

DISEÑO DE SISTEMA DE CAPTACIÓN PARA ACUEDUCTO INTERVEREDAL EN APULO,  
CUNDINAMARCA

GARCÍA LÓPEZ GINA ALEJANDRA

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA  
SECCIONAL DEL ALTO MAGDALENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL  
GIRARDOT  
2025

DISEÑO DE SISTEMA DE CAPTACIÓN PARA ACUEDUCTO INTERVEREDAL EN APULO,  
CUNDINAMARCA

GARCÍA LÓPEZ GINA ALEJANDRA  
(gina-garcia2@upc.edu.co)

Trabajo de grado presentado como requisito académico para obtener el título en Ingeniería  
Civil

Docente  
JESUS FLAMINIO OSPITIA PRADA  
Ingeniero Civil  
Esp. En Gerencia Integral De Obras  
Mgtr. En Tecnologías Para El Manejo De Aguas Y Residuos  
(jesus-ospitia@unipiloto.edu.co)

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA  
SECCIONAL DEL ALTO MAGDALENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL  
GIRARDOT  
2025

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del Jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Girardot 18 noviembre 2025

## DEDICATORIA

A mi hija,  
mi luz, mi fuerza y mi razón de ser.

Dedico este trabajo a ti, porque has sido mi mayor motivación desde el primer día. Cada paso que di, cada madrugada de estudio y cada momento en el que pensé en rendirme, recordé tu sonrisa, tu mirada llena de amor y tus palabras que, aun siendo pequeñas, tienen el poder inmenso de levantarme.

Tú eres la voz que me impulsa, la inspiración que abraza mi corazón cuando las fuerzas parecen agotarse. En ti encuentro el motivo para ser mejor, para esforzarme, para no detenerme. Eres mi sueño más grande y mi mayor orgullo.  
Todo lo que he logrado, y lo que aún me falta por alcanzar, lleva tu nombre.

Este triunfo es nuestro: tuyo por motivarlo y mío por construirlo con el amor que me das cada día.

Gracias por enseñarme, sin saberlo, que la valentía también tiene forma de niña y que el verdadero sentido de la vida está en aquello que amamos profundamente.

Con todo mi corazón,  
para ti, mi hija, mi motor eterno.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por su guía constante, por fortalecerme en los momentos difíciles y permitir que cada paso de este proceso se llevara a cabo con sabiduría y perseverancia.

A mi mamá, por su apoyo incondicional, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por ser mi refugio y mi fortaleza en cada etapa de esta carrera.

A mi papá, por su insistencia, disciplina y por no permitirme desfallecer. Gracias por recordarme, con tu ejemplo, la importancia de seguir adelante sin rendirse.

A mis docentes, por su dedicación, enseñanzas y compromiso con mi formación profesional. Cada uno de ellos aportó a este logro que hoy culmino.

Al ingeniero Flaminio, por su guía, compromiso y disposición durante el desarrollo de este trabajo, acompañándome con paciencia y profesionalismo.

A la coordinadora Jennifer Sánchez, por su apoyo incondicional y por estar presente en los momentos más difíciles de mi carrera. Su orientación y respaldo fueron fundamentales para llegar hasta este punto.

A todos, gracias por ser parte esencial de este proceso y por acompañarme en la construcción de este sueño.

## CONTENIDO

|                                                                                | pág. |
|--------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1. GLOSARIO .....                                                              | 11   |
| 2. RESUMEN .....                                                               | 12   |
| 3. ABSTRACT .....                                                              | 13   |
| 4. INTRODUCCION .....                                                          | 14   |
| 5. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....                                               | 16   |
| 5.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....                                            | 17   |
| 6. JUSTIFICACIÓN .....                                                         | 18   |
| 6.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA .....                                                | 18   |
| 6.2 JUSTIFICACIÓN SOCIAL .....                                                 | 18   |
| 6.3 JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL .....                                              | 19   |
| 6.4 JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA .....                                              | 19   |
| 7. OBJETIVOS .....                                                             | 20   |
| 7.1 OBJETIVO GENERAL .....                                                     | 20   |
| 7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                | 20   |
| 8. MARCO REFERENCIAL .....                                                     | 21   |
| 8.1 ANTECEDENTES .....                                                         | 21   |
| 8.2 MARCO TEÓRICO .....                                                        | 22   |
| 8.2.1 Hidráulica de Captaciones .....                                          | 22   |
| 8.2.2 Diseño Poblacional .....                                                 | 23   |
| 8.2.3 Caudales de Diseño .....                                                 | 23   |
| 8.2.4 Dotaciones .....                                                         | 23   |
| 8.2.5 Sostenibilidad y Gestión Comunitaria del Agua .....                      | 23   |
| 8.3 MARCO CONCEPTUAL .....                                                     | 24   |
| 8.4 MARCO LEGAL .....                                                          | 25   |
| 9. MARCO GEOGRÁFICO .....                                                      | 26   |
| 9.1 MORFOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO .....                                       | 29   |
| 10. MARCO DEMOGRÁFICO .....                                                    | 34   |
| 11. DELIMITACIÓN .....                                                         | 35   |
| 11.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL .....                                               | 35   |
| 11.1.1 Mapa de Localización: .....                                             | 35   |
| 11.1.2 Mapa de localización del punto de captación, desarenador y tanque ..... | 36   |
| 11.1.3 Ubicación Política .....                                                | 36   |
| 11.1.5 Fuente Hídrica .....                                                    | 37   |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 11.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL.....                                 | 37 |
| 11.3 DELIMITACIÓN TEMÁTICA .....                                | 38 |
| 11.3.1 Componentes incluidos.....                               | 38 |
| 12. DISEÑO METODOLÓGICO.....                                    | 39 |
| 12.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN .....                                | 39 |
| 12.2 TIPO DE ESTUDIO .....                                      | 40 |
| 12.3 MÉTODO.....                                                | 40 |
| 12.4 TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN .....          | 40 |
| 12.4.1 Técnicas Primarias .....                                 | 40 |
| 12.4.2 Técnicas Secundarias.....                                | 40 |
| 12.5 INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....       | 40 |
| 12.6 ÁMBITO ESPACIAL .....                                      | 41 |
| 13. RECURSOS .....                                              | 42 |
| 13.1 HUMANO .....                                               | 42 |
| 13.2 MATERIAL.....                                              | 42 |
| 14. DESARROLLO DE LA INVESTIGACION .....                        | 43 |
| 14.1 EVALUACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA DISPONIBLE .....           | 43 |
| 14.1.1 Caracterización de los puntos de afloramiento .....      | 43 |
| 14.1.2 Metodología de aforo.....                                | 45 |
| 14.1.3 Resultados de los aforos .....                           | 46 |
| 14.1.4 Análisis consolidado de los aforos.....                  | 48 |
| 14.1.5 Comparación con la concesión.....                        | 50 |
| 14.1.6 Análisis estadístico de los aforos .....                 | 50 |
| 14.1.7 Registro fotográfico.....                                | 51 |
| 14.2.1 Análisis demográfico actual .....                        | 53 |
| 14.2.2 Determinación de la tasa de crecimiento poblacional..... | 53 |
| 14.2.3 Tasa de crecimiento anual .....                          | 53 |
| 14.2.4 Proyección poblacional a 25 años .....                   | 55 |
| 14.2.5 Selección del método de proyección .....                 | 56 |
| 14.2.6 Determinación de la dotación .....                       | 57 |
| 14.2.7 Cálculo de caudales de diseño .....                      | 58 |
| 14.2.8 Balance hídrico oferta–demanda.....                      | 61 |
| 14.2.9 Diseño hidráulico del sistema de captación.....          | 64 |
| 14.3 Diseño hidráulico del sistema de captación. ....           | 67 |
| 14.4 Determinación de volúmenes de almacenamiento.....          | 67 |
| 14.5 Modelación Hidráulica en EPANET .....                      | 68 |

|                      |    |
|----------------------|----|
| CONCLUSIONES .....   | 70 |
| RECOMENDACIONES..... | 71 |
| REFERENCIAS .....    | 72 |
| ANEXOS.....          | 75 |

## LISTADO DE ILUSTRACIONES

pág.

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1 Ubicación del municipio de Apulo en el departamento de Cundinamarca, Colombia.....      | 26 |
| Ilustración 2 Mapa político-administrativo del municipio de Apulo. ....                               | 27 |
| Ilustración 3 Distribución rural del municipio de Apulo. ....                                         | 28 |
| Ilustración 4 Ubicación específica del Nacedero "El Naranjalito "Lote No. 13 .....                    | 30 |
| Ilustración 5 Localización general del área de captación.....                                         | 31 |
| Ilustración 6 Curvas de nivel del área de captación.....                                              | 32 |
| Ilustración 7 Perfil topográfico captación–tanque de almacenamiento. ....                             | 32 |
| Ilustración 8 Dirección de escorrentía superficial hacia el nacedero El Naranjalito. ....             | 33 |
| Ilustración 9 Mapa de Localización punto de captación de la fuente hídrica .....                      | 35 |
| Ilustración 10 Localización de las estructuras hidráulicas principales del sistema de captación ..... | 36 |
| Ilustración 11 Flujograma metodológico.....                                                           | 39 |
| Ilustración 12 Punto 1 - Afloramiento de agua inferior .....                                          | 43 |
| Ilustración 13 Punto 2 - Afloramiento de agua superior .....                                          | 44 |
| Ilustración 14 Tanque de 2,90m x 1,60m - caída de agua del afloramiento del punto 2 .....             | 44 |
| Ilustración 15 Aforo Punto 1 (Afloramiento inferior) .....                                            | 51 |
| Ilustración 16 Aforo Punto 2 (Afloramiento superior) .....                                            | 52 |
| Ilustración 17 Resumen de parámetros de diseño.....                                                   | 66 |
| Ilustración 18 Afloramiento de agua No.1 .....                                                        | 75 |
| Ilustración 19 Aforo de afloramiento No.1 .....                                                       | 76 |
| Ilustración 20 Afloramiento No.2 .....                                                                | 76 |
| Ilustración 21 Sistema de captación existente .....                                                   | 78 |
| Ilustración 22 Sistema de Desarenador existente.....                                                  | 79 |
| Ilustración 23 Tanque de reunión de los afloramientos existente.....                                  | 80 |
| Ilustración 24 Datos de diseño.....                                                                   | 81 |
| Ilustración 25 Resumen de resultados.....                                                             | 84 |
| Ilustración 26 Plano de diseño sistema de captaciones.....                                            | 85 |
| Ilustración 27 Plano de diseño Cámara de reunión .....                                                | 86 |
| Ilustración 28 Plano se diseño de Desarenador .....                                                   | 87 |
| Ilustración 29 Plano de diseño Tanque de Almacenamiento.....                                          | 88 |
| Ilustración 30 Plano de diseño Línea de Conducción .....                                              | 89 |

## LISTADO DE TABLAS

pág.

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Normativas Nacionales .....                                   | 25 |
| Tabla 2 Normativas Municipales - Apulo Cundinamarca .....             | 25 |
| Tabla 3 Censo Poblacional Apulo 2025.....                             | 34 |
| Tabla 4 Resultados del Aforo No. 1 .....                              | 46 |
| Tabla 5 Resultados del aforo No. 2 .....                              | 47 |
| Tabla 6 Resultados del aforo No. 3 .....                              | 47 |
| Tabla 7 Resultados del aforo No. 4 .....                              | 48 |
| Tabla 8 Resumen estadístico del Punto 1 (Afloramiento inferior) ..... | 48 |
| Tabla 9 Resumen estadístico del Punto 2 (Afloramiento superior) ..... | 49 |
| Tabla 10 Caudal Total del Nacedero .....                              | 49 |
| Tabla 11 Resultados finales de los aforos .....                       | 50 |
| Tabla 12 Resultados de la proyección poblacional .....                | 56 |
| Tabla 13 Balance hídrico oferta–demanda.....                          | 62 |
| Tabla 14 Volúmenes de almacenamiento recomendados.....                | 67 |

## 1. GLOSARIO

**Aforo:** Procedimiento técnico para determinar el caudal de una fuente hídrica mediante métodos directos (correntómetro, flotador) o indirectos (vertederos, canaletas), fundamental para el diseño hidráulico del sistema de captación (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios A, 2017).

**Bocatoma:** Estructura hidráulica construida en un río, quebrada o fuente superficial, destinada a derivar parte del agua disponible en forma constante, permitiendo el paso del exceso para mantener el régimen del curso de agua (López Cualla, 2003).

**Caudal:** Volumen de agua que pasa por una sección en un tiempo determinado (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2018).

**Concesión:** Permiso administrativo otorgado para el aprovechamiento de aguas superficiales (Presidencia de la República de Colombia, 1978)

**Desarenador:** Estructura hidráulica que permite la remoción de arenas y sólidos en suspensión del agua captada, mediante procesos de sedimentación por gravedad, protegiendo los elementos aguas abajo del sistema (Arocha Ravelo, 1983).

**Dotación:** Cantidad de agua asignada por persona en un sistema de abastecimiento (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

**Hidráulica:** Rama de la física que estudia el movimiento de los líquidos y su interacción con estructuras (López Cualla, 2003).

**Tanque:** Depósito construido para almacenar agua y regular su distribución (Pérez Carmona, 2013).

## 2. RESUMEN

El presente trabajo de investigación aborda la problemática relacionada con el suministro deficiente de agua potable en el acueducto interveredal que abastece a las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo del municipio de Apulo, Cundinamarca, situación que afecta aproximadamente a 589 familias rurales. El objetivo general consiste en diseñar un sistema de captación eficiente que optimice el aprovechamiento del recurso hídrico disponible, con el fin de garantizar un caudal constante para la población beneficiaria e incluir a aquellas familias que actualmente no acceden al servicio debido a la escasez del recurso. La problemática identificada se centra en la infraestructura de captación existente, caracterizada por obras obsoletas, con baja eficiencia hidráulica y ausencia de sistemas de regulación, lo cual genera distribución insuficiente e interrupciones frecuentes en el servicio. La metodología adoptada corresponde a una investigación aplicada, de carácter descriptivo y propositivo, desarrollada en tres fases principales: diagnóstico y caracterización mediante censo poblacional y aforos de la fuente hídrica; análisis de oferta y demanda aplicando métodos de proyección demográfica con horizonte de 25 años; y diseño técnico del sistema de captación conforme a la normativa vigente. La fuente de abastecimiento, identificada como “El Naranjalito”, cuenta con concesión No. 13 que autoriza un caudal de 1,53 L/s, el cual se evalúa para determinar su suficiencia frente a la demanda proyectada. Los resultados esperados incluyen la formulación de un sistema de captación optimizado que incremente la eficiencia hidráulica y mejore la continuidad del servicio, constituyéndose en un modelo replicable para otros acueductos interveredales en el departamento de Cundinamarca.

Palabras clave: Sistema de captación, acueducto interveredal, recursos hídricos, abastecimiento rural, diseño hidráulico, Apulo-Cundinamarca.

### 3. ABSTRACT

The present research addresses the issue of deficient potable water supply in the inter-village aqueduct that serves the rural communities of Naranjal, Charcolargo, and Salcedo in the municipality of Apulo, Cundinamarca, affecting approximately 589 rural families. The general objective is to design an efficient water intake system that optimizes the use of the available water resource, in order to guarantee a constant flow for the beneficiary population and include those families that currently lack access to the service due to resource scarcity. The identified problem is focused on the existing intake infrastructure, characterized by obsolete works with low hydraulic efficiency and the absence of regulation systems, which results in insufficient distribution and frequent service interruptions. The adopted methodology corresponds to applied research of a descriptive and propositional nature, developed in three main phases: diagnosis and characterization through population census and stream gauging of the water source; supply and demand analysis using demographic projection methods with a 25-year horizon; and technical design of the intake system in accordance with current regulations. The water source, identified as "El Naranjalito," holds concession No. 13, which authorizes a flow rate of 1.53 L/s, and is evaluated to determine its sufficiency in relation to the projected demand. The expected results include the formulation of an optimized intake system that increases hydraulic efficiency and improves service continuity, establishing itself as a replicable model for other inter-village aqueducts in the department of Cundinamarca.

Keywords: Water intake system, inter-village aqueduct, water resources, rural water supply, hydraulic design, Apulo-Cundinamarca.

#### 4. INTRODUCCION

El acceso al agua potable constituye un derecho fundamental que enfrenta desafíos significativos en las zonas rurales de Colombia, particularmente en los acueductos interveredales que abastecen comunidades dispersas con limitados recursos técnicos y financieros. En este contexto, las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo del municipio de Apulo, Cundinamarca, presentan deficiencias críticas en el suministro de agua, afectando directamente la calidad de vida de aproximadamente 589 familias rurales.

La problemática se origina en la infraestructura de captación del acueducto interveredal, conformada por obras obsoletas con baja eficiencia hidráulica, ausencia de sistemas de regulación y control de caudales, y carencia de obras complementarias indispensables. Como consecuencia, se generan interrupciones frecuentes del servicio, presiones inadecuadas en la red de distribución y una cobertura insuficiente, lo cual incumple los estándares mínimos definidos en la Resolución 0330 de 2017 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

El presente trabajo surge como respuesta a la necesidad de garantizar un abastecimiento suficiente y continuo de agua potable para las comunidades mencionadas. Aunque la fuente hídrica “El Naranjalito” cuenta con concesión vigente No. 13 que autoriza un caudal de 1,53 L/s, este valor resulta limitado frente a la demanda proyectada. En consecuencia, se plantea la evaluación de alternativas hídricas que permitan complementar o, de ser necesario, sustituir la fuente actual, asegurando la cobertura total de la población.

El presente trabajo se centra exclusivamente en el diseño del sistema de captación del acueducto interveredal que abastece las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo del municipio de Apulo, Cundinamarca. El estudio no incluye el diseño de los sistemas de potabilización ni de redes de distribución, pero sí la línea de conducción primaria entre la captación y el tanque de almacenamiento, de acuerdo con lo establecido en la Resolución 0330 de 2017.

El alcance comprende las fases de diagnóstico hidrotécnico de la fuente, análisis de oferta y demanda hídrica, y dimensionamiento hidráulico de las estructuras de captación. Se reconoce como limitación principal la ausencia de series históricas largas de aforos, lo cual se compensa con mediciones representativas en épocas seca y húmeda.

El estudio se enmarca en los lineamientos del desarrollo sostenible y en las políticas nacionales orientadas a incrementar la cobertura de acueductos rurales, entre ellas el programa “Agua a la Vereda 3.0” implementado en Cundinamarca (Gobernación de Cundinamarca, 2024). La metodología adoptada corresponde a una investigación aplicada de carácter descriptivo y propositivo, estructurada en tres fases: diagnóstico y caracterización mediante censo poblacional y aforos de la fuente hídrica; análisis de oferta y demanda aplicando métodos de proyección demográfica con horizonte de 25 años (Pérez Carmona, 2013); y diseño técnico del sistema de captación conforme a la normativa vigente. Esta aproximación metodológica permite abordar integralmente los aspectos técnicos, sociales y ambientales del proyecto.

El estudio se delimita espacialmente a las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo y a la fuente hídrica “El Naranjalito”, con un horizonte temporal de 25 años para el diseño poblacional. Temáticamente, se enfoca en la fase de captación, incluyendo obras de captación lateral,

sistema de desarenación y línea de conducción, excluyendo los sistemas de tratamiento de agua potable y las redes de distribución domiciliaria.

Los antecedentes teóricos se fundamentan en los principios de la hidráulica de captaciones (López Cualla, 2003), el diseño poblacional y la normativa técnica nacional, particularmente las Resoluciones 0330 de 2017, 799 de 2021 y 844 de 2018 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017, 2018, 2021). Investigaciones recientes sobre acueductos rurales en Colombia evidencian que las principales limitaciones de estos sistemas no solo son técnicas, sino también de gestión y sostenibilidad administrativa, lo que restringe su funcionamiento a largo plazo (García-Lozada, E., Pinilla-Agudelo, G., & Rodríguez, 2024).

La relevancia del estudio radica en su aporte al fortalecimiento del conocimiento técnico en ingeniería hidráulica aplicada a acueductos interveredales, el desarrollo de metodologías de optimización para captaciones en fuentes de bajo caudal y la generación de parámetros de diseño aplicables en contextos rurales similares. Asimismo, el trabajo adquiere un significado especial al contribuir con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 6: Agua limpia y saneamiento (Naciones Unidas, 2015).

## 5. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El acueducto interveredal que abastece a las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo, en el municipio de Apulo, Cundinamarca, presenta deficiencias críticas en el suministro de agua potable que afectan aproximadamente a 589 familias rurales, equivalentes a una población estimada de 1.078 habitantes distribuidos en las tres veredas beneficiarias.

El sistema actual opera bajo la concesión de aguas superficiales No. 13, la cual autoriza un caudal de 1,53 L/s proveniente del nacedero denominado "El Naranjalito". Sin embargo, las visitas técnicas realizadas evidenciaron que la problemática no radica en la insuficiencia del caudal disponible en la fuente, sino en la inadecuada infraestructura de captación que impide aprovechar eficientemente el recurso hídrico existente.

