



Esta obra está bajo una  
[Licencia Creative Commons  
Atribución - 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)  
Vea una copia de esta licencia en  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>





**FACULTAD DE ECOLOGÍA**  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

Tesis

**Ocurrencia de transitorios hidráulicos apoyado  
en la modelación hidráulica, de una línea de  
impulsión de agua potable, provincia de Rioja,  
2022**

Para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario

**Autor:**

Roiser Bustamante Sánchez  
<https://orcid.org/0009-0002-4759-5120>

**Asesor:**

Lic. Dr. Fabián Centurión Tapia  
<https://orcid.org/0000-0003-2213-1856>

**Moyobamba, Perú**

**2025**



**FACULTAD DE ECOLOGÍA**  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

Tesis

**Ocurrencia de transitorios hidráulicos apoyado  
en la modelación hidráulica, de una línea de  
impulsión de agua potable, provincia de Rioja,  
2022**

Para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario


**Autor:**

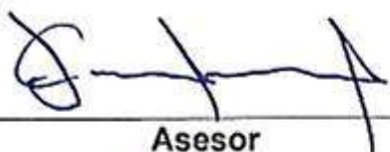
Roiser Bustamante Sánchez

**Sustentado y aprobado el 24 de noviembre del 2025, ante el honorable  
jurado:**

  
\_\_\_\_\_  
**Presidente de Jurado**  
Ing. M.Sc. Santiago Alberto Casas  
Luna

  
\_\_\_\_\_  
**Secretario de Jurado**  
Ing. M.Sc. Mirtha Felicita Valverde  
Vera

  
\_\_\_\_\_  
**Miembro de Jurado**  
Ing. M.Sc. Juan José Pinedo  
Canta

  
\_\_\_\_\_  
**Asesor**  
Lic. Dr. Fabián Centurión Tapia

**Moyobamba, Perú**

**2025**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN  
FACULTAD DE ECOLOGÍA  
Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria



ACTA DE SUSTENTACIÓN DEL INFORME FINAL DE TESIS CONDUCTENTES A  
TÍTULO PROFESIONAL N° 061-2025-UNSM/EPIS/UI

Jurado reconocido con Resolución N° 093-2021-UNSM/CFT/FE, Moyobamba 23 de abril del 2021.

FACULTAD DE ECOLOGÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

PROGRAMA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA SANITARIA

A las 11:00 horas, del día lunes 24 de noviembre de 2025, inició el acto público de sustentación del informe final de tesis “Ocurriencia de transitorios hidráulicos apoyado en la modelación hidráulica, de una línea de impulsión de agua potable, provincia de Rioja, 2022” para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario, presentado por Roiser Bustamante Sánchez con la asesoría del Lic. Dr. Fabián Centurión Tapia.

Instalada la Mesa Directiva conformada por el Ing. M.Sc. Santiago Alberto Casas Luna (Presidente del jurado), Ing. M.Sc. Mirtha Felícita Valverde Vera (Secretario), Ing. M.Sc. Juan José Pinedo Canta (Vocal) y acompañado por el Lic. Dr. Fabián Centurión Tapia, el presidente del jurado dirige brevemente unas palabras y a continuación el secretario dio lectura a la Resolución N° 131-2022-UNSM/CFT/FE, de fecha 29 de abril de 2022.

Seguidamente el autor expuso el informe final de tesis y el jurado realizó las preguntas pertinentes, respondida por el sustentante y eventualmente, con la venia del jurado, por el asesor.

Una vez terminada la ronda de preguntas el jurado procedió a deliberar para determinar la calificación final, para lo cual dispuso un receso de quince (15) minutos, con participación del asesor con voz, pero sin voto; sin la presencia del sustentante y otros participantes del acto público.

Luego de aplicar los criterios de calificación con estricta observancia del principio de objetividad y de acuerdo con los puntajes en escala vigesimal (de 0 a 20), según el Anexo 4.2 del RG-CTI, la nota de sustentación otorgada resultante del promedio aritmético de los calificativos emitidos por cada uno de los miembros del jurado fue *DECISIETE... (17)*, tal como se deja constar en la siguiente descripción.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN  
FACULTAD DE ECOLOGÍA  
Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria



De acuerdo con el Artículo 40° del RG-CTI, la nota obtenida es APROBATORIA.....y correspondiente a la calificación de MUY BUENO. Leído este resultado en presencia de todos los participantes del acto de sustentación, el secretario dio lectura a las observaciones subsanables al informe final que el autor deberá corregir y alcanzar al jurado en un plazo máximo de treinta (30) días calendarios.

Se deja constancia que la presente acta se inscribe en el Libro de Sustentaciones N° 002 del Programa de Estudios de Ingeniería Sanitaria de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ecología de la UNSM.

Firman los integrantes de la Mesa Directiva y el autor del informe final de tesis en señal de conformidad, dando por concluido el acto a las 13:00..... horas, el mismo día lunes 24 de noviembre de 2025.

Ing. M.Sc. Santiago Alberto Casas Luna  
Presidente del Jurado

Ing. M.Sc. Mirtha Felicita Valverde Vera  
Secretario del Jurado

Ing. M.Sc. Juan José Pinedo Canta  
Vocal del Jurado

Lic. Dr. Fabián Centurión Tapia  
Asesor

Roiser Bustamante Sánchez  
Autor

## Declaratoria de autenticidad

**Roiser Bustamante Sánchez**, con DNI N° 72762130, egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ecología de la Universidad Nacional de San Martín, autor de la tesis titulada: Ocurrencia de transitorios hidráulicos apoyado en la modelación hidráulica, de una línea de impulsión de agua potable, provincia de Rioja, 2022.

Declaro bajo juramento que:

1. La tesis presentada es de mi autoría.
2. La redacción fue realizada respetando las citas y referencia de las fuentes bibliográficas consultadas, siguiendo las normas APA actuales.
3. Toda información que contiene la tesis no ha sido plagiada.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido alterados ni copiados, por tanto, la información de esta investigación debe considerarse como aporte a la realidad investigada.

Por lo antes mencionado, asumo bajo responsabilidad las consecuencias que deriven de mi accionar, sometiéndome a las leyes de nuestro país y normas vigentes de la Universidad Nacional de San Martín.

Moyobamba, 24 de noviembre del 2025.



**Roiser Bustamante Sánchez**  
DNI N° 72762130



## Ficha de identificación

<p><b>Título:</b> Ocurriencia de transitorios hidráulicos apoyado en la modelación hidráulica, de una línea de impulsión de agua potable, provincia de Rioja, 2022.</p>	<p><b>Área de investigación:</b> Ciencia y tecnología ambiental.  <b>Línea de investigación:</b> Saneamiento Ambiental.  <b>Sublínea de investigación:</b> Tratamiento de agua.  <b>Grupo de investigación:</b> Tecnología del tratamiento de agua, Resolución N°707-2024-UNSM/CF/FE.  <b>Tipo de investigación:</b>  Básica <input checked="" type="checkbox"/>, Aplicada <input type="checkbox"/>, Desarrollo experimental <input type="checkbox"/></p>
<p><b>Autor:</b> Bach. Roiser Bustamante Sánchez</p>	<p>Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria <a href="https://orcid.org/0009-0002-4759-5120">https://orcid.org/0009-0002-4759-5120</a></p>
<p><b>Asesor:</b> Lic. Dr. Fabián Centurion Tapia</p>	<p><b>Dependencia local de soporte:</b> Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria Unidad o Laboratorio Ingeniería Sanitaria <a href="https://orcid.org/0000-0003-2213-1856">https://orcid.org/0000-0003-2213-1856</a></p>

## **Dedicatoria**

A mis padres, Hermelinda y Clemente, con inmenso cariño y respeto. Esta meta alcanzada es también suya, porque cada esfuerzo, consejo y sacrificio que realizaron fue la base que me permitió continuar y no rendirme. A pesar de las dificultades económicas, nunca dejaron de brindarme su apoyo ni de impulsarme a creer en mis capacidades. Su ejemplo de constancia, honestidad y sencillez ha sido mi mayor motivación.

A mis hermanos Roimer, Elvis y Rolin Ely, por acompañarme en cada etapa de mi formación profesional. Gracias por su ayuda incondicional, por alentarme cuando las fuerzas flaqueaban y por demostrarme que la familia siempre está presente, incluso en la distancia. Su confianza en mí ha sido un impulso para culminar este proyecto.

A mis amigos, quienes compartieron conmigo momentos de esfuerzo, aprendizaje y compañerismo a lo largo de toda la carrera universitaria. Gracias por su apoyo sincero, por las conversaciones que alentaron mis ideas y por ser parte de este recorrido académico y personal.

## **Agradecimientos**

A Dios Creador, por concederme el don de la vida, por ser mi guía constante y darme la fortaleza necesaria para superar cada obstáculo. A Él debo la oportunidad de culminar esta etapa importante de mi formación profesional, bajo su amparo y protección en todo momento.

A mis padres, Clemente y Hermelinda, por su amor incondicional, sacrificio y esfuerzo permanente. Ellos fueron mi mayor inspiración para seguir adelante incluso en las circunstancias más difíciles. Su ejemplo de trabajo, humildad y perseverancia me impulsó a no rendirme y alcanzar este logro que también les pertenece.

A mis hermanos Roimer, Elvis y Roly, quienes con su apoyo, comprensión y aliento constante me brindaron la fortaleza emocional necesaria para continuar este camino académico. Gracias por acompañarme siempre y creer en mí.

De manera especial, al asesor de tesis, por su orientación técnica, paciencia y valiosos aportes durante el desarrollo de esta investigación, que permitieron enriquecer el estudio y culminarlo satisfactoriamente.

Finalmente, a mis compañeros y amigos, por el compañerismo, las jornadas de estudio y el apoyo mutuo que hicieron de esta etapa universitaria una experiencia de aprendizaje y crecimiento personal inolvidable.

## Índice general

Ficha de identificación.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimientos .....	8
Índice general.....	9
Índice de tablas .....	12
Índice de figuras.....	13
RESUMEN .....	14
ABSTRACT .....	15
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN .....	16
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. Antecedentes de la investigación.....	19
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	19
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	20
2.1.3. Antecedentes regionales .....	20
2.2. Fundamentos teóricos.....	20
2.2.1. Componentes principales de un sistema de agua potable.....	20
2.2.2. Ecuaciones básicas en hidráulica.....	21
2.2.3. Altura piezométrica.....	22
2.2.4. Bomba hidráulica.....	22
2.2.5. Curvas características de la bomba.....	22
2.2.6. Análisis de la vegetación en el espectro electromagnético .....	23
2.2.7. Software hammer .....	25
2.2.8. Principales medios de control de transitorios.....	25
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS .....	28
3.1. Ámbito y condiciones de la investigación .....	28
3.1.1. Contexto de la investigación .....	28
3.1.2. Periodo de ejecución .....	29

	10
3.1.3. Autorizaciones y permisos.....	29
3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad .....	29
3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales .....	29
3.2. Sistema de variables.....	29
3.2.1. Variables principales.....	29
3.3. Procedimientos de la investigación .....	30
3.3.1. Diseño de la investigación .....	30
3.3.2. Recopilación de información in situ sobre la topología del área de estudio y características del sistema de impulsión para alimentar el software de modelación hidráulica de transitorios.....	31
3.3.3. Identificación mediante simulación en el software Bentley HAMMER, los puntos críticos de la red de impulsión donde se generan transitorios hidráulicos .....	32
3.3.4. Simulación mediante el software Bentley HAMMER, el comportamiento de los transitorios hidráulicos en la línea de impulsión para analizar sus efectos sobre la infraestructura y evaluar alternativas de mitigación.....	39
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
4.1. Información in situ sobre la topología del área de estudio y características del sistema de impulsión para alimentar el software de modelación hidráulica de transitorios.....	42
4.2. Simulación en el software Bentley HAMMER, los puntos críticos de la red de impulsión donde se generan transitorios hidráulicos .....	44
4.3. Mediante el software Bentley HAMMER, el comportamiento de los transitorios hidráulicos en la línea de impulsión para analizar sus efectos sobre la infraestructura y evaluar alternativas de mitigación .....	48
4.3.1. Escenario 1: Instalación de dos válvulas de aire (triple función).....	48
4.3.2. Escenario 2: Válvula anticipadora de onda más válvulas de aire tri función .....	49
4.3.3. Escenario 3: Tanque hidroneumático más válvulas de aire tri función....	51
4.4. Evaluación comparativa de escenarios con dispositivos de protección.....	52
4.5. Discusión de resultados .....	53
CONCLUSIONES .....	55

RECOMENDACIONES .....	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
ANEXOS .....	60
Anexo 1. Solicitud de permiso y entrega de información de la línea de impulsión por parte de la EPS RIOJA S.A. ....	60
Anexo 2: Plano de ubicación .....	64
Anexo 3: Reporte de resultados de los escenarios evaluados.....	65
Anexo 4: Perfil generado del software Bentley hammer sin dispositivo de protección.....	70
Anexo 5: Perfil generado desde software Bentley hammer con dispositivo de protección (2 válvulas de aire trifuncionales) .....	71
Anexo 6: Perfil generado desde software Bentley hammer con dispositivo de protección (VALVULA ANTICIPADORA DE ONDA + 2 válvulas de aire trifuncional).....	72
Anexo 7: Perfil generado desde software Bentley hammer con dispositivo de protección (TANQUE HIDRONEUMATICO + 2 válvulas de aire trifuncionales).....	73
Anexo 8: Área de estudio data topográfica .....	74
Anexo 9: Escala de riesgo para transitorios hidráulicos en tuberías .....	85
Anexo 10: Panel fotográfico.....	86

## Índice de tablas

Tabla 1. Descripción de variables por objetivo específico .....	30
Tabla 2. Puntos críticos de presión y volumen de vapor durante el evento transitorio (sin dispositivos de protección) .....	47
Tabla 3. Resultados hidráulicos - Escenario 1 (2 válvulas de aire tri función) .....	49
Tabla 4. Resultados hidráulicos – Escenario 2 (válvula anticipadora + 2 válvulas de aire tri función) .....	50
Tabla 5. Resultados hidráulicos – Escenario 3 (tanque hidroneumático + válvulas de aire tri función) .....	51
Tabla 6. Comportamiento de la presión máxima y mínima en los nodos críticos .....	52

## Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación del proyecto de investigación. ....	28
Figura 2. Configuración de un nuevo proyecto en Bentley Hammer.....	33
Figura 3. Configuración de sistema de unidades.....	33
Figura 4. Componentes del sistema de impulsión. ....	34
Figura 5. Ingreso de las elevaciones al entorno de Bentley HAMMER.....	34
Figura 6. Asignación de parámetros hidráulicos a los componentes de la línea de impulsión.....	35
Figura 7. Parámetros hidráulicos de la bomba de impulsión. ....	35
Figura 8. Configuración del estado estacionario del modelo. ....	36
Figura 9. Configuración del transitorio hidráulico en el modelo. ....	36
Figura 10. Análisis del gradiente hidráulico y del volumen de aire-vapor. ....	37
Figura 11. Ingreso de la línea de impulsión de 400 mm al reservorio de 1 200 m <sup>3</sup> .....	44
Figura 12. Perfil del gradiente hidráulico dinámico. ....	45

## RESUMEN

Ocurrencia de transitorios hidráulicos apoyado en la modelación hidráulica, de una línea de impulsión de agua potable, provincia de Rioja, 2022

Se desarrolló con el propósito de evaluar el comportamiento de los transitorios hidráulicos producidos en la línea de impulsión del sistema de abastecimiento de agua potable de la provincia de Rioja, aplicando modelación hidráulica como herramienta de análisis y soporte técnico para la gestión del sistema. El estudio se ejecutó en la región San Martín, distrito de Rioja, durante el año 2022. El objetivo general fue evaluar la ocurrencia de transitorios hidráulicos apoyándose en la simulación hidráulica, mientras que los objetivos específicos comprendieron: recopilar información in situ sobre la topología del área de estudio y características del sistema de impulsión, identificar los puntos críticos donde se generan transitorios hidráulicos y simular el comportamiento de dichos fenómenos para analizar sus efectos y proponer alternativas de mitigación. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental de tipo descriptivo y explicativo, utilizando como herramienta principal el software Bentley HAMMER CONNECT Edition Update 4. Se levantó información técnica del sistema mediante mediciones topográficas, revisión de planos, registro de longitudes, diámetros, materiales y condiciones operativas. Posteriormente, se modeló el sistema para simular un evento de paro súbito de la bomba principal, reproduciendo las condiciones más críticas del golpe de ariete. Se analizaron tres escenarios de mitigación: el primero con válvulas de aire tri funcional, el segundo combinando válvulas anticipadoras y de aire tri funcional, y el tercero incorporando un tanque hidroneumático junto con válvulas de aire. Los resultados evidenciaron que los mayores riesgos de subpresión se concentraron en los puntos altos de la línea, alcanzando valores mínimos de hasta  $-9,98$  m.c.a., mientras que las sobrepresiones máximas se registraron en el arranque del sistema con  $74,1$  m.c.a. El escenario tres mostró una atenuación significativa de los picos de presión, estabilizando el sistema dentro de márgenes seguros y reduciendo el riesgo de cavitación y daño estructural. En conclusión, se determinó que la modelación hidráulica permite identificar de manera precisa los puntos vulnerables ante transitorios hidráulicos, contribuyendo a la optimización del diseño, operación y protección de las líneas de impulsión de agua potable, garantizando así la seguridad y continuidad del servicio en sistemas con condiciones topográficas complejas.

**Palabras clave:** modelación hidráulica, transitorios hidráulicos, línea de impulsión, golpe de ariete, mitigación.

## ABSTRACT

Occurrence of hydraulic transients based on hydraulic modeling of a drinking water supply line, Rioja province, 2022

This study was conducted to evaluate the behavior of hydraulic transients produced in the pressure line of the drinking water supply system in the province of Rioja, using hydraulic modeling as an analysis tool and technical support for system management. The study was carried out in the San Martín region, Rioja district, during 2022. The overall objective was to evaluate the occurrence of hydraulic transients using hydraulic simulation, while the specific objectives included: collecting on-site information on the topology of the study area and characteristics of the drive system, identifying critical points where hydraulic transients are generated, and simulating the behavior of these phenomena to analyze their effects and propose mitigation alternatives. The research used a quantitative approach, with a non-experimental descriptive and explanatory design, using Bentley HAMMER CONNECT Edition Update 4 software as the main tool. Technical information on the system was collected through topographic measurements, review of plans, and recording of lengths, diameters, materials, and operating conditions. The system was then modeled to simulate a sudden shutdown of the main pump, reproducing the most critical conditions of water hammer. Three mitigation scenarios were analyzed: the first with tri-functional air valves, the second combining anticipatory valves and tri-functional air valves, and the third incorporating a hydropneumatic tank together with air valves. The results showed that the highest risks of underpressure were concentrated at the high points of the line, reaching minimum values of up to  $-9.98$  m.c.a., while the maximum overpressures were recorded at the start of the system at  $74.1$  m.c.a. Scenario three showed a significant attenuation of pressure peaks, stabilizing the system within safe margins and reducing the risk of cavitation and structural damage. In conclusion, it was determined that hydraulic modeling allows for the accurate identification of points vulnerable to hydraulic transients, contributing to the optimization of the design, operation, and protection of drinking water supply lines, thus ensuring the safety and continuity of service in systems with complex topographical conditions.

**Keywords:** hydraulic modeling, hydraulic transients, pumping main, water hammer, mitigation.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

El agua constituye un recurso indispensable para la vida y el desarrollo de las sociedades. Sin embargo, la deficiente administración y distribución de este recurso ha ocasionado en las últimas décadas serios problemas de abastecimiento, especialmente en los países en vías de desarrollo, donde los sistemas de conducción presentan deterioro, fallas estructurales y deficiencias técnicas en su diseño y operación (UNESCO & OMS, 2003). En efecto, la carencia de sistemas hidráulicos confiables y sostenibles ha conllevado a un incremento de las enfermedades de origen hídrico, pérdidas económicas y limitaciones en el crecimiento urbano.

El crecimiento poblacional, el cambio climático y la expansión de la demanda de agua potable han generado una presión considerable sobre los sistemas de abastecimiento. En diversos contextos urbanos y rurales, las redes de impulsión y distribución han mostrado deficiencias en su diseño hidráulico, reflejadas en rupturas frecuentes, pérdidas de presión y daños a las infraestructuras, muchas veces causadas por fenómenos transitorios no previstos durante la etapa de diseño (Durán & Torres, 2006). Estos transitorios hidráulicos, también conocidos como golpes de ariete, se producen ante variaciones bruscas en la velocidad del flujo, como cierre de válvulas, arranque o paro de bombas, generando sobrepresiones que pueden superar los límites estructurales de las tuberías, así como subpresiones que inducen cavitación o ingreso de aire (Wylie & Streeter, 2017).

Diversas investigaciones han demostrado que la presencia de aire atrapado dentro de las conducciones puede intensificar significativamente las presiones máximas durante un evento transitorio, llegando incluso a causar la falla del sistema. Estudios experimentales y de modelación numérica señalan que pequeñas bolsas de aire pueden aumentar de manera considerable las sobrepresiones, mientras que las bolsas de gran tamaño tienden a amortiguarlas parcialmente (Ferreira et al., 2021; Lauchlan et al., 2005). En la práctica, estos fenómenos han sido responsables de fallas estructurales en conducciones de diferentes regiones.

Por ejemplo, en el año 2019 se reportó la ruptura de una línea de impulsión en la isla de Lanzarote, España, dejando sin servicio a más de 7 500 habitantes de las localidades de Tahíche, Punta Mujeres, Mala, Arrieta y Tabayesco (García, 2019). En el Perú, se han registrado eventos similares: la ruptura de una tubería en la Av. Elías Aparicio provocó la socavación del pavimento y la interrupción del tránsito (SEDAPAL, 2014),

mientras que, en la ciudad de Huancayo, una sobrepresión generada en la línea de conducción desde la captación Chamisería hacia la planta de Vilcacoto paralizó temporalmente la producción de agua potable (SEDAM Huancayo, 2018). Asimismo, en el distrito de Soritor, la falta de dispositivos de disipación de presión y deficiencias en el diseño técnico del sistema ocasionó rupturas recurrentes y desabastecimiento por varios días (Pinedo, 2022). Estos antecedentes confirman que los transitorios hidráulicos constituyen una causa frecuente de fallas en los sistemas de impulsión de agua potable.

En el caso particular del sistema de agua potable de la provincia de Rioja, se identificó que la línea de impulsión que conecta la cisterna de 500 m<sup>3</sup> con los reservorios de 1 200 m<sup>3</sup> presentaba condiciones de vulnerabilidad ante fenómenos transitorios, debido a que durante su diseño no se aplicaron herramientas de modelación hidráulica para prever y mitigar posibles sobrepresiones o subpresiones. Durante la visita de campo realizada a la estación de bombeo se observó vibración en las tuberías y ausencia de elementos de disipación de energía hidráulica, lo cual evidenció la posibilidad de ocurrencia de golpes de ariete durante arranques o paros de la bomba principal, lo que reduce la vida útil del sistema y pone en riesgo la seguridad de los operadores y la continuidad del servicio.

Frente a ello, la presente investigación se desarrolló con el propósito de evaluar la ocurrencia de transitorios hidráulicos apoyándose en la modelación hidráulica mediante el software Bentley HAMMER CONNECT Edition (versión 24.00.00.26, 64-bit, 2024). Mediante la simulación de diferentes escenarios de operación y condiciones de falla, se analizó el comportamiento dinámico del sistema frente a un evento de paro súbito de la bomba principal, con la finalidad de identificar los puntos críticos y proponer alternativas de mitigación que garanticen la estabilidad hidráulica de la línea de impulsión.

