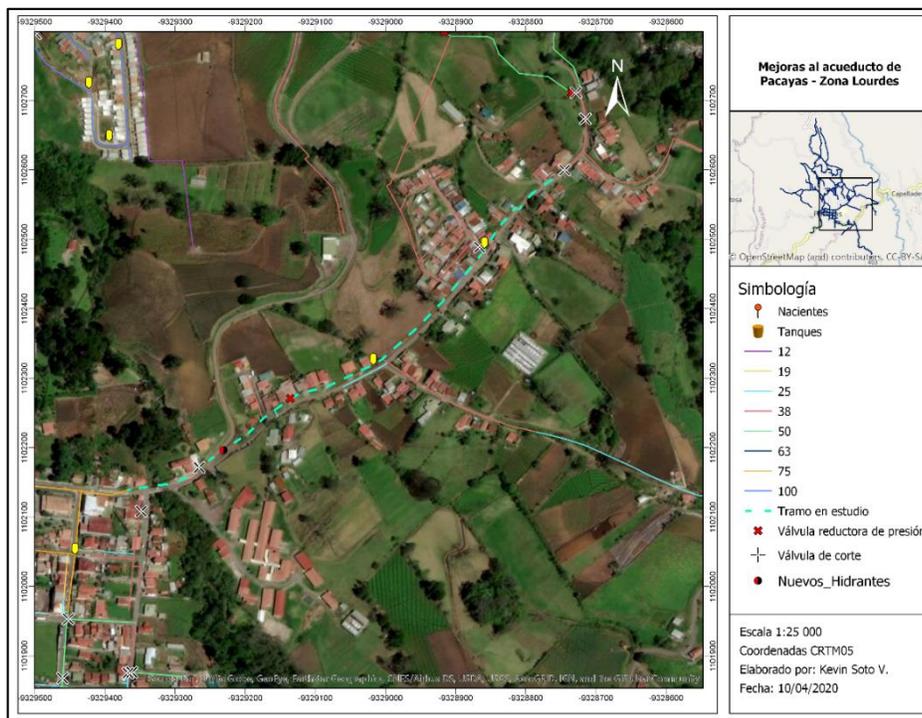


Figura 69. Mejoras 27 y 28 para la zona Tanque Lourdes.



Figura 70. Mejoras 29, 30 y 31 para la zona Tanque Lourdes.

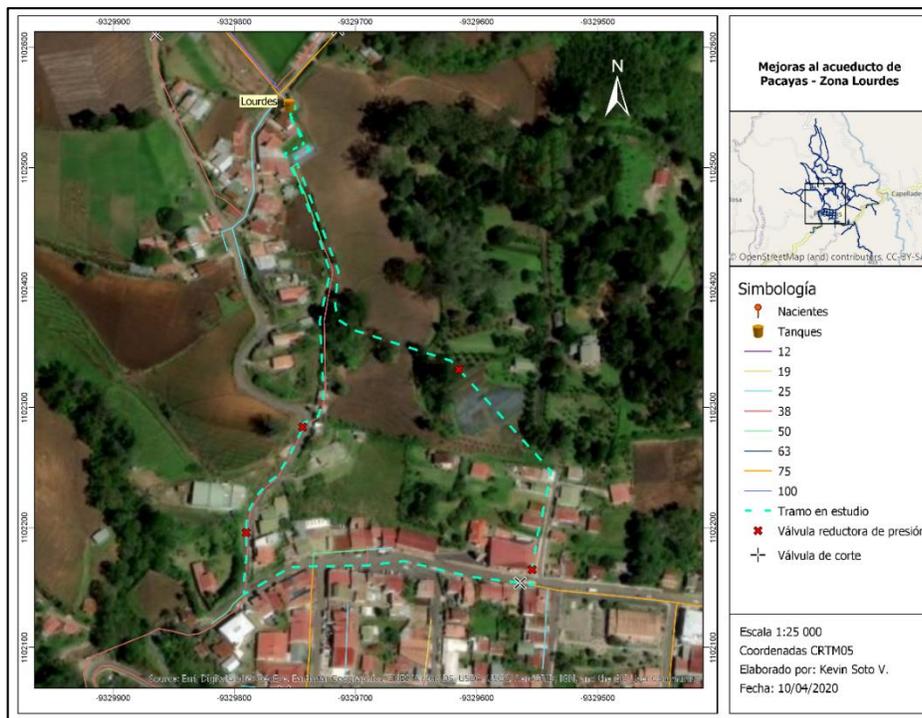


Figura 71. Mejoras 32 y 33 para la zona Tanque Lourdes.

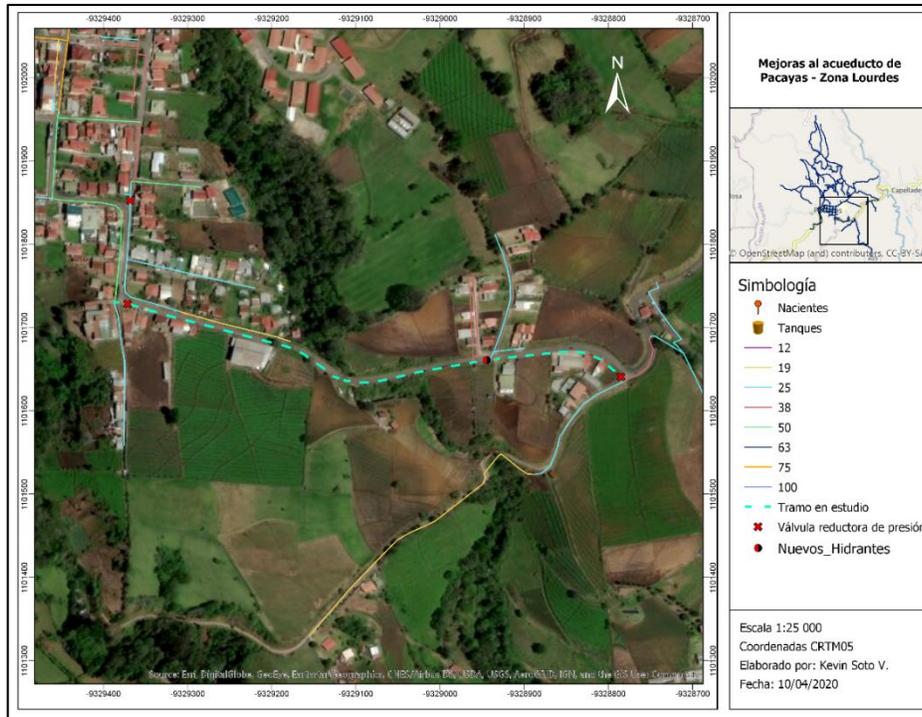


Figura 72. Mejoras 34, 35 y 36 para la zona Tanque Lourdes.