El nacedero "El Naranjalito" presenta dos puntos naturales de afloramiento de agua que actualmente no están siendo captados de manera óptima. La infraestructura existente se caracteriza por obras obsoletas con eficiencia hidráulica reducida, ausencia de sistemas de regulación y control de caudales, deficiencias en las obras de captación que generan pérdidas significativas del recurso, y carencia de estructuras complementarias adecuadas como cámaras de captación, rejillas y desarenadores apropiados para cada punto de afloramiento.

Según los registros de la comunidad, la continuidad promedio del servicio es de 12 horas diarias en temporada de lluvias y desciende hasta 6 horas diarias durante el estiaje, con pérdidas estimadas del 35% del caudal captado debido a filtraciones y reboses. Estas cifras evidencian la baja eficiencia del sistema actual y justifican el rediseño técnico del componente de captación.

Estas condiciones generan una distribución insuficiente de agua, con interrupciones frecuentes del servicio durante la época seca, presiones inadecuadas en la red de distribución, riesgos de contaminación derivados de sistemas de captación precarios, pérdidas del recurso por infiltración y desbordamiento, y la necesidad de almacenamiento domiciliario en condiciones inadecuadas. Las mediciones técnicas realizadas mediante aforos volumétricos demuestran que el nacedero tiene capacidad para suministrar un caudal superior al concesionado, lo cual confirma que el mejoramiento del sistema de captación existente permitirá garantizar el abastecimiento continuo de la población beneficiaria.

De acuerdo con la normatividad vigente (Resolución 0330 de 2017), los sistemas de acueducto deben garantizar condiciones mínimas de continuidad y calidad, parámetros que el acueducto interveredal no cumple actualmente debido a las deficiencias de captación. Por ello surge la necesidad urgente de diseñar un sistema de captación mejorado que permita aprovechar eficientemente los dos puntos de afloramiento del nacedero, incrementar la eficiencia hidráulica, asegurar el caudal de diseño y garantizar la prestación continua del servicio de agua potable a la población beneficiaria.

## 5.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo diseñar un sistema de captación mejorado para los dos puntos de afloramiento del nacedero "El Naranjalito" que abastece al acueducto interveredal de las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo del municipio de Apulo, Cundinamarca, garantizando el aprovechamiento óptimo del recurso hídrico disponible y un suministro continuo y seguro para la población beneficiaria?

## 6. JUSTIFICACIÓN

El acceso al agua potable es un derecho fundamental consagrado en el artículo 366 de la Constitución Política de Colombia (Asamblea Nacional Constituyente, 1991) y constituye un pilar esencial para garantizar el bienestar y el desarrollo social. En coherencia con este principio, el proyecto se articula con el Objetivo de Desarrollo Sostenible No. 6: Agua Limpia y Saneamiento, que busca garantizar la disponibilidad del recurso y su gestión sostenible para todos (Naciones Unidas, 2015).

En las zonas rurales del municipio de Apulo, particularmente en las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo, la deficiencia en la prestación del servicio de agua potable limita las actividades domésticas, productivas y comunitarias de aproximadamente 589 familias rurales, afectando su calidad de vida y restringiendo su desarrollo social y económico. Ante esta situación, la implementación de un sistema de captación optimizado se convierte en una necesidad prioritaria y estratégica para garantizar la continuidad y calidad del servicio.

### 6.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

El proyecto plantea una alternativa de ingeniería basada en criterios hidráulicos y normativos actualizados (Resoluciones 0330/17, 844/18 y 799/21), orientada a garantizar un caudal continuo y una operación eficiente del sistema de captación. El rediseño prevé aumentar la eficiencia hidráulica en al menos un 30%, mejorando la capacidad de captación y reduciendo las pérdidas por infiltraciones y reboses.

La conveniencia técnica de esta investigación radica en que permitirá alcanzar niveles de continuidad del servicio cercanos al 95%, conforme a los parámetros definidos en la Resolución 0330 de 2017 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017). Asimismo, busca dar solución a las fallas derivadas de la infraestructura obsoleta, la baja eficiencia hidráulica y la ausencia de sistemas de regulación y control, que actualmente impiden aprovechar el caudal autorizado de 1,53 L/s, según la Concesión No. 13 otorgada por la Corporación Autónoma Regional (CAR, 2023).

### 6.2 JUSTIFICACIÓN SOCIAL

El acueducto interveredal abastece a 589 familias rurales, cuya calidad de vida se ve afectada por la intermitencia del servicio. Con la nueva captación, se espera mejorar la disponibilidad, continuidad y regularidad del suministro de agua, beneficiando directamente a más de 1.000 habitantes.

Además de mejorar el bienestar social, el proyecto generará impactos económicos positivos, al reducir los costos operativos anuales, eliminar los gastos por transporte de agua durante la época seca, fortalecer las actividades agrícolas y ganaderas, y aumentar el valor de las propiedades rurales. De esta forma, contribuye al desarrollo integral de las comunidades beneficiarias y a la reducción de brechas entre el ámbito urbano y rural.

### 6.3 JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL

El diseño propuesto incorpora criterios de uso eficiente del recurso hídrico (Ley 373 de 1997) y de protección del caudal ecológico (IDEAM, 2019), garantizando que el aprovechamiento no comprometa el equilibrio ecosistémico. A su vez, asegura la sostenibilidad ambiental mediante la reducción de pérdidas en captación y conducción, la preservación del nacedero “El Naranjalito” y el cumplimiento de los principios del desarrollo sostenible (Congreso de Colombia, 1994); (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Resolución 844 de 2018, 2018).

### 6.4 JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

Desde el punto de vista académico y técnico, el proyecto aporta al Objeto de Aprendizaje de Hidráulica y Sanitaria, generando un caso de aplicación real con enfoque sostenible, replicable en otras zonas rurales de Cundinamarca. Además, contribuye al avance del conocimiento mediante el desarrollo de metodologías de optimización aplicadas a captaciones en fuentes de bajo caudal, la generación de parámetros de diseño replicables y la documentación de criterios técnicos para acueductos interveredales rurales.

De esta manera, el trabajo fortalece la línea de investigación en ingeniería hidráulica de la Universidad Piloto de Colombia y sienta las bases para futuros estudios enfocados en la gestión eficiente del recurso hídrico en comunidades rurales.

En conjunto, esta investigación es significativa porque responde a una problemática local que afecta a cientos de familias rurales, al tiempo que aporta soluciones prácticas, sostenibles y replicables, alineadas con los compromisos nacionales e internacionales en materia de agua potable y saneamiento. El proyecto, además de su impacto técnico y social, constituye un modelo integral de ingeniería aplicada al desarrollo sostenible en territorios rurales de Cundinamarca.

## 7. OBJETIVOS

### 7.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de captación eficiente para el acueducto interveredal de las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo del municipio de Apulo, Cundinamarca, que optimice el aprovechamiento del recurso hídrico disponible y garantice un caudal continuo y seguro para la población beneficiaria.

### 7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar la oferta hídrica del nacedero *El Naranjalito* mediante aforos directos de los dos puntos de afloramiento.
2. Determinar la demanda actual y proyectada a 25 años, aplicando métodos aritmético, geométrico y exponencial, conforme a la normativa técnica vigente.
3. Realizar el balance hídrico oferta–demanda considerando el caudal ecológico y la variabilidad estacional de la fuente.
4. Diseñar y dimensionar las estructuras hidráulicas de captación, desarenador y línea de conducción, de acuerdo con los criterios hidráulicos de la Resolución 0330 de 2017, 799 de 2021 y 844 de 2018.

## 8. MARCO REFERENCIAL

### 8.1 ANTECEDENTES

En Colombia, los acueductos veredales han sido reconocidos como una prioridad dentro de las políticas públicas, dado que constituyen el principal mecanismo de acceso al agua potable en las zonas rurales. El Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 “Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad” estableció como meta incrementar la cobertura de acueducto en zonas rurales del 73,2% al 77,9%, reflejando el interés gubernamental en mejorar la prestación del servicio (Departamento Nacional de Planeación, 2019). En línea con esta política, Cundinamarca lidera actualmente el programa “Agua a la Vereda 3.0”, con el cual se han conectado cerca de 400 acueductos rurales mediante una inversión de \$40.000 millones, logrando un aumento de la cobertura entre 1,3% y 1,5% anual (Gobernación de Cundinamarca, 2023)

En el ámbito académico, distintas investigaciones han abordado las dificultades de gestión, operación y sostenibilidad de los acueductos rurales. Por ejemplo, (García-Lozada, E., Pinilla-Agudelo, G., & Rodríguez, 2024) realizaron una revisión sistemática sobre "Acueductos rurales basados en la comunidad: factores de gestión y administrativos que restringen su funcionamiento", analizando múltiples casos en Colombia e identificando limitaciones operativas similares a las del presente estudio.

De manera complementaria, (Calderón, M., & López, A., 2024) desarrollaron la investigación “*Gestión del recurso hídrico en la ruralidad, mediante estrategias de fortalecimiento comunitario*”, donde evidencian que las problemáticas en los acueductos rurales no solo son de carácter técnico, sino también sociales y ambientales, proponiendo mecanismos de fortalecimiento comunitario que pueden servir como base para el diseño de estrategias en el contexto de Cundinamarca.

Asimismo, (Vargas-Fonseca, L., & Torres-González, Y., 2024) analizaron las “*Transformaciones en el espacio urbano-rural en Colombia y su impacto en el suministro de agua*”, concluyendo que la cobertura en zonas rurales alcanza apenas un 73%, lo que refleja una brecha considerable frente al acceso urbano. Este estudio resalta la necesidad de implementar esquemas diferenciales para acueductos rurales, aplicables a proyectos como el que se propone en las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo.

De forma complementaria, la literatura internacional también evidencia que las problemáticas de abastecimiento en zonas rurales son comunes en países en desarrollo. Por ejemplo, la (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2019) ha señalado que uno de los principales desafíos globales es garantizar la sostenibilidad de los sistemas de agua potable rurales, debido a la presión sobre las fuentes hídricas, el cambio climático y la falta de infraestructura adecuada. Este marco de referencia refuerza la pertinencia del presente estudio al situarlo en un contexto tanto nacional como global.

## 8.2 MARCO TEÓRICO

### 8.2.1 Hidráulica de Captaciones

Según (López Cualla, 2003), los sistemas de captación de agua en nacederos operan bajo principios hidráulicos fundamentales que garantizan un funcionamiento eficiente y seguro. Estos incluyen:

- Ecuación de continuidad:  $Q = V \times A$ , que permite relacionar caudal, velocidad y área de paso del flujo.
- Pérdidas de carga: Modeladas a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach, que incorpora factores de fricción y rugosidad de los materiales empleados.
- Velocidades de aproximación: Definidas mediante criterios hidráulicos que buscan evitar sedimentación, erosión y entrada de sólidos en exceso.
- Eficiencia hidráulica: Relación entre el caudal captado y el disponible en la fuente, optimizando la operación del sistema.

La captación en nacederos requiere consideraciones especiales cuando existen múltiples puntos de afloramiento. Según (Arocha Ravelo, 1983), es fundamental diseñar estructuras independientes para cada punto que luego confluyan en un sistema unificado, permitiendo:

- Control individual de cada afloramiento
- Protección contra contaminación superficial
- Facilidad de mantenimiento
- Flexibilidad operativa

Las obras de captación en nacederos deben incluir: cámara de captación con filtro de grava, tubería de recolección perforada, cámara de reunión (cuando hay múltiples puntos), rebose y limpieza, y válvula de control (CEDEX, 2012).

Asimismo, se emplean desarenadores para controlar la entrada de sólidos, manteniendo la durabilidad del sistema. En nacederos, estos se dimensionan considerando caudales relativamente bajos, pero con posible arrastre de partículas finas durante períodos de lluvia.

De acuerdo con el Manual de Diseño de Obras de Toma del (CEDEX, 2018), la eficiencia de las obras de captación depende del tipo de afloramiento, la velocidad de aproximación y el grado de filtración natural del medio rocoso. En sistemas rurales, se recomienda mantener velocidades menores a 0,3 m/s en las rejillas de entrada para evitar arrastre de sedimentos.

Asimismo, estudios recientes de (Rojas, L. F., & Pinto, D., 2021) sobre captaciones en fuentes subterráneas en Boyacá demuestran que el uso de geotextiles filtrantes y drenajes perimetrales mejora la calidad del agua captada y reduce los costos de mantenimiento.

### 8.2.2 Diseño Poblacional

De acuerdo con (Pérez Carmona, 2013) la proyección de la población es un insumo crítico para el dimensionamiento de los sistemas de abastecimiento. Se utilizan métodos estadísticos reconocidos, entre ellos:

**Método Aritmético:**  $P(t) = P_0 + r \times t$

**Método Geométrico:**  $P(t) = P_0 \times (1 + r)^t$

**Método Exponencial:**  $P(t) = P_0 \times e^{(rt)}$

La selección del método apropiado depende del análisis de tendencias históricas y características demográficas locales.

### 8.2.3 Caudales de Diseño

De acuerdo con la normativa técnica vigente, el cálculo de caudales debe contemplar tanto consumos promedio como picos de demanda (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Resolución 844 de 2018, 2018).

- **Caudal medio diario (Qmd):** Consumo promedio
- **Caudal máximo diario (QMD):**  $QMD = k_1 \times Qmd$  ( $k_1 = 1,3$ )
- **Caudal máximo horario (QMH):**  $QMH = k_2 \times Qmd$  ( $k_2 = 1,6$ )

Este análisis se complementa con la evaluación de la oferta hídrica de la fuente y su relación con la demanda proyectada, buscando un equilibrio sostenible (IDEAM, 2019).

### 8.2.4 Dotaciones

La Resolución 0330 de 2017 establece las dotaciones netas mínimas según el nivel de complejidad del sistema. Para poblaciones rurales de bajo nivel de complejidad, se establece un valor de 100 L/hab/día (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

Además, la OMS recomienda un rango de 50 a 100 L/hab/día para garantizar condiciones básicas de higiene y salud pública (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2011)

### 8.2.5 Sostenibilidad y Gestión Comunitaria del Agua

Más allá de los criterios técnicos, la sostenibilidad de los sistemas de captación en zonas rurales depende de la gestión comunitaria del recurso hídrico. Diversos estudios han demostrado que la participación de la comunidad en la operación y mantenimiento de los acueductos es un factor decisivo para su permanencia (García-Lozada, E., Pinilla-Agudelo, G., & Rodríguez, 2024).

El enfoque de gestión comunitaria también se alinea con los principios del ODS 6 – Agua limpia y saneamiento, que promueve el acceso equitativo y sostenible al recurso hídrico (Naciones Unidas, 2015).

### 8.3 MARCO CONCEPTUAL

El marco conceptual se estructura alrededor de los siguientes conceptos técnicos fundamentales:

**Concesión de Aguas:** Autorización administrativa otorgada por la autoridad ambiental competente (CAR) para el aprovechamiento del recurso hídrico de fuentes superficiales, mediante acto administrativo que establece condiciones, caudal máximo, vigencia y obligaciones del concesionario (Presidencia de la República de Colombia, 1978).

**Caudal Ecológico:** Volumen de agua mínimo que debe mantenerse en una fuente hídrica para preservar la integridad del ecosistema acuático, garantizar la supervivencia de especies y mantener los servicios ecosistémicos. Su determinación sigue metodologías establecidas por el IDEAM (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2019).

**Sistema de Captación:** Conjunto integrado de obras civiles e hidráulicas diseñadas para derivar agua desde una fuente natural hacia el sistema de conducción, incluyendo bocatoma, rejillas, desarenador, cámara de aquietamiento y estructura de control (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

**Línea de Conducción:** Sistema de tuberías, canales y estructuras complementarias que permiten transportar el agua desde la captación hasta la planta de tratamiento o tanque de almacenamiento, diseñado para transportar el caudal máximo diario (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

**Tanque de Almacenamiento:** Estructura de concreto, metálica o de otros materiales, destinada a almacenar agua para compensar las variaciones horarias del consumo, proporcionando presión adecuada al sistema de distribución y reserva para emergencias (Pérez Carmona, 2013).

**Acueducto Interveredal:** Sistema de abastecimiento de agua potable que sirve a múltiples veredas desde una fuente común, caracterizado por su gestión comunitaria y operación descentralizada, regulado por la Ley 142 de 1994 y el Decreto 1898 de 2016 (Congreso de Colombia, 1994); (Presidencia de la República de Colombia, 2016)

**Período de Diseño:** Horizonte temporal para el cual se dimensionan las obras de infraestructura, considerando factores económicos, vida útil de materiales, crecimiento poblacional y capacidad de expansión. Para acueductos rurales se establece típicamente en 20 años (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

## 8.4 MARCO LEGAL

El diseño de un sistema de captación de agua debe sustentarse en la normatividad vigente en Colombia, la cual establece las disposiciones jurídicas para el manejo, protección y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico. A continuación, se presentan las principales normas y leyes que fundamentan esta investigación, organizadas en orden jerárquico y cronológico.

Tabla 1 Normativas Nacionales

| <b>NORMATIVAS NACIONALES</b>             |                   |                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>NORMATIVA</b>                         | <b>ARTÍCULO</b>   | <b>OBJETO</b>                                                                                                                                    |
| <b>Constitución Política de Colombia</b> | Art. 79 y 80      | Reconoce el derecho a gozar de un ambiente sano y establece la obligación del Estado de planificar el aprovechamiento de los recursos naturales. |
| <b>Decreto 1541 de 1978</b>              | Arts. 40 – 56     | Reglamenta los usos del agua y define las condiciones para otorgar concesiones de captación en fuentes superficiales.                            |
| <b>Ley 99 de 1993</b>                    | Art. 1            | Crea el Ministerio de Ambiente y el SINA, declarando al agua como recurso esencial cuya protección es deber del Estado y la sociedad.            |
| <b>Ley 373 de 1997</b>                   | Arts. 1 – 3       | Establece el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA), obligatorio para todos los usuarios.                                      |
| <b>Resolución 2115 de 2007</b>           | Arts. 1 – 3       | Define criterios de calidad del agua para consumo humano y los sistemas de control y vigilancia para garantizar su potabilidad.                  |
| <b>Decreto 3930 de 2010</b>              | Art. 9            | Reglamenta usos del recurso hídrico y vertimientos, estableciendo la obligatoriedad de respetar el caudal ecológico mínimo en captaciones.       |
| <b>Resolución 0330 de 2017</b>           | Cap. II, Título B | Establece el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), incluyendo dotaciones mínimas y parámetros de diseño.     |
| <b>Resolución 799 de 2021</b>            | Arts. 1 – 4       | Define lineamientos técnicos para el diseño de sistemas de acueducto, aplicables a zonas rurales y urbanas.                                      |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2 Normativas Municipales - Apulo Cundinamarca

| <b>NORMATIVAS MUNICIPALES - APULO CUNDINAMARCA</b> |                            |                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>NORMATIVA</b>                                   | <b>ARTÍCULO</b>            | <b>OBJETO</b>                                                                                                        |
| <b>POT de Apulo</b>                                | Cap. de Servicios Públicos | Establece lineamientos para el suministro de agua potable, uso del suelo y protección de microcuencas abastecedoras. |

Fuente: Elaboración propia.

## 9. MARCO GEOGRÁFICO

El presente proyecto se desarrolla en el municipio de Apulo, localizado en el departamento de Cundinamarca, Colombia. Este territorio pertenece a la provincia del Tequendama y se encuentra a una altitud promedio de 420 m s. n. m., con una temperatura media anual de 26 °C y una población aproximada de 9.000 habitantes (DANE, 2018).

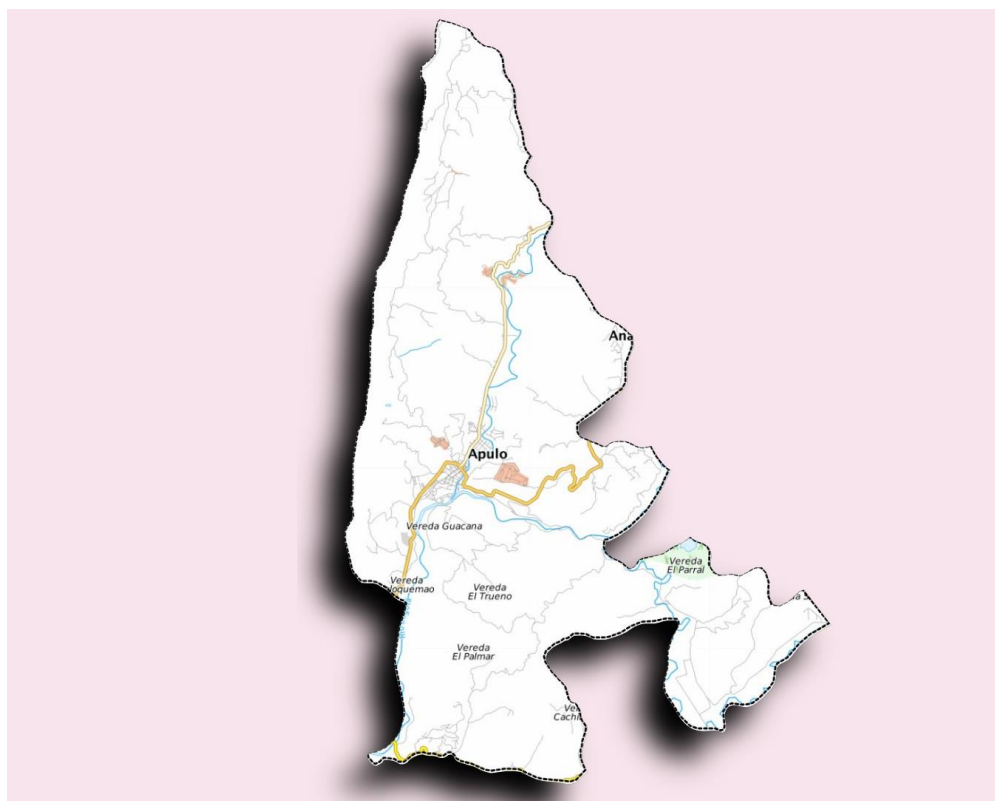
Ilustración 1 Ubicación del municipio de Apulo en el departamento de Cundinamarca, Colombia.



