Evaluación de los escenarios de amenaza y riesgo del Sistema de Acueducto del Municipio de Mistrató, Risaralda

Assessment of Threat and Risk Scenarios for the Aqueduct System of the Municipality of Mistrato, Risaralda

David Ocampo Méndez[1], Alejandro Alzate Buitrago[2]

Resumen

La prestación de los servicios públicos domiciliarios se constituye en uno de los elementos sustanciales de la planificación territorial y de la gestión del riesgo de desastres. A partir de dicha consideración y en virtud de los impactos y efectos sobre los grupos poblacionales y el desarrollo local, que generaría la suspensión temporal o definitiva de la prestación del servicio de acueducto, los gobiernos locales y regionales, en el marco de las políticas nacionales y la legislación sectorial, deben ejecutar los estudios diagnósticos necesarios e implementar las políticas, estrategias, programas, proyectos y acciones necesarias para garantizar la continuidad de la prestación de los servicios públicos ante la eventual ocurrencia de algún evento de origen natural o antrópico que pueda comprometer la prestación oportuna y eficiente de los mismos. Cabe entonces precisar que las particularidades de cada territorio y las capacidades locales orientarán la respuesta ante los escenarios probables de amenaza/riesgo, reconociendo que cada operador, a partir de sus experiencias y realidades territoriales, reconoce sus fortalezas y limitaciones técnicas, operativas, financieras y administrativas, pero que de igual forma identifica las estrategias y acciones mínimas que le permiten garantizar la prestación de los servicios que opera. El municipio de Mistrató, a través del accionar de su empresa prestadora de servicios públicos, debe velar por la prestación eficiente del sistema de acueducto y garantizar que los niveles de vulnerabilidad (exposición y fragilidad) de cada uno de sus componentes sean bajos/aceptables ante la potencial ocurrencia de amenazas que puedan generar escenarios de riesgo de alta complejidad técnica y financiera.

1. Introducción

La prestación eficiente de servicios públicos es vital, ante la eventual ocurrencia de eventos catastróficos, toda vez que ello garantiza seguridad, asistencia y recuperación rápida de zonas y comunidades afectadas, minimizando impactos en la sociedad y en la economía. Es esencial para la resiliencia comunitaria y la estabilidad social ante las crisis desatadas por la ocurrencia de eventos inesperados (Gill, 2014; LeBlanc, 2015). Bruce (1999), haciendo alusión a la Década Internacional para la Reducción de Desastres Naturales de la ONU, iniciada en 1990, refiere que las pérdidas económicas globales por la ocurrencia de desastres naturales aumentó considerablemente en esta década y en las siguientes, destacando que parte de este incremento puede estar vinculado a los efectos globales del cambio climático, razón por la cual resulta estratégico adaptarse y mitigar las nuevas condiciones de amenaza, incluyendo sistemas de advertencia mejorados, construcciones más seguras y una planificación del uso del suelo que sea consciente del riesgo. Para Chang (2003) el desarrollo de metodologías para evaluar beneficios y costos de medidas de

[1] Estudiante Programa Ingeniería Civil, Universidad Libre de Pereira, david-ocampom@unilibre.edu.co

[2] Docente investigador, Universidad Libre de Pereira, alejandro.alzateb@unilibre.edu.co

mitigación de desastres en infraestructuras urbanas es una imperiosa necesidad toda vez que la ocurrencia de actividad sísmica y sus efectos sobre los sistemas de distribución de agua, revela que las pérdidas sociales superan ampliamente las pérdidas directas por la provisión del servicio. Cimellaro et al. (2016) proponen un índice de resiliencia para evaluar cómo las redes de suministro de agua pueden resistir y recuperarse tras eventos disruptivos. El índice se soporta en la cantidad de usuarios afectados, el nivel de agua en reservorios y la calidad del agua, demostrando su utilidad en los procesos de toma de decisión, planificación urbana y respuesta ante la ocurrencia de desastres.

A su vez, Heegaard et al. (2015) afirman que es sustancial, para minimizar pérdidas económicas y humanas asociadas a la ocurrencia de desastres en sistemas críticos, la rápida recuperación de dichos sistemas. Advierten que es imprescindible modelar los sistemas para el manejo de fallos manteniendo los servicios a pesar de las adversidades. Subrayan la importancia de una planificación y respuesta estratégica ante la ocurrencia de incidentes que pongan a prueba los sistemas críticos. Para Guikema (2009) una de las oportunidades de evaluar la condición de riesgo de sistemas de infraestructura complejos, como es el caso del suministro de agua potable, está en el enfoque de la teoría de aprendizaje estadístico, que incluye modelos avanzados como regresiones y algoritmos de aprendizaje automático para evaluar los riesgos de manera más representativa y eficiente. Tales modelos pueden ofrecer una comprensión integral de cómo los desastres naturales afectan la fiabilidad de infraestructuras críticas, sirviendo como complemento a los métodos tradicionales de análisis de riesgo. También, Kamaludin et al. (2022) insisten sobre la necesidad de implementar estrategias y acciones tendientes a reducir los factores generadores de riesgo en el desarrollo de los Sistemas de Suministro de Agua Potable Regionales (SPAM), mediante la aplicación de técnicas de listas de verificación que permitan la identificación, análisis y tratamiento de los riesgos que comprometen la continuidad y operación de los SPAM. Uno de los factores de mayor complejidad identificados, son los eventos de origen natural que, acorde con la localización de los distintos componentes del sistema, pueden generar daños o impactos a todo el ecosistema alrededor de las fuentes de abastecimiento e infraestructura instalada.

En este sentido, Bata et al. (2022) refieren el efecto de los sismos sobre las redes de distribución de aguas, en particular aquella redes que por su obsolescencia ya han perdido su vida útil o presentan significativos deterioros. Sugieren los autores que la continuidad en la prestación del servicio y la presión son las variables más impactadas asociadas a la ocurrencia de un sismo. De igual forma, Pagano et al. (2017) asumen que la ocurrencia de un sismo puede generar grandes perturbaciones sobre la funcionalidad de la infraestructura de acueducto, además de las complejidades surgidas en los procesos de adaptación de infraestructura para dar respuesta a población refugiada temporalmente, como fue el caso del terremoto de L'Aquila (Italia). El análisis de riesgos en los sistemas de suministro de agua potable se ha convertido en un enfoque esencial para garantizar la seguridad y la adecuación del suministro de agua a los consumidores. La seguridad del agua potable depende de una serie de factores, incluida la calidad de la fuente de agua, la eficacia del tratamiento y la integridad del agua (Vassiljev et al., 2012). El análisis cuantitativo de riesgos en el proceso de suministro de agua potable está representado en la falta de agua y la interrupción del suministro y los riesgos cualitativos están representados por la mala calidad del agua potable. Para Rucka & Juhanak (2006) la práctica actual de diseño y

operación de sistemas de agua emplea muy a menudo métodos de modelado matemático. Siendo uno de los fundamentos más importantes para la vida y el desarrollo humanos, los sistemas de suministros de agua han recibido considerable atención en relación con su desempeño en diversas condiciones (Behzadi et al., 2022). Debido a los requisitos de seguridad y confiabilidad del sistema, la evaluación de riesgos ha sido reconocida como una herramienta útil para identificar amenazas, analizar vulnerabilidades y riesgos, y seleccionar medidas de mitigación para los sistemas de abastecimiento de agua (Li y Uk, 2007). Entregar agua desde las fuentes a los clientes es la función básica de un sistema de suministro de agua, que consiste en una red de tuberías, bombas y válvulas que mueven el agua desde las fuentes hasta los clientes, tanques y depósitos que almacenan agua para adaptarse a las fluctuaciones de la demanda a medida que avanzan. Según Lindhe et al. (2010) debe abordarse la gestión de riesgos del suministro de agua de manera integral y desde un enfoque holístico, incluyendo todo el sistema de agua potable, desde la fuente hasta el grifo, siendo esta la forma más eficaz de garantizar un suministro seguro de agua potable.