En este marco, se planteó la pregunta de investigación: ¿Reducirá el riesgo la modelación hidráulica ante las ocurrencias de transitorios hidráulicos en la línea de impulsión de agua potable en la provincia de Rioja? Esta interrogante permitió orientar el estudio hacia la comprensión de los efectos dinámicos generados durante los eventos transitorios y la manera en que la modelación hidráulica puede contribuir a anticiparlos y mitigarlos. Para responder a esta pregunta, se formuló la siguiente hipótesis: Mediante la modelación hidráulica, se contribuirá a reducir el riesgo de las ocurrencias de transitorios hidráulicos en la línea de impulsión del sistema de agua potable en la provincia de Rioja. Esta hipótesis se fundamenta en la capacidad de las herramientas de simulación para reproducir escenarios críticos y estimar las presiones generadas durante fallas operativas.

En correspondencia con ello, el objetivo general del estudio es evaluar la ocurrencia de transitorios hidráulicos en la línea de impulsión del sistema de agua potable en Rioja, apoyándose en la modelación hidráulica para analizar sus efectos y posibles soluciones. Para alcanzar dicho propósito, se establecieron los siguientes objetivos específicos: Recopilar información in situ sobre la topología del área de estudio y características del sistema de impulsión para alimentar el software de modelación hidráulica de transitorios, Identificar, mediante simulación en el software Bentley HAMMER, los puntos críticos de la red de impulsión donde se generan transitorios hidráulicos, Simular, mediante el software Bentley HAMMER, el comportamiento de los transitorios hidráulicos en la línea de impulsión para analizar sus efectos sobre la infraestructura y evaluar alternativas de mitigación.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de la investigación**

##### **2.1.1. Antecedentes internacionales**

Muhammad et al. (2019) realizó en Nigeria una revisión teórica sobre el análisis de transitorios hidráulicos en sistemas de conducción, destacando el uso de herramientas computacionales como HAMMER, AFT Impulse y WANDA. Concluyó que la exactitud de los resultados depende del detalle de los datos hidráulicos y la correcta configuración del modelo. Este estudio sustenta el empleo del software Bentley HAMMER CONNECT Edition Update 4 para representar las condiciones reales de operación de la línea de impulsión analizada.

Apollonio (2016) en Italia, investigó los transitorios hidráulicos generados por la expulsión de aire durante el llenado de tuberías presurizadas. Los resultados mostraron que las sobrepresiones pueden superar los valores de diseño si no se consideran estrategias de ventilación adecuadas. Este antecedente refuerza la importancia del análisis dinámico en conducciones y del diseño de válvulas de aire como parte de la mitigación de eventos transitorios.

Ferreira et al. (2021) en Portugal, desarrollaron una investigación acerca del efecto de las bolsas de aire atrapadas sobre los transitorios hidráulicos en tuberías de presión, utilizando el Método de las Características (MOC). Concluyeron que el volumen y ubicación del aire influyen directamente en la amplitud de las ondas de presión. Su aporte sirve de base para comprender el comportamiento hidráulico en conducciones de impulsión como la estudiada en Rioja.

Tang et al. (2024) en China, evaluaron la efectividad de programas de protección contra golpe de ariete en sistemas de abastecimiento de agua de gran longitud. Los resultados demostraron que la instalación de tanques de protección y válvulas de aire puede reducir las presiones máximas en un 35 %. Este antecedente se relaciona directamente con el análisis de alternativas de mitigación planteado en el presente estudio.

Jiang et al. (2024) analizó el efecto de distintos modelos de fricción en la simulación de golpes de ariete. Se concluyó que la fricción variable con el régimen de flujo mejora la precisión del cálculo de presiones transitorias. Este hallazgo sustenta la importancia de emplear parámetros de fricción calibrados en las simulaciones realizadas en la presente investigación.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Castillo (2023), en la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, realizó un estudio sobre el análisis de transitorios hidráulicos en sistemas de bombeo de agua potable utilizando el software HAMMER. Determinó que las sobrepresiones se incrementan considerablemente ante el paro súbito de las bombas, recomendando el uso de válvulas anticipadoras de golpe de ariete. Este trabajo nacional coincide en el uso del mismo software y método de simulación que el presente estudio.

Ramírez (2022), en la Universidad Nacional de Cajamarca, evaluó la ocurrencia del golpe de ariete en líneas de impulsión rurales aplicando modelación numérica en HAMMER. Los resultados evidenciaron presiones superiores al 140 % de la presión de operación, sugiriendo la instalación de válvulas de aire y cámaras de compensación. Este antecedente nacional complementa la justificación técnica del análisis de transitorios realizado en Rioja.

Mejía y Taipe (2021) en la Universidad Nacional de Huancavelica, desarrollaron un estudio sobre la influencia del diseño hidráulico en el comportamiento de las redes de impulsión ante transitorios. Concluyeron que los sistemas con pendientes pronunciadas presentan mayor riesgo de cavitación y sobrepresión, recomendando simulaciones previas a la ejecución de proyectos. Este antecedente aporta al enfoque preventivo que adopta la presente investigación.

### **2.1.3. Antecedentes regionales**

Sandoval (2022) en la región San Martín, evaluó los efectos de las variaciones hidráulicas en líneas de impulsión de agua potable del distrito de Morales. Utilizando modelación en HAMMER, determinó puntos críticos donde se originan presiones negativas durante el paro repentino de bombas. Concluyó que la implementación de válvulas de aire en las cotas más altas disminuye el riesgo de colapso estructural. Este antecedente regional tiene directa relación con la ubicación geográfica y operativa del sistema estudiado en Rioja, donde se busca identificar y mitigar puntos críticos de transitorios hidráulicos.

## **2.2. Fundamentos teóricos**

### **2.2.1. Componentes principales de un sistema de agua potable**

#### **2.2.1.1. Obras de captación**

Comprende el conjunto de equipos electromecánicos y obras civiles que suelen emplearse para juntar y ubicar de forma adecuada el agua subterránea o superficial.

Estas obras difieren según el tipo de fuente, su magnitud y su localización (Rodríguez, 2001).

### **2.2.1.2. Línea de conducción**

Corresponde a la canalización o tubería que conduce el recurso hídrico desde la captación hasta la propia red de distribución, depósitos de regulación y almacenamiento o estaciones de tratamiento (Trapote, 2014).

Se conoce como "Línea de conducción" al grupo sistematizado de estaciones para bombeo, tuberías y accesorios que tienen como fin transportar el recurso hídrico desde la fuente (considerando la captación) hasta el lugar de la planta potabilizadora, tanque de regularización o de forma directa hacia la red de distribución. La conducción se puede desarrollar de dos formas diferentes, considerando la localización de las fuentes de abastecimiento respecto a las obras de regularización (Rodríguez, 2001).

- Por gravedad
- Por bombeo
- Mixto

### **2.2.1.3. Reservorio de almacenamiento**

El recurso hídrico obtenido desde la fuente, muchas veces no cumple con los parámetros requeridos para ser consumido por la población. El lugar donde se cambia el régimen hídrico para ser ajustado al consumo, se conoce como tanque y se cataloga como de regularización. Con estas infraestructuras se alcanza mantener niveles de presión adecuados del agua en la red de distribución, como también garantizar un abastecimiento continuo de agua (Rodríguez, 2001).

## **2.2.2. Ecuaciones básicas en hidráulica**

### **2.2.2.1. Ecuación de Bernoulli**

Por lo general, los términos en la ecuación son denominados cabeza de presión  $P/Y$ , cabeza de velocidad  $V/2g$ , cabeza estática  $Z$  y pérdida de cabeza  $HL_{1-2}$ . En ninguna circunstancia de interés práctico, las pérdidas de cabeza serán insignificantes; por esto es necesario definir la magnitud de tales pérdidas y sus variaciones antes de considerar cualquier aplicación real. Las pérdidas de energía (o de cabeza) resultan de esfuerzos cortantes a lo largo de las paredes de la tubería y en el interior del fluido y de cambios de cantidad de movimientos en las entradas, salidas, cambios en la sección transversal o dirección y en accesorios como válvulas (Terence, 1999).

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + HL_{1-2}$$

### 2.2.2.2. Ecuación de Darcy – Weisbach

En el cual  $f$  es un factor de fricción,  $L$  es la longitud de la tubería,  $d$  su diámetro interno y  $V^2/2g$  la cabeza de velocidad. Se puede demostrar, mediante análisis dimensional, que  $f$  depende solo y únicamente del número de Reynolds  $NR$  y de otro parámetro adimensional  $e/d$ , llamado de rugosidad relativa, donde  $e$  es la altura de la rugosidad de la superficie en la pared de la tubería y depende del material de esta última (Terence, 1999).

$$HL=f\frac{L}{d}\left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

### 2.2.2.3. Ecuación de Hazen – Williams

En la cual  $C$  es un factor dependiente de la rugosidad relativa,  $R$  es el radio hidráulico (el área de flujo dividido por el perímetro mojado),  $S$  es la pendiente de la línea de energía ( $HL/L$ ), y  $K$  es el factor dependiente de las unidades (0,849 para m/s y m; 1,318 para pies/s pies). El factor de fricción equivalente representado por  $C$  es modificado por  $NR$ , de manera que la ecuación no está totalmente separada de los fenómenos reales que ocurren en el flujo conducto. Las ecuaciones de Darcy-Weisbach y de Hazen-Williams pueden arrojar resultados comparables a un número de Reynolds moderadamente alto cuando se dan valores apropiados a  $C$ . La ecuación es de particular utilidad, ya que puede resolver directamente y así ser usada para una primera aproximación a  $NR$  cuando se utiliza la ecuación de Darcy- Weisbach (Terence, 1999).

$$V=kCR^{0.63}S^{0.54}$$

### 2.2.3. Altura piezométrica

Representa la altura que podría alcanzar la columna de agua dependiendo de la presión que posee el fluido, o sea representa la presión del fluido en ese punto. Se expresa en metros (m) (INACAP, 2020).

### 2.2.4. Bomba hidráulica

En el sentido más amplio del término, una bomba hidráulica es una máquina generadora que trabaja con un fluido incompresible en la que se producen una transformación de energía mecánica en hidráulica (UPCGRAU, 2011).

### 2.2.5. Curvas características de la bomba

Las curvas características son suministradas por el fabricante. Estas curvas son particulares de cada bomba y acogen las características de todos los puntos de funcionamiento posibles a unas revoluciones dadas (Bragado, 2018).

## **2.2.6. Análisis de la vegetación en el espectro electromagnético**

### **2.2.6.1. Transitorio lento o cuasi-estático**

En el que las variables del flujo varían de manera muy lenta en el tiempo (con intervalos de varias horas y hasta de varios días). Como un ejemplo se tiene el flujo no permanente en una red de agua potable, cuyos cambios se generan por la variación del consumo y de los niveles de agua en los tanques (CONAGUA, 2007).

### **2.2.6.2. Transitorio lento u oscilación de masa**

Se relaciona ante todo con el movimiento de la masa de agua en la conducción, semejante a la oscilación en dos vasos comunicantes. Los cambios de las variables en este tipo de transitorios son significativos, pero no tanto como para tomar en consideración las propiedades elásticas del fluido y la de tubería (CONAGUA, 2007).

### **2.2.6.3. Transitorio rápido o golpe de ariete**

Generados por cambios bruscos en la velocidad de la tubería derivados de maniobras rápidas como el paro repentino de una bomba o el cierre rápido de una válvula. Los cambios bruscos en la velocidad se acompañan de cambios bruscos en la presión que se propagan en la tubería, generando ondas de presión de periodo muy corto (apenas varios segundos) (CONAGUA, 2007).

### **2.2.6.4. Separación de columna líquida**

Si la resistencia de la tubería a la compresión es suficiente para evitar un colapso, el descenso de la presión anterior puede producir la vaporación del agua a la temperatura ambiente. Cuando la presión absoluta se aproxima a 0,25 mca para una temperatura ambiente de 20° C, el líquido se transforma en gas y se crean burbujas de tamaños de diversos tamaños en el agua. La presión de la vaporización está en función a la altura sobre el nivel del mar y de la temperatura del líquido, y en si no constituye un problema, pero si puede serlo después, cuando la burbuja producida inicialmente por una onda de depresión sea sometida a una presión levemente superior a la vaporización, lo que reducirá con mucha rapidez su volumen, provocando que las columnas líquidas separadas por ella choquen violentamente (CONAGUA, 2007).

### **2.2.6.5. Cavitación**

Se denomina cavitación a la formación de cavidades en el líquido en movimiento llenas de vapor. Se produce cuando la presión en algún lugar del fluido se hace menor que la presión de vapor saturada del líquido. Es decir, la presión que corresponde a la ebullición del líquido a una temperatura dada (CONAGUA, 2007).

### 2.2.6.6. Pulso de zhukovski

La fórmula de zhukovski muestra que las sobrepresiones que se producen en los transitorios pueden ser sumamente altas. Como un ejemplo, la detención instantánea de un flujo con una velocidad de unos 2 m/s en una tubería de acero ( $a \approx 1\,000$  m/s) daría un incremento de presión del orden de los 200 metros. Un incremento de presión de esa magnitud sería destructivo para la mayoría de la tubería de conducción de agua potable. Afortunadamente los cambios del flujo no son instantáneos y las sobrepresiones normalmente no son tan altas (CONAGUA, 2007).

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta v$$

G = aceleración de la gravedad = 9,81 m/s<sup>2</sup>

A = velocidad de propagación de la onda en m/s

### 2.2.6.7. Velocidad de propagación de la onda de presión (celeridad)

Cualquier cambio repentino en las condiciones del flujo que se origina en un punto de una tubería a presión se trasmite (propaga) por la tubería con una velocidad que depende de la elasticidad del fluido y de la pared de la tubería. Esta velocidad se señala con  $a$  y se denomina también celeridad, para distinguirla de la velocidad del flujo  $v$ .

Si la tubería fuera completamente indeformable (completamente rígida), la velocidad  $a$  sería igual a la velocidad de propagación del sonido en el fluido. La deformabilidad de la tubería disminuye la velocidad de propagación, de forma tal que es válida la siguiente ecuación (CONAGUA, 2007).

$$a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{E_{\text{agua}}}{E_{\text{mat}}} \times \frac{D}{\delta}}}$$

Donde:

$A_0$ : velocidad del sonido en el agua.

$E_{\text{agua}}$ : módulo de elasticidad volumétrica del agua.

$E_{\text{mat}}$ : módulo de elasticidad (módulo de Young) del material del tubo.

D: diámetro interior del tubo.

$\delta$ : espesor de la pared del tubo.

La velocidad del sonido en el agua depende de la temperatura; para las temperaturas normales del agua en conducciones tiene valores de 1 425 a 1 440 m/s. El módulo de

elasticidad del agua es igual a  $2,07 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup>. El valor de  $E_{mat}$  se toma de acuerdo al material de la tubería.

La ecuación presentada es válida para tubos de pared delgada. Para el cálculo de la velocidad de propagación  $a$  se considera que un tubo es de pared delgada si su relación  $D/\delta$  es igual o mayor de 25. Para tubos de pared gruesa, es decir, cuando  $D/\delta$  es menor de 25 se utiliza la siguiente ecuación:

$$a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{E_{\text{agua}}}{E_{\text{mat}}} \times \frac{D}{\delta} \times C}}$$

El coeficiente  $C$  se calcula de la siguiente forma:

$$C = \frac{2\delta}{D} (1 + \mu) + \frac{D(1 - \mu^2)}{D + \mu}$$

Donde  $\mu$  es el coeficiente de Poisson que depende del material de la tubería

### 2.2.7. Software hammer

Permite simular de forma precisa el impacto de diversos tipos de mecanismos de protección contra golpes de ariete en tuberías y equipos rotacionales (bombas y turbinas). El usuario puede elegir entre más de 20 dispositivos distintos y generar un número ilimitado de escenarios operativos hasta dar con la mejor estrategia de mitigación de golpes de ariete (BENTLEY, 2012).

### 2.2.8. Principales medios de control de transitorios

#### 2.2.8.1. Torre de oscilación

La torre de oscilación representa un cilindro conectado con la tubería, que en su parte superior está abierto y se comunica directamente con la atmósfera. En un régimen permanente la elevación del nivel de agua en la torre es igual a la carga piezométrica en la tubería. En las líneas de conducción de menor diámetro como torre de oscilación puede fungir simplemente un tubo parado, que incluso puede ser del mismo diámetro y material como la propia tubería.

Las torres de oscilación aseguran la entrada de agua a la tubería al bajar la presión en ésta, y reciben el agua que sale de la tubería al subir la presión. El funcionamiento de la torre de oscilación es tanto más efectivo para reducir el golpe de ariete, cuanto mayor sea el área de la superficie libre de agua en ella (CONAGUA, 2007).

#### **2.2.8.2. Cámara de aire**

Es uno de los dispositivos más utilizados para el control de transitorios particularmente para la protección de instalaciones de bombeo frente al transitorio originado por el fallo del suministro eléctrico. Consiste en un depósito cerrado, unido a la tubería y que en su parte superior tiene comprimido un volumen de aire. Durante el trabajo normal en régimen permanente el aire en la cámara está comprimido a una presión igual a la presión del agua dentro de la tubería, no existiendo flujo entre la cámara y la tubería. Al bajar la presión dentro de la tubería, surge un flujo desde la cámara. A la tubería entra un gasto que reduce las depresiones del transitorio. El volumen de aire dentro de la cámara se expande y su presión disminuye. Al subir posteriormente la presión en la tubería se genera un flujo hacia la cámara. El gasto que fluye hacia la cámara alivia las sobrepresiones en la tubería, el aire dentro de la cámara disminuye su volumen y su presión aumenta (el aire se comprime). De esta manera, inmediatamente después del fallo en el suministro eléctrico de las bombas la cámara de aire se convierte en una fuente de energía que tiende a mantener el movimiento del fluido en la conducción. El caudal en la tubería se reduce de una forma controlada y mucho más lenta de lo que ocurriría sin la presencia de la cámara. Se trata pues de convertir un transitorio rápido en un fenómeno de oscilación en masa (CONAGUA, 2007).

#### **2.2.8.3. Válvula de alivio**

Las válvulas de alivio son dispositivos conectados a la línea de conducción, que se abren al excederse una presión determinada y descargan ciertos gastos, limitando de esta forma la sobrepresión en la línea. Existe gran variedad de válvulas de alivio, desde las más simples de resorte, o las de contrapeso, hasta válvulas complicadas con complejos pilotajes y posibilidades de regulación. En la válvula de alivio de resorte que es uno de los tipos más sencillos. Por medio de un vástago y un plato el resorte mantiene tapado un orificio que está comunicado con el agua en la tubería. Si la fuerza del empuje por la presión del agua que actúa sobre el plato sobrepasa la fuerza ejercida por el resorte, el plato se levanta y a través del orificio se descarga un cierto gasto directamente al exterior o hacia un recipiente. Al disminuir la presión dentro de la tubería, bajo la acción del resorte la válvula se cierra. La válvula se ajusta para abrir normalmente cuando la presión en la conducción alcanza un valor entre 10 y 20 % superior a la presión del régimen permanente (CONAGUA, 2007).

#### **2.2.8.4. Válvulas anticipadoras del golpe de ariete**

Las válvulas anticipadoras son válvulas de alivio especiales que se abren en el período inicial de presión baja en la tubería. Al bajar la presión hasta un valor determinado la válvula se abre rápidamente y comunica el agua de la tubería con el exterior. Si la

presión continúa disminuyendo y tiende a producirse un vacío, por la válvula entra aire a la tubería.

Una vez abierta, la válvula anticipadora se cierra lentamente de modo que en las siguientes fases de sobrepresión se encuentre abierta y descargue ciertos gastos aliviando las sobrepresiones en la conducción. Las válvulas anticipadoras se utilizan sólo en sistemas en que el transitorio comienza con depresiones, como es el caso de un paro accidental de bombas en una línea de bombeo. Existen diversos tipos de válvulas anticipadoras en cuanto a construcción se refiere. La descripción de las mismas puede encontrarse en los catálogos de los fabricantes. Si, durante todo el transitorio, la presión no llega a bajar hasta el valor a que está ajustada a abrirse la válvula anticipadora, la misma permanece inactiva (CONAGUA, 2007).

#### **2.2.8.5. Válvula de emisión y expulsión de aire**

Permiten la entrada de aire atmosférico a la conducción en el punto de la tubería en que se encuentran instaladas cuando la presión en la conducción tiende a situarse por debajo de la presión atmosférica. Posteriormente y si la presión aumenta hasta superar la presión exterior, el aire es expulsado, de manera que las columnas de líquido separadas por la interface gas, vuelven a juntarse de nuevo. De este modo la válvula de admisión y expulsión de aire ejecuta las siguientes funciones:

- Asegura el escape del aire durante el llenado de la tubería.
- Asegura la entrada de aire al vaciar la tubería.
- **Evita el vacío (presiones negativas) en los transitorios.**

Las válvulas de aire se instalan en los puntos altos de las tuberías de perfil irregular, que es donde pueden presentarse problemas por bajas presiones. Si su funcionamiento es correcto son un elemento sumamente eficaz para la prevención de depresiones; pero una deficiente admisión puede dar lugar a una inesperada cavitación, y si la salida del aire no se efectuó adecuadamente puede aparecer el problema de un violento choque de las columnas en la reunificación (CONAGUA, 2007).