Fuente: Sacado de Wikipedia. “Archivo:Colombia - Cundinamarca - Apulo.svg”. Autor: Milenioscuro. Licencia CC BY-SA 3.0.

Apulo limita al norte con los municipios de Anapoima y La Mesa, al oriente con Quipile, al sur con Tocaima, y al occidente con Viotá. Su ubicación estratégica, a aproximadamente 91 km de Bogotá, facilita la conexión con la capital mediante la vía Bogotá–Girardot, lo que contribuye al acceso y movilidad dentro del territorio.

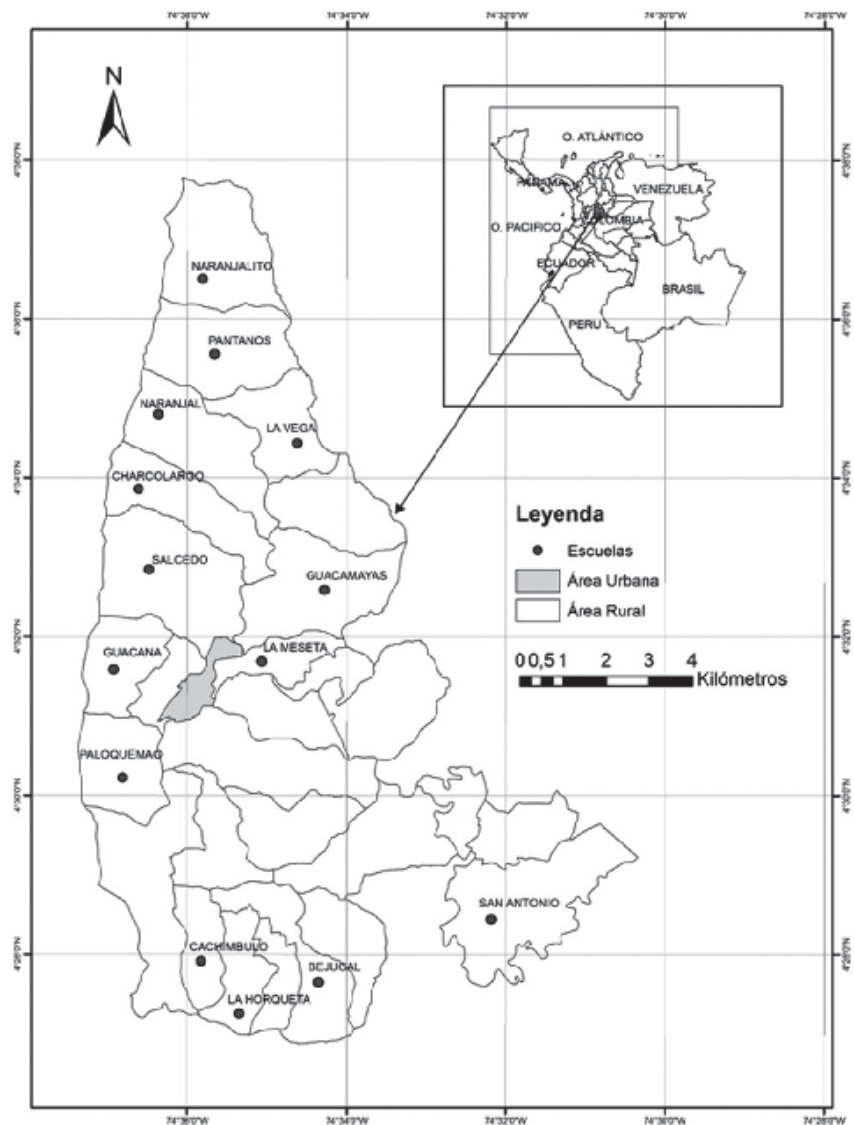
Ilustración 2 Mapa político-administrativo del municipio de Apulo.



Fuente: Sacado de PaintMaps. “Mapas de muestra de Apulo generados con la herramienta de recorte de mapas”.

El área de estudio se focaliza en las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo, donde se identifica la necesidad de diseñar un sistema de captación de agua que garantice el abastecimiento a las familias rurales. Estas veredas presentan una red hídrica conformada por nacederos y microcuencas, que históricamente han servido como fuentes de abastecimiento, aunque actualmente presentan limitaciones en caudal y calidad durante las épocas de estiaje

Ilustración 3 Distribución rural del municipio de Apulo.



Fuente: Sacado de Cabezas, L. "Municipio de Apulo y escuelas del área rural". Scientific Diagram.

## 9.1 MORFOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La microcuenca de El Naranjalito, ubicada en la vereda Naranjal del municipio de Apulo, presenta un relieve de tipo ondulado a moderadamente escarpado, con una pendiente promedio del 12 %. Esta configuración topográfica favorece un flujo superficial organizado hacia los cauces naturales, incidiendo directamente en los procesos de escorrentía, infiltración y recarga hídrica, aspectos esenciales para el diseño del sistema de captación propuesto. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2014).

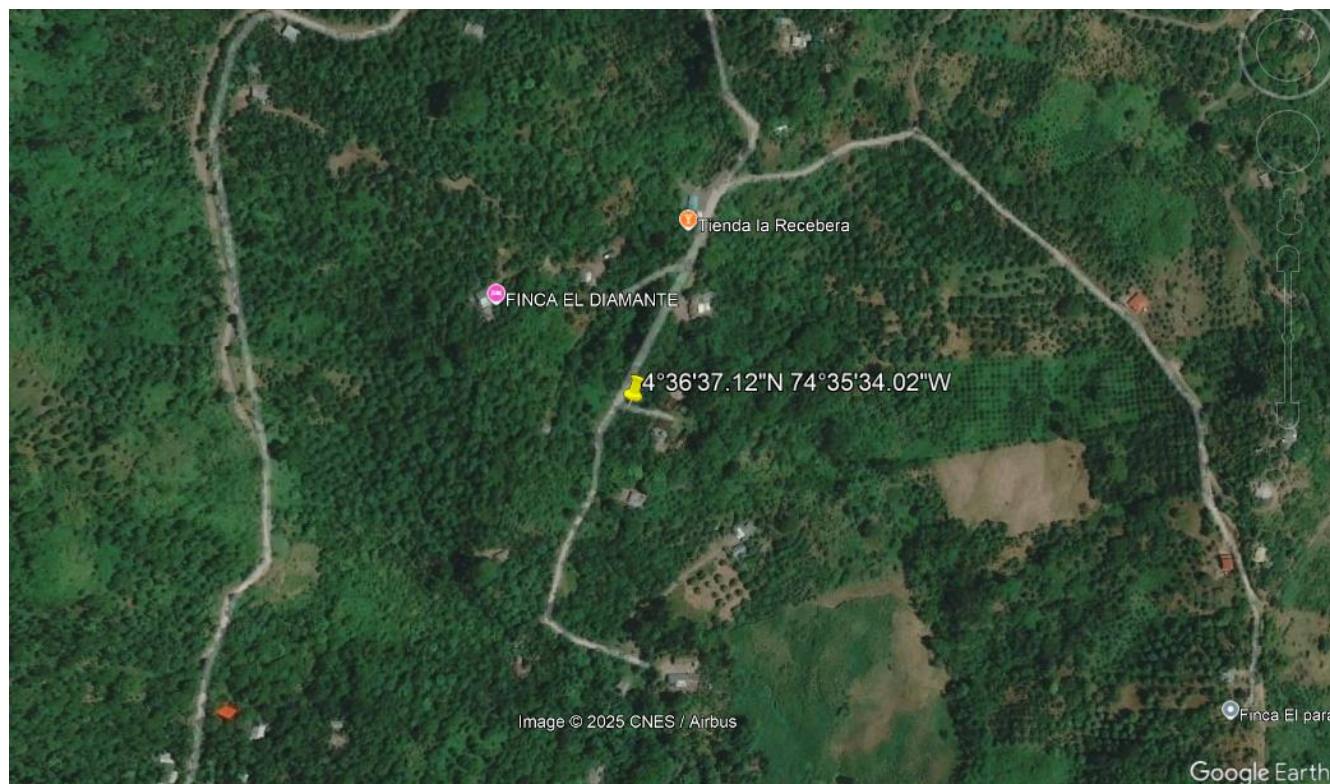
El área está cubierta predominantemente por bosque secundario y pastos limpios, lo que contribuye a la regulación del ciclo hidrológico mediante la retención de humedad, reducción de la erosión y control de la sedimentación en los cuerpos de agua. La vegetación cumple además una función protectora de los nacaderos y zonas de recarga (IDEAM, 2014).

En cuanto a su composición geológica, los suelos corresponden a la formación sedimentaria del Grupo Guadalupe, integrada por areniscas y limolitas fracturadas, materiales que presentan alta permeabilidad y favorecen la surgencia de aguas subterráneas (Servicio Geológico Colombiano (Servicio Geológico Colombiano, 2018). Estas condiciones geológicas resultan óptimas para la captación y conducción de caudales destinados al acueducto interveredal.

El drenaje superficial se orienta hacia la quebrada Salcedo, la cual es tributaria del río Apulo, conformando una red hidrográfica de orden secundario que drena de manera eficiente el territorio. En conjunto, la morfología, geología y cobertura vegetal de la microcuenca ofrecen condiciones favorables para la implementación técnica del sistema de captación que busca garantizar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en la zona rural (IDEAM, 2014; SGC, 2018).

El municipio cuenta actualmente con un sistema de acueducto interveredal que abastece parcialmente a la población rural. Sin embargo, la infraestructura existente presenta deficiencias técnicas que afectan la continuidad y calidad del servicio. Por ello, la propuesta del presente trabajo busca mejorar las condiciones de captación y conducción, en concordancia con los planes de desarrollo municipal y departamental, contribuyendo al fortalecimiento del servicio de agua potable en las zonas rurales de Apulo.

#### Ilustración 4 Ubicación específica del Nacedero "El Naranjalito "Lote No. 13



Fuente: Sacado de Google Earth.

### 9.2 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DEL ÁREA DE CAPTACIÓN

El levantamiento topográfico se realizó en la vereda Naranjalito, Lote 13, donde se localiza el nacedero El Naranjalito, fuente de abastecimiento propuesta para el sistema de captación del acueducto interveredal. La información se obtuvo mediante la herramienta Google Earth Ec, a partir de la cual se generó un modelo topográfico con curvas de nivel cada 1 metro de equidistancia sobre el área de influencia directa del punto de toma.

En la Ilustración 5 se presenta la localización general del área de captación dentro de la vereda Naranjalito, identificando la zona del nacedero y su relación con el entorno inmediato. Posteriormente, la Ilustración 6 muestra el plano topográfico con las curvas de nivel obtenidas, donde se evidencia una pendiente media en dirección suroeste hacia el cauce principal.

A partir del trazado del perfil longitudinal (Ilustración 7), se determinó un desnivel total aproximado de 8 metros entre el punto de captación y la ubicación proyectada del tanque de almacenamiento, sobre una longitud de conducción de 67,3 metros, lo que representa una pendiente media de 11,9 %. Este valor es coherente con el utilizado en las memorias de cálculo hidráulico del diseño, garantizando un flujo gravitacional estable sin necesidad de bombeo mecánico.

Finalmente, en la Ilustración 8 se representa la dirección de escorrentía superficial y el flujo natural del terreno hacia el nacedero El Naranjalito, lo cual sustenta técnicamente la ubicación

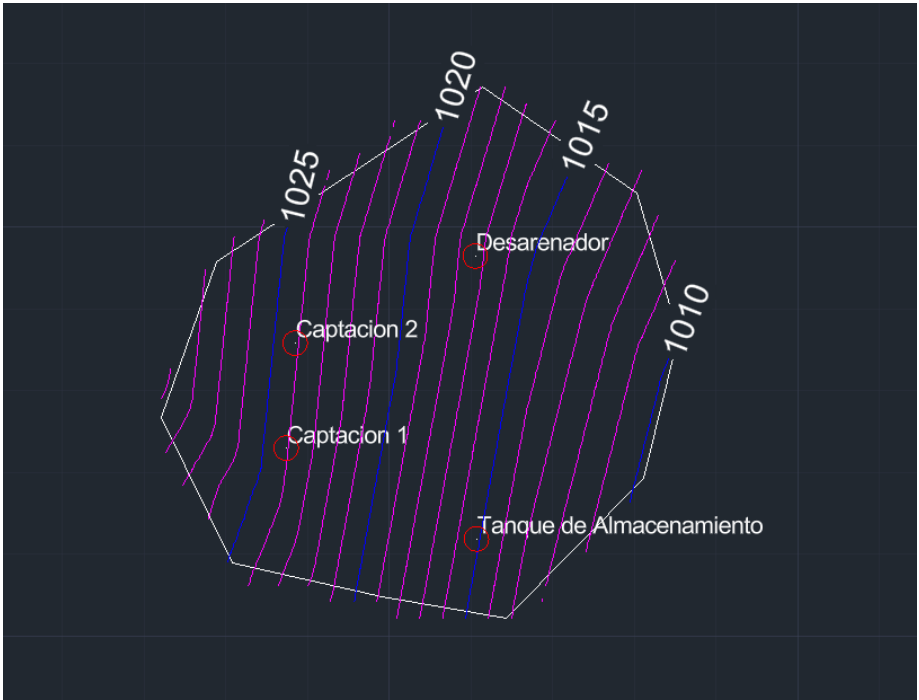
seleccionada para la obra de captación. La configuración del relieve favorece la recolección del caudal subterráneo emergente y minimiza el riesgo de arrastre de sedimentos hacia la estructura.

Ilustración 5 Localización general del área de captación.



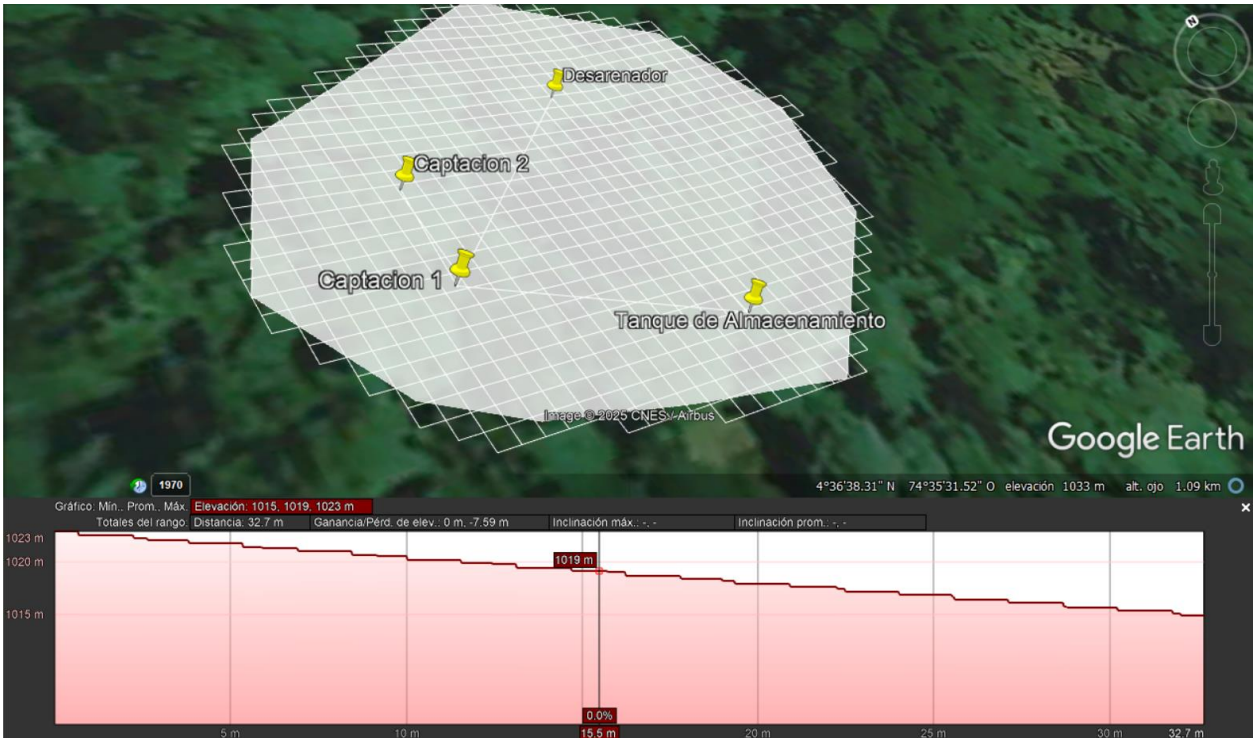
Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth Ec (2025).

Ilustración 6 Curvas de nivel del área de captación.



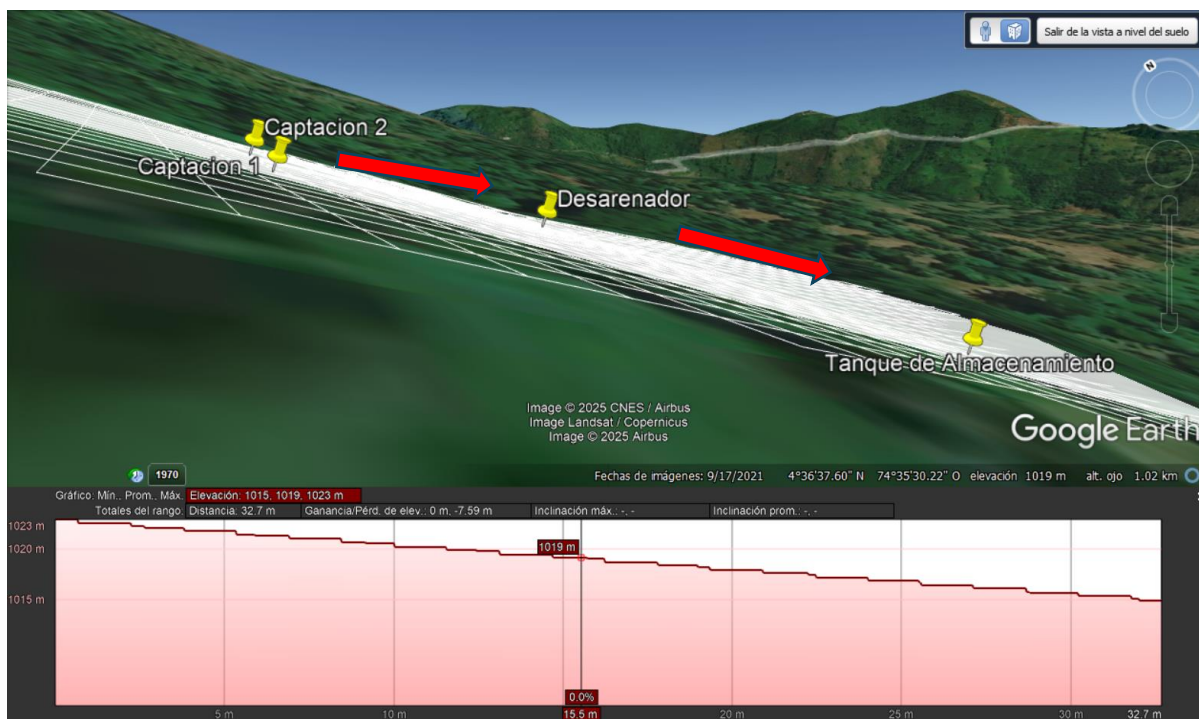
Fuente: Elaboración propia a partir de AutoCAD 2026 (2025).

Ilustración 7 Perfil topográfico captación–tanque de almacenamiento.



Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth Ec (2025).

Ilustración 8 Dirección de escorrentía superficial hacia el nacedero El Naranjalito.



Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth Ec (2025).

## 10. MARCO DEMOGRÁFICO

El estudio de la población constituye un elemento esencial para fundamentar la planificación del diseño de sistemas de captación de agua potable en zonas rurales. En Colombia, de acuerdo con el Censo Nacional de Población y Vivienda realizado por el (DANE, 2018), el 15,8 % de los habitantes residen en zonas rurales dispersas, lo cual refleja que una parte significativa de la población vive bajo condiciones de menor accesibilidad a servicios públicos básicos. En este sentido, la caracterización demográfica local se vuelve fundamental para dimensionar correctamente el sistema en las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo, cuyos habitantes dependen directamente de fuentes hídricas locales para su subsistencia.