Algunos autores destacan los cuantiosos daños de los sistemas de suministro de agua, asociados a la ocurrencia de grandes terremotos (Wang et al., 2010; Tuhov y Ru, 2007; Wu et al., 2020; Garrick y Hall, 2014; Alam, 2019; Hartmann et al., 2018) y ponen de relieve la vulnerabilidad de los sistemas de suministro de agua bajo cargas sísmicas. Resaltan que la salida del sistema, después de un terremoto, no sólo perjudica la capacidad de extinción de incendios, sino que también perturba las actividades residenciales, comerciales e industriales y amenaza el bienestar económico, la seguridad y el tejido social de las comunidades a las que sirven. En este sentido, Bristow et al. (2007) asumen que es de gran interés examinar las condiciones a partir de las cuales los sistemas de distribución de agua urbana son esenciales en la respuesta contra incendios y cómo dicho sistema es altamente vulnerable a la ocurrencia de desastres de origen natural y ataques terroristas. Los autores analizan y evalúan, mediante modelos de programación dinámica y softwares de modelación hidráulica, la eficiencia de los sistemas de agua tras sufrir daños, para combatir eficientemente incendios. Concluyen que se requiere una adecuada interconexión de infraestructuras críticas y la necesidad de protegerlas contra fallos en cascada, toda vez que la ocurrencia de desastres naturales pone a prueba la eficiencia de dichos servicios. A su vez, Marques y Conceição (2011) ofrecen un análisis detallado de las metodologías de gestión de infraestructuras críticas (entre ellos los sistemas de suministro de agua), dentro de contextos de gestión del riesgo de desastres. Resaltan la incidencia de las vulnerabilidades, amenazas, interdependencias y modelos de optimización inherentes a los sistemas de suministro, resaltando e identificando que los sistemas están expuestos a una amplia gama de situaciones adversas extremas provocadas por eventos de origen natural o antrópico, que requieren una gestión de riesgos sistemática.

Tchórzewska-Cieślak et al. (2021) sugieren la implementación de sistemas de seguridad en el suministro de agua para reducir los riesgos, recomendando para ello el uso de estándares de Niveles de Integridad de Seguridad (SIL), con el propósito de evaluar la eficacia de dichos sistemas, bajo el entendido que el suministro de agua, en la fase postdesastre, se considera una infraestructura crítica.

Grigg (2003) aborda la complejidad del manejo de riesgos en las empresas prestadoras de servicios de agua, centrándose en los desafíos presentados tanto por desastres naturales como por amenazas antropogénicas. Revela que los métodos actuales de análisis de riesgos se utilizan poco debido a la falta de datos, formación y priorización dentro de las empresas de servicios y sugiere que las empresas de agua pueden aprender de otros sistemas de infraestructura con características similares para mejorar su resiliencia y fiabilidad. Más recientemente, Mottahedi et al. (2021) y Sathurshan et al. (2022) incorporan el concepto de resiliencia en el contexto de los Sistemas de Infraestructura Crítica (SIC) y que protegerse, resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de las perturbaciones y destacan que este nuevo enfoque de la planificación y desarrollo de los sistemas de suministro de agua potable enfatizan en la preparación, la respuesta y una rápida recuperación postdesastre. De igual forma, Pagano et al. (2014) establecen que la importancia de la seguridad del agua potable es esencial por razones económicas, sociales y sanitarias. Definen que el daño a cualquier elemento de un sistema de agua o la contaminación de la calidad del recurso pueden tener efectos significativos en la población y en todos los recursos y actividades dependientes. Por tanto, es sustancial evaluar la vulnerabilidad del sistema en caso de desastres naturales y actos antropogénicos malintencionados o accidentales. En línea con tales iniciativas, Rak et al. (2019) proponen un método para evaluar las amenazas a las personas y la propiedad que surgen de los sistemas de agua que funcionan en unidades de autogobierno. El método se basa en una matriz de riesgo de cuatro parámetros que considera: la frecuencia o probabilidad de exposición, las pérdidas financieras, los daños a la salud de las personas y el grado de seguridad. Hacen énfasis en la importancia de un análisis de riesgo detallado para los sistemas de suministro de agua en el contexto de situaciones de crisis.

La importancia de la identificación de los escenarios de amenaza y riesgo a los que están expuestos los servicios públicos domiciliarios, se convierten en una poderosa herramienta para mejorar la preparación y respuesta (Eriksson y McConnell, 2011; Kaneberg, 2018) de los entes territoriales y/o empresas prestadoras de servicios públicos, ante la ocurrencia de emergencias, con el propósito de garantizar la pronta recuperación y continuidad de los servicios públicos (Chung, 2014). Tal identificación debe abordar todas las fases operativas desde la activación hasta la normalización de los servicios necesarios, a partir de una adecuada planificación y formulación de planes de emergencia y contingencia (Eriksson y McConnell, 2011; Epstein y Harding, 2019). En este sentido, se busca planificar y ejecutar acciones para comprender y mitigar riesgos, al tiempo que se concientiza a la población (Alshamsi, 2017). Históricamente, el municipio de Mistrató ha enfrentado desastres naturales que han afectado la provisión de servicios esenciales. Se han identificado eventos amenazantes que en alguna medida han generado traumas parciales en la dinámica de prestación de servicios públicos domiciliarios. Los eventos torrenciales, asociados a períodos lluviosos, se convierten en la amenaza de mayor complejidad para la garantía de prestación eficiente de los servicios de acueducto, y eventualmente de los servicios de aseo y alcantarillado. Hechos como los de julio de 2012, cuando producto de evento torrencial, la bocatoma y extensivamente, los restantes componentes del sistema tuvieron significativas afectaciones, generando desabastecimiento en la cabecera municipal por un lapso de 15 días, ratifican tal condición de amenaza. Adicionalmente y acorde con las características de cada uno de los componentes del sistema de acueducto, los fenómenos de remoción en masa (FRM) pueden convertirse en una amenaza para las redes de conducción, en particular en aquellos tramos donde la tubería está expuesta y/o se desarrollan

actividades agrícolas/pecuarias. De manera particular en el municipio de Mistrató esta condición es susceptible de darse en predios de la finca La Solita, en virtud de las acciones que los privados desarrollan y que eventualmente pueden comprometer la estabilidad de las redes de acueducto. Uno de los aspectos a considerar en la cuenca de la quebrada Arrayanal, fuente abastecedora del municipio, son los impactos ambientales que los cambios de uso del suelo pueden generar sobre la calidad y cantidad del recurso, en virtud de las nuevas dinámicas de planificación territorial municipal y usos del suelo en la cuenca alta de dicho drenaje.

2. Metodología

La presente investigación adopta un enfoque cualitativo, orientado a desentrañar y comprender los diversos fenómenos naturales que impactan en el municipio de Mistrató, así como las amenazas recurrentes que provocan la interrupción de servicios esenciales como el acueducto. Este método cualitativo tiene el propósito de explorar y entender cómo las autoridades locales perciben, atienden y dan respuesta a los eventos de origen natural que de manera recurrente comprometen la seguridad de pobladores, infraestructura y prestación de servicios (Tramullas, 2013). Asimismo, la naturaleza inductiva de esta investigación permite abordar la problemática desde un punto de vista exploratorio, identificando vacíos en el conocimiento existente y evaluando el contexto para así establecer planes de acción y contingencia adecuados para los servicios públicos domiciliarios. El foco específico de este estudio recae en el sistema de acueducto del municipio de Mistrató, localizado en el departamento de Risaralda.

Se proponen las siguientes fases:

- Fase 1: Identificación general del escenario de riesgo municipal
  Esta fase permitirá realizar un compendio general de todos los factores de riesgo que en alguna manera han generado impactos y daños en cualquiera de las dimensiones del desarrollo municipal.

- Fase 2: identificación de amenazas
  Esta fase hará énfasis en aquellos eventos que, según los registros históricos de eventos catastróficos, han generado daños o impactos específicos sobre el sistema de acueducto del muncipio de Mistrató y que obligatoriamente han generado suspensiones temporales, parciales o definitivas en la prestación del servicio.

- Fase 3: Identificación de vulnerabilidades
  En esta fase se abordará de manera detallada el diagnóstico y estado de cada uno de los componentes del sistema de acueducto del municipio de Mistrató y su relación de exposición frente a lo eventos amenazantes que comprometen su funcionalidad y continuidad.