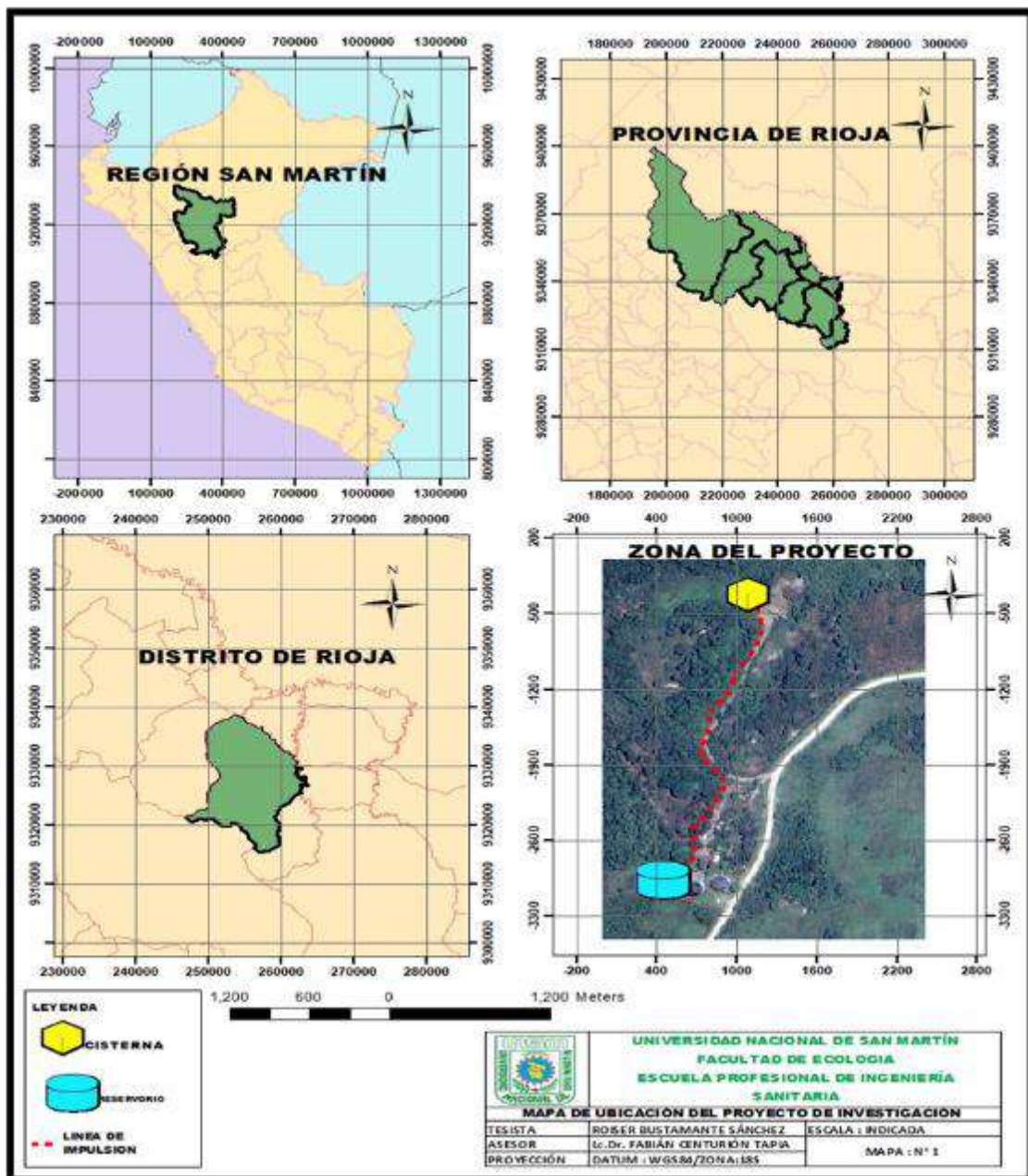
## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Ámbito y condiciones de la investigación

##### 3.1.1. Contexto de la investigación

El escenario de investigación se encuentra ubicado Políticamente en el distrito de rioja, provincia de Rioja, departamento de San Martín.



**Figura 1**  
 Mapa de ubicación del proyecto de investigación.

### **3.1.2. Periodo de ejecución**

La ejecución del estudio comprendió el período del 28 – 08 – 2023 al 24 – 11 – 2025.

### **3.1.3. Autorizaciones y permisos**

Se obtuvo la autorización correspondiente de la empresa prestadora de servicios de saneamiento Rioja S.A. (EPS Rioja S.A.), para la recopilación de información técnica y operativa del sistema de impulsión de agua potable, con el propósito de desarrollar la presente investigación.

Esta gestión permitió el acceso a los datos necesarios y la realización de las observaciones de campo sin inconvenientes.

La documentación que acredita dicha autorización se presenta en el anexo 1.

### **3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad**

La presente tesis “no aplica” para planes o programas de control ambiental, considerando que únicamente se realizaron actividades de levantamiento de información técnica y operativa en campo relacionadas con la línea de impulsión del sistema de agua potable de la provincia de Rioja, así como simulaciones hidráulicas mediante el software Bentley HAMMER CONNECT Edition (versión 24.00.00.26, 64-bit, 2024).

### **3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales**

Se expresa que, en el progreso del presente estudio se practicó los principios de conducta responsable.

## **3.2. Sistema de variables**

### **3.2.1. Variables principales**

- Variable independiente: Modelación hidráulica de una línea de impulsión.
- Variable dependiente: Ocurrencia de transitorios hidráulicos

**Tabla 1***Descripción de variables por objetivo específico*

Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Objetivo específico № 1: Recopilar información in situ sobre la topología del área de estudio y características del sistema de impulsión para alimentar el software de modelación hidráulica de transitorios.			
Información topográfica y de red hidráulica	Datos de elevación, diámetros, longitudes, materiales y caudales	Levantamiento topográfico, planos de la red, información técnica del sistema	metros, mm, L/s
Objetivo específico № 2: Identificar, mediante simulación en el software Bentley HAMMER, los puntos críticos de la red de impulsión donde se generan transitorios hidráulicos.			
Puntos críticos de transitorios hidráulicos	Ubicaciones con mayor fluctuación de presión y riesgo de daño	Simulación y análisis en software HAMMER	Coordenadas (UTM), mca
Objetivo específico № 3: Simular, mediante el software Bentley HAMMER, el comportamiento de los transitorios hidráulicos en la línea de impulsión para analizar sus efectos sobre la infraestructura y evaluar alternativas de mitigación.			
Comportamiento de las medidas de mitigación hidráulica	Variación de presiones y caudales durante transitorios con medidas implementadas	Reportes exportados del software Tablas comparativas Gráficos de presión/tiempo	mca, m/s
Objetivo general: Evaluar la ocurrencia de transitorios hidráulicos en la línea de impulsión del sistema de agua potable en Rioja, apoyándose en la modelación hidráulica para analizar sus efectos y posibles soluciones.			
Ocurrencia de transitorios hidráulicos	Variaciones de presión en la línea de impulsión	Simulación y modelación en software HAMMER	mca (metros de columna de agua)

**3.3. Procedimientos de la investigación****3.3.1. Diseño de la investigación**

Tipo de investigación cuantitativa, ya que se basa en la recopilación y análisis de datos numéricos obtenidos a partir de la modelación hidráulica en el software HAMMER. Además, se apoya en herramientas computacionales para la simulación de transitorios hidráulicos en la línea de impulsión de agua potable en la provincia de Rioja. La investigación cuantitativa se caracteriza por la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer patrones de comportamiento y probar teorías existentes (Hernández et al., 2014).

El nivel de investigación es básico explicativo, pues busca analizar la ocurrencia de transitorios hidráulicos en la línea de impulsión y explicar cómo la modelación hidráulica puede ayudar a comprender sus efectos y proponer medidas de mitigación. La

investigación explicativa busca determinar las causas y efectos de los fenómenos estudiados, estableciendo relaciones de causalidad entre variables (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

**Población:** Se considera el sistema de impulsión de agua potable en la provincia de Rioja, incluyendo su infraestructura hidráulica, tuberías, estación de bombeo y dispositivos de control.

**Muestra:** Se consideró el tramo desde la bomba hasta el nodo o punto de control, con una longitud total de 96,18 metros de tubería. Este tramo está compuesto por 86,18 metros de tubería de PVC y 10 metros de tubería de hierro dúctil. Se seleccionó este segmento debido a la presencia de sobrecargas de presión en el momento en que ocurre el transitorio hidráulico, lo que lo convierte en un punto crítico para el análisis y la implementación de estrategias de mitigación.

**Diseño:** El diseño de la investigación es no experimental y longitudinal. Es no experimental porque no se manipulan directamente las variables, sino que se analizan a partir de la modelación hidráulica. Es longitudinal porque se evaluará la ocurrencia de transitorios en diferentes escenarios simulados a lo largo del tiempo para entender su comportamiento y proponer soluciones (Hernández et al., 2014).

### **3.3.2. Recopilación de información in situ sobre la topología del área de estudio y características del sistema de impulsión para alimentar el software de modelación hidráulica de transitorios**

#### **a. Actividades y tareas**

Se solicitó a la empresa prestadora de agua potable EPS Rioja S.A. información actualizada sobre la topología y los datos técnicos de los accesorios, equipos de bombeo y tuberías que conforman la línea de impulsión de agua potable, en el tramo comprendido entre la cisterna de 500 m<sup>3</sup> y el reservorio de 1 200 m<sup>3</sup>.

Se validó la información proporcionada por la EPS Rioja S.A.C. mediante inspecciones de campo realizadas a lo largo del tramo de la línea de impulsión. Durante estas inspecciones se recopilaron datos técnicos relevantes, tales como los diámetros nominales de las tuberías, las longitudes de los tramos y la altimetría del terreno en el área de estudio.

#### **b. Descripción de los procedimientos**

El proceso inició con una visita de campo para el levantamiento topográfico de la línea de impulsión, donde se determinaron las cotas del terreno, ubicación de accesorios y longitudes de los tramos de tubería. Posteriormente, se efectuó un registro detallado de

las características hidráulicas de cada componente: diámetro, material, rugosidad, tipo de válvulas y condiciones de operación de las bombas.

Con los datos recopilados, se procedió a la elaboración del perfil longitudinal y esquema hidráulico en AutoCAD Civil 3D, complementando la información con tablas de parámetros hidráulicos en Excel. Finalmente, toda la información fue integrada en el software Bentley HAMMER, donde se configuró el modelo de simulación transitoria bajo condiciones reales de operación, sirviendo de base para la identificación de los puntos críticos y el análisis de sobrepresiones y subpresiones.

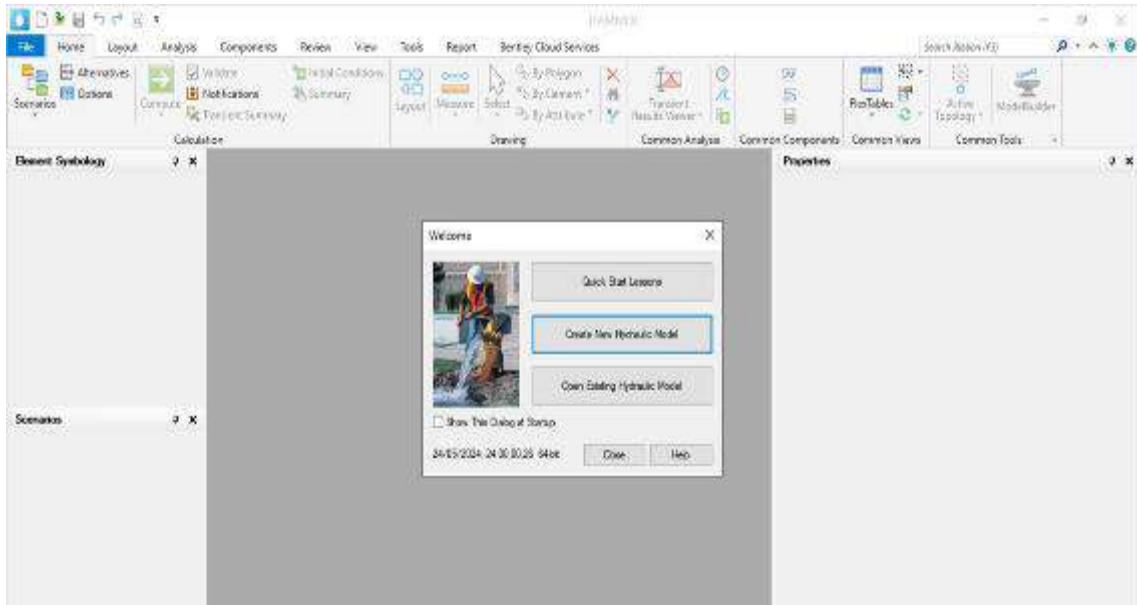
### **c. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

La información recopilada in situ fue procesada utilizando software especializado, como AutoCAD Civil 3D, con el cual se generaron perfiles longitudinales y curvas de nivel del terreno. Paralelamente, se organizó y sistematizó la información técnica del sistema de impulsión (diámetros, materiales, longitudes y accesorios), contrastándola con planos, fichas técnicas y documentación existente. Posteriormente, los datos fueron depurados mediante una revisión cruzada con la información proporcionada por la empresa EPS Rioja S.A.C. y los operadores de la línea de impulsión, lo que permitió validar y complementar los datos de campo. Finalmente, la información fue estructurada en formatos compatibles con el software de modelación hidráulica Bentley HAMMER, tales como archivos DXF, LAN y bases de datos específicas, asegurando que todos los parámetros necesarios estuvieran correctamente definidos para su simulación.

### **3.3.3. Identificación mediante simulación en el software Bentley HAMMER, los puntos críticos de la red de impulsión donde se generan transitorios hidráulicos**

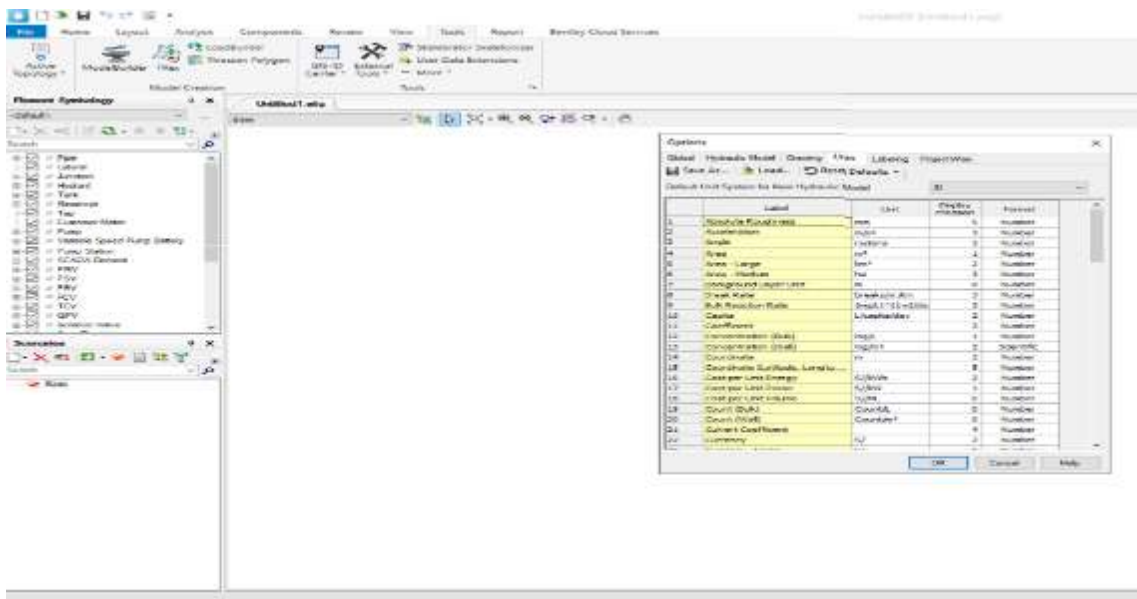
#### **a. Actividades y tareas**

- Se inicia un nuevo proyecto en Bentley HAMMER e ingresa el nombre, identificador y descripción del modelo.



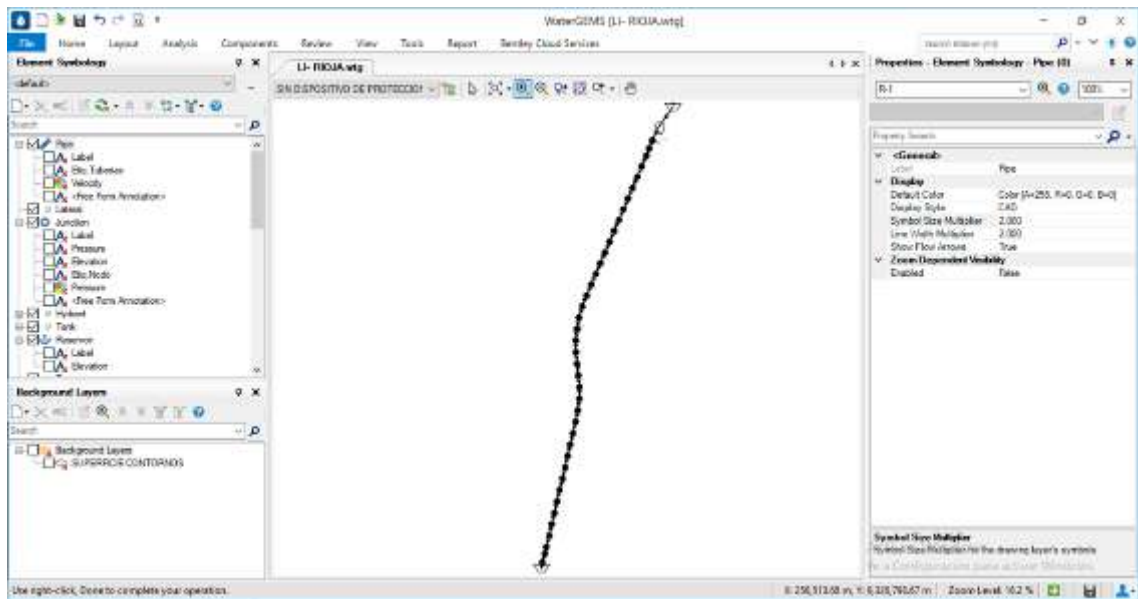
**Figura 2**  
Configuración de un nuevo proyecto en Bentley Hammer.

- Establecer el sistema de unidades en Sistema Internacional (SI) para caudal (L/s), longitud (m) y presión (mH<sub>2</sub>O).



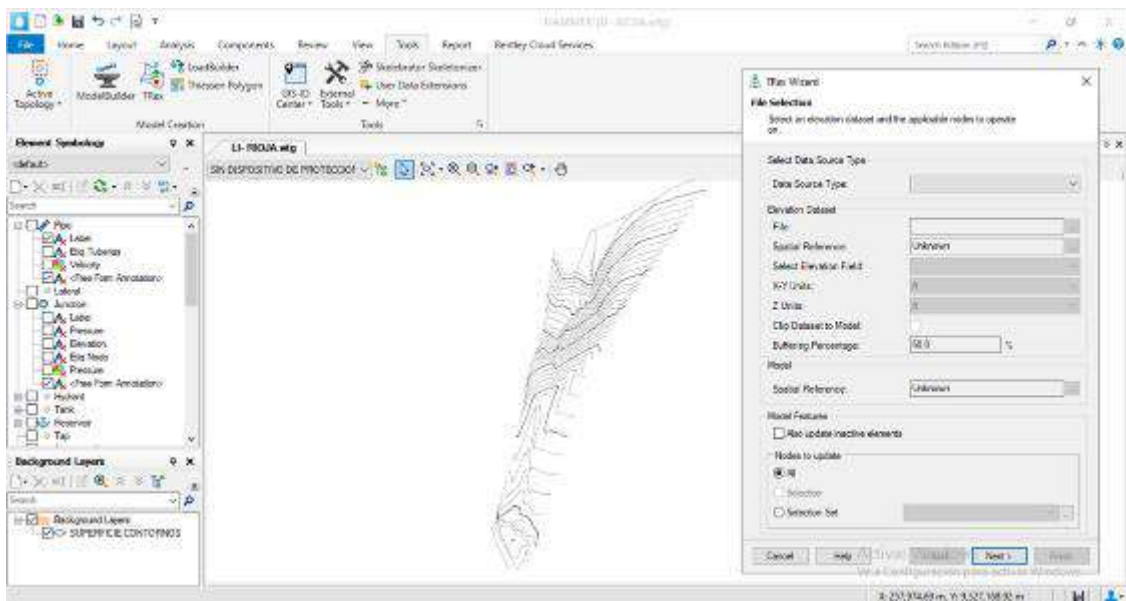
**Figura 3**  
Configuración de sistema de unidades.

- Representar gráficamente los componentes del sistema: cisterna de 500 m<sup>3</sup>, línea de impulsión, bomba y reservorio de 1 200 m<sup>3</sup>.



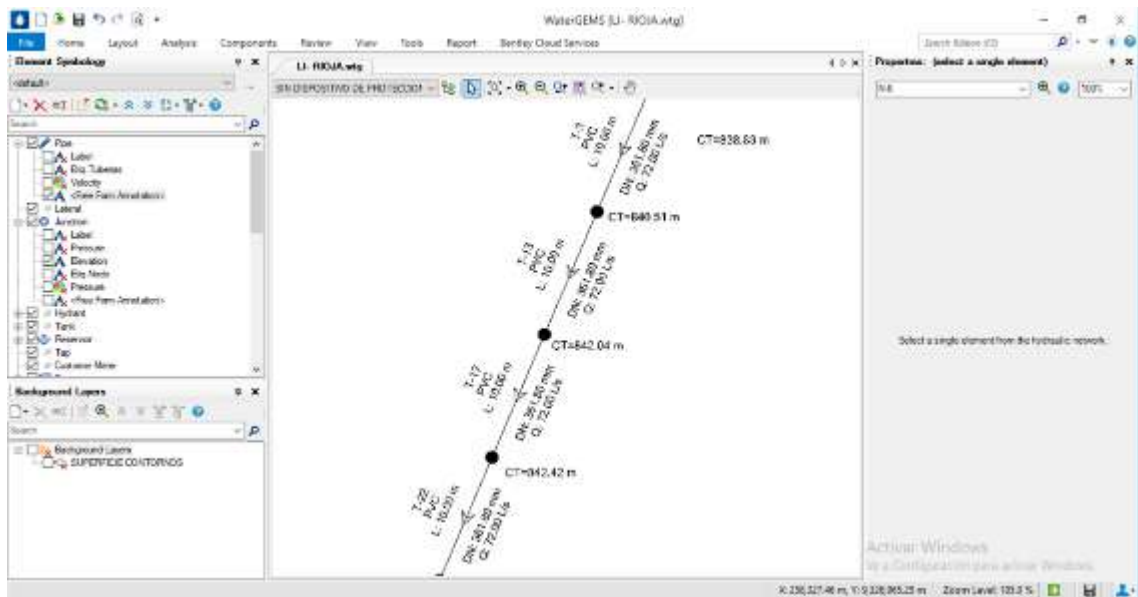
**Figura 4**  
Componentes del sistema de impulsión.

- Importar las elevaciones del terreno mediante la herramienta TRex (Terrain Extractor) utilizando un archivo LandXML exportado desde AutoCAD Civil 3D.



**Figura 5**  
Ingreso de las elevaciones al entorno de Bentley HAMMER.

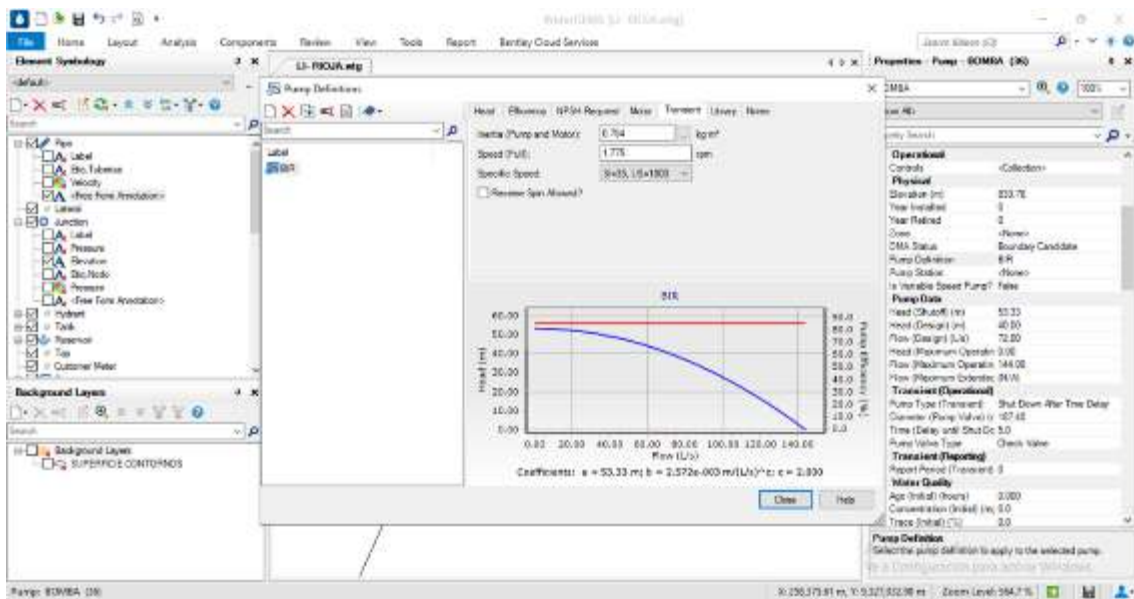
- Definir materiales y diámetros de tuberías (PVC-U Ø400 mm, Clase 7, 5, conforme a NTP-ISO 4 422).