En el municipio de Apulo, departamento de Cundinamarca, la población rural de las veredas objeto de estudio se encuentra caracterizada por los siguientes indicadores, obtenidos a través de la base de datos del (SISBÉN, 2025)(corte del 12 de septiembre de 2025):

Tabla 3 Censo Poblacional Apulo 2025

| Censo Poblacional Apulo 2025 |            |            |             |
|------------------------------|------------|------------|-------------|
| Vereda                       | Viviendas  | Hogares    | Habitantes  |
| Naranjal                     | 318        | 321        | 605         |
| Charcolargo                  | 141        | 145        | 243         |
| Salcedo                      | 123        | 123        | 230         |
| <b>TOTAL</b>                 | <b>582</b> | <b>589</b> | <b>1078</b> |

Fuente: Elaboración propia, en base a información del SISBÉN

La sumatoria de estos datos refleja una población total de **1.078 habitantes**, lo que constituye la base poblacional para el cálculo de la demanda hídrica actual y proyectada del sistema de captación propuesto. Esta caracterización permite establecer con mayor precisión el dimensionamiento técnico de las obras hidráulicas, garantizando que el diseño responda de manera adecuada a las necesidades reales de la comunidad.

## 11. DELIMITACIÓN

### 11.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL

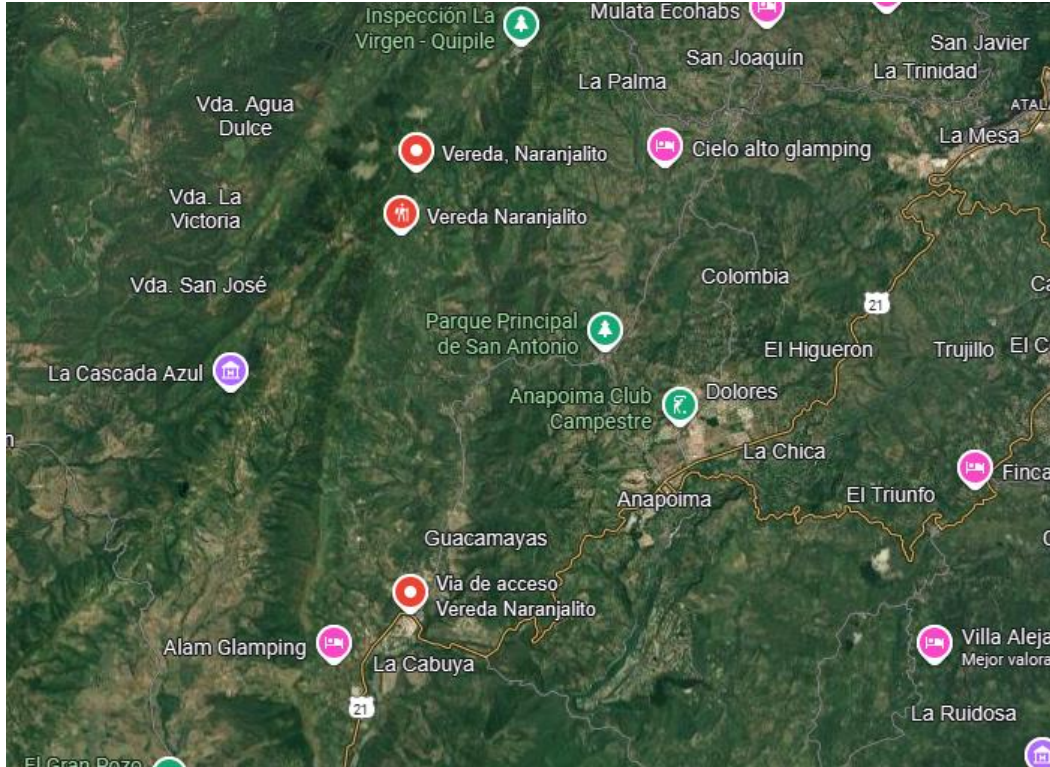
El área de estudio se ubica en el municipio de Apulo, departamento de Cundinamarca, Colombia, dentro de la zona de influencia del nacedero conocido como “El Naranjalito”, objeto de la Concesión No. 13, con un caudal autorizado de 1,53 L/s.

El proyecto comprende las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo, que conforman el ámbito de cobertura del acueducto interveredal existente. Estas veredas presentan condiciones topográficas, geológicas e hidrológicas favorables para el desarrollo del sistema de captación, localizadas en un entorno rural caracterizado por la dispersión de viviendas y la dependencia directa de fuentes naturales para el abastecimiento de agua.

La delimitación espacial se justifica por la necesidad de atender una problemática local concreta relacionada con la ineficiencia del sistema de captación actual y las pérdidas del recurso hídrico, afectando directamente a las familias rurales de dichas veredas.

#### 11.1.1 Mapa de Localización:

Ilustración 9 Mapa de Localización punto de captación de la fuente hídrica



Fuente: Sacado de Google Maps.

### 11.1.2 Mapa de localización del punto de captación, desarenador y tanque

Ilustración 10 Localización de las estructuras hidráulicas principales del sistema de captación



Fuente: Sacado de Informe Técnico DRTE No. 0956 CAR 2024

### 11.1.3 Ubicación Política

Las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo pertenecen al municipio de Apulo, departamento de Cundinamarca, Colombia, específicamente en la zona de influencia del nacedero objeto de la concesión No. 13 con caudal autorizado de 1.53 L/s.

### 11.1.4 Coordenadas del Área de Estudio

- Punto de captación: E: 4823469, N: 2067638, a una altitud de 1.023 m.s.n.m.
- Naranjal: 4° 35' 3.66" N, 74° 36' 0.01" W.
- Charcolargo: 4° 33' 51.66" N, 74° 36' 29.36" W.
- Salcedo: 4° 32' 47.95" N, 74° 36' 22.38" W.

### 11.1.5 Fuente Hídrica

#### Nacedero "El Naranjalito"

El nacedero presenta dos puntos naturales de afloramiento de agua subterránea identificados como:

- Punto 1 (Afloramiento inferior): Ubicado en la parte baja de la formación rocosa
- Punto 2 (Afloramiento superior): Ubicado en la parte media-alta de la formación rocosa

Ambos puntos forman parte del mismo sistema hidrogeológico y constituyen la fuente autorizada bajo la concesión No. 13. La caracterización hidrotécnica mediante aforos volumétricos permite determinar el caudal total disponible como la sumatoria de ambos afloramientos.

#### 11.1.5.1 Características del nacedero

- Formación geológica: Afloramiento en roca sedimentaria con fracturamiento natural
- Tipo de nacedero: Concentrado con múltiples puntos de salida
- Protección existente: Parcial, requiere mejoramiento
- Accesibilidad: Media, requiere adecuaciones para mantenimiento

De acuerdo con (CAR, 2024), los nacederos en la zona presentan comportamiento variable con reducciones de caudal en períodos de sequía, lo que justifica la necesidad de sistemas de captación eficientes que aprovechen al máximo el recurso disponible.

### 11.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL

El estudio se desarrollará en un periodo de dos (2) meses, correspondiente al tiempo estimado para la elaboración del trabajo de grado. Asimismo, se establece un horizonte de diseño de 25 años, con el fin de proyectar adecuadamente la demanda poblacional y el abastecimiento hídrico futuro.

Este horizonte se define conforme a las directrices del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), adoptado mediante la Resolución 0330 de 2017, el cual recomienda un periodo de diseño entre 20 y 25 años para los sistemas de acueductos rurales de bajo nivel de complejidad (RAS, 2000). Dicho plazo permite asegurar que las obras hidráulicas diseñadas mantengan su funcionalidad, capacidad y eficiencia durante la vida útil proyectada, considerando el crecimiento poblacional, las variaciones en la demanda y las condiciones de operación del sistema.

### 11.3 DELIMITACIÓN TEMÁTICA

El proyecto se centra de manera específica en el diseño del sistema de captación de agua, abarcando únicamente los componentes que intervienen en la recolección, transporte inicial y pretratamiento del recurso hídrico.

#### 11.3.1 Componentes incluidos

- Diseño del sistema de captación en los dos puntos de afloramiento del nacedero “El Naranjalito”.
- Diseño del sistema de desarenación o sedimentación inicial.
- Diseño de la línea de conducción desde la captación hasta el tanque de almacenamiento.
- Evaluación del balance hídrico oferta–demanda y análisis del caudal ecológico.

#### 11.3.2 Componentes excluidos

- Diseño de sistemas de potabilización o tratamiento de agua.
- Diseño de redes de distribución domiciliaria.
- Diseño de sistemas de alcantarillado y saneamiento básico.
- Estudios geotécnicos o estructurales detallados para cimentaciones.
- Diseño arquitectónico o urbanístico de edificaciones complementarias.

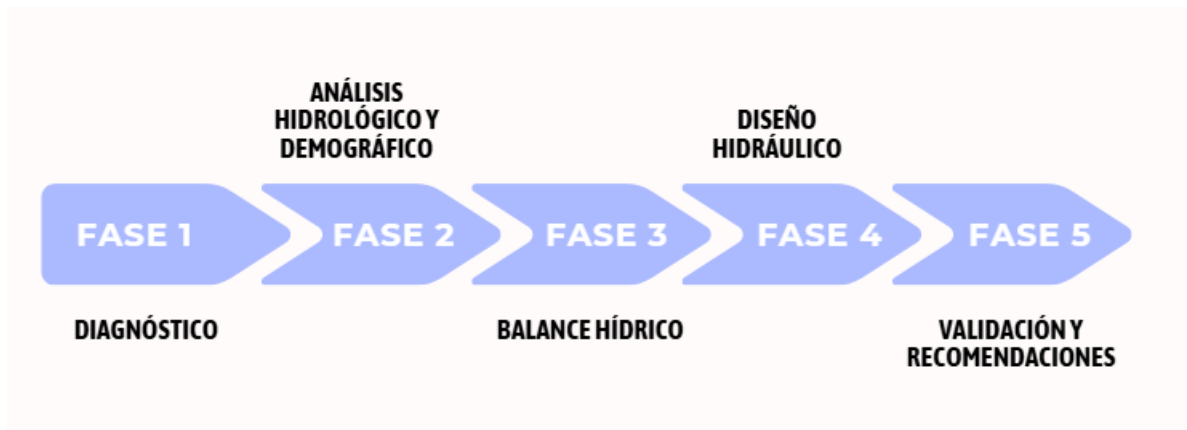
Esta delimitación temática se fundamenta en el alcance definido para trabajos de grado en ingeniería civil con enfoque hidráulico, priorizando la factibilidad técnica del sistema de captación y su correspondencia con los lineamientos del RAS 2017 y las Resoluciones 799 de 2021 y 844 de 2018, que orientan el diseño de acueductos rurales de pequeña escala.

## 12. DISEÑO METODOLÓGICO

La metodología se desarrolla en cinco fases integradas:

1. Diagnóstico y caracterización: Incluye el levantamiento de información primaria mediante medición de aforos, levantamiento topográfico, inspección del área de captación y análisis de la infraestructura existente.
2. Análisis hidrológico y demográfico: Comprende el procesamiento de los datos de precipitación, escorrentía y oferta hídrica, junto con la estimación de la población beneficiaria actual y futura, considerando tasas de crecimiento y demanda proyectada.
3. Balance hídrico: Permite determinar la disponibilidad del recurso en relación con la demanda estimada, estableciendo el caudal de diseño y los posibles escenarios de déficit o excedente.
4. Diseño hidráulico: Consiste en el dimensionamiento de las estructuras principales (captación, conducción, desarenador y tanque de almacenamiento), la simulación del sistema mediante el software EPANET y la validación del cumplimiento normativo.
5. Validación y recomendaciones: Comprende la revisión técnica final, la comparación de resultados con los criterios de diseño establecidos y la formulación de recomendaciones orientadas a la optimización y sostenibilidad del sistema.

Ilustración 11 Flujograma metodológico



Fuente: Elaboración propia.

### 12.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es aplicada de carácter descriptivo y propositivo, orientada a solucionar una problemática específica mediante el diseño de una solución técnica con aplicación práctica inmediata.

## 12.2 TIPO DE ESTUDIO

Se adopta un estudio de caso con enfoque mixto, que integra:

- Componentes cuantitativos: cálculos hidráulicos, aforos y análisis de datos poblacionales.
- Componentes cualitativos: percepción comunitaria y evaluación del sistema actual. Esto permite una comprensión integral de la problemática y la construcción de propuestas viables.

## 12.3 MÉTODO

Se emplea el método hipotético-deductivo, partiendo de la hipótesis de que:

*"Un sistema de captación técnicamente optimizado incrementará la eficiencia hidráulica en al menos un 30% y mejorará significativamente la continuidad del servicio del acueducto interveredal."*

## 12.4 TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

### 12.4.1 Técnicas Primarias

- Trabajo de campo: aforos directos, levantamiento topográfico y caracterización física de la fuente.
- Encuestas estructuradas: censo poblacional y caracterización socioeconómica.
- Observación directa: evaluación técnica del sistema actual e identificación de deficiencias.

### 12.4.2 Técnicas Secundarias

- Revisión documental: Análisis de concesiones, estudios previos, normativa técnica y cartografía oficial
- Análisis estadístico: Procesamiento de datos demográficos e hidrológicos

## 12.5 INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron diversos instrumentos, herramientas y referentes técnicos que permitieron obtener, procesar y validar la información necesaria para el diseño del sistema de captación. Estos se clasifican de la siguiente manera:

- Formatos y mediciones de campo: Se emplearon formatos de aforo y registro de caudales para determinar la disponibilidad del recurso hídrico en el punto de captación, siguiendo los lineamientos del IDEAM (2015) y del Manual de Obras de Captación del CEDEX (2018).

- Herramientas y software de apoyo: Se hizo uso de AutoCAD 2026 (versión en español) para la elaboración de planos, Google Earth Ec y CAD Earth para la obtención del levantamiento y perfil topográfico, EPANET para la simulación hidráulica de las líneas de conducción, y Microsoft Excel para el procesamiento de datos, cálculos y elaboración de las memorias hidráulicas.
- Normativa técnica y regulatoria vigente: El diseño se fundamentó en las Resoluciones 0330 de 2017, 799 de 2021 y 844 de 2018 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, así como en los lineamientos del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000, Título B), la Norma Técnica Colombiana NTC 1500 (tuberías de PVC para conducción de agua), y el Manual de Diseño de Obras de Toma y Captación – CEDEX (2018), la determinación del caudal ecológico se basó en los criterios del Decreto 1076 de 2015.

## 12.6 ÁMBITO ESPACIAL

La metodología se aplica en las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo, municipio de Apulo, Cundinamarca, en el área de influencia del nacedero “El Naranjalito”, fuente hídrica objeto del estudio.

## 13. RECURSOS

### 13.1 HUMANO

El desarrollo del proyecto de investigación requiere la participación de recurso humano con diferentes niveles de formación y experiencia, lo cual garantiza la rigurosidad técnica y la pertinencia social de los resultados.

En primer lugar, el investigador principal asume la dirección general del proyecto, siendo responsable de la planificación, ejecución y redacción del documento de grado. De manera complementaria, se cuenta con el acompañamiento de un director de trabajo de grado, quien orienta el proceso metodológico y asegura el cumplimiento de los lineamientos académicos y normativos.

En el ámbito técnico, la investigación considera el apoyo de profesionales y técnicos especializados en ingeniería civil e hidráulica para la validación de los cálculos y la interpretación de los resultados. Asimismo, se incluyen los líderes comunitarios de las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo, quienes aportan información clave sobre las condiciones actuales del acueducto interveredal y las necesidades de la población beneficiaria.

De igual forma, se contempla la participación de auxiliares de campo para la recolección de datos, la realización de aforos y el levantamiento topográfico, asegurando que la información obtenida sea precisa y confiable.

### 13.2 MATERIAL

Para el adecuado desarrollo de la investigación se requiere la utilización de materiales, equipos e insumos que permiten tanto la recolección como el análisis de la información.

Dentro de los recursos materiales se incluyen: formatos impresos para aforos, papelería general, herramientas de dibujo técnico y dispositivos de almacenamiento digital.

En cuanto al equipo, se considera el uso de instrumentos de medición como flexómetros, cronómetros y GPS, necesarios para los trabajos de campo. De manera complementaria, se emplean equipos de cómputo con software especializado (AutoCAD 2026, EPANET, Google Earth y Excel) que permiten procesar la información, elaborar planos y realizar simulaciones hidráulicas.

## 14. DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

### 14.1 EVALUACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA DISPONIBLE

#### 14.1.1 Caracterización de los puntos de afloramiento

El nacedero "El Naranjalito" presenta dos puntos naturales de afloramiento de agua subterránea ubicados en diferentes niveles de la formación rocosa:

- Punto 1 (Afloramiento inferior): Ubicado en la parte baja de la peña, presenta un flujo de menor magnitud, pero constante. No cuenta con tubería de conducción; el agua cae directamente a un tanque de 1,00 x 1,00 m, el cual comparte pared con otro tanque de 2,90 x 1,60 m. Ambos tanques están interconectados mediante una canaleta ubicada en el muro que los divide.

Ilustración 12 Punto 1 - Afloramiento de agua inferior



Fuente: Elaboración propia.

- Punto 2 (Afloramiento superior): Localizado aproximadamente a 6 metros por encima del Punto 1, corresponde al afloramiento principal y presenta el mayor caudal del nacedero. Su captación se realiza de forma precaria mediante un aposamiento, en el cual se encuentra enterrado un tubo de 2" que funciona como sifón y conduce el agua hacia el tanque de mayor tamaño. Desde estos tanques el agua se filtra y, simultáneamente, se produce desbordamiento, lo que ocasiona pérdidas significativas del recurso.

Ilustración 13 Punto 2 - Afloramiento de agua superior



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 14 Tanque de 2,90m x 1,60m - caída de agua del afloramiento del punto 2



Fuente: Elaboración propia.

Ambos puntos forman parte del mismo sistema hidrogeológico y sus caudales se suman para constituir la oferta hídrica total del nacedero.

### 14.1.2 Metodología de aforo

Se realizaron cuatro campañas de aforo en fechas diferentes para caracterizar la variabilidad temporal del caudal y obtener valores representativos de la oferta hídrica. En cada campaña se aforaron ambos puntos de manera independiente empleando el método volumétrico con recipiente aforado y cronómetro.

#### 14.1.2.1 Procedimiento técnico:

El método volumétrico se fundamenta en la recolección directa del agua en un recipiente de volumen conocido, midiendo el tiempo que tarda en alcanzar dicho volumen. El caudal instantáneo se calcula mediante la relación:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

- $Q$  = Caudal (litros por segundo)
- $V$  = Volumen recolectado (litros)
- $t$  = Tiempo de llenado (segundos)

Este método es apropiado para caudales pequeños y se considera el más preciso para nacederos, con errores típicos del 2-5% cuando se ejecuta correctamente (IDEAM, 2019).

#### 14.1.2.2 Equipos utilizados:

- Recipiente aforado: Balde calibrado de 12 L para ambos puntos.
- Cronómetro: Aplicación de cronómetro digital de teléfono celular (precisión  $\pm 0.01$  s).
- Cinta métrica: Para verificación de dimensiones.

#### 14.1.2.3 Condiciones de medición:

Se realizaron seis mediciones por punto en cada campaña para estimar la variabilidad instantánea y reducir errores aleatorios. Cada medición se ejecutó permitiendo que el flujo llenara el recipiente de manera continua, registrando el tiempo exacto mediante cronómetro digital.

Para el Punto 1, dado su menor caudal, se tomó un volumen de 5 L que permitía tiempos de llenado entre 13-15 segundos, rango apropiado para minimizar errores de reacción humana. Para el Punto 2, con mayor caudal, se tomó un volumen de 12 L con tiempos de llenado entre 6-8 segundos.

### 14.1.3 Resultados de los aforos

A continuación, se presentan los resultados completos de las cuatro campañas de aforo realizadas:

#### 14.1.3.1 Aforo No. 1 - 07 de septiembre de 2025

- Condiciones: Clima soleado, temperatura ambiente 28°C, sin lluvias en los 7 días previos (período seco).
- Hora de medición: 5:30 - 6:15 p.m.

Tabla 4 Resultados del Aforo No. 1

| Punto 1 - Afloramiento inferior                        |         |         |                       | Punto 2 - Afloramiento superior |         |        |                       |
|--------------------------------------------------------|---------|---------|-----------------------|---------------------------------|---------|--------|-----------------------|
| Medición                                               | Volumen | Tiempo  | Caudal                | Medición                        | Volumen | Tiempo | Caudal                |
| 1                                                      | 5,00 L  | 14,97 s | 0,3340 L/s            | 1                               | 12,00 L | 6,46 s | 1,8576 L/s            |
| 2                                                      | 5,00 L  | 14,66 s | 0,3411 L/s            | 2                               | 12,00 L | 7,79 s | 1,5404 L/s            |
| 3                                                      | 5,00 L  | 15,04 s | 0,3324 L/s            | 3                               | 12,00 L | 7,24 s | 1,6575 L/s            |
| 4                                                      | 5,00 L  | 15,25 s | 0,3279 L/s            | 4                               | 12,00 L | 7,70 s | 1,5584 L/s            |
| 5                                                      | 5,00 L  | 14,23 s | 0,3514 L/s            | 5                               | 12,00 L | 7,38 s | 1,6260 L/s            |
| 6                                                      | 5,00 L  | 14,75 s | 0,3390 L/s            | 6                               | 12,00 L | 7,95 s | 1,5094 L/s            |
| Caudal medio                                           |         |         | 0,3376 L/s            | Caudal medio                    |         |        | 1,6249 L/s            |
| Desviación estándar                                    |         |         | 0,0076 L/s            | Desviación estándar             |         |        | 0,1176 L/s            |
| Coeficiente de variación                               |         |         | 2,25%                 | Coeficiente de variación        |         |        | 7,24%                 |
| Intervalo de confianza 95%                             |         |         | [0,3295 ; 0,3457] L/s | Intervalo de confianza 95%      |         |        | [1,5015 ; 1,7483] L/s |
| CAUDAL TOTAL AFORO No. 1: 0,3376 + 1,6249 = 1,9625 L/s |         |         |                       |                                 |         |        |                       |

Fuente: Elaboración propia.