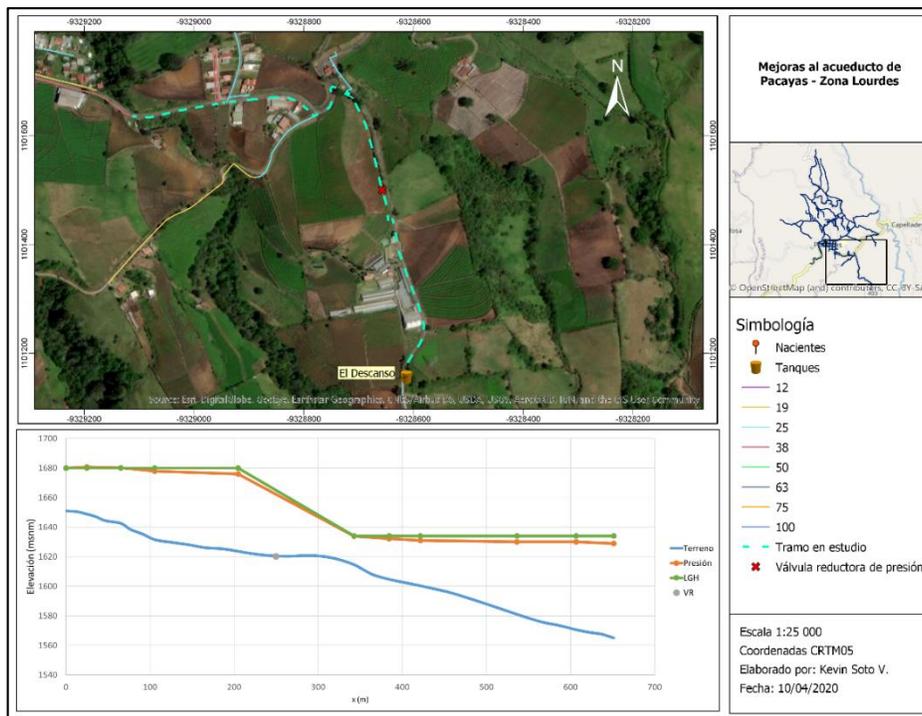


Figura 73. Mejora 37 para la zona Tanque Lourdes.

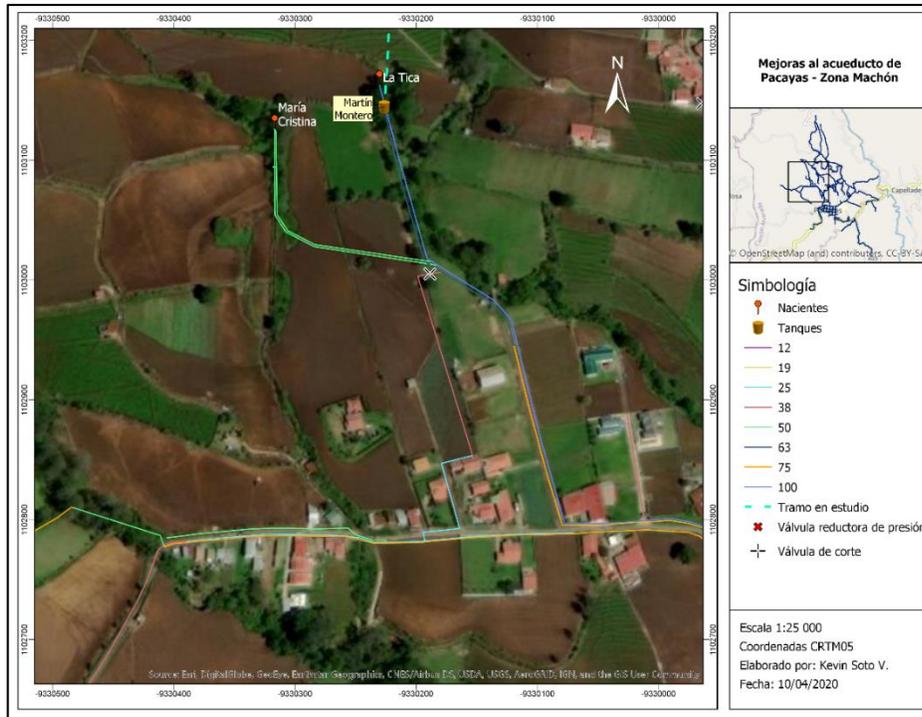


Figura 74. Mejora 38 para la zona Tanque Machón.