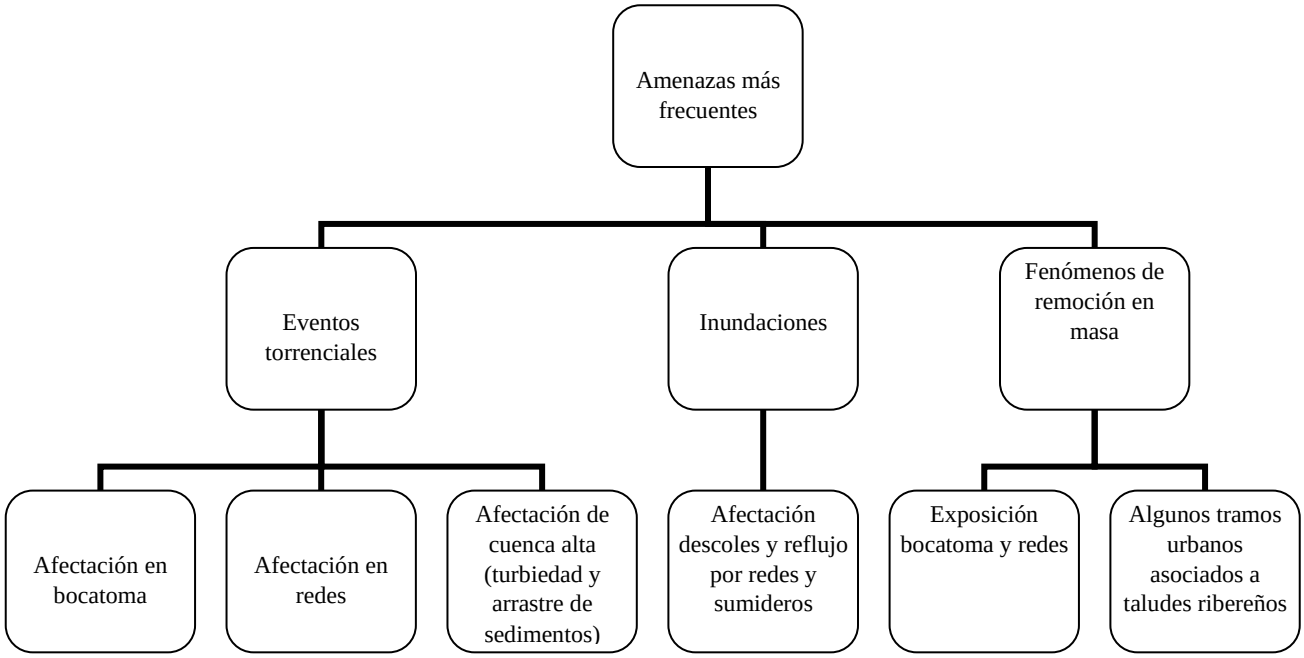
- Fase 4: Identificación y categorización del riesgo
  En esta fase se evaluarán las amenazas y vulnerabilidades identificadas y se calificará el riesgo de cada componente del sistema.

3. Resultados y discusión de resultados

3.1. Evaluación de los escenarios de amenaza y riesgo

En el municipio de Mistrató (Risaralda), históricamente se han identificado eventos amenazantes que en alguna medida han generado traumas parciales en la dinámica de prestación de servicios públicos domiciliarios. Los eventos torrenciales, asociados a períodos lluviosos, se convierten en la amenaza de mayor complejidad para la garantía de prestación eficiente de los servicios de acueducto, y eventualmente del servicio de aseo y alcantarillado. Hechos como los de julio de 2012, cuando producto de evento torrencial, la bocatoma y extensivamente, los restantes componentes del sistema tuvieron significativas afectaciones, generando desabastecimiento en la cabecera municipal por un lapso de 15 días, ratifican tal condición de amenaza. Adicionalmente y acorde con las características de cada uno de los componentes del sistema de acueducto, los fenómenos de remoción en masa (FRM) pueden convertirse en una amenaza para las redes de conducción, en particular en aquellos tramos donde la tubería está expuesta y/o se desarrollan actividades agrícolas/pecuarias. De manera particular en el municipio de Mistrató esta condición es susceptible de darse en predios de la finca La Solita, en virtud de las acciones que los privados desarrollan y que eventualmente pueden comprometer la estabilidad de las redes de acueducto. Uno de los aspectos a considerar en la cuenca de la quebrada Arrayanal, fuente abastecedora del municipio, son los impactos ambientales que los cambios de uso del suelo pueden generar sobre la calidad y cantidad del recurso, en virtud de las nuevas dinámicas de planificación territorial municipal y usos del suelo en la cuenca alta de dicho drenaje.

Figura 1. Escenarios de riesgo identificados para el municipio de Mistrató



Fuente. Diagnóstico de campo y entrevistas personal del municipio

Es importante notar que la amenaza por sismos, eventos volcánicos y amenazas de origen antrópico, no tienen significativa relevancia en el ámbito municipal, toda vez que en los registros históricos de desastres este tipo de amenazas no ha tenido incidencia en los elementos expuestos de cada uno de los componentes de los sistemas de prestación de servicios públicos domiciliarios. No obstante, en virtud de la obsolescencia, tipología constructiva, estado y calidad de los materiales, de algunos componentes de los sistemas de acueducto, es necesario establecer un programa de mantenimiento preventivo, monitoreo, reforzamiento, reposición de elementos y/o reconstrucción, en virtud de la amenaza sísmica generalizada para todo el suroccidente colombiano, que si bien no es la amenaza más compleja para el municipio, si puede eventualmente afectar la operación y funcionamiento de los sistemas y componentes del sistema de acueducto, por las consideraciones anteriormente referidas.

3.2. Identificación de amenazas

Las geo-amenazas obedecen a la dinámica endógena y exógena del planeta. A este grupo pertenecen los sismos, erupciones volcánicas, fenómenos de remoción en masa (FRM), inundaciones (lentas y súbitas), eventos torrenciales, entre las más significativas. Adicionalmente, existe otro grupo de amenazas que conjugan el papel de la naturaleza con las actividades antrópicas, a las que regularmente se les ha denominado amenazas socio-naturales. A este grupo pertenecen las inundaciones, los fenómenos de remoción en masa y todas aquellas formas de contaminación asociadas al quehacer humano.

Para el caso particular del municipio de Mistrató, la Tabla 1 sintetiza las características, probabilidad de ocurrencia e impactos derivados de cada una de las amenazas identificadas que potencialmente pueden impactar el servicio de acueducto y/o cada uno de sus componentes, a saber:

Tabla 1. Amenazas de origen natural diagnosticadas en el municipio de Mistrató

Origen	Tipos de amenaza	Probabilidad de ocurrencia	Áreas de impacto
Natural	Sismos	Eventos registrados en Mistrató: 1935-09-13; 1962-07-30; 1979-11-23; 1999-01-25	Zona minera de Purembará: + de 100 mineros atrapados. Sobre la K 6ª tres (3) viviendas afectadas, pero ya presentaban deterioro
	Erupción Volcánica	Mínima	Perímetro urbano-rural del municipio
	Movimientos en Masa	En el sector urbano se han registrado históricamente un total de 10 deslizamientos con los siguientes impactos: 7 muertos; 108 viviendas reubicadas; 15 viviendas afectadas parcialmente y 10 evacuadas; 4 viviendas destruidas y 30 damnificados.	Barrios Siglo XXI, Siglo XX y Villa Irene; salida municipio Belén de Umbría; K 6ª y 7ª; calles 2, 5 y 12 (salida San Antonio)
	Sequías	De mínima a moderada, aunque históricamente el municipio no ha tenido problemas con los períodos secos	Microcuenca quebrada Arrayanal
	Inundaciones	Se han reportado eventos los años 1981, 1992, 1994, 1997, 1998, 1999, 2000, 2013. El total de viviendas afectadas asciende a 16. Los efectos están asociados al incremento de caudales de la	Barrios Loas Arrayanes, San José, Plaza principal, Buenos Aires y Villa Irene

Origen	Tipos de amenaza	Probabilidad de ocurrencia	Áreas de impacto
		quebrada Arrayanal y el río Risaralda	
	Avenidas Torrenciales	El evento histórico de mayor afectación sucedió en 1974-06-08, cuando la quebrada Arrayanal se desbordó y afectó toda la zona urbana. Específicamente 4 viviendas resultaron afectadas. El evento se repitió en menor magnitud en junio de 2012.	Bocatoma y perímetro urbano municipal
	Descargas Eléctricas	Mínima para el municipio	Sectores urbano y rural
	Vendavales	Mínima para el municipio	Sector rural

Fuente: Base de datos DesInventar (consulta online junio de 2022)

Resulta determinante para el municipio de Mistrató que la mayor condición de amenaza está asociada a la ocurrencia de eventos torrenciales e inundaciones, pues históricamente han sido las generadoras de los mayores impactos sobre bienes, infraestructura y población. De hecho, las avenidas torrenciales (históricas) de la quebrada Arrayanal, por las características morfométricas y de usos del suelo de la microcuenca, se convierten en la mayor amenaza del sistema de acueducto del municipio, por la localización de los componentes captación y redes (el primer tramo de redes)

