

ANÁLISIS TÉCNICO DE ALTERNATIVAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO  
URBANO EN LA CIUDAD DE SANTA MARTA

VANNESSA CAROLINA VALLES VALDEBLÁNQUEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, COLOMBIA  
2024

ANÁLISIS TÉCNICO Y ALTERNATIVAS PARA OPTIMIZAR EL SISTEMA DE ACUEDUCTO URBANO EN  
LA CIUDAD DE SANTA MARTA, MAGDALENA

VANNESSA CAROLINA VALLES VALDEBLÁNQUEZ

PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE SOLUCIÓN A UN PROBLEMA DE  
INGENIERÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

DIRECTOR:

ING. ANTONIO PREZIOSI RIBERO, PhD

CODIRECTOR:

ING. DAVID DE LEÓN PÉREZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, COLOMBIA  
2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

ANTONIO PREZIOSI RIBERO  
Director Trabajo de Grado

## **Dedicatoria**

A mis padres, por ser mi pilar y apoyo incondicional en cada momento. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y el amor por el conocimiento. Este logro es tanto mío como suyo.

Al Ing. David De León Pérez por compartir sus valiosos conocimientos y brindar la información crucial que permitió desarrollar gran parte de este proyecto de manera más precisa y fundamentada. Su experiencia fue esencial para lograr un resultado más completo y realista.

Al Ing. Antonio Preziosi Ribero, mi director de grado, por su guía paciente, sus valiosos consejos y su constante apoyo. Su confianza en mí y su acompañamiento fueron fundamentales para superar los desafíos y culminar con éxito este trabajo. Su dedicación no solo me guió académicamente, sino que también me motivó a seguir adelante. Le deseo siempre lo mejor y agradezco de corazón su invaluable ayuda.

A ESSMAR por la información y los recursos proporcionados fueron esenciales para el desarrollo de esta investigación. Este trabajo es el resultado de un esfuerzo conjunto, de todas las personas que me han acompañado en este viaje. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

## Tabla de Contenido

Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
Justificación.....	14
Objetivos.....	16
Objetivo General:.....	16
Objetivos Específicos:.....	16
Marco Referencial.....	17
Marco de Antecedentes.....	17
Antecedentes Internacionales.....	17
Antecedentes Nacionales.....	19
Marco Teórico.....	23
Sistema de abastecimiento de agua.....	23
Fuente de abastecimiento.....	23
Obras de captación.....	23
Obras de conducción.....	23
Tratamiento del agua.....	24
Almacenamiento.....	24
Fuentes de abastecimiento-Sistemas principales.....	24
Pérdidas de agua en el abastecimiento de agua.....	25
Pérdidas Físicas.....	26
Pérdidas Comerciales.....	26
Marco Geográfico.....	26
Marco Legal.....	29
Metodología.....	30
Cronograma.....	32
Aspectos generales.....	32
Población.....	33
Población actual.....	33
Red de Distribución.....	38

Presiones .....	47
Modelos para Análisis Hidráulico .....	48
Escenario 1: Planta desalinizadora Taganga.....	49
Escenario 2: Planta de Tratamiento de Agua Potable Toribio.....	51
Escenario 3: Planta desalinizadora PRODECO.....	53
Escenario 4: Planta desalinizadora Salguero. ....	55
Escenario 5: Planta desalinizadora Bahía .....	57
Escenario 6: Modelo combinado. ....	59
Análisis y Resultados.....	61
Conclusiones.....	63
Bibliografía .....	66

## Tabla de Ilustraciones

Figura 1. Datos de cobertura del acueducto en porcentaje entre los años 2005 y 2018. Tomado de un artículo realizado por el Departamento de Planeación Nacional en 2018, Vivienda y acceso a servicios públicos; fuente <a href="https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/d">https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/d</a> .....	20
Figura 2.Captación por gravedad y conducción por gravedad. Tomado de López Cualla, Ricardo. Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. 2 ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003. p. 27 .....	25
Figura 3. Ubicación de Santa Marta, Tomado de Google Earth.....	27
Figura 4. Ubicación del Rodadero, Tomado de Google Earth.....	28
Figura 5. Diagrama de flujo metodología del trabajo .....	31
Figura 6. Cronograma del proyecto .....	32
Figura 7. Crecimiento de la Población del año 2018-2023. Tomado de: <a href="https://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/47001T7T000.PDF">https://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/47001T7T000.PDF</a> .....	34
Figura 8. Comparación método Aritmético y Geométrico .....	37
Figura 9.Ubicación de las zonas en la ciudad de Santa Marta según ESSMAR .....	39
Figura 10. Zona Norte en la ciudad de Santa Marta. Tomado de: Programación de Distribución del agua en Santa Marta - ESSMAR E.S.P.....	40
Figura 11. Zona Sur en la ciudad de Santa Marta. Tomado de: Programación de Distribución del agua en Santa Marta - ESSMAR E.S.P.....	41
Figura 12. Situación sistema de abastecimiento Santa Marta tomado de Plan de acción Santa Marta Sostenible by Findeter S.A. - Issuu .....	41
Figura 13. Modelo base del sistema de acueducto de Santa Marta en el software QGIS.....	42
Figura 14. Carga en el sistema para el modelo base del sistema de acueducto. ....	43

Figura 15. Presión en el sistema para el modelo base del sistema de acueducto.....	44
Figura 16. Modelo QGIS para la presión en sistema norte.....	45
Figura 17. Modelo QGIS para el caudal en sistema de acueducto. ....	46
Figura 18. Variación de las presiones durante el día .....	48
Figura 19. Modelo de desalinizadora ubicada en la zona de Taganga.....	49
Figura 20. Selección de nodos a comparar del modelo de Taganga.....	50
Figura 21. Escenario PTAP Toribio, Fuente propia .....	52
Figura 22. Escenario Desalinizadora PRODECO, Fuente propia.....	54
Figura 23. Escenario Desalinizadora INVEMAR, Fuente propia.....	55
Figura 24. Escenario Desalinizadora BAHÍA, Fuente propia.....	58

## Resumen

El propósito principal de este proyecto de grado es evaluar la red de distribución de agua potable en Santa Marta y proponer mejoras para optimizar el sistema de acueducto urbano. Para lograr este objetivo, se ha diseñado una metodología que combina un enfoque descriptivo y analítico. En primer lugar, se utiliza un método descriptivo para recopilar información relevante a través de la toma de datos y la consulta de fuentes relacionadas con el estudio de la situación actual del acueducto en la ciudad. Este análisis permite determinar el estado actual del sistema. Posteriormente, se emplea un enfoque analítico para examinar los datos recopilados y llegar a una síntesis que oriente las propuestas de mejora.

La propuesta de optimización se centra en la exploración de tres posibles fuentes adicionales de agua, con el fin de mejorar el suministro en áreas críticas. Estas áreas se identifican considerando diversos criterios, como la alta demanda, especialmente en zonas turísticas, y la baja presión en ciertos puntos del sistema. Se llevan a cabo comparaciones en estos puntos críticos para determinar cuáles de los casos propuestos generarían el mayor aumento o mejora en el sistema de distribución de agua.

**Palabras claves:** Acueducto, Nuevas fuentes de agua, Optimización del sistema, Análisis de datos.

## **Abstract**

The main purpose of this project is to assess the drinking water distribution network in Santa Marta and present enhancements to optimize the urban aqueduct system. To achieve this goal, the methodology that has been devised blends a descriptive and analytical approach. Initially, a descriptive method is utilized to gather pertinent information through data collection and consultation of sources related to the current state of the aqueduct in the city. This analysis enables the determination of the current system status. Subsequently, an analytical approach is employed to explore the collected data and arrive at a synthesis guiding improvement proposals.

The optimization program focuses on exploring three potential cases of additional water sources to enhance supply in critical areas. These areas are identified considering various criteria, such as high demand, particularly in tourist zones, and low Pressure in certain system points. Detailed comparisons are conducted at these critical points to ascertain which of the proposed scenarios would yield the greatest increase or enhancement in the water distribution system.

**Keywords:** Aqueduct, New water sources, System optimization, Data analysis, Pressure

## Introducción

El agua es un recurso vital para la humanidad, ya que satisface necesidades básicas y es fundamental para realizar actividades domésticas e industriales. Los acueductos desempeñan una función crucial al captar y suministrar agua potable a las comunidades. No obstante, cuando estos sistemas se vuelven obsoletos debido al crecimiento demográfico o a deficiencias en sus estructuras, es imprescindible buscar alternativas que permitan mejorar su eficiencia y cumplir con su propósito original.

Santa Marta D.T.C.H es la capital del departamento de Magdalena, Colombia. Se ubica al norte del país, con una superficie de 2.393 km<sup>2</sup>, con una población de 499.192 hab. según el último censo general de población del DANE 2018, y adicionalmente un aproximado de 60.522 Inmigrantes venezolanos (GIFMM, 2023). Fue fundada el 29 de julio de 1525, lo que la hace la ciudad en pie más antigua de Colombia y América Latina. Teniendo en cuenta su antigüedad e importancia, la infraestructura de abastecimiento de agua potable y sistemas de drenaje de aguas residuales actual de la ciudad debería estar en mejores condiciones. Actualmente Santa Marta D.T.C.H. es una de las ciudades en Colombia con mayores problemas por desabastecimiento de agua, debido a la falta de inversión de las entidades territoriales y privadas responsables de operar los sistemas de acueducto y alcantarillado sanitario del distrito.

Además, existen varios sectores donde los mismos habitantes de la comunidad instalaron redes de distribución de agua potable, sin supervisión técnica o control de calidad, lo que resultó en un sistema de acueducto y alcantarillado construido hace más de 70 años (ESSMAR, 2023) con falta de mantenimiento y, donde los materiales ya cumplieron su vida útil e incluso los

diámetros de las tuberías siguen siendo los mismos. Debido al crecimiento constante de la población sumado a diferentes fenómenos sociales y al auge del turismo en la ciudad, se ha generado una expansión urbana significativa y un incremento en la cantidad de población flotante en determinadas épocas del año. Este aumento demográfico ha generado desafíos en la capacidad del acueducto para satisfacer las necesidades tanto de la población permanente como de la población flotante en la ciudad por la pobre oferta que tiene el sistema de abastecimiento de agua potable frente a la demanda. Esto pone de manifiesto las deficiencias en la planificación, gestión y manejo del servicio público de acueducto en la zona urbana del distrito, tal como fueron contemplados en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT500). (Alcaldía de Santa Marta, 2020).

Otra situación en Santa Marta con el suministro de agua potable está vinculada a la presencia generalizada de depósitos en las viviendas. Estos depósitos, utilizados para almacenar agua, afectan la presión del sistema, dificultando la distribución eficiente del agua en comparación a ciudades como Bogotá, donde el suministro llega normalmente a las instalaciones hidráulicas directamente de las tuberías del acueducto.

El suministro de agua para el distrito de Santa Marta se obtiene a través de cinco fuentes principales: los ríos Piedra, Manzanares, y Gaira, y los acuíferos del Río Manzanares y el Río Gaira. Cada una de las fuentes superficiales cuenta con un desarenador y un sistema de aducción independiente. El agua extraída de los ríos Manzanares y Piedras se trata en la planta de Mamatoco, la cual tiene la capacidad teórica máxima de producir un caudal de 800 L/s (Jiménez, 2014) y actualmente por deficiencias y fugas llega a un promedio de 700 L/s. El caudal extraído

del río Gaira se trata en la planta de tratamiento El Roble, en el sector de Puerto Mosquito. Esta planta cuenta con una capacidad de 400 L/s. En la actualidad, se encuentra en proceso de ampliación, con lo cual se llegaría a una capacidad máxima teórica de 550 L/s

Además de estas fuentes superficiales, la ciudad también dispone de un sistema de acuíferos que se alimenta principalmente de los ríos Manzanares, Gaira y Quebrada Tamacá siendo esta última un afluente del río Manzanares. Durante la temporada de verano, estos pozos subterráneos suministran casi el 50% del agua consumida en la ciudad.

Según datos del DANE, en 2018 la planta de tratamientos Mamatoco en Santa Marta solo operó a un 44% de su capacidad máxima y con una cobertura del 78,2% de la población para el servicio de acueducto (Ayala & Rodríguez, 2019). Por la deficiencia relacionada con el incumplimiento de la demanda necesaria por los habitantes y la insuficiente estructura, que no soporta el crecimiento de la población en los últimos años, se han generado efectos adversos por la demanda de agua insatisfecha, como impacto negativo en la economía local e incluso posible aumento de enfermedades. (Álvarez, Cantillo, Rico, & Salazar, 2013)

La falta de capacidad operativa de las plantas de tratamiento de Santa Marta se agrava debido a la ausencia de un Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado (PMAA). Esta falta de planificación integral ha contribuido significativamente a la insuficiencia en el suministro de agua potable en la ciudad. La carencia de un PMAA es un problema recurrente en los planes de desarrollo municipales, y se observa que muchos municipios no cumplen con las especificaciones definidas por el RAS. Santa Marta no es la excepción, lo que motiva este trabajo a evaluar la red de distribución actual de agua potable en la ciudad y proponer mejoras

para optimizar el sistema de acueducto urbano. Se busca ofrecer opciones que mejoren la disponibilidad de suministros en el distrito, sirviendo de referencia inicial para abordar los problemas identificados por las autoridades locales y las empresas prestadoras de servicios. Además, se pretende ofrecer un panorama de alternativas que puedan mejorar la oferta de abastecimiento en la ciudad, proporcionando así una herramienta de consulta inicial para encontrar soluciones a la problemática mencionada.

### **Justificación**

El recurso agua es vital para el crecimiento económico y desarrollo social dentro de cualquier asentamiento humano, por lo que es indispensable y necesaria la correcta prestación del servicio para los ciudadanos y, de igual forma, garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (DNP, 2015) . La falta de este mismo limita de manera importante el desarrollo de los sectores económicos dentro cualquier ciudad.

En Santa Marta, el suministro de agua potable enfrenta desafíos significativos que afectan la calidad de vida de sus habitantes y el desarrollo sostenible de la región. A pesar de ser una de las ciudades más antiguas de Colombia, la falta de inversión y planificación adecuada por parte de las entidades territoriales y privadas responsables ha llevado a que la infraestructura de acueducto y alcantarillado, construida hace más de 40 años, se encuentre obsoleta y deficiente, lo que ha generado graves problemas de desabastecimiento de agua.

