

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El acceso al agua potable es un derecho imprescindible, ya que satisface necesidades básicas referidas a la salud y las condiciones de vida de las poblaciones humanas, expresado por el derecho de gozar de altas coberturas en los servicios de agua y saneamiento (Hernández Vásquez, García Chomizo, y Mora Alvarado, 2011, pág. 22).

Esta situación es muy importante en materia de salud y desarrollo en los ámbitos nacional, regional y local. En algunas regiones, se ha comprobado que las inversiones en sistemas de abastecimiento de agua y de saneamiento pueden ser rentables desde un punto de vista económico, ya que la disminución de los efectos adversos para la salud y la consiguiente reducción de los costos de asistencia sanitaria son superiores a los costos de las intervenciones. Dicha afirmación es válida para diversos tipos de inversiones, desde las grandes infraestructuras de abastecimiento de agua al tratamiento del agua en los hogares. La experiencia ha demostrado asimismo que las medidas destinadas a mejorar el acceso al agua potable favorecen en particular a los pobres, tanto de zonas rurales como urbanas, y pueden ser un componente eficaz de las estrategias de mitigación de la pobreza (Cervantes, Vázquez, Hurtado, Hernandez, y Sarai, 2016, pág. 7).

Los sistemas de agua potable en Bolivia, son construidos por instituciones estatales y no estatales. Por lo tanto, además de presentar diversidad en su estructura, presentan diversos enfoques sobre administración, operación y mantenimiento. En la actualidad un problema que resalta es la ausencia de información sobre el estado en que se encuentran los sistemas de agua de consumo humano o el nivel de sostenibilidad que han alcanzado en sus años de funcionamiento, provocando condiciones que puedan contribuir a un riesgo sanitario y escasez del líquido elemento en época de estiaje.

La infraestructura usada para el transporte del agua desde las fuentes a los centros de consumo son las líneas de aducción redes de distribución, para realizar su diseño el procedimiento históricamente ha sido por ensayo y error, es decir, los proyectistas calculan algunas alternativas modificando unas pocas variables (generalmente diámetros), Sin

embargo, tomando en cuenta la gran variedad de componentes del sistema, y si todos ellos se modifican, se podría concluir que hay muchas alternativas de solución, pero son muy tediosas y manualmente es difícil reflejar, el comportamiento hidráulico en condiciones específicas que puedan darse en todo el sistema de agua potable. Uno de los aspectos más importantes a la hora del diseño de una aducción y red de distribución es el comportamiento de las líneas piezométricas y de la gradiente hidráulica, ya que hay que evitar las presiones negativas, como presiones muy altas, lo que puede producir un desabastecimiento, por falta de presión o por roturas de tuberías por excesivas presiones.

Este servicio debe ser continuo (24 horas); con la presión, cantidad y calidad satisfactoria, su comportamiento es complejo. Por lo que, los encargados de estos sistemas deben diseñar y operarlos, verificando el cumplimiento de las restricciones hidráulicas (Presión y velocidad) de acuerdo a lo establecido en la Norma Boliviana NB 689.

Con la introducción del computador, los análisis y cálculos de los sistemas, se fueron optimizando, quedando atrás las limitaciones que se tenía, posteriormente con el avance tecnológico se desarrollaron softwares que lograron analizar los sistemas complejos que puedan presentarse, como la representación de las líneas importantes en el diseño de una aducción, (gradiente hidráulico) y red de distribución (presiones), de esta manera poder tomar las mejores alternativas de diseño. En la actualidad se puede encontrar muchos softwares especializados en la simulación y análisis de redes de agua potable, como lo son el “WaterCAD” siendo un software comercial de análisis, modelación y gestión de redes a presión (sistemas de distribución o de riesgo), que utiliza el método del gradiente hidráulico, propiedad de la Empresa de Software Bentley Systems, otra alternativa es “EPANET” un software que sirve para realizar la simulación del comportamiento hidráulico y seguimiento de la calidad del agua en un sistema de redes de distribución de agua, esta opción es de uso libre y fue desarrollada por el EPA (Environmental Protection Agency), de igual manera que el anterior mencionado, este utiliza el método del gradiente hidráulico y por último tenemos una nueva opción que fue presentada en Bolivia y es el programa “AquasystemS PRO” que usa bloques programables en AutoCAD, cuyo software ha sido lanzado en el 2016 por dos Ing. Civiles Bolivianos, los hermanos Marco y Santiago Caballero, estos softwares solo entregan resultados a partir de la simulación de

modelos cuya información es introducida por el usuario lo que puede llevar a sobrepagos o errores de diseño, por ignorar las limitaciones, desventajas, que pueden presentar.

1.2. Planteamiento del problema

Normalmente al elaborar un diseño de una aducción y red de distribución de agua potable, los softwares disponibles para su cálculo y diseño, presentan diferentes alternativas de manejabilidad (introducción de datos) y representación de los resultados, tanto como limitantes o restricciones en los mismos.

Para escoger una opción de método computacional para el diseño de una aducción y distribución de un sistema de agua potable, bajo el criterio de la NB-689 nos hacemos la siguiente pregunta:

¿Cuál es el método computacional con mejor trabajabilidad, versatilidad, y que brinde mayor cantidad de resultados cumpliendo con los parámetros de diseño de la NB-689 en el diseño de las aducciones y redes de agua potable?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Comparar la trabajabilidad, versatilidad y cantidad de resultados que entregan los métodos computacionales WaterCAD, EPANET y AquasystemS PRO aplicado al diseño del sistema de agua potable de la Comunidad de Chirimoyal cumpliendo con los parámetros de diseño la NB-689.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar las diferencias de la interfaz del usuario en cuanto a la introducción de datos, interoperabilidad, manejo de herramientas de modelación, facilidad de construcción topológica de la aducción y la red de distribución, claridad en la presentación de estados de simulación y su versatilidad en la realización de cambios en el modelo, para así determinar que método es más sencillo de usar.
- Evaluar la versatilidad de EPANET, AquasystemS PRO y WaterCAD en términos de capacidad de modelado, los tipos de elementos que permite incluir cada

software (tuberías, válvulas, depósitos, bombas, etc.), como su edición de los mismos.

- Analizar la escalabilidad de los programas en función del tamaño y complejidad del sistema que pueden manejar sin perder precisión ni eficiencia, incluyendo la evaluación del rendimiento computacional al aumentar el número de elementos o la cantidad de datos procesados en el modelo.
- Observar, comparar y analizar la presentación de los resultados obtenidos por cada software, evaluando parámetros como presión, caudal y velocidad. El propósito es identificar posibles diferencias entre ellos y determinar cuál se ajusta mejor a los criterios técnicos establecidos en la norma boliviana NB-689.

1.4. Hipótesis

Todos los métodos computacionales presentan buena trabajabilidad, versatilidad y brindan una presentación óptima de resultados, aplicado al diseño del sistema de agua potable, de la Comunidad de Chirimoyal cumpliendo con los parámetros de diseño de la NB-689.

1.5. Justificación

La oferta de las diferentes alternativas de métodos computacionales existentes en el mercado, por sí solas no son la solución de nuestros problemas para el diseño. El manejo de estas herramientas estén a criterio y preferencia del ingeniero encargado del cálculo, sin hacer un análisis de que limitaciones y ventajas se tiene con cada herramienta, esta situación fue ocasionada porque no había un software que este basado en la NB-689, situación que cambio en el año 2016 con la presentación de un software boliviano para el diseño de redes de agua potable (AquasystemS PRO), ante este nuevo panorama, es necesario una comparación de los sistemas computacionales existentes, analizando la manera de trabajo, facilidad de manejo, resultado que nos ofrecen y posibles errores en su uso, pudiendo determinar de esta manera que método se acomoda de mejor manera a la normativa manejada en nuestro país. Por ello esta comparación es de gran importancia porque no solo tendrá un enfoque comparativo, si no que se analizara los resultados obtenidos y la manera de trabajo, utilizando el rediseño de una aducción y red de distribución como parámetro de medida.

1.6. Alcance del estudio

1.6.1. Alcance temático

El estudio se centra en un análisis comparativo exhaustivo de la trabajabilidad, versatilidad y generación de resultados de tres softwares (WaterCAD, EPANET y AquasystemS PRO), aplicados al diseño hidráulico de un sistema de agua potable rural. El alcance temático del proyecto se delimitó para determinar y comparar específicamente:

- **La trabajabilidad y el flujo de diseño:** Evaluando la facilidad de uso, la eficiencia en la entrada de datos topográficos en cada software.
- **La versatilidad de modelado:** La capacidad de cada software para simular componentes complejos, como sistemas de aducción por bombeo, y para gestionar escenarios operativos alternativos.
- **Las herramientas de análisis y visualización:** Comparando la calidad y profundidad de las funciones para la obtención e interpretación de resultados.
- **La capacidad de generación de entregables:** Verificando la habilidad de cada programa para producir productos finales de ingeniería, tales como planos técnicos.
- **El alineamiento con la normativa:** Determinando qué método computacional permite la verificación más rigurosa, clara y automatizada de los resultados conforme a los parámetros de la Norma Boliviana NB-689.

Este estudio excluye deliberadamente el análisis de calidad de agua, los fenómenos transitorios como el golpe de ariete y una evaluación económica detallada.

1.6.2. Alcance geográfico

El caso de estudio práctico se centra en el diseño del sistema de agua potable para la comunidad de Chirimoyal. Las conclusiones y recomendaciones funcionales son extrapolables a sistemas rurales de características similares de nuestro país.

1.6.3. Alcance temporal

El diseño hidráulico se proyecta para un período de 20 años, conforme a lo estipulado por la NB-689.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Servicio de Agua Potable

Servicio público que comprende una o más de las actividades de captación, conducción, tratamiento y almacenamiento de Recursos Hídricos para convertirlos en Agua Potable y el sistema de distribución a los Usuarios mediante redes de tuberías o medios alternativos. (Estado Plurinacional de Bolivia, 1999)

Un sistema de agua potable es un conjunto de infraestructuras y procesos diseñados para proporcionar agua limpia y segura a una comunidad o población. El objetivo principal de este sistema es garantizar que el agua que llega a los hogares, comercios e industrias sea de calidad, apta para el consumo humano, y libre de contaminantes que puedan ser perjudiciales para la salud. Este está constituido por una fuente de agua, aducción, tratamiento, almacenamiento y red de distribución (Ministerio del Agua, Viceministerio de Servicios Básicos, 2007).

2.2. Componentes de un sistema de agua potable

Este compuesto por:

- Obra de toma
- Aducción
- Planta potabilizadora (en caso que se requiera)
- Tanque de almacenamiento y regulación
- Red de distribución
- Conexiones domiciliarias

2.2.1. Obra de toma

Una fuente de agua es el desvío de dicho elemento de su ciclo natural para ser utilizada por el hombre. En la naturaleza existen diferentes recursos de agua como son los abastecimientos subterráneos y superficiales (Universidad de las Américas Puebla., s.f.).

2.2.2. Aducción de agua

2.2.2.1. Aducción por gravedad

Se denomina aducción por gravedad al conjunto de tuberías, canales, túneles, dispositivos y obras civiles que permiten el transporte de agua, aprovechando la energía disponible por efecto de la fuerza de gravedad, desde la obra de captación hasta la planta de tratamiento, tanque de almacenamiento o directamente a la red de distribución (Ministerio de Servicios y Obras Públicas Viceministerio de Servicios Básicos, 2004, pág. 133).

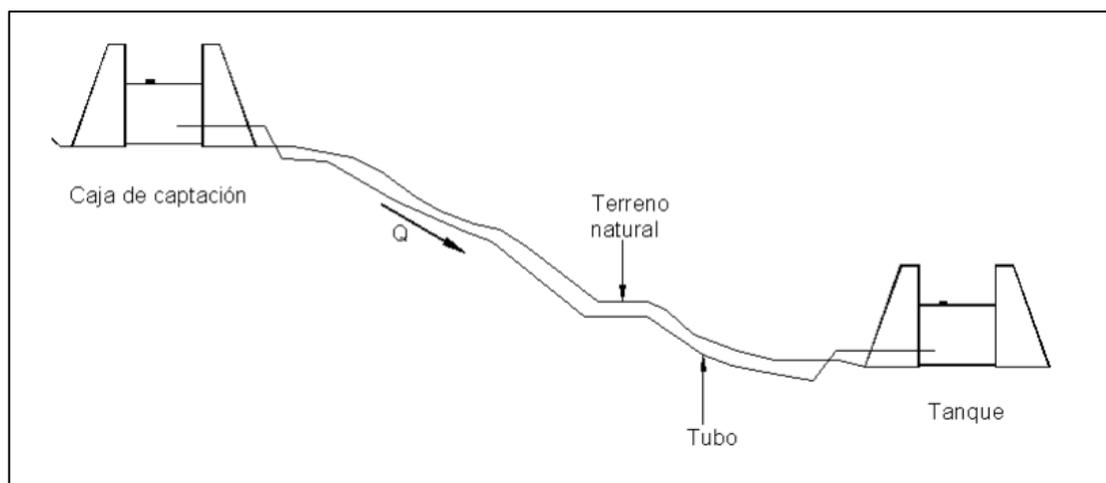


Figura 2.2.1: Aducción por gravedad.

Fuente: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2012).

2.2.2.2. Aducción por bombeo

Un sistema de abastecimiento de agua mediante bombeo extrae e impulsa el líquido mediante una bomba y tubería, desde la fuente de captación hasta un tanque de almacenamiento que se halla a mayor altura que los usuarios. A partir del tanque, el agua es conducida por gravedad hacia los domicilios de los usuarios a través de las tuberías que conforman la red de distribución y las conexiones domiciliarias.

Se denomina aducción por bombeo al conjunto de elementos estructurales, equipos dispositivos, tuberías y accesorio que permiten el transporte de un volumen determinado de agua mediante bombeo desde la obra de captación, hasta la planta de tratamiento tanque de almacenamiento o directamente a la red de distribución. (Ministerio de Servicios y Obras Públicas Viceministerio de Servicios Básicos, 2004, pág. 154)

Si el punto de descarga está relativamente cerca a la fuente, los equipos de bombeo y sus conexiones eléctricas e hidráulicas conforman un conjunto de instalaciones que se denomina Impulsión (si la distancia fuente-descarga es relativamente grande, se prefiere darles tratamiento por separado al equipamiento y a la aducción por bombeo) (Ministerio del Agua, Viceministerio de Servicios Básicos, 2007, pág. 9)

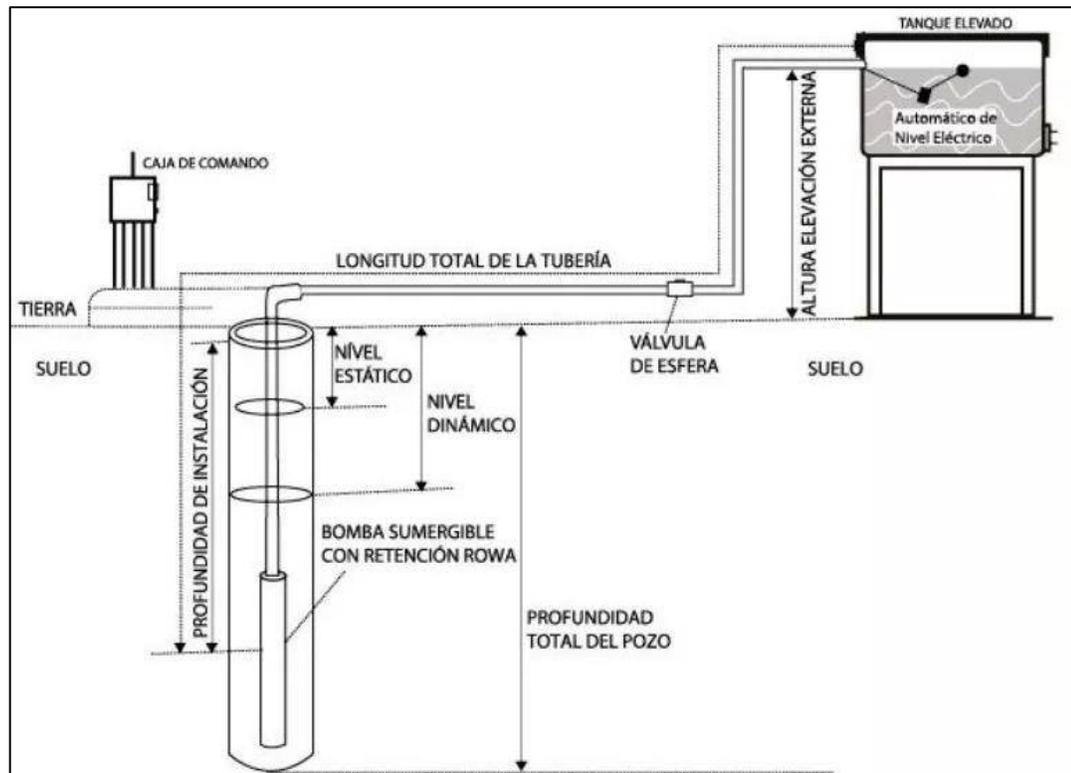


Figura 2.2.2: Aducción por bombeo.

Fuente: https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_2X_830966-MLA54977305549_042023-F.webp

2.2.3. Planta potabilizadora

El objetivo de un sistema de potabilización es producir, a partir de una fuente de suministro dada, agua con calidad acorde con la norma que rige en el país, Para lograrlo, es preciso combinar una serie de procesos y operaciones unitarias que remuevan los compuestos considerados como contaminantes y que estén presentes en la fuente de suministro. Un sistema adecuado depende de la calidad original del agua de la fuente (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015, pág. 49)

2.2.4. Tanque de almacenamiento y regulación

El tanque de almacenamiento es un depósito de agua destinado precisamente a almacenar agua y regular el suministro a los usuarios en función a la demanda, la cual no es constante ya que existen horas pico durante el día, y en la noche disminuye el consumo a casi cero.

El tanque de almacenamiento debe estar ubicado en un sitio elevado natural o artificial que permita generar las presiones de servicio necesarias para la red y los usuarios. Cuando la elevación es natural (una ladera o una colina) el tanque puede ser semienterrado o superficial, y cuando no existen condiciones naturales se debe construir un tanque elevado sobre columnas y vigas. (Ministerio del Agua, Viceministerio de Servicios Básicos, 2007, pág. 15).

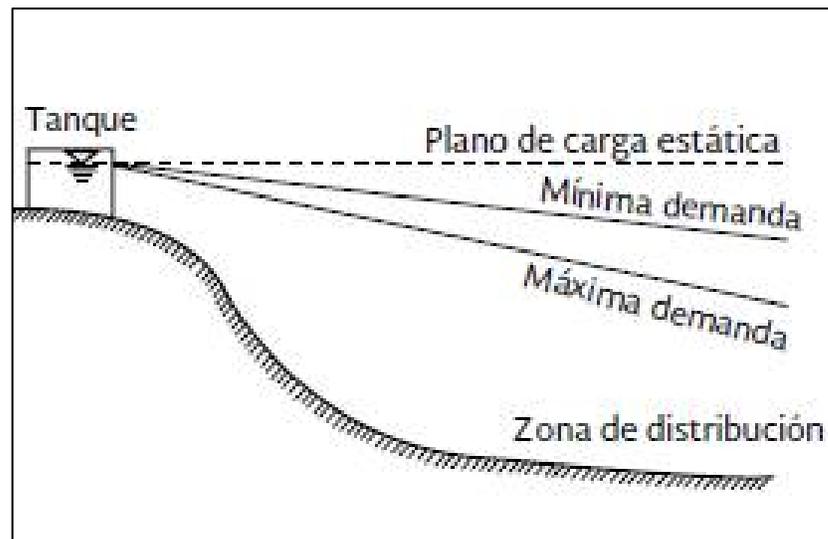


Figura 2.2.3 Tanque de almacenamiento y regulación.

Fuente: CONAGUA. (2015).

2.2.5. Red de distribución

Una red de distribución (que en lo sucesivo se denominara red) es el conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de servicio o de distribución hasta la toma domiciliaria o hidrantes públicos. Su finalidad es proporcionar agua a los usuarios para consumo doméstico, publico, comercial, industrial y para condiciones extraordinarias como extinguir incendios. La red debe proporcionar este servicio todo el tiempo, en cantidad suficiente, con la calidad requerida y a una presión adecuada. (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015, pág. 1).

2.2.5.1. Red de distribución abierta

La red está constituida por tuberías que forman ramificaciones a partir de una línea principal. La red abierta puede aplicarse en poblaciones semidispersas y dispersas o cuando por razones topográficas o de conformación de la población no es posible un sistema cerrado.

2.2.5.2. Red de distribución cerrada o mallada

La red está constituida por tuberías que forman circuitos cerrados o anillos. La red cerrada puede aplicarse en poblaciones concentradas y semiconcentradas mediante redes totalmente interconectadas o redes parcialmente interconectadas.

La red puede estar compuesta por una red de tuberías principales y una red de tuberías secundarias.

2.2.5.3. Red mixta o combinada

De acuerdo a las características topográficas y distribución de la población, pueden aplicarse en forma combinada redes cerradas y redes abiertas (Ministerio de Servicios y Obras Públicas Viceministerio de Servicios Básicos, 2004, pág. 284).

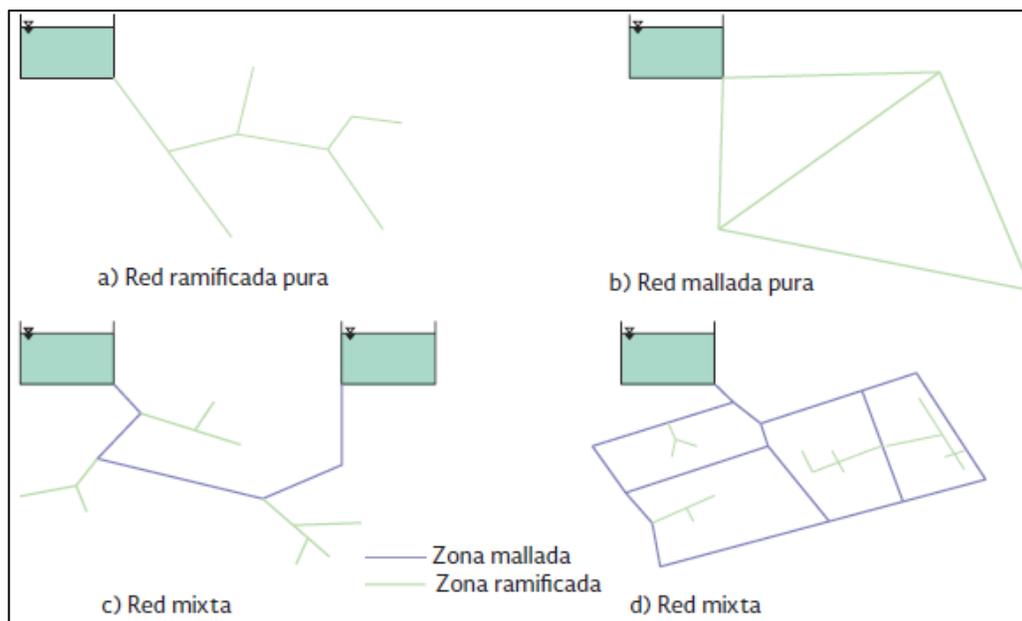


Figura 2.2.4: Tipos distribución de acuerdo son su topología.

Fuente: CONAGUA. (2015).

2.3. Formas de distribución

De acuerdo a condiciones topográficas, la ubicación de la fuente respecto a la red y al tanque de almacenamiento, motivara diversas formas de suministro de agua a la red de agua potable.

2.3.1. Por gravedad

El agua de la fuente se conduce o bombea hasta un tanque elevado desde el cual fluye por gravedad hacia la población. De esta forma se mantiene una presión suficiente y prácticamente constante en la red para el servicio a los usuarios. Este es el método más confiable y se debe utilizar siempre que se dispone de cotas de terreno suficientemente altas para la ubicación del tanque, para asegurar así las presiones requeridas en la red, presión máxima estática (L.E.H.), línea de gradiente hidráulica (L.G.H.). (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015, pág. 8)

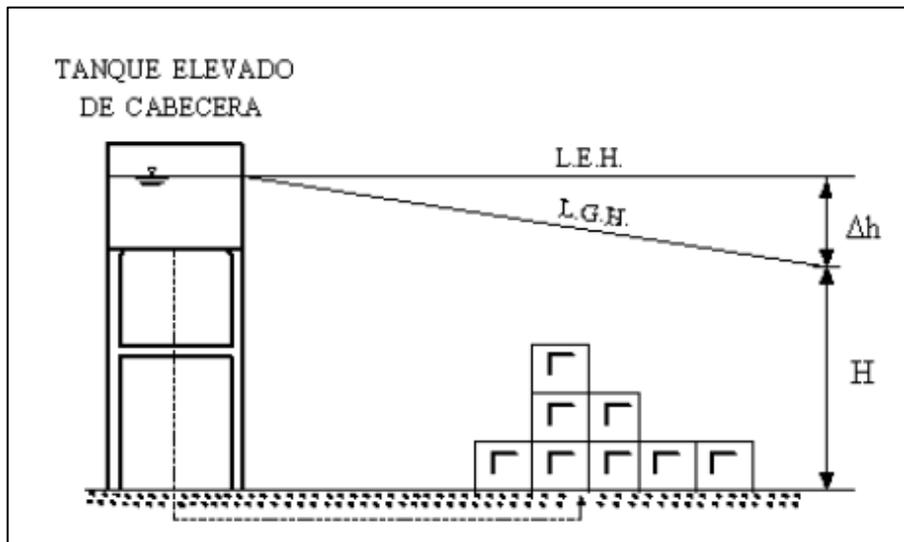


Figura 2.3.1: Tanque de almacenamiento elevado.

Fuente: Freddy M. Magne (2008).

2.3.2. Distribución por bombeo directo a la red

La distribución por bombeo puede aplicarse cuando la ubicación de la obra de captación o tanque de almacenamiento no garantiza presión suficiente en toda la red, por lo que es necesario utilizar dispositivos y equipos que impulsen el agua a través de la red.

Con la finalidad de proporcionar un servicio continuo, debe incluirse un sistema de suministro de energía de emergencia. (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015, pág. 8).

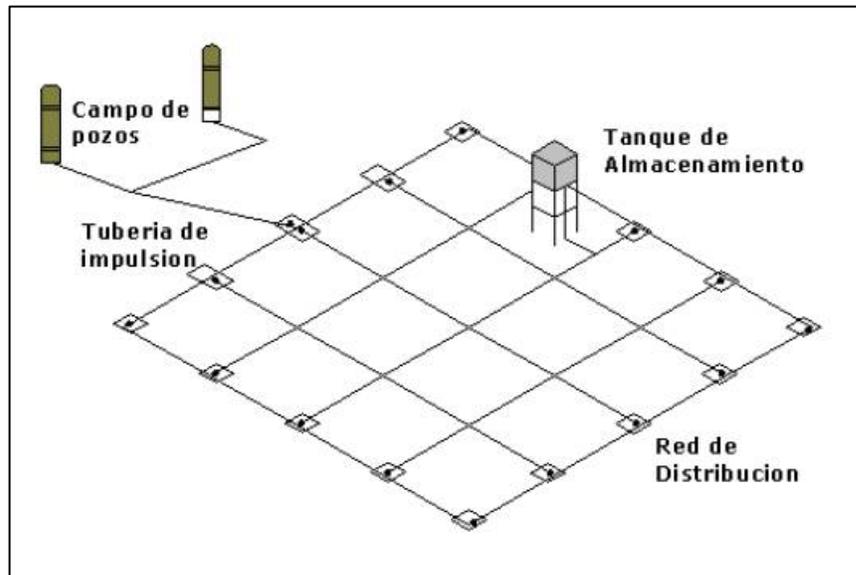


Figura 2.3.2: Distribución por bombeo.

Fuente: Freddy M. Magne (2008).

2.4. Elementos de una red

2.4.1. Tubería

Una tubería se compone de dos o más tubos que pueden ser constituidos de diferentes materiales, los cuales son ensamblados mediante un sistema de unión que permite la conducción de un fluido. Los puntos de unión entre las tuberías se denominan nodos.

En la selección del material de la tubería intervienen características como: resistencia mecánica, durabilidad, resistencia a la corrosión, capacidad de conducción, economía, facilidad de conexión y reparación, y, especialmente, la conservación de la calidad del agua.

La resistencia de la tubería debe ser mayor que la máxima carga estática que se puede presentar. La carga estática máxima en un punto de la red se calcula restando la cota de la tubería a la cota de la carga estática en dicho punto. En los tramos que se encuentran con desniveles suaves, la carga estática máxima es el mayor valor de los calculados para sus

dos extremos. La durabilidad es el grado al cual la tubería provee servicio satisfactorio y económico bajo las condiciones de uso. Implica larga vida útil y hermeticidad, tanto en la tubería como en su sistema de unión (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015, pág. 11).

En el mercado existen tuberías fabricadas con gran diversidad de materiales, que dependiendo de las condiciones de operación se comportan de manera satisfactoria o no. La tubería de Poli (cloruro de vinilo) (PVC) (Productos Nacobre S.A. de C.V., pág. 1), Fierro galvanizado, fibrocemento, etc.



Figura 2.4.1: Tubería de diferentes materiales.

Fuente: <https://obrasurbanas.es/uniones-y-conexiones-en-tuberias-de-pe-para-aplicaciones-sin-apertura-de-zanja/>

En la tabla 2.4.1 se presentan las características técnicas de tuberías de PVC comercializada en el país.

Tabla 2.4.1: Tubería PVC clase 12 (120m.c.a.).

Díámetro Nominal (plg.)	Espesor de Pared Mínimo (mm)
1 1/2"	2,50
2"	3,10
2 1/2"	3,90
3"	4,60
4"	6,00
6"	8,80

Fuente: <http://dismat.com.bo/tuberias-pvc-presion-para-sistemas-de-agua-potable/>.

2.4.2. Piezas especiales

Se les llama piezas especiales a todos aquellos accesorios de la tubería que permiten formar cambios de dirección, ramificaciones e intersecciones, así como conexiones incluso entre tubería de diferente material y diámetros. También permiten la inserción de válvulas y la conexión con estaciones de bombeo y otras instalaciones hidráulicas.