**Figura 6**

Asignación de parámetros hidráulicos a los componentes de la línea de impulsión.

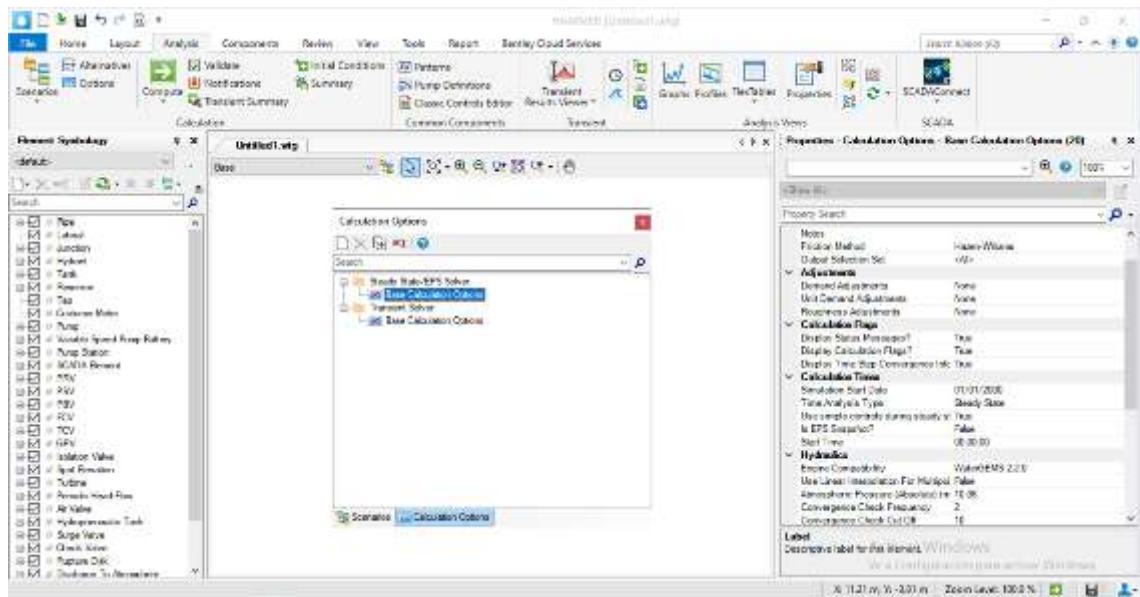
- Configurar la bomba tipo turbina vertical con  $Q = 72 \text{ L/s}$ ,  $H = 33,74 \text{ m}$  y  $\eta = 85,6 \%$ . Configurar la inercia del conjunto bomba-motor en  $0,62 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  y la velocidad de rotación en  $1775 \text{ rpm}$ .



**Figura 7**

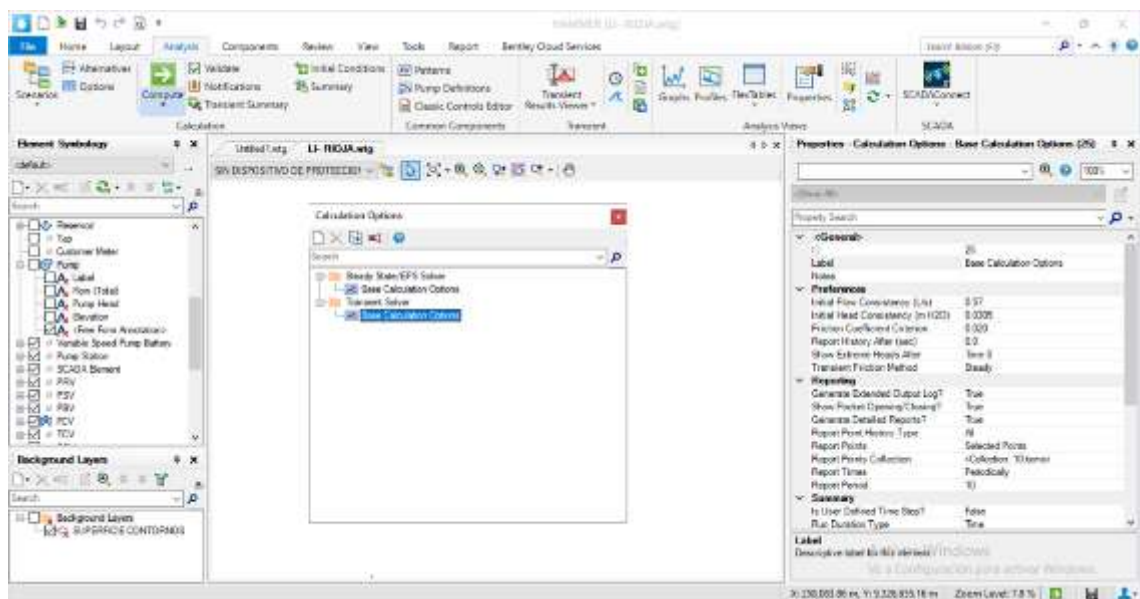
Parámetros hidráulicos de la bomba de impulsión.

- En el menú Analysis > Calculation Options, seleccionar el tipo de cálculo Steady-State, con los parámetros: Accuracy = 0,001, Maximum Trials = 40 y método Darwin Solver. Asignar esta opción al escenario activo y verificar la estabilidad hidráulica inicial.



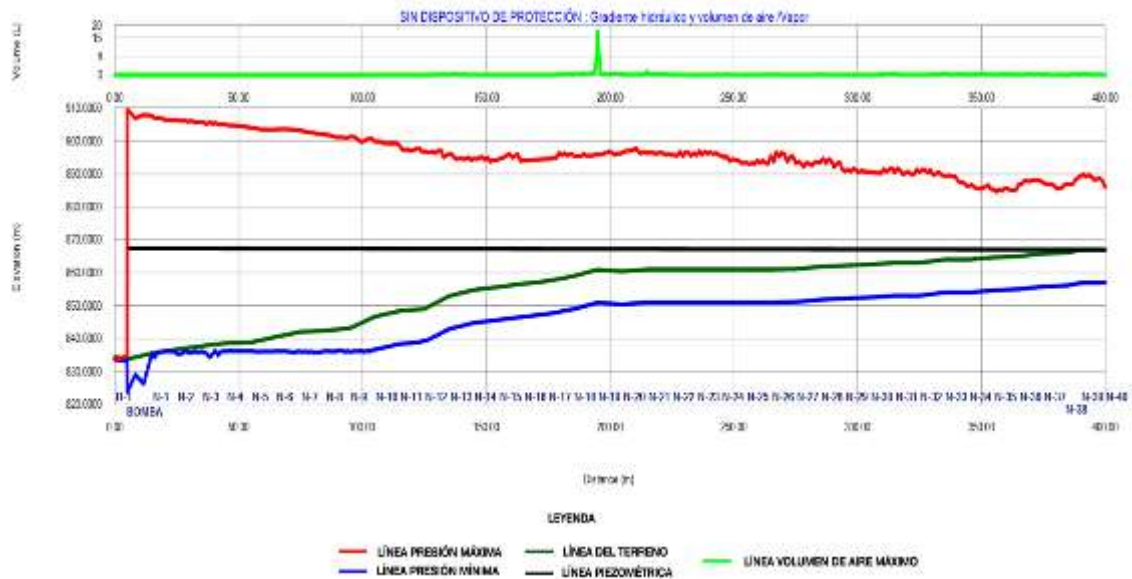
**Figura 8**  
Configuración del estado estacionario del modelo.

- Definir un evento de apagado de bomba con duración de 120 s, velocidad de onda de 310 m/s y presión de vapor de  $-9,98 \text{ mH}_2\text{O}$ . Establecer un cierre rápido de válvula de 0,1 s, activar opciones Run Extended CAV, Generate Animation Data y Calculate Transient Force.



**Figura 9**  
Configuración del transitorio hidráulico en el modelo.

- Registrar valores de presión y volumen de vapor cada 10 s en puntos críticos. Analizar el perfil del gradiente hidráulico, volumen de aire/vapor y subpresiones. Identificar los tramos más vulnerables a sobrepresión y cavitación.



**Figura 10**  
Análisis del gradiente hidráulico y del volumen de aire–vapor.

### b. Descripción de los procedimientos

El proceso inició con la creación del modelo hidráulico en Bentley HAMMER, estableciendo el sistema de unidades en formato SI, lo que garantizó la coherencia de las variables durante la simulación. Luego, se incorporó la topografía del terreno mediante la herramienta TRex, que asignó automáticamente las cotas del modelo digital de terreno a cada nodo de la red. Posteriormente, se modeló el sistema de impulsión completo, compuesto por la cisterna de 500 m<sup>3</sup>, la bomba principal, la línea de impulsión y el reservorio de 1 200 m<sup>3</sup>, representando la geometría real observada en campo. Se definieron las propiedades hidráulicas de las tuberías de PVC-U y la curva característica de la bomba tipo turbina vertical con sus condiciones de operación nominal.

Una vez calibrado el modelo estacionario, se configuró la simulación transitoria para analizar el comportamiento del sistema ante un apagado súbito de la bomba y un cierre rápido de válvula, lo que permitió reproducir las fluctuaciones de presión y los efectos del golpe de ariete.

La duración de la simulación fue de 120 segundos, considerando una velocidad de propagación de 310 m/s y una presión de vapor de -9,98 mH<sub>2</sub>O. Se activaron las opciones para extender el cálculo de cavitación, generar animaciones y calcular fuerzas transitorias.

### c. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de los datos obtenidos de la simulación hidráulica se efectuó mediante procedimientos numéricos y gráficos, aplicados a los resultados generados

por el software Bentley HAMMER. Estas técnicas permitieron evaluar el comportamiento transitorio de la línea de impulsión y determinar los puntos críticos del sistema.

- Método de las Características (MOC)

Técnica numérica aplicada automáticamente por el software Bentley HAMMER para resolver las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento durante los eventos transitorios, permitiendo representar con precisión la propagación y reflexión de las ondas de presión en la tubería.

- Análisis del gradiente hidráulico

Se realizó una comparación entre el gradiente hidráulico dinámico y el gradiente estático, con la finalidad de identificar zonas de sobrepresión, asociadas al golpe de ariete, y zonas de subpresión, relacionadas con el riesgo de cavitación.

- Evaluación del volumen de aire/vapor

Se determinó el comportamiento de las zonas donde la presión cae por debajo de la presión de vapor, generando cavitación. Este análisis se efectuó mediante la interpretación de la línea magenta (Air/Vapor Volumen) en los perfiles de simulación.

- Validación del modelo

se verificó la coherencia del comportamiento hidráulico simulado respecto a las condiciones reales de operación observadas en campo, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos en la simulación.

- Identificación de puntos críticos

Se localizaron los tramos de la línea de impulsión más vulnerables a sobrepresiones y subpresiones, a través del análisis de los perfiles de presión y velocidad generados en el software. Este procedimiento permitió fundamentar la propuesta de medidas de mitigación, tales como la instalación de válvulas de aire o cámaras rompe-presión, con el fin de reducir los impactos de los transitorios hidráulicos y preservar la integridad del sistema.

### **3.3.4. Simulación mediante el software Bentley HAMMER, el comportamiento de los transitorios hidráulicos en la línea de impulsión para analizar sus efectos sobre la infraestructura y evaluar alternativas de mitigación**

#### **3.3.4.1. Criterios técnicos para evaluar los dispositivos de protección ante transitorios hidráulicos**

La selección de los tres escenarios de dispositivos de protección (válvulas de aire, válvula anticipadora de onda y tanque hidroneumático) se basa en criterios técnicos que combinan seguridad hidráulica, funcionalidad operativa y factibilidad económica:

##### **1. Mitigación del riesgo hidráulico**

- Los dispositivos se eligen según su capacidad para controlar sobrepresiones y subpresiones generadas durante eventos transitorios (paro súbito de bombas o arranque rápido).
- La prioridad es prevenir cavitación, ingreso de aire o daño estructural en tramos altos y puntos críticos de la línea.

##### **2. Complejidad de instalación y mantenimiento**

- Las válvulas de aire son fáciles de instalar y mantener, por lo que se evalúan primero como solución básica.
- La válvula anticipadora de onda requiere configuración en la estación de bombeo, pero sigue siendo relativamente sencilla de operar.
- El tanque hidroneumático es más costoso y voluminoso, requiere espacio y conexiones adicionales, por lo que se evalúa como solución completa para casos donde los transitorios son severos.

##### **3. Efectividad progresiva de mitigación**

- Se evalúan en orden de complejidad y efectividad: primero mitigación básica (válvulas de aire), luego mitigación combinada (válvula anticipadora + válvulas de aire) y finalmente mitigación completa (tanque hidroneumático + válvulas de aire).
- Esto permite comparar mejoras de presión y subpresión y seleccionar la alternativa que ofrezca un balance óptimo entre seguridad y costos.

##### **4. Criterio económico y operativo**

- Se considera el costo de adquisición, instalación y mantenimiento de cada dispositivo frente a la reducción del riesgo de falla en la infraestructura.

- La combinación final (tanque hidroneumático + válvulas de aire) se justifica cuando los beneficios en estabilidad hidráulica y seguridad superan los costos adicionales

#### **a. Actividades y tareas**

- Configuración de los escenarios de simulación transitoria en el software Bentley HAMMER, considerando eventos críticos como el paro súbito de la bomba.
- Definición de parámetros hidráulicos relevantes: velocidad de propagación de la onda, presión de vapor, duración del evento.
- Ejecución de simulaciones dinámicas bajo diferentes condiciones operativas del sistema (con y sin dispositivos de protección).
- Obtención y análisis de los resultados gráficos: perfiles del gradiente hidráulico, presiones transitorias, volúmenes de aire/vapor y velocidades instantáneas.
- Identificación de zonas de sobrepresión y subpresión a lo largo de la línea de impulsión.
- Propuesta de alternativas de mitigación hidráulica, tales como válvulas de aire, válvula anticipadora de onda o tanques hidroneumáticos.
- Evaluación comparativa del comportamiento del sistema con y sin medidas de protección, para determinar la solución más eficiente.

#### **b. Descripción de los procedimientos**

Para el desarrollo de este objetivo se establecieron distintos escenarios transitorios en Bentley HAMMER.

Se configuró un evento base sin dispositivos de protección, simulando el paro súbito de la bomba, lo que permitió analizar el comportamiento real del sistema ante una perturbación hidráulica. Posteriormente, se implementaron escenarios con elementos de mitigación (válvulas de aire tri funcional, válvula anticipadora de onda y tanque hidroneumatico) para comparar la respuesta dinámica del sistema.

Cada simulación consideró una duración de 120 segundos, una velocidad de propagación de onda de 310 m/s y una presión de vapor de -9,98 mH<sub>2</sub>O.

Se utilizaron las funciones "Run Transient Analysis" y "Generate Animation Data" para registrar la evolución de la presión en puntos críticos de la red.

Los resultados se visualizaron mediante los gráficos "Hydraulic Grade and Air/Vapor Volume" y "Head Envelope", identificando los sectores donde el gradiente hidráulico (línea roja) supera el gradiente estático (línea negra), indicando sobrepresiones, o cae

por debajo del eje de la tubería (línea azul), indicando subpresiones y riesgo de cavitación.

Finalmente, los escenarios fueron comparados considerando las máximas presiones y tensiones inducidas, con el fin de seleccionar la alternativa de mitigación más adecuada para la protección de la infraestructura hidráulica.

### **c. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

El procesamiento y análisis de los resultados de simulación se realizó con base en métodos cuantitativos y comparativos, permitiendo interpretar el comportamiento hidráulico del sistema ante eventos transitorios.

Los resultados numéricos y gráficos obtenidos del software Bentley HAMMER se procesaron con la extracción de perfiles de gradiente hidráulico, presiones máximas y mínimas, y volúmenes de aire/vapor en puntos estratégicos de la línea de impulsión.

Se aplicó el Método de las Características (MOC) como base del análisis computacional, el cual resuelve de manera simultánea las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento, permitiendo representar con precisión las ondas de presión y las variaciones instantáneas de caudal durante el evento transitorio.

El análisis de los datos se centró en: Comparar los valores de presión y velocidad entre escenarios con y sin dispositivos de protección hidráulica, para determinar el grado de mitigación de los transitorios.

Evaluar el gradiente hidráulico dinámico frente al estático, identificando zonas de sobrepresión (por encima del gradiente estático) y de subpresión (por debajo de la línea de presión atmosférica).

Analizar el comportamiento del volumen de aire/vapor, determinando la magnitud y duración de las cavitaciones en función del tiempo.

Cuantificar las presiones extremas obtenidas en la simulación y compararlas con la presión nominal de las tuberías para verificar su seguridad estructural.

Representar los resultados en gráficos y tablas, permitiendo una interpretación visual clara de los puntos críticos y de la respuesta del sistema frente a distintas condiciones de operación.

Finalmente, se validaron los resultados mediante la comparación con datos observados en campo y la revisión de la coherencia hidráulica del modelo, asegurando la confiabilidad de los valores analizados.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### **4.1. Información in situ sobre la topología del área de estudio y características del sistema de impulsión para alimentar el software de modelación hidráulica de transitorios**

Para la configuración y desarrollo del modelo hidráulico transitorio, se recopiló información in situ y documental del sistema de impulsión proporcionada por la Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento Rioja S.A. (EPS Rioja S.A.). La información técnica permitió caracterizar las condiciones físicas y operativas de la línea de impulsión que conecta la cisterna de 500 m<sup>3</sup> con los reservorios de 1 200 m<sup>3</sup>.

Durante la fase de campo, se realizó el levantamiento topográfico del sistema de impulsión, con el propósito de obtener las cotas del terreno y la ubicación georreferenciada de cada componente del sistema. Esta información permitió generar el perfil longitudinal de la línea de impulsión y establecer las condiciones de pendiente, pérdidas de carga y diferencias de altura entre los puntos de inicio y descarga, las cuales son determinantes para la simulación de los fenómenos transitorios

Los principales parámetros identificados fueron los siguientes:

##### **- Tipo de tubería**

PVC conforme a la norma NTP ISO 4422, adecuada para sistemas de conducción de agua a presión. Tubería clase 7,5.

##### **- Diámetro nominal**

400 milímetros (DN 400).

##### **- Caudal de impulsión**

72 litros por segundo (0,072 m<sup>3</sup>/s), correspondiente al volumen transportado desde la cisterna de 500 m<sup>3</sup> hacia los reservorios de 1 200 m<sup>3</sup>.

##### **- Material del sistema**

PVC de clase de presión acorde a las condiciones de operación del sistema, con un coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams  $C = 150$ , característico para conducciones de PVC.

### **- Longitud del tramo de impulsión**

Según planos y mediciones en campo, corresponde al tramo cisterna-reservorio, con desarrollo lineal adaptado a la topografía del terreno y una longitud total de 405, 02 metros.

### **- Información técnica del motor**

El motor de impulsión presenta una potencia nominal de 50 HP (37,3 kW), operando a una velocidad de 1 775 revoluciones por minuto (rpm). Es un motor trifásico diseñado para trabajar a 460 V con una eficiencia nominal del 90,2 %, lo que garantiza un funcionamiento confiable y eficiente en el accionamiento de la bomba del sistema de impulsión.

### **- Información técnica de la bomba**

La estación de bombeo cuenta con una bomba vertical tipo turbina de cuatro etapas, diseñada para un caudal nominal de 72 L/s y una altura manométrica total de 55 mca. El conjunto hidráulico está conformado por tazones de hierro fundido con impulsores cerrados de bronce, acoplados a un eje vertical de acero inoxidable. El sistema descarga hacia una tubería de 400 mm de diámetro. La bomba es accionada por un motor eléctrico trifásico de 50 HP y 1 775 rpm, con una eficiencia hidráulica del 85 %, asegurando un funcionamiento confiable, continuo y eficiente en la impulsión de agua hacia los reservorios.

### **- Topografía**

La topografía se levantó con GPS diferencial donde se obtuvo cotas de nivel los cuales se muestra en el anexo 08.

Con base en la información anterior, se elaboró el modelo hidráulico del sistema de impulsión, definiendo los elementos principales del sistema: bomba de impulsión, válvulas de control, línea principal de PVC DN400, puntos singulares de pérdida y dispositivos de protección hidráulica considerados en los distintos escenarios de simulación.



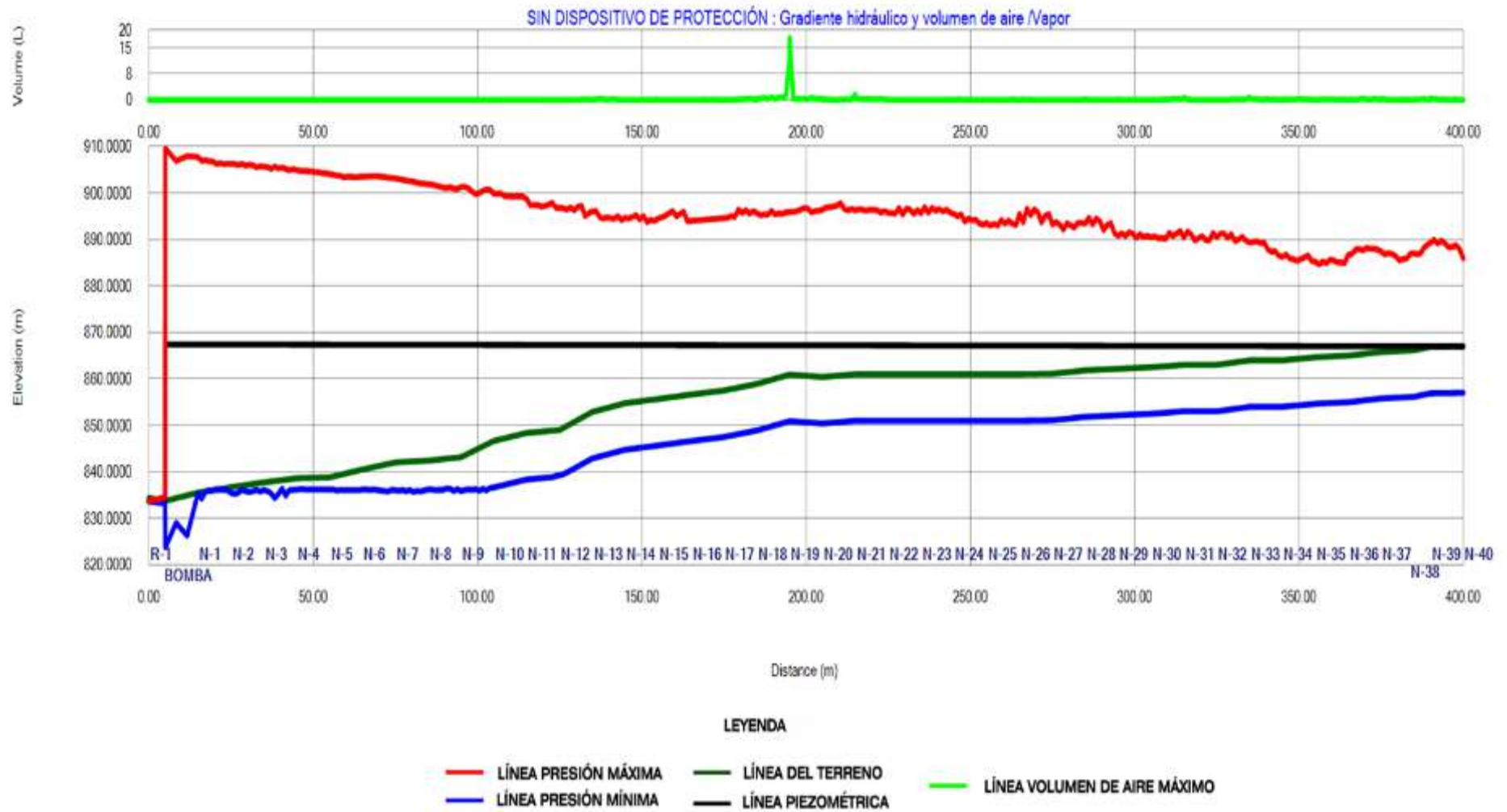
**Figura 11**

*Ingreso de la línea de impulsión de 400 mm al reservorio de 1 200 m<sup>3</sup>.*

#### **4.2. Simulación en el software Bentley HAMMER, los puntos críticos de la red de impulsión donde se generan transitorios hidráulicos**

El análisis transitorio realizado en el software Bentley HAMMER Connect Edition permitió evaluar el comportamiento hidráulico de la línea de impulsión de agua potable frente a un paro súbito de la bomba principal, sin la presencia de dispositivos de protección. Este escenario representa la condición inicial más desfavorable durante la operación del sistema.