Santa Marta basa su economía principalmente en el turismo. Por lo tanto, la falta de este recurso produce una disminución en la calidad de saneamiento y agua limpia prestada a los

aproximadamente 3 millones de turistas que visitan la ciudad al año (Caracol Radio Santa Marta, 2021). La ciudad se abastece de agua potable mediante los ríos Piedra, Manzanares y Gaira (Alcaldía de Santa Marta, 2020), cuyas aguas son tratadas en las plantas Mamatoco y Roble. Además, cuenta con un total aproximado de 52 pozos subterráneos, de los cuales solo 38 se encuentran activos. Sin embargo, debido al inadecuado abastecimiento de agua generado por un sistema defectuoso y un caudal insuficiente en épocas de sequía, las necesidades poblacionales no son suplidas adecuadamente, lo que ha llevado a medidas como la compra de botellones o carrotanques, creando negocios alrededor de este recurso e incentivando conexiones ilegales que generan altas pérdidas en el sistema (Montero, Henríquez, Bedoya, & Mendoza, 2018). Este desabastecimiento afecta especialmente a las zonas críticas de la ciudad, donde el servicio de agua es irregular, llegando incluso a recibir agua cada 8-10 días (Noticias Caracol, 2023). Esta situación se agrava durante las temporadas de alto flujo turístico, como la Semana Santa, que generalmente coincide con el inicio del año hidrológico en la región.

Para abordar estos desafíos, se han propuesto soluciones que incluyen la disminución de las pérdidas generadas por el mal estado del sistema y las conexiones ilegales, la construcción de una planta desalinizadora en una playa cerca de Gaira, y la intervención en nuevos ríos como Guachaca y Buritaca. Estas medidas buscan incrementar el caudal disponible y mejorar el acceso al servicio de agua potable en Santa Marta, garantizando un desarrollo económico y social sostenible en la ciudad.

## **Objetivos**

### **Objetivo General:**

- Evaluar la red de distribución actual de agua potable en Santa Marta y proponer mejoras para optimizar el sistema de acueducto urbano.

### **Objetivos Específicos:**

- Evaluar información actual obtenida acerca de conexiones, fuentes y distribución.
- Presentar una propuesta, según los análisis técnicos realizados al acueducto de Santa Marta, evaluando las posibles mejoras al sistema de distribución por medio de modelación numérica.
- Comparar los planes de expansión propuestos, para generar una propuesta eficiente que mejore la distribución de agua potable en Santa Marta

## **Marco Referencial**

### **Marco de Antecedentes**

En este marco se presenta la recopilación de antecedentes que comprenden proyectos, diagnósticos, análisis, informes y diseños anteriormente realizados que proveerán de información necesaria para estructurar el estado del arte. De acuerdo con esta información, se pretende definir mejores parámetros a la hora de formular el análisis técnico para mejora del sistema de acueducto en la ciudad de Santa Marta.

### **Antecedentes Internacionales**

Según Jaquez (2006) en el World Water Council<sup>1</sup> Se dio a conocer que en Latinoamérica existen 77 millones de personas que carecen de acceso a agua potable. A pesar de que esta zona cuenta con alrededor del 31% de las fuentes de agua potable en el mundo, podría ser una de las regiones más afectadas en una eventual crisis provocada por el cambio climático. En algunos países, como el Perú, cerca del 90% de la población cuenta con abastecimiento de agua, el servicio presenta importantes limitaciones, con un suministro intermitente, baja presión y calidad deficiente del agua potable, creando problemas de saneamiento, enfermedades entre otras.

Según March, H., Sauri, D, & Zapana, L. (2021) en su artículo sobre Las desigualdades en el acceso al agua en ciudades latinoamericanas de rápido crecimiento: El caso de Arequipa, Perú, la expansión demográfica ha resultado en una disminución de la calidad de los servicios

---

<sup>1</sup> Es una organización internacional cuya misión es tomar acción sobre problemas críticos del agua. Se centra en las dimensiones políticas de la seguridad hídrica, la adaptación y la sostenibilidad.

tanto en los centros urbanos como en las periferias. Se presentaron soluciones para mejorar la disponibilidad y accesibilidad, sin embargo, estas mejoras implicarían un aumento de las tarifas las cuales afectan en mayor proporción a la periferia urbana, esta misma combina mecanismos de abastecimiento de agua "formal" e "informal", por lo que, con el fin de mejorar el servicio en estas comunidades, es importante legalizar estas alternativas de abastecimiento. Finalmente, frente a estas realidades de abastecimiento desigual, un esfuerzo conjunto con políticas más inclusivas puede ayudar a mejorar la prestación de un servicio tan esencial como el agua.

Otro proyecto realizado en Perú "Optimization of Lima Water and Sewerage Systems - Procurement Plan", busca optimizar el sistema de acueducto y alcantarillado con el objetivo de mejorar la eficiencia y confiabilidad del servicio en la zona norte de Lima. Dentro del proyecto se definen tres elementos los cuales consisten en: Rehabilitación del sistema de acueducto con la construcción nuevas líneas de tuberías las cuales beneficiarán a más de 158.000 personas de bajos recursos, aumentar la eficiencia del Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL) construyendo nuevas plantas de tratamiento para así aumentar el alcance y, por último, mejorar las gestiones de proyectos en el SEDAPAL.

Según el último estudio de Alvarado & De la Vega, (2022) en World Resources Institute del Pacto Mundial de las Naciones Unidas, Chile se encuentra ubicado como el primer país en Latinoamérica con un "estrés hídrico alto" lo que significa que la demanda de agua es mayor a la disponible. Por eso, en la región de Maule, en el centro de Chile, realizaron un plan maestro para mejorar la distribución de los recursos hídricos. En este proyecto decidieron definir y sectorizar las principales fuentes de agua como acuíferos, redes hidrometeorológicas y sus niveles de caudal para analizar la oferta y demanda de recursos hídricos en cuencas críticas,

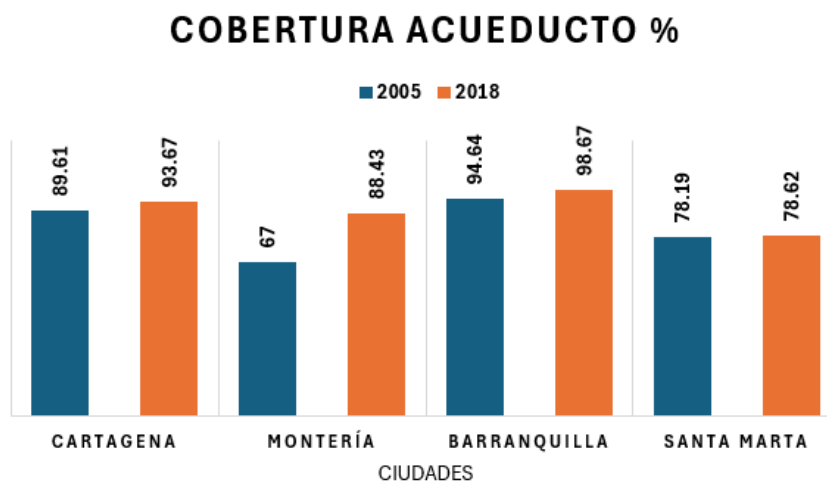
mejoramiento y ampliación de red de aguas subterráneas y evaluación de los recursos para presentar un mejor servicio a la población.

### **Antecedentes Nacionales**

En la costa colombiana se han presenciado diversos desafíos relacionados con la falta de abastecimiento de agua. Algunos de los factores que contribuyen a esta problemática incluyen la variabilidad climática, falta de infraestructura adecuada e incluso la gestión ineficiente del agua. Desde la promulgación de la Constitución de 1991, en el territorio colombiano se ha iniciado la unificación del sector privado en el desarrollo de sistemas de acueductos. Gracias a las estrategias implementadas por el Gobierno nacional para la reactivación económica y social, en el departamento de Bolívar, se asignó una inversión de \$85.981 millones de pesos en 2021, (El Universal). Entre los contratos adjudicados se encuentran los proyectos de San Estanislao de Kotska y San Juan, en colaboración con Aguas de Bolívar SA ESP. Estas iniciativas tienen como objetivo mejorar el sistema de infraestructura con la instalación de 30.454 metros lineales de tubería, incluyendo colectores y una línea de impulsión. Asimismo, se planea la construcción de una estación de bombeo equipada con 4 bombas sumergibles, capaz de bombear 165 L/s. Estas obras se añadirán posteriormente a la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en la zona (El Universal, 2021).

En el caso del departamento de Magdalena, incluida Santa Marta, se observa un estancamiento en cobertura y calidad de los servicios de acueducto en comparación con otros municipios. Según datos del Departamento Nacional de Planeación (DNP), Santa Marta cuenta con una cobertura de solo el 78%, siendo la más baja en comparación con ciudades como Cartagena, Montería y Barranquilla, tal como se muestra en la Figura 1.

En cuanto al crecimiento y desarrollo de la cobertura de acueducto a lo largo de 13 años, se evidencia un aumento mínimo para Santa Marta, con un incremento de tan solo el 0,5%, en contraste con los municipios mencionados.



*Figura 1. Datos de cobertura del acueducto en porcentaje entre los años 2005 y 2018. Tomado de un artículo realizado por el Departamento de Planeación Nacional en 2018, Vivienda y acceso a servicios públicos; fuente <https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/d>*

Esta misma problemática no solo se presenta en la costa colombiana, sino que también en diferentes municipios y veredas al interior del país. Por ejemplo, en algunos municipios de Boyacá, como Paipa, se han realizado diferentes investigaciones, una de estas denominada “Estudio de caso para la optimización del sistema de acueducto del municipio de Paipa departamento de Boyacá y búsqueda de fuentes alternativas para el abastecimiento de agua”, tiene como objetivo optimizar y brindar alternativas para mejorar el abastecimiento y correspondientemente la calidad de vida de la población. La situación problema que enfrenta Paipa es que las nuevas urbanizaciones construidas al estar ubicadas en una cota mayor presentan problemas de presión por lo que, como solución, se planteó la construcción de tres tanques alimentados por bombeo. De igual manera, la parte sur donde se encuentra el sector hotelero

presenta problemas de abastecimiento afectando al turismo y a la economía de Paipa; por eso los hoteles y centros de convención han tomado medidas de solución propias. Dentro de este proyecto se realizaron proyecciones de población indicando que según lo previsto será necesario el uso de motobombas ya que la población se expandirá hacia las zonas más altas; De igual manera también presenta como soluciones la construcción, reformación y ampliación de algunas tuberías y el aumento de volumen de los tanques de almacenamiento. (Cruz 2015)

En Tibaná, otro municipio ubicado Boyacense, se realizó una tesis acerca de la “Modelación y optimización de la red de acueducto urbano del municipio de Tibaná-Boyacá”. Aquí, se explican los problemas de saneamiento en Tibaná, que a pesar de ser un municipio pequeño cuenta con problemas de abastecimiento en la población, por lo que presenta como solución mejorar el sistema y redes de acueducto con el fin de mejorar la calidad de vida. Las soluciones se modelaron en EPANET y en el software de QGIS para evaluar el estado de la red y su alcance. Tibaná presenta una problemática centrada en que la red de acueducto presenta graves deficiencias en cuanto a la prestación del servicio, un 30% del total de la red presenta presiones por debajo de los 15 metros columna de agua (mca) y un 51% del total de red presenta presiones por encima de los 50 mca, dejando así únicamente un 19% que cumple con las especificaciones exigidas por el RAS 2000. (Sarmiento & Silva, 2017)

Por estos mismos problemas, la mejor alternativa presentada en este proyecto fue la del uso de dos válvulas que regulan la presión. La fuente del municipio de Tibaná-Boyacá no abastece correctamente la demanda poblacional por lo que también se plantearon alternativas de fuentes complementarias que ayuden a la regulación del servicio.

Tanto en la investigación de Tibaná, como en la de Paipa, se presentan situaciones similares a las que se ve enfrentada la ciudad de Santa Marta. Dentro de ellas se destacan los problemas de presión, fuentes de abastecimiento insuficientes o con problemas y demandas excesivas debido a la cantidad de población, entre otras. En síntesis, ambas fuentes serán una guía importante para el desarrollo de este mismo proyecto y búsqueda de soluciones.

Asimismo, la Universidad de Los Andes ha llevado a cabo otras investigaciones, como el estudio titulado "Guía de mejores prácticas para la ejecución de proyectos de Asociación Público-Privada en el sector de agua y saneamiento, un caso de estudio en Santa Marta". Este trabajo resalta la importancia de la implementación de las APP como medio para generar ventajas significativas, tales como la mejora en la gestión, la reducción de las carencias en la cobertura, la elevación de la calidad de los servicios y la garantía de disponibilidad ininterrumpida las 24 horas del día. Este proyecto permite examinar cómo la crisis en la prestación de servicios públicos domiciliarios en el Distrito de Santa Marta puede abordarse mediante la aplicación de las buenas prácticas descritas en la guía. Estas prácticas demuestran ser beneficiosas en áreas que históricamente han presentado dificultades para la ejecución de proyectos similares. Estos aspectos incluyen la estabilidad política, ya que la participación del sector privado limita los cambios impulsados por grupos políticos de gobierno a gobierno, el diseño efectivo de las transacciones financieras que fomentan una mayor inversión, la gestión de riesgos de manera adecuada y controlada, y el fortalecimiento de la institucionalidad a través de un marco normativo y regulatorio sólido.

## **Marco Teórico**

### **Sistema de abastecimiento de agua**

El sistema de suministro de agua potable engloba todas las infraestructuras diseñadas para llevar el agua potable desde su fuente de captación hasta los hogares y edificaciones de una ciudad, pueblo o zona rural. Estas obras de ingeniería se encargan de garantizar el traslado eficiente y seguro del agua apta para el consumo humano desde el punto de captación hasta el punto de consumo final. Su objetivo es asegurar que el agua potable se abastezca en la cantidad y calidad necesarias para satisfacer las necesidades de las personas. (Jiménez, 2013)

### **Fuente de abastecimiento**

La fuente de donde se obtiene el agua puede ser de dos tipos: superficiales, como ríos, lagos, embalses y agua de lluvia, o subterráneas, que se encuentran a diferentes profundidades. La elección de la fuente de abastecimiento depende de factores como la ubicación, calidad y cantidad del agua disponible.