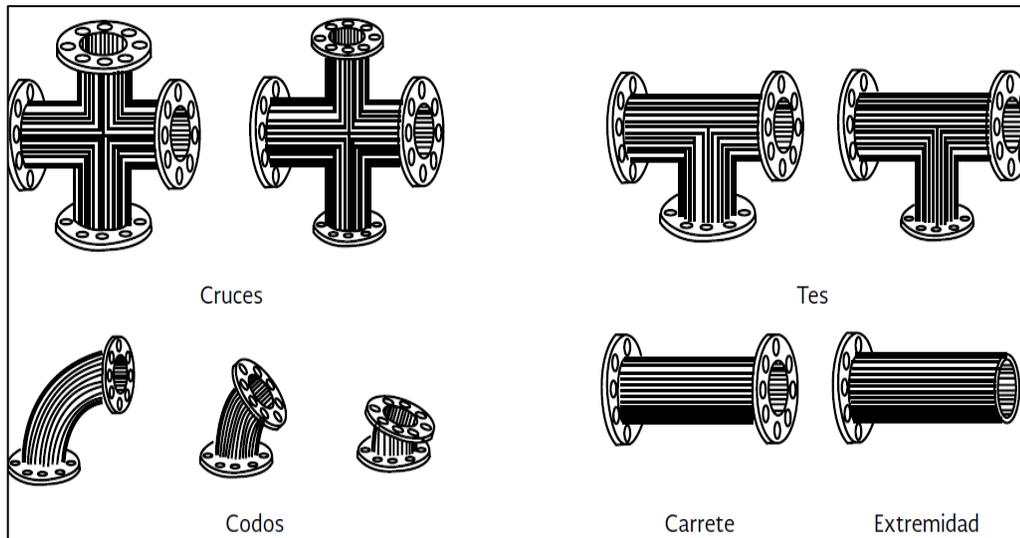


Figura 2.4.2: Piezas especiales con unión brida.

Fuente: CONAGUA (2015).

2.4.3. Válvulas

Las válvulas son dispositivos mecánicos que son empleados para detener, iniciar o controlar las características del flujo en conductos a presión. Pueden ser accionadas manualmente o por medios automáticos o semiautomáticos. Así, existen accionadores eléctricos, hidráulicos o neumáticos, los cuales se usan en plantas de tratamiento o en instalaciones donde se requiere operar frecuentemente las válvulas. En redes de distribución son más usuales las válvulas que se operan manualmente mediante palancas, volantes y engranes, debido a que los cierres y aperturas son ocasionales.

Las válvulas se dividen en dos clases según su función: 1) Aislamiento o seccionamiento y 2) Control. Según su tipo las válvulas de aislamiento pueden ser: de compuerta, de mariposa o de asiento (cilíndrico, cónico o esférico). Las válvulas de asiento pueden realizar ambas funciones. A su vez las válvulas de control pueden ser: de altitud, de

admisión y expulsión de aire, controladoras de presión, de globo, de retención (check) o de vaciado (de desagüe).

2.4.3.1. Válvulas de compuerta

Este tipo de válvula funciona con una placa que se mueve verticalmente a través del cuerpo de la válvula en forma perpendicular al flujo. El tipo de válvula de compuerta más empleado es la de vástago saliente.

2.4.3.2. Válvulas de mariposa

Estas válvulas se operan por medio de una flecha que acciona un disco y lo hace girar centrado en el cuerpo de la válvula. Se identifican por su cuerpo sumamente corto. El diseño hidrodinámico de esta válvula permite emplearla como reguladora de gasto en condiciones de gastos y presiones bajos.

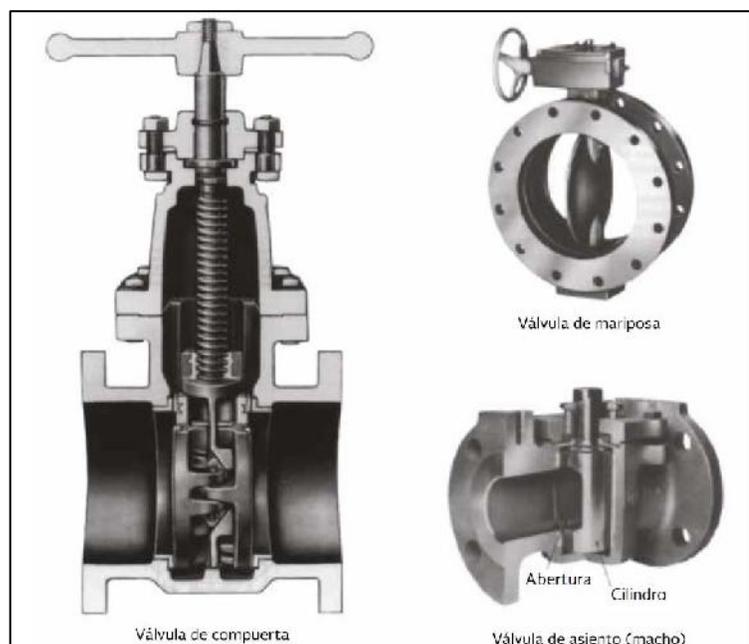


Figura 2.4.3: Válvula compuerta y mariposa.

Fuente: CONAGUA (2015).

2.4.3.3. Válvulas para admisión y expulsión de aire

Este tipo de válvulas se instalan para permitir la entrada o salida de aire a la línea. Lo anterior puede requerirse durante las operaciones de llenado o vaciado de la línea. Así mismo, se emplean en tramos largos de tubería, así como en puntos altos de las mismas

donde suele acumularse aire, el cual bloquea la circulación del agua o reduce la capacidad de la conducción. También evitan la formación de vacíos parciales en la línea durante su vaciado, que pudieran causar el colapso o aplastamiento de la tubería (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015).



Figura 2.4.4: Válvula de doble propósito.

Fuente: Freddy M. Magne (2008).

2.4.3.4. Válvulas de retención

Las válvulas de retención (check) son automáticas (son unidireccionales), es decir, flujos en dirección contraria a la de diseño. Sirve para evitar la inversión de flujo en un conducto. Siendo su uso vital para los sistemas de bombeo y distribución. tienen el fin de evitar la descarga del agua en dirección a la bomba, esto evita daños por la rotación inversa de la bomba, además de impedir el vaciado de la tubería permitiendo que la puesta en marcha del sistema sea más rápida y segura además protegen a la bomba durante las sobre presiones. En general, debe ser instalada en la tubería de descarga de los equipos de bombeo. Este tipo de válvula cierra normalmente de forma instantánea al presentarse la inversión del flujo. (Productos Nacobre S.A. de C.V.).

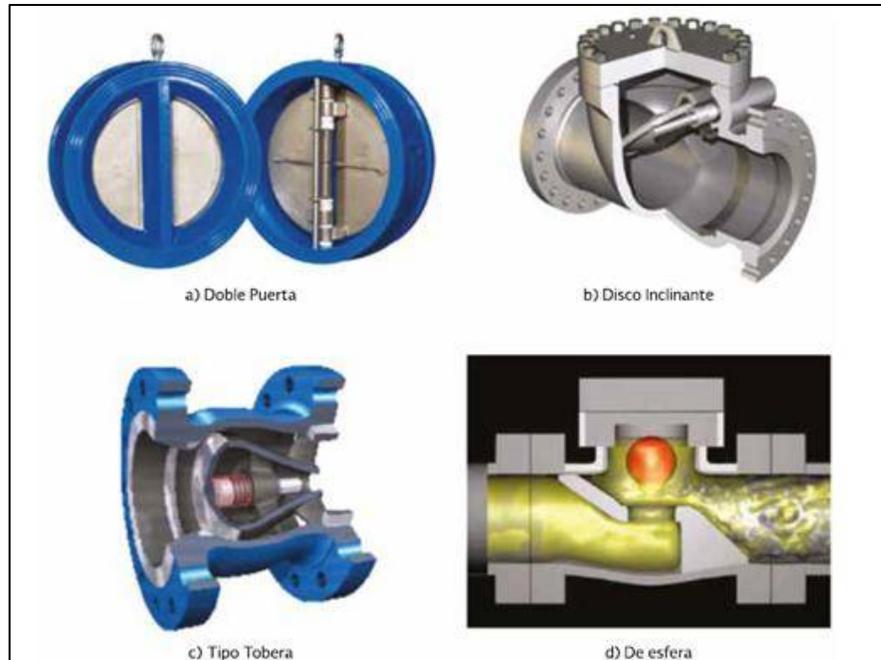


Figura 2.4.5: Válvulas Check.

Fuente: CONAGUA (2015).

2.5. Hidráulica aplicada al diseño de redes

2.5.1. Ecuación de la continuidad

La ecuación de la continuidad se fundamenta en la ley de la conservación de la masa, que establece que: considerando un volumen fijo y arbitrario, llamado volumen control, en el cual existe un ingreso y salida de masa continuos el balance entre la masa que entra y la que sale más la variación en el interior de este volumen control en un intervalo de tiempo dado da como resultante una masa nula, ya que esta no puede crearse ni desaparecer (Pérez Farrás, 2002, pág. 2).

De esta manera para un movimiento permanente y si la masa en el interior permanece constante, se deduce que la masa que entra debe ser igual a la que sale. Esto es aplicable también al flujo másico y al caudal.

El principio de continuidad establece que si un líquido fluye a través de un conducto sin pérdida o ganancia de fluido el caudal se mantendrá constante a lo largo de este. Esto implica que el volumen de entrada debe ser igual al volumen de salida, en un lapso de tiempo. Así analizando dos puntos a lo largo del conducto.

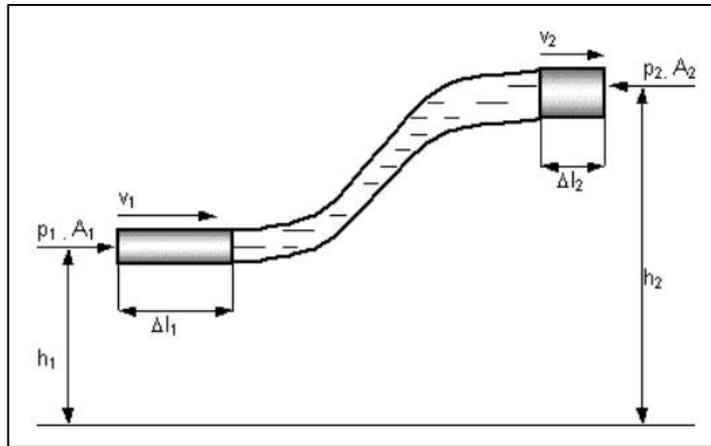


Figura 2.5.1: Conservación de la masa en la dinámica de los fluidos.

Fuente: <https://www.fisicanet.com.ar/fisica/dinamica-de-fluidos/ap01-hidrodinamica.php>

El caudal puede calcularse como el volumen transportado por unidad de tiempo, o como el producto de la velocidad y el área de la sección transversal expresado en la ecuación (2.1).

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\Delta l * A}{t} \quad (2.1)$$

$$Q = v * A \quad (2.2)$$

Para el flujo en un ducto se cumple la condición de la ecuación (2.3).

$$Q_1 = Q_2 \quad (2.3)$$

$$v_1 * A_1 = v_2 * A_2 \quad (2.4)$$

Donde:

Q = Caudal (m³/s).

V = Volumen (m³).

t = Tiempo (s).

A = Área de la sección (m²).

v = Velocidad del flujo (m/s).

2.5.2. Ecuación de Bernoulli

En el análisis de flujo de tuberías existen tres tipos de energía que siempre deben considerarse, la energía potencial debido a la elevación a partir de un punto de referencia; energía cinética debido a la velocidad del flujo y la energía del flujo o energía de presión necesaria para mover el elemento de fluido, por ello Bernoulli presenta la ecuación (2.5) para fluidos ideales (Giles, 1975, pág. 72).

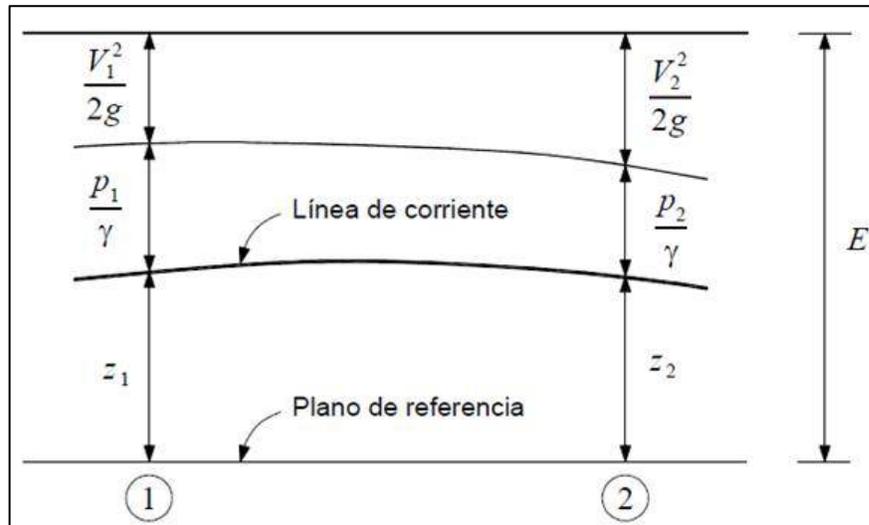


Figura 2.5.2: Esquema Teorema de Bernoulli.

Fuente: Rocha Felices (1998).

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (2.5)$$

Donde:

P = Presión (Pa).

γ = Peso específico del fluido (N/m³).

v = Velocidad del fluido (m/s).

g = Aceleración gravitacional (9.81 m/s²).

z = Altura sobre un plano de referencia (m).

La ecuación de Bernoulli es una forma simplificada de la primera de la primera ley de la termodinámica y establece un balance entre la energía de presión y la energía cinética de

un flujo en un conducto. Por lo tanto, la suma de ambos términos en un punto dado representa en principio la energía total del fluido en ese punto (Umaña, 2006, pág. 4).

En un flujo ideal, la energía E en 1 es igual a la energía en 2, pero para un fluido real habría una pérdida de energía entre 1 y 2. En realidad esa energía se transforma en calor por la fricción entre las paredes de la tubería y el fluido que circula por él, entonces la ecuación para un fluido real es: (Rocha Felices, 1998, pág. 8).

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{f_{1-2}} \quad (2.6)$$

Donde:

P = Presión (Pa).

γ = Peso específico del fluido (N/m³).

v = Velocidad del fluido (m/s).

g = Aceleración gravitacional (9.81 m/s²).

z = Altura sobre un plano de referencia (m).

$h_{f_{1-2}}$ = Pérdidas de energía (m).

2.5.3. Ecuaciones de pérdidas de Carga.

En estructuras largas, la pérdida de carga por fricción es muy importante, por lo que ha sido objeto de investigaciones teoricoexperimentales para llegar a soluciones satisfactorias de fácil aplicación. Para el problema de la resistencia al flujo es necesario clasificar inicialmente los flujos entre laminar y turbulento Osborne Reynolds (1883) en base a sus experimentos fue el primero que propuso el criterio para distinguir ambos tipos de flujo mediante el número que lleva su nombre (Sotelo Ávila, 1997, pág. 277). En el caso de un conducto cilíndrico a presión, el número de Reynolds se define Ec. (2.7).

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (2.7)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds (adimensional).

V = Velocidad del fluido (m/s).

ν = Viscosidad cinemática (m²/s).

D = Diámetro del conducto (m).

2.5.4. Ecuación de Darcy Weisbach

Es la ecuación de resistencia fluida más general aplicado al diseño de tuberías circulares fluyendo a presión. Describe que la fricción es proporcional a la carga de velocidad del flujo y a la relación de la longitud al diámetro de la corriente (Mott, 2006, pág. 233). Esto se expresa en forma matemática con la Ec. (2.8)

$$hf = f * \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} \quad (2.8)$$

Donde:

f = Coeficiente de fricción (adimensional).

V = Velocidad en la sección en (m/s).

g = Aceleración gravitacional (9,81 m/s²).

D = Diámetro del conducto (m).

L = Longitud de la tubería (m).

El factor de fricción f se calcula mediante diferentes ecuaciones, dependiendo del Número de Reynolds (Re) del flujo:

- Para $Re < 2000$ (flujo laminar) se emplea la fórmula de Hagen – Poiseuille (2.9).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.9)$$

- Para $Re > 4000$ (flujo turbulento) se emplea la fórmula de Colebrook y White (2.10).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{k}{3,71 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (2.10)$$

- O también es muy empleada la fórmula de aproximación de Swamne – Jain (2.11).

$$f = \frac{0,25}{\left(\log \left(\frac{5,74}{Re^{0,9}} + \frac{k}{3,71 * D} \right) \right)^2} \quad (2.11)$$

Donde:

f = Coeficiente de fricción (adimensional).

D = Diámetro del conducto (m).

k = Rugosidad de la tubería (m).

Re = Número de Reynolds (adimensional).

2.5.5. Ecuación de Hazen-Williams

La complejidad de la ecuación de Darcy Weisbach debido al proceso de métodos numéricos iterativos para el cálculo del factor de fricción, conlleva a la formulación de una serie de ecuaciones empíricas que describen en forma aproximada y limitada el comportamiento mecánico de los sistemas de tuberías, pero debido a su fácil aplicación se hicieron muy populares como la ecuación de Hazen Williams (2.12) Los límites establecidos para su uso son: **diámetro deben ser igual o superior a 3 pulgadas y la velocidad menor a 3 m/s.** (Saldarriaga, 2007, pág. 156).

$$Q = 0,28 \cdot C \cdot D^{2,63} \cdot J^{0,54} \quad (2.12)$$

$$J = \frac{h_f}{L} \quad (2.13)$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s).

C = Coeficiente de Hazen-Williams (adimensional).

D = Diámetro de la tubería (m).

J = Pérdida de carga unitaria o gradiente hidráulico (m/m).

h_f = Pérdida de carga (m).

L = Longitud de la tubería (m).

2.5.6. Pérdidas de carga locales

Las pérdidas de carga locales o singulares ocurren en determinados puntos de la tubería y se deben a la presencia de algo especial que se denomina genéricamente singularidad un codo, una válvula, etc.

Las pérdidas de cargas locales se expresan genéricamente en función de la altura de velocidad en la tubería Ec. (2.14). (Rocha Felices, 1998, pág. 151).

$$h_{loc} = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.14)$$

Donde:

K =Coeficiente de la característica de la singularidad que genera la pérdida (adimensional).

V = Velocidad del fluido (m/s).

g = Aceleración gravitacional (9,81 m/s^2).

2.6. Norma Boliviana de Diseño de Sistemas de Agua Potable (NB 689)

2.6.1. Introducción

El diseño de sistemas de agua potable para poblaciones urbanas y rurales de la República de Bolivia, se ha venido desarrollando en base a la Norma Técnica de Diseño para Sistemas de Agua Potable NB 689 y a los Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable promulgadas por el entonces Ministerio de Desarrollo Humano en noviembre del año 1996. Debido a los avances tecnológicos sobre el diseño y construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable que se han dado en los últimos años, el

Ministerio de Servicios y Obras Públicas, a través del Viceministerio de Servicios Básicos, ha encarado la actualización de la Norma y Reglamentos, con el propósito de incorporar y modificar conceptos, criterios y fórmulas que se ajusten a la realidad actual para el diseño de sistemas de agua potable en nuestro país. Para el efecto, se han tomado en cuenta las inquietudes de instituciones, profesionales y técnicos que trabajan en el sector. El presente documento se ha actualizado con la finalidad de brindar a proyectistas, ejecutores, supervisores y fiscalizadores de un instrumento normativo para el diseño de proyectos de agua potable urbano, peri-urbano y rural de nuestro país (Ministerio de Servicios y Obras Públicas Viceministerio de Servicios Básicos, 2004).

2.6.2. Parámetros básicos de diseño

2.6.2.1. El período de diseño

Es el número de años durante los cuales una obra determinada prestará con eficiencia el servicio para el cual fue diseñada.

Tabla 2.6.1: Período de diseño (años).

Componente del sistema	Población menor a 20 000 habitantes	Población mayor a 20 000 habitantes
Obra de captación	10 – 20	30
Aducción	20	30
Pozos Profundos	10	15 – 20
Estaciones de Bombeo	20	30
Plantas de Tratamiento	15 – 20	20 – 30
Tanques de almacenamiento	20	20 – 30
Redes de distribución	20	30

Fuente: Norma Boliviana NB 689.

2.6.2.2. Población de proyecto (*Pf*)

Es el número de habitantes que ha de ser servido por el proyecto para el período de diseño, el cual debe ser establecido con base en la población inicial.

a) Métodos de cálculo.

a) Crecimiento Aritmético.

$$Pf = Po * \left(1 + \frac{i * T}{100}\right) \quad (2.15)$$

b) Crecimiento Geométrico.

$$Pf = Po * \left(1 + \frac{i}{100}\right)^T \quad (2.16)$$

Donde:

Po = Población inicial (Hab).

i = Índice de Crecimiento anual (%).

T = Periodo de Diseño (Años).

Pf = Población futura (Hab).

Tabla 2.6.2: Aplicación de los métodos de cálculo para estimación de la población futura.

Método	población (Número de Habitantes)			
	Hasta 5.000	De 5.001 - 20.000	De 20.001 - 100.000	Mas de 100.001
Aritmético	x	X		
Geométrico	x	x	X	x
Exponencial	X (2)	X (2)	X (1)	x
x A falta de Información Básica, se adopta un valor técnicamente razonable				
X (1) Optativo, Recomendable				
X (2) Sujeto a Justificación				

Fuente: Norma Boliviana NB 689.

2.6.2.3. Dotación media diaria (D_o)

La dotación media diaria se refiere al consumo anual total previsto en un centro poblado dividido por la población abastecida y el número de días del año. Es el volumen equivalente de agua utilizado por una persona en un día.

Para el caso de sistemas nuevos de agua potable, con conexiones domiciliarias, la dotación media diaria puede ser obtenida sobre la base de la población y la zona geográfica dada, según lo especificado en la tabla 2.6.3.

Tabla 2.6.3: Dotación media diaria (l/Hab/d).

Zona	Población (habitantes)					
	Hasta 500	De 501 a 2 000	De 2 001 a 5 000	De 5 001 a 20 000	De 20 001 a 100 000	Más de 100 000
Del Altiplano	30 - 50	30 - 70	50 - 80	80 - 100	100 - 150	150 - 200
De los Valles	50 - 70	50 - 90	70 - 100	100 - 140	150 - 200	200 - 250
De los Llanos	70 - 90	70 - 110	90 - 120	120 - 180	200 - 250	250 - 350
Notas:	Justificar a través de un estudio social			Justificar a través de un estudio socio-económico.		

Fuente: Norma Boliviana NB 689.

2.6.2.4. Dotación futura de agua (D_f)

La dotación media diaria actual puede incrementarse de acuerdo a los factores que afectan el consumo y se justifica por el mayor hábito en el uso de agua por la disponibilidad de la misma. Por lo que, se debe considerar en el proyecto una dotación futura para el período de diseño, la misma que debe ser utilizada para la estimación de los caudales de diseño Ec. (2.17).

$$D_f = D_o * \left(1 + \frac{d}{100}\right)^T \quad (2.17)$$

Donde:

D_f = Dotación Futura (l/Hab/d).

D_o = Dotación Inicial (l/Hab/d).

d = Variación Anual de la dotación (0,50% - 2%).

T = Número de Años en estudio.

2.6.2.5. Caudales de diseño

a) Caudal medio diario (Q_{md})

Es el consumo medio diario de una población, obtenido en un año de registros. Se determina con base en la población del proyecto y dotación, de acuerdo a la ecuación (2.18).

$$Q_{md} = \frac{P_f * D_f}{86400} \quad (2.18)$$

Donde:

Q_{md} = Caudal medio diario (l/s).

P_f = Población futura (Hab).

D_f = Dotación Futura (l/Hab/d).

b) Caudal máximo diario (Q_{maxd})

Es la demanda máxima que se presenta en un día del año, es decir representa el día de mayor consumo del año. Se determina multiplicando el caudal medio diario por el coeficiente K_1 que varía según las características de la población.

$$Q_{maxd} = K_1 * Q_{md} \quad (2.19)$$

Donde:

K_1 = Coeficiente de variación diaria (adimensional).

Q_{md} = Caudal medio diario (l/s).

Q_{maxd} = Caudal máximo diario (l/s).

Se recomienda utilizar valores para K_1 entre **1,20 - 1,50**; poblaciones pequeñas tomar el valor superior.

c) Caudal máximo horario (Q_{maxh})

Es la demanda máxima que se presenta en una hora durante un año completo. Se determina multiplicando el caudal máximo diario por el coeficiente K_2 que varía, según el número de habitantes de 1,5 a 2,2.

$$Q_{maxh} = K_2 * Q_{maxd} \quad (2.20)$$

Donde:

K_2 = Coeficiente de variación horaria (adimensional).

Q_{maxd} = Caudal máximo diario (l/s).

Q_{maxh} = Caudal máximo horario (l/s).

Tabla 2.6.4: Valores para el coeficiente K_2 .

Población (habitantes)	Coeficiente (K_2)
Hasta 2 000	2,20 – 2,00
De 2 001 a 10 000	2,00 – 1,80
De 10 001 a 100 000	1,80 – 1,50
Más de 100 000	1,5

Fuente: Norma Boliviana NB 689.

d) Caudales de instituciones

Es el caudal para instituciones que deben ser calculadas para incluir en la red de distribución, Los consumos industriales e institucionales pueden ser establecidos en base a lo especificado en el Reglamento Nacional de Instalaciones Sanitarias Domiciliarias tabla (2.6.5).

Tabla 2.6.5: Cuadro de dotaciones comerciales, públicas. Valores referenciales.

Tipo de inmueble/ Utilización	Dotación
Centros educativos, escuelas, colegios, universidades y otros similares, alumnado externo	50 L/alumno. d
Centros educativos, escuelas, colegios, universidades y otros similares, alumnado interno	120 L/alumno. d
Edificios de oficinas, personal	50 L/persona. día o 6,0 L/m ² . d
Parqueos sin lavado de automóviles	2 L/m ² . d
Centros de salud, hospitales, clínicas, personal médico, paramédico.	50 L/persona. d
Centros de salud, hospitales, clínicas, internos	400 – 600 L/cama.

Fuente: Reglamento Nacional de Instalaciones Sanitarias Domiciliarias. Estado Plurinacional de Bolivia.

2.6.3. Aducción

2.6.3.1. Caudal de diseño (bombeo) (Q_b)

Si el sistema tiene tanque de almacenamiento, el caudal de bombeo deberá estimarse en función del caudal máximo diario y el número de horas de bombeo.

Si el bombeo se realiza directamente a la red de distribución, el caudal de bombeo debe ser igual al caudal máximo horario.

$$Q_b = Q_{maxd} * \frac{24}{N} \quad (2.21)$$

Donde:

Q_b = Caudal de bombeo (l/s).

Q_{maxd} = Caudal máximo diario (l/s).

N = Horas de bombeo al día.

Por razones económicas y operativas, se aconseja que el período de bombeo en un día debe ser menor a 12 horas, que podrán ser distribuidas en una o más operaciones (arranques) de bombeo diarios.

2.6.3.2. Presiones

a) Presión estática

Representa la carga máxima a la que puede estar sometida una tubería al agua cuando se interrumpe bruscamente el flujo.

b) Presión dinámica

En cualquier punto de la línea, representa la diferencia de la carga estática y la pérdida de carga por fricción en la tubería.

c) Gradiente hidráulica (L.G.H.)

Es la línea que indica la presión en columna de agua a lo largo de la tubería bajo condiciones de operación (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2004).

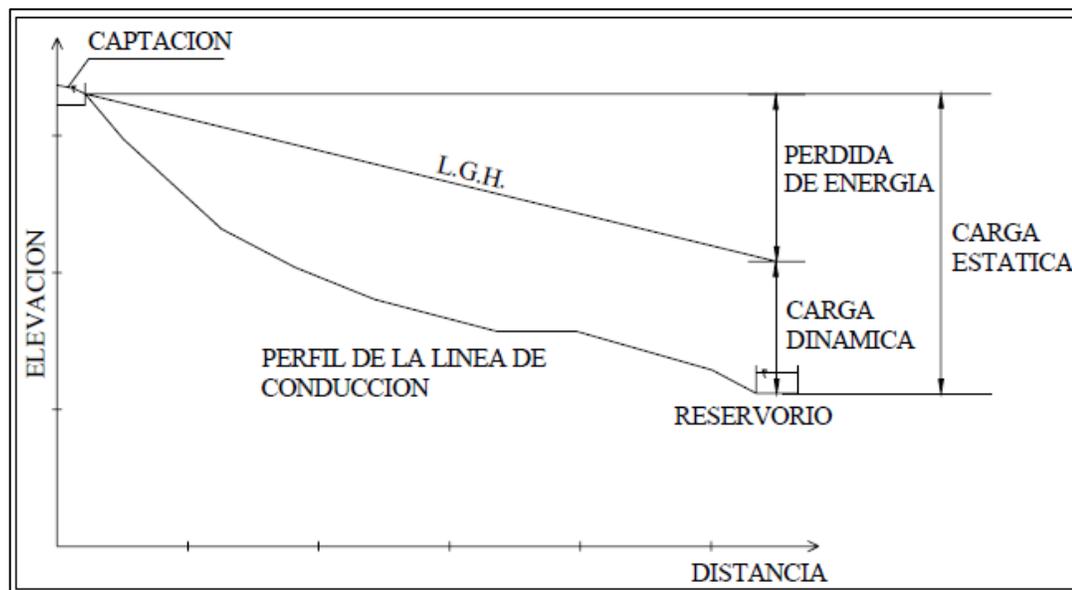


Figura 2.6.1: Cargas estática y dinámica de la línea de conducción.

Fuente: OPS (2004).

- La presión estática máxima de la tubería de aducción no debe ser mayor al 80% de la presión de trabajo especificada por el fabricante, debiendo ser compatibles con las presiones de servicio de los accesorios y válvulas a utilizarse.
- La presión dinámica mínima recomendable en cualquier punto de la tubería de aducción, en las condiciones más desfavorables de escurrimiento, debe ser de 2 m.c.a., excepto en los puntos inicial y final de la aducción ligados a un tanque o cámara en contacto con la atmósfera.

2.6.3.3. Velocidades

- Velocidad máxima 2 m/s tuberías de impulsión, pero se debe considerar 1,50 m/s. para ayudar a mitigar el golpe de ariete.
- La velocidad mínima recomendada es de 0,30 m/s.

2.6.3.4. Profundidad de instalación de tubería

- En áreas de cultivo, cruce de caminos, líneas de ferrocarril o aeropuertos, la profundidad mínima debe ser de 1,00 m sobre la clave de la tubería. El proyectista debe justificar el uso de valores menores al indicado si estos cuentan con un sistema de protección.