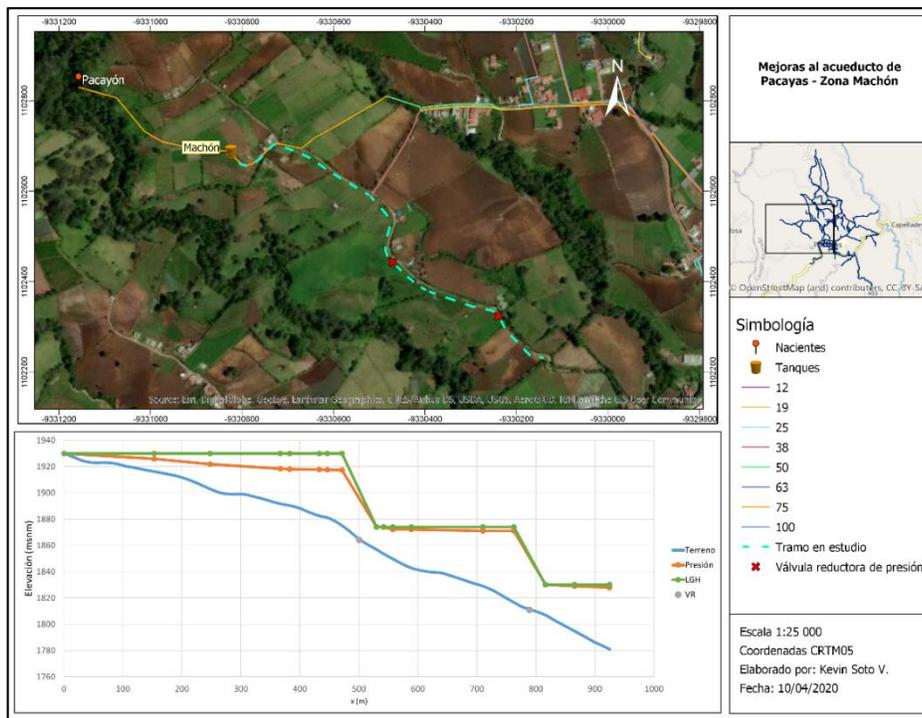


Figura 75. Mejoras 39 y 40 para la zona Tanque Machón.

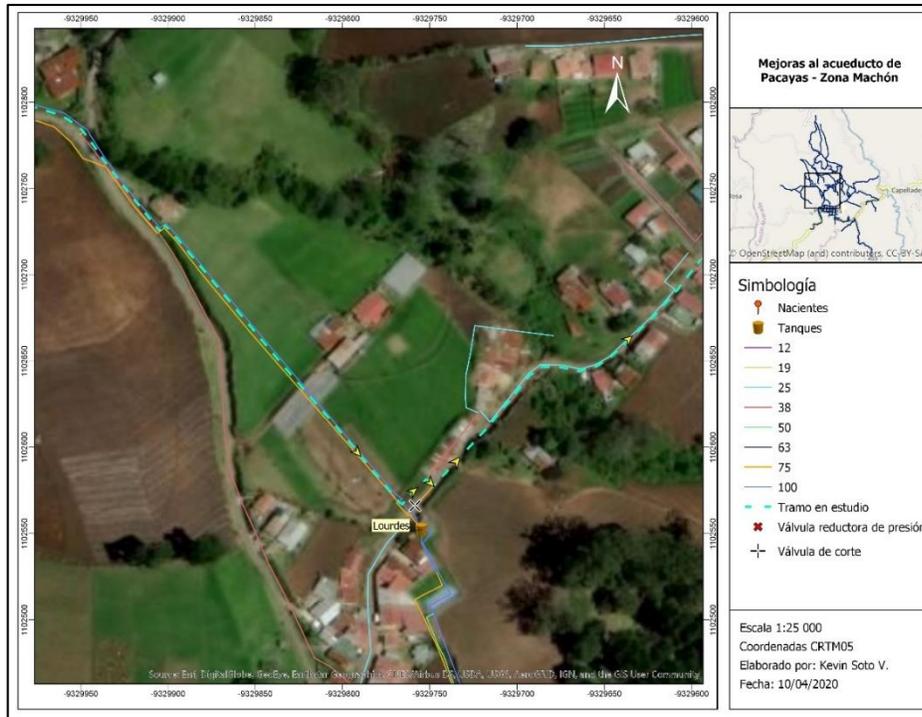


Figura 76. Mejora 41 para la zona Tanque Machón.

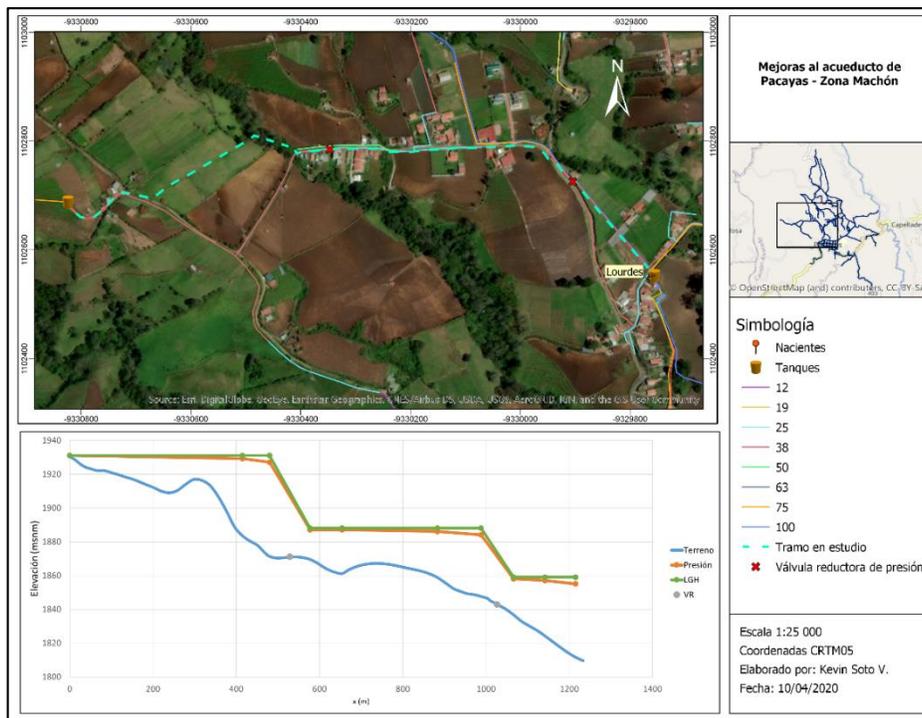


Figura 77. Mejora 42 para la zona Tanque Machón.