### **Obras de captación**

Las estructuras utilizadas para captar el agua dependen del tipo de fuente de abastecimiento. En general, para captar agua superficial se utilizan bocatomas, mientras que para captar aguas subterráneas se utilizan pozos.

### **Obras de conducción**

En un proyecto de suministro de agua, se requieren diversas conducciones para transportar el agua entre diferentes puntos. Estas conducciones pueden adoptar diferentes formas según la topografía y la longitud del recorrido.

### **Tratamiento del agua**

El agua en su estado natural no siempre es apta para el consumo humano. Es necesario aplicar un tratamiento mínimo para prevenir la contaminación por organismos patógenos durante el transporte del agua.

### **Almacenamiento**

Se requiere almacenar agua en un tanque durante los períodos de baja demanda y utilizarla en momentos de alta demanda por parte de la comunidad.

### **Fuentes de abastecimiento-Sistemas principales**

Los sistemas principales son utilizados para poblaciones pequeñas pero estructuradas (municipios). Ver la Tabla 1 y la Figura 2.

*Tabla 1. Tipos de captación y conducción en sistemas principales*

Captación	Tipo de Flujo
Gravedad	<ul style="list-style-type: none"><li>• Flujo en conducción a superficie libre</li><li>• Flujo en conducción forzada</li></ul>
Bombeo	<ul style="list-style-type: none"><li>• Flujo en conducción a superficie libre</li><li>• Flujo en conducción forzada</li></ul>

En áreas montañosas se utilizan sistemas de agua potable por gravedad, aprovechando la topografía del terreno para llevar el agua desde una fuente en la parte más alta hasta las viviendas en zonas más bajas. Estos sistemas se basan en el uso de válvulas para controlar el flujo de agua y asegurar que el servicio llegue correctamente a todos los puntos de distribución, tanto hogares como fuentes públicas.

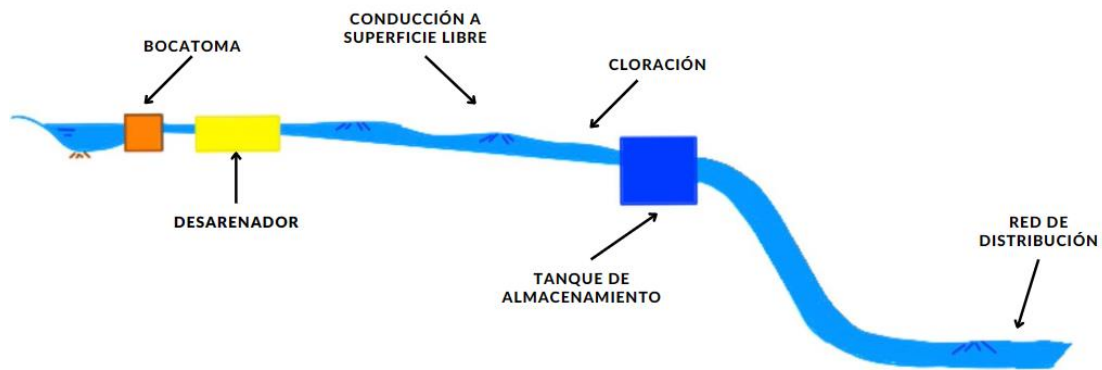


Figura 2. Captación por gravedad y conducción por gravedad. Tomado de López Cualla, Ricardo. Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. 2 ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003. p. 27

## Pérdidas de agua en el abastecimiento de agua

Al diseñar un sistema de transporte de agua tratada desde las plantas de tratamiento hasta los tanques de almacenamiento o compensación, es importante determinar las pérdidas en las tuberías después de la planta de tratamiento y antes del inicio de la red de distribución, considerando también los posibles desbordamientos e infiltraciones en los tanques de almacenamiento o compensación. Estas pérdidas deben representar un porcentaje del caudal medio diario, y ese porcentaje debe ser inferior al 2%. (EPM, 2013)

### ***Pérdidas Físicas***

Las pérdidas físicas son las fugas que ocurren en tuberías, juntas, válvulas y otros componentes del sistema de distribución, causadas por deterioro, corrosión, daño mecánico, uniones mal selladas, componentes de baja calidad o desbordamientos en tanques sin sistemas de control adecuados.

### ***Pérdidas Comerciales***

Las pérdidas comerciales incluyen agua que se utiliza, pero no se factura correctamente debido a problemas como conexiones ilegales, medición defectuosa por medidores que no registran adecuadamente el consumo y errores administrativos en la facturación y gestión de cuentas.

## **Marco Geográfico**

Santa Marta, se encuentra a orillas de la bahía del mismo nombre sobre el Mar Caribe, en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta en el departamento del Magdalena. Sus coordenadas geográficas son: 11° 14' 50" de latitud norte y 74° 12' 06" de latitud oeste. La altura media de la ciudad es de 2 msnm, pero con una diferencia de altura en el territorio del municipio, desde el nivel del mar hasta los 5.775 msnm en el Pico Cristóbal Colón, el más elevado de Colombia en la Sierra Nevada de Santa Marta. Ver Figura 3.

Santa Marta posee un clima tropical seco, con una temperatura media anual de 28 °C y una precipitación anual que varía entre 500 mm y 1,000 mm. La ciudad experimenta dos temporadas marcadas: la temporada seca (diciembre a abril) y la temporada de lluvias (mayo a noviembre).

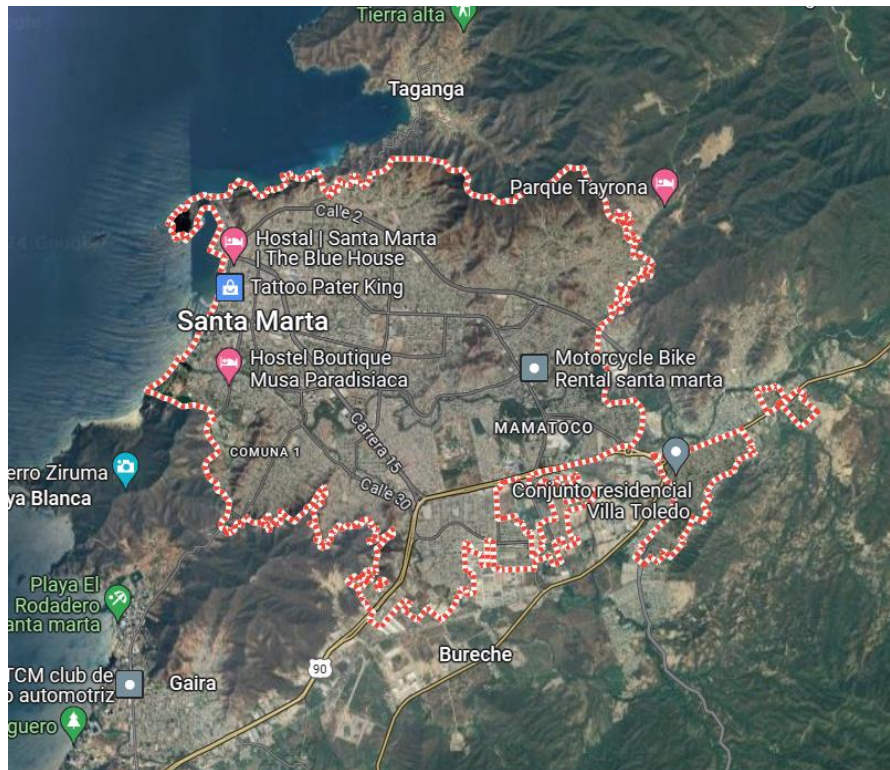


Figura 3. Ubicación de Santa Marta, Tomado de Google Earth

Santa Marta se divide administrativamente en comunas urbanas y corregimientos rurales. Entre los corregimientos destacan Taganga, un pequeño pueblo de pescadores situado a unos 5 km al norte de Santa Marta y El Rodadero, al sur de Santa Marta, a 8 km del centro de la ciudad. (Ver Figura 4).

El Rodadero es una de las zonas turísticas más importantes de Santa Marta, conocida por sus playas. La infraestructura turística incluye hoteles, restaurantes, bares y centros comerciales, que atraen a turistas tanto nacionales como internacionales.

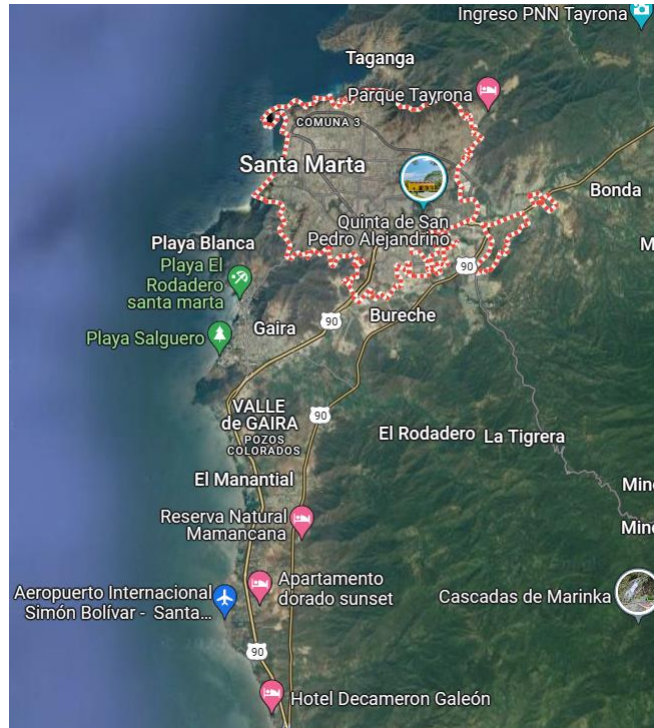


Figura 4. Ubicación del Rodadero, Tomado de Google Earth.

Ambos corregimientos son importantes tanto por su actividad económica como por su atractivo turístico. La economía de Santa Marta se basa, en el turismo, el comercio, las operaciones portuarias, la pesca y la agricultura. Los principales productos agrícolas son el banano, el café, el cacao, los árboles frutales y la yuca.

También es un puerto importante para el país por su posición geográfica, calado natural que facilita el paso de los barcos, considerándose el puerto más profundo de América y uno de los más seguros del mundo. Como resultado, muchos barcos mercantes llegan a la ciudad, lo que contribuye al desarrollo económico de la zona. (LEGISCOMEX, 2017)

## Marco Legal

Para la realización de este análisis es necesario realizar la revisión del marco normativo y legal.

Estas leyes y regulaciones proporcionan las bases jurídicas para la planificación, ejecución y supervisión de las mejoras en el sistema de acueducto. (Ver Tabla 2.)

*Tabla 2. Marco Legal*

Norma	Epígrafe	Contenido
Constitución Política de Colombia 1991	En ejercicio de su poder soberano, representado por sus delegatarios a la Asamblea Nacional Constituyente [...] en ejercicio de su poder soberano, representado por sus delegatarios a la Asamblea Nacional Constituyente	Artículo 334 Explotación de los recursos naturales, en el uso del suelo, en la producción, distribución, utilización y consumo de los bienes [...] con el fin de conseguir el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes.
Decreto 1575 de 2007	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.	Capítulo III. Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
Ley 142 de 1994	Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.	Artículo 168. Las empresas que hagan parte del sistema interconectado nacional deberán cumplir con el reglamento de operación y con los acuerdos adoptados
Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000	Serán principios orientadores de la planeación, diseño y ejecución de las obras y de las actividades de operación y mantenimiento objeto de la presente Resolución	Establece las condiciones técnicas para los diseños, construcciones y métodos relacionados con el ámbito del Agua Potable y Saneamiento Básico. También abarca la supervisión técnica, la intervención, la operación y el mantenimiento de estos sistemas
Decreto 475 de 1998	Por el cual se expiden normas técnicas de calidad del agua potable. El presidente de la República de Colombia, en ejercicio de las facultades conferidas por el numeral 11 del artículo 189 de la Constitución Política y, en desarrollo de las Leyes 09 de 1979 y 142 de 1999	Se emiten normas técnicas para asegurar la calidad del agua potable y regular las actividades vinculadas a su control para consumo humano. Estas normas garantizan que el agua suministrada por los prestadores de servicios públicos de acueducto sea adecuada para el consumo humano.

## Metodología

Se hizo un análisis técnico para optimizar el sistema de acueducto urbano en Santa Marta. Luego, se presentaron diversas alternativas destinadas a fomentar el desarrollo y mejorar la calidad de vida de los residentes en el sector urbano. En la primera fase, se revisó la literatura y los datos disponibles para comprender a fondo la problemática de la escasez de agua en diferentes áreas de la ciudad. Posteriormente, se delimitó la zona de estudio para identificar y ubicar las áreas problemáticas, recopilando la mayor cantidad de información posible. Luego, se procedió al análisis y modelación de estos datos utilizando el software EPANET y QGIS.