2.6.4. Redes de Distribución

2.6.4.1. Caudales de diseño

- La red de distribución debe calcularse para el caudal máximo horario o para el caudal máximo diario más la demanda contra incendios, utilizando para el diseño el mayor valor resultante.
- Para el cálculo de la red de distribución se debe considerar la zona actual y futura con sus densidades actuales y aquellas consideradas en los planes reguladores urbanos o establecidas por el proyectista sobre la base de información local.
- Para redes abiertas con más de 30 conexiones debe aplicarse uno de los métodos para redes cerradas.
- Para el cálculo de ramales debe considerarse un caudal mínimo de 0,10 l/s.

- Los caudales puntuales (escuelas, hospitales, etc.) deben ser considerados como un nudo.
- La pérdida de carga en el ramal debe ser determinada para el caudal del tramo.

a) Método del número de familias

- Ecuación caudal unitario (Qu); (2.22).

$$Qu = \frac{Qmaxh}{N^of} \quad (2.22)$$

Donde:

$Qmaxh$ = Caudal máximo horario (l/s).

Qu = Caudal unitario (l/s).

N^of = Número Total de familias.

2.6.4.2. Presiones de servicio

- Poblaciones iguales o menores a 2 000 habitantes 5,00 m.c.a. la presión dinámica, cuando el tanque esté en los niveles mínimos.
- La presión estática máxima permitida en tuberías de distribución será de 70 m.c.a. referida al máximo nivel del tanque de almacenamiento.

2.6.4.3. Velocidades

- La velocidad máxima en la red de distribución no debe ser mayor a 2,00 m/s.
- La velocidad mínima en la red de distribución en ningún caso debe ser menor a 0,30 m/s para garantizar la autolimpieza del sistema.
- Para poblaciones pequeñas, se aceptarán velocidades menores, solamente en ramales secundarios.

2.6.4.4. Diámetros mínimos

- En redes abiertas, el diámetro mínimo de la tubería principal debe ser de 1", aceptándose, en poblaciones menores a 2 000 habitantes, un diámetro de 3/4" para ramales.

2.6.4.5. Válvulas

a) Válvulas de control

- Debe colocarse una válvula en los puntos en que exista un ramal de derivación importante.

b) Válvulas de retención

- Deben colocarse en las tuberías de distribución por bombeo (líneas de impulsión) a efecto de evitar el retroceso del agua, con el consiguiente vaciado del conducto y posibles daños a las bombas.

2.7. Conceptos previos a la Modelación

2.7.1. Modelación hidráulica

El uso de modelos matemáticos para el análisis de sistemas de distribución de agua potable fue propuesto por vez primera por Hardy Cross en 1936. Desde entonces, los métodos de solución empleados en los modelos han evolucionado del análisis del caudal en redes desarrollado por él, hecho a mano, hasta el desarrollo y extensión de modelos hidráulicos de redes para computadoras (Métodos Computacionales) en las décadas de los setenta y ochenta.

Actualmente, los modelos de simulación son sistemas completos de fácil manejo que permiten a los usuarios analizar y mostrar los parámetros hidráulicos y de calidad del agua dentro de un sistema de distribución de agua potable (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015).

Con el desarrollo que en los últimos años han experimentado los modelos de simulación, es posible aplicarlos de acuerdo con el objetivo que se persiga o los criterios que se establezcan.

2.7.2. Tipos de Modelos Hidráulicos

2.7.2.1. Modelos operacionales o de diseño

Se emplean para simular matemáticamente el comportamiento hidráulico de variables, como la presión, caudales en la red, los niveles en tanques de regulación. El objetivo es

tener un mejor soporte en la toma de decisiones para la elección de materiales, válvulas, etc.

El tiempo es una variable fundamental en la simulación de redes de agua potable. Existen dos tipos de modelación: estática y dinámica. En el caso de una modelación operacional o de diseño, se toma las condiciones más críticas, las que se dan en una modelación estática.

a) Estáticos o de flujo permanente

En este tipo de modelos se da por hecho que los caudales demandados e inyectados permanecen constantes, que no existen variaciones en la operación en la red, y que el nivel en los tanques es fijo. Es cierto que las redes de distribución de agua potable no permanecen invariables a lo largo del tiempo. No obstante, estos modelos se emplean frecuentemente para analizar el comportamiento de la red con los caudales máximos horarios, así se les somete a las condiciones más desfavorables.

b) Dinámicos o de flujo no permanente

A diferencia de los modelos estáticos, en los modelos de tipo dinámico se permite la variación temporal de los caudales demandados e inyectados, de las condiciones operativas de la red y de los niveles en los tanques. Consideran bajo ciertas restricciones, simular la evolución temporal de la red, en un intervalo determinado.

2.7.3. Etapas de modelación de Diseño

La construcción del modelo de simulación hidráulica, tiene las siguientes fases:

2.7.3.1. Determinar el tipo de problemas a resolver

La importancia de esto es determinar el tipo de modelo a desarrollar como el grado de detalle, la variación en el tiempo como las variables del mismo, esto definirá la información necesaria para realizar la construcción del modelo hidráulico. Una definición adecuada del objetivo de la modelación, definirá el costo de la misma y el tiempo para realizarlo.

2.7.3.2. Recopilación de Información

Es parte fundamental del éxito de una modelación, ya que una información confiable y precisa nos llevará a la construcción más parecida a la realidad del sistema de agua potable. esta tarea implica la revisión de planos, estudios demográficos, levantamiento topográfico, revisión de campo, etc. Estas actividades son de gran importancia puesto que los resultados obtenidos en la modelación dependerán directamente de este punto.

2.7.3.3. Topología de la red

Consiste en la manera que están conectados y como están representados los diferentes elementos que constituyen la red de agua potable, para llegar a esta necesitamos el anterior punto. Los principales elementos de una red son divididos y representados de la siguiente manera:

a) Nodos

Los nodos representan el comienzo y el final de una tubería, además pueden representar el consumo tanto de un domicilio como el de un consumo industrial o de servicio público. Generalmente requieren datos de posición geográfica, elevación y demanda de consumo.

b) Depósitos o tanques de almacenamiento

Estos elementos se requiere conocer la siguiente información:

- Ubicación.
- Tipo (elevado, superficial).
- Geometría y capacidad.
- Elevación.
- Elevación de los niveles máximos y mínimos.

c) Fuentes de abastecimiento

Se necesita información del tipo de fuente, la elevación, la cota de la superficie de agua para la alimentación al sistema.

d) Tuberías

Son las que unen los nudos u otros componentes entre sí, con lo cual para su representación es necesario conocer los siguientes datos:

- Nodo inicial y final.
- Diámetro.
- Longitud.
- Material (coeficiente de rugosidad y demás características del mismo).
- Conectividad o topología.

e) Bombas

Será necesario conocer lo siguiente:

- Ubicación dentro de la misma red.
- Elevación.
- Potencia.
- Curva característica.
- Caudal de bombeo.

f) Válvulas

Uno de los elementos que afectan considerablemente la predicción de los caudales y las presiones dentro de la red de distribución es el conocimiento preciso del estado de las válvulas. Los datos que se requieren para iniciar el proceso de simulación son su ubicación y su condición actual (abierta o cerrada), Se pueden considerar varios tipos de válvulas, como las válvulas reguladoras y reductoras de presión. Para este tipo de válvulas se incluirá, en el modelo de simulación, la presión que se desea aguas abajo de la válvula. Otro tipo de válvulas son las limitadoras de caudal, que restringen el caudal de paso a través de la válvula a un valor prefijado.

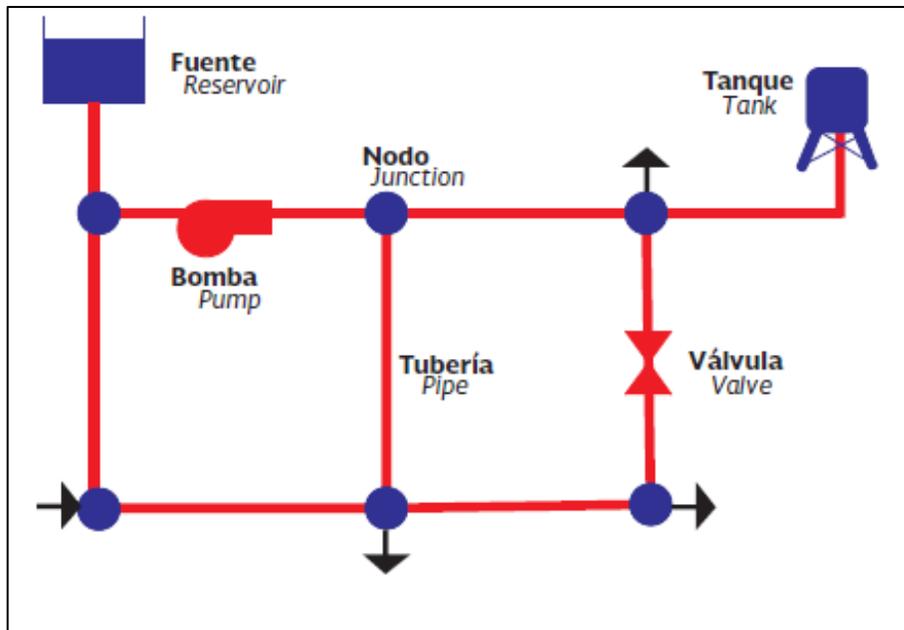


Figura 2.7.1: Representación Topológica de una red de agua potable.

Fuente: CONAGUA (2015).

2.7.3.4. Asignación de demanda

La demanda en los nodos de consumo es la variable que más incidencia tendrá en la respuesta del modelo, de esta dependerá la ubicación, dimensiones y materiales de la mayoría de los elementos de la red. En resumen, cuando se construye un modelo de simulación hidráulica se consideran tres aspectos respecto del consumo de agua:

- El caudal que satisface la demanda.
- Ubicación los puntos de consumo.
- EL objetivo de la demanda.

2.7.4. Principales softwares

Los más conocidos y usados en nuestro medio son EPANET, WaterCAD y por su relación con la NB-689 el AquasystemS PRO.

A continuación, se detalla cada uno de estos:

2.7.4.1. EPANET

El modelo EPANET simula el comportamiento hidráulico y de la calidad del agua durante largos periodos de tiempo. EPANET monitoriza el caudal de agua en cada tubería, la presión en cada nodo, la altura del agua en cada tanque y la concentración de especies químicas (Manual del usuario de EPANET) mediante la ecuación de continuidad y la ecuación de Bernoulli. EPANET se puede aplicar para modelar el análisis de cloro residual, comprender el destino y el movimiento de los componentes en el sistema de agua potable, modelar la exposición de los consumidores y mejorar la calidad del agua en el sistema, incluyendo la limpieza de tuberías y la modificación del uso de las fuentes en múltiples fuentes del sistema.

El software cuenta con varias características clave, como la capacidad de usar computación en la nube, acceder a un conjunto de datos de libre acceso cuando no hay datos disponibles y herramientas de visualización. EPANET fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y solo está disponible para el sistema operativo Windows (The World Bank, 2020).

Es un programa de ordenador que realiza simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico de una red que puede estar constituida por tuberías, nudos (uniones de tuberías), bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento o embalses.

EPANET efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nudos, los niveles en los depósitos, y la concentración de las especies químicas presentes en el agua, a lo largo del periodo de simulación discretizado en múltiples intervalos de tiempo. Además de la concentración de las distintas especies, puede también simular el tiempo de permanencia del agua en la red y su procedencia desde las diversas fuentes de suministro. (Grupo de Redes Hidráulicas y Sistemas a Presión., 2017).

a) Capacidades para la confección de Modelos Hidráulicos

- No existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse.
- Las pérdidas de carga pueden calcularse mediante las fórmulas de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o de Chezy-Manning.

- Contempla pérdidas menores en codos, accesorios, etc.
- Admite bombas de velocidad fija o variable.
- Determina el consumo energético y sus costes.
- Permite considerar varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de retención, y reguladoras de presión o caudal.
- Admite depósitos de geometría variable (esto es, cuyo diámetro varíe con el nivel).
- Permite considerar diferentes tipos de demanda en los nudos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo.
- Admite leyes de control simples, basadas en el valor del nivel en los depósitos o en la hora prefijada por un temporizador, y leyes de control más complejas basadas en reglas lógicas.

2.7.4.2. WaterCAD

WaterCAD es el software para modelación de sistemas de abastecimiento de agua potable más usado a nivel mundial. Este programa permite al modelador un manejo integral de las redes de distribución de agua potable, en donde se incluye la simulación hidráulica, calibración y el diseño optimizado de redes, así como también, una mayor eficiencia en los procesos de gestión de datos, construcción de modelos, preparación de escenarios, cálculo hidráulico y preparación de reportes y planos. El programa es propiedad de Bentley de Estados Unidos, comercializadores de software como Cybercad, StormCad y otros.

WaterCAD es un software de análisis, modelación y gestión de redes a presión (sistemas de distribución o de riesgo que produce soluciones para el diseño, construcción y operación de infraestructuras en diversos campos). Permite la simulación hidráulica de un modelo computacional representado por elementos tipo: Línea (tramos de tuberías), Punto (Nodos de Consumo, Tanques, Reservorios, Hidrantes) e Híbridos (Bombas, Válvulas de Control, Regulación, etc.).

Así pues, este software permite realizar una calibración automática de modelos de modo que el modelo refleje el comportamiento real (con datos de campo) y así estudiar los

problemas existentes. También permite realizar un diseño optimizado de redes, maximizar beneficios para costos mínimos también realizar diseños óptimos (Fernandez, 2015).

a) Capacidades para la confección de Modelos Hidráulicos

- El programa permite realizar el análisis hidráulico para estados estáticos o simulación en periodos extendidos, además del análisis de flujo contra incendios en todo tipo de redes.
- Calcula pérdidas de carga utilizando las ecuaciones de Manning, Hazen Williams y Darcy-Weisbach.
- Determina caudales, presiones, niveles de agua en el tanque, velocidades, concentración de componentes químicos, tiempo de permanencia del agua, etc. de todos los elementos de la red.
- Cuenta con una función de gestión de múltiples escenarios de trabajo, para analizar las diversas alternativas de diseño.
- Admite bombas de velocidad fija o variable.
- Estimación de gastos energéticos.
- Permite considerar varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de retención, y reguladoras de presión o caudal.

2.7.4.3. AquasystemS PRO

Método presentado por los Hermanos Marcos y Santiago Caballero C. que hace uso de bloques programables en AutoCAD reflejando las condiciones de la NB-689, la utilización se orienta a la concepción de diseño establecida por el ingeniero y a la aplicación de la normativa reglamentaria. El software se adapta a las necesidades del proyectista, y no el ingeniero a los requerimientos del programa.

AquasystemS PRO propone una metodología práctica y ágil para establecer condiciones de flujo en una tubería de conducción presurizada, lo que permite al ingeniero determinar la hidráulica de diversas situaciones reales de conducción presurizada mediante un análisis detallado visual por el mismo ingeniero, independizándolo de las soluciones de paquetes de software.

Debido a que la metodología propuesta es básicamente gráfica, es aconsejable desarrollar el trabajo dentro de un programa dibujo tipo CAD (Caballero y Caballero, 2016).

a) Propósito del uso de AquasystemS PRO

- Se alinea con el criterio del ingeniero, no al revés.
- Aplica normativas como la NB 689.
- Está diseñada para resolver situaciones reales de diseño donde el caudal no es una incógnita, sino el dato de partida.
- Presenta una metodología propia basada en gradientes de pérdida de carga para diseñar tuberías.

b) Metodología de diseño hidráulico con AquasystemS PRO

- Trazado de líneas de energía en perfiles longitudinales.
- Uso de gradientes de pérdida para determinar el diámetro necesario de la tubería.
- Se evita el uso exclusivo de fórmulas iterativas; el análisis es gráfico, visual y controlado por el proyectista.
- Se desprecia la influencia de pérdidas menores cuando representan menos del 5% de la pérdida total, como establece la NB 689.

c) Aplicaciones del método en AquasystemS PRO

- Aducciones por gravedad.
- Captación desde varias fuentes.
- Distribución hacia varios tanques.
- Impulsión desde bombas hacia depósitos.
- Cualquier sistema con condiciones de energía conocidas en sus extremos.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Método

La investigación se desarrolló bajo un método deductivo y comparativo. Fue deductiva al partir de principios teóricos generales, como las leyes de la hidráulica y los criterios de la norma NB-689, para aplicarlos al caso de estudio específico del diseño para la comunidad de Chirimoyal. A su vez, fue comparativa al analizar sistemáticamente las características, capacidades y resultados de tres herramientas de software (WaterCAD, EPANET y AquasystemS PRO), contrastando sus enfoques para resolver los mismos desafíos de diseño.

3.2. Tipo de Investigación

Corresponde a una investigación de tipo aplicada, ya que su objetivo principal no es generar nueva teoría hidráulica, sino resolver un problema práctico y concreto: proporcionar información útil que guíe a los profesionales de la ingeniería civil en Bolivia en la selección de la herramienta de software más adecuada para sus proyectos de agua potable.

3.3. Nivel de Investigación

El estudio se enmarca en un nivel descriptivo-comparativo con alcance explicativo. Es descriptivo porque detalla las características y funcionalidades de cada software. Es comparativo porque contrasta sistemáticamente estas características entre sí. Y alcanza un nivel explicativo al analizar las causas de las diferencias en los resultados numéricos, atribuyéndolas a las distintas filosofías de modelado y metodologías de cálculo de cada software.

3.4. Enfoque

Se utilizó un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo). El enfoque cuantitativo se empleó para medir y comparar los resultados hidráulicos numéricos (presiones, caudales, velocidades) generados por cada software. El enfoque cualitativo se aplicó al realizar una evaluación interpretativa de características no numéricas, como la trabajabilidad de la interfaz, la flexibilidad del flujo de trabajo y la facilidad de cumplimiento normativo, todo

ello basado en la experiencia y el juicio del investigador durante el desarrollo del caso de estudio.

3.5. Delimitación del Estudio

3.5.1. Ubicación geográfica

El estudio se realizará en la localidad de Chirimoyal, Municipio de Yacuiba provincia Gran Chaco del departamento de Tarija-Bolivia.

Su ubicación geográfica es:

Latitud Sur.	Longitud Oeste.
21° 47' 27,42"	63° 29'18,18"
Altitud (Z) = 530 m.s.n.m.	



Figura 3.5.1: Ubicación geográfica contexto nacional.

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Departamento_de_Tarija#/media/Archivo:Tarija_in_Bolivia.svg.



Figura 3.5.2: Ubicación geográfica contexto municipal.

Fuente: Gobierno Autónomo Municipal de Yacuiba (2016).

3.5.2. Descripción Fisiográfica

El área de influencia del proyecto se ubica dentro la zona.

La llanura chaqueña, está caracterizada por amplias extensiones de tierra en las que se presentan pequeñas ondulaciones significativas. El clima es árido con una precipitación promedio de 550 mm, y temperaturas altas. Se caracteriza por una morfología homogénea y casi plana con algunas ondulaciones, donde se tienen formas, tanto deposicionales como erosionales, notándose también la presencia de terrazas aluviales y amplias llanuras aluviales. En las llanuras aluviales la pendiente topográfica con relación al drenaje casi ha desaparecido completamente. Todos los depósitos superficiales en las llanuras aluviales y terrazas son sedimentos cuaternarios de origen aluvial (Gobierno Autónomo Municipal de Yacuiba, 2016).

3.5.3. Descripción hidrográfica

El Municipio de Yacuiba forma parte del gran sistema hidrográfico de la cuenca del Río de La Plata, el sistema hidrográfico del municipio es el del río Pilcomayo.

3.5.4. Geomorfológicamente

Presenta un paisaje con relieve accidentado. En el lugar se puede observar que los suelos del área forman un valle aluvial constituido por sedimentaciones aluviales especialmente reciente, proveniente del material acarreado por los ríos, así como de todas las acequias existentes en gran número en la zona.

3.5.5. Clima

El sector meridional donde se encuentra el Centro urbano de Caiza Villa Ingavi está clasificado climáticamente como llanura Chaqueña Semihúmedo Seco, la mayor parte del año se tiene clima cálido con elevadas temperaturas, teniendo clima frío entre los meses de junio a agosto.

3.5.6. Población del Área del Proyecto

La población diferenciada por sexo en la comunidad del área de influencia del proyecto es aproximadamente a 210 habitantes, de los cuales 56% son hombres y 44% son mujeres, con un índice de masculinidad de 1,18 hombres por cada mujer. Tal como se observa en la tabla 3.5.1.

Tabla 3.5.1: Población diferenciada por sexo.

COMUNIDAD	SEXO		TOTAL
	HOMBRES	MUJERES	
Chirimoyal	116	95	210
TOTAL	116	95	210
Índice de Masculinidad 1,18 hombre por mujer			

Fuente: Gobierno Autónomo Municipal de Yacuiba.

El proyecto, comprende el diseño de un Sistema de Agua Potable para beneficiar en forma directamente a 32 familias.

3.5.6.1. Tamaño Promedio de las Familias.

El número de familias que habitan en el área de influencia del proyecto es de 32, tal como se observa en la tabla 3.5.2.

Tabla 3.5.2 Número de familias.

COMUNIDAD	Nº DE FAMILIAS	TAMAÑO PROMEDIO
Chirimoyal	32	6,56
TOTAL	32	6,56

Fuente: Gobierno Autónomo Municipal de Yacuiba.

En relación al tamaño promedio de las familias, se puede indicar según información presentada en el Cuadro anterior, que este fluctúa entre las 6 a 7 personas, siendo el promedio de 6 miembros por cada familia (Gobierno Autónomo Municipal de Yacuiba, 2016).

3.5.6.2. Estabilidad Poblacional

La migración junto con las tasas de natalidad y mortalidad son las variables que determinan el crecimiento y la estructura de la población.

Según los datos del censo de Población y Vivienda 2014, indican que el Municipio de Yacuiba, lugar donde se encuentra ubicada la localidad beneficiaria, tiene una tasa de crecimiento intercensal de 1,7%, baja en comparación con otros Municipios. (Gobierno Autónomo Municipal de Yacuiba).

La comunidad en la actualidad tiene un comité de agua potable, denominada EPSA capis de Chirimoyal.

3.6. Información inicial

3.6.1. Topografía

El levantamiento topográfico del área de estudio se realizó a partir de información oficial proporcionada por el Gobierno Autónomo Municipal de Yacuiba, consistente en

coordenadas georreferenciadas de puntos de control y Bench Marks (BMs). Estos datos permitieron establecer una base confiable para el modelado de la topografía y el trazado del sistema de aducción y distribución de agua.

3.6.2. Población

Para el cálculo de la demanda poblacional y proyecciones futuras, se utilizó información demográfica proporcionada por el Gobierno Autónomo Municipal de Yacuiba. Dichos datos incluyeron la población actual de la comunidad, tasas de crecimiento estimadas y características poblacionales relevantes.

Tabla 3.6.1: Población Beneficiaria.

COMUNIDAD	Hombres	Mujeres	Total	N.º Familias
CHIRIMOYAL	116	95	210	32
TOTAL	116	95	210	32

Fuente: Gobierno Autónomo Municipal de Yacuiba.

3.6.3. Instituciones

La comunidad beneficiaria tiene una infraestructura educativa, donde asiste la población en edad escolar, en la Unidad Educativa Chirimoyal se tiene un total de 56 alumnos donde asisten alumnos de la comunidad y de comunidades vecinas (Gobierno Autónomo Municipal de Yacuiba, 2016).

Tabla 3.6.2: Estudiantes U.E. Chirimoyal

UNIDAD EDUCATIVA	TOTAL, NIVEL			TOTAL U.E.
	INICIAL	PRIMARIA	SECUNDARIA	
Chirimoyal	18	38	0	56
TOTAL	18	38	0	56

Fuente: Gobierno Autónomo Municipal de Yacuiba.

3.6.4. Dotación

No se cuenta con mediciones directas del consumo de agua en la comunidad, por lo que la estimación de la demanda se realizó utilizando consumos per cápita recomendados por la normativa boliviana NB 689.

3.6.5. Softwares

Para el desarrollo del presente proyecto, se ha utilizado los siguientes:

- **Microsoft Excel:** Para cálculo de población, demanda y pérdidas de carga.
- **AutoCAD Civil 3D:** Para elaboración de planos topográficos y planos para traspasar información DXF.
- **WaterCAD V8i:** Para simular caudales, presiones y velocidades en el sistema completo, direccionado al diseño del mismo.
- **EPANET 2.2:** Para validación del diseño hidráulico bajo condiciones críticas del sistema de agua potable.
- **AquasystemS PRO:** de igual manera se utilizó para el diseño hidráulico del sistema de agua potable Chirimoyal.

CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1. Información general

Debido a la ausencia de fuentes de agua superficial cercanas a la comunidad de Chirimoyal, se descarta la captación desde ríos o quebradas de la zona, ya que su implementación requeriría una inversión elevada, haciendo esta alternativa técnica y económicamente inviable.

Existe un pozo profundo, ubicado en los límites colindantes con la comunidad de Caiza – Villa Ingavi. El propietario ha autorizado, de manera solidaria, que la comunidad de Chirimoyal utilice el recurso hídrico de dicho pozo para consumo exclusivamente humano, mediante un sondeo eléctrico vertical (SEV) (véase Anexo A), se determinó la profundidad de instalación de la bomba de 85m.

El agua será impulsada desde el pozo mediante una línea de aducción de tubería hasta un tanque elevado de hormigón armado (H^oA^o) previamente construido (20m; 30m³). Desde este reservorio, el sistema operará por gravedad para abastecer a la comunidad a través de una red de distribución diseñada según la demanda estimada.

4.2. Parámetros de diseño

4.2.1. Definición del periodo de diseño (T)

- Por recomendación de la NB-689 se adopta un periodo de diseño de 20 años.

$$T = 20 \text{ años.}$$

4.2.2. Cálculo de la Población del proyecto (Pf)

$P_o = 210$ Hab. (fuente, G.A.M.Y.).

$i = 1,7\%$ (fuente, G.A.M.Y.).

$T = 20$ años.

- a) Crecimiento Aritmético

$$Pf = P_o * \left(1 + \frac{i * T}{100} \right) = 281 \text{ hab.}$$

b) Crecimiento Geométrico

$$Pf = Po * \left(1 + \frac{i}{100}\right)^T = 294 \text{ hab.}$$

Se adopta el siguiente resultado:

$$Pf = 288 \text{ Hab.}$$

4.2.3. Dotación media diaria (Do)

Chirimoyal se encuentra en la zona geográfica de los llanos y de acuerdo al tamaño de la población se adopta una dotación inicial de **90 l/Hab-d.**

4.2.4. Dotación futura de agua (Df)

Se trabajará con un coeficiente de variación anual de la dotación de 1,7 % porque el sistema está en funcionamiento, pero año a año van aumentando los beneficiarios.

$$Do = 90 \text{ l/Hab-d.}$$

$$D = 1,7 \%$$

$$T = 20 \text{ años.}$$

$$Df = Do * \left(1 + \frac{d}{100}\right)^T = 126,08 \frac{l}{\text{hab} * \text{dia}}$$

$$Df = 126,08 \text{ l/Hab-d.}$$

4.2.5. Consumo medio diario anual (Qmd)

$$Df = 126,08 \text{ l/Hab-d.}$$

$$Pf = 288 \text{ Hab.}$$

$$Q_{md} = \frac{Pf * Df}{86400} = 0,42 \frac{l}{s}$$

$$Q_{md} = 0,42 \text{ l/s.}$$

4.2.6. Consumo máximo diario (Qmaxd)

En poblaciones pequeñas las variaciones son altas, por lo tanto, se adopta el valor máximo de 1,5.

$$Q_{md} = 0,42 \text{ l/s.}$$

$$K_1 = 1,5.$$

$$Q_{max.d} = K_1 * Q_{md} = 0,63 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$Q_{maxd} = 0,63 \text{ l/s.}$$

4.2.7. Consumo máximo horario (Q_{maxh})

En poblaciones pequeñas las variaciones son altas, por lo tanto, se adopta el valor máximo de 2,2.

$$Q_{maxd} = 0,63 \text{ l/s.}$$

$$K_2 = 2,2.$$

$$Q_{max.h} = K_2 * Q_{maxd} = 1,39 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$Q_{maxd} = 1,39 \text{ l/s}$$

4.2.8. Cálculo caudal unitario (Q_u)

Como el número de conexiones superan a las 30, se utiliza un método de red cerrada.

$$Q_{maxd} = 1,39 \text{ l/s.}$$

$$N_f = 32 \text{ (G.A.M.Y.)}$$

$$Q_u = \frac{Q_{maxh}}{N_f} = 0,043 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$Q_u = 0,043 \text{ l/s.}$$

4.2.9. Caudales de instituciones (Q_e)

Escuela cuenta con una asistencia de 56 alumnos externos y 4 profesores quienes son permanentes (G.A.M.Y.).

$$N^\circ \text{ Alum.} = 56.$$

$$N^\circ \text{ Prof.} = 4.$$

$$\text{Dot. Prof.} = 120 \text{ l/d. (Tabla 2.6.5).}$$

Dot. Alum = 50 l/d. (Tabla 2.6.5).

$$Q_e = \frac{(N^\circ Alum. \times Dot. Alum.) + (N^\circ Prof. \times Dot. Prof.)}{86400} = 0,040 \frac{l}{s}$$

$$Q_e = 0,040 \text{ l/s.}$$

4.2.10. Caudal de bombeo (*Q_b*)

El sistema contará con una aducción por bombeo, la cual tendrá dos arranques de 4 horas y llevará a un tanque elevado:

$$N = 8 \text{ hr.}$$

$$Q_{maxd} = 0,63 \text{ l/s.} + 0,04 \text{ l/s} = 0,67 \text{ l/s.}$$

$$Q_b = Q_{maxd} * \frac{24}{N} = 2,00 \frac{l}{s}$$

$$Q_b = 2,00 \text{ l/s.}$$

4.3. Proceso de simulación

4.3.1. Definición del objetivo de simulación

- Diseño sistema de agua potable Comunidad Chirimoyal.

4.3.2. Preparación de datos topográficos

El levantamiento topográfico realizado en la comunidad de Chirimoyal proporcionó una nube de puntos como resultado principal, la cual contiene coordenadas tridimensionales que representan la superficie del terreno. Esta información bruta requiere un procesamiento previo antes de ser utilizada en el diseño del sistema de agua potable.