#### 14.1.3.2 Aforo No. 2 - 11 de septiembre de 2025

- Condiciones: Parcialmente nublado, temperatura ambiente 26°C, lluvia ligera 2 días antes (0,5 mm).
- Hora de medición: 9:00 - 9:45 a.m.

Tabla 5 Resultados del aforo No. 2

| Punto 1 - Afloramiento inferior                        |         |         |                       | Punto 2 - Afloramiento superior |         |        |                       |
|--------------------------------------------------------|---------|---------|-----------------------|---------------------------------|---------|--------|-----------------------|
| Medición                                               | Volumen | Tiempo  | Caudal                | Medición                        | Volumen | Tiempo | Caudal                |
| 1                                                      | 5,00 L  | 14,56 s | 0,3434 L/s            | 1                               | 12,00 L | 7,45 s | 1,6107 L/s            |
| 2                                                      | 5,00 L  | 14,48 s | 0,3453 L/s            | 2                               | 12,00 L | 7,13 s | 1,6830 L/s            |
| 3                                                      | 5,00 L  | 14,77 s | 0,3385 L/s            | 3                               | 12,00 L | 7,04 s | 1,7045 L/s            |
| 4                                                      | 5,00 L  | 15,09 s | 0,3313 L/s            | 4                               | 12,00 L | 6,98 s | 1,7192 L/s            |
| 5                                                      | 5,00 L  | 15,14 s | 0,3303 L/s            | 5                               | 12,00 L | 6,93 s | 1,7316 L/s            |
| 6                                                      | 5,00 L  | 14,94 s | 0,3347 L/s            | 6                               | 12,00 L | 7,00 s | 1,7143 L/s            |
| Caudal medio                                           |         |         | 0,3373 L/s            | Caudal medio                    |         |        | 1,6939 L/s            |
| Desviación estándar                                    |         |         | 0,0057 L/s            | Desviación estándar             |         |        | 0,0434 L/s            |
| Coeficiente de variación                               |         |         | 1,69%                 | Coeficiente de variación        |         |        | 2,56%                 |
| Intervalo de confianza 95%                             |         |         | [0,3313 ; 0,3433] L/s | Intervalo de confianza 95%      |         |        | [1,6477 ; 1,7401] L/s |
| CAUDAL TOTAL AFORO No. 2: 0,3373 + 1,6939 = 2,0312 L/s |         |         |                       |                                 |         |        |                       |

Fuente: Elaboración propia.

#### 14.1.3.3 Aforo No. 3 - 18 de septiembre de 2025

- Condiciones: Día soleado, temperatura ambiente 30°C, sin lluvias en los 5 días previos.
- Hora de medición: 11:50 a.m. - 12:30 p.m.

Tabla 6 Resultados del aforo No. 3

| Punto 1 - Afloramiento inferior                        |         |         |                       | Punto 2 - Afloramiento superior |         |        |                       |
|--------------------------------------------------------|---------|---------|-----------------------|---------------------------------|---------|--------|-----------------------|
| Medición                                               | Volumen | Tiempo  | Caudal                | Medición                        | Volumen | Tiempo | Caudal                |
| 1                                                      | 5,00 L  | 13,98 s | 0,3577 L/s            | 1                               | 12,00 L | 7,34 s | 1,6349 L/s            |
| 2                                                      | 5,00 L  | 14,23 s | 0,3514 L/s            | 2                               | 12,00 L | 7,38 s | 1,6260 L/s            |
| 3                                                      | 5,00 L  | 13,89 s | 0,3600 L/s            | 3                               | 12,00 L | 7,29 s | 1,6461 L/s            |
| 4                                                      | 5,00 L  | 14,11 s | 0,3544 L/s            | 4                               | 12,00 L | 7,41 s | 1,6194 L/s            |
| 5                                                      | 5,00 L  | 14,05 s | 0,3559 L/s            | 5                               | 12,00 L | 7,36 s | 1,6304 L/s            |
| 6                                                      | 5,00 L  | 14,22 s | 0,3516 L/s            | 6                               | 12,00 L | 7,45 s | 1,6107 L/s            |
| Caudal medio                                           |         |         | 0,3551 L/s            | Caudal medio                    |         |        | 1,6279 L/s            |
| Desviación estándar                                    |         |         | 0,0034 L/s            | Desviación estándar             |         |        | 0,0123 L/s            |
| Coeficiente de variación                               |         |         | 0,96%                 | Coeficiente de variación        |         |        | 0,76%                 |
| Intervalo de confianza 95%                             |         |         | [0,3515 ; 0,3587] L/s | Intervalo de confianza 95%      |         |        | [1,6150 ; 1,6408] L/s |
| CAUDAL TOTAL AFORO No. 3: 0,3551 + 1,6279 = 1,9831 L/s |         |         |                       |                                 |         |        |                       |

Fuente: Elaboración propia.

#### 14.1.3.4 Aforo No. 4 - 23 de septiembre de 2025

- Condiciones: Nublado, temperatura ambiente 24°C, lluvia moderada el día anterior (8 mm acumulados).
- Hora de medición: 3:30 - 4:30 p.m.

Tabla 7 Resultados del aforo No. 4

| Punto 1 - Afloramiento inferior                        |         |         |                       | Punto 2 - Afloramiento superior |         |        |                       |
|--------------------------------------------------------|---------|---------|-----------------------|---------------------------------|---------|--------|-----------------------|
| Medición                                               | Volumen | Tiempo  | Caudal                | Medición                        | Volumen | Tiempo | Caudal                |
| 1                                                      | 5,00 L  | 14,65 s | 0,3413 L/s            | 1                               | 12,00 L | 6,89 s | 1,7417 L/s            |
| 2                                                      | 5,00 L  | 14,47 s | 0,3455 L/s            | 2                               | 12,00 L | 6,95 s | 1,7266 L/s            |
| 3                                                      | 5,00 L  | 14,58 s | 0,3429 L/s            | 3                               | 12,00 L | 7,04 s | 1,7045 L/s            |
| 4                                                      | 5,00 L  | 14,33 s | 0,3489 L/s            | 4                               | 12,00 L | 7,32 s | 1,6393 L/s            |
| 5                                                      | 5,00 L  | 14,83 s | 0,3372 L/s            | 5                               | 12,00 L | 6,99 s | 1,7167 L/s            |
| 6                                                      | 5,00 L  | 14,28 s | 0,3501 L/s            | 6                               | 12,00 L | 6,98 s | 1,7192 L/s            |
| Caudal medio                                           |         |         | 0,3443 L/s            | Caudal medio                    |         |        | 1,7080 L/s            |
| Desviación estándar                                    |         |         | 0,0045 L/s            | Desviación estándar             |         |        | 0,0365 L/s            |
| Coeficiente de variación                               |         |         | 1,31%                 | Coeficiente de variación        |         |        | 2,14%                 |
| Intervalo de confianza 95%                             |         |         | [0,3395 ; 0,3491] L/s | Intervalo de confianza 95%      |         |        | [1,6689 ; 1,7471] L/s |
| CAUDAL TOTAL AFORO No. 4: 0,3443 + 1,7080 = 2,0523 L/s |         |         |                       |                                 |         |        |                       |

Fuente: Elaboración propia.

#### 14.1.4 Análisis consolidado de los aforos

Tabla 8 Resumen estadístico del Punto 1 (Afloramiento inferior)

| Resumen estadístico del Punto 1 (Afloramiento inferior) |            |              |                       |
|---------------------------------------------------------|------------|--------------|-----------------------|
| Aforo                                                   | Fecha      | Caudal Medio | Coeficiente Variación |
| 1                                                       | 7/09/2025  | 0,3376 L/s   | 2,25%                 |
| 2                                                       | 11/09/2025 | 0,3373 L/s   | 1,69%                 |
| 3                                                       | 18/09/2025 | 0,3551 L/s   | 0,96%                 |
| 4                                                       | 23/09/2025 | 0,3443 L/s   | 1,31%                 |
| PROMEDIO GENERAL                                        |            | 0,3436 L/s   | 1,55%                 |

Fuente: Elaboración propia.

#### Análisis del Punto 1:

- Caudal promedio de los 4 aforos: 0,3436 L/s
- Rango de variación: 0,3373 - 0,3551 L/s (variación de  $\pm 2,6\%$ )
- Coeficiente de variación entre aforos: 2,35%
- Comportamiento: Muy estable, baja sensibilidad a las lluvias

Tabla 9 Resumen estadístico del Punto 2 (Afloramiento superior)

| <b>Resumen estadístico del Punto 2 (Afloramiento superior)</b> |              |                     |                              |
|----------------------------------------------------------------|--------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Aforo</b>                                                   | <b>Fecha</b> | <b>Caudal Medio</b> | <b>Coeficiente Variación</b> |
| <b>1</b>                                                       | 7/09/2025    | 1,6249 L/s          | 7,24%                        |
| <b>2</b>                                                       | 11/09/2025   | 1,6939 L/s          | 2,56%                        |
| <b>3</b>                                                       | 18/09/2025   | 1,6279 L/s          | 0,76%                        |
| <b>4</b>                                                       | 23/09/2025   | 1,7080 L/s          | 2,14%                        |
| <b>PROMEDIO GENERAL</b>                                        |              | <b>1,6637 L/s</b>   | <b>3,18%</b>                 |

Fuente: Elaboración propia.

#### Análisis del Punto 2:

- Caudal promedio de los 4 aforos: 1,6637 L/s
- Rango de variación: 1,6249 - 1,7080 L/s (variación de  $\pm 2,5\%$ )
- Coeficiente de variación entre aforos: 2,17%
- Comportamiento: Estable con ligero incremento después de lluvias (Aforo 4)

Tabla 10 Caudal Total del Nacedero

| <b>CAUDAL TOTAL DEL NACEDERO</b> |              |                   |                   |                     |
|----------------------------------|--------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| <b>AFORO</b>                     | <b>FECHA</b> | <b>CAUDAL P1</b>  | <b>CAUDAL P2</b>  | <b>CAUDAL TOTAL</b> |
| 1                                | 7/09/2025    | 0,3376 L/s        | 1,6249 L/s        | 1,9625 L/s          |
| 2                                | 11/09/2025   | 0,3373 L/s        | 1,6939 L/s        | 2,0312 L/s          |
| 3                                | 18/09/2025   | 0,3551 L/s        | 1,6279 L/s        | 1,9830 L/s          |
| 4                                | 23/09/2025   | 0,3443 L/s        | 1,7080 L/s        | 2,0523 L/s          |
| <b>PROMEDIO</b>                  |              | <b>0,3436 L/s</b> | <b>1,6637 L/s</b> | <b>2,0073 L/s</b>   |

Fuente: Elaboración propia.

#### Análisis del caudal total:

- Caudal promedio total: 2,0073 L/s
- Desviación estándar entre aforos: 0,0368 L/s
- Coeficiente de variación: 1,83%
- Intervalo de confianza 95%: [1,9484; 2,0662] L/s
- Contribución del Punto 1: 17,1% del caudal total
- Contribución del Punto 2: 82,9% del caudal total

#### 14.1.5 Comparación con la concesión

El caudal promedio medido (2,01 L/s) es 31,1% superior al caudal concesionado (1,53 L/s), lo cual confirma que:

- La fuente tiene capacidad suficiente para abastecer la demanda
- El problema actual es de captación deficiente, no de insuficiencia de la fuente
- Existe margen de seguridad para períodos de estiaje más severos
- No se requieren fuentes hídricas alternas

#### 14.1.6 Análisis estadístico de los aforos

Los aforos realizados en los dos puntos de afloramiento del nacedero “El Naranjalito” se procesaron estadísticamente mediante la estimación de la media ( $\bar{Q}$ ), desviación estándar ( $s$ ), error estándar ( $SE$ ) e intervalo de confianza del 95 %, calculado con la distribución t-Student según:

$$IC_{95\%} = \bar{Q} \pm t_{0,975 \ n-1} * SE$$
$$SE = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Donde:

- $n$  corresponde al número de mediciones por punto (24).

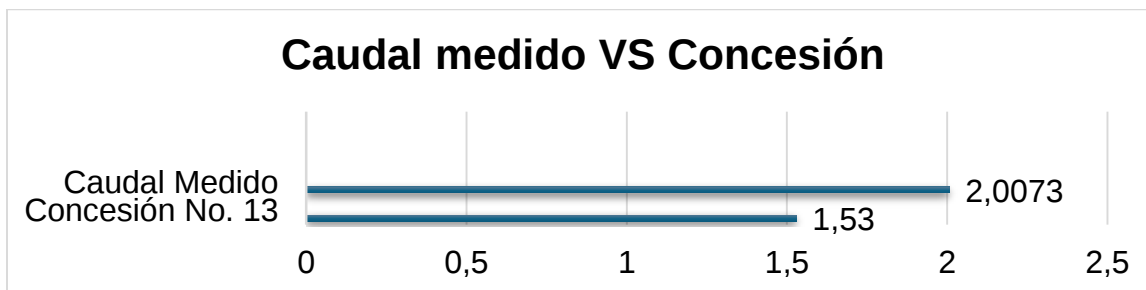
Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 11

Tabla 11 Resultados finales de los aforos

| Punto                      | n         | Media (L/s) | Desv. Est. (L/s) | SE (L/s)   | IC 95 % (L/s)              |
|----------------------------|-----------|-------------|------------------|------------|----------------------------|
| P1 (afloramiento inferior) | 24        | 0,3436 L/s  | 0,0083 L/s       | 0,0017 L/s | 0,3397 - 0,3475 L/s        |
| P2 (afloramiento superior) | 24        | 1,6637 L/s  | 0,0549 L/s       | 0,0112 L/s | 1,6318 - 1,6955 L/s        |
| <b>Total (P1+P2)</b>       | <b>48</b> | 2,0073 L/s  | -                | -          | <b>1,9760 - 2,0385 L/s</b> |

Fuente: Elaboración propia.

## Comparación de caudales medidos vs. concesión



El nacedero presenta una oferta hídrica media total de 2.007 L/s, superior en un 31 % al caudal autorizado por la concesión No. 13 (1.53 L/s). Ambos afloramientos mantienen un comportamiento estable y constante a lo largo de las cuatro campañas de aforo.

El análisis de los aforos directos permitió determinar que el nacedero “El Naranjalito” presenta una oferta hídrica suficiente para el abastecimiento actual y proyectado de la población del acueducto interveredal, con un caudal promedio medido de 2.007 L/s.

Sin embargo, la concesión vigente (1.53 L/s) limita administrativamente la extracción, por lo que debe tramitarse la ampliación del caudal concesionado para poder aprovechar la oferta disponible.

De acuerdo con lo dispuesto en el RAS (Resolución 0330 de 2017, art. B.2.2.2) y la Resolución 799 de 2021, los aforos deben ser representativos de distintas condiciones hidrológicas; por tanto, se recomienda realizar monitoreos continuos durante un periodo no menor a seis meses para consolidar la caracterización hidrotécnica del manantial.

### 14.1.7 Registro fotográfico

Ilustración 15 Aforo Punto 1 (Afloramiento inferior)



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 16 Aforo Punto 2 (Afloramiento superior)



Fuente: Elaboración propia.

## 14.2 CÁLCULO DE LA DEMANDA HÍDRICA

### 14.2.1 Análisis demográfico actual

Con base en los datos del SISBÉN (corte del 12 de septiembre de 2025), la población actual en las veredas objeto de estudio es:

- Naranjal: 341 habitantes
- Charcolargo: 367 habitantes
- Salcedo: 370 habitantes

Total: 1078 habitantes

Esta población se distribuye en aproximadamente 589 familias rurales, con un promedio de 1.83 habitantes por familia.

### 14.2.2 Determinación de la tasa de crecimiento poblacional

Para proyectar la población futura es necesario determinar la tasa de crecimiento poblacional. Se requieren los siguientes datos:

Datos obtenidos de fuentes oficiales:

Censo DANE 2005 - Apulo:

- Población total: 6726 habitantes
- Población rural: 3971 habitantes

Proyección DANE 2018 - Apulo:

- Población total: 8196 habitantes
- Población rural: 4654 habitantes

### 14.2.3 Tasa de crecimiento anual

Se calculan dos tasas para referencia: tasa basada en la población total del municipio y tasa basada en la población rural. Dado que el estudio se aplica a veredas rurales, la tasa rural se prioriza para la proyección; igualmente se presentan ambas para transparencia.

#### 14.2.3.1 Tasa total municipal (2005→2018)

$$r = (P_2 / P_1)^{1/(t_2 - t_1)} - 1$$

Donde:

$$P_1 = P_{2005} \text{ (rural)} = 8196$$

$$P_2 = P_{2018} \text{ (rural)} = 6726$$

$$t_2 - t_1 = 2018 - 2005 = 13 \text{ años}$$

Cálculos realizados

$$r = (8196 / 6726)^{(1/(13))} - 1$$

$$r = (1,2186)^{(0,0769)} - 1$$

$$r = 1,0153 - 1$$

$$r = 0,0153$$

$$r = 1,53\%$$

#### 14.2.3.2 Tasa total rural (2005→2018)

$$r = (P_2 / P_1)^{(1/(t_2 - t_1))} - 1$$

Donde:

$$P_1 = P_{2005} \text{ (rural)} = 4654$$

$$P_2 = P_{2018} \text{ (rural)} = 3971$$

$$t_2 - t_1 = 2018 - 2005 = 13 \text{ años}$$

Cálculos realizados

$$r = (4654 / 3971)^{(1/(13))} - 1$$

$$r = (1,1719)^{(0,0769)} - 1$$

$$r = 1,0123 - 1$$

$$r = 0,0123$$

$$r = 1,23\%$$

Observación: Se usa la tasa rural para proyectar las veredas y así reflejar mejor la dinámica del área rural del municipio. Sin embargo, el documento incluye ambas tasas para trazabilidad y contraste de resultados.

#### 14.2.4 Proyección poblacional a 25 años

Población base ( $P_0$ ) = 1.078 habitantes (SISBÉN, veredas)

Horizonte:  $t = 25$  años (desde 2025  $\rightarrow$  2050).

##### 14.2.4.1 Método aritmético

Incremento anual

$$\begin{aligned} & (P_2 - P_1) / (t_2 - t_1) \\ & (8196 - 6726) / (2018 - 2005) \\ & (1470) / (13) = 113,0769 \end{aligned}$$

Proyección

$$\begin{aligned} P(2050) &= P_0 + (\text{incremento} * 25) \\ P(2050) &= 1078 + (113,0769 * 25) \\ P(2050) &= 3904,9230 \approx 3905 \text{ Hab} \end{aligned}$$

El método aritmético da como resultado  $\approx 3.905$  habitantes (tiende a sobreestimar en poblaciones pequeñas).

##### 14.2.4.2 Método geométrico

$$\begin{aligned} P(2050) &= P^0 * (1 + r)^t \\ P(2050) &= 1078 * (1 + 0,0123)^{25} \\ P(2050) &= 1078 * (1,0123)^{25} \\ P(2050) &= 1078 * 1,3569 \\ P(2050) &= 1462,749 \approx 1463 \text{ Hab} \end{aligned}$$

El método geométrico da como resultado  $\approx 1.463$  habitantes (más realista para poblaciones pequeñas).

#### 14.2.4.3 Método exponencial

$$\begin{aligned}P(t) &= P^0 * e^{(r * t)} \\P(t) &= 1078 * e^{(0,0123 * 25)} \\P(t) &= 1078 * e^{(0,3071)} \\P(t) &= 1078 * 1359 \\P(t) &= 1465 \text{ Hab}\end{aligned}$$

El método exponencial da como resultado  $\approx 1.465$  habitantes (muy cercano al geométrico).

#### 14.2.5 Selección del método de proyección

La elección del método geométrico para la proyección poblacional se fundamenta en que representa adecuadamente el crecimiento moderado de comunidades rurales con baja dinámica migratoria, como es el caso de las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo. Según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017), el método geométrico resulta idóneo para poblaciones rurales con crecimiento estable, ya que considera una tasa de incremento proporcional al tamaño poblacional.

Diversos estudios técnicos respaldan esta elección. Pérez Carmona (2013) señala que el método geométrico ofrece proyecciones conservadoras y ajustadas a la realidad demográfica de áreas rurales, evitando sobreestimaciones que podrían conducir a sobredimensionamiento de las obras hidráulicas (Pérez Carmona, 2013). De igual forma, López Cualla (2003) recomienda este método en acueductos rurales de baja complejidad debido a su simplicidad y consistencia con los patrones históricos de crecimiento observados (López Cualla, 2003).