Con base en la información obtenida durante el análisis, se evaluaron cualitativa y cuantitativamente los impactos positivos y negativos que podría tener la implementación de diversos planes. El objetivo era determinar la alternativa más viable para el sistema de acueducto en la ciudad de Santa Marta. A continuación, se presenta una tabla que detalla las actividades y sus descripciones necesarias para la ejecución de este proyecto. Ver *Figura 5* y

*Tabla 3*

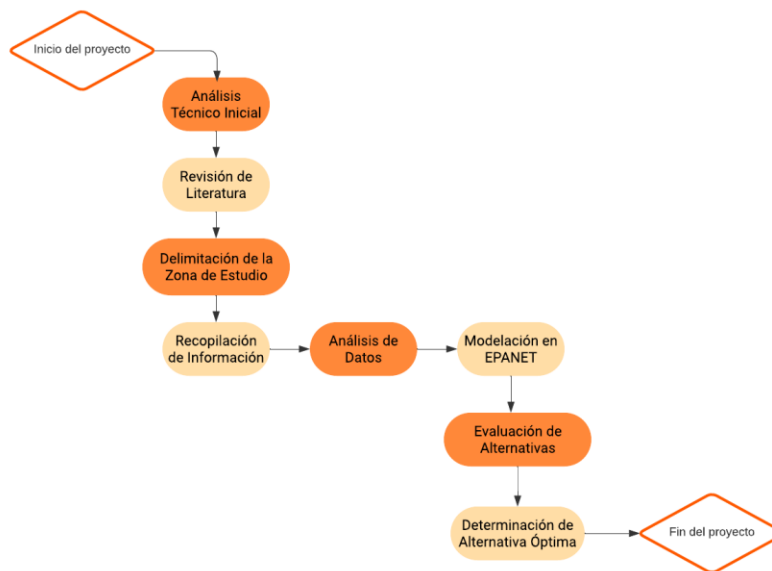


Figura 5. Diagrama de flujo metodología del trabajo

Tabla 3. Metodología del proyecto

<b>Objetivo</b>	<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Actores</b>
Evaluar información actual obtenida acerca de conexiones, fuentes y distribución.	Delimitar zona de estudio.	Mediante softwares trazar tramos relevantes y definir zona a trabajar	Autor
Presentar una propuesta, según los análisis técnicos realizados al acueducto de Santa Marta, evaluando las posibles mejoras al sistema de distribución por medio de modelación numérica.	Analizar estudios y diseños realizados previamente.	Revisar información presentada en los estudios y diseños previos y tomar toda aquella información relevante para el desarrollo del proyecto	Autor
	Organizar y filtrar los datos recogidos.	Después de obtener los estudios y los datos necesarios realizar decantación para el fin de nuestro proyecto	Autor
Comparar los planes de expansión propuestos, para generar una propuesta acorde	Modelación Numérica del Sistema de Distribución	Se utilizará software especializado para modelar el sistema de distribución del acueducto de Santa Marta, configurando el modelo con los datos recopilados previamente, incluidos parámetros como las presiones	Autor
	Evaluación de Mejoras y Elaboración de Propuesta	Con el modelo, se realizarán simulaciones y análisis para evaluar mejoras en el sistema del acueducto. Identificando áreas críticas para optimizar la red de tuberías. Se elaborará una propuesta con recomendaciones basadas en los resultados de la modelación.	Autor
Comparar los planes de expansión propuestos, para generar una propuesta acorde	Definir una estimación de los recursos necesarios para las alternativas.	Realizar presupuesto para las tres alternativas formuladas.	Autor
	Establecer el alcance del proyecto	Se establecerá un seguimiento al proyecto	Autor
	Determinar qué propuesta cumple los objetivos y parámetros afines a la solución esperada.	Realizar análisis de resultados a lo obtenido	Autor
	Definir propuesta final	Mediante la evaluación de aspectos y con base a conocimientos adquiridos se definirá la propuesta más viable y por qué	Autor

## Cronograma

La Figura 6 presenta un plan estratégico que abarca desde la planificación inicial hasta la entrega final del proyecto. Se desglosan las actividades clave, los plazos estimados y los recursos necesarios para llevar a cabo y culminar este proyecto.

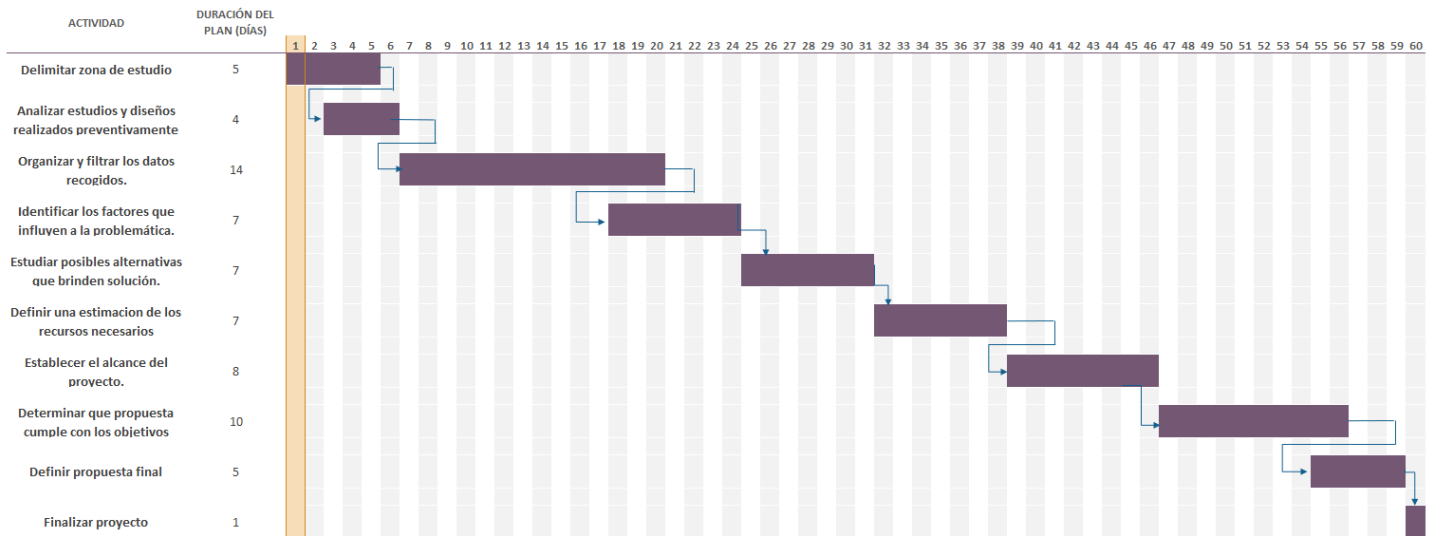


Figura 6. Cronograma del proyecto

## Aspectos generales

Para modelar la red y los cálculos pertinentes para determinar el tamaño y distribución de las tuberías en la red de suministro de agua, se empleará el programa QGIS, que permitirá realizar un análisis hidráulico. A través de este programa, se examinará la oferta y presión de agua en cada uno de los puntos de suministro, evaluando los aspectos relacionados con el flujo. Se logrará obtener un panorama de las necesidades de consumo diario de la ciudad de Santa Marta en cuanto a su abastecimiento de agua.

### Aspectos físicos de Santa Marta

- Extensión total: 2393.35 km<sup>2</sup>
- Altitud: 15 m.s.n.m
- Temperatura: 27 °C

### ***Población***

#### ***Población actual***

La población actual (2023) en la ciudad de Santa Marta es de 555,030 personas, según encuestas realizadas por el DANE.

#### 2.4.2 Proyección de población

A continuación, se muestra la proyección poblacional realizada por el DANE para la ciudad de Santa Marta. Esta se obtuvo de la página de internet oficial del DANE. Ver Tabla 4

*Tabla 4. Proyección y crecimiento de población según el DANE*

Año	Población Total (Habitantes)	Crecimiento Poblacional (Habitantes)
2018	499.192	-
2019	521.239	22.047
2020	538.612	17.373
2021	546.979	8.367
2022	552.391	5.142
2023	557.388	4.997

Proyección de población del municipio de Santa Marta, según la página web oficial del

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)

La proyección se hace hasta el año 2048, ya que el periodo de diseño es de 25 años, según el Título 2 - Capítulo 1 - Art. 40 de la Resolución 0330 de 2017. Gráficamente se muestra el crecimiento del municipio. Ver Figura 7:



Figura 7. Crecimiento de la Población del año 2018-2023. Tomado de: [https://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL\\_PDF\\_CG2005/47001T7T000.PDF](https://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/47001T7T000.PDF)

Actualmente, Santa Marta tiene una cobertura del 81% (Urieles, 2021) en el sistema de acueducto con un aproximado de 130.000 usuarios. Para realizar el cálculo de población a satisfacer, se utilizaron los datos de censos oficiales del DANE de 2005 y 2018. A continuación, se muestran los datos obtenidos. (Ver Tabla ).

Tabla 4. Crecimiento población según DANE

Año	Población
2005	414.387
2018	499.192
2023	577 388

Según el censo de 2018 el promedio de personas por hogar es de 3,6, si se multiplica el número de usuarios por el promedio de habitantes encontramos que actualmente el servicio se presta de media a 468.000 habitantes.

Para el cálculo de la población a satisfacer en el año 2048 se evaluaron los métodos propuestos en el libro “Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados” (López Cualla, 2003). Los 3 métodos que se evalúan son: Lineal, logarítmico y geométrico. Posteriormente al observar los métodos graficados se determina cuál es el mejor dependiendo de ciertos factores. Para este proyecto se decidió utilizar los métodos Aritmético y Geométrico que se muestra a continuación.

### Método Aritmético

Este método se basa en un incremento poblacional intrínseco que se encuentra en equilibrio con las tasas de mortalidad y emigración, como se menciona en el informe del MINVIVIENDA de 2010. La ecuación empleada para proyectar la población se expresa de la siguiente manera: Ver Ecuación 1. Después de reemplazar los valores de la *Tabla* en la ecuación se obtiene que, para 2048 habrá un aproximado de 803.779 Habitantes en Santa Marta. Ver Tabla 5 y Figura 8

*Ecuación 1. Método Aritmético*

$$P_f = P_{uc} + \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}} \times (T_f - T_{uc})$$

*Tabla 5. Crecimiento poblacional en Santa Marta según método Aritmético*

Año	Población
-----	-----------

---

2025	595.500
2030	640.778
2035	686.056
2040	731.334
2045	776.612
2048	803.779

---

### **Método Geométrico**

Este método es beneficioso para poblaciones con destacada actividad económica, lo que lleva a un notorio progreso y dispone de áreas de expansión significativas que pueden ofrecer servicios públicos fácilmente. La ecuación utilizada en este contexto es la siguiente. Ver

Ecuación 2 :

*Ecuación 2. Método Geométrico*

$$P_f = P_{uc} (1 + r)^{T_f - T_{uc}}$$

Tras realizar este método, arroja una proyección poblacional para 2048 de unos 91527 habitantes. Ver Tabla 6 y Figura 8

Tabla 6. Crecimiento poblacional en Santa Marta según método Geométrico

Año	Población
2025	599.066
2030	656.889
2035	720.293
2040	789.817
2045	866.051
2048	915.279

A continuación, se observa en la Figura 8 una comparación entre dos métodos de crecimiento poblacional: el método aritmético y el geométrico. Se analiza la evolución de la población con los años utilizando ambos enfoques, para identificar y comprender la tendencia en sus resultados.

Posteriormente, se presenta la Tabla 7 que relaciona el año, la población correspondiente a cada periodo y diferentes caudales previamente calculados. Esta tabla permitirá visualizar la relación entre el crecimiento poblacional y el caudal que debe garantizar el acueducto.

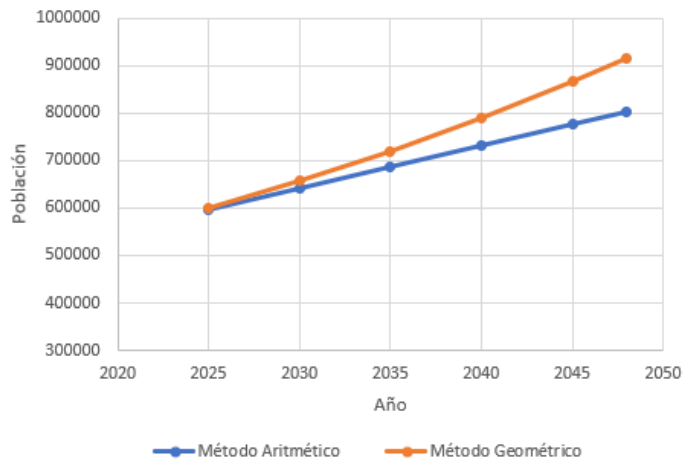


Figura 8. Comparación método Aritmético y Geométrico

Tabla 7. Dotación en Santa Marta

Año	Población promedio	Dotación Bruta	Caudal medio diario	Caudal máximo diario	Caudal máximo horario
2025	597.283	180	1245	1494	2241
2030	648.833	180	1352	1623	2434
2035	703.174	180	1465	1758	2637
2040	760.575	180	1585	1902	2853
2045	821.331	180	1712	2055	3082
2050	859.528	180	1791	2150	3224

### **Red de Distribución**

Como punto de partida se contó con información de un modelo hidráulico de la ciudad realizado por la empresa de aguas ESSMAR. Este modelo incluye diámetros y longitud de tuberías, localización de válvulas, características de puntos de interés como tanques de almacenamiento, reservorios, bombas entre otras. El proceso fue complementado con el apoyo de ingenieros de la compañía, que conocen el funcionamiento del sistema y así presentaron una modelación con datos reales.

En esta sección, se expondrán imágenes generadas a partir del modelo hidráulico implementado en el software QGIS con el complemento de QGISRed, enfocado en el sistema de acueducto de la ciudad de Santa Marta. Esto se usará como un diagnóstico actual del sistema, exhibiendo parámetros esenciales como las presiones, cargas totales y otros factores.