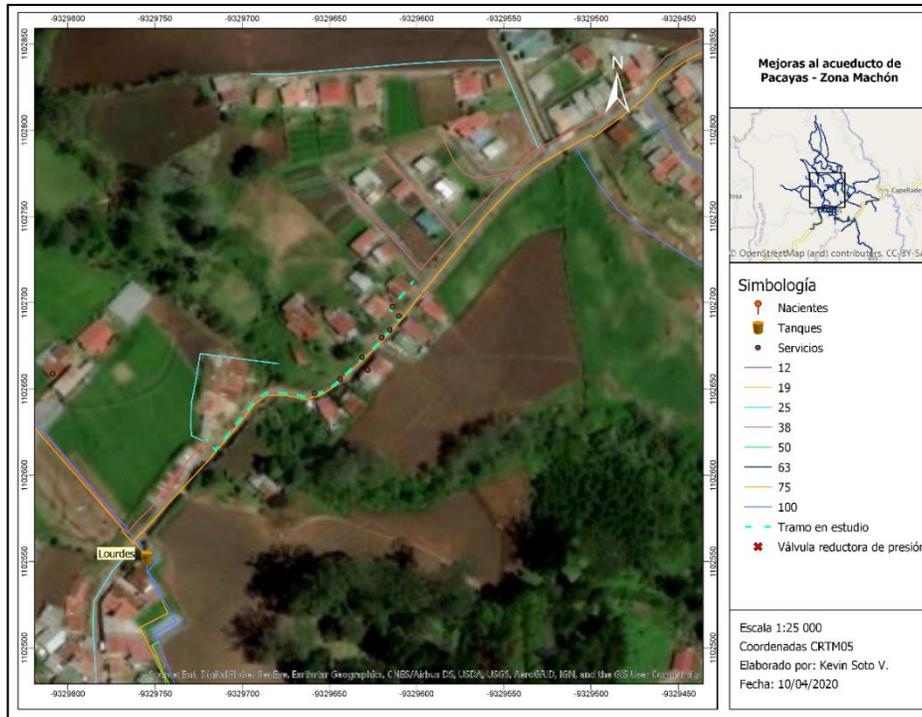


Figura 78. Mejora 43 para la zona Tanque Martín Montero.



Figura 79. Mejoras 44 y 45 para la zona Tanque Martín Montero.

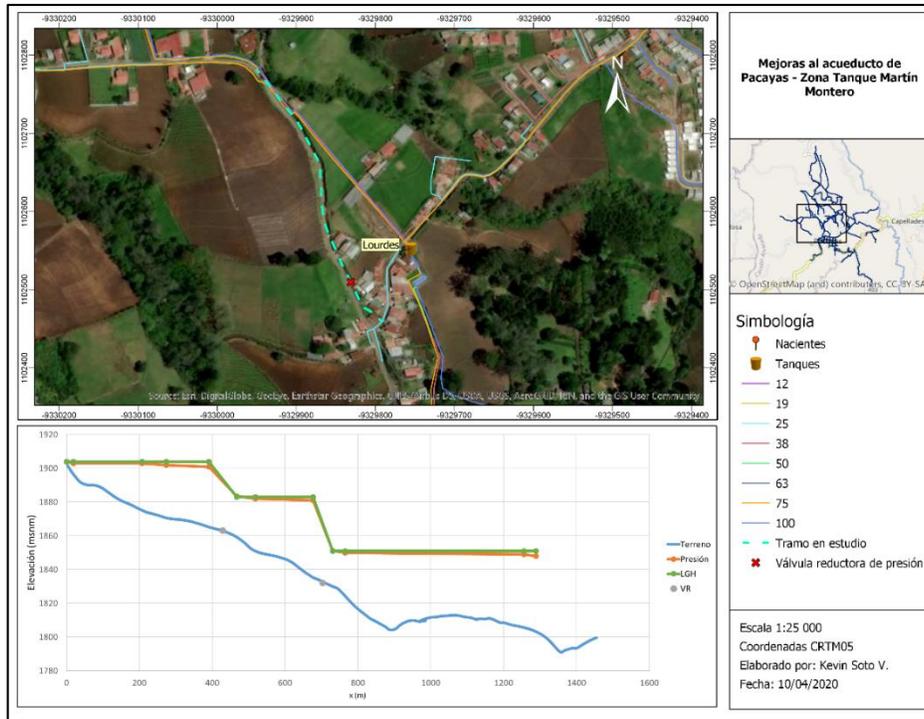


Figura 80. Mejora 46 para la zona Tanque Martín Montero.

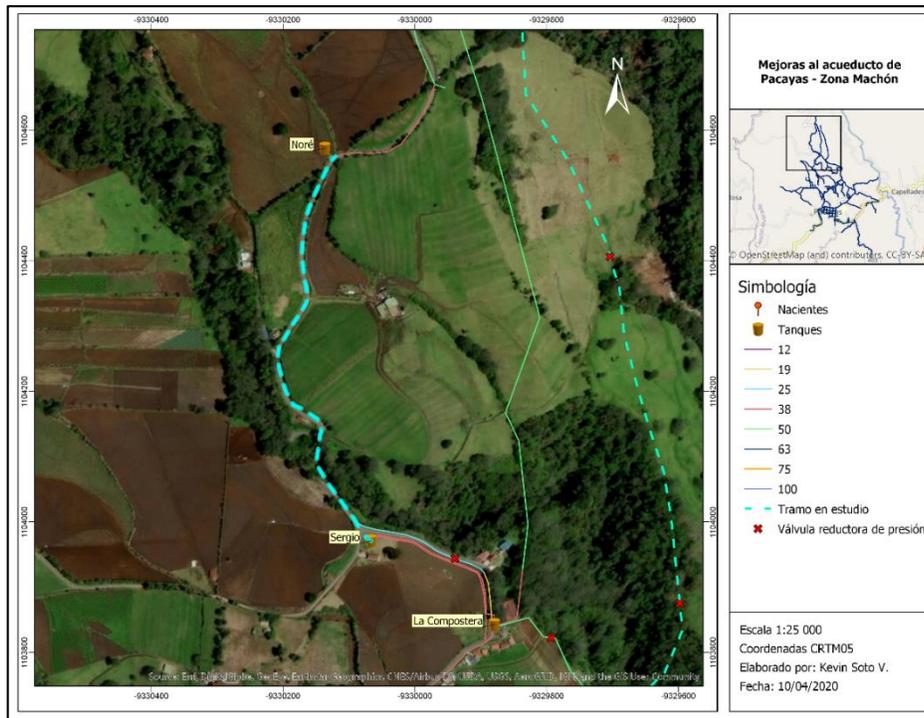


Figura 81. Mejoras 47 y 48 para la zona Tanque Noré.



Figura 82. Mejoras 52, 53 y 54 para la zona Tanque Sergio.