Los resultados obtenidos muestran la aparición de ondas de sobrepresión y subpresión a lo largo de la conducción, generadas por la detención instantánea del flujo. Estas ondas se propagan desde la cámara de bombeo hacia el reservorio, ocasionando fluctuaciones que alcanzan presiones negativas en los tramos más elevados de la topografía.



**Figura 12**  
*Perfil del gradiente hidráulico dinámico.*

En la Figura 12 se muestra el perfil del gradiente hidráulico y volumen de aire/vapor durante los 120 segundos de simulación, correspondiente al evento de paro súbito de la bomba sin dispositivos de protección. En el gráfico, la línea roja representa el gradiente hidráulico dinámico (HGL), la línea verde indica el perfil topográfico de la conducción, la línea negra muestra la línea piezométrica en régimen permanente, mientras que la línea azul evidencia las zonas de subpresión o presiones negativas generadas a lo largo del sistema. En la parte superior, se observa la variación del volumen de aire/vapor, indicador de la formación de cavitación en determinados puntos de la red.

Durante los primeros instantes del evento (alrededor de 13,16 segundos), se aprecia una disminución abrupta del gradiente hidráulico en el tramo inicial de la impulsión, coincidiendo con el cierre instantáneo del flujo. Esta condición origina una onda de depresión que se propaga con una velocidad de 310 m/s, reflejándose en distintos puntos de la conducción. En la parte media del perfil (entre 180 y 220 m de distancia), se observa un pico de volumen de aire/vapor, correspondiente a una presión inferior a la presión de vapor del agua ( $-9,9843$  m H<sub>2</sub>O), lo que confirma la formación de cavitación transitoria. Conforme avanza la simulación, las ondas reflejadas tienden a disiparse progresivamente, alcanzando una condición estable al final del periodo de análisis.

Del análisis del perfil hidráulico se identificaron tres comportamientos principales:

#### **- Zonas de sobrepresión**

Se localizaron principalmente en la zona de impulsión cercana a la cámara de bombeo, donde el cierre súbito del flujo genera un incremento temporal de la presión estática. Estas sobrepresiones alcanzaron valores cercanos a 72,5 metro columna de agua (m.c.a), que pueden superar la presión nominal de diseño de la tubería, aumentando el riesgo de fugas o roturas en un evento real.

#### **- Zonas de subpresión**

En la parte media de la línea, coincidente con los tramos de mayor elevación topográfica, se observaron presiones negativas respecto a la presión atmosférica. Este fenómeno se visualiza en la línea azul, la cual cae por debajo de la línea piezométrica en régimen permanente (línea negra), indicando riesgo de cavitación e ingreso de aire. En el gráfico, este comportamiento se asocia a un aumento del volumen de vapor alrededor de los 200 m de distancia.

### - Zonas de presión estable:

En el tramo final, próximo al reservorio de llegada, las presiones tienden a estabilizarse. Este comportamiento indica que el reservorio actúa como un elemento amortiguador del fenómeno transitorio, disipando parte de la energía generada por las ondas de presión reflejadas

**Tabla 2**

*Puntos críticos de presión y volumen de vapor durante el evento transitorio (sin dispositivos de protección)*

<b>Nodo</b>	<b>Elevación (m)</b>	<b>Presión máx. (m.c.a.)</b>	<b>Presión mín. (m.c.a.)</b>	<b>Volumen máx. de vapor (L)</b>	<b>Riesgo predominante</b>	<b>Observaciones</b>
N-1	835,54	72,04	-0,14	0	Sobrepresión leve	Pico inicial al detener el flujo.
N-6	840,51	62,87	-4,31	0	Subpresión moderada	Inicio de cavitación local.
N-9	843,17	57,98	-7,24	0	Subpresión alta	Riesgo de cavitación.
N-13	852,91	43,00	-9,98	0	Subpresión crítica	Presión por debajo del nivel de vapor.
N-19	860,92	34,86	-9,98	23	Crítico	Formación significativa de vapor.
N-21	861,00	35,19	-9,98	2	Crítico	Cavitación localizada intermitente.
N-31	863,03	27,33	-9,98	1	Crítico	Formación puntual de bolsas de aire/vapor.
N-33	864,00	25,31	-9,98	1	Crítico	Posible colapso estructural del conducto.
N-39	866,92	22,31	-9,98	0	Crítico	Subpresión extrema en zona elevada.
N-40	867,00	18,96	-9,98	0	Crítico	Punto más vulnerable del sistema.

Del análisis de los resultados se evidencia que los puntos más críticos se ubican en los nodos comprendidos entre N-19 y N-40, correspondientes a las zonas de mayor elevación (860–867 m.s.n.m.), donde las presiones mínimas alcanzan valores negativos cercanos a -10 m.c.a. y se presenta formación de volumen de vapor de hasta 23 L, evidenciando la presencia de cavitación.

En contraste, los nodos cercanos a la cámara de bombeo (N-1 a N-6) presentan sobrepresiones moderadas sin riesgo de daño estructural inmediato, aunque sí reflejan el impacto inicial del fenómeno transitorio.

Estos resultados permiten delimitar con precisión los puntos críticos del sistema, los cuales serán la base para el análisis de escenarios de mitigación. En la siguiente etapa se evaluarán mediante modelación comparativa los efectos de distintos dispositivos de protección (como válvulas de aire tri funcional, tanques hidroneumáticos o válvulas sostenedoras de presión, o la combinación de estos) con el fin de determinar la configuración óptima que reduzca las sobrepresiones y subpresiones en la línea de impulsión.

#### **4.3. Mediante el software Bentley HAMMER, el comportamiento de los transitorios hidráulicos en la línea de impulsión para analizar sus efectos sobre la infraestructura y evaluar alternativas de mitigación**

Con el objetivo de mitigar los efectos del golpe de ariete producido ante el paro súbito de la bomba principal, se evaluaron cuatro escenarios de simulación en el software Bentley HAMMER CONNECT Edition (v.24.00.00.26, 64-bit).

El escenario base (sin protección) permitió identificar los puntos más críticos de la línea de impulsión, mientras que los escenarios siguientes incorporaron progresivamente dispositivos de protección hidráulica: válvulas de aire, válvula anticipadora de onda y tanque hidroneumático.

Los resultados permiten comparar el comportamiento de presión, cavitación y volumen de vapor en los mismos nodos representativos, con el fin de evaluar cuantitativamente la efectividad de cada alternativa de mitigación.

##### **4.3.1. Escenario 1: Instalación de dos válvulas de aire (triple función)**

En este escenario se incorporaron dos válvulas de aire tipo triple efecto (AV-1 y AV-2), ubicadas estratégicamente en los puntos altos (860,92 m y 865,00 m). Estas válvulas, con orificios de entrada/salida de 100 mm y secundarios de 20-40 mm, permitieron controlar la admisión y expulsión de aire durante las fases de llenado y vaciado de la línea.

El efecto sobre las presiones fue positivo, aunque limitado, reduciendo parcialmente las subpresiones y atenuando la amplitud de las ondas transitorias. Sin embargo, en los nodos más elevados (N-33 a N-40) las presiones mínimas continuaron siendo negativas, indicando que persistía el riesgo de cavitación leve.

**Tabla 3**  
*Resultados hidráulicos - Escenario 1 (2 válvulas de aire tri función)*

<b>Nodo</b>	<b>Elevación (m)</b>	<b>P máx (m.c.a.)</b>	<b>P mín (m.c.a.)</b>	<b>Mejora respecto al base</b>	<b>Riesgo predominante</b>	<b>Observaciones</b>
N-1	835,54	69,64	-9,98	Leve reducción de sobrepresión	Moderado	Amortiguación inicial del golpe.
N-6	840,51	60,67	-2,51	Mejora en subpresión	Leve	Se atenúa riesgo de cavitación.
N-9	843,17	58,05	-7,93	Estabilidad general	Moderado	Transitorio más controlado.
N-13	852,91	46,81	-9,98	Sin mejora significativa	Crítico	Persiste vacío hidráulico.
N-19	860,92	35,96	-9,98	Similar	Crítico	Se reduce vapor, pero sigue el riesgo.
N-21	861,00	34,95	-9,98	Similar	Crítico	Cavitación aún presente.
N-31	863,03	28,40	-9,98	Sin mejora	Crítico	Persistencia del vacío.
N-33	864,00	26,76	-9,98	Sin mejora	Crítico	Cavitación continua.
N-39	866,92	23,38	-9,98	Leve mejora en P <sub>máx</sub>	Crítico	Zona muy afectada.
N-40	867,00	21,04	-9,98	Leve mejora	Crítico	Punto vulnerable del sistema.

#### 4.3.2. Escenario 2: Válvula anticipadora de onda más válvulas de aire tri función

En el segundo escenario se añadió una válvula anticipadora de onda (SAV-01) en la estación de bombeo, configurada con una presión de apertura de 25 metro columna de agua (m.c.a) y un tiempo de apertura total de 5 segundos.

Este dispositivo alivió de manera automática las sobrepresiones iniciales, permitiendo que el flujo se libere temporalmente hacia el exterior.

Los resultados reflejan una reducción más uniforme de las presiones máximas y mínimas, especialmente en los nodos cercanos al punto de bombeo (N-1 a N-9).

Sin embargo, los puntos más elevados (N-31 a N-40) aún mantuvieron presiones negativas, aunque de menor magnitud y duración.

**Tabla 4**  
**Resultados hidráulicos – Escenario 2 (válvula anticipadora + 2 válvulas de aire tri función)**

<b>Nodo</b>	<b>Elevación (m)</b>	<b>P máx. (m.c.a.)</b>	<b>P mín. (m.c.a.)</b>	<b>Mejora respecto al base</b>	<b>Riesgo predominante</b>	<b>Observaciones</b>
N-1	835,54	72,70	5,64	Notable reducción de subpresión ( $P_{\min}$ pasó a positivo); leve aumento de $P_{\max}$ .	Bajo	Eliminación del vacío en el nodo; aparece mayor sobrepresión transitoria.
N-6	840,51	69,48	2,96	Notable reducción de subpresión; aumento de $P_{\max}$ .	Bajo	Cavitación atenuada, pero $P_{\max}$ creció (vigilar sobrepresión).
N-9	843,17	66,67	2,28	Significativa reducción de subpresión; aumento de $P_{\max}$ .	Bajo	Transitorio más controlado respecto a $P_{\min}$ ; $P_{\max}$ mayor.
N-13	852,91	56,05	-3,45	Notable reducción de subpresión (menos negativo), pero $P_{\max}$ aumentó significativamente.	Moderado	Vacío reducido, pero aún negativo; riesgo de cavitación disminuye, sobrepresión crece.
N-19	860,92	—	—	Dato no proporcionado en los datos finales	—	Confirma y reenvía N-19 si quieres que la compare y la incluya.
N-21	861,00	50,72	-9,61	$P_{\min}$ casi sin mejora; aumento notable de $P_{\max}$ .	Crítico	Persiste vacío profundo; además $P_{\max}$ aumentó — alto riesgo dinámico.
N-31	863,03	27,28	-9,98	Sin mejora en $P_{\min}$ ; $P_{\max}$ similar.	Crítico	Vacío hidráulico crítico persiste en cota alta.
N-33	864,00	27,49	-9,98	Sin mejora en $P_{\min}$ ; leve aumento de $P_{\max}$ .	Crítico	Cavitación continua en la cota alta.

N-39	866,92	23,86	-9,98	Sin mejora en Pmin; leve aumento de Pmáx.	Crítico	Vacío persistente en zona elevada.
N-40	867,00	19,04	-9,98	Sin mejora en Pmin; Pmáx similar.	Crítico	Punto más vulnerable - vacío extremo mantiene riesgo estructural.

#### 4.3.3. Escenario 3: Tanque hidroneumático más válvulas de aire tri función

El último escenario incorporó un tanque hidroneumático sellado (TH-01), con volumen total de 8 000 L y volumen inicial de 4 000 L, ubicado a una elevación de 836,71 m, operando junto con las dos válvulas de aire previamente instaladas. Los volúmenes se van analizando según el requerimiento de la capacidad de la tubería como también la longitud, la presión se extrae del punto de conexión del tanque hidroneumático en este caso sería 30,67 metros columna de agua (m.c.a).

El tanque permitió almacenar energía hidráulica temporalmente mediante la compresión del aire en su cámara superior, estabilizando las fluctuaciones de presión en todo el sistema.

**Tabla 5**

*Resultados hidráulicos – Escenario 3 (tanque hidroneumático + válvulas de aire tri función)*

Nodo	Elevación (m)	P máx. (m.c.a.)	P mín. (m.c.a.)	Mejora respecto al base	Riesgo predominante	Observaciones
N-1	835,54	35,24	0	total, de sobrepresión	Sin riesgo	Estabilización total del arranque.
N-6	840,51	30,05	0	significativa	Sin riesgo	Amortiguación completa.
N-9	843,17	28,12	0	significativa	Sin riesgo	Eliminación de cavitación.
N-13	852,91	20,44	5	sustancial	Sin riesgo	Presiones dentro de rango seguro.
N-19	860,92	12,90	5	total	Sin riesgo	Condición estable.
N-21	861,00	12,38	5	total	Sin riesgo	Oscilación mínima.
N-31	863,03	9,25	5	total	Sin riesgo	Se elimina vacío hidráulico.
N-33	864,00	7,20	5	total	Sin riesgo	Estabilidad total del tramo alto.
N-39	866,92	4,33	5	total	Sin riesgo	Línea totalmente amortiguada.
N-40	867,00	3,38	5	total	Sin riesgo	Punto crítico completamente estabilizado.

#### 4.4. Evaluación comparativa de escenarios con dispositivos de protección

A partir de las simulaciones realizadas en Bentley HAMMER, se evaluaron tres configuraciones de protección ante transitorios hidráulicos:

- Escenario 1: Solo 2 válvulas de aire tri funcional.
- Escenario 2: Válvula anticipadora de onda + 2 válvulas de aire tri funcional.
- Escenario 3: Tanque hidroneumático + 2 válvulas de aire tri funcional.

**Tabla 6**

*Comportamiento de la presión máxima y mínima en los nodos críticos*

Nodo	Escenario 1 (Válvulas de aire) (Pmáx / Pmín)	Escenario 2 (Anticipadora + aire) (Pmáx / Pmín)	Escenario 3 (Tanque + aire) (Pmáx / Pmín)
	[m.c.a.]	[m.c.a.]	[m.c.a.]
N-1	74,1 / -0,5	72,0 / -0,1	37,1 / 25,5
N-6	68,3 / -3,8	62,9 / -4,3	31,6 / 21,2
N-9	62,5 / -7,6	58,0 / -7,2	28,6 / 18,9
N-13	46,0 / -9,9	43,0 / -9,9	18,3 / 9,7
N-19	38,2 / -9,8	35,4 / -9,6	9,8 / 2,5
(AV-1)			
N-21	38,1 / -9,9	35,3 / -9,7	9,5 / 2,3
(AV-2)			
N-33	34,2 / -10,0	30,8 / -9,9	8,2 / 0,5
N-40	28,7 / -9,9	25,9 / -9,7	6,5 / 0,2

El Escenario 1, que incorpora únicamente válvulas de aire tri función, mantiene subpresiones críticas cercanas a -10 m.c.a. en los nodos ubicados en mayor elevación (N-13, N-19, N-21, N-33 y N-40). Estos valores confirman la persistencia del riesgo de cavitación, así como la presencia de condiciones de vacío hidráulico en tramos altos de la impulsión.

En el Escenario 2, el uso de una válvula anticipadora combinada con válvulas de aire reduce parcialmente las sobrepresiones máximas (por ejemplo, N-1 pasa de 74,1 m.c.a. a 72,0 m.c.a.). Sin embargo, las subpresiones continúan alcanzando valores entre -9,6 y -9,9 m.c.a., lo que demuestra que la cavitación no es eliminada y que la línea aún experimenta oscilaciones severas durante el evento transitorio.

Finalmente, el Escenario 3, que incorpora un tanque hidroneumático junto con válvulas de aire, evidencia una mejora sustancial:

- Las sobrepresiones se reducen entre 50 % y 70 % respecto al escenario base (por ejemplo, de 74,1 m.c.a. a 37,1 m.c.a. en N-1).

- Las subpresiones negativas desaparecen por completo, manteniéndose todas las presiones dentro de rangos positivos, entre 0,2 y 25,5 m.c.a.
- Los nodos más críticos del sistema (N-19, N-21, N-33 y N-40) presentan presiones estabilizadas y libres de cavitación.

El análisis comparativo demuestra que la combinación tanque hidroneumático + válvulas de aire (Escenario 3) ofrece el mejor desempeño hidráulico, al amortiguar de manera eficiente las ondas de presión, reducir los extremos de presión y asegurar un régimen estable en toda la línea de impulsión.

#### **4.5. Discusión de resultados**

Los resultados obtenidos en el levantamiento topográfico y la caracterización de la línea de impulsión muestran que la información recopilada permite definir con precisión la geometría, la pendiente, las alturas, la longitud de la tubería y las características técnicas de la bomba y el motor, parámetros fundamentales para la modelación hidráulica transitoria. Estos hallazgos son consistentes con lo planteado por Muhammad (2020), quien señala que la exactitud de los modelos de transitorios depende de la calidad de los datos hidráulicos y de la correcta configuración del modelo. Asimismo, la caracterización detallada de los tramos, incluyendo el coeficiente de rugosidad y el caudal de diseño, respalda la confiabilidad de las simulaciones realizadas en Bentley HAMMER, tal como lo utilizan estudios previos a nivel internacional y nacional.

La simulación en Bentley HAMMER reveló zonas de sobrepresión cercanas a la bomba y zonas de subpresión en los tramos de mayor elevación, con presiones mínimas negativas de hasta -10 m.c.a. y formación de cavitación transitoria, especialmente entre los nodos N-19 y N-40. Estos resultados coinciden con los antecedentes de Apollonio (2016) y Ferreira et al. (2021), quienes indican que la presencia de aire atrapado y la topografía influyen directamente en la aparición de sobrepresiones y subpresiones en tuberías presurizadas.

Los escenarios evaluados mostraron que:

- Escenario 1 (solo válvulas de aire) redujo parcialmente las subpresiones, pero las zonas altas continuaron con presión negativa y riesgo de cavitación.
- Escenario 2 (válvula anticipadora + válvulas de aire) disminuyó de manera más uniforme las sobrepresiones, aunque persistieron subpresiones leves.
- Escenario 3 (tanque hidroneumático + válvulas de aire) estabilizó completamente las presiones, eliminando subpresiones y reduciendo sobrepresiones entre 50 % y 70 %.

Estos resultados concuerdan con Tang et al. (2024), quienes encontraron que la instalación de tanques de protección y válvulas de aire puede reducir las presiones máximas hasta en un 35 %. De manera complementaria, los antecedentes de Sandoval (2022) muestran que la implementación de válvulas de aire en cotas altas disminuye el riesgo de colapso estructural, reforzando la pertinencia de las medidas aplicadas en Rioja.

## CONCLUSIONES

La recopilación y sistematización de la información topográfica, hidráulica y operativa del sistema de impulsión permite definir con precisión las condiciones de modelación y los parámetros base para la simulación de los transitorios hidráulicos, garantizando la representatividad del modelo en Bentley HAMMER.

A partir de la simulación sin dispositivos de protección, se identifican puntos críticos de subpresión en los nodos ubicados en las zonas altas de la línea de impulsión (N-13, N-19, N-21 y N-40), alcanzando valores mínimos próximos a  $-10$  m.c.a., lo que evidencia condiciones de cavitación y riesgo estructural del conducto.

La implementación de válvulas de aire reduce parcialmente las fluctuaciones de presión, mientras que la incorporación de una válvula anticipadora de onda mejora la disipación de sobrepresiones, aunque no elimina totalmente los episodios de subpresión, especialmente en los tramos superiores de la conducción.

El escenario con tanque hidroneumático combinado con válvulas de aire presenta los mejores resultados hidráulicos, estabilizando las presiones dentro de márgenes operativos seguros (entre 37,1 y 18,9 m.c.a.) y eliminando el riesgo de cavitación, lo que demuestra su mayor eficiencia en la mitigación del golpe de ariete.

Se concluye que la modelación hidráulica constituye una herramienta esencial para el diagnóstico y optimización de sistemas de impulsión en zonas topográficamente irregulares, permitiendo determinar con fundamento técnico las soluciones más efectivas frente a transitorios hidráulicos y mejorar la confiabilidad del servicio de agua potable.

## RECOMENDACIONES

Implementar un sistema de protección contra transitorios hidráulicos basado en la instalación combinada de tanque hidroneumático y válvulas de aire, conforme al escenario 3 que fue el más eficiente determinado en la modelación, priorizando su ubicación en la descarga de la bomba y en los puntos altos del perfil longitudinal.

Realizar un monitoreo continuo de presiones en la línea de impulsión mediante sensores o registradores de presión, con el fin de validar en campo los resultados obtenidos en la simulación y detectar oportunamente eventos de golpe de ariete o cavitación.

Optimizar el mantenimiento preventivo de los componentes hidráulicos — particularmente de válvulas y accesorios— para garantizar su correcto funcionamiento durante eventos transitorios y reducir el riesgo de fallas estructurales o pérdidas de eficiencia en la conducción.

Desarrollar estudios complementarios de costo-beneficio que permitan comparar económicamente las distintas alternativas de mitigación (válvulas de aire, válvulas anticipadoras y tanques hidroneumáticos) para su aplicación práctica en sistemas similares de la región.

Promover la capacitación técnica del personal operativo en el manejo de softwares de modelación hidráulica como Bentley HAMMER, con el propósito de fortalecer las capacidades locales en la detección, análisis y prevención de transitorios hidráulicos.