El proceso inicia con la evaluación y depuración de la nube de puntos, eliminando datos erróneos, duplicados o inconsistencias que puedan afectar la precisión del modelo. Posteriormente, los puntos válidos se transforman a un formato compatible con el software AutoCAD Civil 3D, donde se genera un modelo digital del terreno (MDT).

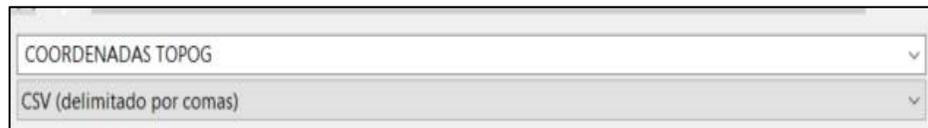
La representación digital del terreno en Civil 3D permite trabajar con superficies topográficas precisas, esto es fundamental para el diseño de la red de distribución de agua

potable, simulaciones hidráulicas, análisis de alternativas y principalmente para la definición de trazados de tuberías.

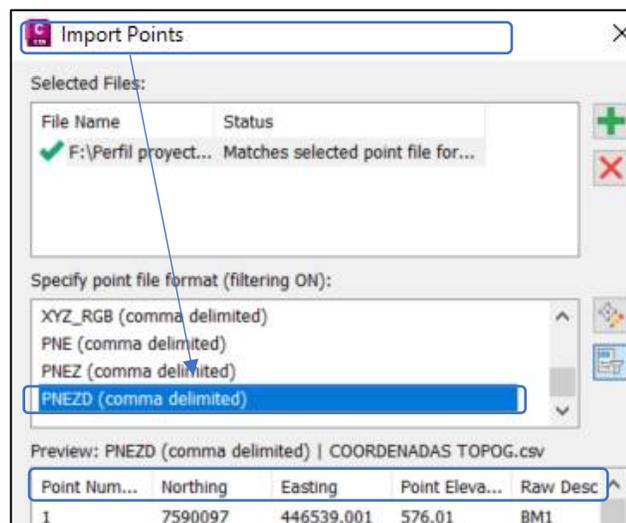
4.3.2.1. Topografía

Obtención de puntos del levantamiento topográfico de la zona, recibidos formato Excel.

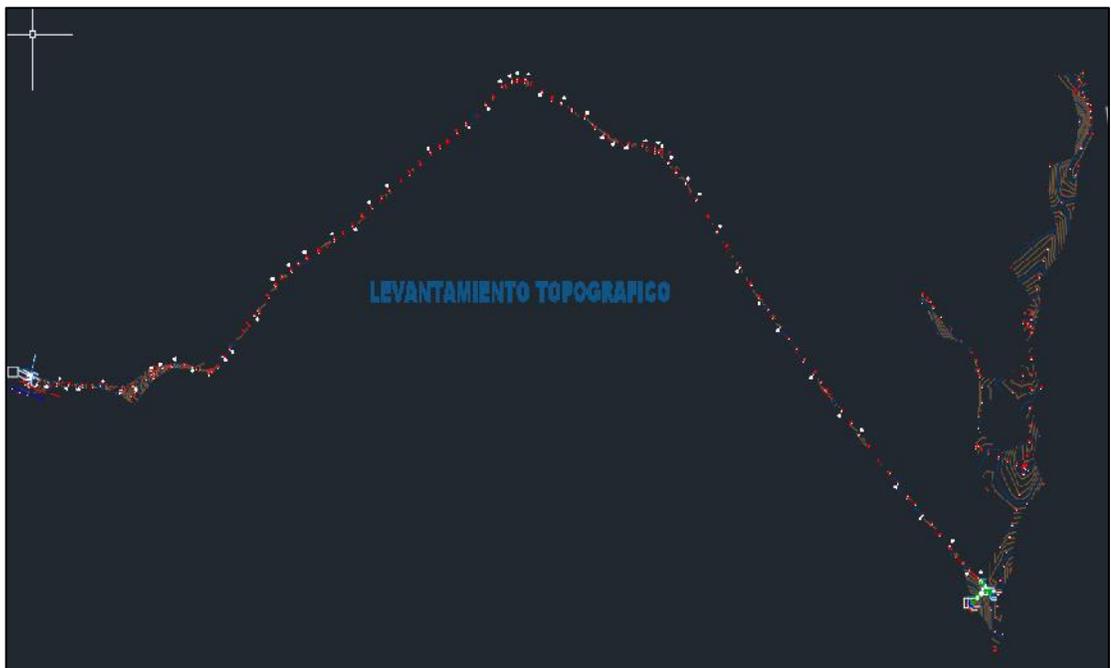
- Revisión y procesamiento de datos del levantamiento topográfico mediante Excel, ordenar desde primera columna hacia la derecha (N° Punto, N, E, Z, D.) y guardar archivo en formato CSV (delimitado por comas).



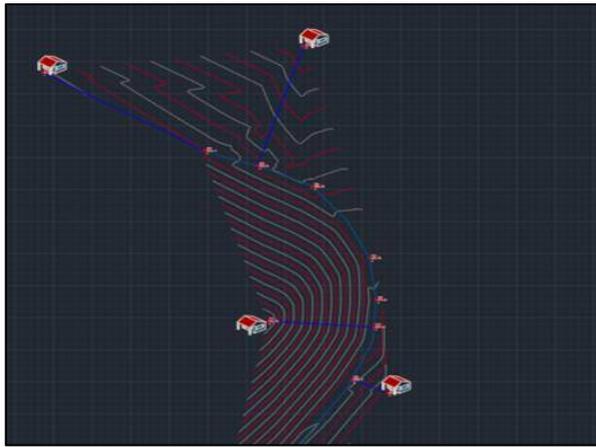
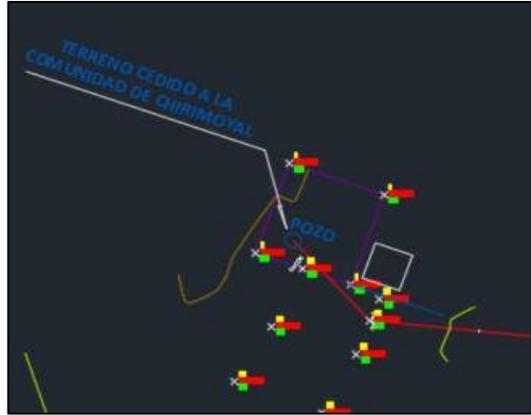
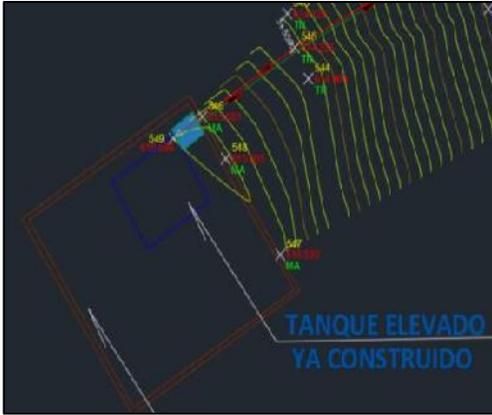
- Para importar archivos CSV en Civil 3D, se accede a la pestaña Home, dentro del panel Create Ground Data, y se selecciona la opción Points, seguida de Import Points. En la ventana de importación, se añade el archivo CSV mediante el botón "+", y se especifica el formato correspondiente de acuerdo al orden de las columnas del archivo, por ejemplo, PNEZD (comma delimited) para archivos delimitados por comas que contienen las columnas Punto, Norte, Este, Cota y Descripción. Es fundamental que el archivo no contenga encabezados y que el delimitador coincida con el especificado. Finalmente, se confirma la operación haciendo clic en OK, lo que permite incorporar los puntos topográficos al modelo del proyecto.



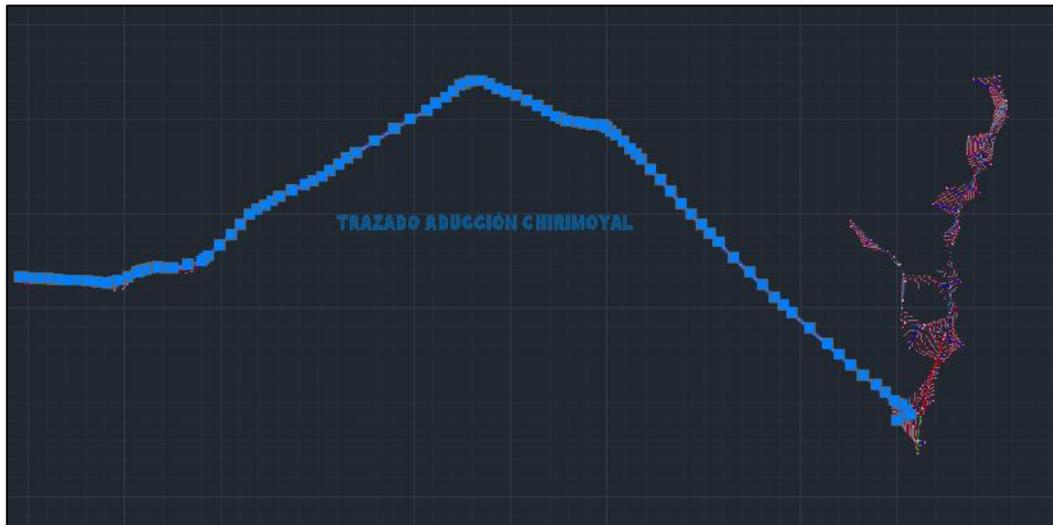
- Con los puntos topográficos importados en Civil 3D se procede a la representación digital del terreno correspondiente al sistema de aducción y a la red de distribución. Esta representación se materializa mediante la generación de una superficie topográfica del tipo TIN (Triangulated Irregular Network), la cual permite modelar con precisión el relieve natural del área de estudio. La superficie generada constituye la base para el análisis altimétrico y el posterior diseño del sistema de agua potable, ya que a partir de ella se obtienen las cotas, pendientes y trayectorias necesarias para la correcta ubicación de las tuberías, estructuras de captación, cámaras de ruptura, válvulas y demás componentes hidráulicos del proyecto. En el siguiente gráfico, se observa la presentación digital de la aducción y red distribución.



- En los siguientes gráficos se identifican los principales componentes del sistema de agua potable: la fuente de abastecimiento, el tanque de almacenamiento, los domicilios de los beneficiarios y la unidad educativa. Estos elementos son indispensables para la correcta modelación y diseño del sistema, ya que permiten establecer los puntos de captación, almacenamiento, distribución y consumo dentro del modelo hidráulico.



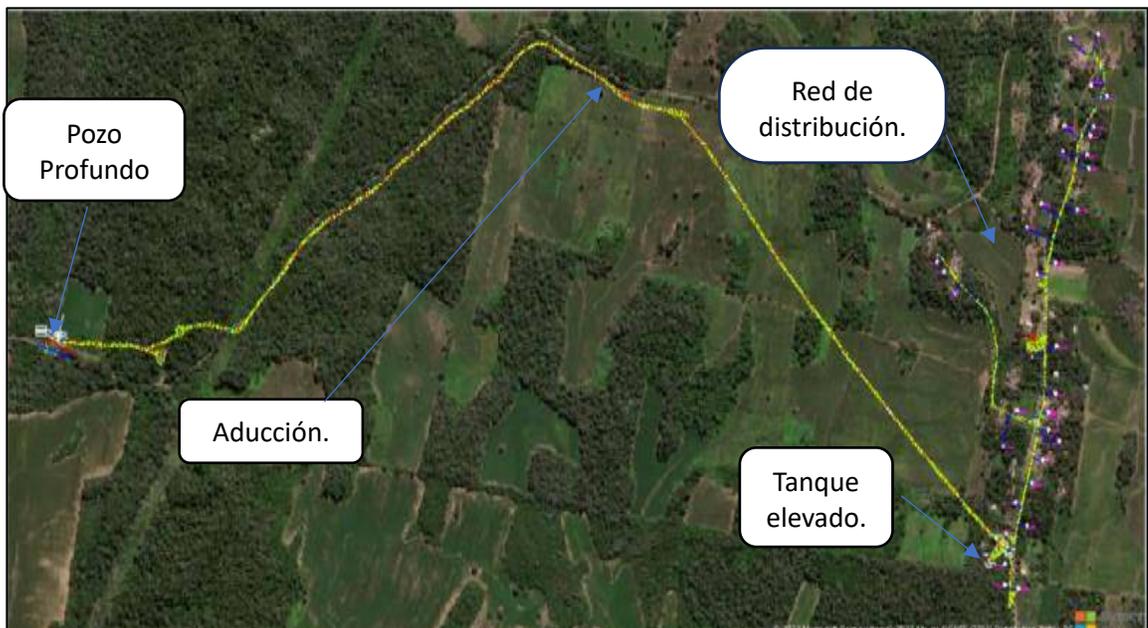
- Trazado aducción, importante usar herramienta polilínea 3D. Durante el trazado, se respetaron las recomendaciones técnicas establecidas por la Norma Boliviana NB-689, que regula los criterios para sistemas de abastecimiento de agua potable en el ámbito rural.



- El trazado de la red de distribución se realizó identificando previamente la ubicación de los domicilios de los beneficiarios mediante coordenadas obtenidas en el levantamiento topográfico. Se respetaron los lineamientos establecidos en la **Norma Boliviana NB-689**.



- Como parte del proceso de validación del modelo topográfico y del trazado del sistema, se utilizó de forma obligatoria la herramienta Geolocation de AutoCAD Civil 3D. Esta herramienta permite insertar coordenadas geográficas y superponer imágenes satelitales de alta resolución directamente en el entorno de trabajo.



Para la modelación hidráulica del sistema, se trabajó la línea de aducción y la red de distribución en modelos separados, debido a la presencia de un tanque de almacenamiento elevado. Este elemento introduce una división natural en el sistema hidráulico, ya que, en el punto de contacto con la atmósfera, la presión se iguala a cero (presión manométrica), según los principios de hidráulica.

4.3.3. Aplicación WaterCAD

A continuación, se presentará la estructuración para la aplicación de los datos obtenidos en campo, procesados y preparados para utilizarlos en la correcta modelación en el diseño del sistema de agua potable Chirimoyal, desde la configuración de las unidades, construcción topológica, diseño de la bomba aplicando las diferentes herramientas que nos ofrece el software y resultados que nos presenta, teniendo en cuenta las recomendaciones y restricciones de la NB-689.

4.3.3.1. Aducción

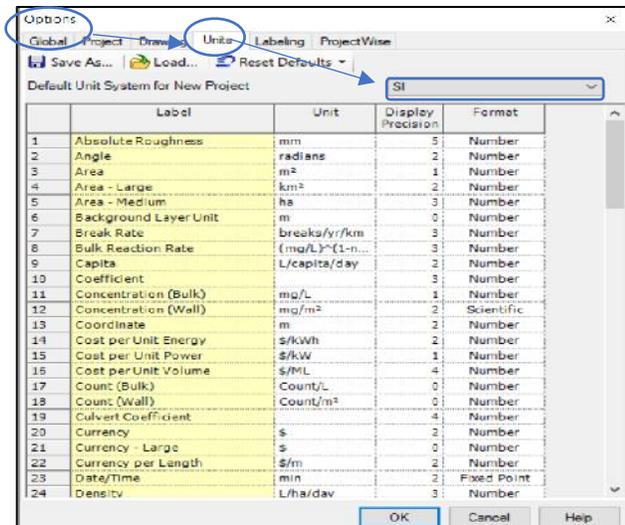
Verificación de restricciones, una vez simulado el sistema de agua potable, se debe verificar las restricciones de la NB-689 que en aducción son las siguientes:

- Velocidad máxima 2 m/s y una velocidad mínima de 0,30 m/s, pero se debe considerar una velocidad máxima de 1,50 m/s para ayudar a mitigar el golpe de ariete.
- Profundidad de instalación de tubería, en áreas de cultivo, cruce de caminos, líneas de ferrocarril o aeropuertos, la profundidad mínima debe ser de 1,00 m sobre la clave de la tubería. El proyectista debe justificar el uso de valores menores al indicado si estos cuentan con un sistema de protección.
- Presión mínima debe ser mayor 2 m.c.a. a excepción en los puntos iniciales y finales.

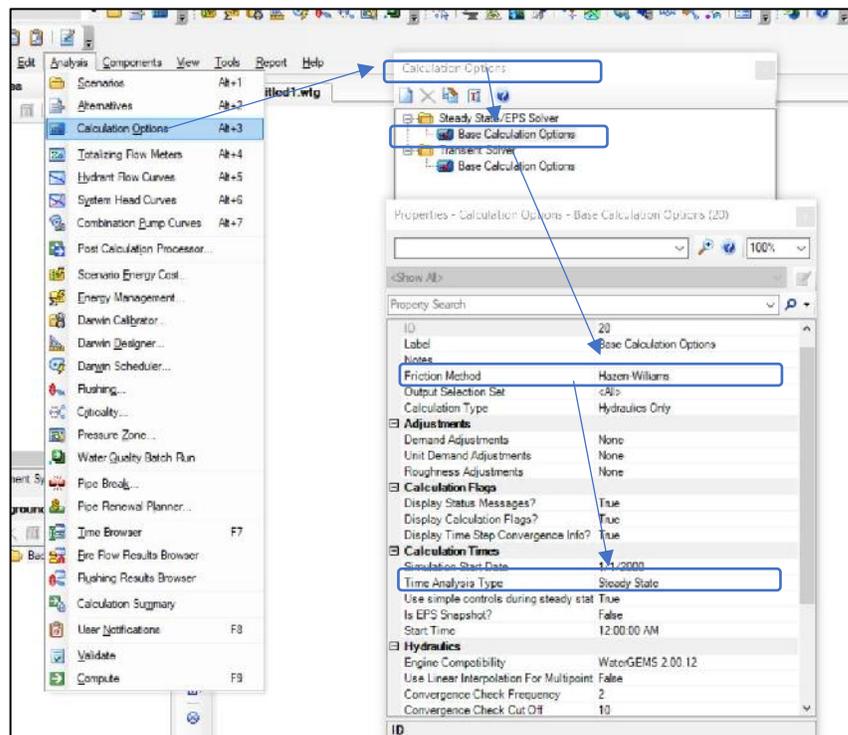
a) Configuración

Definición de Unidades, materiales y el método de cálculo que se utilizará en el sistema, asegurando que los procesos sean precisos, eficientes y adaptados a los requerimientos establecidos.

- Crear nuevo proyecto, configurar unidades en las pestañas opciones, Units. Colocar S.I. (Sistema internacional)

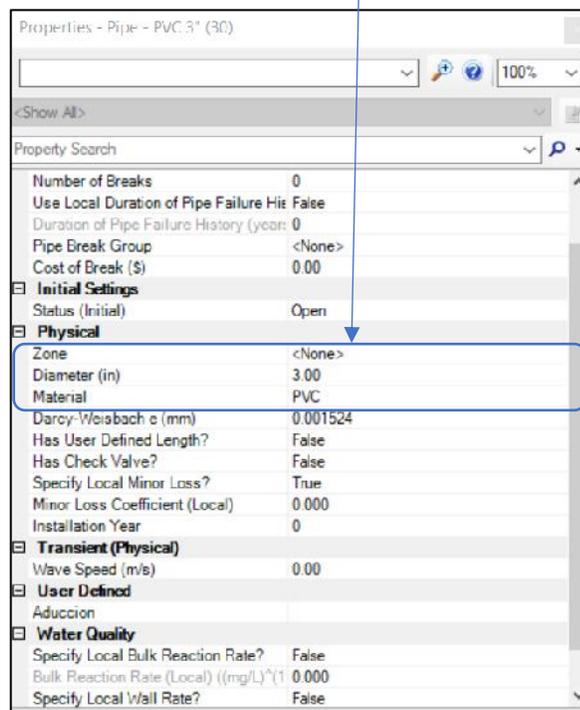
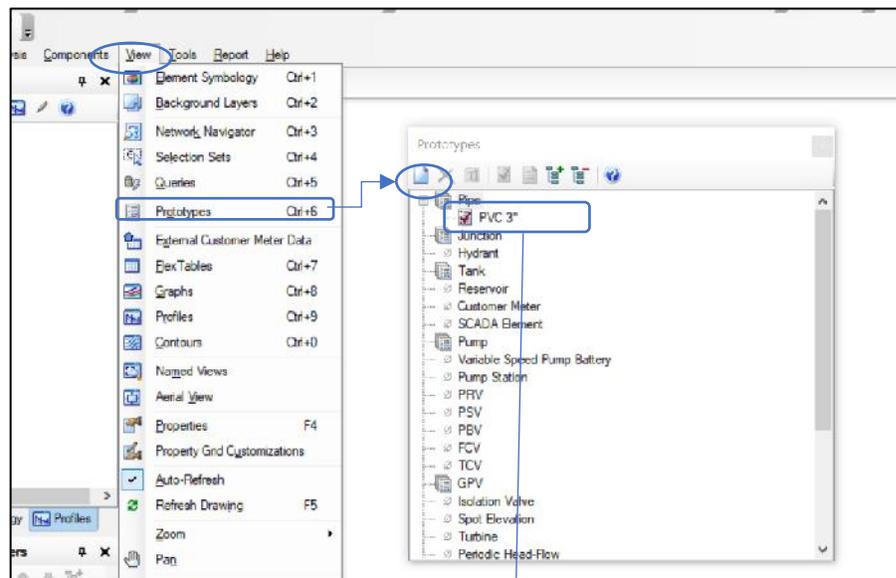


- Para la modelación hidráulica del sistema, se procedió a configurar el método de cálculo de pérdidas de carga y el tipo de análisis hidráulico según los requerimientos del proyecto.



- Para asignar las características físicas e hidráulicas a las tuberías del modelo, se accedió a la pestaña View > Prototypes en WaterCAD. Desde esta sección, se seleccionó la opción New > Pipe para crear un nuevo prototipo de tubería con propiedades específicas, acorde a los materiales utilizados en el diseño del sistema de

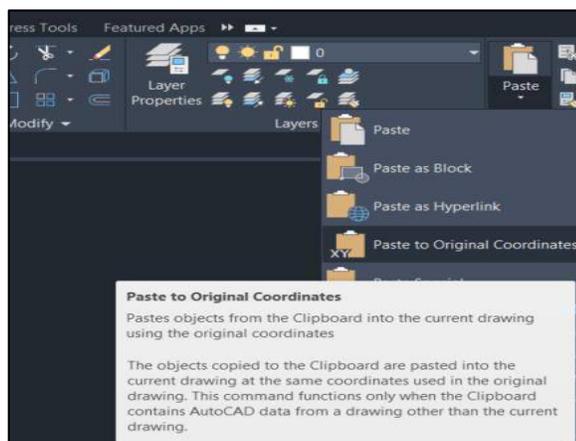
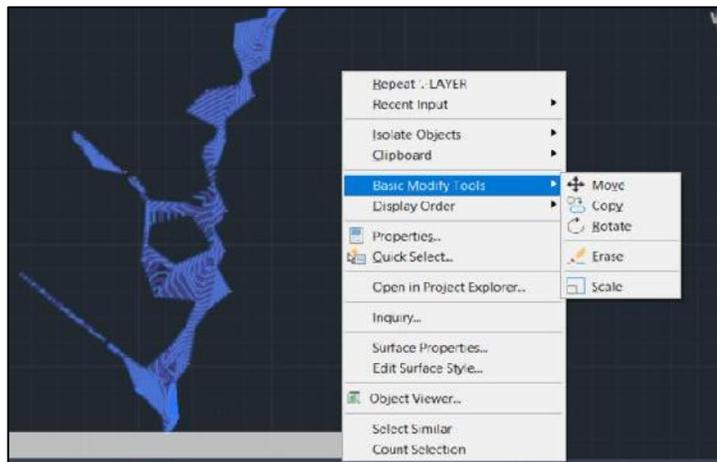
agua potable, al escoger material (PVC) el programa asigna automáticamente coeficientes de pérdida de carga.



b) Construcción topológica

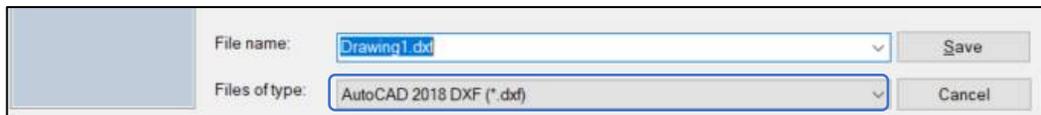
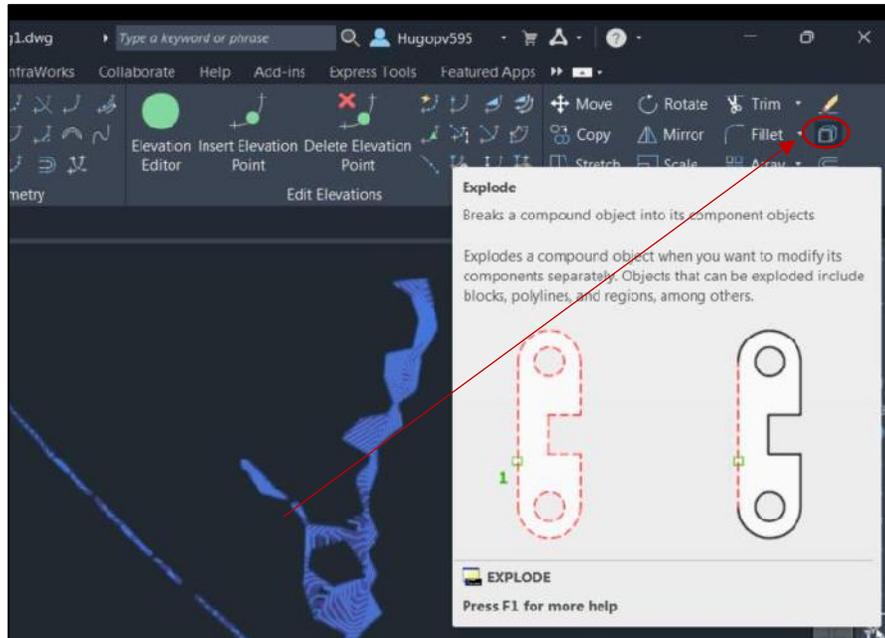
Para ello, es fundamental contar con una base topográfica precisa que permita referenciar correctamente la ubicación y altitud de cada componente del sistema.

- La topografía previamente trabajada en AutoCAD Civil 3D se exporta en un formato compatible con WaterCAD, como DXF, LandXML u otros admitidos por el software. Antes de la exportación, se realiza una copia de la superficie en un archivo nuevo, utilizando la función Copiar con punto base y Pegar a coordenadas originales, asegurando que las curvas de nivel, elevaciones y geometría conserven su ubicación real y no se desplacen en el espacio.
- Este procedimiento es crucial, ya que cualquier alteración en las coordenadas puede comprometer la precisión del modelo topológico, afectando el cálculo de cotas, pendientes y presiones.



- Explotar la superficie copiada y convertirla en polilíneas 3D con información de elevación y coordenadas, se descompone la geometría en elementos editables, se verifica que conserven los datos de altura (Z) y se exporta el archivo en formato DXF,

asegurando que se incluyan los valores 3D. Finalmente, se valida que las polilíneas mantengan sus coordenadas X, Y, Z, guardar archivo con formato DXF.

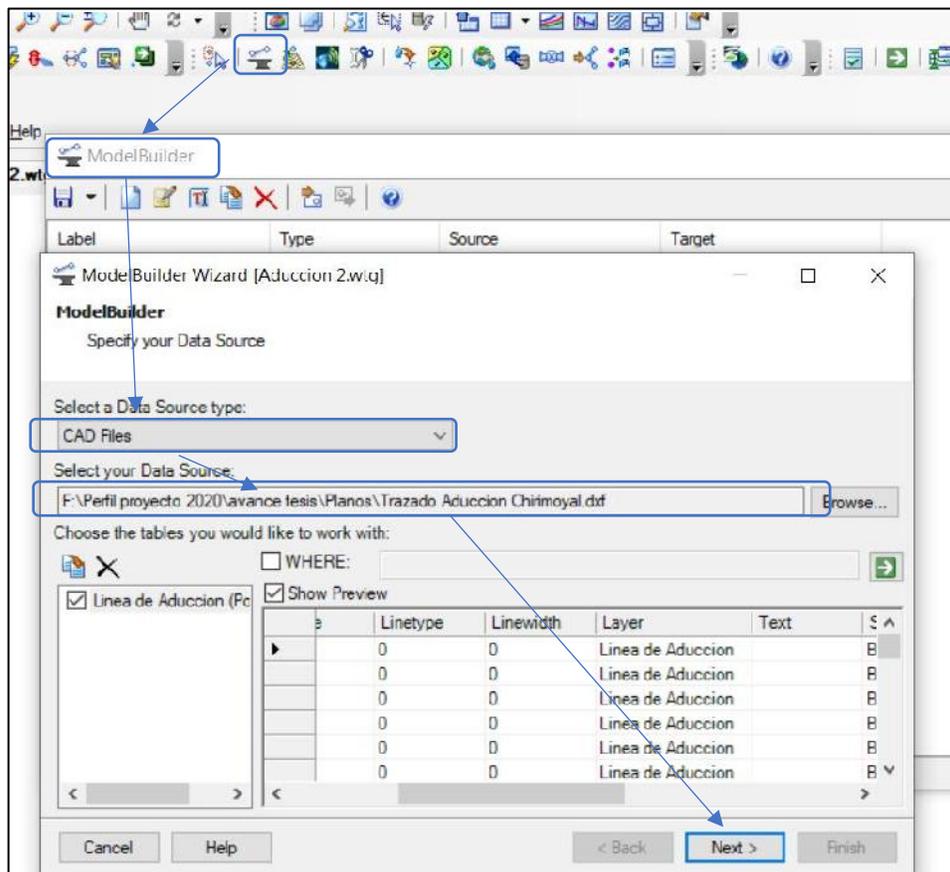


- Para el trazado de la aducción, se realiza el mismo procedimiento antes descrito, a diferencia que en este archivo se guardarán líneas cuya información importante son las coordenadas y el inicio y final de cada línea trazada.