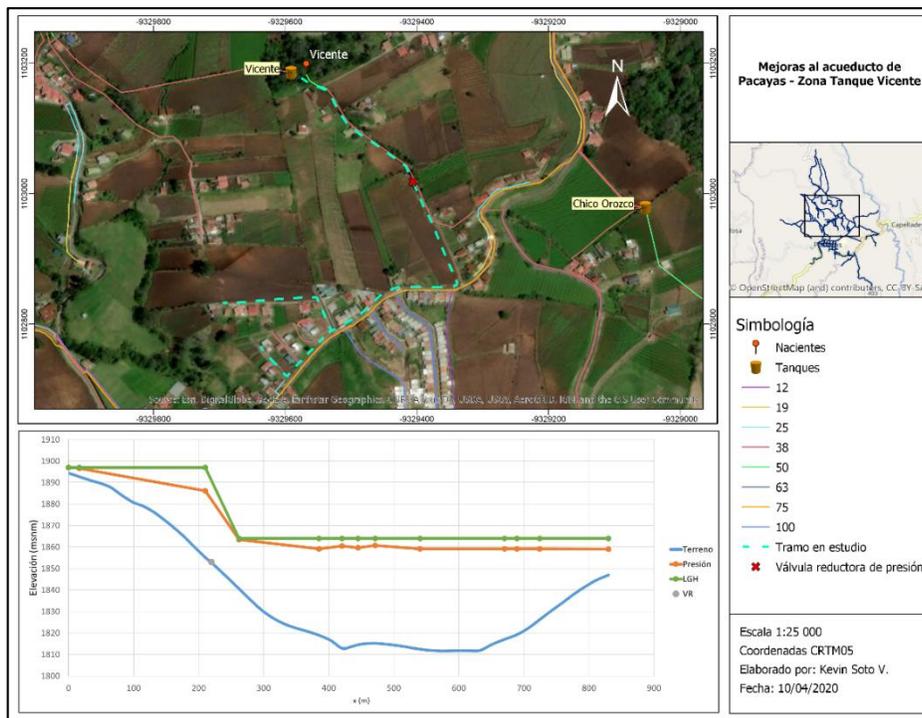


Figura 83. Mejora 55 para la zona Tanque Vicente Serrano.

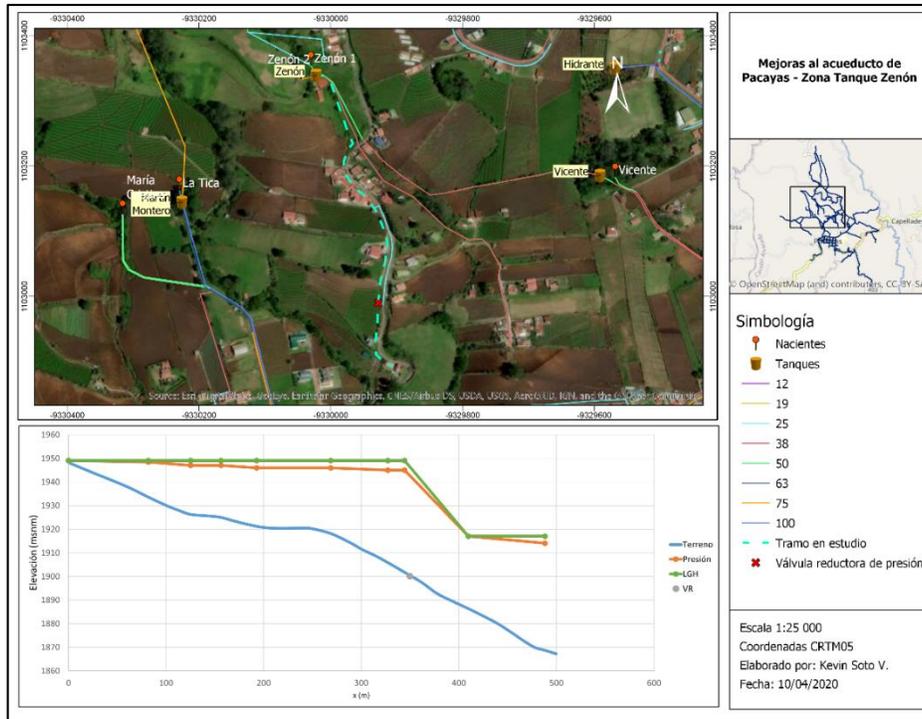


Figura 84. Mejoras 56, 57 y 58 para la zona Tanque Zenón.



Figura 85. Mejora 59 para la zona Tanque Zenón.

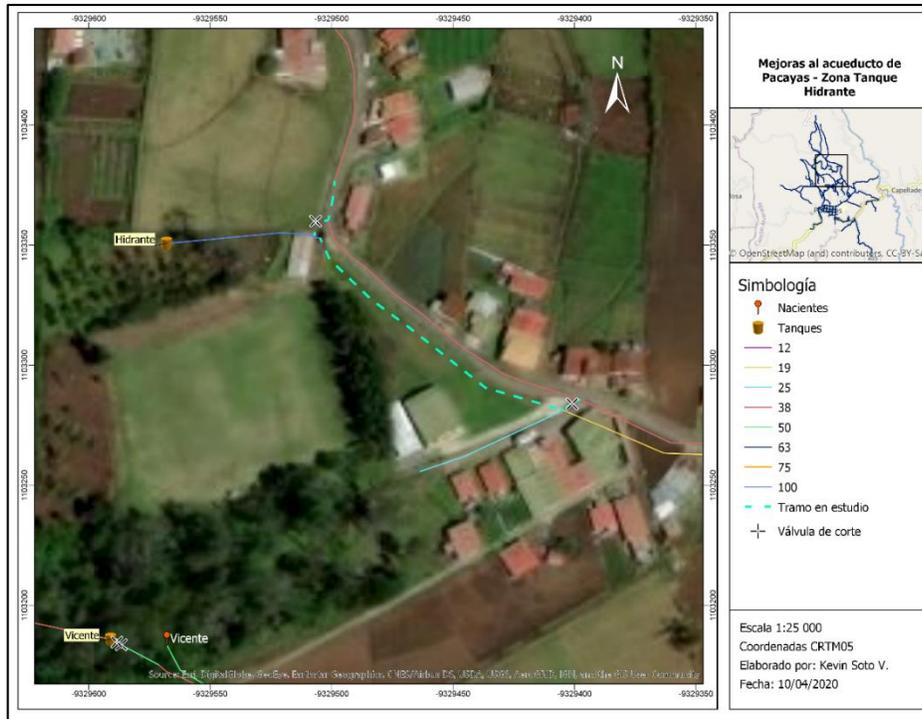


Figura 86. Mejora 60 para la zona Tanque Hidrante.