Considerar la actualización periódica del modelo hidráulico conforme se realicen ampliaciones o rehabilitaciones en la red, de modo que se mantenga vigente la evaluación del comportamiento del sistema frente a nuevos escenarios operativos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apollonio, C. (2016). *Experimental and numerical analysis of hydraulic transients induced by air expulsion in pressurized pipelines* [Tesis doctoral, Politecnico di Bari]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3412.1689>
- Bentley Systems. (2012). *Bentley HAMMER CONNECT Edition: Water hammer and transient analysis*. Bentley Systems Incorporated. <https://www.bentley.com>
- Bragado, R. (2018). Bombas hidráulicas: Curvas características y aplicaciones. *Revista Ingeniería y Desarrollo Industrial*, 7(2), 45–53. <https://doi.org/10.20868/idi.2018.7.2>
- Castillo, J. A. (2023). *Análisis de transitorios hidráulicos en sistemas de bombeo de agua potable utilizando el software HAMMER* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/30300>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Golpe de ariete*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/conagua>
- Durán, M., & Torres, G. (2006). Transitorios hidráulicos y protección contra el golpe de ariete en sistemas de bombeo. *Ingeniería Hidráulica en México*, 21(2), 15–26.
- Ferreira, D., Buttarazzi, D., Ferras, D., & Covas, D. (2021). Experimental study of air pocket effects in hydraulic transients in pressurized pipelines. *Journal of Hydraulic Research*, 59(3), 355–368. <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1763201>
- Ferreira, D., Ramos, H., & Almeida, A. (2021). Air pocket effects in hydraulic transients: Numerical and experimental approaches. *Journal of Hydraulic Research*, 59(2), 234–247. <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1802010>
- García, J. (2019). Rotura en la línea de impulsión deja sin agua a varias localidades de Lanzarote. *La Voz de Lanzarote*. [https://www.lavozdelanzarote.com/actualidad/sociedad/rotura-linea-impulsion-deja-sin-agua-varias-localidades-lanzarote\\_2019.html](https://www.lavozdelanzarote.com/actualidad/sociedad/rotura-linea-impulsion-deja-sin-agua-varias-localidades-lanzarote_2019.html)
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Education. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las*

- rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.* McGraw-Hill Education.  
<https://doi.org/10.22201/FESC.20072236E.2019.10.18.6>
- Instituto Nacional de Capacitación Profesional (INACAP). (2020). *Fundamentos de hidráulica y mecánica de fluidos*. Área de Ingeniería. <https://www.inacap.cl>
- Jiang, D., Zeng, C., Lu, Q., & Guo, Q. (2024). Water hammer in pipelines based on different friction models. *Scientific Reports*, 14(1), 953.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-51409-9>
- Lauchlan, C., Stephens, M., & Van Zyl, J. (2005). Air pockets and their effects on hydraulic transients in pipelines. *Water Science and Technology: Water Supply*, 5(6), 45–52. <https://doi.org/10.2166/ws.2005.0071>
- Lauchlan, C., Van Zyl, J., & Simpson, A. (2005). Air valve sizing for pipelines subjected to column separation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(8), 690–698.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:8\(690\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:8(690))
- Mejía, R., & Taípe, H. (2021). *Influencia del diseño hidráulico en el comportamiento de las redes de impulsión ante transitorios hidráulicos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica].  
<https://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/2234>
- Muhammad, A. (2020). Review of hydraulic transient analysis in pressurized water systems: Modeling and control. *Nigerian Journal of Engineering*, 27(2), 45–58.  
<https://doi.org/10.4314/nje.v27i2.7>
- Muhammad, A. B., Nasir, A., Ayo, S. A., & Bori, I. (2019). Hydraulic transient analysis in fluid pipeline: A review. *Journal of Science Technology and Education*, 7(4).  
<http://irepo.futminna.edu.ng:8080/jspui/handle/123456789/17911>
- Pinedo, J. (2022). *Análisis técnico del sistema de impulsión del distrito de Soritor y evaluación de fallas por transitorios hidráulicos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio Institucional UNSM.  
<https://repositorio.unsm.edu.pe/>
- Ramírez, E. (2022). *Análisis de golpe de ariete en líneas de impulsión rurales aplicando modelación hidráulica en HAMMER* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/4521>
- Rodríguez, J. (2001). *Ingeniería sanitaria: Abastecimiento de agua potable y alcantarillado sanitario* (3.<sup>a</sup> ed.). Editorial Limusa.

- Sandoval, C. (2022). *Evaluación de variaciones hidráulicas en líneas de impulsión de agua potable del distrito de Morales, región San Martín* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín]. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/4960>
- SEDAM Huancayo S. A. (2018). *Informe técnico: Evaluación del evento de sobrepresión en la línea de conducción Chamisería–Vilcacoto*. Archivo técnico interno.
- SEDAPAL. (2014). *Reporte de emergencia por ruptura de tubería en Av. Elías Aparicio, distrito de Lince*. Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima.
- Tang, X., Cheng, Y., Shen, J., Wu, Z., Zhang, L., Li, S., & Yuan, Z. (2024). Assessment of surge protection programs in long water supply systems. *Water Supply*, 24(1), 135–147. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.012>
- Terence, F. (1999). *Hidráulica general y aplicada* (2.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Trapote, A. (2014). *Infraestructuras hidráulico-sanitarias I. Abastecimiento y distribución de agua* (2<sup>a</sup> Ed.). España: Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- UNESCO & Organización Mundial de la Salud. (2003). *Agua para las personas, agua para la vida: Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000129573>
- Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. (2011). *Manual de máquinas hidráulicas: Bombas y turbinas*. Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Wylie, E. B., & Streeter, V. L. (2017). *Fluid transients in systems*. Dover Publications.

## ANEXOS

### Anexo 1. Solicitud de permiso y entrega de información de la línea de impulsión por parte de la EPS RIOJA S.A.



“AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO”

SOLICITA: INFORMACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE LA LINEA DE IMPULSION DE AGUA POTABLE, TRAMO CISTERNA 500 M3 – RESERVORIO DE 1000 m3 y 1200 m3.

**Ing. Marco Antonio Ramírez Pérez**  
Gerente General- EPS rioja S.A

Yo Roiser Bustamante Sánchez, identificado con DNI N° 72762130 domiciliado en el JR: MANUEL DEL AGUILA C - 01 N° 185 MOYOBAMBA - SAN MARTÍN, ante UD. Con el debido respeto me presento y expongo lo siguiente:

Que en el marco de la ejecución de mi tesis denominada “Ocurrencia de transitorios hidráulicos apoyado en la modelación hidráulica, de una línea de impulsión de agua potable, provincia de Rioja, 2022” con resolución N° 131-2022-UNSM/CFT/FE, asesorado por el Lic. Dr. Fabián Centurión Tapia con DNI N° 05315301; y, por motivo de requerir información para la respectiva ejecución de mi tesis solicito a usted me brinde las facilidades requeridas, solicitando la siguiente información:

- ✓ Tipo de tubería y diámetro utilizado en la línea de impulsión tramo cisterna 500m3-reservorios 1000 m3 y 1200 m3.
- ✓ Caudal que transporta la tubería de impulsión de agua, tramo cisterna 500m3-reservorios 1000 m3 y 1200 m3.
- ✓ Nombre y tipo de bombas de impulsión.
- ✓ Ficha técnica de las bombas de impulsión.
- ✓ Planos hidráulicos, arquitectónicos y estructurales del sistema de impulsión desde la cisterna 500 m3 a reservorios 1000m3 y 1200m3. (los archivos en extensión DWG AUTOCAT).
- ✓ Topografía y curvas de nivel si lo tuvieran actualizada. (los archivos en extensión DWG AUTOCAT).

Esperando contar con la atención a este documento y agradeciéndole por anticipado, me suscribo a usted.

Moyobamba, 03 de octubre del 2023.

*[Handwritten signature]*

Roiser Bustamante Sánchez  
DNI N° 72762130  
correo: [roiser-san@gmail.com](mailto:roiser-san@gmail.com)  
cel.: 925013931



*[Handwritten signature]*  
Evaluador



Rioja, 05 de octubre del 2023

**CARTA N° 265 - 2023-GG/EPS RIOJA S.A.**

Señor  
**ROISER BUSTAMANTE SÁNCHEZ**  
Moyobamba.-

Asunto **Sobre información referente al sistema de la línea de impulsión de agua potable, tramo cisterna 500 m3 – Reservorio de 1000 m3 y 1200 m3**  
Ref. Solicitud del 03-10-2023  
INFORME N° 127-GOP-2023-EPS RIOJA S.A.

De mi consideración:

Me dirijo a usted, para saludarle cordialmente y en atención a solicitud de la referencia, información referente al sistema de la línea de impulsión de agua potable, tramo cisterna 500 m3 – Reservorio de 1000 m3 y 1200 m3, para la ejecución de su tesis denominada "Ocurrencia de Transitorios hidráulicos apoyado en la modelación hidráulica, de una línea de impulsión de agua potable, Provincia de Rioja – 2022", según informe de nuestra Gerencia de Operaciones.

Sin otro particular, expreso a usted mi consideración y estima.

Atentamente,

  
EMPRESA PRESTADORA  
DE SERVICIOS RIOJA S.A.  
Ing. Marco Antonio Romerez Perez  
GERENTE GENERAL

MARP/mgv  
c.c. Archivo  
Reg. N° 936

"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

**INFORME N° 127-GOP-2023-EPS-RIOJA S.A.**

AL : Ing. Marco Antonio Ramírez Pérez  
 GERENTE GENERAL-EPS RIOJA S.A.

DEL : Ing. Luis Jeiler Idrogo Mejía  
 GERENTE DE OPERACIONES - EPS RIOJA S.A.

ASUNTO : REMITIR INFORMACIÓN REFERENTE AL COMPONENTE DE LA LÍNEA DE  
 IMPULSIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE.

FECHA : Rioja, 5 de octubre del 2023.

Mediante el presente, me dirijo a usted, con la finalidad de expresarle mi cordial saludo, y a la vez brindar la información de acuerdo al documento de referencia; detallando de la siguiente manera:

✓ **Tipo de tubería y diámetro de la línea de impulsión.**

Tramo de línea	Diámetro (milímetros)	Longitud (mL)	Tipo de tubería
<b>Línea de Conducción (por Gravedad):</b> De captación Río Negro a Cisterna de 500 m <sup>3</sup>	560	15,600	HDPE
<b>Línea de impulsión (por Bombeo):</b> De Cisterna de 500 m <sup>3</sup> a Reservorio de 1200 m <sup>3</sup>	400	645	PVC
<b>Total</b>		16,245	



✓ **Caudal que transporta la tubería de la línea de impulsión.**

Q=72 l/s

✓ **Planos hidráulicos, topográficos, arquitectónicos y estructurales del componente de impulsión desde la cisterna hasta el reservorio.**

Los planos solicitados se encuentran en el siguiente enlace:

[https://drive.google.com/drive/folders/1wUOn8HUdkq04RM57a-4X9rGGRx69zBNZ?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1wUOn8HUdkq04RM57a-4X9rGGRx69zBNZ?usp=drive_link)

Los documentos que están en el enlace son archivos DWG, así mismo se ha enviado la información al correo del documento de referencia.

Con respecto a la ficha técnica de las bombas de impulsión, no se cuenta con esa información ya que el ejecutor de esta obra no nos ha brindado la documentación post ejecución, donde se encuentran la información definitiva con todas sus modificaciones que se realizaron en el momento de la ejecución.



GERENCIA DE OPERACIONES

de acuerdo a la información solicitada, se esta brindando los documentos pertinentes con la cual dispone la EPS RIOJA S.A., de esta manera facilitar al tesista Roiser Bustamante Sánchez a continuar con la ejecución de su proyecto "Ocurrencia de transitorios hidráulicos apoyado en la modelación hidráulica, de una línea de impulsión de agua potable, provincia de Rioja, 2022".

Es cuanto informo a Usted, se recomienda brindar la información al solicitante para que continúe con sus trámites pertinentes; sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente,

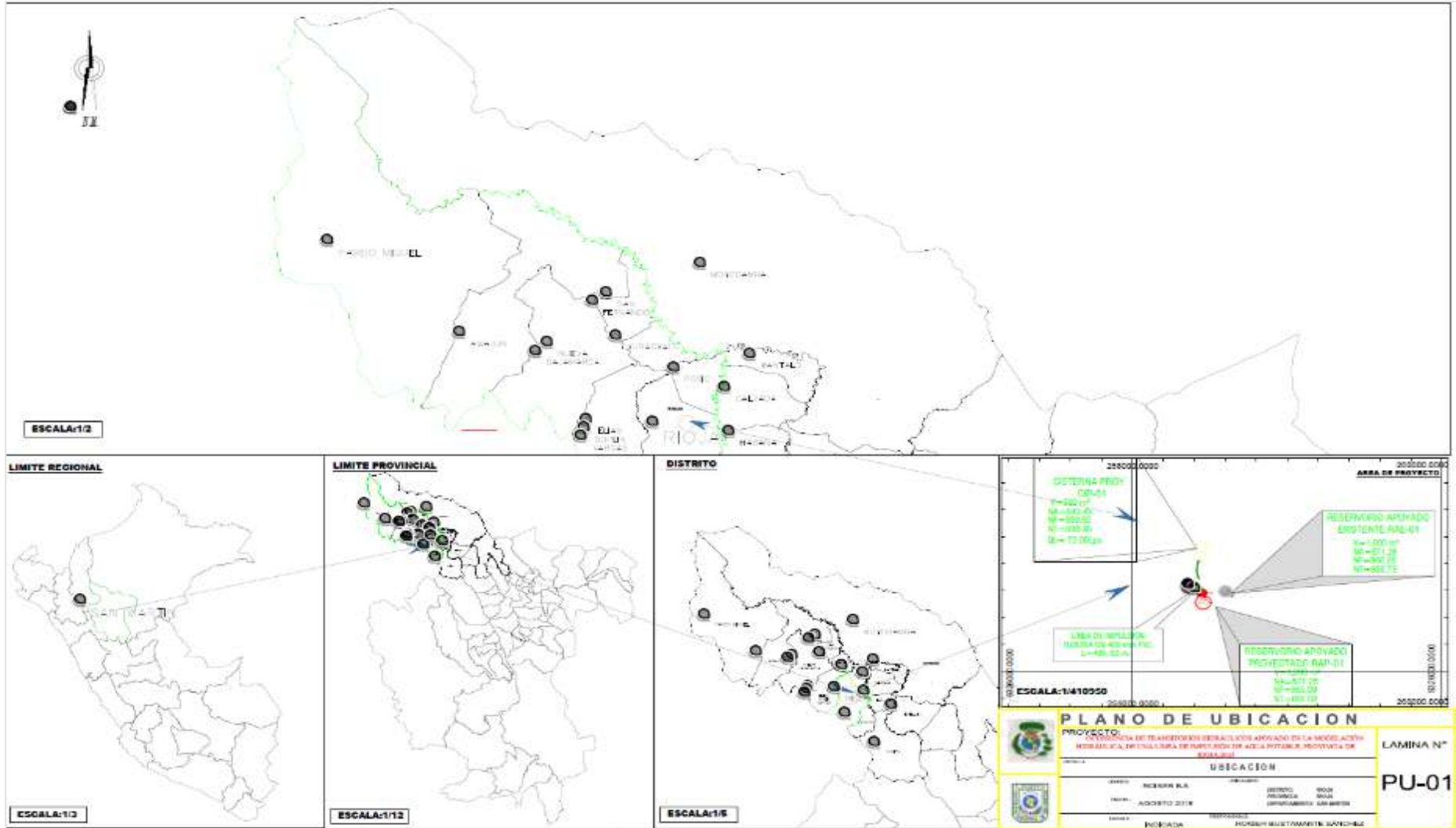


EMPRESA PRESTADORA  
DE SERVICIOS RIOJA S.A.  
.....  
Ing. Luis Javier Urzogo Mejía  
GERENTE DE OPERACIONES



*Revisar la separación  
al administrador*

Anexo 2: Plano de ubicación



### Anexo 3: Reporte de resultados de los escenarios evaluados

Sin dispositivo de protección									
Label	X (m)	Y (m)	Elevation (m)	Pressure (m H2O)	Pressure (Maximum, Transient) (m H2O)	Pressure (Minimum, Transient) (m H2O)	Pressure (Maximum) (m H2O)	Pressure (Minimum) (m H2O)	Vapor Volume (Maximum, Transient) (L)
N-1	258362,8	9327024,1	835,5	31,8	72,0	-0,1	31,8	31,8	0,0
N-2	258360,2	9327017,3	836,7	30,6	69,4	-1,2	30,6	30,6	0,0
N-3	258357,7	9327011,0	837,7	29,6	67,8	-1,6	29,6	29,6	0,0
N-4	258353,8	9327002,0	838,6	28,7	66,2	-2,4	28,7	28,7	0,0
N-5	258350,0	9326992,8	838,8	28,5	65,1	-2,6	28,5	28,5	0,0
N-6	258346,1	9326983,5	840,5	26,8	62,9	-4,3	26,8	26,8	0,0
N-7	258342,2	9326974,3	842,0	25,2	61,0	-6,0	25,2	25,2	0,0
N-8	258338,3	9326965,1	842,4	24,9	59,4	-6,2	24,9	24,9	0,0
N-9	258334,5	9326955,9	843,2	24,1	58,0	-7,2	24,1	24,1	0,0
N-10	258330,6	9326946,7	846,7	20,6	53,1	-10,0	20,6	20,6	0,0
N-11	258326,7	9326937,4	848,4	18,9	50,2	-10,0	18,9	18,9	0,0
N-12	258322,8	9326928,2	849,0	18,2	47,7	-9,7	18,2	18,2	0,0
N-13	258319,0	9326919,0	852,9	14,3	43,0	-10,0	14,3	14,3	0,0
N-14	258315,1	9326909,8	854,8	12,5	39,8	-10,0	12,5	12,5	0,0
N-15	258311,2	9326900,6	855,7	11,6	38,7	-10,0	11,6	11,6	0,0
N-16	258307,3	9326891,3	856,6	10,6	37,3	-10,0	10,6	10,6	0,0
N-17	258303,7	9326882,0	857,5	9,7	37,0	-10,0	9,7	9,7	0,0
N-18	258300,8	9326872,5	858,9	8,3	36,7	-10,0	8,3	8,3	0,0
N-19	258299,0	9326862,7	860,9	6,3	34,9	-10,0	6,3	6,3	23,0
N-20	258298,2	9326852,8	860,4	6,8	35,9	-10,0	6,8	6,8	0,0
N-21	258298,4	9326842,7	861,0	6,2	35,2	-10,0	6,2	6,2	2,0

N-22	258299,3	9326,832,8	861,0	6,2	34,6	-10,0	6,2	6,2	0,0
N-23	258300,4	9326,822,8	861,0	6,2	34,6	-10,0	6,2	6,2	0,0
N-24	258301,2	9326,812,9	861,0	6,2	34,4	-10,0	6,2	6,2	0,0
N-25	258301,2	9326,802,9	861,0	6,1	32,4	-10,0	6,1	6,1	0,0
N-26	258299,9	9326,793,0	861,0	6,1	34,4	-10,0	6,1	6,1	0,0
N-27	258298,1	9326,783,2	861,1	6,0	32,1	-10,0	6,0	6,0	0,0
N-28	258295,8	9326,773,4	861,8	5,3	31,5	-10,0	5,3	5,3	0,0
N-29	258293,6	9326,763,7	862,2	4,9	28,6	-10,0	4,9	4,9	0,0
N-30	258291,4	9326,753,9	862,5	4,6	27,8	-10,0	4,6	4,6	0,0
N-31	258289,1	9326,744,2	863,0	4,1	27,3	-10,0	4,1	4,1	1,0
N-32	258286,9	9326,734,4	863,0	4,0	27,4	-10,0	4,0	4,0	0,0
N-33	258284,7	9326,724,7	864,0	3,1	25,3	-10,0	3,1	3,1	1,0
N-34	258282,4	9326,714,9	864,0	3,1	22,2	-10,0	3,1	3,1	0,0
N-35	258280,2	9326,705,2	864,7	2,4	20,5	-10,0	2,4	2,4	0,0
N-36	258278,0	9326,695,4	865,0	2,0	21,7	-10,0	2,0	2,0	0,0
N-37	258275,7	9326,685,7	865,8	1,2	21,6	-10,0	1,2	1,2	0,0
N-38	258273,5	9326,675,9	866,2	0,9	20,8	-10,0	0,9	0,9	0,0
N-39	258272,2	9326,670,3	866,9	0,1	22,3	-10,0	0,1	0,1	0,0
N-40	258270,0	9326,662,7	867,0	0,0	19,0	-10,0	0,0	0,0	0,0

**Con dispositivo de protección (2 válvulas de aire tri funcional)**

Label	X (m)	Y (m)	Elevation (m)	Pressure (m H2O)	Pressure (Maximum, Transient) (m H2O)	Pressure (Minimum, Transient) (m H2O)	Pressure (Maximum) (m H2O)	Pressure (Minimum) (m H2O)	Vapor Volume (Maximum, Transient) (L)
N-1	258362,8	9327024,1	835,5	31,8	69,6	-10,0	31,8	31,8	0,0
N-2	258360,2	9327017,3	836,7	30,6	66,8	-3,9	30,6	30,6	0,0
N-3	258357,7	9327011,0	837,7	29,6	64,2	-2,4	29,6	29,6	0,0
N-4	258353,8	9327002,0	838,6	28,7	63,0	-6,6	28,7	28,7	0,0

N-5	258350,0	9326992,8	838,8	28,5	63,4	1,0	28,5	28,5	0,0
N-6	258346,1	9326983,5	840,5	26,8	60,7	-2,5	26,8	26,8	0,0
N-7	258342,2	9326974,3	842,0	25,2	59,7	-3,0	25,2	25,2	0,0
N-8	258338,3	9326965,1	842,4	24,9	59,3	-5,6	24,9	24,9	0,0
N-9	258334,5	9326955,9	843,2	24,1	58,1	-7,9	24,1	24,1	0,0
N-10	258330,6	9326946,7	846,7	20,6	55,7	-10,0	20,6	20,6	0,0
N-11	258326,7	9326937,4	848,4	18,9	52,8	-10,0	18,9	18,9	0,0
N-12	258322,8	9326928,2	849,0	18,2	49,9	-10,0	18,2	18,2	0,0
N-13	258319,0	9326919,0	852,9	14,3	46,8	-10,0	14,3	14,3	0,0
N-14	258315,1	9326909,8	854,8	12,5	45,2	-10,0	12,5	12,5	0,0
N-15	258311,2	9326900,6	855,7	11,5	45,1	-10,0	11,5	11,5	0,0
N-16	258307,3	9326891,3	856,6	10,6	42,8	-10,0	10,6	10,6	0,0
N-17	258303,7	9326882,0	857,5	9,7	40,1	-10,0	9,7	9,7	0,0
N-18	258300,8	9326872,5	858,9	8,3	37,4	-10,0	8,3	8,3	0,0
N-20	258298,2	9326852,8	860,4	6,8	36,0	-10,0	6,8	6,8	0,0
N-21	258298,4	9326842,7	861,0	6,2	34,9	-10,0	6,2	6,2	0,0
N-22	258299,3	9326832,8	861,0	6,2	36,1	-10,0	6,2	6,2	0,0
N-23	258300,4	9326822,8	861,0	6,2	34,3	-10,0	6,2	6,2	0,0
N-24	258301,2	9326812,9	861,0	6,2	32,3	-10,0	6,2	6,2	0,0
N-25	258301,2	9326802,9	861,0	6,1	32,2	-10,0	6,1	6,1	0,0
N-26	258299,9	9326793,0	861,0	6,1	31,1	-10,0	6,1	6,1	0,0
N-27	258298,1	9326783,2	861,1	6,0	29,6	-10,0	6,0	6,0	0,0
N-28	258295,8	9326773,4	861,8	5,3	31,0	-10,0	5,3	5,3	0,0
N-29	258293,6	9326763,7	862,2	4,9	29,8	-10,0	4,9	4,9	0,0
N-30	258291,4	9326753,9	862,5	4,6	29,5	-10,0	4,6	4,6	0,0
N-31	258289,1	9326744,2	863,0	4,1	28,4	-10,0	4,1	4,1	0,0
N-32	258286,9	9326734,4	863,0	4,0	29,7	-10,0	4,0	4,0	0,0
N-33	258284,7	9326724,7	864,0	3,1	26,8	-10,0	3,1	3,1	0,0
N-34	258282,4	9326714,9	864,0	3,1	28,5	-10,0	3,1	3,1	0,0