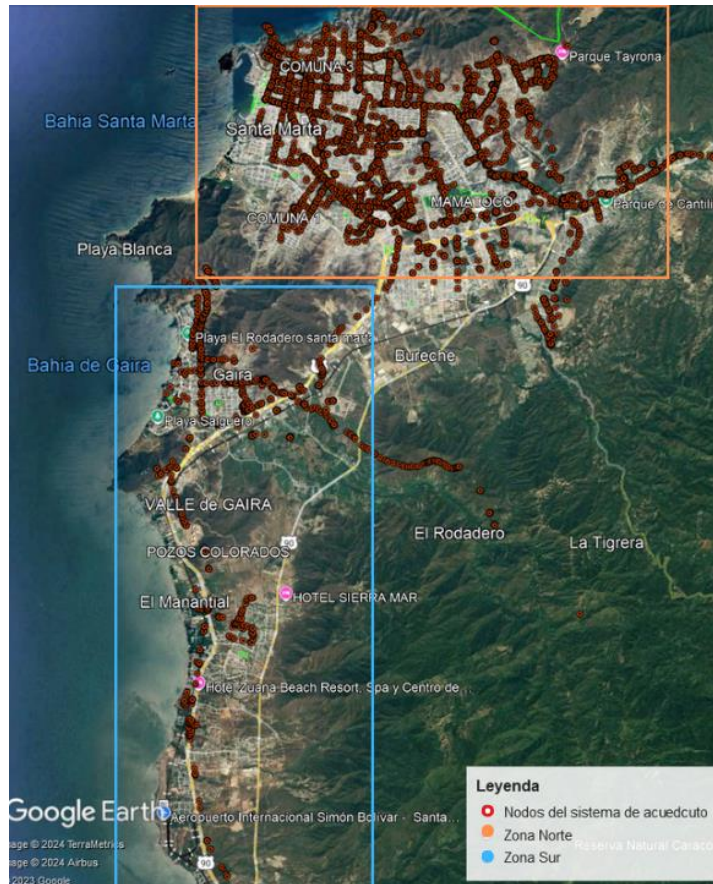


Figura 9. Ubicación de las zonas en la ciudad de Santa Marta según ESSMAR

La presentación de este diagnóstico permitió identificar patrones, evaluar la eficiencia operativa y señalar posibles áreas de mejora en el acueducto. Dentro del sistema actual de acueducto se establecen dos zonas (Ver Figura 9), denominadas como zona Norte y zona Sur. La primera comprende al sistema ubicado en todo el perímetro urbano de la ciudad de Santa Marta, incluyendo a los corregimientos de Taganga y Bonda (ver Figura 10), mientras que la zona Sur, comprende Barrios como Gaira, el Rodadero, la zona hotelera y el Aeropuerto Simón Bolívar (ver Figura 11)

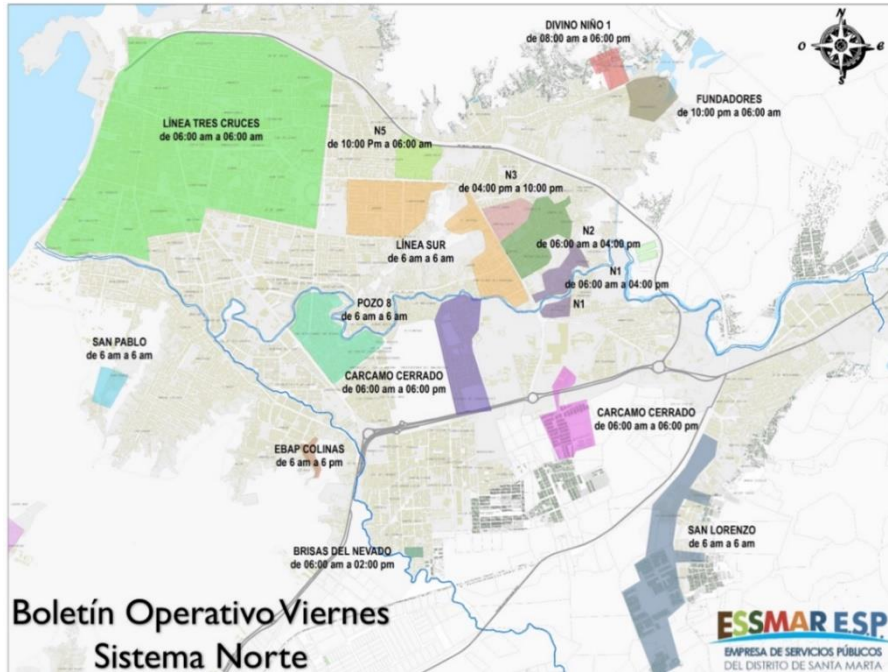


Figura 10. Zona Norte en la ciudad de Santa Marta. Tomado de: Programación de Distribución del agua en Santa Marta - ESSMAR E.S.P.

Los ríos Piedras, Manzanares y la quebrada Aserrío suministran agua a la zona norte de la ciudad. La zona sur, se abastece del río Gaira. Durante la alta temporada turística, que coincide con los meses de verano, la demanda supera los 2.450 L/s, mientras que las fuentes superficiales pueden llegar a aportar solo 300 L/s, lo que genera un déficit de aproximadamente 2.150 L/s. Este déficit se solventa parcialmente mediante la explotación máxima de las fuentes subterráneas y sometiendo a la población a racionamiento obligatorio. (Ver Figura 12)

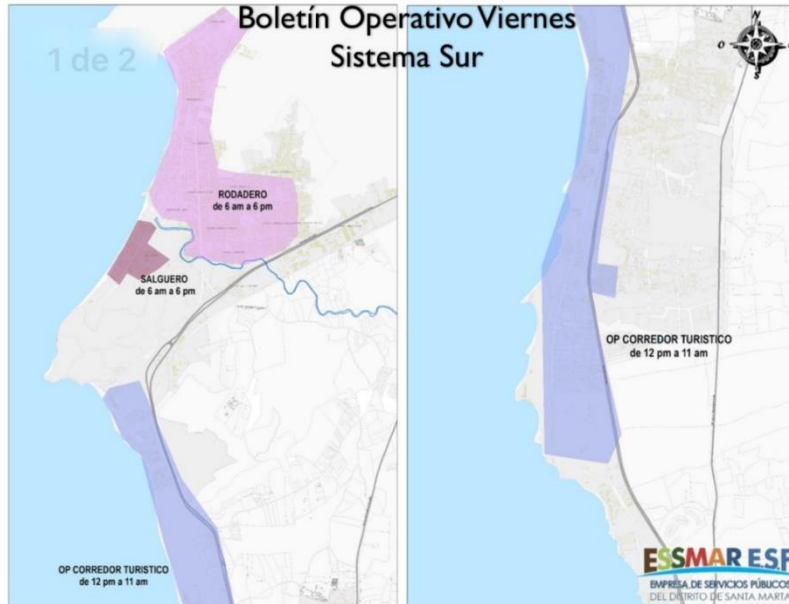
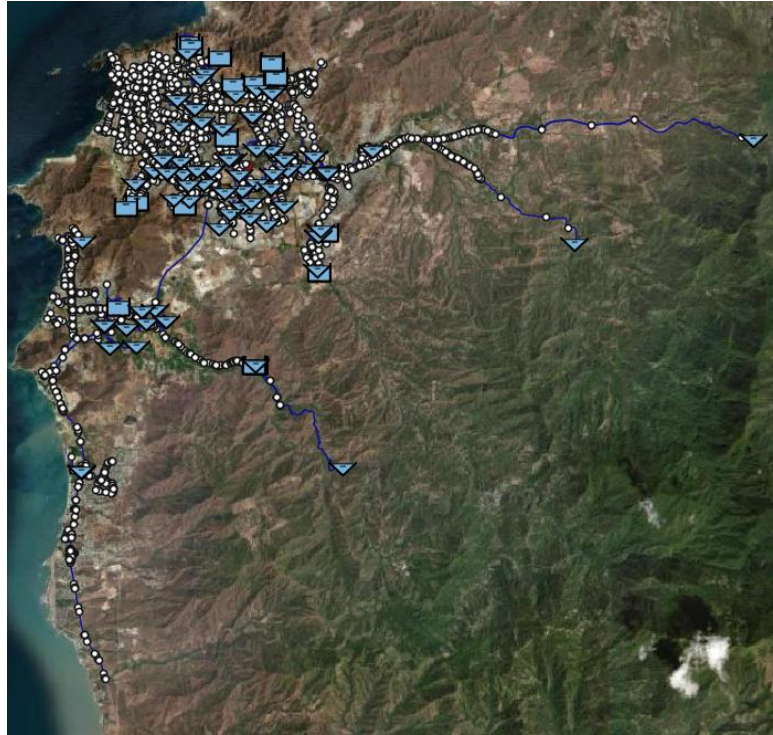


Figura 11. Zona Sur en la ciudad de Santa Marta. Tomado de: Programación de Distribución del agua en Santa Marta - ESSMAR E.S.P.

Sistema de Abastecimiento	Caudales (lps)		Cap. Instalada (lps)
	Invierno	Verano	
Sistema Mamatoco (ríos Piedras y Manzanares)	800	150	800
Sistema El Roble (Río Gaira)	450	150	450
Agua subterránea (60 pozos)	850	850	850
<b>Total Santa Marta</b>	<b>2.100</b>	<b>1.150</b>	<b>2.100</b>
Necesidad requerida (CDM)	2.450	2.450	
Déficit (CDM)	350	1.300	

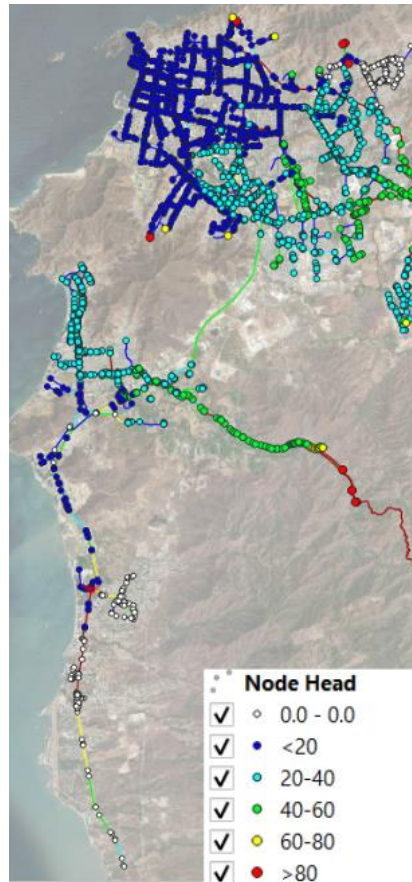
Figura 12. Situación sistema de abastecimiento Santa Marta tomado de Plan de acción Santa Marta Sostenible by Findeter S.A. - Issuu

A través de esta representación gráfica de datos, se pretende proporcionar una base para la comprensión de la dinámica del sistema de acueducto. Según el modelo y los valores del programa, se decidió considerar factores como Presión, Pérdida unitaria y velocidad ya que son las bases del diseño, la operación y el mantenimiento adecuados de los sistemas de acueducto, asegurando que el agua llegue a su destino. Por eso se presenta el modelo base de manera global (Ver Figura 13) y, luego, puntos críticos los cuáles se mencionarán y discutirán después.



*Figura 13. Modelo base del sistema de acueducto de Santa Marta en el software QGIS*

En la Figura 14 se observa de manera global, la carga dentro del sistema en la ciudad de Santa Marta, incluyendo sectores ubicados al sur de la ciudad como lo son el Rodadero y la zona hotelera. La escala de colores que indica QGIS, muestra cómo la mayoría de los nodos dentro de la ciudad, presentan valores desde <20 hasta 38 mca.



*Figura 14. Carga en el sistema para el modelo base del sistema de acueducto.*

Los tanques muestran las cargas más altas y consistentes entre los tipos de elementos analizados. Los tanques están diseñados para mantener la presión en el sistema y asegurar un suministro constante de agua, incluso durante los periodos de alta demanda. La consistencia en las cargas medidas a las 06:00 hrs donde la media de la carga es 70.15 mca y a las 08:00 hrs la media es 70.21 mca, esto refleja la eficacia de los tanques en mantener la presión y el flujo necesarios para el funcionamiento del sistema de acueducto. Los tanques, con su capacidad de almacenamiento elevado y su ubicación estratégica, juegan un papel crucial en la gestión de la presión hidráulica, lo que es vital para evitar problemas como la cavitación en las bombas y la entrada de aire en las tuberías.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con respecto a los valores de Presión. Los valores ideales de Presión deberían rondar entre los 15 – 30 mca. Según los datos obtenidos en EPANET, solo el 15% de nodos cumplen con el rango ideal. En la Figura 15 se observa cómo todos los nodos ubicados en el Centro Histórico y la Bahía presentan presiones menores a 15 mca

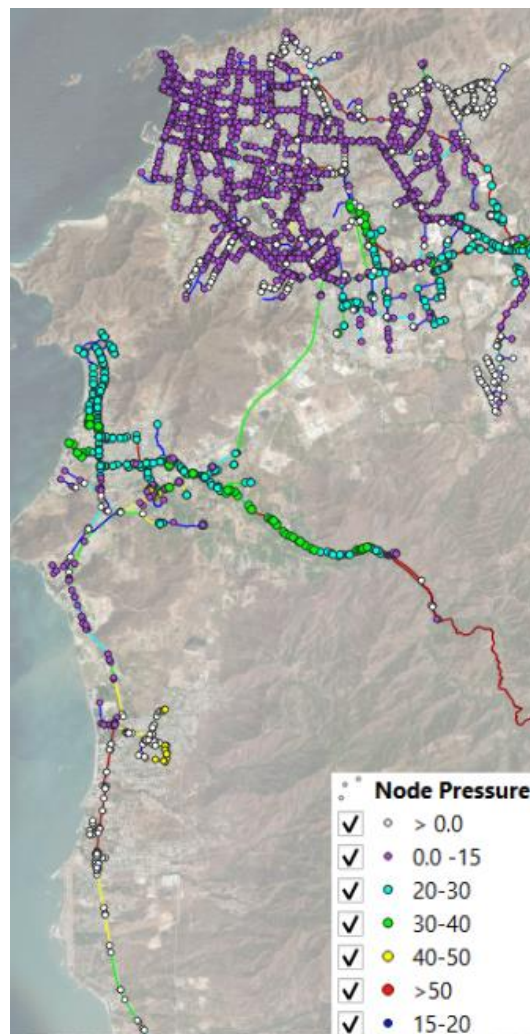


Figura 15. Presión en el sistema para el modelo base del sistema de acueducto.

Los valores promedio de presión a las 06:00 y 08:00 horas muestran una disminución notable en la presión del sistema a medida que avanza la mañana. Esta tendencia sugiere un aumento en el consumo de agua en este período, típico en áreas residenciales y comerciales. Sin

embargo, las elevadas fluctuaciones de la presión indican una alta variabilidad en las presiones registradas, lo cual evidencia la situación actual de Santa Marta donde día a día existen inconsistencias en el suministro.