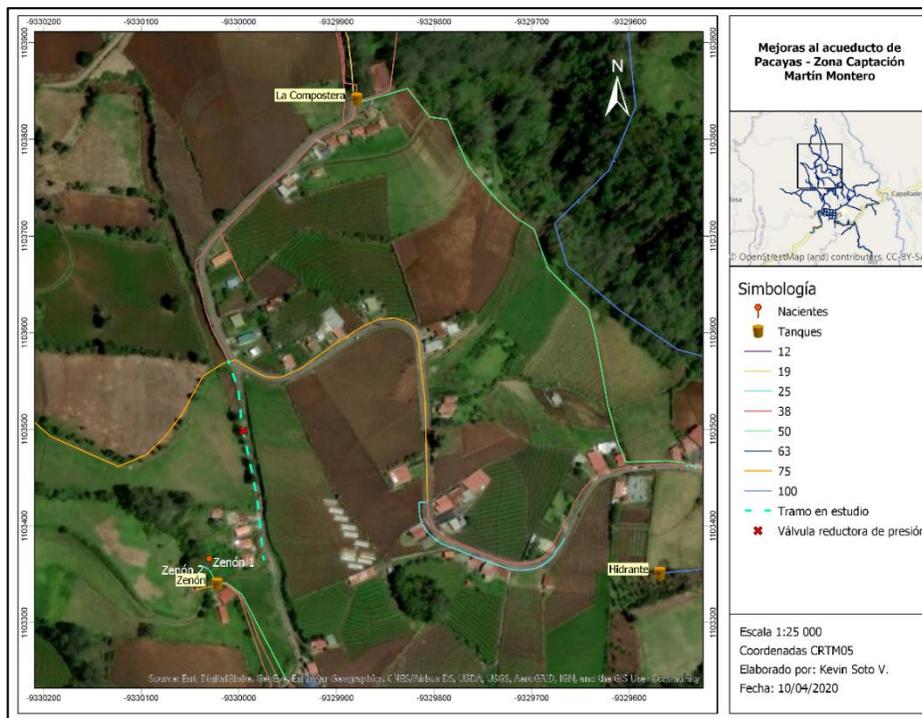


Figura 87. Mejoras 61 y 62 para la zona Captación Martín Montero al largo plazo.

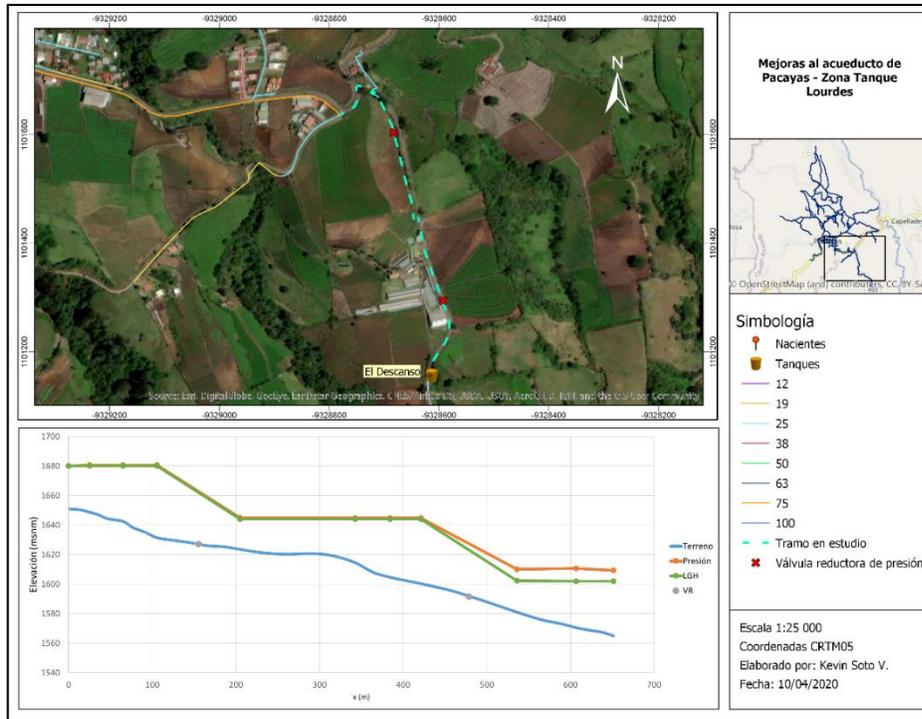


Figura 88. Mejoras 65 y 66 para la zona Tanque Lourdes al largo plazo.