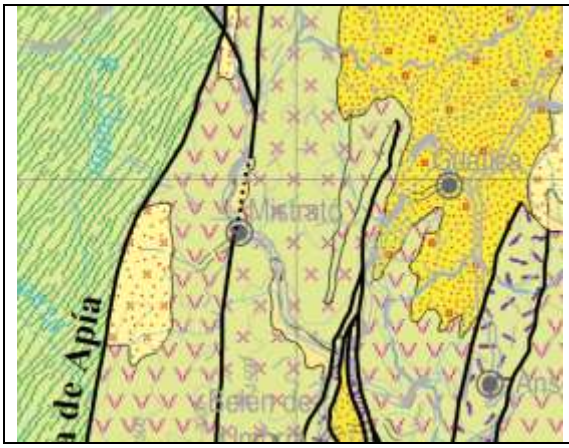
3.2.1. Amenaza Sísmica

El municipio de Mistrató se localiza sobre el flanco oriental de la cordillera occidental, en la zona andina colombiana. Adicionalmente, por pertenecer al suroccidente colombiano, su territorio está expuesto a dos tipos de amenazas: la amenaza sísmica y la amenaza por fenómenos de remoción en masa. El municipio está afectado por las fallas Mistrató y Apía (ver Figura 2) y la condición de fracturamiento de las rocas aflorantes en el territorio municipal, además de la dinámica de cambios de uso del suelo, genera un escenario potencial para la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa.

Es importante aclarar que históricamente en el municipio de Mistrató no se han registrado grandes afectaciones por la ocurrencia de sismos. Sin embargo, este tipo de amenaza cobra especial importancia en el caso de fenómenos de remoción en masa, pues los sismos se consideran agentes detonantes de deslizamientos. Tal apreciación es válida, si a las

condiciones de presencia de rocas fracturadas (por la presencia de fallas geológicas), altas pendientes y suelos de poco espesor, se les suma regímenes de precipitaciones altos (2300 mm/año) y la localización de la cabecera municipal (ver Figura 3).

Figura 1. Mapa geológico-estructural municipio de Mistrató

	Las Fallas Apía y Mistrató condicionan la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa, en razón a las pendientes y el grado de fracturamiento de las rocas aflorantes.

Fuente: Gonzáles, (1993).

Figura 2. Localización geográfica municipio de Mistrató.

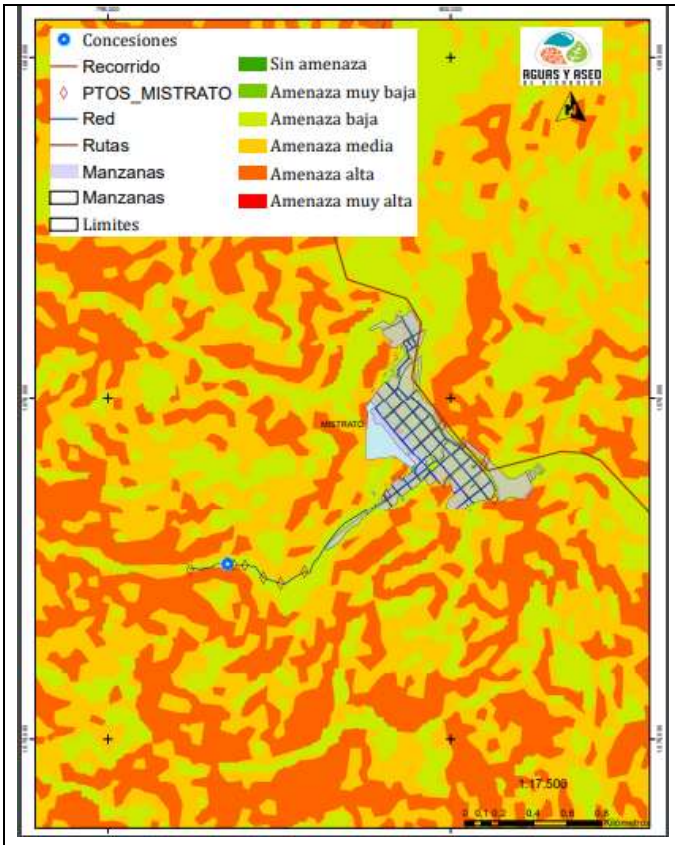
	La localización geográfica del municipio y los registros históricos de ocurrencia de sismos permiten definir escenarios de amenaza sísmica bajos. De igual forma la conformación arquitectónica de la cabecera municipal, con predominio de viviendas de 1 y 2 pisos, livianas, reducen el potencial impacto de un evento sísmico.

Fuente: Google Earth (junio 22 de 2018)

3.2.2. Amenaza por fenómenos de remoción en masa (FRM)

La ocurrencia de fenómenos de remoción en masa, al igual que las inundaciones, son los eventos amenazantes de mayor recurrencia en el territorio municipal. Tal condición es acelerada por una serie de variables que condicionan la ocurrencia de FRM.

Figura 3. Amenas por fenómenos de remoción en masa municipio de Mistrató



Los factores naturales que condicionan la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa en el municipio de Mistrató son: lito-estructurales asociados a la deformación y origen de las rocas, estructurales (presencia de las fallas Mistrató y Apía), geomorfológicos (pendientes y formas de los terrenos), hidrogeológicos (dinámica superficial y sub-superficial de las aguas), climáticos (períodos húmedos de lluvias frecuentes e intensas) y antrópicos (usos del suelo, cortes y excavaciones en laderas y taludes, ausencia de obras de control y manejo de aguas de escorrentía).

Fuente: POMCA río Risaralda (CARDER, 2015)

La figura 4 ilustra la amenaza que por fenómenos de remoción en masa presenta el servicio de acueducto del municipio de Mistrató, y extensivamente el territorio municipal. Puede notarse que los componentes del sistema (desde bocatoma hasta planta de tratamiento) presentan categoría de amenaza de moderada a baja, condición que se ratifica con los registros históricos de deslizamientos.

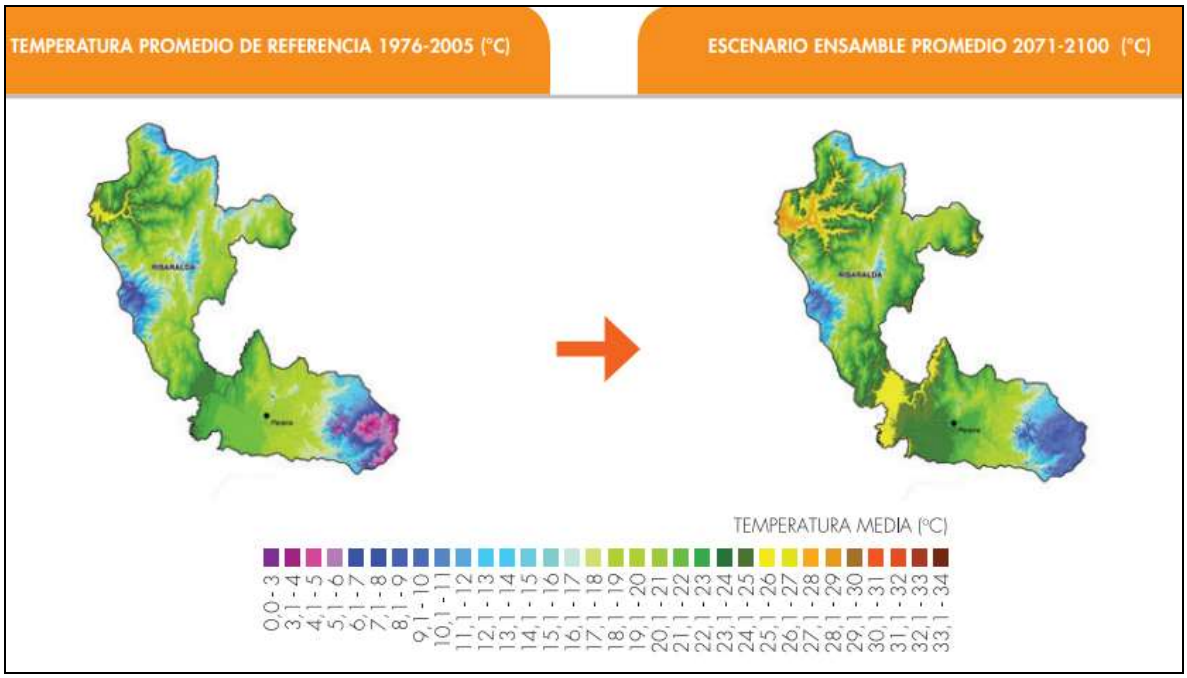
Es importante destacar que los componentes del sistema de acueducto del municipio de Mistrató, una vez adelantado el diagnóstico de campo, presentan relativas condiciones de susceptibilidad bajas/moderadas frente a la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa, toda vez que sólo el evento del 2012 provocó el desabastecimiento por un lapso de 15 días, y éste en esencia estuvo asociado a un evento torrencial. Claro está que dicho evento fue posible a la combinación de lluvias fuertes, deslizamientos superficiales de suelos residuales y vegetación y el incremento de caudal de la quebrada Arrayanal, para posibilitar