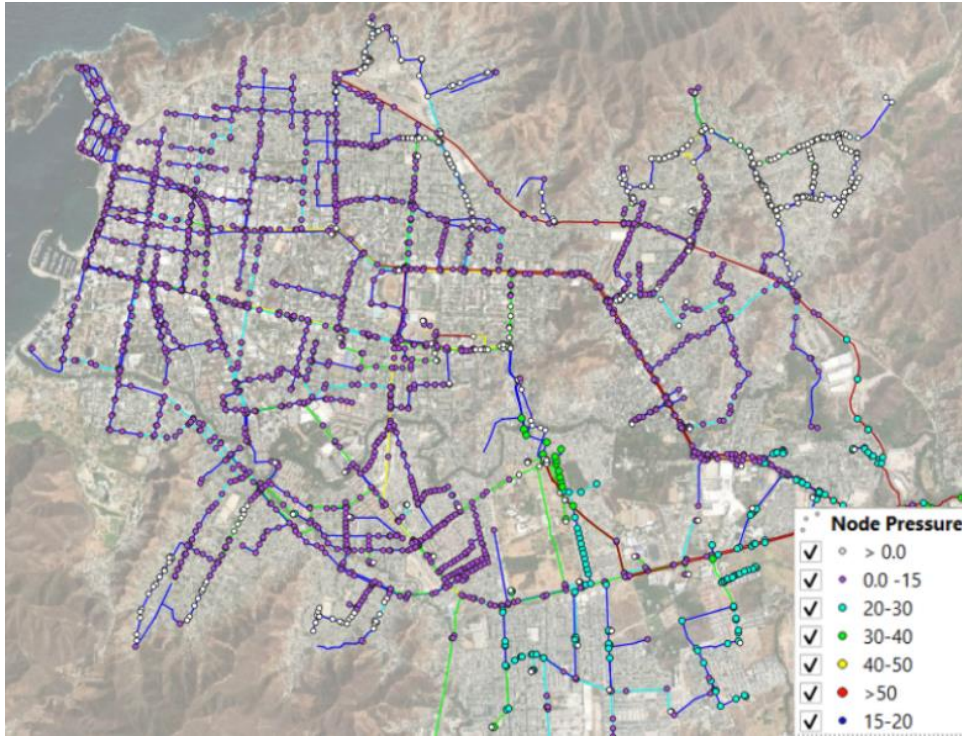


Figura 16. Modelo QGIS para la presión en sistema norte

En la Figura 16 se observa que algunos nodos presentan un color blanco, lo cual indica que en estos puntos las presiones son negativas. Esto significa que en dichas zonas no hay presencia de agua. Matemáticamente, esto se manifiesta con valores negativos, y se ha registrado en algunos nodos presiones de hasta  $-12211882$  mca, lo que confirma la ausencia del recurso hídrico en esos puntos. Esta situación refleja la realidad actual en la ciudad, donde no se dispone de suficiente agua para satisfacer la demanda. Como consecuencia, la empresa de servicios públicos implementa racionamientos mediante el cierre de válvulas y la redirección del flujo de agua para abastecer diferentes zonas de la ciudad en diferentes momentos.

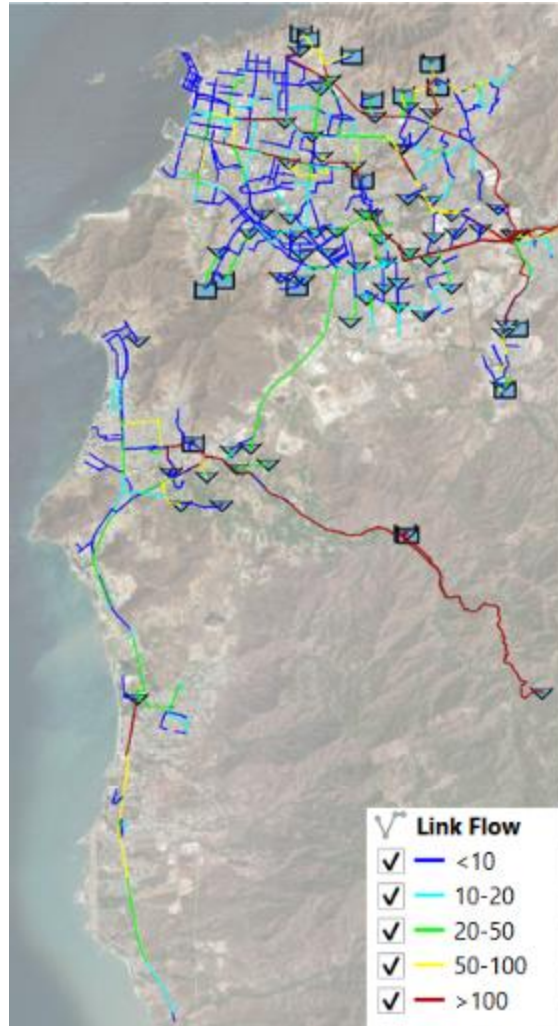


Figura 17. Modelo QGIS para el caudal en sistema de acueducto.

El sistema de acueducto es una red compleja que requiere una gestión eficiente del caudal para garantizar un suministro continuo y seguro de agua potable. El análisis del sistema de acueducto de Santa Marta revela una considerable variabilidad en los caudales de agua a las 06:00 y 08:00 hrs, con variaciones altas y presencia de caudales negativos que sugieren sin conocer el contexto actual de la ciudad, flujos reversos o errores de medición. Ver Figura 17

Esta variabilidad es indicativa de fluctuaciones en la demanda, fugas y problemas en la infraestructura. Cambios bruscos en el caudal pueden poner estrés en las bombas y válvulas, aumentando el riesgo de fallas mecánicas y la necesidad de mantenimiento frecuente. La diferencia promedio de caudal entre las horas es pequeña, pero la gran variabilidad puede

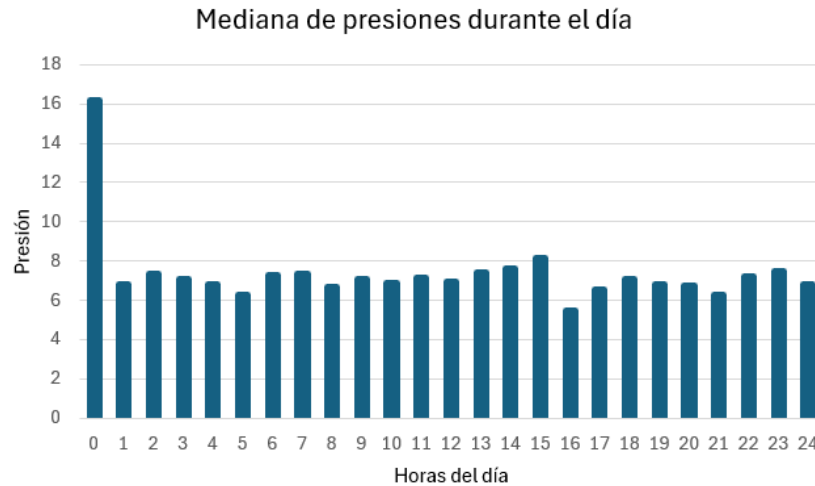
reflejar desafíos en la gestión del flujo y potenciales problemas de capacidad o demanda en ciertos puntos críticos del sistema. Esta alta variabilidad en los caudales puede llevar a una operación ineficiente del sistema de bombeo y distribución, resultando en mayores costos operativos y problemas para mantener una presión constante, afectando la calidad del servicio.

### **Presiones**

Tras completar el modelado hidráulico, se examinó las variaciones de presión en el sistema en un ciclo de 24 horas. Los resultados revelaron un patrón, evidenciando que las presiones más bajas se registran a las 5 a.m. y a las 4 p.m. Estos hallazgos sugieren que estas franjas horarias específicas se caracterizan por condiciones de menor presión en comparación con otras horas del día. (Ver Figura 18).

Las presiones más bajas en estos momentos podrían atribuirse a diversos factores. Por ejemplo, durante las primeras horas de la mañana, es probable que la demanda de agua sea mínima, ya que la mayoría de las personas descansan y no utilizan el suministro. Puede que en estos períodos haya menor actividad comercial o industrial que requiera flujo de agua elevado, lo que contribuiría a disminuir la presión en el sistema.

Este análisis de las variaciones de presión a lo largo del día proporciona información para la gestión eficiente del sistema hidráulico. Permite identificar momentos específicos de menor demanda y presión, lo que puede ser de utilidad para planificar el mantenimiento, ajustar la operación de las bombas y optimizar el suministro de agua de manera más efectiva.



*Figura 18. Variación de las presiones durante el día*

### **Modelos para Análisis Hidráulico**

En el marco de este análisis hidráulico, se contempla la inclusión de seis escenarios que involucran la implementación de nuevas fuentes de agua. En particular, se evaluarán cuatro desalinizadoras, junto con una planta de agua potable, cerca al río Toribio al sur de la ciudad. Estas adiciones están destinadas a mejorar las condiciones del sistema de acueducto en Santa Marta. La aplicación de simulaciones individuales y combinadas ayudó a comprender el impacto de estas nuevas infraestructuras en términos de valores de presión. Esta aproximación permite evaluar el impacto de las diferentes alternativas, o la combinación de estas, en el abastecimiento de agua de la ciudad. En el contexto de cada escenario, se seleccionaron 6 nodos, que se analizaron como puntos críticos para evaluar el impacto de la implementación de la nueva fuente de agua. Las presiones mencionadas corresponden al funcionamiento del sistema bajo carga total, es decir, cuando está presurizado. Sin embargo, debido a la falta de oferta para satisfacer la demanda y a la presencia de depósitos de los usuarios, en su mayoría el

sistema opera como una red abierta que no está completamente bajo carga, lo que conlleva una disminución de las presiones.

### Escenario 1: Planta desalinizadora Taganga

El primer escenario es la construcción de una planta desalinizadora señalada con el círculo rojo, la planta está ubicada a dos cuadras de la playa de Taganga en el Centro de Desarrollo Pesquero y Acuícola propiedad de la Universidad del Magdalena ver Figura 19 . En este modelo se destacan las siguientes condiciones observadas durante las simulaciones hidráulicas. Los valores de presión en puntos críticos del sistema revelan presiones bajas, lo que indica áreas específicas donde se necesita mejoras o ajustes.

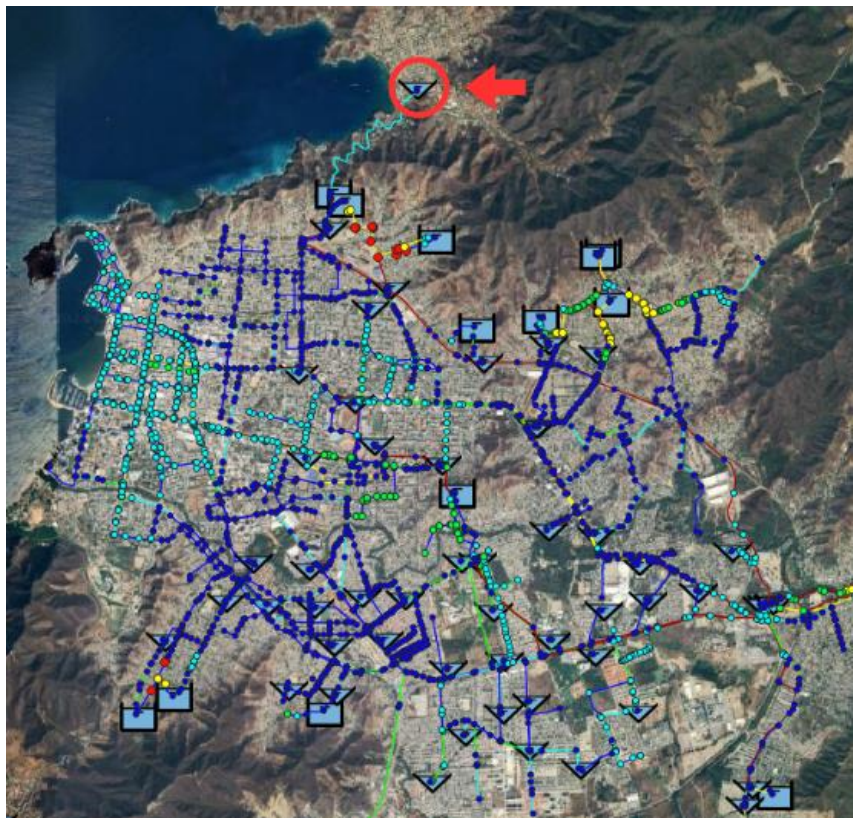


Figura 19. Modelo de desalinizadora ubicada en la zona de Taganga

En el contexto del primer escenario, centrado en la desalinizadora en Taganga contribuyendo con 15 L/s, Esta desalinizadora beneficiaría un total de 46 nodos, la presión en el sistema experimenta una variación, mostrando un incremento sustancial en el sistema del 100,08 %. En la Figura 20 se definirán los puntos críticos a los cuáles se hace la comparación con el modelo base y se observa la variación respectiva. En el recuadro pequeño (ubicado en la esquina superior derecha), se presenta una vista general de una red más extensa, donde la sección detallada está destacada en un recuadro rojo. Todos los nodos muestran un aumento de presión al pasar del escenario "Base" al escenario "Taganga", lo que sugiere una mejora significativa en el suministro de agua en esas ubicaciones específicas. El nodo 3, al ser el más cercano a la conexión de la desalinizadora, tiene un mayor aumento porcentual, en comparación a los otros nodos.

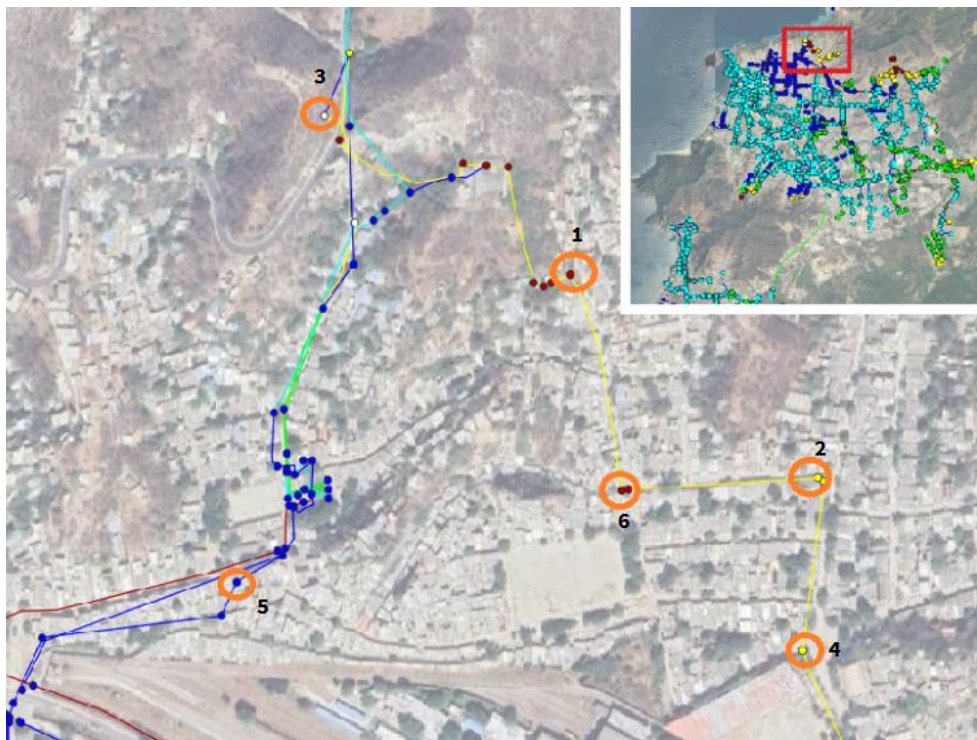


Figura 20. Selección de nodos a comparar del modelo de Taganga

Tabla 8. Modelo Base VS Modelo 1 - Taganga

Nodo	Presión Modelo	Presión Modelo	Aumento porcentual %
	Base mca	Taganga mca	
J-8672	-37	1.06	102,86%
J-7267	-3.66	1.08	129,51%
J-10542	-66.58	47.47	171,30%
J-10317	-3.13	0.93	129,71%
J-6434	-3.65	0.97	126,58%
J-7390	-3.48	0.74	121,26%

## Escenario 2: Planta de Tratamiento de Agua Potable Toribio

En el contexto del segundo escenario, ubicado en la zona sur de la ciudad, se contempla la instalación de una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) en las proximidades del río Toribio (ver Figura 21), se presenta una vista general de una red más extensa, donde la sección detallada está destacada en un recuadro rojo. En esta instalación, se resaltan los estudios realizados por CORPAMAG en 2018. En ellos, la cuenca del río Toribio presentó un caudal medio de 4160 L/s (CORPAMAG, 2018). Pero, para esto, se utiliza un caudal de 200 L/s que aporta la PTAP al sistema. La inclusión de la planta se hace al modelo por medio de un tanque con caudal conocido. Esta planta beneficiaría 179 nodos.