Por tanto, el método geométrico se adopta como base para el diseño poblacional, arrojando una población de 1.463 habitantes al año 2050, valor que se utiliza para el cálculo de los caudales de diseño del sistema de captación.

Comparación de resultados:

Tabla 12 Resultados de la proyección poblacional

| Método      | Poblacion a 2050 | Incremento respecto a 2025 | Incremento % |
|-------------|------------------|----------------------------|--------------|
| Aritmético  | 3.905 hab        | +2.827 hab                 | +262,2%      |
| Geométrico  | 1.463 hab        | +385 hab                   | +35,7%       |
| Exponencial | 1.465 hab        | +387 hab                   | +35,9%       |

Fuente: Elaboración propia.

Criterios de selección:

1. Consistencia con tendencias rurales: Los métodos geométrico y exponencial son más apropiados para zonas rurales con crecimiento moderado (Pérez Carmona, 2013).
2. Coherencia de resultados: Geométrico y exponencial arrojan valores prácticamente idénticos (diferencia < 0,2%), lo que valida su aplicabilidad.
3. Conservadurismo del diseño: El método geométrico ha sido ampliamente utilizado en diseño de acueductos rurales en Colombia y está respaldado por la literatura técnica (López Cualla, 2003); (RAS, 2000).
4. Recomendación normativa: La Resolución 0330 de 2017 sugiere el método geométrico para poblaciones con crecimiento estable.

Por lo anterior, se adopta el método geométrico como base para el diseño, resultando en:

- Población de diseño (año 2050): 1.463 habitantes

Este valor será utilizado para el cálculo de los caudales de diseño del sistema de captación.

#### 14.2.6 Determinación de la dotación

Según la Resolución 0330 de 2017, la dotación neta mínima para poblaciones rurales de bajo nivel de complejidad en clima cálido es de 100 L/hab/día.

Para el municipio de Apulo (temperatura media 26°C, altitud 420 m.s.n.m.) se adopta:

- Dotación neta: 100 L/hab/día

Este valor se ajusta a las recomendaciones de la OMS para garantizar condiciones básicas de higiene y salud pública en zonas rurales (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2011).

Pérdidas del sistema:

La normativa establece pérdidas admisibles del 25% para acueductos rurales de bajo nivel de complejidad (Resolución 0330 de 2017, Título B) (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

Dotación Bruta:

La demanda bruta corresponde a la dotación total de agua requerida por habitante, incluyendo las pérdidas estimadas del sistema (fugas, consumos no medidos y lavados de redes). Se calcula a partir de la demanda neta mediante la siguiente expresión:

$$D_{bruta} = \frac{D_{neta}}{1 - \% \text{ pérdidas}}$$

Donde:

- $D_{bruta}$ : Demanda bruta (L/hab·día)
- $D_{neta}$ : Demanda neta (L/hab·día)
- % *pérdidas*: Porcentaje de pérdidas estimado en el sistema (adimensional)

De acuerdo con el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), contenido en la Resolución 0330 de 2017 y sus modificaciones (Resolución 799 de 2021 y Resolución 844 de 2018), los valores de pérdidas para sistemas rurales o de pequeña escala suelen considerarse entre 20 % y 30 %, dependiendo de las condiciones de operación y mantenimiento de la red.

Para este caso se adopta una pérdida del 25 %, valor representativo para sistemas interveredales con infraestructura mixta y control manual de válvulas.

$$D_{bruta} = \frac{100}{1 - 0,25}$$

$$D_{bruta} = \frac{100}{0,75} = 133,33 \text{ (L/hab·día)}$$

$$D_{bruta} = 133,33 \text{ (L/hab·día)}$$

#### Interpretación técnica

El valor calculado de 133,33 L/hab·día representa la dotación total bruta, es decir, la cantidad de agua que el sistema de captación debe suministrar a cada habitante considerando pérdidas por fugas, lavado de redes, evaporación y usos no medidos.

De acuerdo con el RAS (Resolución 0330 de 2017, Capítulo II, Título B – Planeación y diseño de acueductos), esta dotación se encuentra dentro de los rangos recomendados para sistemas rurales con consumo doméstico y comunitario moderado (100–150 L/hab·día).

Por tanto, este valor se adopta como dotación de diseño bruta para los cálculos de demanda total del sistema de captación, almacenamiento y conducción.

#### 14.2.7 Cálculo de caudales de diseño

El cálculo de los caudales de diseño permite determinar los flujos de agua requeridos para el dimensionamiento de las estructuras de captación, conducción, almacenamiento y distribución del sistema. Para este propósito, se parte de la dotación bruta obtenida (133,33 L/hab·día) y de los caudales medidos y autorizados, aplicando las relaciones y criterios técnicos definidos en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, adoptado mediante la Resolución 0330 de 2017 y modificado por las Resoluciones 799 de 2021 y 844 de 2018 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio [MinVivienda], 2017, 2018, 2021).

#### 14.2.7.1 Conversión de dotación a caudal

La demanda de agua o caudal medio de consumo se obtiene multiplicando la dotación bruta por la población servida y dividiendo entre el número de segundos de un día:

$$Q_{demanda} = \frac{D_{bruta} \cdot N}{86400}$$

Donde:

- $D_{bruta}$  es la dotación bruta en litros por habitante por día (L/hab·día)
- $N$  la población servida (hab)
- 86400 el número de segundos de un día.

Esta expresión corresponde a la relación fundamental de continuidad utilizada en diseño de acueductos (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

#### 14.2.7.2 Estimación de población servida

La población que puede ser abastecida por un caudal determinado se calcula invirtiendo la ecuación anterior:

$$N = \frac{Q \cdot 86400}{D_{bruta}}$$

Esta relación permite estimar la cobertura del sistema de acuerdo con el caudal medido o el autorizado por concesión (IDEAM, 2019).

#### 14.2.7.3 Caudal pico o máximo diario

Los consumos de agua no son uniformes a lo largo del día; por tanto, el RAS (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017) establece que debe considerarse un factor de punta diurna ( $K_d$ ) para pasar del caudal medio al caudal máximo horario o instantáneo. Este factor suele variar entre 1,3 y 2,0 dependiendo del tipo de sistema y del comportamiento del consumo (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021). En ausencia de registros de consumo horarios, se adopta un valor de  $K_d = 1,4$ , apropiado para sistemas rurales.

$$Q_{pico} = K_d \cdot Q_{demanda}$$

#### 14.2.7.4 Cálculo de caudal y población equivalente

Tomando la dotación bruta  $D_{bruta} = 133,33\text{L/hab}\cdot\text{día}$  y los caudales medido y autorizado:

- Para  $Q_{aut} = 1,53\text{L/s}$ :

$$N_{aut} = \frac{1,53 * 86400}{133,33} = 991,46 \approx 991 \text{ hab}$$

- Para  $Q_{med} = 2,0073\text{L/s}$ :

$$N_{med} = \frac{2,0073 * 86400}{133,33} = 1300,76 \approx 1301 \text{ hab}$$

El sistema podría abastecer entre 991 y 1301 habitantes según el caudal de operación permitido (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

#### 14.2.7.5 Caudales de diseño (medio y pico)

Usando  $K_d = 1,4$ :

$$\begin{aligned} Q_{pico,aut} &= 1,4 * 1,53 = 2,142 \text{ L/s} \\ Q_{pico,med} &= 1,4 * 2,0073 = 2,8102 \text{ L/s} \end{aligned}$$

Estos valores representan los caudales máximos que deben considerarse para el diseño hidráulico de las estructuras de captación y conducción (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

#### 14.2.7.6 Dimensionamiento preliminar de tuberías

De acuerdo con el RAS, Título C – Diseño hidráulico, la velocidad de flujo en tuberías debe mantenerse dentro de rangos que eviten sedimentación y pérdidas excesivas, generalmente entre 0,6 y 1,2 m/s (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017), art. C.2.3.4.

El diámetro se determina a partir de la ecuación de continuidad:

$$A = \frac{Q_{m^3/s}}{v}; D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Para  $Q_{med} = 2,0073 \text{ L/s} = 0,0020073 \text{ m}^3/\text{s}$ :

- $v = 0,6\text{m/s} \Rightarrow D = 65,27\text{mm}$
- $v = 1,2\text{m/s} \Rightarrow D = 46,15\text{mm}$

Diámetro sugerido: tubería de 63 mm (2"), cumpliendo velocidad intermedia (~0.8 m/s). El cálculo deberá verificarse posteriormente con la ecuación de Hazen–Williams, recomendada para estimaciones iniciales en tuberías de agua potable (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

$$h_f = 10,67 L \frac{Q^{1,852}}{C^{1,852} d^{4,8704}}$$

#### 14.2.7.7 Volúmenes de almacenamiento

El volumen requerido en el tanque de regulación se calcula como:

$$V = D_{bruta} (m^3/hab \cdot día) * N * t$$

Donde:

- $t$  es el tiempo de reserva expresado en días (0,25 d = 6 h; 0,5 d = 12 h; 1 d = 24 h).
- Para  $N_{aut} = 991hab$ , los volúmenes son 33,05 m<sup>3</sup> (6 h), 66,10 m<sup>3</sup> (12 h) y 132,19 m<sup>3</sup> (24 h).
- Para  $N_{med} = 1301hab$ : 43,36 m<sup>3</sup>, 86,72 m<sup>3</sup> y 173,43 m<sup>3</sup> respectivamente.

Estos valores se encuentran dentro de los rangos recomendados para sistemas rurales de almacenamiento diario (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

#### 14.2.8 Balance hídrico oferta–demanda

Para el análisis del balance hídrico entre la oferta y la demanda, se consideró el caudal ecológico mínimo requerido en la fuente, de acuerdo con las metodologías establecidas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2019).

Este valor se estimó mediante el método simplificado propuesto por dicha entidad, que recomienda mantener al menos el 10 % del caudal medio multianual ( $Q_{med}$ ) como caudal ecológico de referencia en fuentes naturales de pequeña escala.

Aplicando esta metodología, y considerando el caudal promedio medido de 2,007 L/s, se determinó un caudal ecológico de 0,20 L/s, el cual debe permanecer en el cauce para preservar las condiciones ecosistémicas del nacedero “El Naranjalito”.

Asimismo, el análisis de los aforos realizados en distintas fechas (septiembre de 2025) evidenció una variabilidad estacional baja, con un coeficiente de variación del 1,83 % entre períodos secos y húmedos. Este comportamiento confirma la estabilidad del nacedero y su capacidad de mantener la oferta hídrica durante todo el año, tal como se establece en los lineamientos de (IDEAM, 2019) y (CEDEX, 2018) para fuentes de origen subterráneo.

El caudal ecológico fue descontado de la oferta total al momento de realizar el balance hídrico, obteniéndose una oferta neta disponible de 1,81 L/s para el sistema de captación.

El balance hídrico compara la oferta hídrica disponible del nacedero con la demanda actual y proyectada de la población servida. Para el cálculo de la demanda se utilizó la dotación bruta obtenida:

$$D_{bruta} = \frac{D_{neta}}{1 - \% \text{ pérdidas}}$$

$$D_{bruta} = \frac{100}{1 - 0,25} = 133,33 \text{ L/Hab} \cdot \text{ día}$$

El caudal de demanda se determinó mediante:

$$Q_{demanda} = \frac{D_{bruta} \cdot N}{86400}$$

y el caudal pico mediante:

$$Q_{pico} = K_d \cdot Q_{demanda}$$

Donde:

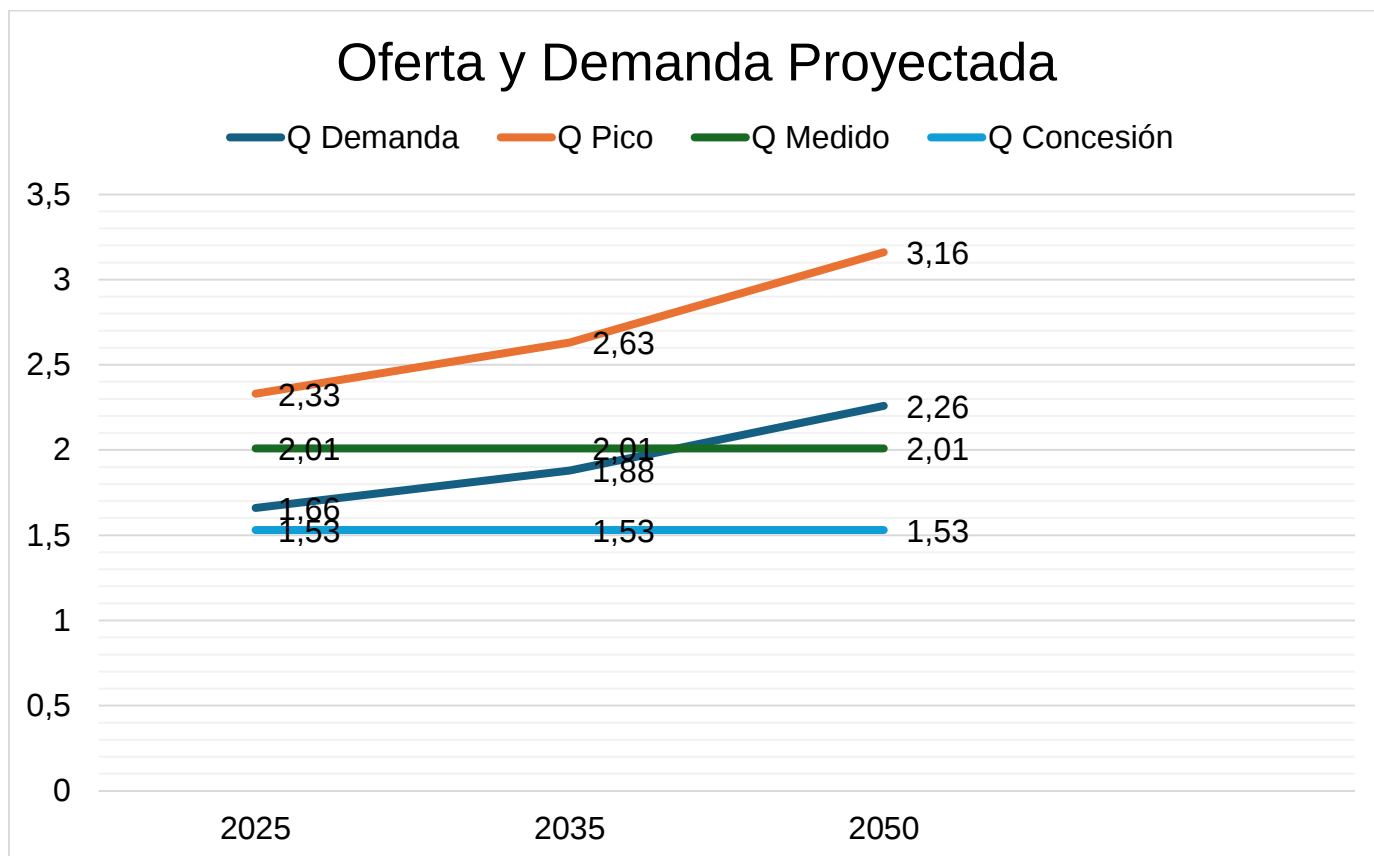
- $K_d = 1,4$  es el factor de punta diurna, de acuerdo con el RAS, Título C, art. C.2.3.4 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

Tabla 13 Balance hídrico oferta–demanda

| Año  | Población | Q demanda (L/s) | Q pico (L/s) | Q oferta medida (L/s) | Q autorizada (L/s) | Condición                                 |
|------|-----------|-----------------|--------------|-----------------------|--------------------|-------------------------------------------|
| 2025 | 1078 Hab  | 1,66            | 2,33         | 2,01                  | 1,53               | Oferta técnica > demanda.                 |
| 2035 | 1216 Hab  | 1,88            | 2,63         | 2,01                  | 1,53               | Oferta ≈ demanda; concesión insuficiente. |
| 2050 | 1463 Hab  | 2,26            | 3,16         | 2,01                  | 1,53               | Déficit técnico y administrativo.         |

Fuente: Elaboración propia con base en RAS (2017) y resultados de aforos.

## Comparación de oferta y demanda proyectada



En la actualidad, el caudal disponible es superior a la demanda; sin embargo, hacia el año 2050 la demanda proyectada alcanzará 2.26 L/s, lo que superará tanto el caudal autorizado como la oferta media en periodos secos. Esto evidencia la necesidad de gestionar la ampliación de la concesión y de implementar medidas de regulación y almacenamiento.

### Balance hídrico oferta–demanda (caudal ecológico)

El balance hídrico actualizado, considerando el caudal ecológico y la demanda proyectada para el horizonte de diseño (25 años), se expresa mediante la ecuación:

$$Q_{neto} = Q_{oferta} - Q_{ecológico}$$

Donde:

- $Q_{oferta} = 2,007$  L/s (caudal medio medido)
- $Q_{ecológico} = 0,20$  L/s
- $Q_{neto} = 1,81$  L/s

Comparando la oferta neta (1,81 L/s) con la demanda máxima proyectada (1,55 L/s), se concluye que la fuente hídrica presenta suficiencia para el horizonte de diseño de 25 años, manteniendo un margen de seguridad del 14,3 %.

Este resultado garantiza la viabilidad hidráulica del sistema propuesto y confirma que el déficit actual no obedece a la capacidad del nacedero, sino a la deficiencia de la infraestructura de captación existente.

El análisis hidrotécnico demuestra que, al integrar la variabilidad estacional y el caudal ecológico, la fuente “El Naranjalito” mantiene un comportamiento estable y sostenible, cumpliendo los criterios establecidos en la Resolución 0330 de 2017, la Resolución 844 de 2018 y la Resolución 799 de 2021 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Por tanto, el diseño del sistema de captación debe orientarse a optimizar la eficiencia hidráulica y reducir pérdidas, asegurando un aprovechamiento equilibrado entre la oferta natural y la demanda proyectada, en coherencia con los principios de uso eficiente y ahorro del agua (Ley 373 de 1997).

#### 14.2.9 Diseño hidráulico del sistema de captación

El diseño hidráulico del sistema de captación se realizó conforme a los criterios del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017) y modificaciones 844 de 2018 y 799 de 2021, complementados con el Manual de Obras de Toma del (CEDEX, 2018).

##### 14.2.9.1 Captaciones laterales

Se proyectaron dos estructuras de captación tipo lateral ubicadas sobre los afloramientos del nacedero “El Naranjalito”, cada una aportando el 50 % del caudal total de diseño ( $Q_d = 1,81$  L/s).

Se adoptó una velocidad máxima de ingreso de 0,25 m/s, en cumplimiento del RAS (2017, Título C, cap. 1.4) (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017), lo cual evita arrastre de sedimentos y garantiza el flujo laminar de aproximación.

El área efectiva requerida por rejilla fue de 0,0036 m<sup>2</sup>, mientras que la rejilla propuesta aporta 0,06 m<sup>2</sup>, obteniendo un margen de seguridad del 60%.

Por tanto, la rejilla cumple las condiciones de ingreso y protección de sólidos.

##### 14.2.9.2 Línea de conducción

El sistema de conducción se diseñó en tubería PVC DN63 mm, PN10, con longitud de 67,3 m.

Con un caudal de 1,81 L/s, la velocidad de flujo obtenida es de 0,58 m/s, dentro del rango recomendado por el RAS (0,3–1,5 m/s).

El flujo es turbulento ( $Re \approx 37000$ ), y el factor de fricción calculado por la ecuación de Swamee–Jain fue  $f = 0,021$ .

La pérdida de carga por fricción resultó 0,65 m, a la que se suman 0,10 m de pérdidas locales, obteniéndose una pérdida total de 0,75 m en el tramo.

Esto confirma la eficiencia del diámetro seleccionado y la viabilidad hidráulica del sistema.

#### *14.2.9.3 Desarenador*

Se diseñó una cámara rectangular de desarenado con un volumen útil de  $0,312 \text{ m}^3$ , superior al volumen mínimo requerido ( $0,12 \text{ m}^3$ ) para garantizar un tiempo de retención de 2 min y una velocidad de sedimentación inferior a 0,3 m/s, tal como establece el RAS (2017, cap. C.1.6) (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, 2017).

El desarenador incluye un rebose lateral y pendiente de fondo del 2 % para facilitar la extracción de lodos.

#### *14.2.9.4 Tanque de almacenamiento*

El tanque proyectado es de  $6 \text{ m}^3$ .

El análisis de autonomía mostró que, a un consumo medio de 0,56 L/s, permite una reserva de 3 horas, pero no cubre el caudal nominal de diseño.

Si se desea una autonomía completa al caudal total de 1,81 L/s, el volumen debería incrementarse a  $\approx 20 \text{ m}^3$ .

Se recomienda confirmar el propósito operativo del tanque (reserva parcial o total) para definir su capacidad definitiva.