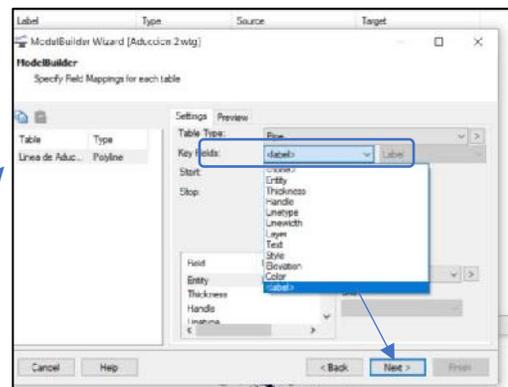
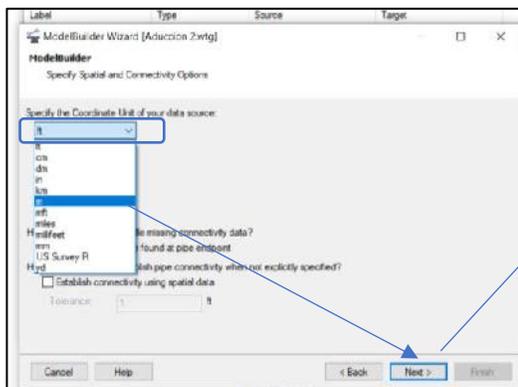
	<i>Trazado Aduccion Chirimoyal</i>	<i>4/11/2025 2:30 AM</i>	<i>Intercambio de dib...</i>	<i>946 KB</i>
	<i>Topografía</i>	<i>4/11/2025 2:28 AM</i>	<i>Intercambio de dib...</i>	<i>4,002 KB</i>

- Para la creación automática de la topología del sistema (nodos y tuberías), se emplea la herramienta ModelBuilder de WaterCAD. Esta funcionalidad permite generar la red hidráulica a partir de archivos previamente elaborados en formato DXF, los cuales contienen el trazado geométrico del sistema, como en el caso de la línea de aducción. El procedimiento inicia seleccionando la opción Nuevo en la pestaña superior de ModelBuilder. Luego, en la sección de formato de archivo, se especifica que se

importará un archivo de tipo DXF, y en la pestaña intermedia se localiza y selecciona el archivo correspondiente al trazado de aducción previamente preparado.



- Definir unidades, Se selecciona la propiedad a importar, el campo "Label", que actúa como identificador único para los elementos del modelo (nodos, tuberías, tanques, etc.).



- ModelBuilder presenta un resumen detallado de las tuberías y nudos generados, incluyendo sus propiedades básicas, y permite la creación automática de la topología del sistema en el entorno de trabajo. Esta funcionalidad resulta especialmente útil para verificar la correcta conexión entre los elementos y garantizar la coherencia estructural del modelo.

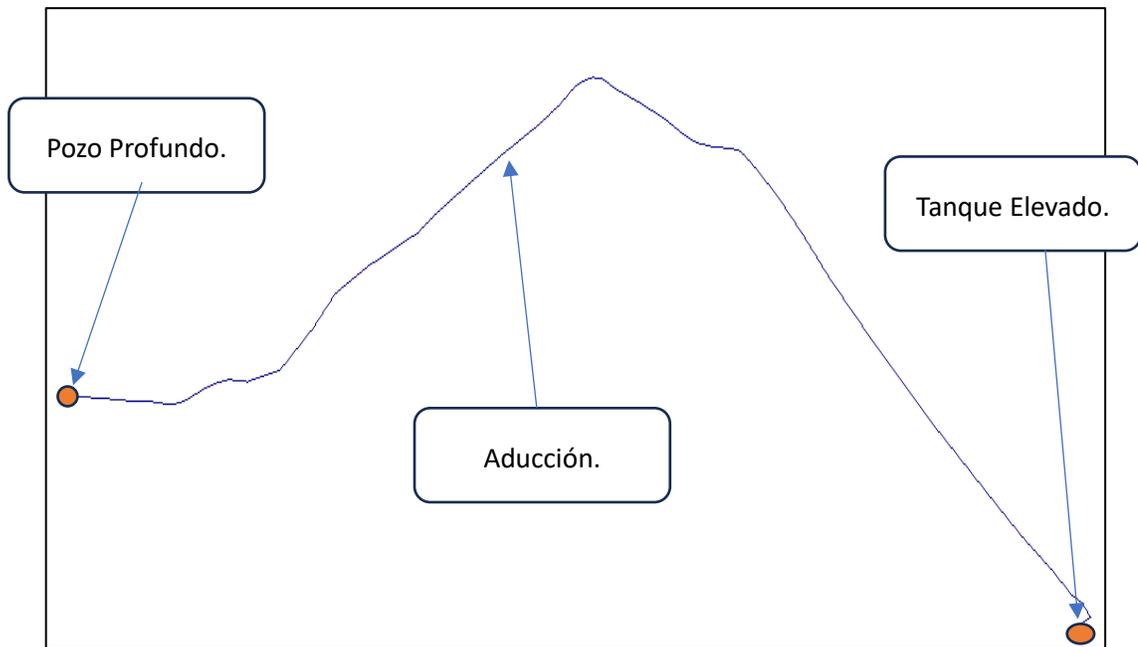
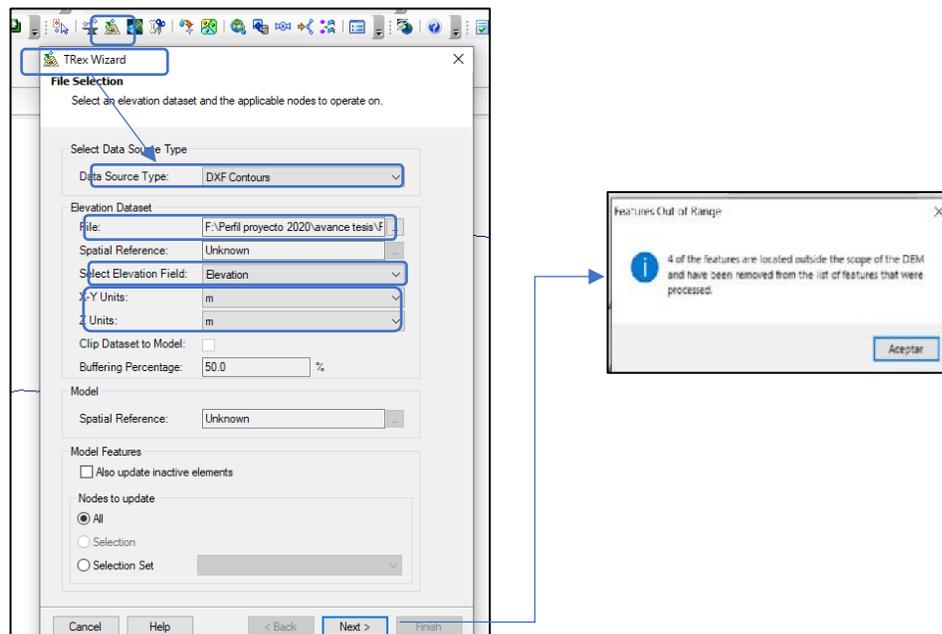


Figura 4.3.1: Aducción Chirimoyal.

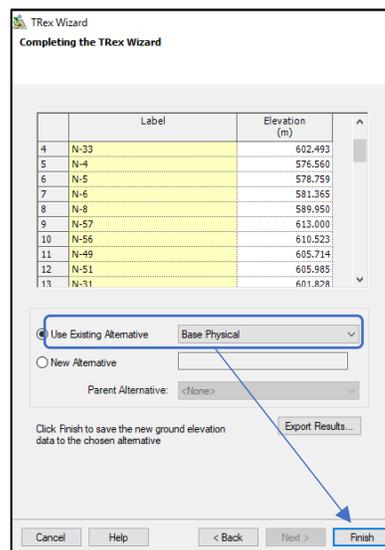
Fuente: Elaboración propia.

- Para asignar las elevaciones a los nodos del sistema, se empleó la herramienta “**TRex Wizard**”. Esta utilidad permite automatizar la asignación de cotas utilizando información de topografía contenida en un archivo DXF previamente preparado (topografía), el cual contiene las curvas de nivel con valores de elevación. Al iniciar el asistente, se selecciona el tipo de archivo como en nuestro caso DXF contours, se busca el archivo correspondiente y se define el campo del que se extraerán los valores de elevación (elevation). A continuación, se especifican las unidades de medida (metros) y se procede con el siguiente paso del asistente.
- En caso de que algún nodo no se encuentre dentro del área cubierta por las curvas de nivel del archivo DXF, el sistema generará una alerta indicando que ciertos nodos no

han podido recibir una cota asignada, lo cual deberá corregirse manualmente para asegurar la integridad del modelo hidráulico.



- Antes de finalizar el proceso de asignación de cotas, TRex Wizard proporciona una vista previa, la cual permite verificar visualmente qué elementos del modelo han recibido correctamente los valores de elevación desde el archivo de topografía. Esta función resulta útil para identificar posibles errores o inconsistencias antes de aplicar los cambios, posteriormente se debe definir la base de trabajo donde se le quiere asignar (base física) será definida- finish.



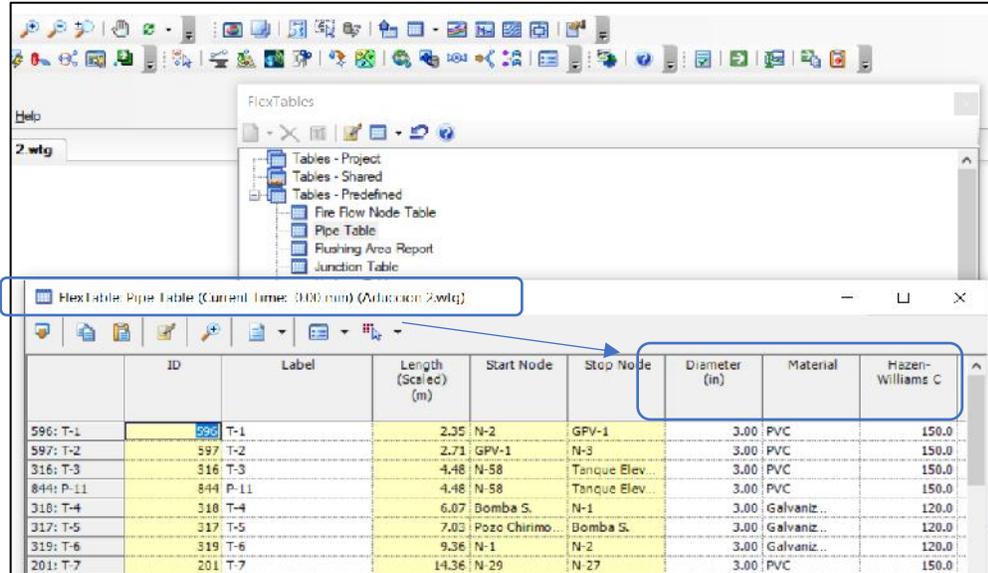
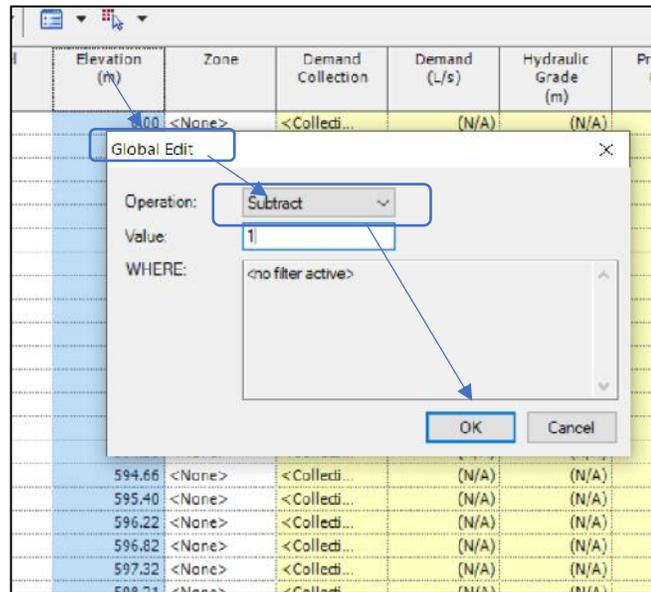
c) Edición de datos

- WaterCAD genera de forma automática las denominadas FlexTables, las cuales son herramientas tabulares que permiten visualizar, editar y gestionar la información asociada a los distintos elementos del sistema hidráulico. Estas tablas incluyen datos de nodos, tuberías, tanques, válvulas, entre otros componentes, lo que facilita significativamente la revisión, validación y modificación de parámetros como cotas, longitudes, diámetros, demandas, rugosidades, presiones y otros atributos relevantes para el análisis hidráulico. Además, tiene la posibilidad de crear nuevos campos personalizados dentro de las FlexTables, lo que permite incorporar información adicional que no esté contemplada por defecto en el modelo. Esta funcionalidad resulta especialmente útil para realizar cálculos auxiliares, registrar datos específicos del proyecto o aplicar filtros y condiciones personalizadas durante el proceso de modelación y validación del sistema.

	ID	Label	Elevation (m)	Zone	Demand Collection	Demand (L/s)	Hydraulic Grade (m)	Pressure (kPa)	X (m)	Y (m)
36: J-6	36	J-6	0.00	<None>	<Collecti	(N/A)	(N/A)	(N/A)	448,006.65	7.59
40: J-7	40	J-7	0.00	<None>	<Collecti	(N/A)	(N/A)	(N/A)	448,030.55	7.59
47: J-11	47	J-11	0.00	<None>	<Collecti	(N/A)	(N/A)	(N/A)	447,123.51	7.59

- Las FlexTables de WaterCAD no solo permiten visualizar y organizar la información del modelo, sino que también ofrecen funcionalidades avanzadas como la aplicación de filtros, el ordenamiento de registros y la edición masiva de datos. Por ejemplo, mediante una FlexTable de nodos es posible ajustar la altura de excavación restando una profundidad determinada a la elevación del nodo. Esto se realiza accediendo a la columna "Elevation", utilizando la opción "Global Edit", seleccionando la operación "Subtract" e ingresando el valor correspondiente a la profundidad a la que se ubicará la tubería (1 m.). De igual manera, desde la FlexTable de tuberías es posible editar

diámetros, materiales u otros atributos en caso de que existan tramos que difieran del prototipo definido inicialmente. Estas herramientas permiten mantener la coherencia de los datos y optimizar la edición de grandes volúmenes de información dentro del modelo hidráulico.



d) Representación elementos más complejos

- **Pozo Profundo**, Se representa como un tanque enterrado, las propiedades físicas como de niveles se pueden definir mediante niveles que toma como referencia la base

del pozo, o por elevación que la referencia es la elevación superficial del pozo. se definirán de la siguiente manera (niveles) figura (4.3.2).

- Base será igual a la base del pozo obtenida de elevación del terreno menos profundidad de pozo perforado (336,4m.s.n.m.).
- Elevación mínima es igual a la altura de instalación de la bomba, profundidad total del pozo menos la profundidad de instalación de la bomba (154,6 m).
- Elevación máxima igual al nivel del nivel estático (189,6 m).
- Elevación inicial, es el nivel del agua en que se empezara el bombeo, para condiciones más críticas se toma lo más cerca posible del nivel mínimo. (154,605).
- Diámetro del pozo, es una dimensión aproximada al diámetro del acuífero que se está explotando ya que debemos considerar que el nivel del agua no baje más que el nivel mínimo asignado.

Pozo Chirimoyal

Properties - Tank - Pozo Chirimoyal (312)

Pozo Chirimoyal 100%

<Show All>

Property Search

Is Active? True

Demand

Demand Collection <Collection: 0 items>

Unit Demand Collection <Collection: 0 items>

Customer Meter Demand <Collection>

Customer Meter Unit De <Collection>

Operating Range

Operating Range Type Level

Elevation (Base) (m) 336.400

Level (Minimum) (m) 154.600

Level (Initial) (m) 154.605

Level (Maximum) (m) 189.600

Use High Alarm? False

Use Low Alarm? False

Operational

Controls <Collection>

Physical

Elevation (m) 576.000

Zone <None>

Volume (Inactive) (L) 0.00

Installation Year 0

Section Circular

ID

Unique identifier assigned to this element.

$D =$

$Q =$

$V =$

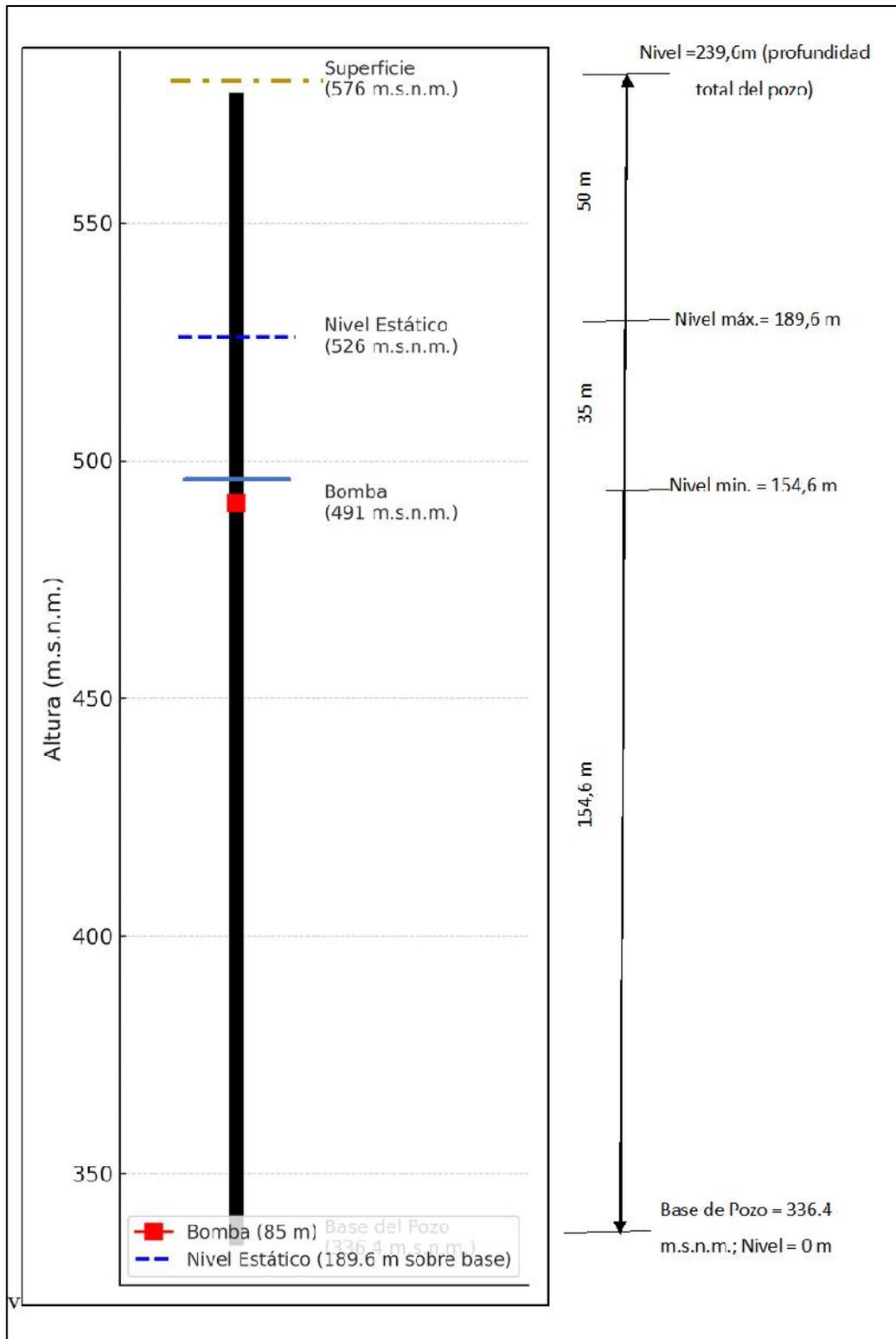
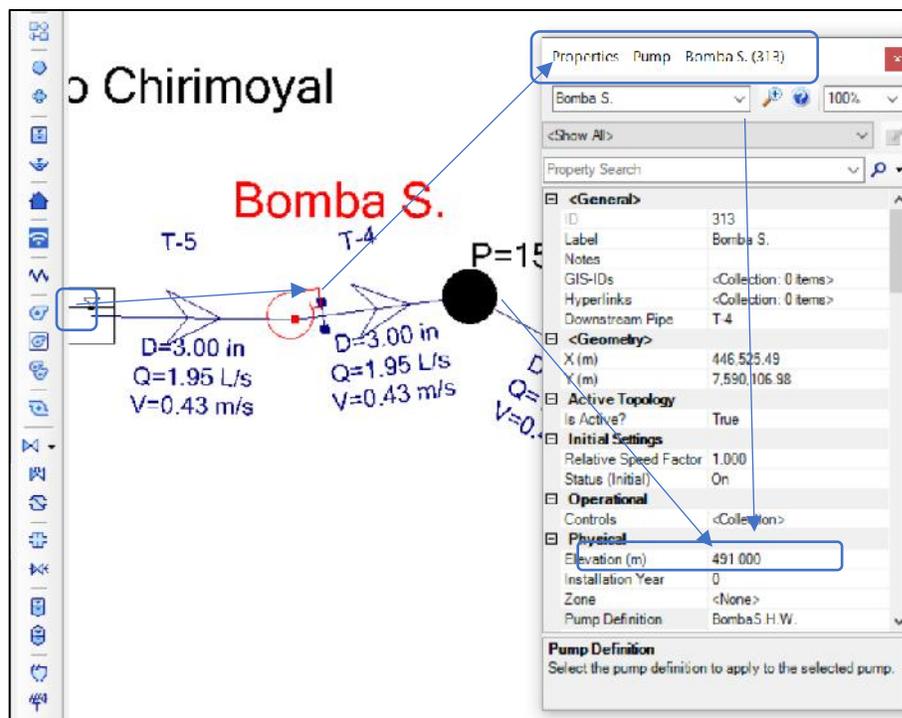


Figura 4.3.2 : Diagrama pozo profundo Chirimoyal.

Fuente: Elaboración propia.

- **Bomba sumergible**, no existe una herramienta específica para su representación. Por ello, se ha empleado una configuración alternativa que permite simular su comportamiento hidráulico de forma adecuada. Esta configuración consta de los siguientes elementos figura (4.3.3).
 - Ubicación de la bomba: La bomba se sitúa lateralmente al pozo, conectada mediante una tubería auxiliar de 0,5 metros de longitud, la cual genera una pérdida de carga despreciable.
 - Elevación de la bomba: Se determina como la diferencia entre la elevación superficial del terreno donde se ubica el pozo (576 m.s.n.m.) y la profundidad de instalación de la bomba (85 m) obteniendo una elevación de 491 m.s.n.m.
 - Nodo auxiliar: La bomba se conecta a un nodo auxiliar a través de una segunda tubería auxiliar, también de 0,5 metros de longitud. Este nodo tiene la misma elevación que la bomba, lo cual permite controlar adecuadamente la presión inicial generada por la bomba en la red.



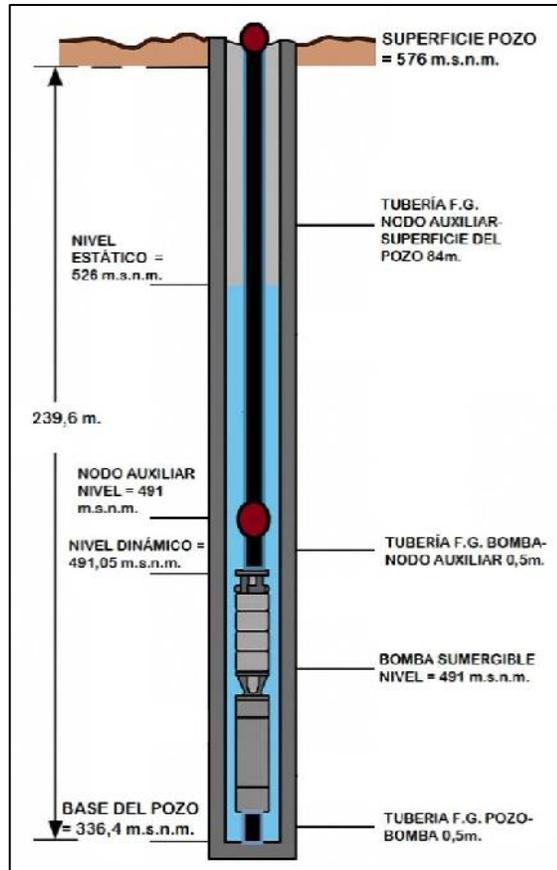


Figura 4.3.3: Esquema configuración bomba.

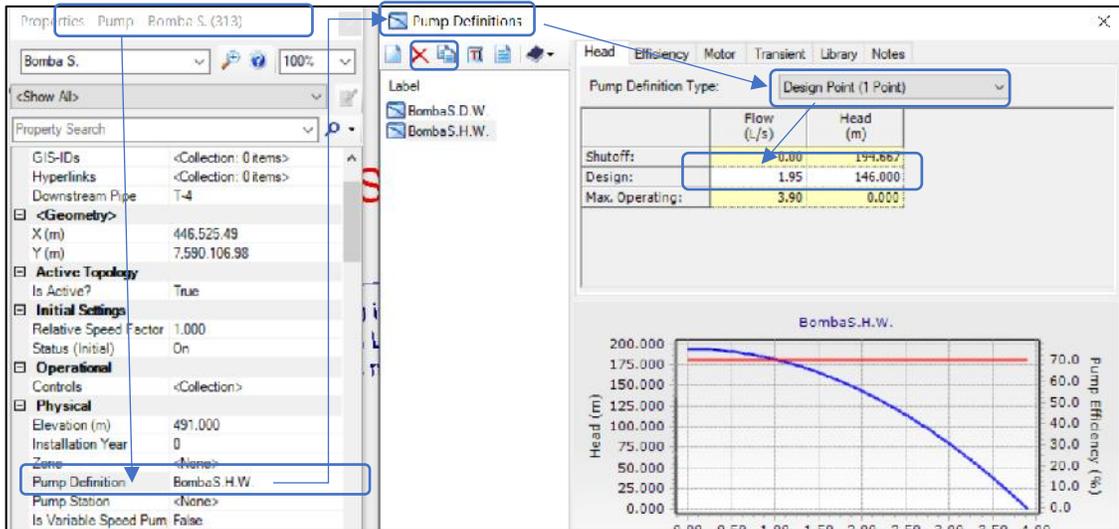
Fuente: Elaboración propia.

- Una vez definidos los datos físicos del sistema, se procede a integrar la configuración hidráulica de la bomba sumergible en el modelo. Para ello, es necesario definir una curva característica de la bomba, ya que en este caso se trata de un diseño y no de una bomba existente con curva proporcionada por el fabricante.

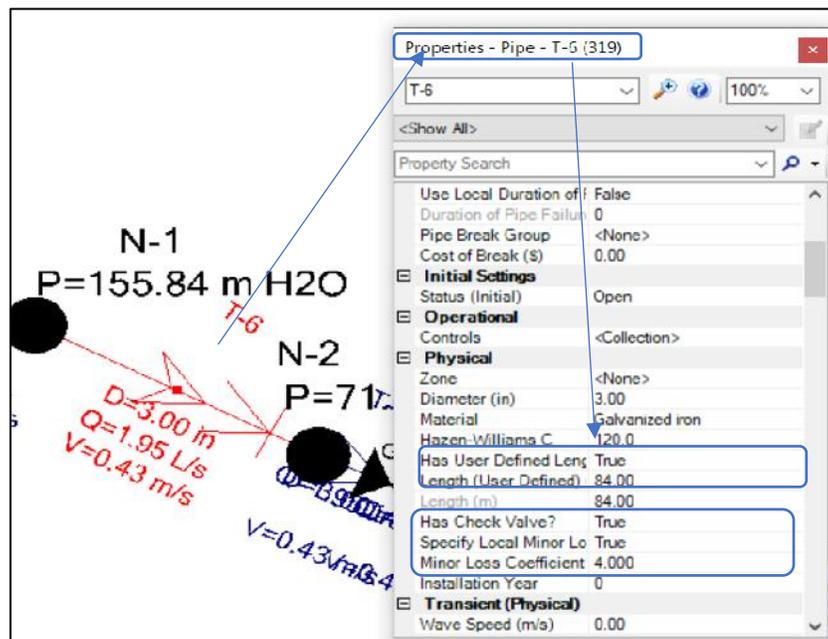
Datos de diseño:

- Caudal de bombeo: 2,00 L/s.
- Altura geométrica: 146 m.
- Eficiencia estimada: 75 %.
- Para configurar la bomba en el software, se sigue el siguiente procedimiento:
 - Ingresar al menú de propiedades de la bomba (Pump Definition > Edit. Pump Definition). Crear una nueva curva de bomba y definirla mediante un punto,

correspondiente al caudal de diseño y la altura geométrica mencionada. Seleccionar una eficiencia del 75 % como valor estimado para el dimensionamiento preliminar. Asignar la curva creada a la bomba dentro del sistema.



- Del nodo auxiliar se unirá al sistema antes creado con una tubería que tendrá como longitud el resto de la profundidad de la bomba (84m), e incluirá una válvula antirretorno (¿has Check Valve?; True) que se definirá en la misma tubería.



- **El modelado del tanque elevado** se realiza aplicando principios similares a los utilizados para el pozo, con las siguientes particularidades técnicas figura (4.3).
 - Elevación de base del tanque: La Norma Boliviana NB-689 recomienda que, en el punto de llegada del sistema de aducción, **exista una presión mínima de 2 metros de columna de agua**. Dado que el software no considera esta condición de forma automática, se incorpora manualmente al modelo mediante el ajuste de la elevación de la base del tanque. Para cumplir con esta recomendación, se suma 2 metros a la elevación real de la base. En este caso, si la elevación natural es de 635,38 m.s.n.m., se adopta una elevación ajustada de **637,38 m.s.n.m.**
 - Nivel mínimo: Corresponde a la altura desde la base del tanque hasta el nivel más bajo operativo, definido en 0,15 m.
 - Nivel inicial: Se establece también en 0,30 m, (0,15 m espesor de la base más 0,15 m caudal muerto) representando el punto a partir del cual el tanque comienza a descargar agua hacia el sistema, e influye directamente en el tiempo de llenado simulado.
 - Nivel máximo: Se define como la altura máxima que alcanza el agua cuando el tanque está completamente lleno, establecida en 2,15 m desde la base.
 - Área de la base del tanque: Se considera un valor de 15 m², que puede corresponder a una geometría circular o no circular, según el diseño estructural adoptado.
 - Ingreso del caudal al tanque: Por defecto, el software hidráulico asume que el agua ingresa al tanque por la base, lo cual genera un desfase en la simulación con respecto a la realidad física, ya que el tanque elevado se llena por la parte superior a partir de los 2,15 metros de altura (nivel máximo). Esta diferencia afecta especialmente el cálculo de la altura de diseño de la bomba.
 - Para resolver esta discrepancia y lograr una simulación realista del proceso de llenado, se modela el ingreso del caudal al tanque con un caudal constante de 2,00 l/s hasta alcanzar el nivel máximo. De esta manera, se asegura que la simulación represente adecuadamente el comportamiento hidráulico del sistema durante el llenado del tanque elevado.