el transporte y depositación de materiales, que finalmente generaron la emergencia de ese entonces. Uno de los pocos sitios en donde se evidencia de manera concreta la posibilidad de afectación por deslizamientos en alguno de los componentes del sistema (redes), es en el sitio denominado finca La Solita, asociado a la intervención antrópica. De igual manera, los tramos de red comprendidos entre la planta de tratamiento y el tanque de almacenamiento pueden estar expuestos a posibles rupturas debido a la implementación de mejoras constructivas o nuevas construcciones, razón por la cual se hace necesario amojonar y señalizar la servidumbre de la red.

3.2.3. Sequias y Variabilidad climática

Según los registros históricos de desastres y los testimonios del prestador del servicio y las comunidades, el municipio de Mistrató no ha presentado problemas de desabastecimiento debido a los períodos secos del régimen bimodal de lluvias de la región. Confirman tal condición los testimonios y acciones adelantadas por la Empresa prestadora de Servicios Públicos Domiciliarios de Mistrató, cuando manifiestan que la actual concesión es suficiente para suplir la actual demanda del servicio agua. No obstante, la Empresa sigue en la búsqueda de una fuente alterna y/o complementaria que le permita tener redundancia del sistema. La figura 5 muestra diferentes escenarios de variabilidad climática para el departamento de Risaralda, en los que se puede evidenciar que los cambios en los regímenes de temperaturas regionales serán muy significativos en la zona del Parque Natural de los Nevados y en la zona centro-nor-occidental del departamento, en límites con el departamento del Chocó.

Figura 4. Escenario de cambio climático del departamento de Risaralda (CARDER, 2016).



Fuente: documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022963/.../risaralda_fichatecnica.pdf

La fuente de abastecimiento para el municipio de Mistrató es la quebrada Arrayanal. Por su importancia, esta microcuenca que abastece el Acueducto Municipal fue declarada mediante Acuerdo No. 004 del 28 de febrero de 1999 como Área Natural Protegida del orden Municipal.

3.2.4. Susceptibilidad a Eventos torrenciales

Se consideran eventos torrenciales aquellos movimientos rápidos que están conformados por sedimentos, fragmentos de rocas y vegetación, que eventualmente ocasionan el represamiento del drenaje. Dadas las condiciones hidrológicas y topográficas del municipio, acompañadas de los cambios de uso del suelo en la microcuenca alta, el incremento de la amenaza por eventos torrenciales es alto. Las áreas más vulnerables son la cabecera municipal por encontrarse en un pequeño valle que se forma en la desembocadura de la quebrada Arrayanal al río Risaralda. Eventos históricos como los de los años 1974 y 2012, así lo confirman. Siendo esta la mayor amenaza para la cabecera municipal y para el sistema de acueducto, es importante adelantar las siguientes acciones:

- Evaluación diagnóstica que permita modelar la dinámica torrencial de la quebrada Arrayanal y los diferentes escenarios de riesgo asociados a dicho modelo
- Fortalecer los programas de conservación y reforestación de la microcuenca
- Evaluar la posibilidad de relocalizar el componente captación (bocatoma y sistemas complementarios) del sistema de acueducto del municipio de Mistrató, en virtud de su alta exposición a eventos torrenciales.

3.2.5. Amenazas de origen antrópico o tecnológico

Las amenazas de origen antrópico o tecnológico guardan relación con las actividades humanas en un determinado territorio, y tienen que ver con algunas externalidades que comprometen la operación y funcionamiento eficiente y continua de alguno de los componentes del sistema, en este caso particular el sistema de acueducto. Dado que los efectos de las amenazas antrópico-tecnológicas impactan la totalidad de servicios prestados en el municipio de Mistrató, la Tabla 2 resume los tipos de amenaza, la probabilidad de ocurrencia del evento y las áreas potencialmente afectables.

Tabla 2. Amenazas de origen antrópico o tecnológico

Origen	Tipos de amenaza antropogénica	Probabilidad de ocurrencia	Áreas de impacto
Antrópico-tecnológico	Incendios	Comprometen la seguridad de viviendas construidas en materiales ligeros	La cabecera municipal y zona rural dispersa
	Derrame de hidrocarburos	Poca probabilidad en virtud de la condición de accesos a la cabecera municipal	El territorio municipal

Origen	Tipos de amenaza antropogénica	Probabilidad de ocurrencia	Áreas de impacto
	Fugas de cloro	Baja, por el carácter de la dosificación (manual)	La comunidad servida por el prestador del servicio
	Daños en los vehículos de operación	Baja en virtud de los kilometrajes recorridos	No aplica
	Daños en la tubería de conducción de agua potable	Baja/moderada, asociada a cambios de presión y rupturas accidentales por procesos constructivos	Cabecera municipal
	Conexiones ilegales en la red de distribución de agua potable	Dada la extensión de la red y el monitoreo constante al que está sometido, son poco probables las conexiones ilegales	Cabecera municipal
	Daños en los micromedidores	Moderados en virtud de la novedad que representan para la comunidad. Los incidentes son resueltos de forma oportuna y rápida por el prestador	Cabecera municipal
	Colmatación de lechos de secado	No aplica	No aplica para cabecera municipal
	Hallazgo de residuos peligrosos	No aplica, en virtud de que la recolección de estos está garantizada y monitoreada	No aplica
	Derrames de residuos en las vías	Siendo poco probables, no se han registrado en el municipio	No aplica
	Accidentes laborales	No se tiene registro de accidentes laborales asociados a la prestación de cualquiera de los tres (3) servicios. Poco probables	No aplica
	Transporte de hidrocarburos	Por localización de la estación de servicio, el acceso de vehículos	Zona circunvecina a la estación de servicio

Origen	Tipos de amenaza antropogénica	Probabilidad de ocurrencia	Áreas de impacto
		transportadores de hidrocarburos está restringido a la entrada del municipio	
	Falta de Mantenimientos y restitución	No aplica	No aplica
	Diseños deficientes o inapropiadas construcciones	Las deficiencias constructivas de las viviendas aplican para la vulnerabilidad sísmica, aunque la amenaza sísmica se reconoce como baja	Cabecera municipal
	Riesgos biológicos	No aplica	No aplica
	Riesgo público de asonadas	No se tienen registros de dicha amenaza para el territorio municipal	No aplica
	Mantenimiento de vías	Moderada en virtud de la obsolescencia de los pavimentos y el deterioro normal de los mismos	Cabecera municipal

Fuente: Diagnóstico de campo y entrevistas personal del municipio

3.3. Identificación de factores de vulnerabilidad

Este subcapítulo brindará información básica y específica del sistema de acueducto y las diferentes vulnerabilidades a las que está expuesto. La información se soporta en los análisis de campo, en las entrevistas con funcionarios de la empresa prestadora de servicios y en la consulta de información de los actuales PEC y/o información temática del servicio público domiciliario prestado.

Los factores de vulnerabilidad consideran elementos de tipo técnico, administrativos, operativos y de infraestructura y expresan el nivel de resiliencia para que el servicio de acueducto, ante la eventual ocurrencia de situaciones de emergencia (amenazas), pueda ser restaurado y retornar a sus condiciones normales de operación. Tal diagnóstico define la fragilidad del sistema evaluado desde los factores internos de los componentes del servicio de tratamiento y distribución de agua potable.

En ese sentido, a partir de cada componente del servicio, se definieron los factores administrativos, técnicos y operativos para proceder a la identificación de las debilidades de la empresa, y de esta manera determinar su capacidad de resiliencia.

Las siguientes tablas (Tablas 3, 4, 5, 6 y 7) ayudan a describir el sistema, ubicarlo en el territorio, definir sus componentes y rápidamente entender el estado administrativo y financiero de la empresa prestadora.