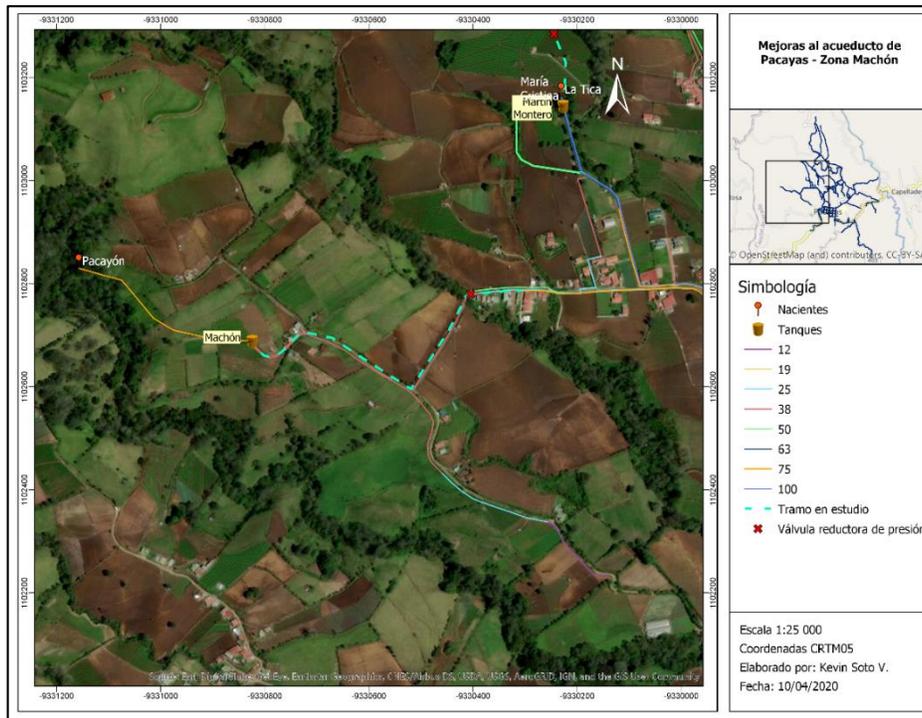


Figura 89. Mejoras 67, 68 y 69 para la zona Tanque Machón al largo plazo.

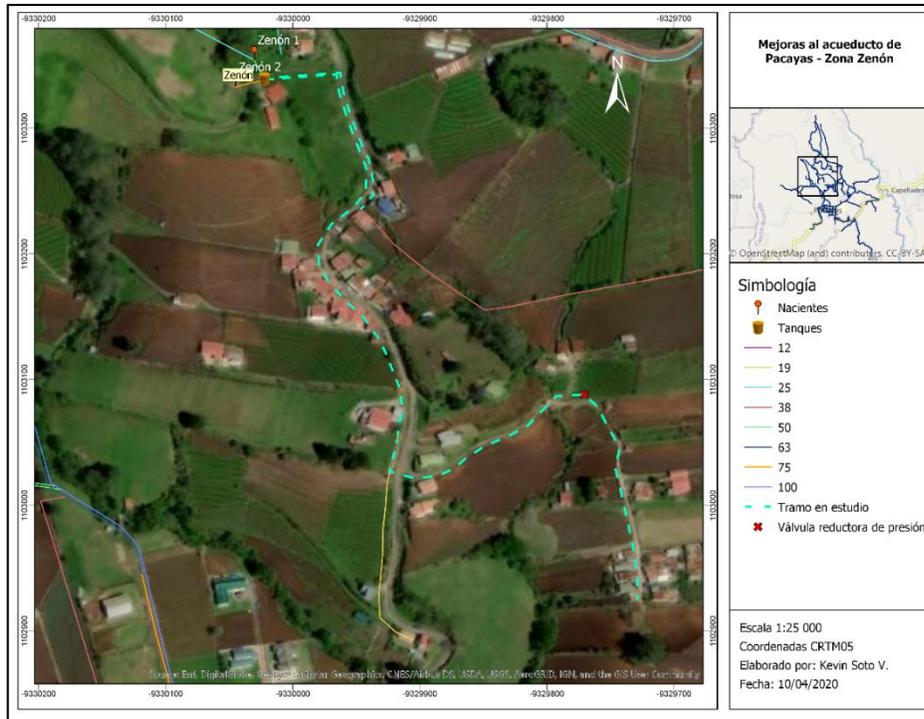


Figura 90. Mejoras 70, 71, 72 y 73 para la zona Tanque Zenón al largo plazo.

Anexo 3.

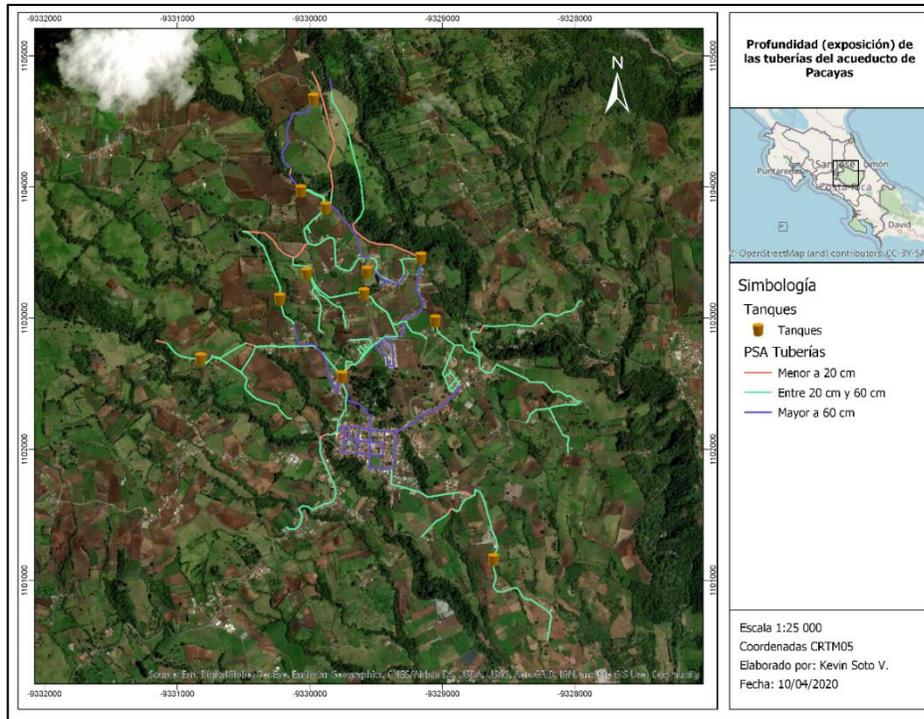


Figura 91. Profundidad (exposición) de las tuberías del acueducto.