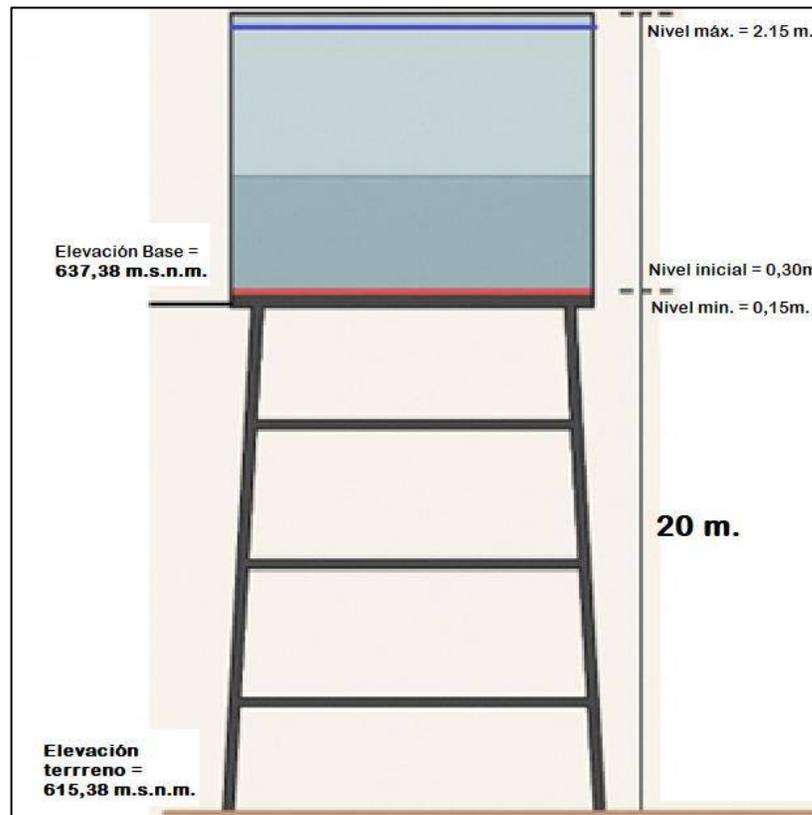
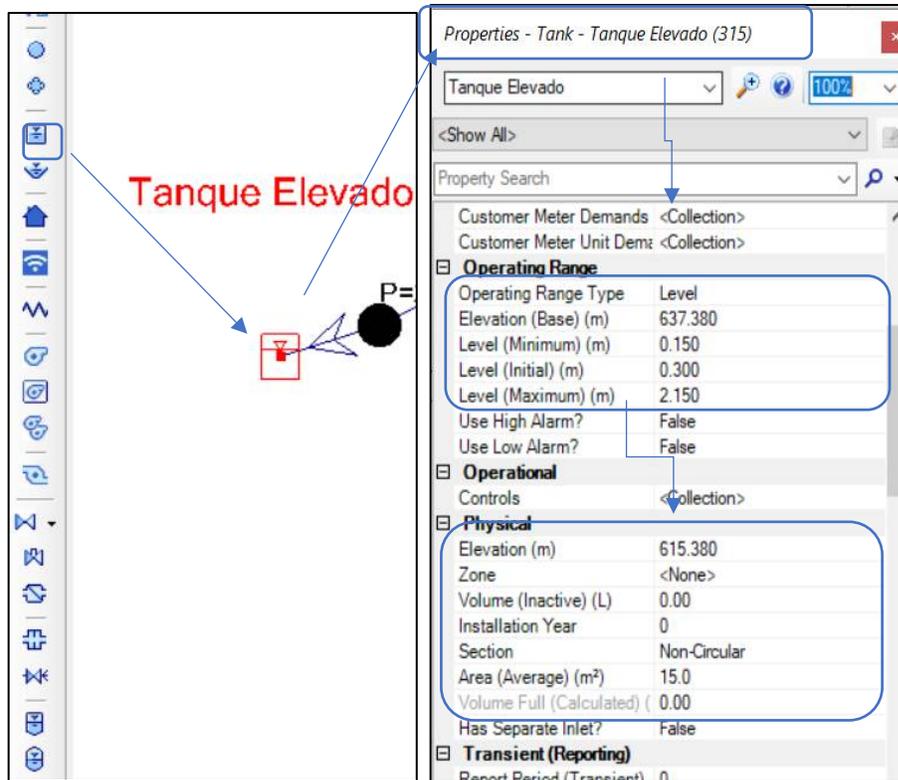


Figura 4.3.4: Esquema configuración tanque elevado.

Fuente: Elaboración propia.

- **Las válvulas de uso global** se integran automáticamente en el modelo hidráulico en los puntos donde se requiere su instalación. Al colocarlas, el software divide la tubería en la que se emplazan, generando un nuevo nodo y permitiendo su configuración independiente. Para su correcta definición, se deben establecer los siguientes parámetros técnicos:
 - Diámetro de la válvula: Debe coincidir con el diámetro nominal de la tubería donde será instalada, a fin de evitar discontinuidades hidráulicas.
 - Tipo de válvula: Se define mediante el coeficiente de pérdida local (K), el cual representa la resistencia que ofrece la válvula al paso del flujo.
 - Curva de pérdida de carga: Esta curva debe elaborarse previamente en una hoja de cálculo y debe considerar la relación entre el caudal, el diámetro y el tipo de válvula. A partir de estos datos, se obtienen los valores del coeficiente K para distintos regímenes de flujo, lo que permite su ingreso al modelo de forma precisa.

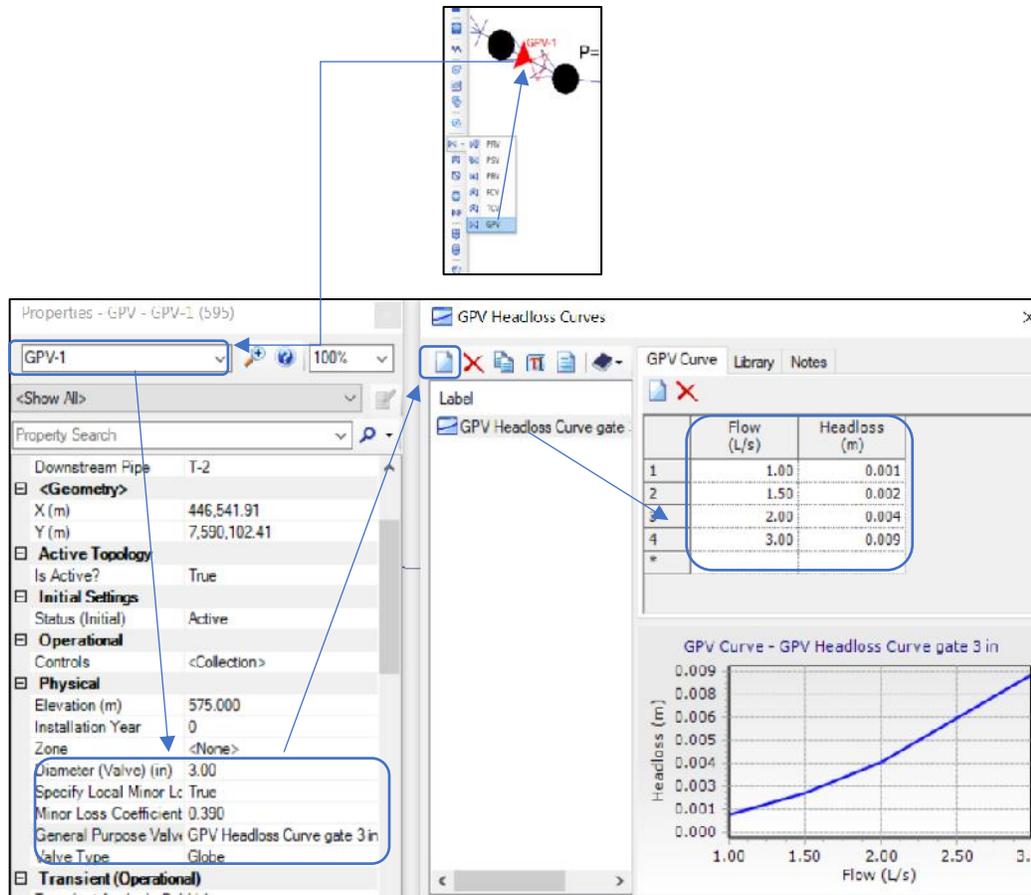
Valvua gate	
Flow (L/s)	Headloss (m)
0.020	0.00000
0.060	0.00000
0.100	0.00001
0.500	0.00024
1.000	0.00096
2.000	0.00382
3.000	0.00860

k	0.39
D	3

Figura 4.3.5: Cálculo curva perdida de carga de una válvula compuerta de 3 pulgadas de diámetro para un rango de caudal definido.

Fuente: Elaboración propia.

- Se carga la curva de pérdida de carga correspondiente a la válvula de propósito general, a fin de representar adecuadamente su comportamiento hidráulico en el sistema.

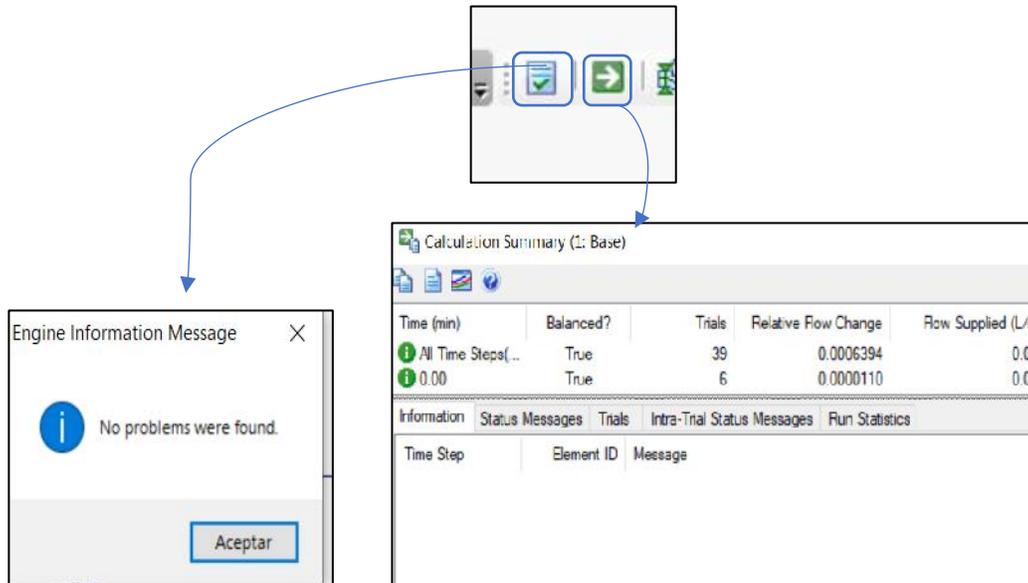


e) Validación del Modelo y Cálculo Hidráulico

- Una vez definidos todos los elementos del sistema con sus respectivas configuraciones preliminares, se procede a la fase de validación del modelo en el entorno de trabajo del software WaterCAD. Este proceso consiste en una revisión tanto automática como manual de los datos ingresados, con el objetivo de verificar:
 - La correcta asignación de propiedades hidráulicas y físicas a cada componente (tuberías, nodos, bombas, válvulas, tanque, etc.).
 - La existencia de conexiones válidas entre elementos, evitando tramos sin continuidad o con direcciones incorrectas.
 - La ausencia de datos incompletos, redundantes o valores fuera de los rangos permitidos.
- WaterCAD proporciona una herramienta específica para esta tarea denominada "Valídate" (Validar), que se encuentra en la cinta de opciones del software. Al

ejecutarla, se despliega un reporte con mensajes de error y advertencia. Estos mensajes permiten una detección oportuna de inconsistencias, las cuales deben ser corregidas antes de proceder con la simulación. Es importante revisar cada advertencia, ya que, aunque algunas no impidan el cálculo, pueden comprometer la validez de los resultados.

- Ejecutar el cálculo hidráulico utilizando la herramienta "Compute".

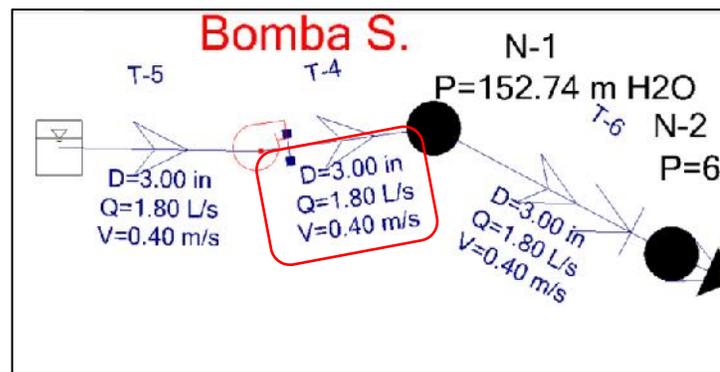


Ejecutada la operación anterior, permite obtener los primeros resultados del modelo: caudales en cada tramo, presiones en nodos, pérdidas de carga, velocidades del flujo y el comportamiento de los elementos activos como bombas y válvulas.

f) Análisis de Resultados Iniciales y Ajuste del Diseño (proceso de diseño iterativo)

- Se obtienen los primeros resultados del modelo hidráulico, los cuales permiten evaluar variables clave como:
 - Caudales en cada tramo de tubería.
 - Presiones en los nodos.
 - Pérdidas de carga lineales y localizadas.
 - Velocidades del flujo en la red.

- Comportamiento hidráulico de elementos activos (bombas, válvulas, tanque elevado).
- A partir de estos resultados, se identificó que la capacidad de la bomba configurada con la curva de diseño preliminar no es suficiente para cumplir con el caudal objetivo. Específicamente, se observó que la bomba alcanza un caudal máximo de 1,80 l/s, inferior al caudal de diseño establecido en 2,00 l/s. Este resultado evidencia que la altura de bombeo definida en la curva inicial debe ser revisada y ajustada.



I. Ajuste de la Curva Característica de la Bomba mediante Curva del Sistema

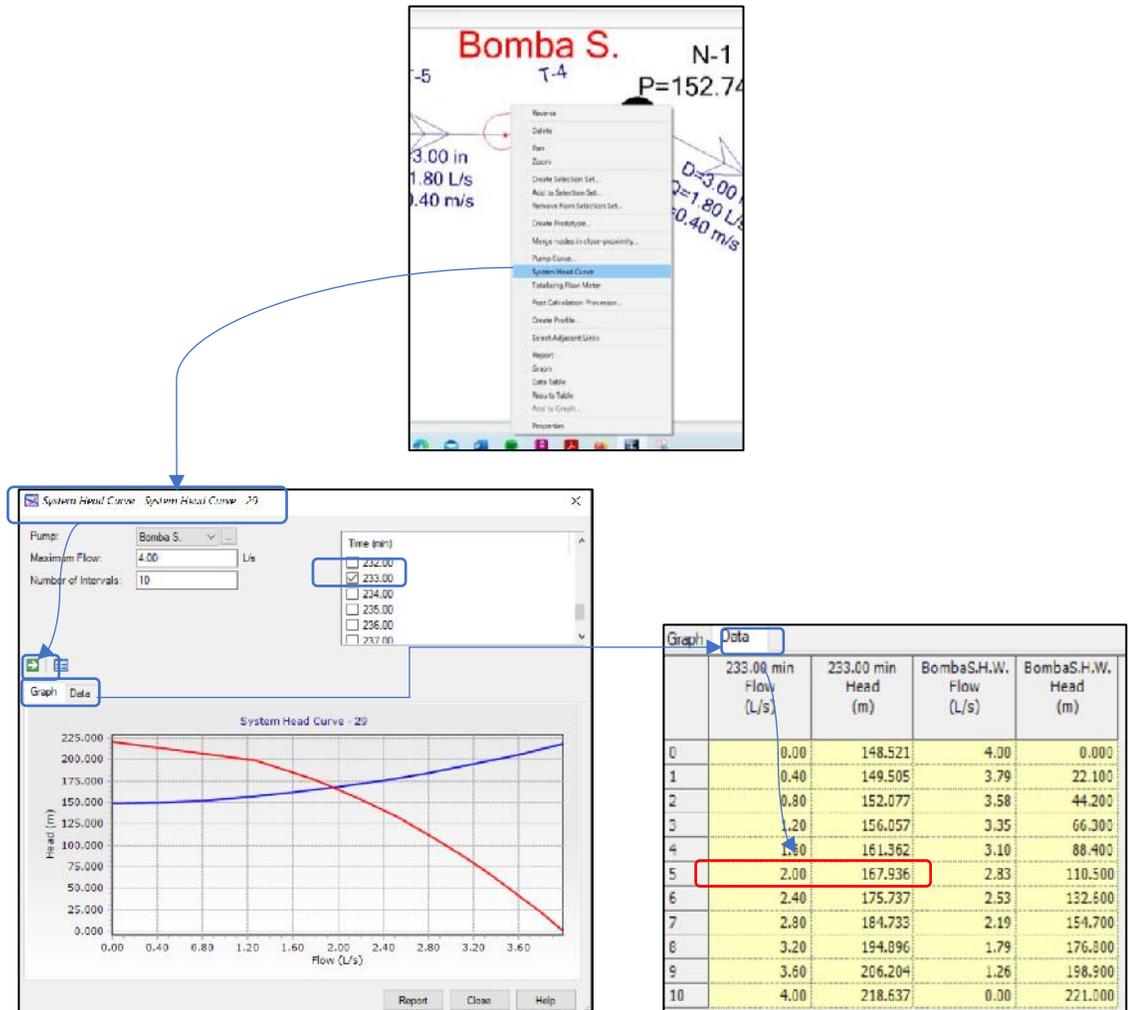
- Como solución al problema identificado, se procedió a generar y analizar la curva del sistema, que relaciona el caudal de operación con la altura total de bombeo requerida (head), incluyendo pérdidas de carga y altura geométrica. Esta curva fue obtenida con ayuda del propio software de simulación, considerando el escenario más desfavorable: el tanque elevado completamente lleno, lo cual ocurre aproximadamente a los 233 minutos de operación continua de bombeo.

Simultáneamente, se redefinió la curva característica de la bomba para garantizar que su punto de operación coincidiera con la curva del sistema en el caudal deseado de 2,00 l/s. Este cruce entre ambas curvas representa el punto óptimo de funcionamiento de la bomba, asegurando que sea capaz de superar la elevación total requerida y entregar el caudal proyectado al tanque elevado bajo condiciones de carga completa.

- Para ajustar con precisión la curva característica de la bomba y asegurar que opere adecuadamente dentro del sistema hidráulico modelado, se utiliza la herramienta “**System Head Curve**” proporcionada por WaterCAD. Esta funcionalidad permite

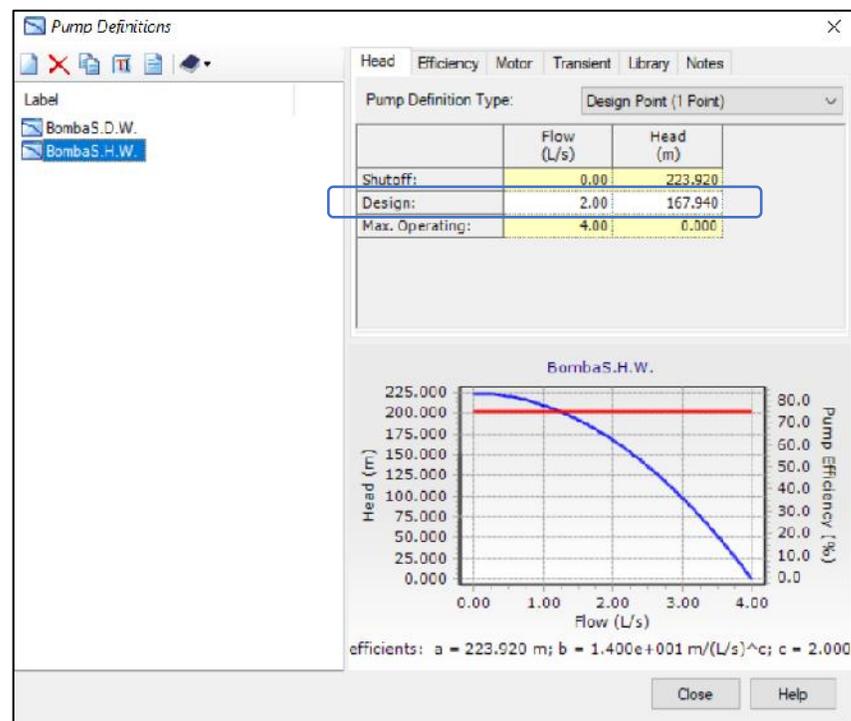
visualizar la relación entre el caudal y la elevación requerida (head) por el sistema, considerando tanto la altura geométrica como las pérdidas de carga.

- Anti clip en el elemento bomba - System head Curve-run, en el apartado “Run > Data” de esta herramienta, se pueden ajustar parámetros como el tiempo de simulación y seleccionar el punto crítico de operación, en este caso, el momento en el que el tanque elevado se encuentra lleno (233 minutos).

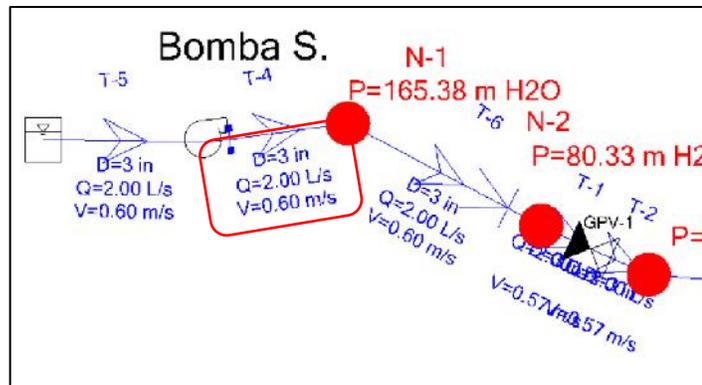


- Se observa que la altura de la bomba para cumplir con la entrega del caudal de diseño es de 167,94 m, con lo que se procede a la redefinición de la curva característica de la bomba, de forma que esta se ajuste con precisión a las condiciones reales del sistema. Para ello, se accede nuevamente a la configuración del elemento bomba mediante la siguiente ruta:

- Pump Definition → Edit Pump Definition → Edit Curve.
- Se define un único punto de operación que corresponde a los siguientes parámetros:
 - Caudal de bombeo = 2,00 l/s.
 - Altura de diseño (head)= 167,94 m (valor obtenido del cruce con la curva del sistema).
- Esta definición puntual establece un funcionamiento específico para la bomba bajo las condiciones de diseño, lo que facilita su ajuste al punto de operación óptimo dentro del sistema hidráulico. Una vez configurados los parámetros correspondientes, se guarda la información ingresada y se cierra la ventana de definición de la bomba. Posteriormente, se procede a re-ejecutar el cálculo hidráulico del sistema, permitiendo así validar el comportamiento de la bomba dentro del modelo.



- Con los resultados obtenidos de la simulación hidráulica, se verifica que la bomba seleccionada cumple con la entrega del caudal de diseño requerido para la línea de aducción. Asimismo, se comprueba que la velocidad del flujo en las tuberías se encuentra dentro de los rangos recomendados por la Norma Boliviana NB-689, considerando los diámetros previamente definidos.



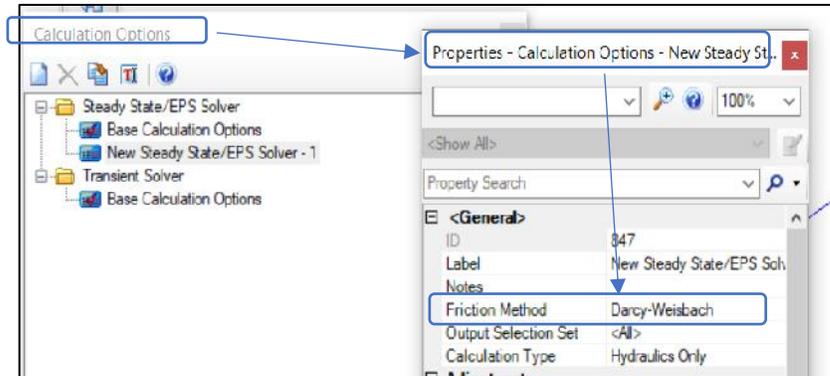
- Con la bomba ya definida, se procede a verificar que se cumplan las restricciones de velocidad y presión en la aducción que nos exige la NB-689. En caso necesario, se modificarán los diámetros de las tuberías para garantizar el cumplimiento de estos parámetros. Posteriormente, se calcula el tiempo de llenado del tanque elevado mediante una simulación en periodo extendido, utilizando un caudal fijo equivalente al del diseño del sistema de aducción, que es de 2,00 l/s.
- Validación y cálculo: Se ejecuta la simulación hidráulica del modelo, con el proceso iterativo y de elección de diámetros, materiales de las tuberías ya definidos, lo que permite obtener como resultados el tiempo de llenado del tanque elevado, así como las presiones y velocidades en cada intervalo de tiempo definido.

Message Id	Scenario	Element Type	Element Id	Label	Time (min)	Message
40022	Base	Tank	315	Tanque Elev...	230.02	Tank Tanque Elevado is full.
40022	Base	Tank	315	Tanque Elev...	231.00	Tank Tanque Elevado is full.
40022	Base	Tank	315	Tanque Elev...	232.00	Tank Tanque Elevado is full.

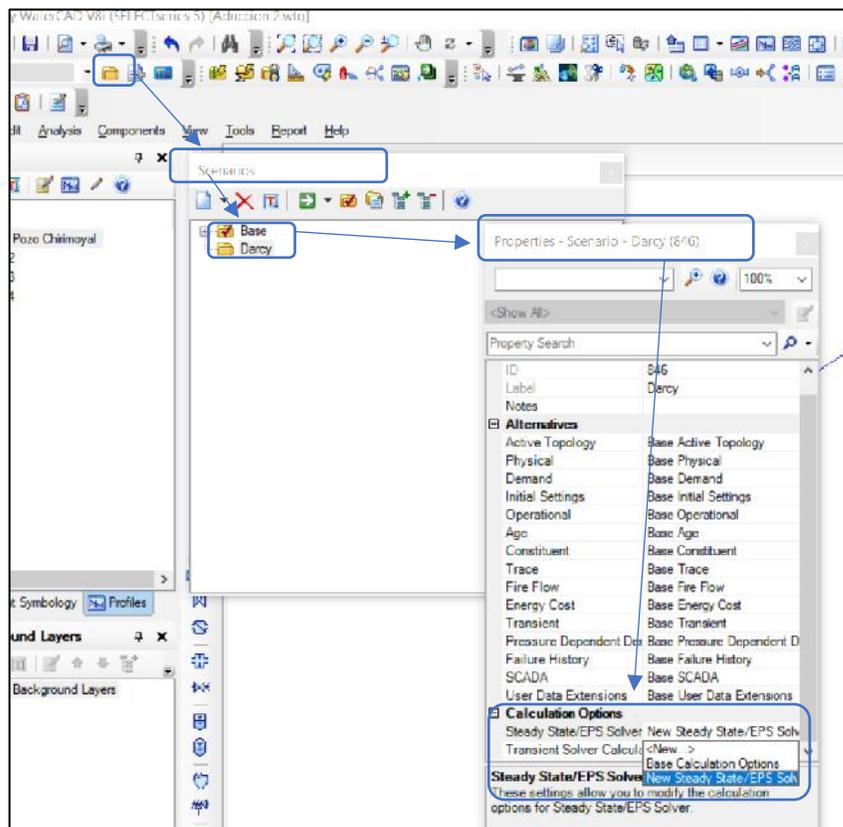
g) Creación de escenarios

WaterCAD permite la creación de diferentes escenarios dentro del mismo archivo de proyecto, lo que facilita el análisis comparativo de distintas configuraciones del sistema sin necesidad de crear archivos separados. Para cada escenario, es posible definir una opción de cálculo personalizada, incluyendo la selección del método de fricción a utilizar. Los métodos disponibles: **Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Manning**. No obstante, en nuestro medio, los más utilizados son Hazen-Williams, por su simplicidad y aplicación tradicional en redes de agua potable, y Darcy-Weisbach.

- Se usa la topología base antes construida, los cambios realizados se hacen en el cambio de opciones de cálculo, creando una nueva opción de cálculo definiendo el método de fricción.