Tabla 3. Descripción e identificación del sistema y sus componentes

Información básica del Sistema	Características
Tipo de sistema	Acueducto que funciona por gravedad. Su funcionamiento data del año 1979 a partir del funcionamiento de planta convencional. El sistema está constituido por la captación bocatoma); las redes de aducción; la planta de tratamiento; el tanque de almacenamiento y las redes de distribución. El sistema se encuentra sectorizado.
Descripción del sistema	Captación: captación lateral y rejilla de fondo, con sus correspondientes accesorios y complementos (válvulas, desarenador, compuertas y recámara de rebose). Conducción: Tubería en 6" (polietileno de alta densidad. El sistema presenta cuatro (4) pasos sobre drenajes naturales. Tratamiento/almacenamiento: Tanque sedimentador, floculadores, filtros y sistema de desinfección. Floculación tipo Alabama, sedimentación cruzada, filtros rápidos y tanque de contacto de cloro. El tanque de almacenamiento tiene las siguientes características: tanque de 12 m x 12 m x 3,8 m en concreto reforzado, sin afectaciones evidentes. Accesorios: By pass, válvulas y ventosas.
Localización y accesos	La bocatoma se localiza en la finca La Solita y su fuente abastecedora es la quebrada Arrayanal. Se llega a la bocatoma a través de vía en buen estado y la bocatoma se localiza a cinco (5) minutos de la cabecera.
Comunidad servida	Cabecera municipal del municipio de Mistrató
Gerente	José Jair Díaz Villada (jdlider@hotmail.com)

Fuente: Diagnóstico de campo y entrevistas personal del municipio

Tabla 4. Identificación y características de las amenazas que comprometen los componentes del sistema

Tipo de amenaza	Características/prioridades de atención y áreas de impacto
Sismos	Se ha registrado la percepción del sismo, pero las afectaciones han sido mínimas. Es necesario evaluar a la luz de la NSR-10 la infraestructura de la planta de tratamiento y el tanque de almacenamiento, pues se evidencia cierto grado de deterioro y pérdida de vida útil.
Deslizamientos	Su registro está asociado a lluvias en la parte alta de la microcuenca de la quebrada Arrayanal y como efecto directo desencadenó evento torrencial. Tales registros coinciden con los testimonios de moradores y funcionarios de la empresa prestadora del servicio. Los años de 1974 y 2012 fueron los más críticos en cuanto a eventos torrenciales. Su probabilidad de ocurrencia es alta y sus impactos, dependiendo de la magnitud del evento, impredecibles.
Inundaciones	Genéricamente están asociadas a eventos torrenciales de la quebrada Arrayanal. También el río Risaralda expone parte de la infraestructura municipal, pero no compromete la prestación del servicio de acueducto. Las inundaciones del rio Risaralda son probables y recurrentes.
Sequías	Según testimonios de la comunidad y de funcionarios de la empresa prestadora, entre los años 1998-1999 se presentó racionamiento del servicio de acueducto por disminución de la cantidad del recurso. Claro está, en ese entonces no se habían instalado micromedidores. En la actualidad la empresa ha optimizado la prestación del servicio y ha minimizado los racionamientos, aún en situaciones de veranos prolongados. La probabilidad del evento es mínima.
Actividades antrópicas	La compra de predios y la declaratoria de la cuenca de la quebrada Arrayanal como área de interés ambiental, disminuyó las probabilidades de afectación antrópica.
Otras	La ocupación y urbanización de algunos tramos de la red de aducción y en proximidades del tanque de almacenamiento, incrementa la amenaza del sistema y extensivamente se convierte en un elemento amenazante. Es necesario señalizar y amojonar la servidumbre de la red y evitar las construcciones en periferias de planta de tratamiento y tanque de almacenamiento.

Fuente: Diagnóstico de campo y entrevistas personal del municipio

Factores de vulnerabilidad social

La vulnerabilidad social corresponde a la susceptibilidad que presentan los usuarios del sistema ante la probable interrupción del sistema y los riesgos aborales que puedan comprometer la seguridad de operarios y funcionarios de la empresa prestadora del servicio.

Tabla 5. Componentes de vulnerabilidad social

Sistema	Vulnerabilidad social
Servicio de Acueducto	Usuarios: 1095 Operarios: 1 fontanero y 3 operarios de planta

Fuente: Diagnóstico de campo y entrevistas personal del municipio

Factores de vulnerabilidad ambiental

Los factores de vulnerabilidad ambiental corresponden a los recursos naturales que pueden ser afectados y extensivamente generar algún tipo de perturbación en la prestación del servicio. En este caso particular corresponde a las fuentes abastecedoras.

Tabla 6. Componentes de vulnerabilidad ambiental

Sistema	Vulnerabilidad ambiental	Caudal concesionado
Servicio de Acueducto	La fuente abastecedora: quebrada Arrayanal presenta buenas coberturas boscosas; tiene una declaratoria de área de interés ambiental municipal y CARDER/municipio han empezado la compra de predios. Tiene como particularidad que el poco espesor de los suelos residuales y las altas pendientes facilitan el desprendimiento y caída de vegetación al cauce principal, obstruyendo en algunos casos el drenaje	30 lt/seg. El sistema opera con 15 lt/seg, razón por la cual se cuenta con todas las garantías para la prestación continua del servicio

Fuente: Diagnóstico de campo y entrevistas personal del municipio

Vulnerabilidad Administrativa

La vulnerabilidad administrativa está relacionada con el nivel de organización de la empresa, la capacitación de operadores y funcionarios en temas referentes a amenazas naturales y la capacidad del personal administrativo para desempeñar sus obligaciones. De igual forma evalúa la capacidad financiera y de recursos materiales con los que cuenta la empresa para dar respuesta oportuna y eficiente ante la ocurrencia de cualquier incidente,

además de las debilidades de la organización y estructura jerárquica de la organización (Empresa).

En la Tabla 7 se sintetiza la vulnerabilidad administrativa de la empresa prestadora de servicios públicos domiciliarios del municipio de Mistrató

Tabla 7. Componentes de vulnerabilidad administrativa

Componente	Descripción/Observaciones
Organización y administración	La empresa prestadora de servicios públicos domiciliarios del municipio de Mistrató cuenta con una estructura organizacional transparente y sencilla. Está conformada por una Junta Directiva, la Gerencia, una División Técnica, una División Financiera y una oficina de PQR. En general está conformada por: Auxiliares administrativos, Asesores (jurídico, contable, control interno), Técnico administrativo, Servicios profesionales y generales y Operarios de planta y fontanero, que en conjunto suplen los requerimientos de usuarios y componentes del sistema
Recursos materiales disponibles	La empresa cuenta con un stock de materiales, accesorios y elementos necesarios. Además, cuenta con el servicio de "bodega virtual" en caso de urgencia y esta opera según el requerimiento necesidad. La empresa cuenta con los químicos necesarios en la bodega de la planta de tratamiento.
Recursos financieros disponibles	La empresa cobra una tarifa promedio mensual de $10.278. Presenta unos ingresos mensuales de $23.915.684. En la actualidad tiene cuentas por cobrar de $2.256.247 y las cuentas por pagar ascienden a $13.705.119. La empresa recibe recursos por convenios (CARDER/Municipio) de $873.702.739 (año 2017). Financieramente la empresa presenta solvencia.
Capacitación del personal	La mayoría de los funcionarios cuenta con una experiencia que oscila entre 1-2 años, salvo el caso del técnico administrativo (23 años), el fontanero y operarios de planta. El personal recibe un entrenamiento inicial, pero no existe una periodicidad en las capacitaciones brindadas al personal. Eventualmente se capacita a funcionarios por parte del SENA y la Secretaría de Salud Departamental. Los operarios de planta, fontanero y funcionarios administrativos no cuentan con la capacitación y experticia en temas de amenazas naturales que puedan comprometer la continuidad en la prestación del servicio

Fuente: Diagnóstico de campo y entrevistas personal del municipio

Vulnerabilidad Operativa

Constituye los elementos en tiempo y calidad que son factores determinantes en la evaluación del servicio referente a la temporalidad y permanencia del mismo. Están relacionados con la calidad, cantidad y continuidad; rutinas operacionales, actividades de mantenimiento y capacitación de operadores para el cumplimiento de las funciones.