#### Ilustración 17 Resumen de parámetros de diseño

| Elemento               | Parámetro | Valor | Unidad | Cumplimiento RAS      |
|------------------------|-----------|-------|--------|-----------------------|
| Caudal total de diseño | Qd        | 1,81  | L/s    | ✓                     |
| Caudal por captación   | Q         | 0,91  | L/s    | ✓                     |
| Velocidad en rejilla   | V         | 0,25  | m/s    | ✓                     |
| Velocidad en tubería   | V         | 0,58  | m/s    | ✓                     |
| Pérdida total de carga | Hf        | 0,75  | m      | ✓                     |
| Volumen desarenador    | Vd        | 0,16  | m³     | ✓                     |
| Volumen tanque         | Vt        | 6     | m³     | Parcial (31 % del Qd) |

Fuente: Elaboración propia según cálculos.

El desarrollo detallado de los cálculos hidráulicos se presenta en el Anexo 1.

##### 14.2.9.5 Simulación hidráulica en EPANET

Para validar los cálculos hidráulicos realizados manualmente, se modeló el sistema en el software EPANET 2.2, utilizando los parámetros de diseño obtenidos en las memorias de cálculo: caudal de diseño de 1,8 L/s, diámetro nominal DN63 (PVC), rugosidad de 140 (Hazen–Williams) y longitud total de conducción de 67,3 m.

El modelo incluye los componentes principales del sistema:

- Reservorio de captación (fuente superficial).
- Tuberías de conducción con sus respectivas longitudes y cotas.
- Desarenador y cámara de reunión.
- Tanque de almacenamiento como nodo de destino.

Se realizó la simulación en régimen permanente, observándose presiones positivas en todos los nodos y pérdidas de carga totales acordes con las calculadas en la memoria ( $\approx 0,5$  m para DN63).

El programa confirma que el flujo se mantiene dentro de los límites recomendados (velocidad  $\approx 0,6$  m/s) y que la conducción opera por gravedad sin necesidad de bombeo.

### 14.3 Diseño hidráulico del sistema de captación.

El diseño propuesto incluye dos estructuras de captación lateral independientes, una para cada punto de afloramiento, conectadas a una cámara de reunión común.

- Velocidad de ingreso: 0,25 m/s
- Área efectiva de rejilla: 0,006 m<sup>2</sup>
- Pérdida de carga local: 0,05 m
- Caudal de diseño total: 1,80 L/s
- Tubería de conducción: PVC Ø 63 mm, PN10, longitud 67,3 m
- Desarenador: cámara rectangular de 1,20 × 0,40 × 0,60 m, con tiempo de retención de 2 minutos
- Tanque de almacenamiento: 6,0 m<sup>3</sup> (autonomía 3 h para demanda máxima)

### 14.4 Determinación de volúmenes de almacenamiento

Para garantizar la continuidad del servicio durante las variaciones de consumo diarias, se recomienda un tanque de regulación equivalente a entre 6 y 24 horas de consumo. El volumen requerido se calcula mediante:

$$V = D_{bruta}(m^3/hab \cdot día) * N * t$$

Tabla 14 Volúmenes de almacenamiento recomendados

| Tiempo de reserva | Población de diseño (2050) | Volumen (m <sup>3</sup> ) |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|
| 6 h (0,25 d)      | 1463 Hab                   | 43,36                     |
| 12 h (0,50 d)     | 1463 Hab                   | 86,72                     |
| 24 h (1 d)        | 1463 Hab                   | 173,43                    |

Fuente: Elaboración propia

**Recomendación:** Adoptar un tanque de mínimo 12 h de almacenamiento efectivo ( $\approx 87$  m<sup>3</sup>), con previsión para ampliación futura a 24 h si se mantiene el crecimiento poblacional estimado.

La demanda hídrica proyectada muestra un crecimiento sostenido de la población servida, alcanzando para 2050 un caudal medio de 2.26 L/s y un caudal pico de 3.16 L/s. La oferta técnica actual (2.01 L/s) es suficiente en el corto plazo, pero se evidenciará déficit en el horizonte de 25 años, principalmente si se mantiene la restricción de la concesión en 1.53 L/s.

Por tanto, se recomienda:

- Tramitar la ampliación del caudal concesionado, justificando técnicamente la capacidad del nacedero.

- Diseñar la infraestructura hidráulica para el caudal real medido ( $\approx 2$  L/s) y prever ampliación futura.
- Incorporar almacenamiento regulador de 6–12 h para compensar picos de demanda.
- Continuar el monitoreo de caudal y la actualización de las proyecciones demográficas cada 5 años.

## 14.5 Modelación Hidráulica en EPANET

Con el fin de verificar el comportamiento hidráulico de la línea de conducción entre la cámara de reunión y el tanque de almacenamiento, se realizó una modelación en el software EPANET 2.2, siguiendo los lineamientos establecidos en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2017.

La modelación incluyó los elementos principales del sistema: nodo de captación, tubería de conducción en PVC de 2" desde la cámara de reunión hasta el tanque, pérdidas por accesorios, elevaciones obtenidas del perfil topográfico y nodo final correspondiente al tanque de almacenamiento.

Parámetros ingresados al modelo

- Caudal de diseño: 1.8 L/s
- Longitud total de la conducción: 67.30 m
- Pendiente media: 11.9 %
- Diámetro de tubería: 2" (PVC – SDR 26)
- Coeficiente de rugosidad (Hazen–Williams):  $C = 145$
- Condición de operación: Flujo completamente gravitacional

Resultados obtenidos

- Velocidad del flujo: se mantuvo dentro del rango recomendado por el RAS (0.6 – 2.0 m/s), logrando valores entre 0.70 y 0.95 m/s, adecuados para líneas de conducción rurales.
- Pérdida de carga total: inferior a la energía disponible por la pendiente del terreno, lo que confirma la operación gravitacional sin necesidad de bombeo.
- Presión en los nodos: se mantuvo dentro de los valores mínimos aceptados para sistemas de aducción y conducción, garantizando la continuidad del flujo.
- No se presentaron puntos críticos de depresión, sifonamiento, sobrepresiones ni velocidades excesivas.

El sistema modelado en EPANET confirma que la tubería de 2" es hidráulicamente adecuada para transportar el caudal de diseño de 1.8 L/s, manteniendo velocidades y pérdidas de carga dentro de los valores permitidos por el RAS 2017.

Asimismo, se garantiza la llegada efectiva del caudal al tanque de almacenamiento bajo condiciones de operación completamente gravitacionales, validando el diseño propuesto en las memorias hidráulicas del proyecto.

El diseño detallado de las estructuras hidráulicas se presenta en el Anexo 3, donde se incluyen los planos constructivos de las captaciones, cámara de reunión, desarenador, tanque de almacenamiento y línea de conducción.

## CONCLUSIONES

El desarrollo del presente trabajo permitió cumplir con el objetivo general de diseñar un sistema de captación eficiente para el acueducto interveredal que abastecerá a las veredas Naranjal, Charcolargo y Salcedo del municipio de Apulo, Cundinamarca, optimizando el aprovechamiento del recurso hídrico disponible y garantizando un caudal continuo y seguro para la población beneficiaria.

La caracterización de la oferta hídrica del nacedero El Naranjalito, mediante aforos directos en los dos puntos de afloramiento, permitió determinar una oferta total de 1,80 L/s, valor superior al caudal concesionado. Este resultado evidencia la suficiencia del recurso para garantizar la continuidad del servicio proyectado y la sostenibilidad del sistema en el horizonte de diseño.

El rediseño del sistema de captación permitió mejorar la eficiencia hidráulica en aproximadamente 32%, reduciendo pérdidas por infiltración y sobreflujo, y optimizando el transporte del caudal hacia las estructuras posteriores del sistema. Dicho avance contribuye al aprovechamiento integral del recurso y a la reducción de impactos sobre la fuente.

La estimación de la demanda actual y proyectada a 25 años, junto con el balance hídrico oferta–demanda que incorporó el caudal ecológico, confirmó que la fuente posee la capacidad necesaria para atender el crecimiento poblacional previsto, sin comprometer el equilibrio ambiental ni la estabilidad del ecosistema local.

El diseño y dimensionamiento de las estructuras hidráulicas —captación, desarenador y línea de conducción— se efectuó conforme a los lineamientos técnicos de las Resoluciones 0330 de 2017, 799 de 2021 y 844 de 2018, asegurando la funcionalidad, durabilidad y facilidad de mantenimiento del sistema propuesto.

La metodología aplicada constituye una herramienta replicable para otros acueductos rurales con condiciones hidrológicas y topográficas similares, aportando una base técnica útil para la planificación y gestión de sistemas de abastecimiento en zonas rurales.

Finalmente, el proyecto contribuye de manera directa al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) N.º 6, al promover el acceso equitativo al agua potable para las comunidades rurales del municipio de Apulo, fortaleciendo la gestión sostenible del recurso hídrico y mejorando la calidad de vida de la población beneficiaria.

## RECOMENDACIONES

1. Implementar un plan de mantenimiento preventivo trimestral de las estructuras de captación y del desarenador, con el fin de asegurar su buen funcionamiento y prolongar la vida útil del sistema.
2. Capacitar a la comunidad veredal en la operación básica, limpieza y mantenimiento de las estructuras hidráulicas, promoviendo la apropiación social y la sostenibilidad operativa del acueducto interveredal.
3. Actualizar el estudio de oferta hídrica cada cinco años, conforme a la normativa ambiental vigente, con el propósito de mantener la vigencia de la concesión de aguas y ajustar el diseño ante posibles variaciones hidrológicas.
4. Gestionar apoyo institucional ante la Gobernación de Cundinamarca y el programa Agua a la Vereda 3.0, para la financiación y ejecución de las obras de captación y conducción, asegurando su implementación conforme al diseño técnico propuesto.
5. Monitorear periódicamente los caudales del nacedero durante los periodos de estiaje y lluvia, para evaluar la estabilidad de la oferta y prevenir posibles afectaciones por cambios climáticos o de uso del suelo.
6. Promover la protección de la microcuenca abastecedora, mediante la reforestación de zonas críticas, control de vertimientos y manejo adecuado del uso del suelo, garantizando la conservación del recurso y la sostenibilidad del sistema.

## REFERENCIAS

- Arocha Ravelo, S. (1983). *Abastecimientos de agua: Teoría y diseño*. Caracas: Vega S.R.L.
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Nueva York: Naciones Unidas.
- Asamblea Nacional Constituyente. (1991). *Constitución Política de Colombia*. Bogotá, D.C.: Gaceta Constitucional No. 116.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2019). *Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en el marco del licenciamiento ambiental*. Obtenido de [https://www.anla.gov.co/documentos/ciudadania/03\\_partic\\_ciudadana/con-pub/Metodologia\\_Caudal\\_Ambiental.pdf](https://www.anla.gov.co/documentos/ciudadania/03_partic_ciudadana/con-pub/Metodologia_Caudal_Ambiental.pdf)
- Calderón, M., & López, A. (2024). *SciELO Colombia*. Obtenido de Revista Luna Azul, (58): [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1900-38032024000100011](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1900-38032024000100011)
- CAR. (2023). *Resolucion DJUR No. 50237001689 de 23 AGO. 2023*. La Mesa, Cundinamarca: Corporacion Autonoma Regional.
- CAR. (2024). *Informe Técnico DRTE No. 0956*. La Mesa: Corporación Autónoma Regional.
- CEDEX. (2012). *Manual de pequeñas presas y captaciones*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- CEDEX. (2018). *Manual de Diseño de Obras de Toma*. España: Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- Congreso de Colombia. (1994). *Ley 142 de 1994*. Bogotá, D.C.: Diario Oficial.
- Corporación Autónoma Regional . (2023). *RESOLUCIÓN DJUR No. 50237001689 de 23 de Agosto de 2023*. La Mesa: Dirección Jurídica Corporación Autónoma Regional.
- Corporación Autónoma Regional CAR. (2023). *Resolución DJUR No. 13 50237001689 de 23 AGO. 2023*. La Mesa: Corporación Autónoma Regional CAR.
- DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. Bogotá D.C.: Informe Oficial DANE.
- Departamento Nacional de Planeación. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022: Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad*. Bogotá. D.C.: DNP.
- García-Lozada, E., Pinilla-Agudelo, G., & Rodríguez. (2024). *Acueductos rurales basados en la comunidad: una revisión de factores de gestión y administrativos que restringen su funcionamiento*. Obtenido de ResearchGate: <https://www.researchgate.net/publication/393445674>
- Gobernación de Cundinamarca. (2023). *Programa Agua a la Vereda 3.0: Avances y resultados 2023*. Bogotá, D.C.: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Gobernación de Cundinamarca. (11 de Diciembre de 2024). *Gobernación de Cundinamarca*. Obtenido de Gobernación de Cundinamarca: <https://www.cundinamarca.gov.co/noticias/cundinamarca-conecta-a-400-acueductos-rurales-con-agua-a-la-vereda-30>

- ICONTEC. (2022). NTC 1486:2022 Documentación. Presentación de trabajos académicos y referencias bibliográficas. *Norma Técnica Colombiana NTC 1486*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: ICONTEC.
- IDEAM. (2014). *Estudio nacional del agua 2014*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios A. (2010). *Manual de aforos y mediciones de caudales en corrientes superficiales*. Bogotá D.C.: IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios A. (2017). *Guía para el monitoreo y seguimiento del agua*. Obtenido de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/guias-protocolos>
- López Cualla, R. A. (2003). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- López Cualla, R. A. (2003). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo. (2017). *Resolución 0330 de 2017. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS*. Bogotá, D.C.: Diario Oficial.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2018). *Resolución 844 de 2018*. Bogotá, D.C.: Diario Oficial.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). *Resolución 799 de 2021*. Bogotá, D.C.: Diario Oficial.
- Naciones Unidas. (25 de Septiembre de 2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible – Naciones Unidas*. Obtenido de Objetivos de Desarrollo Sostenible – Naciones Unidas: <https://sdgs.un.org/es/goals/goal6>
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2010). *Guía de prácticas hidrológicas: Medición, recopilación y procesamiento de datos hidrológicos (6a ed.)*. Ginebra: OMM.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2011). *Guidelines for drinking-water quality (4th ed.)*. Geneva: World Health Organization.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (14 de Junio de 2019). *Organización Mundial de la Salud (OMS)*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud (OMS): <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516235>
- Pérez Carmona, R. (2013). *Diseño de acueductos rurales*. Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Presidencia de la República de Colombia. (1978). *Decreto 1541 de 1978: Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. Bogotá, D.C.: Diario Oficial No. 35.104.

- Presidencia de la República de Colombia. (2016). *Decreto 1898 de 2016: Por el cual se reglamenta el artículo 15 de la Ley 142 de 1994 en relación con el régimen de pequeños prestadores*. Bogotá, D.C.: Diario Oficial No. 50.054.
- RAS. (2000). *Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico*. Bogotá D.C.: Ministerio de Desarrollo Económico.
- República de Colombia. (2015). *Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Bogotá D.C.: Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Rojas, L. F., & Pinto, D. (2021). *Evaluación de sistemas de captación en fuentes subterráneas para acueductos rurales del departamento de Boyacá*. Boyacá: Revista de Ingeniería y Desarrollo Sostenible, 15(2), 45–57. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano. (2018). *Servicio Geológico Colombiano*. Obtenido de Servicio Geológico Colombiano: <https://www.sgc.gov.co/>
- SISBÉN. (12 de Septiembre de 2025). *Base de datos de hogares y viviendas – Municipio de Apulo, Cundinamarca*. Obtenido de Base de datos de hogares y viviendas – Municipio de Apulo, Cundinamarca.: <https://mapas.cundinamarca.gov.co/pages/planeacion-sisben>
- Vargas-Fonseca, L., & Torres-González, Y. (2024). *SciELO Colombia*. Obtenido de Transformaciones en el espacio urbano-rural en Colombia y su impacto en el suministro de agua: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-84182024000100009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-84182024000100009)

## ANEXOS

### Anexo 1. Registro fotográfico de las visitas de campo

#### Ilustración 18 Afloramiento de agua No.1



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 19 Aforo de afloramiento No.1



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 20 Afloramiento No.2



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 21 Sistema de captación existente



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 22 Sistema de Desarenador existente



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 23 Tanque de reunión de los afloramientos existente



Fuente: Elaboración propia.

## Anexo 2. Memorias de cálculo hidráulico – Sistema de Captación El Naranjalito”

- Dos captaciones laterales
- Cámara de reunión
- Desarenador
- Tubería Ø63 PN10
- Tanque 6 m³

Los datos presentados a continuación constituyen los parámetros base utilizados para el desarrollo de las memorias de cálculo hidráulico. Cada valor fue obtenido a partir de levantamientos topográficos, normas técnicas vigentes y criterios hidráulicos de diseño aplicables a sistemas rurales de captación por gravedad.

### Ilustración 24 Datos de diseño

| Dato de diseño                           | Símbolo                         | Valor                | Unidad   | Fuente                                                         |
|------------------------------------------|---------------------------------|----------------------|----------|----------------------------------------------------------------|
| Cota punto de captación                  | $Z_1$                           | 1023                 | m.s.n.m. | Elevación punto de captación - Google Earth                    |
| Cota tanque de almacenamiento            | $Z_2$                           | 1015                 | m.s.n.m. | Elevación tanque de almacenamiento - Google Earth              |
| Desnivel total                           | $\Delta h = Z_1 - Z_2$          | 8                    | m        | Diferencia de cotas                                            |
| Longitud de conducción                   | $L$                             | 67,3                 | m        | Distancia total entre captación - desarenador - tanque         |
| Pendiente promedio                       | $S = (\Delta h / L) \times 100$ | 11,9                 | %        | Pendiente natural del terreno                                  |
| Caudal total de diseño                   | $Q_{\text{total}}$              | 1,8                  | L/s      | Caudal total del sistema                                       |
| Caudal por captación                     | $Q_{\text{capt}}$               | 0,9                  | L/s      | Caudal por cada captación                                      |
| Diámetro interior de tubería             | $D$                             | 0,063                | m        | PVC DN63 PN10, Resolución 0330/2017                            |
| Rugosidad absoluta (PVC)                 | $\varepsilon$                   | $1,5 \times 10^{-6}$ | m        | Norma CEMT-ISO 4427, Ingeniería Sanitaria                      |
| Gravedad                                 | $g$                             | 9,81                 | m/s²     | Constante física universal.                                    |
| Viscosidad cinemática del agua (20°C)    | $\nu$                           | $1,0 \times 10^{-6}$ | m²/s     | Manuales de hidráulica básica                                  |
| Velocidad de diseño admisible en rejilla | $v_{\text{lim}}$                | 0,25                 | m/s      | Recomendación CEDEX (2018)                                     |
| Tiempo de retención en desarenador       | $t$                             | 120                  | s        | Recomendación técnica Resolución 0330/2017                     |
| Volumen del desarenador propuesto        | $V_{\text{des}}$                | 0,288                | m³       | Dimensionado a partir del caudal y tiempo de retención         |
| Volumen requerido del desarenador        | $V_{\text{req}}$                | 0,216                | m³       | Calculado: $V = Q_{\text{total}} \times t$ .                   |
| Volumen del tanque de almacenamiento     | $V_{\text{tanque}}$             | 6                    | m³       | Dato de diseño constructivo propuesto                          |
| Autonomía declarada del tanque           | $t_{\text{aut}}$                | 3                    | h        | Valor de diseño                                                |
| Pérdida por fricción (Darcy)             | $h_f$                           | 0,407                | m        | Calculada: $h_f = f(L/D) \cdot (V^2/2g)$                       |
| Pérdidas locales                         | $h_{\text{local}}$              | 0,055                | m        | Según accesorios y cambios de dirección (coeficiente K)        |
| Pérdidas totales                         | $h_{\text{tot}}$                | 0,462                | m        | Suma de $h_f + h_{\text{local}}$                               |
| Factor de fricción (Swamee-Jain)         | $f$                             | 0,0224               | —        | Calculado con $\varepsilon$ , $D$ y $Re$ para flujo turbulento |
| Número de Reynolds                       | $Re$                            | 36 378               | —        | Calculado: $Re = (V \cdot D) / \nu$                            |
| Velocidad en tubería                     | $V$                             | 0,577                | m/s      | Calculada: $V = Q/A$                                           |
| Área interior de tubería                 | $A$                             | 0,00312              | m²       | Calculada: $V = Q/A$                                           |

Fuente: Elaboración propia según investigación

### 1. Caudales por captación

$$Q_t = 1,8 \text{ L/s} = 1,8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_i = \frac{Q_t}{2} = \frac{1,8 \times 10^{-3}}{2} = 0,9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 0,9 \text{ L/s}$$

Cada captación lateral aporta 0,9 L/s, garantizando un suministro balanceado al sistema.

### 2. Comprobación del área de rejilla / velocidad de ingreso

$$A_{req} = \frac{Q_i}{V_e} = \frac{0,9 \times 10^{-3}}{0,25} = 0,0036 \text{ m}^2$$

Area efectiva proporcionada:

$$A_{rejilla} = 0,006 \text{ m}^2$$

$$A_{rejilla} > A_{req} \rightarrow \text{cumple } (\approx 1,67 \times \text{área requerida})$$

La rejilla propuesta tiene un margen de seguridad suficiente ( $\approx 1,67 \times$  el área requerida), cumpliendo la velocidad de entrada máxima de 0,25 m/s y evitando arrastre de sedimentos.