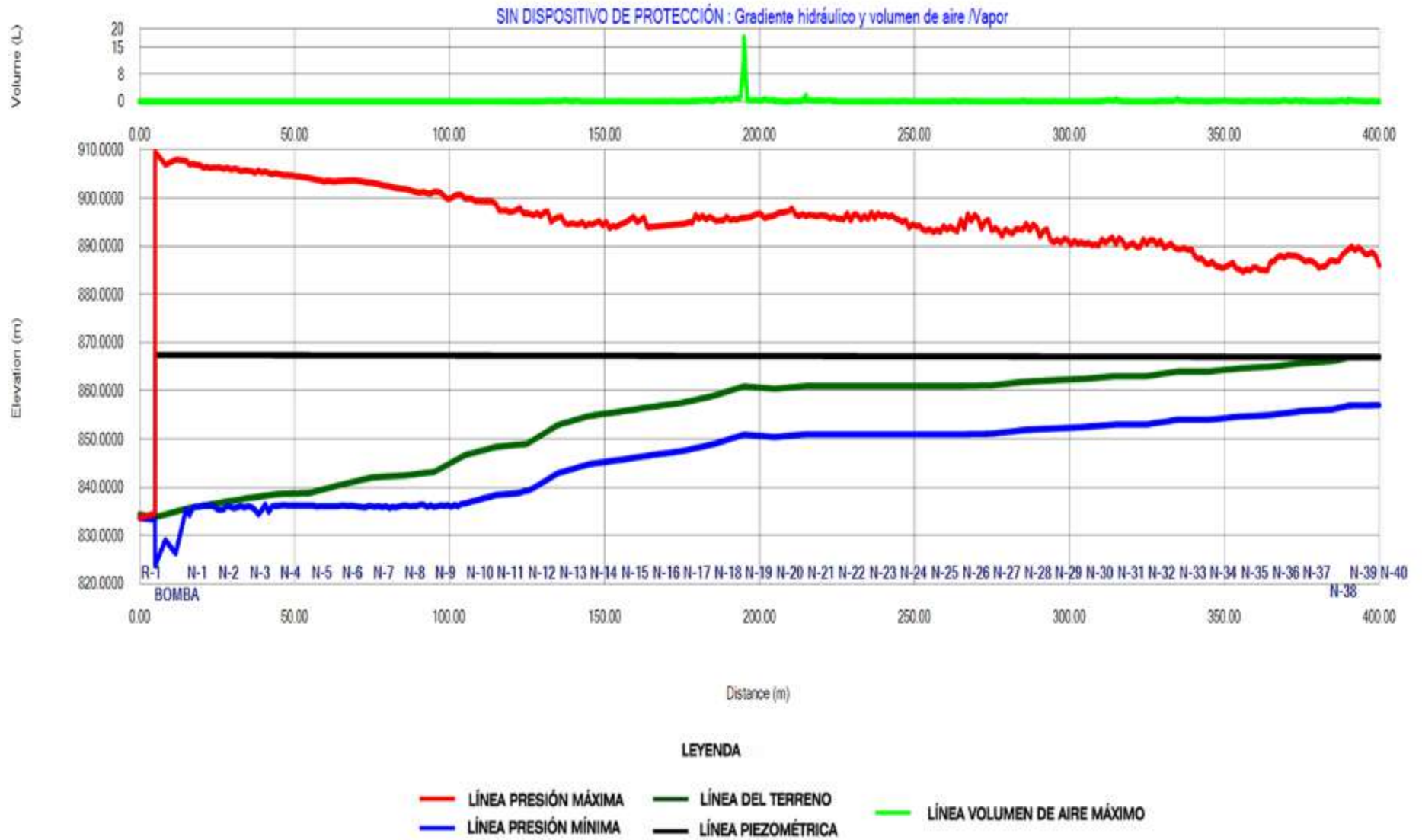
N-35	258280,2	9326705,2	864,7	2,4	26,1	-10,0	2,4	2,4	0,0
N-37	258275,7	9326685,7	865,8	1,2	26,8	-10,0	1,2	1,2	0,0
N-38	258273,5	9326675,9	866,2	0,9	26,5	-10,0	0,9	0,9	0,0
N-39	258272,2	9326670,3	866,9	0,1	23,4	-10,0	0,1	0,1	0,0
N-40	258270,0	9326662,7	867,0	0,0	21,0	-10,0	0,0	0,0	0,0

**Con dispositivo de protección (tanque hidroneumático más 2 válvulas de aire tri funcional)**

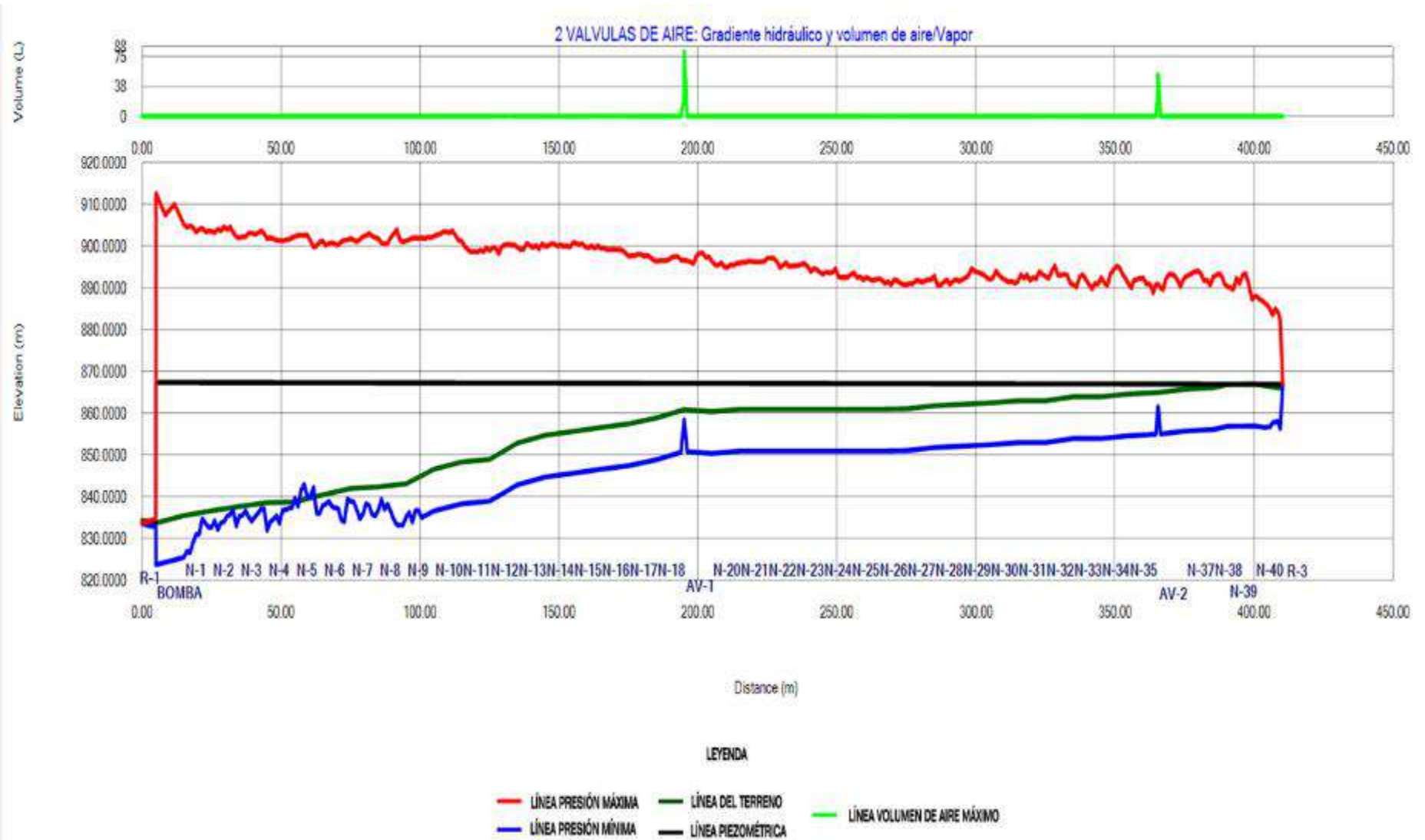
Label	X (m)	Y (m)	Elevation (m)	Pressure (m H2O)	Pressure (Maximum, Transient) (m H2O)	Pressure (Minimum, Transient) (m H2O)	Pressure (Maximum) (m H2O)	Pressure (Minimum) (m H2O)	Vapor Volume (Maximum, Transient) (L)
N-1	258362,8	9327024,1	835,5	31,8	37,1	25,5	31,8	31,8	0,0
N-3	258357,7	9327011,0	837,7	29,6	34,8	23,5	29,6	29,6	0,0
N-4	258353,8	9327002,0	838,6	28,7	33,8	22,8	28,7	28,7	0,0
N-5	258350,0	9326992,8	838,8	28,5	33,4	22,7	28,5	28,5	0,0
N-6	258346,1	9326983,5	840,5	26,8	31,6	21,2	26,8	26,8	0,0
N-7	258342,2	9326974,3	842,0	25,2	30,0	19,8	25,2	25,2	0,0
N-8	258338,3	9326965,1	842,4	24,9	29,5	19,5	24,9	24,9	0,0
N-9	258334,5	9326955,9	843,2	24,1	28,6	18,9	24,1	24,1	0,0
N-10	258330,6	9326946,7	846,7	20,6	25,0	15,5	20,6	20,6	0,0
N-11	258326,7	9326937,4	848,4	18,9	23,1	14,0	18,9	18,9	0,0
N-12	258322,8	9326928,2	849,0	18,2	22,4	13,5	18,2	18,2	0,0
N-13	258319,0	9326919,0	852,9	14,3	18,3	9,7	14,3	14,3	0,0
N-14	258315,1	9326909,8	854,8	12,5	16,3	7,9	12,5	12,5	0,0
N-15	258311,2	9326900,6	855,7	11,5	15,3	7,2	11,5	11,5	0,0
N-16	258307,3	9326891,3	856,6	10,6	14,2	6,3	10,6	10,6	0,0
N-17	258303,7	9326882,0	857,5	9,7	13,2	5,6	9,7	9,7	0,0
N-18	258300,8	9326872,5	858,9	8,3	11,7	4,3	8,3	8,3	0,0

N-20	258298,2	9326852,8	860,4	6,8	9,8	3,1	6,8	6,8	0,0
N-21	258298,4	9326842,7	861,0	6,2	9,1	2,7	6,2	6,2	0,0
N-22	258299,3	9326832,8	861,0	6,2	9,0	2,9	6,2	6,2	0,0
N-23	258300,4	9326822,8	861,0	6,2	8,9	2,9	6,2	6,2	0,0
N-24	258301,2	9326812,9	861,0	6,2	8,7	3,1	6,2	6,2	0,0
N-25	258301,2	9326802,9	861,0	6,1	8,5	3,2	6,1	6,1	0,0
N-26	258299,9	9326793,0	861,0	6,1	8,4	3,4	6,1	6,1	0,0
N-27	258298,1	9326783,2	861,1	6,0	8,1	3,4	6,0	6,0	0,0
N-28	258295,8	9326773,4	861,8	5,3	7,2	2,9	5,3	5,3	0,0
N-29	258293,6	9326763,7	862,2	4,9	6,7	2,6	4,9	4,9	0,0
N-30	258291,4	9326753,9	862,5	4,6	6,2	2,5	4,6	4,6	0,0
N-31	258289,1	9326744,2	863,0	4,1	5,6	2,1	4,1	4,1	0,0
N-32	258286,9	9326734,4	863,0	4,0	5,4	2,3	4,0	4,0	0,0
N-33	258284,7	9326724,7	864,0	3,1	4,3	1,5	3,1	3,1	0,0
N-34	258282,4	9326714,9	864,0	3,1	4,1	1,6	3,1	3,1	0,0
N-35	258280,2	9326705,2	864,7	2,4	3,3	1,1	2,4	2,4	0,0
N-37	258275,7	9326685,7	865,8	1,2	1,8	0,4	1,2	1,2	0,0
N-38	258273,5	9326675,9	866,2	0,9	1,3	0,2	0,9	0,9	0,0
N-39	258272,2	9326,670,3	866,9	0,1	0,5	-0,4	0,1	0,1	0,0
N-40	258270,0	9326,662,7	867,0	0,0	0,2	-0,2	0,0	0,0	0,0

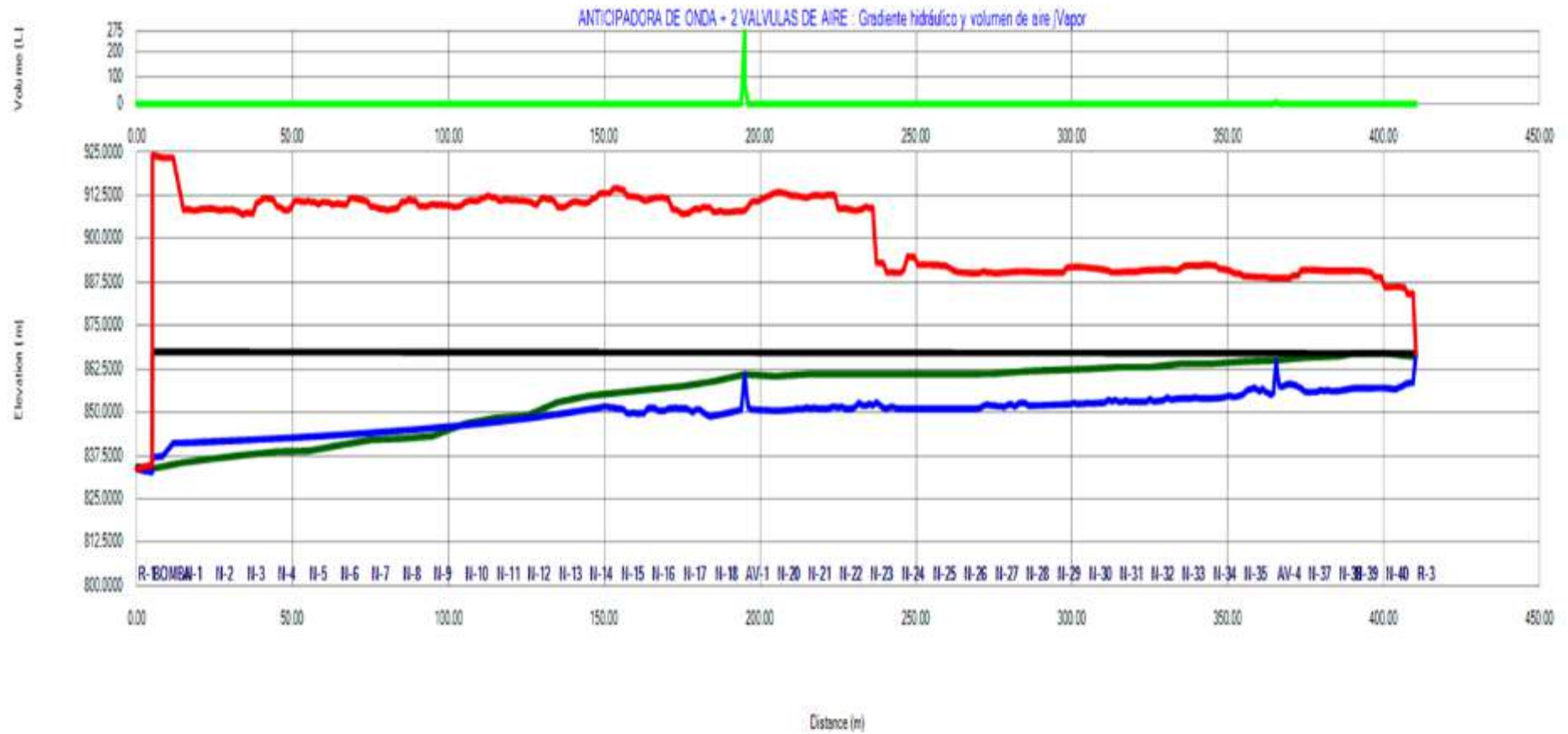
Anexo 4: Perfil generado del software Bentley hammer sin dispositivo de protección



Anexo 5: Perfil generado desde software Bentley hammer con dispositivo de protección (2 válvulas de aire trifuncionales)



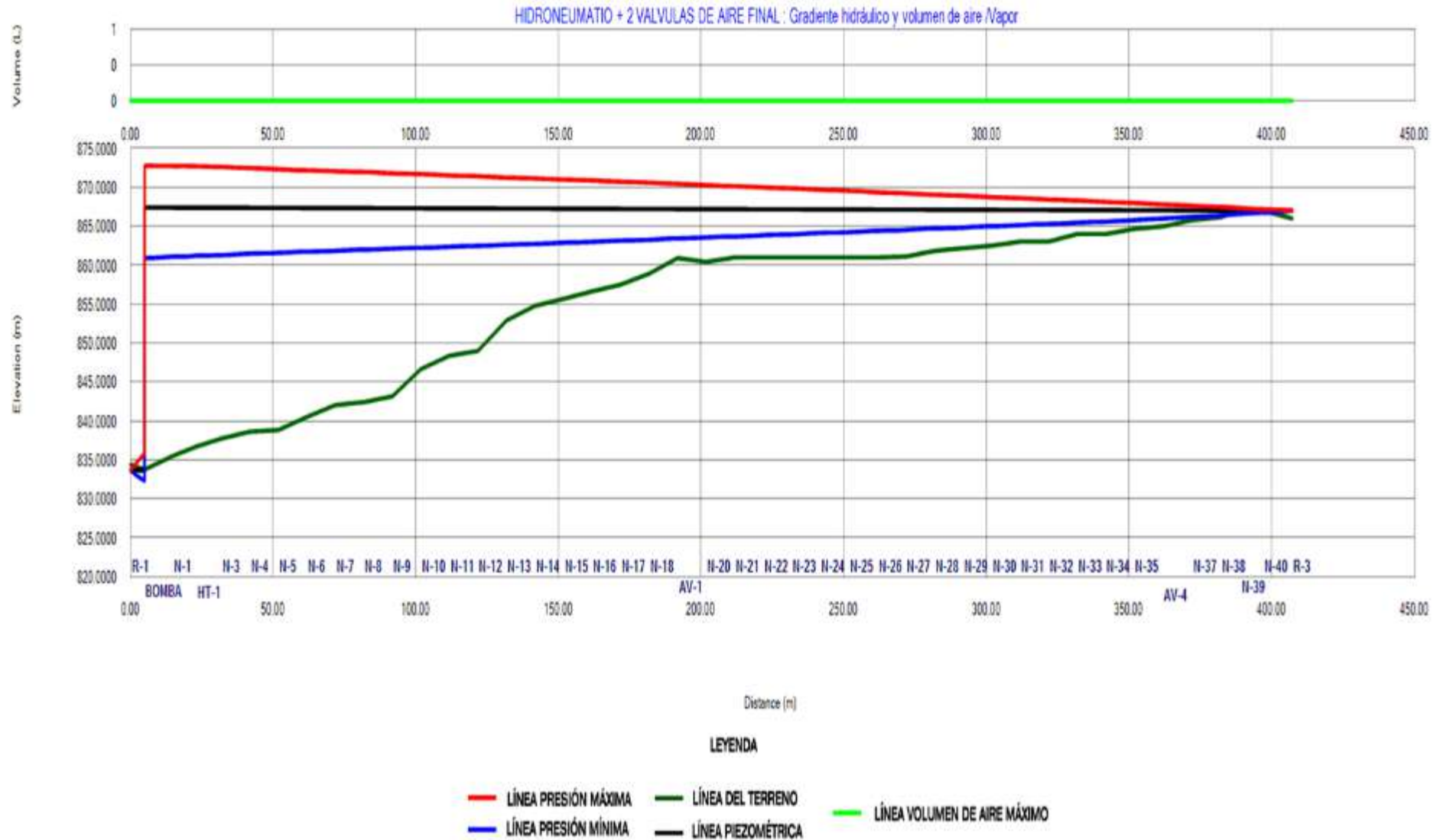
**Anexo 6: Perfil generado desde software Bentley hammer con dispositivo de protección (VALVULA ANTICIPADORA DE ONDA + 2 válvulas de aire trifuncionales)**



**LEYENDA**

- |                                                          |                                                         |                                                                  |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <span style="color: red;">—</span> LÍNEA PRESIÓN MÁXIMA  | <span style="color: green;">—</span> LÍNEA DEL TERRENO  | <span style="color: cyan;">—</span> LÍNEA VOLUMEN DE AIRE MÁXIMO |
| <span style="color: blue;">—</span> LÍNEA PRESIÓN MÍNIMA | <span style="color: black;">—</span> LÍNEA PIEZOMÉTRICA |                                                                  |

**Anexo 7: Perfil generado desde software Bentley hammer con dispositivo de protección (TANQUE HIDRONEUMATICO + 2 válvulas de aire trifuncionales)**



### Anexo 8: Área de estudio data topográfica

Punto	Data topográfica			Descripción
	Norte	Este	Cota	
1	9326661,26	258247,15	866,59	TN
2	9326671,26	258247,15	866,01	TN
3	9326681,26	258247,15	866,41	TN
4	9326691,26	258247,15	865,50	TN
5	9326631,26	258257,15	866,96	TN
6	9326641,26	258257,15	866,48	TN
7	9326651,26	258257,15	866,12	TN
8	9326661,26	258257,15	867,00	TN
9	9326671,26	258257,15	867,00	TN
10	9326681,26	258257,15	866,25	TN
11	9326691,26	258257,15	865,19	TN
12	9326701,26	258257,15	864,27	TN
13	9326711,26	258257,15	863,48	TN
14	9326721,26	258257,15	863,66	TN
15	9326621,26	258267,15	866,49	RAP
16	9326631,26	258267,15	866,07	TN
17	9326641,26	258267,15	867,00	TN
18	9326651,26	258267,15	867,00	TN
19	9326661,26	258267,15	867,00	TN
20	9326671,26	258267,15	867,00	TN
21	9326681,26	258267,15	865,99	TN
22	9326691,26	258267,15	865,39	TN
23	9326701,26	258267,15	864,85	TN
24	9326711,26	258267,15	863,99	TN
25	9326721,26	258267,15	863,20	TN
26	9326731,26	258267,15	862,40	TN
27	9326741,26	258267,15	862,19	TN
28	9326751,26	258267,15	861,90	TN
29	9326761,26	258267,15	861,65	TN
30	9326621,26	258277,15	866,28	TN
31	9326631,26	258277,15	866,88	TN
32	9326641,26	258277,15	867,00	TN
33	9326651,26	258277,15	867,00	TN
34	9326661,26	258277,15	867,00	TN
35	9326671,26	258277,15	866,00	TN
36	9326681,26	258277,15	866,00	TN
37	9326691,26	258277,15	865,63	TN
38	9326701,26	258277,15	865,01	TN
39	9326711,26	258277,15	864,70	TN
40	9326721,26	258277,15	864,05	TN