En la Tabla 8 se sintetiza la vulnerabilidad operativa de la empresa prestadora de servicios públicos domiciliarios del municipio de Mistrató

Tabla 8. Vulnerabilidad operativa de la empresa prestadora de servicios públicos domiciliarios del municipio de Mistrató

Componente	Descripción/Observaciones
Cantidad-continuidad-calidad del servicio	El sistema opera con 13 lt/seg, aunque la concesión de aguas es de 30 lt/seg. El servicio se presta 24 x 7 x 365. En la actualidad la empresa cuenta con un superávit de 17 lt/seg para suplir las demandas de los crecimientos urbanos y empresariales que eventualmente se den. Según el IRCA, la calidad de aguas es el ideal. Eventualmente por el lavado de tanques (1 vez por semestre) se suspende el servicio 1 día.
Operación y mantenimiento	Las rutinas de operación y mantenimiento son: Verificación de entrada de agua y cloración Revisión de minutas Toma de muestras de agua Inspección de bocatoma y aforo de caudal Aseo y limpieza de instalaciones Anotaciones y producción de informes Seguimiento nivel tanque de almacenamiento Medición, análisis y reporte de pH, cloro residual, color, turbiedad.
Capacitación del personal	Se cuenta con 4 operarios de planta y un contratista. Eventualmente el SENA implementa procesos de certificación en competencias laborales (fontanero). La última capacitación recibida fue en septiembre de 2022 (entidad capacitadora: SENA). Se requiere fortalecer los procesos de capacitación de funcionarios en: seguridad y salud ocupacional; trabajo en alturas y espacios confinados; amenazas naturales, vulnerabilidades.

Fuente: Diagnóstico de campo y entrevistas personal del municipio

3.4. Caracterización de escenarios de riesgo

La caracterización de escenarios de riesgo es el producto de la combinación de los factores de amenaza y vulnerabilidad que se manifiestan en situaciones específicas que deben ser atendidas. Los escenarios de riesgo describen las condiciones asociadas a algún fenómeno amenazante. Se realizó la valoración y análisis de los escenarios de riesgo a partir de tres factores: nivel de exposición, identificación de daño y estimación de los efectos, mediante matrices de doble entrada en las que se asigna valor al nivel de influencia que pueda tener la manifestación de una amenaza en alguno de los procesos o componentes del servicio

Los criterios para la asignación de valores están relacionados con el conocimiento técnico del personal de la Empresa, la localización geográfica del área de prestación del servicio, las condiciones hidrometeorológicas y biofísicas. Posterior a la valoración de los escenarios de riesgo, se procede a realizar el análisis, con base al cual se definirán las acciones a implementar en caso de manifestarse el escenario de riesgo en alguno de los componentes del servicio.

3.4.1. Estimación del nivel de exposición del sistema.

Se consideraron los componentes del sistema de acueducto, que debido al lugar donde se encuentran ubicados, pueden llegar a sufrir daños cuando se manifiesta algún tipo de amenaza.

Tabla 9. Calificación del nivel de exposición de un componente del sistema frente a una amenaza natural

Asignar un Valor de:	Descripción del Nivel de Exposición
1	**Exposición Baja**. El componente no se ve afectado por un evento amenazante
3	**Exposición Media**. Cuando el componente se ve afectado en su estabilidad estructural o funcional cuando ocurre un evento amenazante.
5	**Exposición Alta.** Cuando se observa un fallo o colapso estructural o funcional del componte

Fuente: Diagnóstico de campo y entrevistas personal del municipio

La valoración de los niveles de exposición se realiza en torno al nivel de pérdidas que se pueden ocasionar por la ocurrencia o manifestación de una amenaza sobre alguno de los componentes del servicio. La Tabla 10, permite diferenciar e identificar los niveles de exposición asociados a cada amenaza.

Tabla 10. Identificación y evaluación de la exposición de los componentes asociados a cada amenaza

Nivel de Exposición Frente a la Amenaza	Componente del Sistema							
	Areas de Protección	Bocatoma Captación Aducción	Desarenador	Tubería de Conducción	Planta de Tratamiento	Tanques de Distribución	Redes De Distribución	**Total**
Sismo	1	1	1	1	1	1	1	**7**
Deslizamiento	5	5	5	5	2	1	1	**24**
Avenidas Torrenciales	5	5	5	5	1	1	1	**23**
Inundaciones	1	1	2	1	1	1	1	**8**
Sequía	3	3	1	1	1	1	1	**11**
Actividades Antrópicas	3	3	1	1	1	1	1	**11**
Otras	1	1	1	2	1	1	1	**8**
Subtotal	**19**	**19**	**16**	**14**	**8**	**7**	**7**	**92**

Fuente: Diagnóstico de campo y entrevistas personal del municipio

Tabla 11. Identificación del nivel de amenaza

Valor	Daño Generado por la Amenaza
1	No hay deterioro, no se presenta afectación a la infraestructura
2	Daño/afectación reparable en horas. No afecta de forma significativa los componentes, es posible arreglarlo en corto tiempo (horas). Solo causa daños menores
3	Daño/afectación con limitada reparación. Afecta el componente de manera que no puede ser reparado rápidamente (se requiere entre 1 y 5 días). Causa daños severos
5	Daño/afectaciones no reparables. El daño no puede ser arreglado, afecta completamente el componente. (se requiere reubicar la infraestructura o el componente)

Fuente: Diagnóstico de campo y entrevistas personal del municipio

Tabla 12. Identificación del nivel de amenaza

Amenaza	Componente del Sistema							
	Areas de Protección	Bocatoma Captación Aducción	Desarenador	Tubería de Conducción	Planta de Tratamiento	Tanques de Distribución	Redes de Distribución	**Total**
Sismo	1	1	1	1	1	1	1	**7**
Deslizamiento	5	5	5	5	2	1	1	**24**
Avenidas Torrenciales	5	5	5	5	1	1	1	**23**
Inundaciones	1	1	2	1	1	1	1	**8**
Sequía	3	3	1	1	1	1	1	**11**
Actividades Antrópicas	3	3	1	1	1	1	1	**11**
Otras	1	1	1	2	1	1	1	**8**
Subtotal	**19**	**19**	**16**	**14**	**8**	**7**	**7**	**92**

Fuente: Diagnóstico de campo y entrevistas personal del municipio

3.4.2. Matriz de riesgos

Identificadas las condiciones de amenaza y grado de exposición de cada uno de los componentes del sistema de acueducto, se presenta a continuación la matriz de riesgos identificada para cada componente. La Tabla 13 muestra y resume la condición de riesgo identificada y evaluada para cada uno de los componentes del sistema de distribución de agua del municipio de Mistrató.

Tabla 13. Matriz de riesgos de cada componente

Amenaza	Nivel De Exposición Frente A La Amenaza						
	Areas de Protección	Bocatoma Captación Aducción	Desarenador	Tubería de Conducción	Planta de Tratamiento	Tanques de Distribución	Redes de Distribución
Sismo	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
Deslizamiento	**A**	**A**	**A**	**A**	**B**	**B**	**B**
Avenidas Torrenciales	**A**	**A**	**A**	**A**	**B**	**B**	**B**
Inundaciones	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
Sequía	**M**	**M**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
Actividades Antrópicas	**M**	**M**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
Otras	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**

Fuente: Diagnóstico de campo y entrevistas personal del municipio

La matriz de riesgos señala que A: riesgo alto; M: riesgo medio; B; riesgo bajo. Es importante señalar que la condición de riesgo de mayor complejidad del sistema de acueducto del municipio de Mistrató está asociada a las amenazas deslizamientos/avenidas torrenciales y los componentes más expuestos son áreas de protección, captación (bocatoma), desarenador y tuberías de conducción.

4. Conclusiones

El estudio identifica eventos naturales y antrópicos como amenazas principales para el sistema de acueducto de Mistrató, destacando eventos torrenciales e inundaciones como los más críticos. Ello sugiere la necesidad de una planificación detallada y medidas preventivas para mitigar estos riesgos.

Los componentes bocatoma y tuberías de conducción, son los componentes del sistema de acueducto más vulnerables a deslizamientos y eventos torrenciales, en virtud de los eventos históricos que los han afectado y las actuales condiciones de ocupación y uso de los suelos, a lo largo de dichos componentes.

La investigación resalta la necesidad de una planificación y respuesta estratégica eficaz frente a desastres naturales y amenazas antrópicas, enfatizando la importancia de la preparación, la respuesta rápida y la recuperación postdesastre para minimizar los impactos en la comunidad y la infraestructura.

Se destaca la influencia del cambio climático y las modificaciones en el uso del suelo en la cuenca abastecedora, como los factores que en mayor medida afectan la calidad y cantidad del recurso hídrico, razón por la cual es necesario adaptarse a estas nuevas condiciones para garantizar la continuidad del servicio de acueducto.