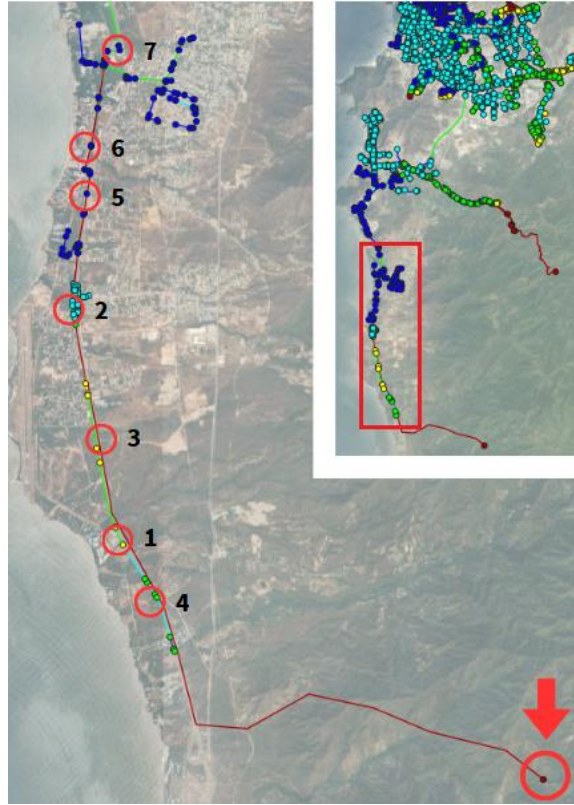


Figura 21. Escenario PTAP Toribio, Fuente propia

Para este segundo escenario, enfocado en la Planta de Toribio, se ha evidenciado una mejora significativa en comparación con el escenario base. La simulación muestra un aumento sustancial del 45.6 % en los valores de presión, indicando una mayor eficiencia hidráulica en la red de distribución. Inicialmente, ninguno de los 179 nodos analizados alcanzaba el rango de presión ideal. Con la incorporación de esta nueva fuente de suministro, el 6 % de los nodos está en los parámetros óptimos de presión, lo que sugiere una mejora en la estabilidad del sistema. Este avance podría tener implicaciones positivas en la reducción de pérdidas por fugas y en la mejora del servicio a los usuarios.

Tabla 9. Modelo base VS Modelo Toribio

Nodo	Presión Modelo Base mca	Presión Modelo Toribio mca	Aumento porcentual %
sur-97	-69.36	21.83	131,47%
sur-736	-35.94	13.93	138,76%
sur-716	-33.42	10.71	132,05%
sur-674	-0.42	2.24	633,33%
sur-590	-33.18	9.84	129,66%
sur-554	1.75	1.94	10.86%
sur-509	-34.2	9.94	129,06%

### Escenario 3: Planta desalinizadora PRODECO.

En el escenario 3, centrado en la planta desalinizadora cercana al Aeropuerto Simón Bolívar, ubicada en las proximidades del antiguo puerto de PRODECO, se proyecta que esta instalación aporte aproximadamente 100 L/s al sistema de acueducto, beneficiando a 98 nodos. La Figura 22 presenta una vista general de una red más extensa, con la sección detallada resaltada en un recuadro rojo.

En este tercer escenario, la simulación ha mostrado cambios significativos, destacándose un aumento del 26.79% en los valores de presión. Sin embargo, aunque se observa una mejora en la presión de los nodos analizados, ninguno logró situarse dentro del rango ideal de 15 a 30 metros de columna de agua (mca). Este resultado indica que, si bien la incorporación de la desalinizadora contribuye positivamente al sistema, aún persisten desafíos en alcanzar niveles

de presión óptimos para todos los nodos, lo cual podría limitar la efectividad general del suministro en estas áreas críticas.

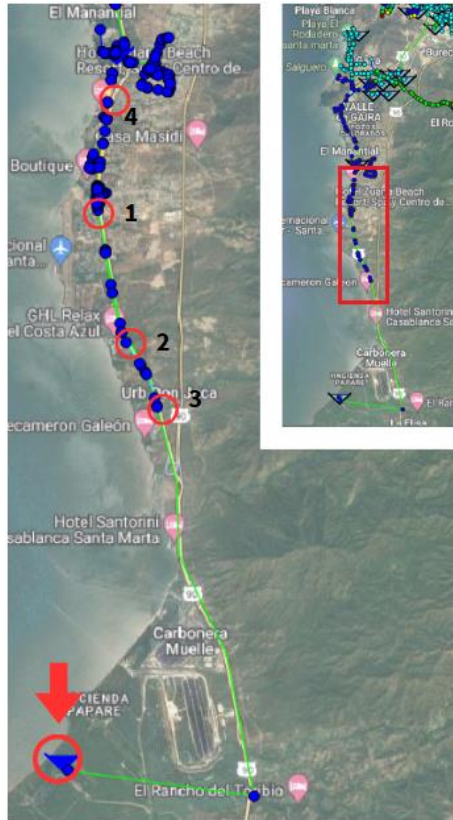


Figura 22. Escenario Desalinizadora PRODECO, Fuente propia

Tabla 10. Modelo Base VS Modelo Desalinizadora

Nodo	Presión Modelo	Presión Modelo	Aumento Porcentual %
	Base mca	Desalinizadora mca	
sur-155	-37.98	-26.23	30,94%
sur-284	-83.01	-66.15	28,88%
sur-207	-32.15	-22.19	30,98%
sur-715	-33.36	-23.16	30,58%

#### Escenario 4: Planta desalinizadora Salguero.

En el escenario 4, focalizado en la desalinizadora cercana a la playa Salguero, dentro del lote de INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras), esta desalinizadora pretende suministrar al sistema aproximadamente 125 L/s, beneficiando a 258 nodos. Para este cuarto escenario, centrado en la desalinizadora, se han observado cambios significativos. La simulación revela un aumento sustancial del 153.4 % en los valores de presión. Ver Figura 23



Figura 23. Escenario Desalinizadora INVEMAR, Fuente propia

Nodo	Presión Modelo Base mca	Presión Modelo INVEMAR mca	Aumento Porcentual %
sur-260	-5.31	24.98	570,43%
sur-342	-4.12	25.73	724,51%
sur-368	-8.57	18.8	319,37%
sur-379	-4.16	25.7	717,79%
sur-434	30.21	93.84	210,63%
sur-749	24.69	78.44	217,70%

La comparación de las presiones en distintos nodos del sistema muestra diferencias notables que afectan la operatividad y eficiencia del acueducto. En los cuatro primeros nodos analizados, las presiones en el modelo INVEMAR se encuentran dentro del rango ideal de 15 a 30 mca, lo cual es favorable para el funcionamiento adecuado del sistema. Estas presiones adecuadas indican una mejora en la estabilidad del suministro de agua en estos puntos específicos, resolviendo problemas de presiones negativas o insuficientes observados previamente en el modelo base. Sin embargo, en otros nodos del sistema, las presiones registradas en el modelo INVEMAR son excesivamente altas, superando con creces el rango ideal.

Este fenómeno se observa en los nodos que presentan presiones de hasta 93.84 mca y 78.44 mca, lo que puede generar serios problemas en la infraestructura del acueducto, como fugas o rupturas de tuberías, y afectaciones en el consumo de agua por parte de los usuarios. Es destacable que, de los 258 nodos evaluados en el modelo INVEMAR, solo 10 cumplen con la

condición de presión ideal, mientras que 243 nodos presentan presiones superiores a 30 mca. Este escenario contrasta con el modelo base, donde 194 nodos estaban dentro del rango ideal de presión. La prevalencia de presiones excesivamente altas en la mayoría de los nodos del modelo INVEMAR subraya la necesidad de ajustes y optimización en el sistema que puede solucionarse con la instalación de válvulas reguladoras de presión, con el fin de asegurar un suministro de agua eficiente y seguro en toda la red de acueducto.

### **Escenario 5: Planta desalinizadora Bahía**

En el contexto del quinto escenario, ubicado en la zona norte de la ciudad, se contempla la instalación de una desalinizadora en frente de la bahía de Santa Marta, dentro de un lote que hace parte de la SOCIEDAD PORTUARIA DE SANTA MARTA (Ver Figura 24). En esta instalación, se resalta el estado inicial de los nodos ubicados en el centro histórico y la bahía donde en su totalidad, manejan presiones entre 0 – 15 mca. Para este escenario, se modeló una desalinizadora con un caudal de 125 L/s. Esta planta beneficiaría 397 nodos y tiene un aumento sustancial del 141.4 % en los valores de presión.



Figura 24. Escenario Desalinizadora BAHÍA, Fuente propia

Nodo	Presión Modelo Base mca	Presión Modelo Bahía mca	Aumento Porcentual %
J-9252	8.9	17.31	94,49%
J-8840	9.51	20.09	111,25%
J-8631	10.2	19.24	88,63%
J-8163	7.8	15.49	98,59%
J-7501	9.89	83.48	744,08%
J-6861	9.53	21.71	127,81%

En los nodos analizados, el modelo Bahía muestra una mejora significativa en las presiones en comparación con el modelo base. Por ejemplo, en los primeros cuatro nodos, las presiones en el modelo Bahía se encuentran dentro del rango ideal de 15 a 30 mca, lo que es favorable

para el funcionamiento adecuado del sistema. Estas presiones adecuadas en los nodos indican una mejora en la estabilidad del suministro en estos puntos, ya que en el modelo base ninguna de las presiones alcanzaba el rango ideal. En el modelo base, las presiones variaban entre 7.5 y 10.2 mca, todas por debajo del mínimo recomendado.

De los 397 nodos evaluados en el modelo Bahía, 296 cumplen con la condición de presión ideal (15-30 mca), mientras que en el modelo base ningún nodo estaba dentro de este rango. Esta mejora significativa en el modelo Bahía indica un avance importante en la optimización del sistema de acueducto. Sin embargo, 29 nodos en el modelo Bahía presentan presiones superiores a 30 mca, lo que sigue siendo una preocupación. Estos nodos con presiones elevadas subrayan la necesidad de ajustes adicionales como el uso de válvulas reguladoras.

### **Escenario 6: Modelo combinado.**

El Escenario 6 propone una integración estratégica de los escenarios 1, 2 y 4, combinando las ventajas individuales de cada intervención para crear una solución integral que aborde las necesidades hídricas de Santa Marta de manera más completa y efectiva. Este escenario busca mejorar la eficiencia operativa del sistema de acueducto y garantizar una distribución equitativa del agua en las diferentes zonas de la ciudad, donde no solo se beneficie a la zona hotelera y turística de la ciudad, sino también a otros sectores de la población, especialmente a las zonas residenciales y áreas de alta demanda que han tenido problemas de presión y suministro.

Al integrar la planta desalinizadora de la Bahía (Escenario 5), la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) en el río Toribio (Escenario 2) y la desalinizadora en la playa Salguero dentro del lote de INVEMAR (Escenario 4), se prevé un refuerzo significativo en la capacidad del sistema para manejar volúmenes de agua más grandes y distribuirlos de manera más uniforme. La combinación de estas tres fuentes permite aprovechar la diversidad de

localizaciones y la capacidad hidráulica de cada una, reduciendo la vulnerabilidad del sistema ante fluctuaciones en la demanda o fallos en alguna de las instalaciones.

En este escenario combinado, se espera un aumento significativo en la capacidad total del sistema de acueducto, con una distribución más equilibrada de las presiones en todos los nodos, lo que se traduce en un servicio más confiable y eficiente para los ciudadanos. Las simulaciones iniciales proyectan un mejoramiento en la presión en los nodos críticos, logrando que una mayor proporción de estos alcance el rango ideal de 15 a 30 mca, lo cual es crucial para asegurar un suministro continuo y sin interrupciones.

Para garantizar el éxito de este escenario, se recomienda instalar válvulas reguladoras de presión, cruciales para mantener la integridad de la infraestructura y evitar daños como fugas o rupturas de tuberías por exceso de presiones. En este modelo, se observó un aumento general del 52.75% en los valores de presión, lo que indica una mejora significativa en la capacidad de distribución del acueducto. Aunque se detectaron disminuciones de presión en algunos nodos, pasaron a estar dentro de los estándares aceptables por la RAS.

Nodo	Presión Modelo Base mca	Presión Modelo Bahía mca	Aumento Porcentual %
J-5257	12.37	17.81	43,98%
J-6100	9.51	28.19	196,42%
J-9811	1.42	12.43	8,84%
sur-139	36,89	30.2	-18,13%
sur-14	8.76	29.84	240,64%
sur-166	49,82	25,46	-48,90%

## Análisis y Resultados

En los escenarios modelados para el sistema de acueducto de Santa Marta, se observan diversas mejoras y desafíos en términos de presiones hidráulicas y distribución eficiente del agua. En el **Escenario 1**, la construcción de una planta desalinizadora en Taganga, con una capacidad de 15 L/s, benefició a 46 nodos, mostrando un incremento sustancial del 100.08% en los valores de presión. Aunque todos los nodos experimentaron mejoras al pasar del escenario base al escenario "Taganga", los puntos críticos aún evidencian presiones bajas que requieren ajustes adicionales en la red para asegurar un suministro más uniforme. El nodo 3, debido a su proximidad a la conexión de la desalinizadora, mostró el mayor aumento porcentual en presión, lo que sugiere una significativa mejora en la distribución en esa área específica.