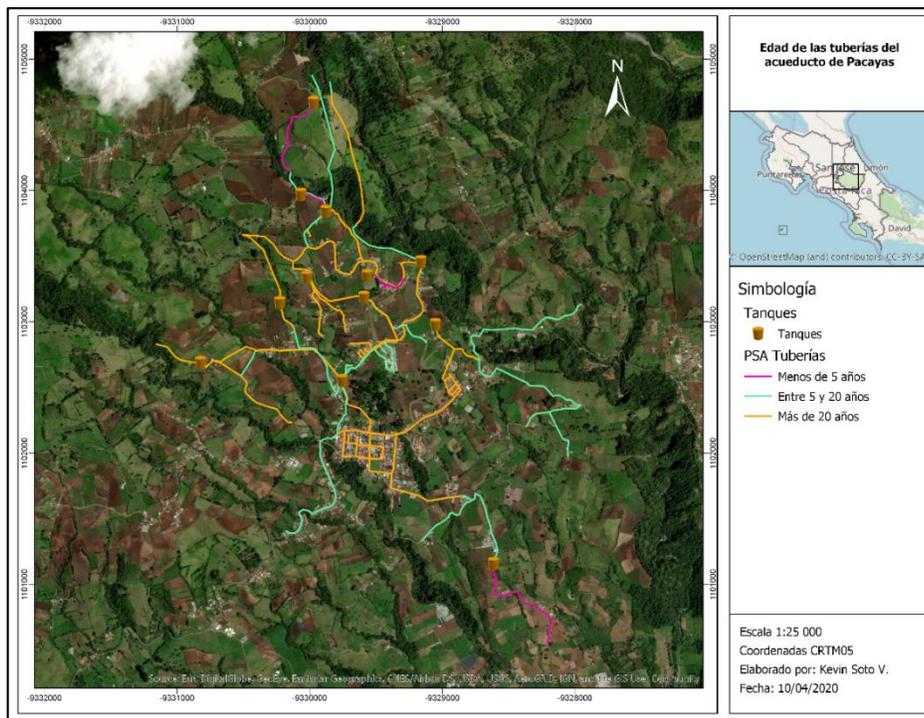


Figura 92. Edad de las tuberías del acueducto.

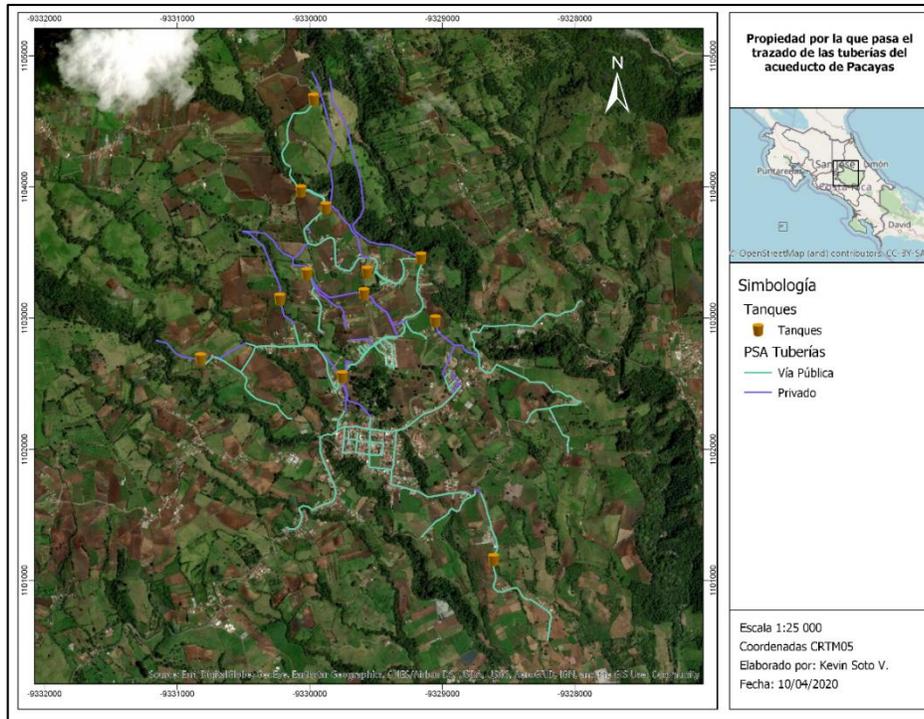


Figura 93. Propiedad por las que pasa el trazado de las tuberías del acueducto.

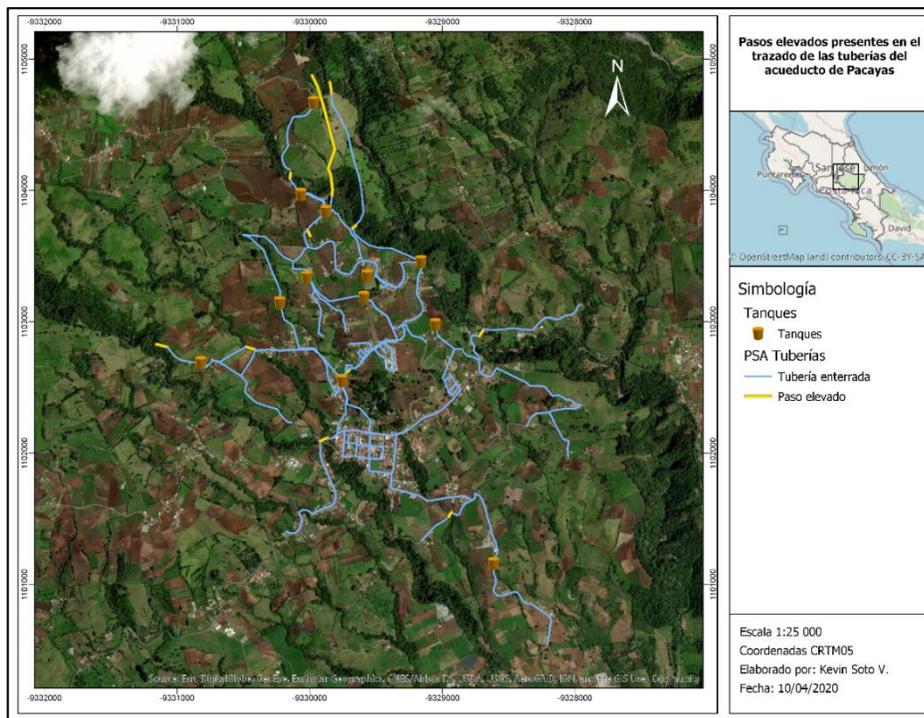


Figura 94. Pasos elevados presentes en el trazado de las tuberías del acueducto.