Las actividades humanas, como la agricultura y la urbanización, incrementan la vulnerabilidad del sistema de acueducto a eventos como deslizamientos y contaminación, lo que requiere una gestión cuidadosa y regulaciones para mitigar dichas condiciones de riesgo.

La investigación destaca la importancia de mejorar la resiliencia del sistema de acueducto y su capacidad para recuperarse rápidamente ante la ocurrencia de eventos catastróficos, mediante la implementación de tecnologías avanzadas, mejoras en la infraestructura y capacitación permanente y periódica del personal de apoyo y de operaciones.

Es necesario involucrar a la comunidad y a todos los actores del municipio y externos a él que tienen alguna competencia sobre el sistema de acueducto, con el propósito de incrementar la conciencia pública sobre los riesgos y vulnerabilidades del sistema, para fomentar una cultura de prevención y preparación ante desastres naturales y amenazas antrópicas.

Referencias bibliográficas

Alam, M. (2019). *Decision Support on Risk Reduction Alternatives in Drinking Water Systems A multi-criteria analysis for making risk management decisions*. *August*.

Alshamsi, H. (2017). *Managing Major Emergencies: Recommendations to develop effective contingency planning in the United Arab Emirates* (Issue December).

Bata, M. T. H., Carriveau, R., & Ting, D. S. K. (2022). Urban water supply systems' resilience under earthquake scenario. *Scientific Reports*, *12*(1), 1–14. https://doi.org/10.1038/s41598-022-23126-8

Behzadi, F., Wasti, A., Steissberg, T. E., & Ray, P. A. (2022). Vulnerability assessment of drinking water supply under climate uncertainty using a river contamination risk (RANK) model. *Environmental Modelling and Software*, *150*, 105294. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105294

Bristow, E., Kanta, L., & Brumbelow, K. (2007). Coupled assessment of water and fire systems damages under attack and disaster scenarios. *Examining the Confluence of Environmental and Water Concerns - Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2006*. https://doi.org/10.1061/40856(200)29

Bruce, J. P. (1999). Disaster loss mitigation as an adaptation to climate variability and change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *4*(3–4), 295–306. https://doi.org/10.1023/a:1009615721957

Chang, S. E. (2003). Infrastructure Systems. *Resilience Engineering*, *4*(4), 31–42. https://doi.org/10.1017/cbo9781139026772.003

Chung, A. Q. H. (2014). *Emergency Preparedness and Response Planning : A Value-Based Approach to Preparing Coastal Communities for Sea Level Rise*. 212.

Cimellaro, G. P., Tinebra, A., Renschler, C., & Fragiadakis, M. (2016). New Resilience Index for Urban Water Distribution Networks. *Journal of Structural Engineering*,

142(8), 1–13. https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001433
Epstein, A. L., & Harding, G. H. (2019). Disaster planning and emergency preparedness. In *Clinical Engineering Handbook, Second Edition* (Second Edi). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813467-2.00099-7
Eriksson, K., & McConnell, A. (2011). Contingency planning for crisis management: Recipe for success or political fantasy? *Policy and Society*, *30*(2), 89–99. https://doi.org/10.1016/j.polsoc.2011.03.004
Garrick, D., & Hall, J. W. (2014). Water security and society: Risks, metrics, and pathways. *Annual Review of Environment and Resources*, *39*, 611–639. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-013012-093817
Gill, T. (2014). Building Resilience: Social Capital in Post-Disaster Recovery. *Social Science Japan Journal*, *17*(1), 118–122. https://doi.org/10.1093/ssjj/jyt046
Gonzáles, H. (1993). Mapa Geológico del departamento de Risaralda Geología y recursos Minerales. *Bogotá: Ingeominas*.
Grigg, N. S. (2003). Water utility security: Multiple hazards and multiple barriers. *Journal of Infrastructure Systems*, *9*(2), 81–88. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2003)9:2(81)
Guikema, S. D. (2009). Natural disaster risk analysis for critical infrastructure systems: An approach based on statistical learning theory. *Reliability Engineering and System Safety*, *94*(4), 855–860. https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.09.003
Hartmann, J., van der Aa, M., Wuijts, S., de Roda Husman, A. M., & van der Hoek, J. P. (2018). Risk governance of potential emerging risks to drinking water quality: Analysing current practices. *Environmental Science and Policy*, *84*(February), 97–104. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.02.015
Heegaard, P. E., Helvik, B. E., Trivedi, K. S., & Machida, F. (2015). Survivability as a generalization of recovery. *2015 11th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks, DRCN 2015*, 133–140. https://doi.org/10.1109/DRCN.2015.7149004
Kamaludin, T. M., Rusdin, A., Nirmalawati, Fadjar, A., & Wahab, A. (2022). Risk Management in the Development of a Regional Drinking Water Supply System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1075*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1075/1/012038
Kaneberg, E. (2018). *Emergency preparedness management and civil defence in Sweden : An all-hazards approach for developed countries' supply chains* (Issue 121).
LeBlanc, R. M. (2015). Building Resilience: Social Capital in Post-disaster Recovery by Daniel P. Aldrich. *The Journal of Japanese Studies*, *41*(1), 185–189. https://doi.org/10.1353/jjs.2015.0015
Li, H., & Uk, A. (2007). *Hierarchical Risk Assessment of Water Supply Systems CORE View metadata, citation and similar papers at core*. *March*.
Lindhe, A., Rosén, L., & Hokstad, P. (2010). Risk evaluation and decision support for drinking water systems. *Risk (Quality)*, *3000*(December), 4000.
Marques, J. R., & Da Conceição Cunha, M. (2011). Infrastructure management methodologies in risk situations. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, *6*(1), 1–12. https://doi.org/10.2495/SDP-V6-N1-1-12
Mottahedi, A., Sereshki, F., Ataei, M., Qarahasanlou, A. N., & Barabadi, A. (2021). The resilience of critical infrastructure systems: A systematic literature review. In *Energies* (Vol. 14, Issue 6). https://doi.org/10.3390/en14061571

Pagano, A., Giordano, R., Portoghese, I., Fratino, U., & Vurro, M. (2014). A Bayesian vulnerability assessment tool for drinking water mains under extreme events. *Natural Hazards*, *74*(3), 2193–2227. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1302-5

Pagano, A., Pluchinotta, I., Giordano, R., & Vurro, M. (2017). Drinking water supply in resilient cities: Notes from L'Aquila earthquake case study. *Sustainable Cities and Society*, *28*, 435–449. https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.005

Rak, J. R., Tchórzewska-Cieślak, B., & Pietrucha-Urbanik, K. (2019). A hazard assessment method for waterworks systems operating in self-government units. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(5), 1–12. https://doi.org/10.3390/ijerph16050767

Rucka, J. A. N., & Juhanak, T. (2006). *Risk Analysis of Water Distribution Systems*. 169–182.

Sathurshan, M., Saja, A., Thamboo, J., Haraguchi, M., & Navaratnam, S. (2022). Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review of Measurement Frameworks. In *Infrastructures* (Vol. 7, Issue 5). https://doi.org/10.3390/infrastructures7050067

Tchórzewska-Cieślak, B., Pietrucha-Urbanik, K., & Eid, M. (2021). Functional safety concept to support hazard assessment and risk management in water-supply systems. *Energies*, *14*(4). https://doi.org/10.3390/en14040947

Tramullas, J. (2013). Capítulo Iii Marco. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*(9), 1689–1699. http://virtual.urbe.edu/tesispub/0106891/cap03.pdf

Tuhov, L., & Ru, J. (2007). Hazard Identification and Risk Analysis. *Guidelines for Risk Based Process Safety*, 209–242. https://doi.org/10.1002/9780470925119.ch9

Vassiljev, A., Koppel, T., & Puust, R. (2012). Use of error analysis for calibration of water distribution systems. *Water Distribution Systems Analysis 2010 - Proceedings of the 12th International Conference, WDSA 2010*, 1256–1269. https://doi.org/10.1061/41203(425)113

Wang, Y., Au, S. K., & Fu, Q. (2010). Seismic risk assessment and mitigation of water supply systems. *Earthquake Spectra*, *26*(1), 257–274. https://doi.org/10.1193/1.3276900

Wu, D., Wang, H., Mohammed, H., & Seidu, R. (2020). Quality Risk Analysis for Sustainable Smart Water Supply Using Data Perception. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, *5*(3), 377–388. https://doi.org/10.1109/TSUSC.2019.2929953