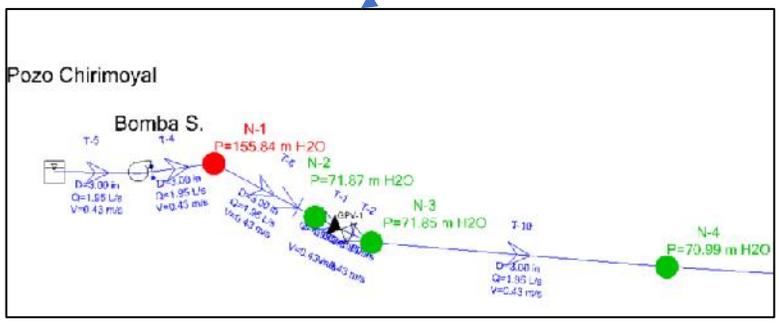
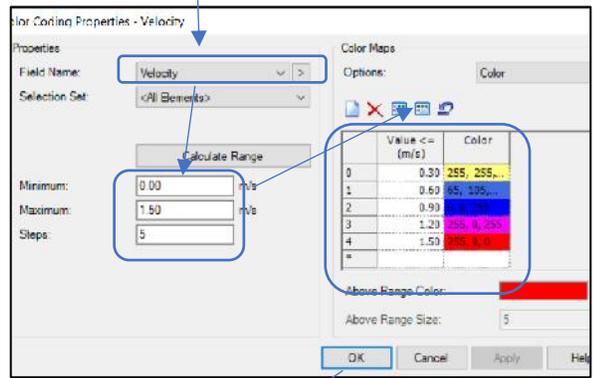
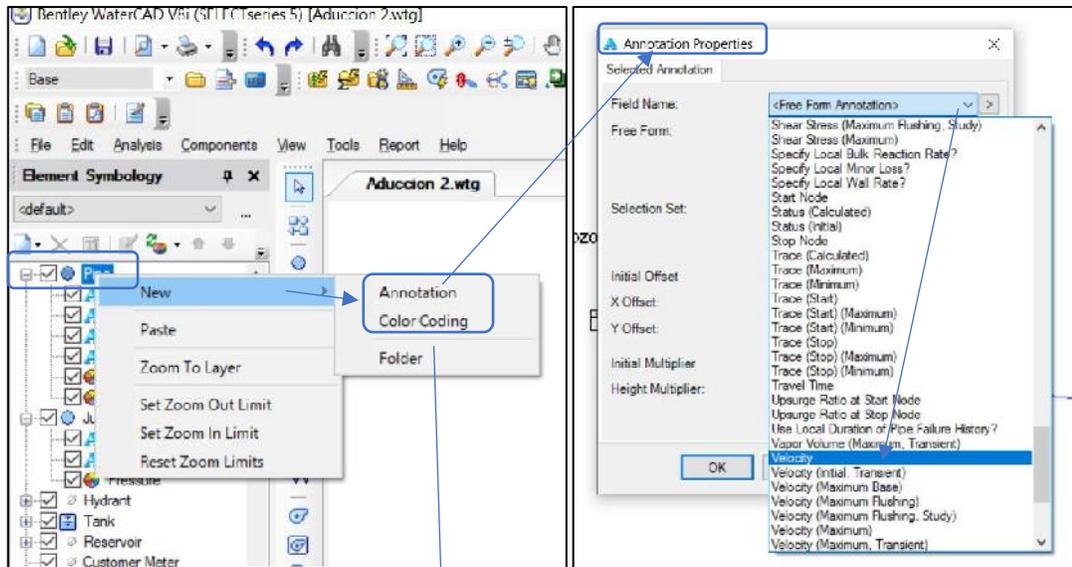
- Esto permite obtener resultados más precisos en términos de pérdidas de carga, especialmente en sistemas donde el flujo varía significativamente o se tienen tuberías con distintas características. Además, permite comparar los resultados bajo diferentes métodos de estimación de pérdidas de carga, dentro del mismo proyecto.



h) Resultados

WaterCAD ofrece una serie de herramientas avanzadas para la post-modelación que facilitan el análisis, la visualización y la interpretación de los resultados obtenidos durante la simulación hidráulica, facilitando la toma de decisiones respecto a la selección de diámetros óptimos, materiales más adecuados y demás parámetros de diseño establecidos por la NB-689.

- Entre las principales herramientas que ofrece WaterCAD para la etapa de post-modelación se encuentran: **Color Coding** y **Annotations** para la visualización gráfica de resultados, **FlexTables** para el análisis tabular de parámetros hidráulicos, y los gráficos para el seguimiento temporal de variables como caudal, presión y nivel de agua.
- La herramienta **Annotation** permite configurar etiquetas personalizadas que se colocan al lado de cada elemento del modelo. Estas etiquetas muestran parámetros hidráulicos relevantes, como el caudal que circula por una tubería o la presión en un nodo. Esta herramienta facilita la visualización directa y gráfica de los resultados del modelo, mejorando la interpretación de los datos y permitiendo una evaluación detallada del desempeño hidráulico de la aducción.
- La herramienta **Color Coding** permite diferenciar visualmente las distintas propiedades, tanto físicas como hidráulicas de los diferentes componentes de la aducción, como los diámetros de tuberías presentes en el modelo mediante el uso de colores. Se asigna un color específico a un rango de valores, lo que facilita la identificación rápida de los elementos del sistema. Por ejemplo, se puede utilizar para mostrar los diámetros de las tuberías o para destacar aquellos elementos que cumplen con las restricciones de velocidad, tanto mínimas como máximas, o que garantizan que los nodos mantengan las presiones dentro de los límites establecidos por la NB-689. Esta visualización puede activarse o desactivarse según sea necesario, lo que ofrece flexibilidad similar a la de las capas en un archivo de AutoCAD.



- Las **FlexTables** son tablas dinámicas que presentan los resultados numéricos de la simulación de manera estructurada. Estas tablas pueden ser personalizadas para mostrar solo los parámetros de interés, como caudal, presión, velocidad o pérdidas de carga. Además, permiten ordenar, filtrar, estadísticas y exportar los datos, lo que facilita un análisis más detallado y la comparación de los resultados a través de diferentes elementos del sistema. Las FlexTables ofrecen una manera eficiente de

trabajar con grandes volúmenes de datos y extraer la información necesaria para la toma de decisiones.

Table: Junction Table

Table Type: Junction

Available Columns: 83

Selected Columns: 10

Available Columns:

- Pressure (Minimum, Transient)
- Pressure (Reference)
- Pressure (Residual Lower Limit)
- Pressure (System Lower Limit)
- Pressure (Zone Lower Limit)
- Pressure Drop (Typical)
- Pressure Head**
- Reference Pressure Equals Threshold...
- Satisfies Fire Flow Constraints?
- Shortfall (Cumulative)
- Shortfall (Typical)

Selected Columns:

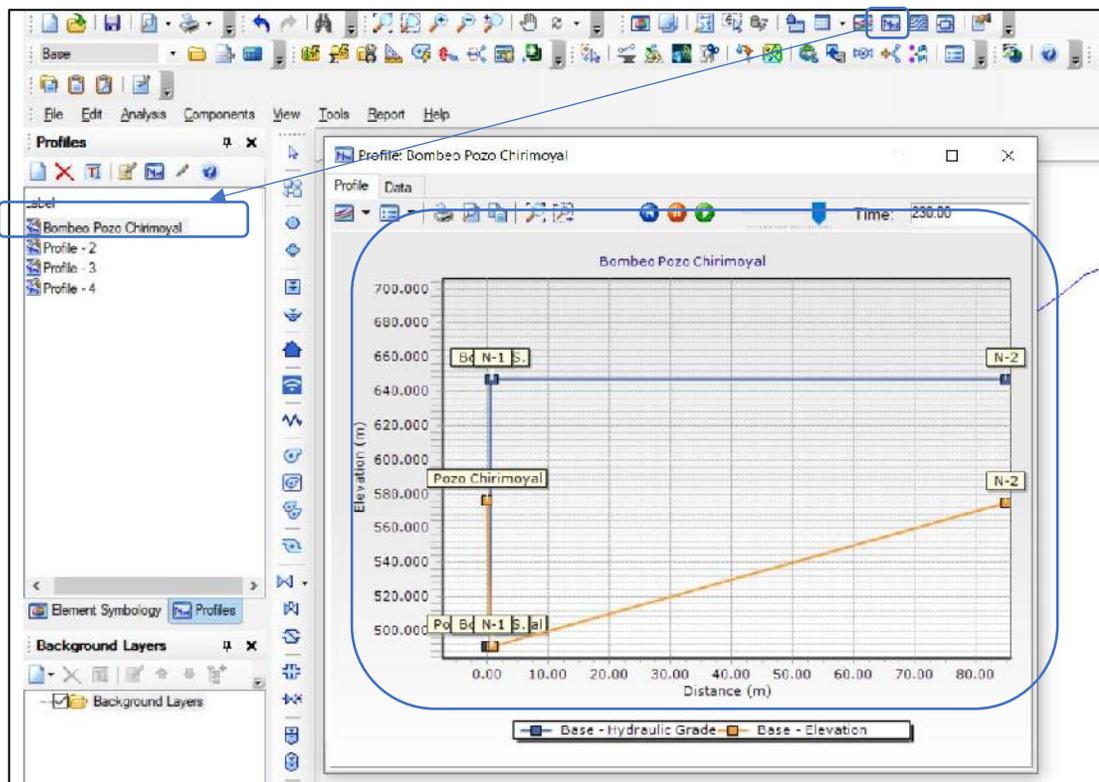
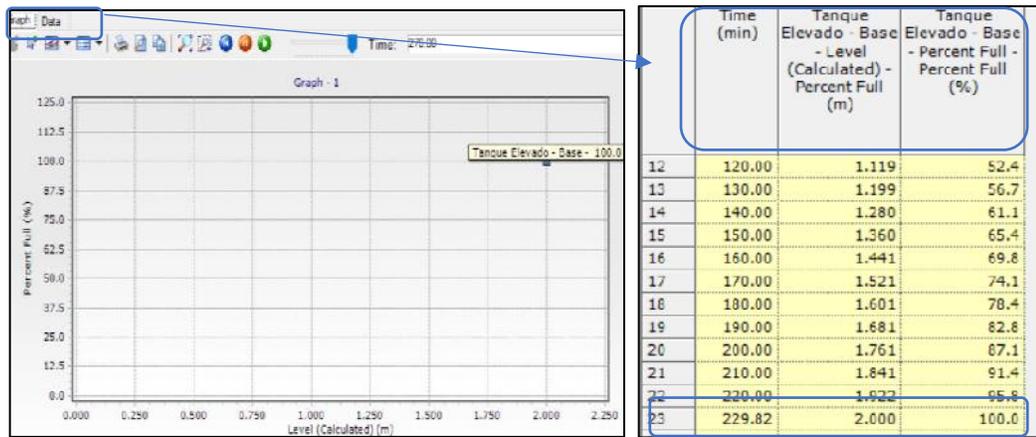
- ID
- Label
- Elevation
- Zone
- Demand Collection
- Demand
- Hydraulic Grade
- Pressure
- X
- Y

Background Table:

ID	Label	Elevation (m)	Zone	Demand Collection	Demand (L/s)	Hydraulic Grade (m)	Pressure (m H2O)	X (m)	Y (m)
314: N-1	N-1	491.000	<None>	<Collected...>	0.00	640.703	41.12	446,531.51	7,590,107.79
199: N-2	N-2	574.763	<None>	<Collected...>	0.00	642.631	42.86	446,539.79	7,590,103.41
200: N-3	N-3	574.763	<None>	<Collected...>	0.00	646.760	71.85	446,544.39	7,590,101.31
210: N-4	N-4	575.560	<None>	<Collected...>	0.00	646.696	70.99	446,568.56	7,590,099.33
212: N-5	N-5	577.759	<None>	<Collected...>	0.00	646.614	68.72	446,599.20	7,590,097.44
213: N-6	N-6	580.365	<None>	<Collected...>	0.00	646.545	66.05	446,625.08	7,590,096.53
227: N-7	N-7	584.401	<None>	<Collected...>	0.00	646.450	61.92	446,660.76	7,590,093.56
216: N-8	N-8	588.950	<None>	<Collected...>	0.00	645.117	56.05	447,143.76	7,590,172.28
215: N-9	N-9	589.000	<None>	<Collected...>	0.00	645.189	56.00	447,123.51	7,590,154.14
253: N-10	N-10	589.660	<None>	<Collected...>	0.00	645.439	55.67	447,032.28	7,590,130.70
228: N-11	N-11	590.120	<None>	<Collected...>	0.00	646.359	56.13	446,695.28	7,590,091.45
292: N-12	N-12	590.487	<None>	<Collected...>	0.00	644.846	54.25	447,218.92	7,590,241.60
258: N-13	N-13	591.000	<None>	<Collected...>	0.00	644.602	53.49	447,279.81	7,590,310.64
255: N-14	N-14	593.500	<None>	<Collected...>	0.00	644.451	50.85	447,336.93	7,590,340.41
262: N-15	N-15	595.000	<None>	<Collected...>	0.00	644.200	48.20	447,394.05	7,590,370.18
256: N-16	N-16	596.000	<None>	<Collected...>	0.00	643.949	45.55	447,451.17	7,590,400.95
265: N-17	N-17	597.000	<None>	<Collected...>	0.00	643.698	42.90	447,508.29	7,590,431.72
266: N-18	N-18	598.000	<None>	<Collected...>	0.00	643.447	40.25	447,565.41	7,590,462.49
272: N-19	N-19	599.000	<None>	<Collected...>	0.00	643.196	37.60	447,622.53	7,590,493.26
273: N-20	N-20	599.500	<None>	<Collected...>	0.00	642.945	34.95	447,679.65	7,590,524.03
231: N-21	N-21	599.505	<None>	<Collected...>	0.00	640.703	41.12	448,548.55	7,590,493.59
307: N-22	N-22	599.583	<None>	<Collected...>	0.00	642.631	42.86	447,912.89	7,590,696.43
280: N-23	N-23	599.583	<None>	<Collected...>	0.00	642.631	42.86	447,912.89	7,590,696.43
249: N-24	N-24	599.505	<None>	<Collected...>	0.00	640.703	41.12	448,548.55	7,590,493.59
270: N-25	N-25	599.583	<None>	<Collected...>	0.00	642.631	42.86	447,912.89	7,590,696.43

Label	Elevation (m)	Pressure Head (m)	Pressure (Minimum) (m H2O)	Hydraulic Grade (m)	Pressure (m H2O)	Zone	X (m)	Y (m)	
314: N-1	N-1	491.000	156.15	154.30	647.151	155.84	<None>	446,531.51	7,590,107.79
199: N-2	N-2	574.763	72.01	70.33	646.777	71.87	<None>	446,539.79	7,590,103.41
200: N-3	N-3	574.763	72.00	70.31	646.760	71.85	<None>	446,544.39	7,590,101.31
210: N-4	N-4	575.560	71.14	69.45	646.696	70.99	<None>	446,568.56	7,590,099.33
212: N-5	N-5	577.759	68.85	67.17	646.614	68.72	<None>	446,599.20	7,590,097.44
213: N-6	N-6	580.365	66.18	64.50	646.545	66.05	<None>	446,625.08	7,590,096.53
227: N-7	N-7	584.401	62.05	60.37	646.450	61.92	<None>	446,660.76	7,590,093.56
216: N-8	N-8	588.950	56.17	54.47	645.117	56.05	<None>	447,143.76	7,590,172.28
215: N-9	N-9	589.000	56.19	54.49	645.189	56.00	<None>	447,123.51	7,590,154.14
253: N-10	N-10	589.660	55.78	54.09	645.439	55.67	<None>	447,032.28	7,590,130.70
228: N-11	N-11	590.120	56.24	54.57	646.359	56.13	<None>	446,695.28	7,590,091.45
292: N-12	N-12	590.487	54.36	52.65	644.846	54.25	<None>	447,218.92	7,590,241.60
258: N-13	N-13	591.000	53.60	51.89	644.602	53.49	<None>	447,279.81	7,590,310.64
255: N-14	N-14	593.500	50.85	49.24	644.451	50.85	<None>	447,336.93	7,590,340.41
262: N-15	N-15	595.000	48.20	46.63	644.200	48.20	<None>	447,394.05	7,590,370.18
256: N-16	N-16	596.000	45.55	43.94	643.949	45.55	<None>	447,451.17	7,590,400.95
265: N-17	N-17	597.000	42.90	41.29	643.698	42.90	<None>	447,508.29	7,590,431.72
266: N-18	N-18	598.000	40.25	38.64	643.447	40.25	<None>	447,565.41	7,590,462.49
272: N-19	N-19	599.000	37.60	35.99	643.196	37.60	<None>	447,622.53	7,590,493.26
273: N-20	N-20	599.500	34.95	33.34	642.945	34.95	<None>	447,679.65	7,590,524.03
231: N-21	N-21	599.505	41.12	39.47	640.703	41.12	<None>	448,548.55	7,590,493.59
307: N-22	N-22	599.583	42.86	37.71	642.631	42.86	<None>	447,912.89	7,590,696.43
280: N-23	N-23	599.583	42.86	37.71	642.631	42.86	<None>	447,912.89	7,590,696.43
249: N-24	N-24	599.505	41.12	39.47	640.703	41.12	<None>	448,548.55	7,590,493.59
270: N-25	N-25	599.583	42.86	37.71	642.631	42.86	<None>	447,912.89	7,590,696.43

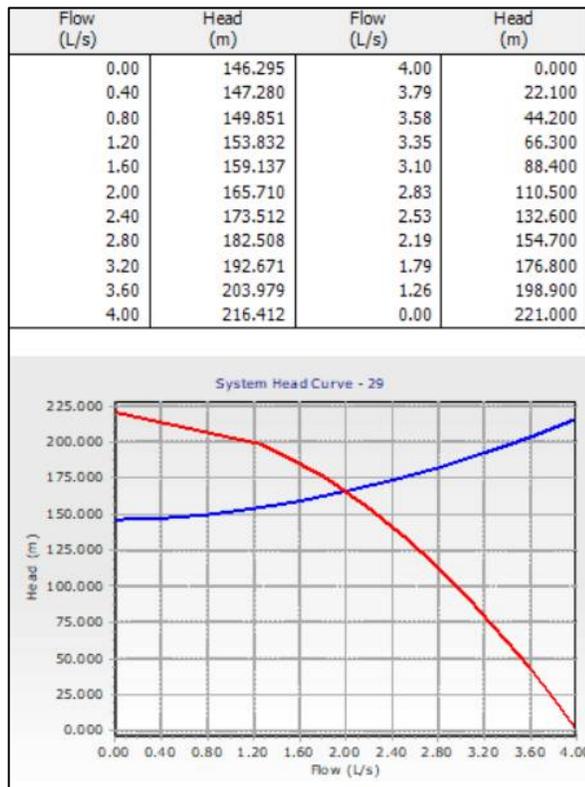
- La herramienta de **Gráficos** en WaterCAD permite la representación visual de las variables clave para el diseño y análisis del sistema hidráulico. Por ejemplo, es posible generar gráficos del tiempo de llenado del tanque elevado, perfiles de presión o caudal a lo largo de diferentes segmentos de la red, entre otros parámetros. Estos gráficos facilitan la interpretación de los resultados y la identificación de posibles áreas de mejora o ajustes en el diseño. Además, todos los datos generados a partir de los gráficos pueden ser exportados a archivos Excel para un análisis más detallado o para su presentación en informes.

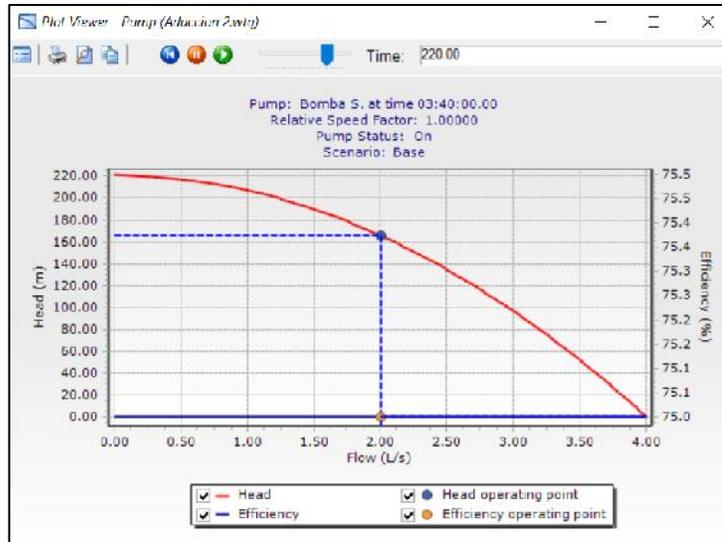


- En la sección de **Reportes** de WaterCAD, se puede acceder a un cómputo métrico completo de las tuberías del sistema de manera general y a grosso modo. Estos informes incluyen detalles esenciales como el diámetro, la longitud total, el tipo de material.

	Diameter (in)	Length (PVC) (m)	Length (Galvanized iron) (m)	Length (All Materials) (m)
3.00 (in)	3.00	3,556.78	85.00	3,641.78
All Diameters	All Diameters	3,556.78	85.00	3,641.78

- WaterCAD permite generar y visualizar la curva de operación del sistema hidráulico, la curva característica propia de la bomba, mostrando la relación entre el caudal y la altura (o presión) de acuerdo con las necesidades de la aducción. Al interceptar la curva del sistema con la curva característica de la bomba, se puede identificar el punto de operación, lo cual es crucial para determinar la eficiencia y el rendimiento de la bomba dentro del sistema. Este análisis facilita la selección adecuada de la bomba y la optimización de su funcionamiento para garantizar el cumplimiento de los requisitos de presión y caudal en el sistema.





En resumen, de los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.3.1.

Tabla 4.3.1: Resultados aducción WaterCAD.

Parámetro.	Hazen-Williams.	Darcy Weisbach.
Caudal.	2,00 l/s.	2,00 l/s.
Velocidad.	0,57 m/s.	0,57 m/s.
Presión máxima dinámica.	83,40 m.c.a.	84,26 m.c.a.
Presión mínima dinámica.	24,15 m.c.a.	24,15 m.c.a.
Pérdida de carga unitaria.	0,0052 m/m.	0,0054 m/m.
Altura de bombeo.	167,94 m.	169,30 m.
Tubería.	PVC; C-12; C=150.	PVC; C-12; k=0,001524mm.
Diámetro.	DN= 76,2mm.; e=4,6mm.	DN= 76,2mm.; e=4,6mm.
Tiempo llenado tanque.	230,02 min.	230,05 min.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.2. Red de distribución

Verificación de restricciones, una vez simulado el sistema de agua potable, se debe verificar las restricciones de la NB-689 que en red de distribución son las siguientes:

- Para el cálculo de la red de distribución se debe considerar la zona actual y futura con sus densidades actuales y aquellas consideradas en los planes reguladores urbanos o establecidas por el proyectista sobre la base de información local.
- Poblaciones iguales o menores a 2 000 habitantes 5,00 m.c.a. la presión dinámica, cuando el tanque este en los niveles mínimos.
- La presión estática máxima permitida en tuberías de distribución será de 70 m.c.a. referida al máximo nivel del tanque de almacenamiento.
- La presión estática máxima permitida en tuberías de distribución será de 50 m.c.a.
- La velocidad mínima en la red de distribución en ningún caso debe ser menor a 0,30 m/s para garantizar la autolimpieza del sistema.
- Para poblaciones pequeñas, se aceptarán velocidades menores, solamente en ramales secundarios.
- La velocidad máxima en la red de distribución no debe ser mayor a 2,00 m/s.
- En redes abiertas, el diámetro mínimo de la tubería principal debe ser de 1", aceptándose, en poblaciones menores a 2 000 habitantes, un diámetro de 3/4" para ramales.
- Para el cálculo de ramales debe considerarse un caudal mínimo de 0,10 l/s.
- Los caudales puntuales (escuelas, hospitales, etc.) deben ser considerados como un nudo.
- La pérdida de carga en el ramal debe ser determinada para el caudal del tramo.

a) Construcción topológica y configuración

- Este procedimiento sigue una metodología análoga a la utilizada para el sistema de aducción. No obstante, las particularidades y variables adicionales requeridas para la modelación hidráulica de la red de distribución se detallan a continuación.

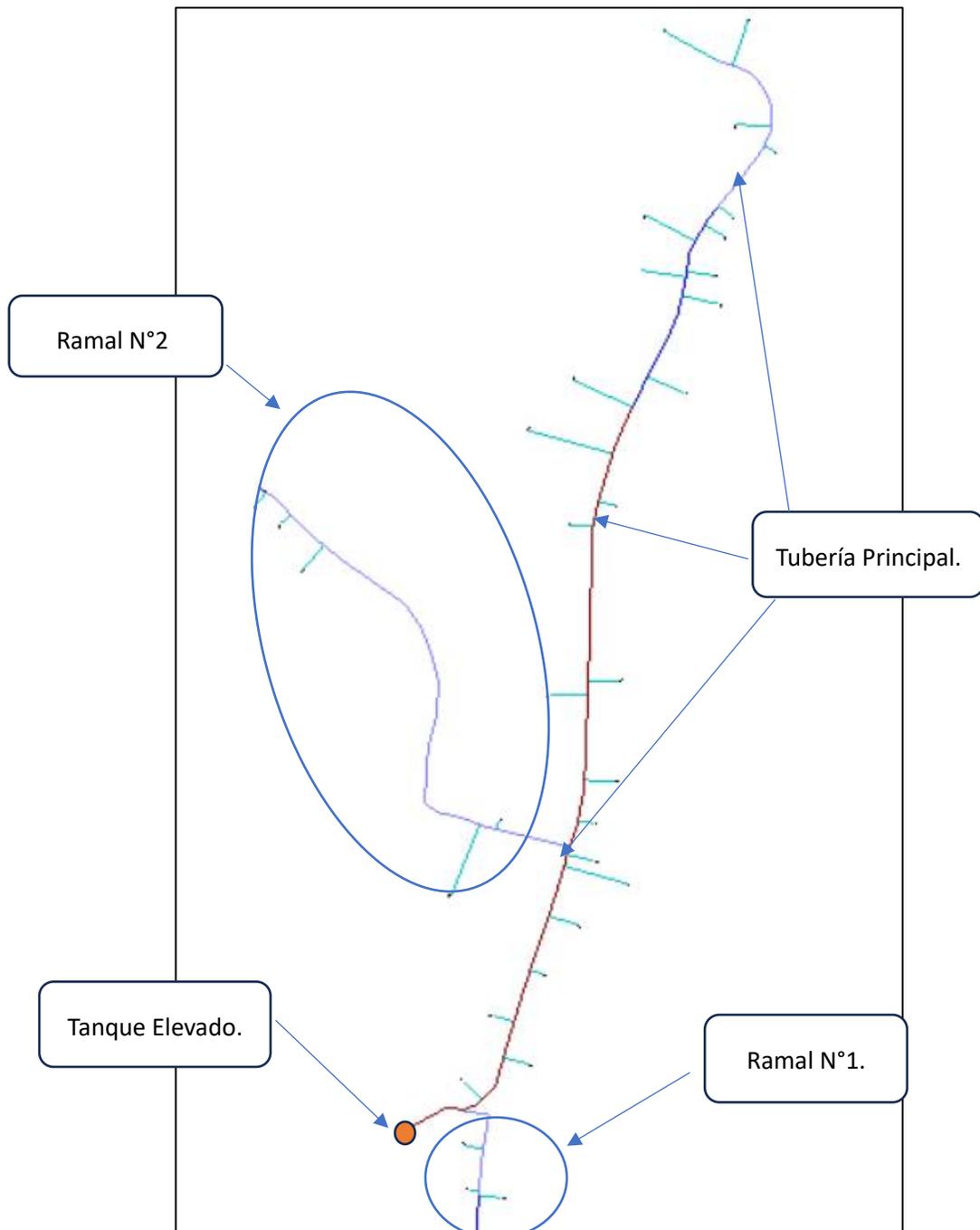
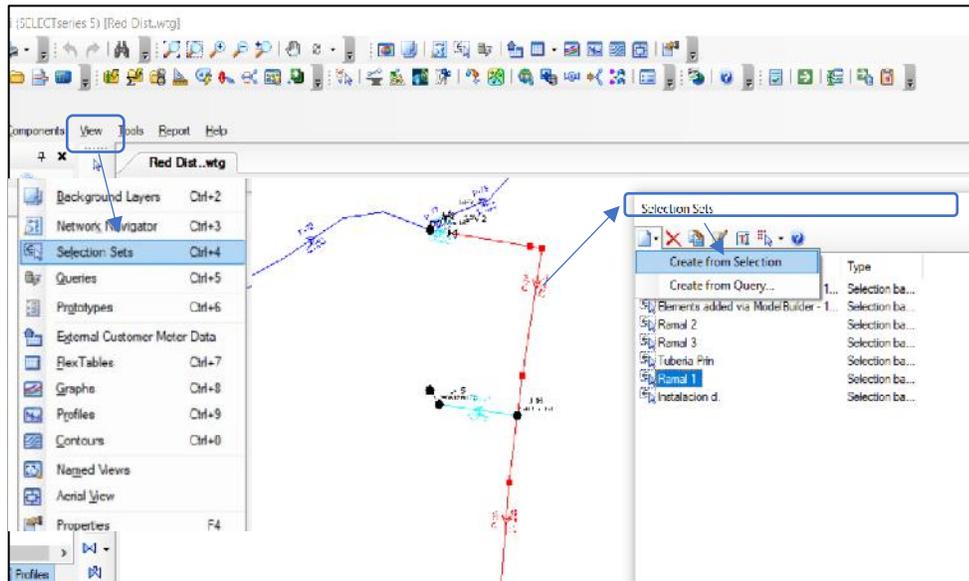


Figura 4.3.6: Red de distribución Chirimoyal.

Fuente: Elaboración propia.

b) Creación de secciones de la red

- La creación de secciones específicas dentro de la red hidráulica, como ramales o la tubería principal, permite organizar y gestionar el modelo de manera más eficiente. Este proceso consiste en seleccionar las tuberías correspondientes directamente en el dibujo del modelo, utilizando la combinación de teclas Ctrl + clic para elegir múltiples elementos. Una vez definida la selección, se puede crear un grupo o subconjunto de elementos, lo cual permite editar sus características de forma conjunta (como diámetro, material, rugosidad o asignaciones de carga), sin afectar el resto de las tuberías o componentes de la red. Esta funcionalidad resulta especialmente útil para realizar ajustes sectorizados, análisis por zonas o pruebas de alternativas de diseño dentro de WaterCAD.