En el **Escenario 2**, se evaluó la instalación de una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) en la cuenca del río Toribio, aportando 200 L/s al sistema y beneficiando a 179 nodos. La simulación indicó un aumento del 45.6% en los valores de presión, con un 6% de los nodos alcanzando el rango de presión ideal de 15 a 30 mca, algo no logrado en el escenario base. Este resultado señala una mayor eficiencia hidráulica y una mejora en la estabilidad del sistema, lo cual podría traducirse en una reducción de pérdidas por fugas y una mejora en el servicio a los usuarios. Sin embargo, la mayoría de los nodos aún no alcanza el rango de presión óptimo, lo que sugiere que se requieren mejoras adicionales para optimizar la red de distribución.

El **Escenario 3** se centró en una planta desalinizadora cerca del Aeropuerto Simón Bolívar, con una capacidad proyectada de 100 L/s, beneficiando a 98 nodos. Aunque se observó un aumento del 26.79% en los valores de presión, ninguno de los nodos analizados logró situarse dentro del

rango ideal de 15 a 30 mca. Este resultado, aunque positivo, evidencia la necesidad de ajustes adicionales para lograr niveles de presión adecuados en todos los nodos, lo cual es esencial para asegurar la efectividad y fiabilidad del suministro en las áreas críticas.

En el **Escenario 4**, se propuso una desalinizadora en la playa Salguero, dentro del lote de INVEMAR, con una capacidad de 125 L/s, beneficiando a 258 nodos. La simulación mostró un aumento del 153.4% en los valores de presión, con los primeros cuatro nodos logrando situarse dentro del rango ideal de 15 a 30 mca. Sin embargo, se observó que 243 nodos presentaron presiones superiores a 30 mca, con algunas presiones alcanzando hasta 93.84 mca, lo cual plantea serios riesgos para la infraestructura del acueducto, como fugas o rupturas. Estos resultados resaltan la necesidad de instalar válvulas reguladoras de presión para mitigar el riesgo de daños.

En el **Escenario 5**, una desalinizadora propuesta frente a la bahía de Santa Marta, con una capacidad de 125 L/s, beneficiaría a 397 nodos, mostrando un aumento del 141.4% en los valores de presión. De los nodos evaluados, 296 lograron situarse dentro del rango ideal, lo que representa una mejora significativa en comparación con el modelo base. No obstante, 29 nodos presentaron presiones superiores a 30 mca, lo que subraya la necesidad de ajustes adicionales. El sexto y último escenario, que propone una integración estratégica de los escenarios 1, 2 y 4, se presenta como una solución integral que busca maximizar las ventajas individuales de cada intervención. Esta combinación permite una mayor eficiencia operativa del sistema y una distribución más equitativa del agua en toda la ciudad. Al integrar la planta desalinizadora de la Bahía, la PTAP en el río Toribio y la desalinizadora en Playa Salguero, se refuerza

significativamente la capacidad del sistema para manejar mayores volúmenes de agua y distribuirlos de manera uniforme. Este escenario combinado no solo optimiza la capacidad hidráulica del sistema, sino que también reduce la vulnerabilidad ante fluctuaciones en la demanda o fallos en alguna de las instalaciones. Las simulaciones iniciales del escenario 6 proyectan una mejora general del 52.75% en los valores de presión, con una notable capacidad para alcanzar y mantener el rango ideal en los nodos críticos. Aunque se observaron disminuciones de presión en algunos nodos, estos se mantuvieron dentro de los estándares aceptables, lo que subraya la capacidad de adaptación y regulación del sistema propuesto. Este escenario se perfila como la opción más efectiva para asegurar un suministro de agua equilibrado y confiable en la mayoría de los nodos de la red, minimizando los riesgos de fallos y mejorando la satisfacción de los usuarios en diversas zonas de la ciudad. En resumen, aunque cada escenario muestra mejoras en la presión del sistema, los resultados también revelan la necesidad de optimizaciones adicionales para alcanzar un equilibrio adecuado en toda la red, garantizando un suministro de agua eficiente, seguro y sostenible para la ciudad de Santa Marta.

## **Conclusiones**

La evaluación de la red de distribución de agua potable en Santa Marta permitió identificar puntos críticos y oportunidades de mejora, cumpliendo con el objetivo principal de optimizar el sistema de acueducto urbano. Los resultados obtenidos en las simulaciones muestran mejoras significativas en la presión y estabilidad del suministro, confirmando que las propuestas planteadas pueden mejorar sustancialmente la eficiencia operativa y la distribución equitativa del agua en la ciudad. En los seis escenarios planteados para la mejora del sistema de acueducto en

Santa Marta, se han observado variaciones significativas en los valores de presión y, en consecuencia, en la eficiencia y estabilidad del suministro de agua en distintas áreas de la ciudad. Cada escenario presenta características particulares que afectan de manera diversa la red de distribución, reflejando tanto avances en la optimización del sistema como desafíos que requieren atención para asegurar su efectividad a largo plazo.

El Escenario 6, que propone una integración de los escenarios 1, 2 y 4, representa una solución más integral que combina las ventajas de cada intervención para mejorar la eficiencia del sistema de acueducto en su totalidad. Este escenario busca no solo mejorar la presión y distribución del agua en las zonas turísticas y hoteleras, sino también en las áreas residenciales y de alta demanda que han sufrido problemas de presión y suministro. Al integrar las plantas desalinizadoras y la PTAP, se fortalece la capacidad del sistema para manejar mayores volúmenes de agua y distribuirlos de manera más uniforme y eficiente en toda la ciudad. Este escenario permite un aumento general del 52,75% en los valores de presión, con una distribución más equilibrada en todos los nodos, lo que se traduce en un servicio más confiable y efectivo para los ciudadanos. Aunque se observan disminuciones de presión en algunos nodos, estas caídas se encuentran dentro de los estándares aceptables, lo que indica una capacidad de adaptación y regulación que convierte a este escenario en una opción ideal para asegurar un suministro de agua equilibrado en la mayoría de los nodos, minimizando los riesgos de fallos y mejorando la satisfacción de los usuarios.

En conclusión, los escenarios evaluados demuestran que la incorporación de nuevas fuentes de agua, como plantas desalinizadoras y de tratamiento, puede contribuir significativamente a

mejorar el suministro y la presión en diferentes áreas de Santa Marta. No obstante, la distribución de las mejoras no es uniforme, y en algunos casos, la introducción de estas fuentes genera presiones excesivas que pueden comprometer la infraestructura del acueducto. Por tanto, es fundamental considerar una mejora y renovación de la infraestructura actual del sistema de acueducto, la instalación de dispositivos reguladores de presión y otras medidas de optimización para asegurar que las intervenciones propuestas no solo mejoren el suministro de agua, sino que también garanticen la sostenibilidad y seguridad del sistema a largo plazo. Este análisis subraya la complejidad inherente al diseño y mejora de sistemas de acueducto en áreas urbanas, donde las soluciones deben ser adaptadas cuidadosamente a las condiciones específicas de cada zona para lograr un equilibrio entre la eficiencia y la seguridad. La integración propuesta en el Escenario 6 surge como la solución más efectiva y completa para abordar los desafíos del sistema de acueducto de Santa Marta. Este escenario no solo maximiza las ventajas individuales de cada intervención, sino que también ofrece una respuesta coordinada y resiliente ante las fluctuaciones en la demanda o los posibles fallos operativos. Para garantizar el éxito de esta propuesta, es esencial implementar válvulas reguladoras de presión y llevar a cabo un monitoreo constante de la red, asegurando que las presiones se mantengan dentro de los rangos ideales para preservar la integridad de la infraestructura y garantizar un servicio de alta calidad a largo plazo.

## Bibliografía

- Alvarado, R. (2022, marzo 22). Chile lidera la crisis hídrica en América Latina— Universidad de Chile. <https://forestal.uchile.cl/noticias/184816/dia-mundial-del-agua-chile-lidera-la-crisis-hidrica-en-america-latina>
- Beltrán, A. L., & Galindo, J. J. A. (2021). Análisis de Demanda y la Red de Distribución de Agua en el Municipio de Aracataca, Colombia.
- Caracol, N. (2023, septiembre 29). Problemática de agua en Santa Marta: Las residuales se mezclan con la potable (world) [Text]. Noticias Caracol; Noticias Caracol. <https://www.noticiascaracol.com/politica/elecciones-colombia/bus-colombia/problemativa-de-agua-en-santa-marta-las-residuales-se-mezclan-con-la-potable-rg10>
- Caracol Radio Santa Marta •. (s. f.). Avanza con éxito la reactivación turística de Santa Marta Cerca de 3 millones de turistas llegaron a Santa Marta durante el 2021: Cerca de 3 millones de turistas llegaron a Santa Marta durante el 2021. Recuperado 19 de diciembre de 2023, de [https://caracol.com.co/emisora/2022/01/02/santa\\_marta/1641145133\\_368069.html](https://caracol.com.co/emisora/2022/01/02/santa_marta/1641145133_368069.html)
- Caribe, G. C. (2023). Infografía de Refugiados y Migrantes Venezolanos.
- Casma, J. C. (2015, mayo 13). América Latina: La región con más agua, la más castigada por la sed. El País. [https://elpais.com/internacional/2015/05/13/actualidad/1431542093\\_232345.html](https://elpais.com/internacional/2015/05/13/actualidad/1431542093_232345.html)
- Castañeda, V., & Esteban, J. (2019). Pre-diseño del plan maestro de alcantarillado sanitario y pluvial del casco urbano municipio de San Francisco Cundinamarca [Bachelor thesis]. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/19284>

- Cepeda, J. (2021, febrero 1). Essmar E.S.P. instala 1.000 metros de tuberías en el barrio Cristo Rey. ESSMAR E.S.P. <https://essmar.gov.co/essmar-e-s-p-instala-1-000-metros-de-tuberias-en-el-barrio-cristo-rey/>
- CORPAMAG. (2018). Resolución 3231 del 2018. [https://www.corpamag.gov.co/archivos/resoluciones/Resol\\_3831-2018.pdf](https://www.corpamag.gov.co/archivos/resoluciones/Resol_3831-2018.pdf)
- Cruz, O. I. (2015). Estudio de caso para la optimización del sistema de acueducto del municipio de Paipa departamento de Boyacá y búsqueda de fuentes alternativas para el abastecimiento de agua. <http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/8119>
- Díaz, F. (2020). Diagnóstico Anexo Dimensión Social. 90.
- DNP. (s. f.). TerriData. Recuperado 19 de diciembre de 2023, de <https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/descargas>
- El Tiempo. (2021, noviembre 22). Santa Marta: Superservicios interviene empresa de agua. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/santa-marta-superservicios-interviene-empresa-de-agua-633981>
- El Tiempo. (2023, junio 16). Crisis en servicios públicos de Santa Marta. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/crisis-en-servicios-publicos-de-santa-marta-778255>
- El Universal. (2021a). Asignan más de \$150 mil millones para alcantarillados en Bolívar | EL UNIVERSAL - Cartagena. <https://www.eluniversal.com.co/regional/bolivar/asignan-mas-de-150-mil-millones-para-alcantarillados-en-bolivar-EK5149053>
- El Universal. (2021b, diciembre 6). Firman acuerdo para construcción de alcantarillado San Juan y San Estanislao de Kostka.

<https://www.eluniversal.com.co/regional/bolivar/firman-acuerdo-para-construccion-de-alcantarillado-san-juan-y-san-estanisla-de-kostka-IY5818903>

- Empresas Públicas de Medellín. (2009). Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto.
- Huertas, L. S. S., & Diaz, R. S. (2017). MODELACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE ACUEDUCTO URBANO DEL MUNICIPIO DE TIBANÁ-BOYACÁ.
- Jiménez, J. (2013). Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario.
- Cepeda, J. (2023, noviembre 9). Essmar inicia obras de alcantarillado que beneficiarán a más de 700 usuarios del barrio Pescaíto. ESSMAR E.S.P. <https://essmar.gov.co/essmar-inicia-obras-de-alcantarillado-que-beneficiaran-a-mas-de-700-usuarios-del-barrio-pescaito/>
- LEGISCOMEX. (2017). El Puerto de Santa Marta se convirtió en el terminal marítimo más importante de Colombia. <https://www.legiscomex.com/documentos/santamarta-terminal-maritimo-importante-colombia-actualizacion>
- MINVIVIENDA. (2021, septiembre 8). Inversión en agua y saneamiento en el Atlántico asciende a más de \$242 mil millones. <https://minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/inversion-en-agua-y-saneamiento-en-el-atlantico-asciende-mas-de-242-mil-millones>
- Opinión Caribe. (2021, diciembre 8). La escasez de agua en Santa Marta es producto de una errada gestión del recurso hídrico. Opinion Caribe. <https://www.opinioncaribe.com/2021/12/08/la-escasez-de-agua-en-santa-marta-es-producto-de-una-errada-gestion-del-recurso-hidrico/>

- Roa, J. C., & Ayala, M. (2019). Estudio de caso: Deficiencias en la prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado en la ciudad de Santa Marta.  
<https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/c52dd4d4-da5d-4c13-907f-bf76c044a6b4>
- Valois, G. E. (2017). Pre-diseño del acueducto y alcantarillado para el municipio de Puente Tanando (departamento del Chocó) [Bachelor thesis, Universidad Santo Tomás].  
<https://repository.usta.edu.co/handle/11634/3155>
- World Bank. (2020). Development Projects: PE Optimization of Lima Water and Sewerage Systems [Text/HTML]. World Bank.  
<https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/project-detail/P117293>
- World Water Council. (2006). Problemas de Agua en Latinoamérica.  
[https://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/wwc/News/WWC\\_News/water\\_problems\\_es\\_22.03.04.pdf](https://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/wwc/News/WWC_News/water_problems_es_22.03.04.pdf)
- Zapana, L., March, H., Sauri, D., Zapana, L., March, H., & Sauri, D. (2021). Las desigualdades en el acceso al agua en ciudades latinoamericanas de rápido crecimiento: El caso de Arequipa, Perú. *Revista de geografía Norte Grande*, 80, 369-389.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-34022021000300369>