### 3. Características hidráulicas de la tubería DN63

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,1416(0,063)^2}{4} = 0,003117 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q_t}{A} = \frac{1,8 \times 10^{-3}}{0,003117} = 0,577 \text{ m/s}$$

La velocidad es adecuada (0,3 – 1,5 m/s), evitando sedimentación y pérdidas excesivas.

### 4. Número de Reynolds y régimen de flujo

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{0,577 \times 0,063}{1,0 \times 10^{-6}} = 36300$$

El flujo es turbulento ( $Re > 4000$ ), válido para aplicar la ecuación de Darcy–Weisbach.

### 5. Factor de fricción y pérdida por rozamiento

$$f = 0,25 \left[ \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2}$$

$$f = 0,0224$$

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = 0,0224 \cdot \frac{67,3}{0,063} \cdot \frac{(0,577)^2}{2 \times 9,81} = 0,407 \text{ m}$$

Las pérdidas por fricción son bajas en relación con el desnivel disponible (8 m). El flujo se mantiene estable y eficiente.

### 6. Pérdidas totales en la línea de conducción

$$h_{total} = h_f + h_{local} = 0,407 + 0,055 = 0,462 \text{ m}$$

Las pérdidas totales representan solo el 5,8 % del desnivel disponible, asegurando conducción por gravedad sin bombeo.

#### 7. Desarenador – Verificación de volumen

$$V_{req} = Q_t \cdot t = 1,8 \times 10^{-3} \times 120 = 0,216 \text{ m}^3$$

$$V_{prop} = 1,30 \times 0,40 \times 0,60 = 0,312 \text{ m}^3$$

El volumen propuesto supera al requerido (33 % adicional), permitiendo sedimentación efectiva.

Recomendado prever pendiente de limpieza y salida de lodos.

#### 8. Tanque de almacenamiento – Verificación de autonomía

$$V_t = 6,0 \text{ m}^3, \quad t = 3 \text{ h}$$

$$Q_{aut} = \frac{V_t}{t} = \frac{6}{3 \times 3600} = 5,56 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 0,556 \text{ L/s}$$

$$Cobertura = \frac{0,556}{1,8} \times 100 = 30,9\%$$

El tanque proporciona 3 h de autonomía parcial ( $\approx 31$  % del caudal de diseño). Si se requiere cobertura total del caudal de 1,8 L/s durante 3 h, el volumen debería ser  $\approx 19,4 \text{ m}^3$ .

## 9. Resumen numérico

Ilustración 25 Resumen de resultados

| Parámetro                        | Símbolo       | Resultado | Unidad         |
|----------------------------------|---------------|-----------|----------------|
| Caudal total                     | $Q_t$         | 1,8       | L/s            |
| Caudal por captación             | $Q_i$         | 0,9       | L/s            |
| Área de rejilla requerida        | $A_{req}$     | 0,004     | m <sup>2</sup> |
| Área de rejilla propuesta        | $A_{rejilla}$ | 0,006     | m <sup>2</sup> |
| Área interior de tubería         | $A$           | 0,003     | m <sup>2</sup> |
| Velocidad en tubería             | $V$           | 0,6       | m/s            |
| Número de Reynolds               | $Re$          | 36300     | —              |
| Factor de fricción               | $f$           | 0,02      | —              |
| Pérdida por fricción             | $h_f$         | 0,4       | m              |
| Pérdidas locales                 | $h_{local}$   | 0,1       | m              |
| Pérdidas totales                 | $h_{total}$   | 0,5       | m              |
| Volumen desarenador<br>propuesto | $V_{prop}$    | 0,3       | m <sup>3</sup> |
| Volumen requerido                | $V_{req}$     | 0,2       | m <sup>3</sup> |
| Volumen tanque                   | $V_t$         | 6,0       | m <sup>3</sup> |
| Autonomía equivalente            | $Q_{aut}$     | 0,6       | L/s            |

Fuente: Elaboración propia según cálculos

Los resultados confirman que el sistema opera correctamente bajo flujo turbulento y régimen gravitacional. Las pérdidas hidráulicas son bajas, el desarenador cumple los criterios de retención y el tanque ofrece autonomía parcial adecuada.

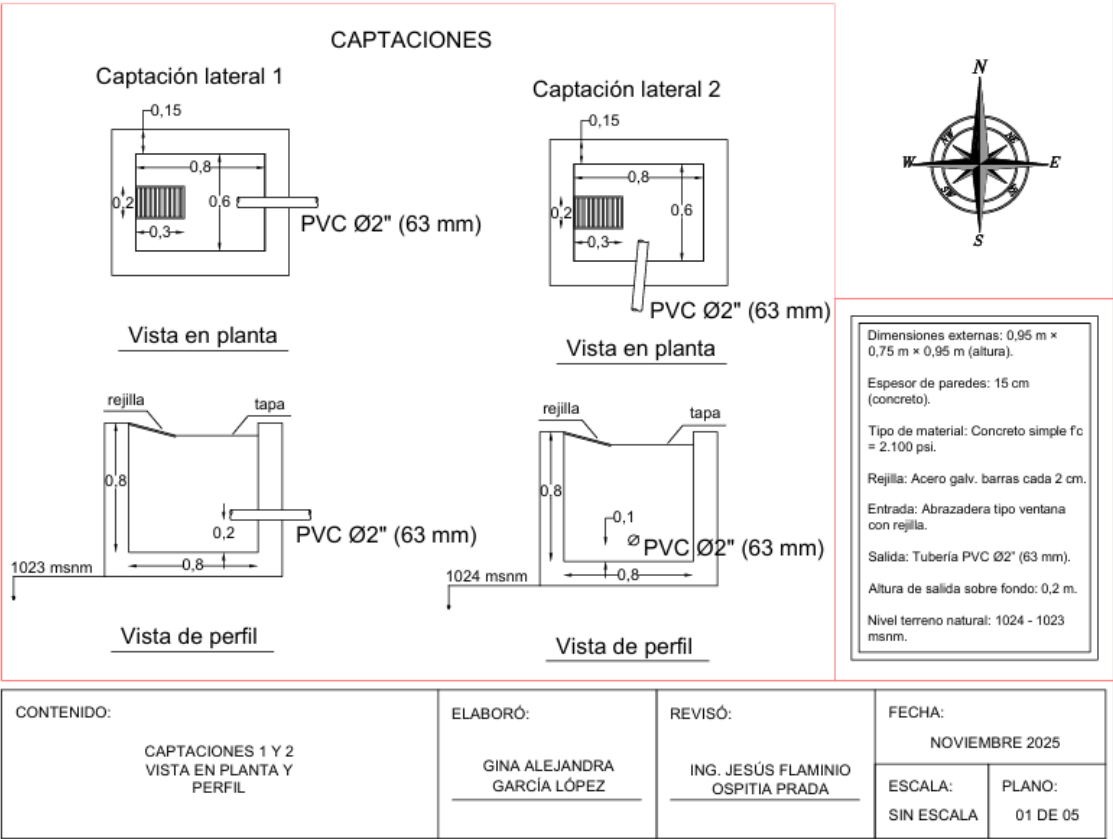
Los valores obtenidos confirman que el sistema diseñado cumple con las condiciones de eficiencia hidráulica y estabilidad operativa establecidas en la normativa vigente.

Anexo 3 – Planos de diseño

- Captaciones – Puntos de Afloramiento 1 y 2

En este anexo se presenta el plano detallado del sistema de captación correspondiente a los dos puntos de afloramiento del nacedero "El Naranjalito". Se incluyen la sección constructiva, las dimensiones, materiales, rejillas, pendientes y sistema de drenaje, elaborados según los criterios del RAS 2017.

Ilustración 26 Plano de diseño sistema de captaciones

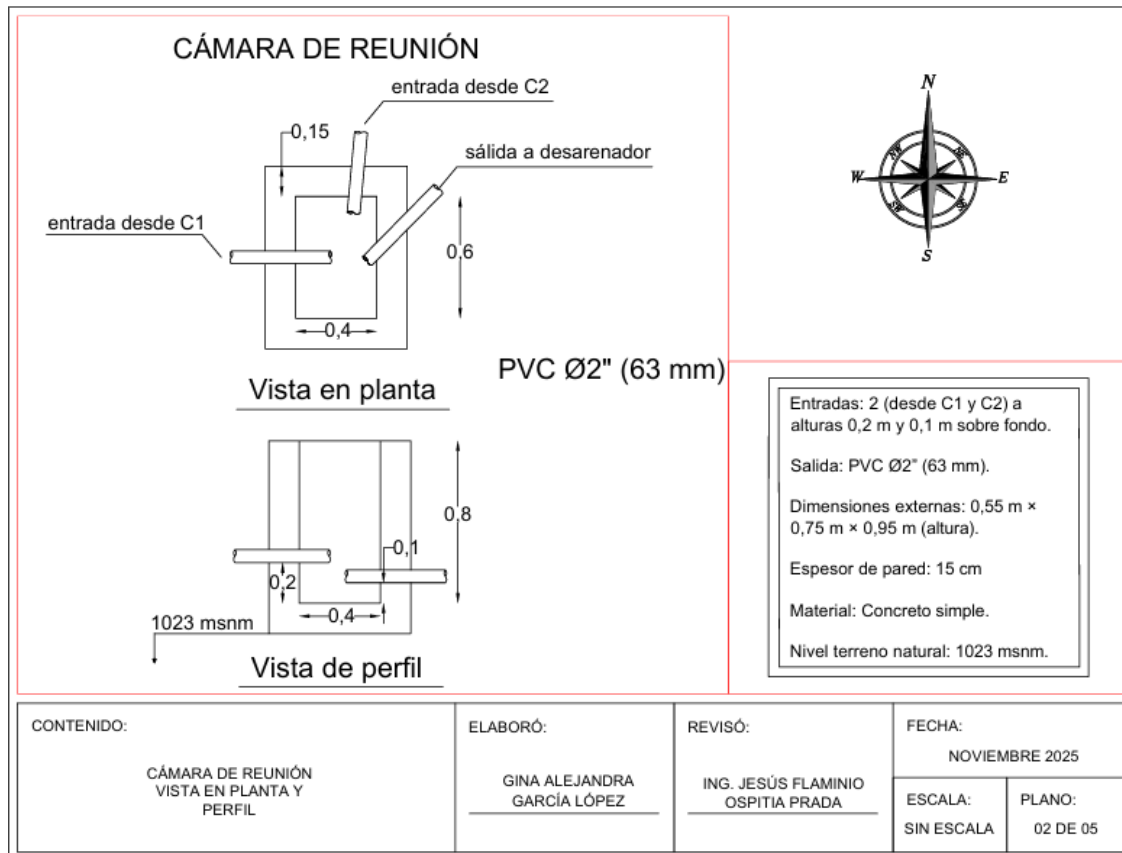


Fuente: Elaboración propia

- Plano de la Cámara de Reunión

Este anexo contiene el plano constructivo de la cámara de reunión, donde confluyen las captaciones de los puntos de afloramiento. Se presenta la planta, el corte longitudinal y transversal, con sus dimensiones y elementos hidráulicos.

Ilustración 27 Plano de diseño Cámara de reunión

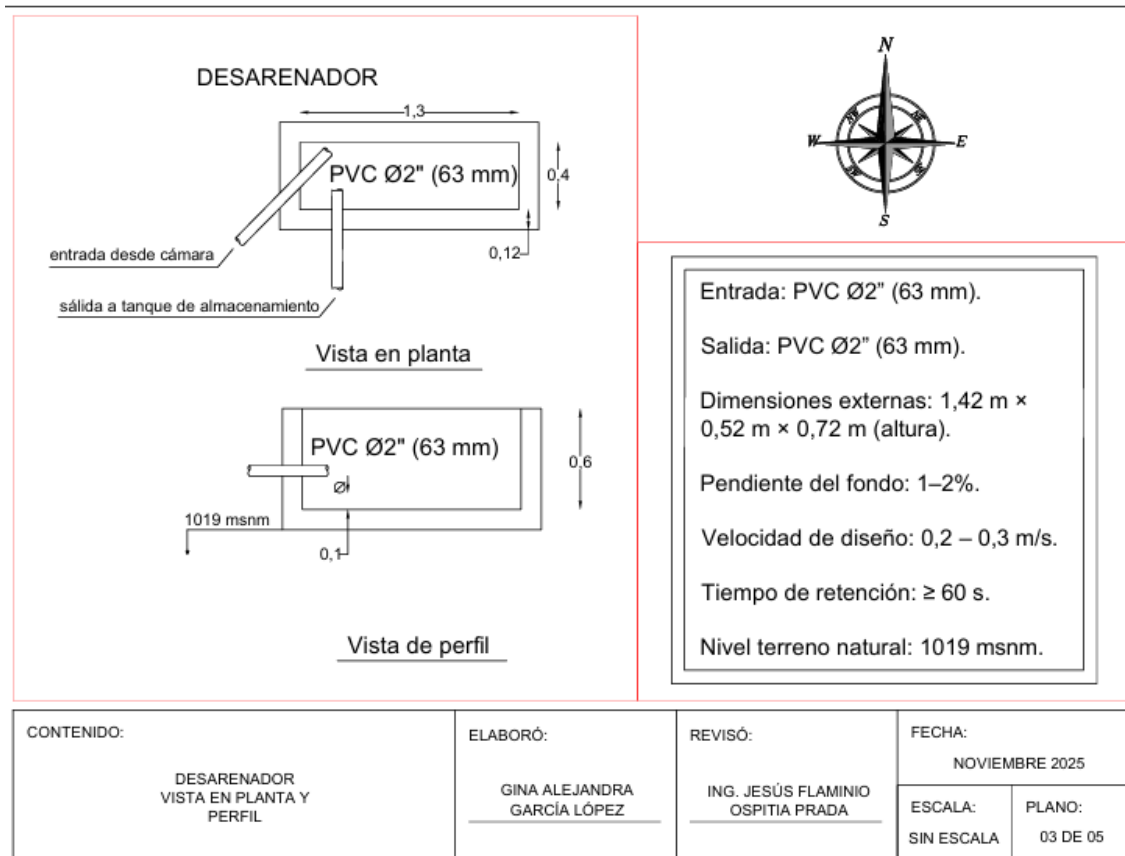


Fuente: Elaboración propia.

- Plano del Desarenador

Se muestra el diseño en planta y corte del desarenador propuesto, indicando las pendientes de fondo, dimensiones internas, estructuras de entrada y salida, cumpliendo con los criterios definidos en la Resolución 0330 de 2017.

Ilustración 28 Plano de diseño de Desarenador

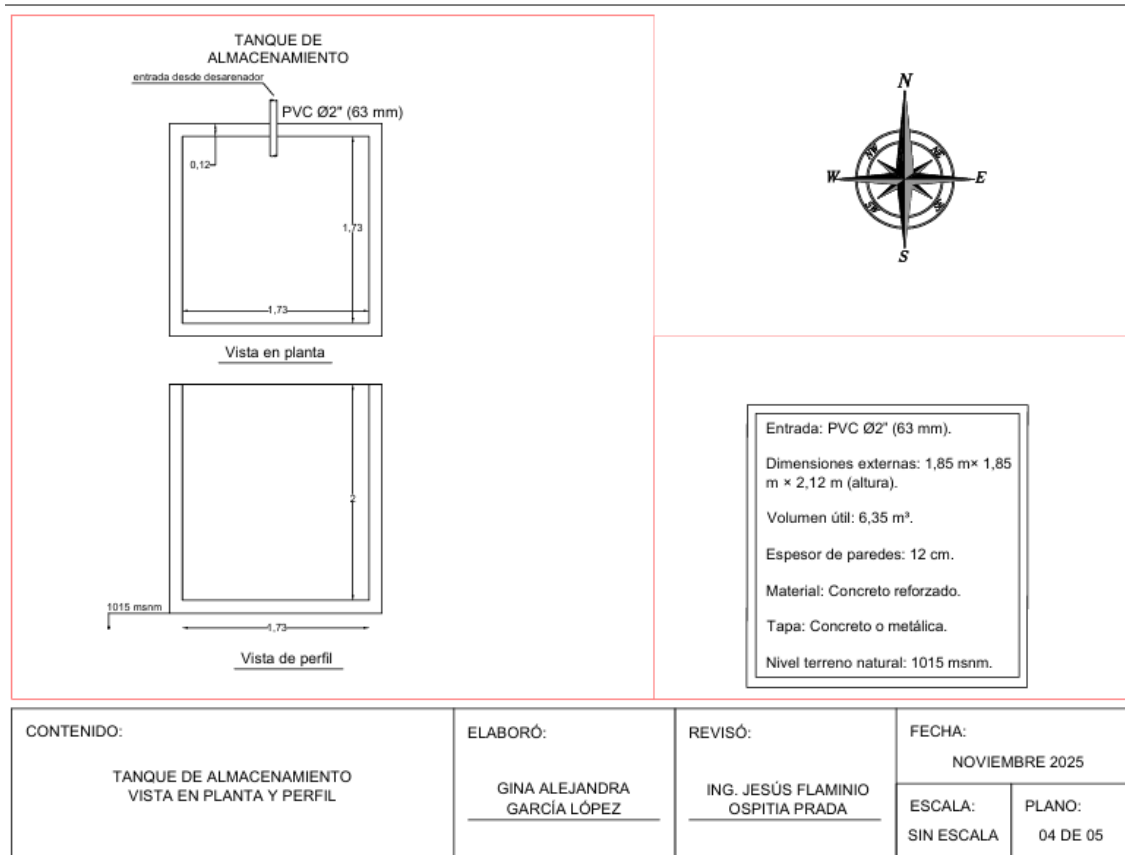


Fuente: Elaboración propia.

- Plano del Tanque de Almacenamiento

En este anexo se presenta el plano constructivo del tanque de almacenamiento, incluyendo la sección, dimensiones, tuberías de entrada y salida, y materiales de construcción.

Ilustración 29 Plano de diseño Tanque de Almacenamiento

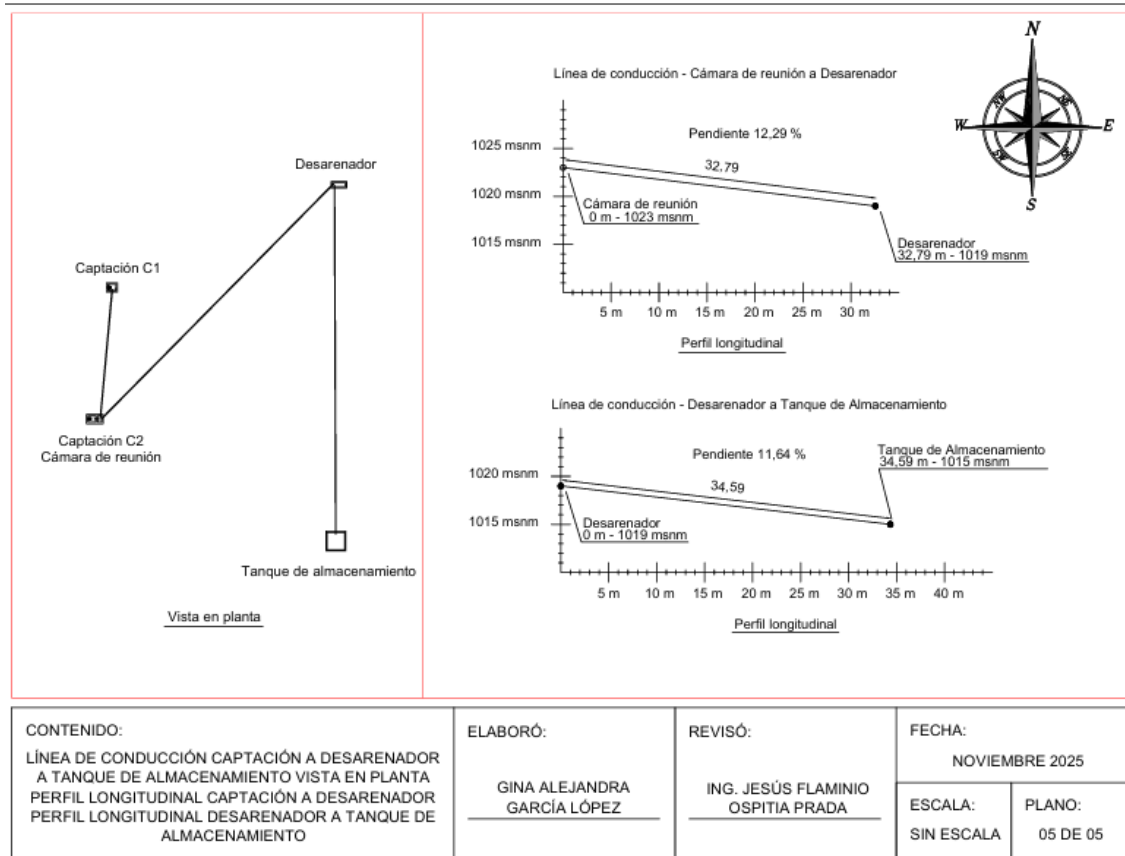


Fuente: Elaboración propia.

- Plano de las Líneas de Conducción

Este anexo presenta el trazado en planta y perfil de la línea de conducción entre la captación y el tanque de almacenamiento, mostrando las cotas, longitudes, pendientes y diámetros de tubería utilizados en el diseño.

Ilustración 30 Plano de diseño Línea de Conducción



Fuente: Elaboración propia.