---

41	9326731,26	258277,15	863,12	TN
42	9326741,26	258277,15	862,58	TN
43	9326751,26	258277,15	862,16	TN
44	9326761,26	258277,15	861,74	TN
45	9326771,26	258277,15	861,30	TN
46	9326781,26	258277,15	860,88	TN
47	9326791,26	258277,15	860,49	TN
48	9326801,26	258277,15	860,10	TN
49	9326811,26	258277,15	859,63	TN
50	9326631,26	258287,15	866,09	TN
51	9326641,26	258287,15	866,26	TN
52	9326651,26	258287,15	867,00	TN
53	9326661,26	258287,15	866,28	TN
54	9326671,26	258287,15	865,78	TN
55	9326681,26	258287,15	865,80	TN
56	9326691,26	258287,15	865,00	TN
57	9326701,26	258287,15	864,43	TN
58	9326711,26	258287,15	863,89	TN
59	9326721,26	258287,15	864,02	TN
60	9326731,26	258287,15	863,51	TN
61	9326741,26	258287,15	863,33	TN
62	9326751,26	258287,15	862,98	TN
63	9326761,26	258287,15	862,74	TN
64	9326771,26	258287,15	862,35	TN
65	9326781,26	258287,15	861,76	TN
66	9326791,26	258287,15	861,41	TN
67	9326801,26	258287,15	861,05	TN
68	9326811,26	258287,15	860,69	TN
69	9326821,26	258287,15	860,27	TN
70	9326831,26	258287,15	859,69	TN
71	9326841,26	258287,15	859,26	TN
72	9326851,26	258287,15	858,25	TN
73	9326861,26	258287,15	856,36	TN
74	9326641,26	258297,15	865,66	TN
75	9326651,26	258297,15	865,84	TN
76	9326661,26	258297,15	866,18	TN
77	9326671,26	258297,15	865,48	TN
78	9326681,26	258297,15	864,93	TN
79	9326691,26	258297,15	864,41	TN
80	9326701,26	258297,15	863,93	TN
81	9326711,26	258297,15	863,72	TN
82	9326721,26	258297,15	863,29	TN
83	9326731,26	258297,15	862,75	TN
84	9326741,26	258297,15	862,69	TN

---

---

85	9326751,26	258297,15	862,58	TN
86	9326761,26	258297,15	861,94	TN
87	9326771,26	258297,15	861,93	TN
88	9326781,26	258297,15	861,32	TN
89	9326791,26	258297,15	861,29	TN
90	9326801,26	258297,15	861,17	TN
91	9326811,26	258297,15	861,57	TN
92	9326821,26	258297,15	861,36	TN
93	9326831,26	258297,15	861,04	TN
94	9326841,26	258297,15	860,60	TN
95	9326851,26	258297,15	860,17	TN
96	9326861,26	258297,15	859,54	TN
97	9326871,26	258297,15	858,07	TN
98	9326881,26	258297,15	856,62	TN
99	9326891,26	258297,15	855,19	TN
100	9326901,26	258297,15	853,56	TN
101	9326911,26	258297,15	851,93	TN
102	9326671,26	258307,15	864,82	TN
103	9326681,26	258307,15	864,59	TN
104	9326691,26	258307,15	864,23	TN
105	9326701,26	258307,15	863,77	TN
106	9326711,26	258307,15	863,41	TN
107	9326721,26	258307,15	863,10	TN
108	9326731,26	258307,15	862,76	TN
109	9326741,26	258307,15	862,45	TN
110	9326751,26	258307,15	862,12	TN
111	9326761,26	258307,15	861,81	TN
112	9326771,26	258307,15	861,48	TN
113	9326781,26	258307,15	861,26	TN
114	9326791,26	258307,15	860,79	TN
115	9326801,26	258307,15	860,57	TN
116	9326811,26	258307,15	860,77	TN
117	9326821,26	258307,15	861,00	TN
118	9326831,26	258307,15	860,99	TN
119	9326841,26	258307,15	860,99	TN
120	9326851,26	258307,15	860,98	TN
121	9326861,26	258307,15	860,76	TN
122	9326871,26	258307,15	859,27	TN
123	9326881,26	258307,15	857,78	TN
124	9326891,26	258307,15	856,31	TN
125	9326901,26	258307,15	854,82	TN
126	9326911,26	258307,15	853,21	TN
127	9326921,26	258307,15	850,98	TN
128	9326931,26	258307,15	848,83	TN

---

---

129	9326941,26	258307,15	847,25	TN
130	9326711,26	258317,15	863,40	TN
131	9326721,26	258317,15	863,03	TN
132	9326731,26	258317,15	862,67	TN
133	9326741,26	258317,15	862,32	TN
134	9326751,26	258317,15	862,00	TN
135	9326761,26	258317,15	861,69	TN
136	9326771,26	258317,15	861,37	TN
137	9326781,26	258317,15	861,05	TN
138	9326791,26	258317,15	860,71	TN
139	9326801,26	258317,15	860,36	TN
140	9326811,26	258317,15	859,99	TN
141	9326821,26	258317,15	859,98	TN
142	9326831,26	258317,15	860,23	TN
143	9326841,26	258317,15	860,43	TN
144	9326851,26	258317,15	860,42	TN
145	9326861,26	258317,15	860,79	TN
146	9326871,26	258317,15	859,89	TN
147	9326881,26	258317,15	858,46	TN
148	9326891,26	258317,15	856,99	TN
149	9326901,26	258317,15	855,55	TN
150	9326911,26	258317,15	853,69	TN
151	9326921,26	258317,15	850,93	TN
152	9326931,26	258317,15	849,03	TN
153	9326941,26	258317,15	847,14	TN
154	9326951,26	258317,15	845,12	TN
155	9326961,26	258317,15	843,42	TN
156	9326971,26	258317,15	842,89	TN
157	9326981,26	258317,15	842,23	TN
158	9326741,26	258327,15	862,31	TN
159	9326751,26	258327,15	861,94	TN
160	9326761,26	258327,15	861,58	TN
161	9326771,26	258327,15	861,25	TN
162	9326781,26	258327,15	860,93	TN
163	9326791,26	258327,15	860,61	TN
164	9326801,26	258327,15	860,29	TN
165	9326811,26	258327,15	859,98	TN
166	9326821,26	258327,15	859,61	TN
167	9326831,26	258327,15	859,38	TN
168	9326841,26	258327,15	859,54	TN
169	9326851,26	258327,15	859,84	TN
170	9326861,26	258327,15	860,26	TN
171	9326871,26	258327,15	860,33	TN
172	9326881,26	258327,15	858,40	TN

---

---

173	9326891,26	258327,15	856,77	TN
174	9326901,26	258327,15	855,60	TN
175	9326911,26	258327,15	854,28	TN
176	9326921,26	258327,15	851,13	TN
177	9326931,26	258327,15	848,18	TN
178	9326941,26	258327,15	845,89	TN
179	9326951,26	258327,15	843,96	TN
180	9326961,26	258327,15	842,79	TN
181	9326971,26	258327,15	842,02	TN
182	9326981,26	258327,15	840,91	TN
183	9326991,26	258327,15	839,98	TN
184	9327001,26	258327,15	839,24	TN
185	9327011,26	258327,15	838,37	TN
186	9327021,26	258327,15	837,57	TN
187	9327031,26	258327,15	836,76	TN
188	9327041,26	258327,15	835,96	TN
189	9327051,26	258327,15	835,19	TN
190	9326771,26	258337,15	861,22	TN
191	9326781,26	258337,15	860,86	TN
192	9326791,26	258337,15	860,50	TN
193	9326801,26	258337,15	860,17	TN
194	9326811,26	258337,15	859,85	TN
195	9326821,26	258337,15	859,54	TN
196	9326831,26	258337,15	859,22	TN
197	9326841,26	258337,15	858,84	TN
198	9326851,26	258337,15	858,82	TN
199	9326861,26	258337,15	859,10	TN
200	9326871,26	258337,15	859,53	TN
201	9326881,26	258337,15	859,43	TN
202	9326891,26	258337,15	857,51	TN
203	9326901,26	258337,15	855,52	TN
204	9326911,26	258337,15	853,49	TN
205	9326921,26	258337,15	851,33	TN
206	9326931,26	258337,15	850,21	TN
207	9326941,26	258337,15	846,77	TN
208	9326951,26	258337,15	843,34	TN
209	9326961,26	258337,15	842,35	TN
210	9326971,26	258337,15	841,58	TN
211	9326981,26	258337,15	840,81	TN
212	9326991,26	258337,15	839,74	TN
213	9327001,26	258337,15	838,53	TN
214	9327011,26	258337,15	837,14	TN
215	9327021,26	258337,15	836,05	TN
216	9327031,26	258337,15	835,20	TN

---

---

217	9327041,26	258337,15	834,35	TN
218	9327051,26	258337,15	834,00	TN
219	9327061,26	258337,15	834,00	TN
220	9326801,26	258347,15	860,13	TN
221	9326811,26	258347,15	859,77	TN
222	9326821,26	258347,15	859,41	TN
223	9326831,26	258347,15	859,09	TN
224	9326841,26	258347,15	858,77	TN
225	9326851,26	258347,15	858,44	TN
226	9326861,26	258347,15	858,16	TN
227	9326871,26	258347,15	858,41	TN
228	9326881,26	258347,15	858,77	TN
229	9326891,26	258347,15	858,53	TN
230	9326901,26	258347,15	856,72	TN
231	9326911,26	258347,15	854,80	TN
232	9326921,26	258347,15	852,55	TN
233	9326931,26	258347,15	850,04	TN
234	9326941,26	258347,15	847,51	TN
235	9326951,26	258347,15	845,71	TN
236	9326961,26	258347,15	842,89	TN
237	9326971,26	258347,15	841,06	TN
238	9326981,26	258347,15	840,35	TN
239	9326991,26	258347,15	839,58	TN
240	9327001,26	258347,15	838,51	TN
241	9327011,26	258347,15	837,37	TN
242	9327021,26	258347,15	836,08	TN
243	9327031,26	258347,15	834,53	TN
244	9327041,26	258347,15	834,00	TN
245	9327051,26	258347,15	834,00	TN
246	9327061,26	258347,15	834,00	TN
247	9327071,26	258347,15	834,00	TN
248	9326841,26	258357,15	858,68	TN
249	9326851,26	258357,15	858,34	TN
250	9326861,26	258357,15	858,02	TN
251	9326871,26	258357,15	857,67	TN
252	9326881,26	258357,15	857,74	TN
253	9326891,26	258357,15	857,99	TN
254	9326901,26	258357,15	857,63	TN
255	9326911,26	258357,15	855,96	TN
256	9326921,26	258357,15	854,03	TN
257	9326931,26	258357,15	851,79	TN
258	9326941,26	258357,15	849,25	TN
259	9326951,26	258357,15	846,73	TN
260	9326961,26	258357,15	844,21	TN

---

---

261	9326971,26	258357,15	841,69	TN
262	9326981,26	258357,15	839,38	TN
263	9326991,26	258357,15	839,10	TN
264	9327001,26	258357,15	838,50	TN
265	9327011,26	258357,15	837,77	TN
266	9327021,26	258357,15	836,30	TN
267	9327031,26	258357,15	834,67	TN
268	9327041,26	258357,15	834,00	TN
269	9327051,26	258357,15	834,00	TN
270	9327061,26	258357,15	834,00	TN
271	9327071,26	258357,15	834,00	TN
272	9326871,26	258367,15	857,59	TN
273	9326881,26	258367,15	857,26	TN
274	9326891,26	258367,15	856,93	CIS
275	9326901,26	258367,15	857,26	TN
276	9326911,26	258367,15	856,88	TN
277	9326921,26	258367,15	855,16	TN
278	9326931,26	258367,15	853,25	TN
279	9326941,26	258367,15	851,01	TN
280	9326951,26	258367,15	848,47	TN
281	9326961,26	258367,15	845,95	TN
282	9326971,26	258367,15	843,42	TN
283	9326981,26	258367,15	840,90	TN
284	9326991,26	258367,15	838,29	TN
285	9327001,26	258367,15	838,33	TN
286	9327011,26	258367,15	836,96	TN
287	9327021,26	258367,15	835,59	TN
288	9327031,26	258367,15	834,24	TN
289	9327041,26	258367,15	833,74	TN
290	9327051,26	258367,15	833,87	TN
291	9327061,26	258367,15	834,00	TN
292	9327071,26	258367,15	834,00	TN
293	9327081,26	258367,15	834,00	TN
294	9326891,26	258377,15	856,71	TN
295	9326901,26	258377,15	856,51	TN
296	9326911,26	258377,15	856,50	TN
297	9326921,26	258377,15	856,08	TN
298	9326931,26	258377,15	854,36	TN
299	9326941,26	258377,15	852,47	TN
300	9326951,26	258377,15	850,22	TN
301	9326961,26	258377,15	847,69	TN
302	9326971,26	258377,15	845,16	TN
303	9326981,26	258377,15	842,64	TN
304	9326991,26	258377,15	840,33	TN

---

---

305	9327001,26	258377,15	838,38	TN
306	9327011,26	258377,15	836,42	TN
307	9327021,26	258377,15	834,73	TN
308	9327031,26	258377,15	833,54	TN
309	9327041,26	258377,15	833,17	TN
310	9327051,26	258377,15	833,19	TN
311	9327061,26	258377,15	833,46	TN
312	9327071,26	258377,15	833,71	TN
313	9327081,26	258377,15	833,96	TN
314	9327091,26	258377,15	834,00	TN
315	9326911,26	258387,15	855,64	TN
316	9326921,26	258387,15	855,56	TN
317	9326931,26	258387,15	855,28	TN
318	9326941,26	258387,15	853,57	TN
319	9326951,26	258387,15	851,69	TN
320	9326961,26	258387,15	849,45	TN
321	9326971,26	258387,15	846,91	TN
322	9326981,26	258387,15	844,39	TN
323	9326991,26	258387,15	842,16	TN
324	9327001,26	258387,15	839,98	TN
325	9327011,26	258387,15	838,27	TN
326	9327021,26	258387,15	836,66	TN
327	9327031,26	258387,15	835,05	TN
328	9327041,26	258387,15	834,56	TN
329	9327051,26	258387,15	834,08	TN
330	9327061,26	258387,15	834,04	TN
331	9327071,26	258387,15	834,01	TN
332	9327081,26	258387,15	833,96	TN
333	9327091,26	258387,15	833,94	TN
334	9326941,26	258397,15	854,45	TN
335	9326951,26	258397,15	852,77	TN
336	9326961,26	258397,15	850,90	TN
337	9326971,26	258397,15	848,78	TN
338	9326981,26	258397,15	847,08	TN
339	9326991,26	258397,15	845,37	TN
340	9327001,26	258397,15	843,66	TN
341	9327011,26	258397,15	841,93	TN
342	9327021,26	258397,15	840,23	TN
343	9327031,26	258397,15	838,51	TN
344	9327041,26	258397,15	836,79	TN
345	9327051,26	258397,15	835,07	TN
346	9327061,26	258397,15	834,02	TN
347	9327071,26	258397,15	834,05	TN
348	9327081,26	258397,15	834,06	TN

---

---

349	9327091,26	258397,15	834,04	TN
350	9326951,26	258407,15	853,22	TN
351	9326961,26	258407,15	852,13	TN
352	9326971,26	258407,15	850,52	TN
353	9326981,26	258407,15	849,14	TN
354	9326991,26	258407,15	847,62	TN
355	9327001,26	258407,15	846,10	TN
356	9327011,26	258407,15	844,53	TN
357	9327021,26	258407,15	842,98	TN
358	9327031,26	258407,15	841,33	TN
359	9327041,26	258407,15	839,63	TN
360	9327051,26	258407,15	837,93	TN
361	9327061,26	258407,15	836,23	TN
362	9327071,26	258407,15	834,51	TN
363	9327081,26	258407,15	834,02	TN
364	9327091,26	258407,15	834,04	TN
365	9327101,26	258407,15	834,02	TN
366	9326971,26	258417,15	851,56	TN
367	9326981,26	258417,15	849,88	TN
368	9326991,26	258417,15	848,47	TN
369	9327001,26	258417,15	847,31	TN
370	9327011,26	258417,15	846,00	TN
371	9327021,26	258417,15	844,50	TN
372	9327031,26	258417,15	842,98	TN
373	9327041,26	258417,15	841,44	TN
374	9327051,26	258417,15	839,90	TN
375	9327061,26	258417,15	838,34	TN
376	9327071,26	258417,15	836,78	TN
377	9327081,26	258417,15	835,22	TN
378	9327091,26	258417,15	834,00	TN
379	9327101,26	258417,15	834,03	TN
380	9326991,26	258427,15	849,30	TN
381	9327001,26	258427,15	847,71	TN
382	9327011,26	258427,15	846,64	TN
383	9327021,26	258427,15	845,52	TN
384	9327031,26	258427,15	844,32	TN
385	9327041,26	258427,15	842,87	TN
386	9327051,26	258427,15	841,36	TN
387	9327061,26	258427,15	839,84	TN
388	9327071,26	258427,15	838,31	TN
389	9327081,26	258427,15	836,77	TN
390	9327091,26	258427,15	835,23	TN
391	9327101,26	258427,15	834,29	TN
392	9327111,26	258427,15	834,03	TN

---

---

393	9327001,26	258437,15	848,76	TN
394	9327011,26	258437,15	846,99	TN
395	9327021,26	258437,15	845,85	TN
396	9327031,26	258437,15	844,78	TN
397	9327041,26	258437,15	843,69	TN
398	9327051,26	258437,15	842,51	TN
399	9327061,26	258437,15	841,20	TN
400	9327071,26	258437,15	839,72	TN
401	9327081,26	258437,15	838,21	TN
402	9327091,26	258437,15	836,69	TN
403	9327101,26	258437,15	835,17	TN
404	9327111,26	258437,15	834,39	TN
405	9327021,26	258447,15	846,50	TN
406	9327031,26	258447,15	845,14	TN
407	9327041,26	258447,15	844,08	TN
408	9327051,26	258447,15	842,97	TN
409	9327061,26	258447,15	841,86	TN
410	9327071,26	258447,15	840,75	TN
411	9327081,26	258447,15	839,43	TN
412	9327091,26	258447,15	838,03	TN
413	9327101,26	258447,15	836,55	TN
414	9327111,26	258447,15	835,06	TN
415	9327121,26	258447,15	834,29	TN
416	9327031,26	258457,15	845,98	TN
417	9327041,26	258457,15	844,47	TN
418	9327051,26	258457,15	843,31	TN
419	9327061,26	258457,15	842,22	TN
420	9327071,26	258457,15	841,15	TN
421	9327081,26	258457,15	840,05	TN
422	9327091,26	258457,15	838,90	TN
423	9327101,26	258457,15	837,73	TN
424	9327111,26	258457,15	836,30	TN
425	9327121,26	258457,15	834,92	TN
426	9327131,26	258457,15	834,00	TN
427	9327051,26	258467,15	843,77	TN
428	9327061,26	258467,15	842,51	TN
429	9327071,26	258467,15	841,46	TN
430	9327081,26	258467,15	840,40	TN
431	9327091,26	258467,15	839,32	TN
432	9327101,26	258467,15	838,21	TN
433	9327111,26	258467,15	837,07	TN
434	9327121,26	258467,15	835,93	TN
435	9327131,26	258467,15	834,71	TN
436	9327061,26	258477,15	843,20	TN

---

---

437	9327071,26	258477,15	841,74	TN
438	9327081,26	258477,15	840,70	TN
439	9327091,26	258477,15	839,64	TN
440	9327101,26	258477,15	838,57	TN
441	9327111,26	258477,15	837,48	TN
442	9327121,26	258477,15	836,39	TN
443	9327131,26	258477,15	835,25	TN
444	9327141,26	258477,15	834,15	TN
445	9327081,26	258487,15	840,98	TN
446	9327091,26	258487,15	839,93	TN
447	9327101,26	258487,15	838,88	TN
448	9327111,26	258487,15	837,81	TN
449	9327121,26	258487,15	836,74	TN
450	9327131,26	258487,15	835,65	TN
451	9327141,26	258487,15	834,62	TN
452	9327091,26	258497,15	840,38	TN
453	9327101,26	258497,15	839,18	TN
454	9327111,26	258497,15	838,12	TN
455	9327121,26	258497,15	837,06	TN
456	9327131,26	258497,15	835,99	TN
457	9327141,26	258497,15	834,94	TN
458	9327151,26	258497,15	834,27	TN
459	9327111,26	258507,15	838,44	TN
460	9327121,26	258507,15	837,34	TN
461	9327131,26	258507,15	836,29	TN
462	9327141,26	258507,15	835,24	TN
463	9327151,26	258507,15	834,55	TN
464	9327161,26	258507,15	834,01	TN
465	9327121,26	258517,15	837,75	TN
466	9327131,26	258517,15	836,57	TN
467	9327141,26	258517,15	835,52	TN
468	9327151,26	258517,15	834,73	TN
469	9327161,26	258517,15	834,17	TN
470	9327141,26	258527,15	835,80	TN
471	9327151,26	258527,15	834,87	TN
472	9327161,26	258527,15	834,30	TN
473	9327151,26	258537,15	835,03	TN
474	9327161,26	258537,15	834,45	TN

---

## Anexo 9: Escala de riesgo para transitorios hidráulicos en tuberías

Escala de riesgo para transitorios hidráulicos en tuberías				
Nivel de riesgo	Presión máxima (sobrepresión) m.c.a.	Presión mínima (subpresión) m.c.a.	Interpretación	Fuente / Norma
Sin riesgo	$\leq 50$ % de la presión nominal de diseño	$\geq 0$	Condición segura; no se espera daño en tubería ni riesgo de cavitación	Ramírez (2022); AWWA Manual M51 (2012)
Leve	51–75 % de la presión nominal de diseño	0 a -2	Se observa ligera sobrepresión o vacío hidráulico; riesgo mínimo de daños	Tang et al. (2024); Apollonio (2016)
Moderado	76–100 % de la presión nominal de diseño	-2 a -5	Riesgo significativo de sobrepresión o cavitación; se recomienda mitigación	AWWA Manual M51; Muhammad (2020)
Crítico	$> 100$ % de la presión nominal de diseño	$< -5$	Alto riesgo de falla estructural, rotura de tubería o cavitación; requiere acción inmediata	Ramírez (2022); Mejía y Taípe (2021)

## Anexo 10: Panel fotográfico



Fotografía 1. Succión de la bomba de impulsión.



Fotografía 2. Cuarto de bombas de la línea de impulsión.



Fotografía 3. Parte externa de la caseta de bombeo.



Fotografía 4. Medición de la altura en la cisterna de 500 m<sup>3</sup>.



Fotografía 5. Diagrama de flujo del sistema de impulsión de agua.



Fotografía 6. Ingreso de la tubería de impulsión al reservorio apoyado de 1 200 m<sup>3</sup>.

# Roiser Bustamante Sánchez

## Ocurrencia de transitorios hidráulicos apoyado en la modelación hidráulica, de una línea de impulsión de agua pot...

 Revisión Repositorio Institucional

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:570297396

Fecha de entrega

23 mar 2026, 9:55 GMT-5

Fecha de descarga

23 mar 2026, 10:00 GMT-5

Nombre del archivo

Informe Final Roiser Bustamante v2 27-02-26.pdf

Tamaño del archivo

3.9 MB

87 páginas

20.764 palabras

105.701 caracteres




# 19% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

## Fuentes principales

- 19%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 9%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.