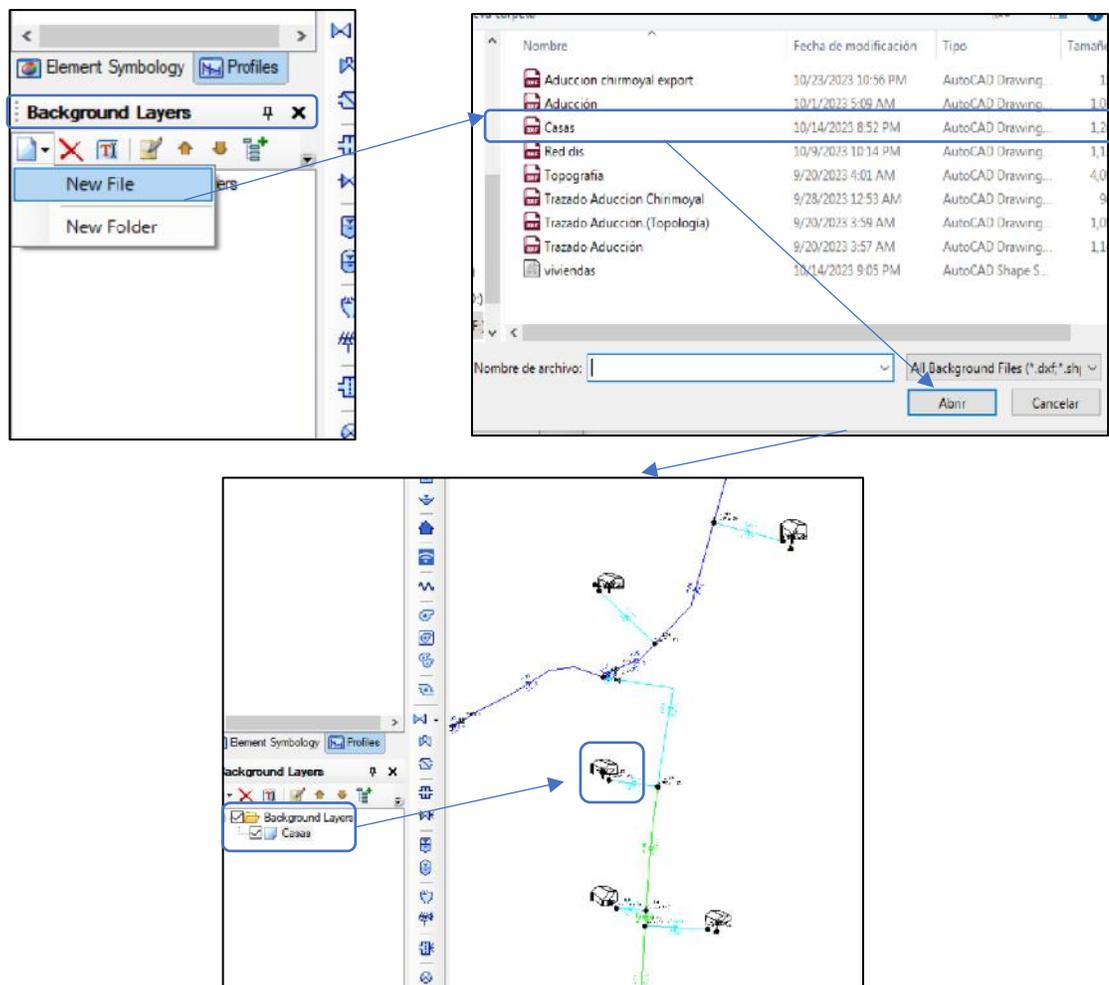


c) Asignación de demandas

Se realiza la simulación hidráulica de la red principal considerando el caudal máximo horario, al cual se suma el consumo correspondiente a la unidad educativa (1,43 L/s). Dado que se trata de una comunidad rural, no se contempla un caudal destinado a la lucha contra incendios. La verificación se enfoca en comprobar que los diámetros seleccionados satisfacen las condiciones del escenario proyectado (demanda futura), cumpliendo con los parámetros establecidos por la norma NB-689.

Se realiza la simulación considerando el escenario actual, basado en la densidad poblacional vigente de las viviendas en la comunidad de Chirimoyal.

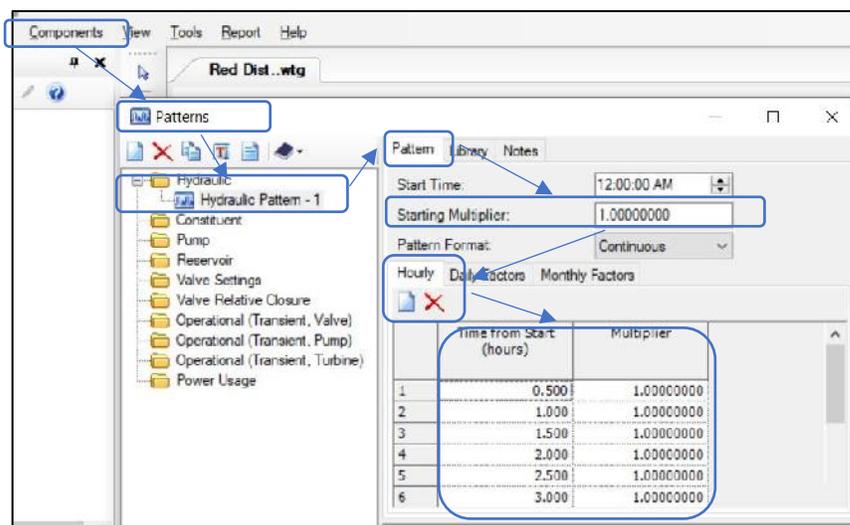
- Para la asignación de las **demandas**, como es el caso de la población de Chirimoyal, esta puede efectuarse de forma manual, nodo por nodo. No obstante, también se dispone de herramientas específicas como el Demand Control Center y Customer Meter, siendo esta última la más adecuada para distribuir las demandas según el número de familias. Para ello, se importa como fondo (background) el plano de ubicación de las viviendas de los beneficiarios. Al activarse, dicho fondo permite visualizar directamente en el dibujo la localización de cada una de las casas.



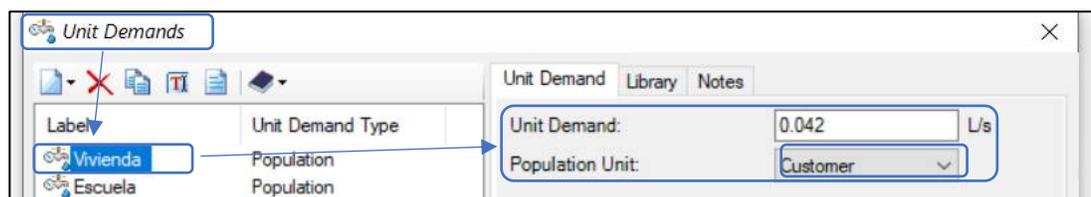
- Para comprobar que las presiones de servicio cumplan con los valores establecidos por la norma NB-689, se evalúa la condición de presión dinámica mínima. Para ello, se configura el sistema con el tanque en su nivel mínimo operativo y se simula el

escenario de demanda máxima (caudal máximo horario). Esta configuración permite representar el momento más crítico del sistema, donde el consumo es elevado y el nivel del tanque es bajo, permitiendo verificar si las presiones disponibles en los nodos cumplen con los valores mínimos exigidos por la normativa.

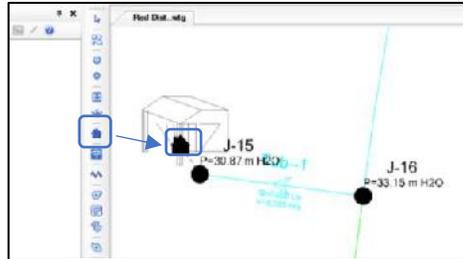
- Para esta simulación, se crea un patrón de consumo (Pattern) con caudal constante, correspondiente al caudal máximo horario previamente calculado. Dado que se utiliza directamente el valor del caudal máximo horario, el multiplicador (Multiplier) del patrón se establece en 1.



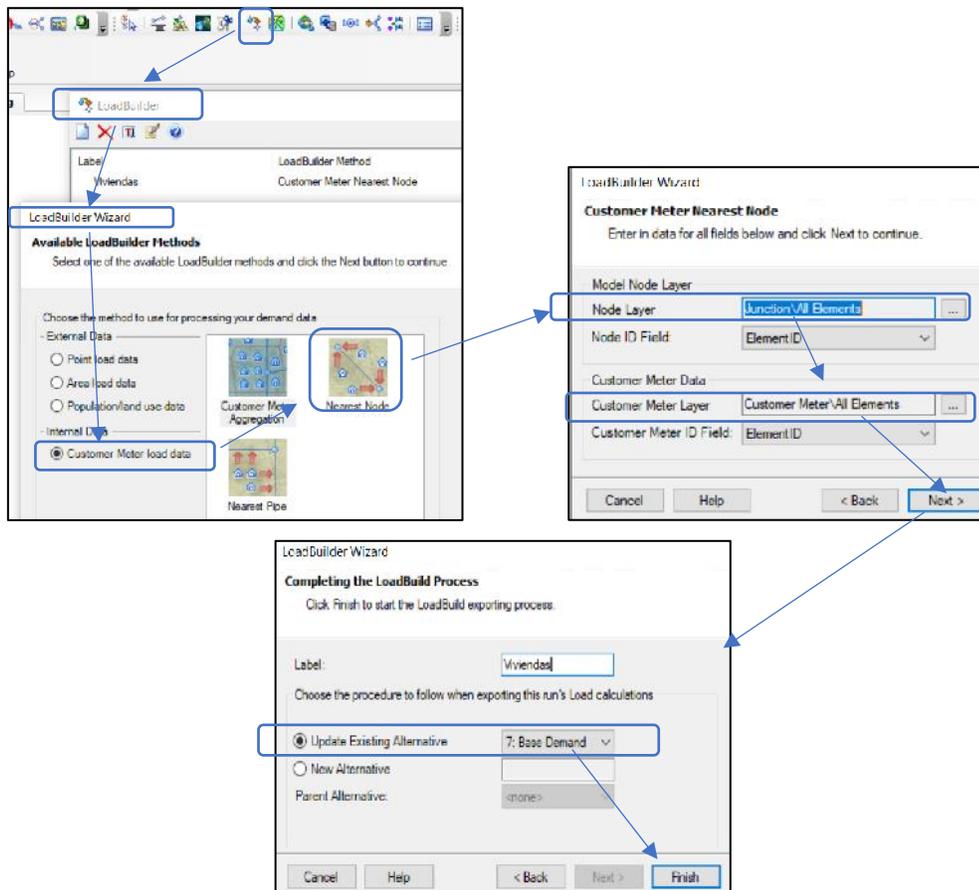
- Se procede a la creación de una nueva unidad de demanda (Unit Demand) mediante la herramienta Customer (Cliente) disponible en WaterCAD. A través de esta funcionalidad, se asigna a cada cliente individual un caudal unitario previamente calculado, basado en el consumo por familia determinado en el estudio de demanda (0,042 l/s). De igual manera, se crea y asigna una unidad de demanda específica para la unidad educativa, utilizando el caudal correspondiente establecido en el análisis preliminar (0,040 l/s). Esta asignación permite representar con mayor precisión la distribución espacial de las demandas dentro del modelo hidráulico.



- Con el plano de fondo (background) activado, se procede a representar las viviendas mediante la herramienta Customer Meter, ubicándolas en las proximidades de los nudos más cercanos.



- Para asociar cada elemento Customer Meter a un nudo de la red, se utiliza la herramienta LoadBuilder. En el proceso, se selecciona la opción "Asociar al nudo más cercano (red abierta)", indicando como capas de entrada la capa de nodos (seleccionar todos) y la capa correspondiente a los Customer Meters (todos). A continuación, se elige la alternativa de asignación "Demanda base" y se finaliza el procedimiento. Esta operación permite vincular cada unidad de consumo con su nudo más próximo.



- A través de la FlexTable (Customer Meter), desde esta interfaz es posible asignar una o más unidades de demanda según sea necesario. Es importante tener en cuenta la ubicación de la unidad educativa, ya que requiere una demanda específica a las demandas residenciales, para la condición de presión dinámica mínima el número de demandas es 1 (sumado es el caudal máximo horario más el caudal de la escuela).

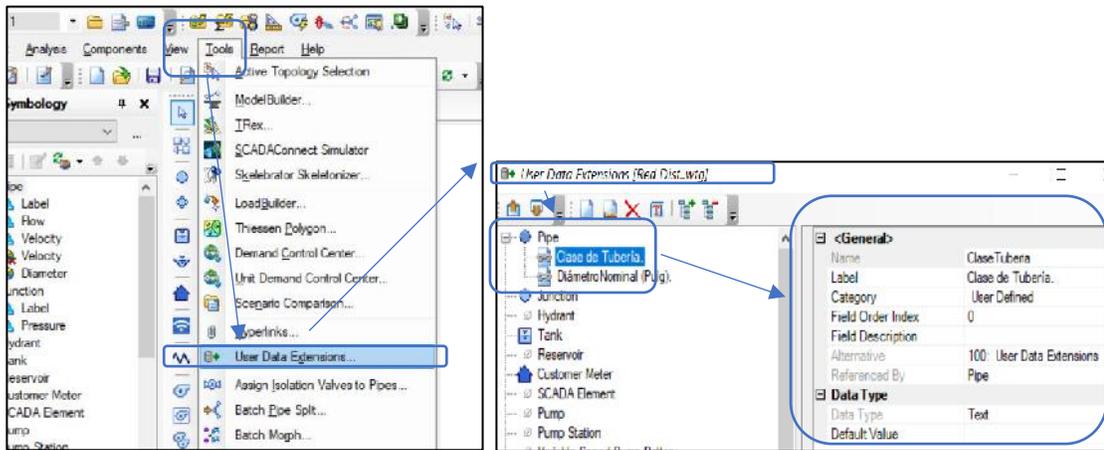
	ID	Label	Associated Element	Demand (L/s)	Number of Unit Demands	Unit Demand	Pattern (Unit Demand)	Pattern (Demand)	Is Active?
217: CU-1	217	CU-1	J-11	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
218: CU-2	218	CU-2	J-9	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
219: CU-3	219	CU-3	J-43	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
220: CU-4	220	CU-4	J-55	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
221: CU-5	221	CU-5	J-1	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
222: CU-6	222	CU-6	J-31	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
223: CU-7	223	CU-7	J-63	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
224: CU-8	224	CU-8	J-37	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
225: CU-9	225	CU-9	J-5	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
226: CU-10	226	CU-10	J-21	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
227: CU-11	227	CU-11	J-29	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
228: CU-12	228	CU-12	J-33	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
229: CU-13	229	CU-13	J-15	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
230: CU-14	230	CU-14	J-25	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
231: CU-15	231	CU-15	J-3	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
232: CU-16	232	CU-16	J-13	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
233: CU-17	233	CU-17	J-39	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
234: Escuela	234	Escuela	J-47	0.00	1.00	Escuela	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
235: CU-19	235	CU-19	J-41	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓
236: CU-20	236	CU-20	J-27	0.00	1.00	Vivienda	Hydraulic Pattern - 1	Fixed	✓

d) Edición y configuración masiva de los elementos

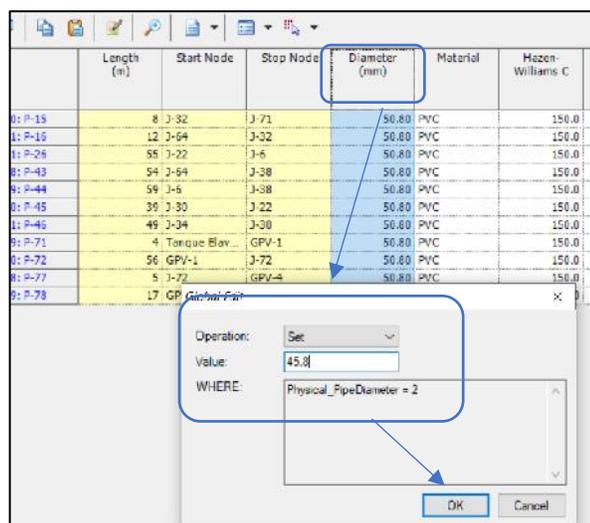
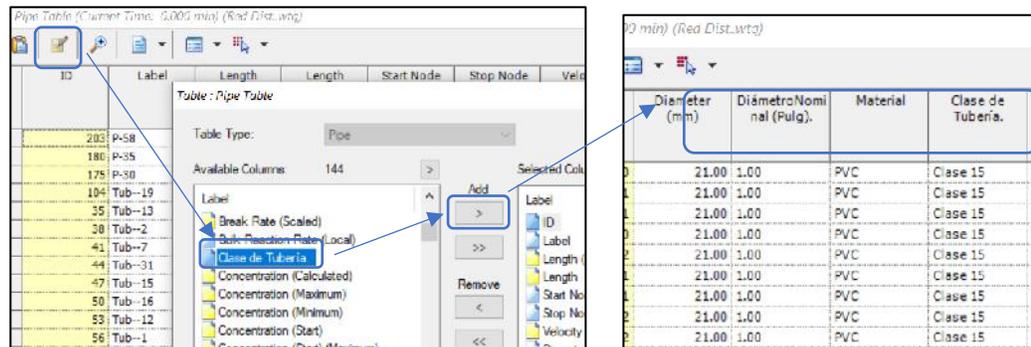
El programa, por defecto, trabaja con diámetros nominales. Por esta razón, es necesario modificar estos valores para reflejar el diámetro interior real de las tuberías, considerando el espesor del material. Esta corrección se realiza desde la FlexTable, aplicando filtros por tipo de material y clase de tubería. Una vez filtradas, se reemplaza el valor del diámetro nominal por el correspondiente diámetro interior, conforme a tablas técnicas del fabricante, para poder diferenciar estos diámetros, Diámetro nominal(DN), clase de tubería y el diámetro interno de la tubería, se crea un campo en la flex table para cada uno de ellos.

- Para crear nuevos campos(User Data Extensions), menú Tools > User Data Extensions, selecciona el tipo de elemento (Pipe), clic en el ícono de agregar (📄). Luego, se asigna un nombre técnico y un rótulo visible, define el tipo de dato (texto, porque lo utilizaremos para información), y opcionalmente un valor por defecto.

Guardar los cambios con “OK” y el nuevo campo estará disponible para añadirlo en la FlexTable correspondiente.

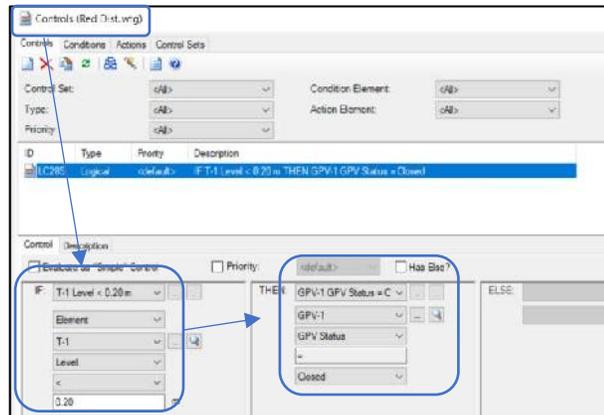


- Adicionar los campos creados manualmente (User Data Extensions) a la FlexTable, abrir la FlexTable correspondiente al tipo de elemento (Pipe con tuberías) > Edit. Con esta opcion adicionamos los campo requeridos para visualizarse en la tabla.



e) **Análisis de Resultados Iniciales y Ajuste del Diseño (proceso de diseño iterativo).**

- Para simular la presión dinámica mínima (con el tanque a nivel mínimo), es necesario definir los controles de funcionamiento del sistema. La válvula de paso del tanque se configurará para permanecer abierta hasta que el nivel del agua en el tanque descienda por debajo de 0,30 m, momento en el cual se cerrará, permitiendo simular las condiciones de presión mínima.



- Se procede a validar y computar la red de distribución de la misma manera que en el sistema de aducción. Esto implica revisar la coherencia topológica del modelo, verificar la correcta asignación de demandas y parámetros hidráulicos, así como ejecutar la simulación para evaluar los resultados de presiones, velocidades y pérdidas de carga.

Time (hours)	Balanced?	Trials	Relative Flow Change	Flow Supplied (L/s)	Flow Demanded (L/s)	Flow Stored (L/s)
All Time Steps...	True	18	0.0003024	0.00	1.43	-1.02
0.00	True	2	0.0001573	0.00	1.43	-1.43
0.50	True	1	0.0001194	0.00	1.43	-1.43
1.00	True	1	0.0000918	0.00	1.43	-1.43
1.50	True	1	0.0000699	0.00	1.43	-1.43
2.00	True	1	0.0000677	0.00	1.43	-1.43
2.50	True	1	0.0000677	0.00	1.43	-1.43
3.00	True	1	0.0000698	0.00	1.43	-1.43
3.50	True	1	0.0000698	0.00	1.43	-1.43
4.00	True	1	0.0000675	0.00	1.43	-1.43
4.50	True	1	0.0000675	0.00	1.43	-1.43
4.67	True	4	0.0003023	0.00	1.43	0.00
5.00	True	1	0.0003024	0.00	1.43	0.00
5.50	True	1	0.0000748	0.00	1.43	0.00
6.00	True	1	0.0000748	0.00	1.43	0.00

El programa reporta que el sistema puede operar bajo el escenario de demanda máxima horaria sin reposición al tanque durante aproximadamente 4,67 horas. A partir de este

punto, el sistema no puede seguir satisfaciendo las demandas, ya que el almacenamiento se agota, lo que compromete la continuidad del servicio.

f) Resultados

I. Presión dinámica mínima (P.D. min.) y velocidades

- Para verificar la presión dinámica mínima, velocidades del sistema, considerando los diámetros de tubería seleccionados, se analiza el comportamiento del sistema en el intervalo de tiempo correspondiente a las 4,67 horas, momento en el que el tanque alcanza su nivel mínimo operativo. Para ello, se utiliza la herramienta **Time Browser** (F7) para posicionarse en dicho paso de tiempo. Luego, desde la FlexTable de nodos (Junctions), se accede a la opción de Statistics y se revisa el valor de presión (Pressure).

The screenshot illustrates the process of checking the minimum dynamic pressure in the system. It shows three main components:

- Time Browser:** A window showing a timeline from 240,000 to 280,483 minutes. The current time is set to 280,000 minutes (4.67 hours).
- FlexTable: Junction Table:** A table showing the status of various junctions at the current time. The 'Pressure (m H2O)' column is highlighted, and a context menu is open over it, with 'Statistics...' selected.
- Statistics Dialog:** A dialog box showing the statistical distribution of pressure values for the selected junctions. The minimum pressure is highlighted as 5.32 m H2O.

ID	Label	Elevation (m)	Zone	Demand Collection	Demand (L/s)	Hydraulic Grade (m)	Pressure (m H2O)	Customer Meter Demands	Unit Demand Colle
142: J-72	142 J-72	603.77	<None>	<Collect...	0.00	634.46	30.63	<Collection>	<Collection>
85: J-34	85 J-34	603.16	<None>	<Collect...	0.00	634.10	30.68	<Collection>	<Collection>
84: J-33	84 J-33	603.00	<None>	<Collect...	0.04	633.62	30.56	<Collection>	<Collection>
79: J-30	79 J-30	604.50	<None>	<Collect...	0.00	633.38	28.82	<Collection>	<Collection>
78: J-29	78 J-29	604.50	<None>	<Collect...	0.04	632.93		<Collection>	<Collection>
67: J-22	67 J-22	603.12	<None>	<Collect...	0.00	632.84		<Collection>	<Collection>
66: J-21	66 J-21	601.09	<None>	<Collect...	0.04	632.46		<Collection>	<Collection>
43: J-6	43 J-6	598.62	<None>	<Collect...	0.00	632.13		<Collection>	<Collection>
42: J-5	42 J-5	599.12	<None>	<Collect...	0.04	631.91		<Collection>	<Collection>

Count:	72	
Maximum:	43.34	m H2O
Mean:	25.42	m H2O
Minimum:	5.32	m H2O
Standard Deviation:	11.10	m H2O
Sum:	1,830.57	m H2O

Se observa que la presión mínima dinámica en la simulación se encuentra al límite inferior de los valores establecidos por la norma NB-689, que establece una presión mínima de servicio de 5 m.c.a. en condiciones de máxima demanda.

- Se procede a identificar el nodo en la red (herramienta **Zoom To**) para realizar un ajuste en el diámetro de la tubería principal o tuberías secundarias del ramal con el objetivo de reducir las pérdidas de carga por fricción, lo cual permitirá incrementar la presión disponible en los nodos más alejados o con cotas elevadas.
- Una vez realizados los cambios en el modelo, se ejecuta nuevamente la simulación hidráulica para verificar que las presiones cumplan con los requerimientos normativos.

Demand (l/s)	Hydraulic Grade (m)	Pressure (m H2O)	Customer Meter Demands	Unit
0.00	634.66	30.83	<Collection>	<Colle
0.00	634.30	31.08	<Collection>	<Colle
0.04	633.82	30.76	<Collection>	<Colle

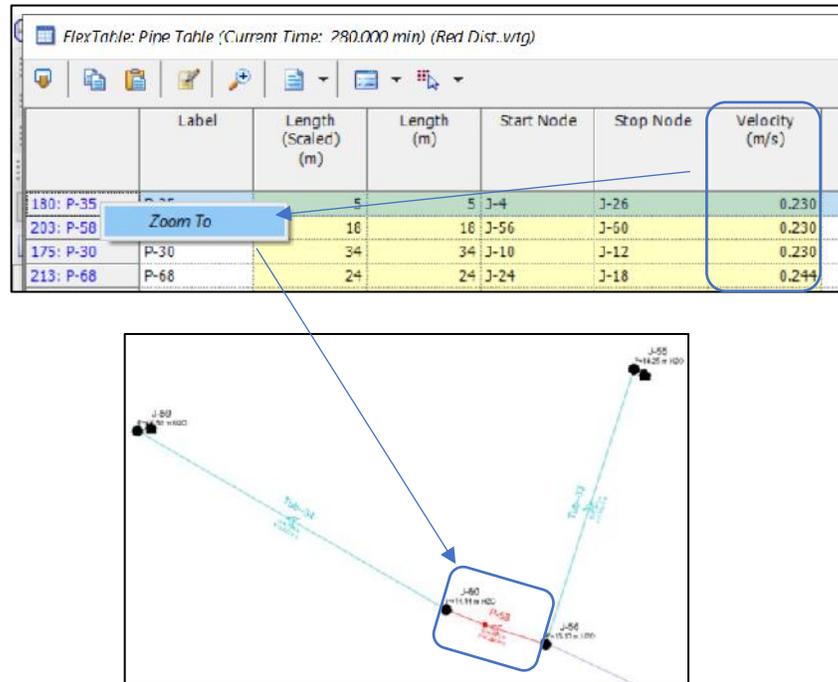
Statistics	
Count:	72
Maximum:	46.92 m H2O
Mean:	28.40 m H2O
Minimum:	8.35 m H2O
Standard Deviation:	9.88 m H2O
Sum:	2,044.82 m H2O

- Para verificar que las velocidades del flujo cumplan con los parámetros establecidos por la norma NB-689, se accede a la FlexTable de tuberías (Pipes). En esta tabla se revisa la columna “Velocity”, donde se evalúa que los valores obtenidos se encuentren dentro del rango permitido por la normativa (generalmente entre 0,30 m/s y 2,00 m/s para redes de distribución).

	Darcy-Weisbach e (mm)	Has Check Valve?	Flow (l/s)	Velocity (m/s)	Minor Loss Coefficient (Local)	Headloss Gradient (m/m)
35: Tub-13	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
36: Tub-2	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
41: Tub-7	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
44: Tub-31	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
47: Tub-15	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
50: Tub-18	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
53: Tub-12	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
56: Tub-1	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
59: Tub-29	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
62: Tub-21	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
65: Tub-6	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
68: Tub-28	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
71: Tub-3	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
74: Tub-20	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
77: Tub-5	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
80: Tub-11	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
83: Tub-4	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618
86: Tub-27	0.001524	<input type="checkbox"/>	0.04	0.332	0.00	0.618

Statistics	
Count:	77
Maximum:	1.150 m/s
Mean:	0.458 m/s
Minimum:	0.230 m/s
Standard Deviation:	0.228 m/s
Sum:	38.311 m/s

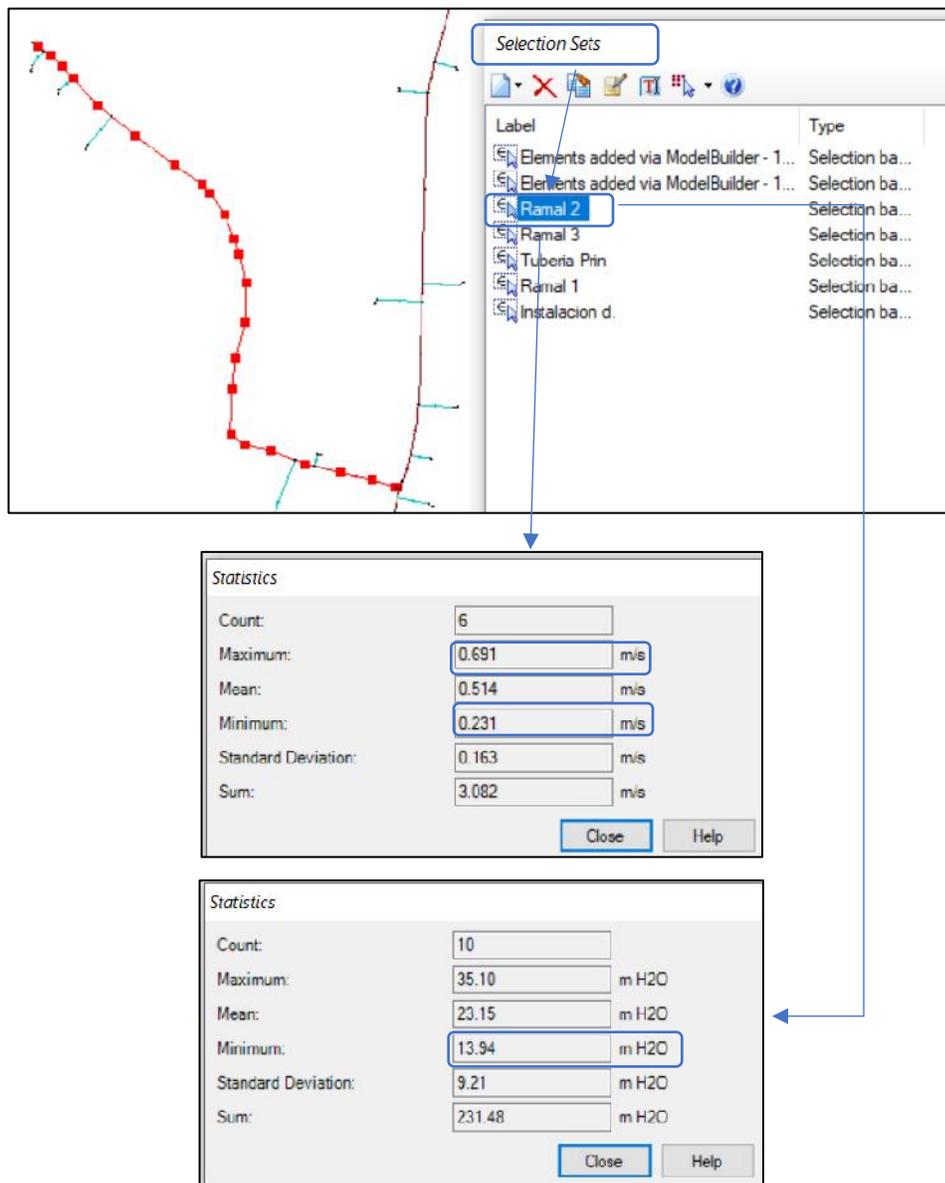
- Se observa que existen tuberías con velocidades inferiores al límite mínimo establecido por la norma. Para identificarlas, en la FlexTable de tuberías (Pipes), se ordenan los valores de la columna Velocity de menor a mayor. Una vez localizadas, se puede utilizar la herramienta **Zoom To** para ubicarlas gráficamente en el modelo y evaluar si es necesario ajustar su diámetro o configuración para optimizar su funcionamiento.



i. Verificación de tubería principal y ramales

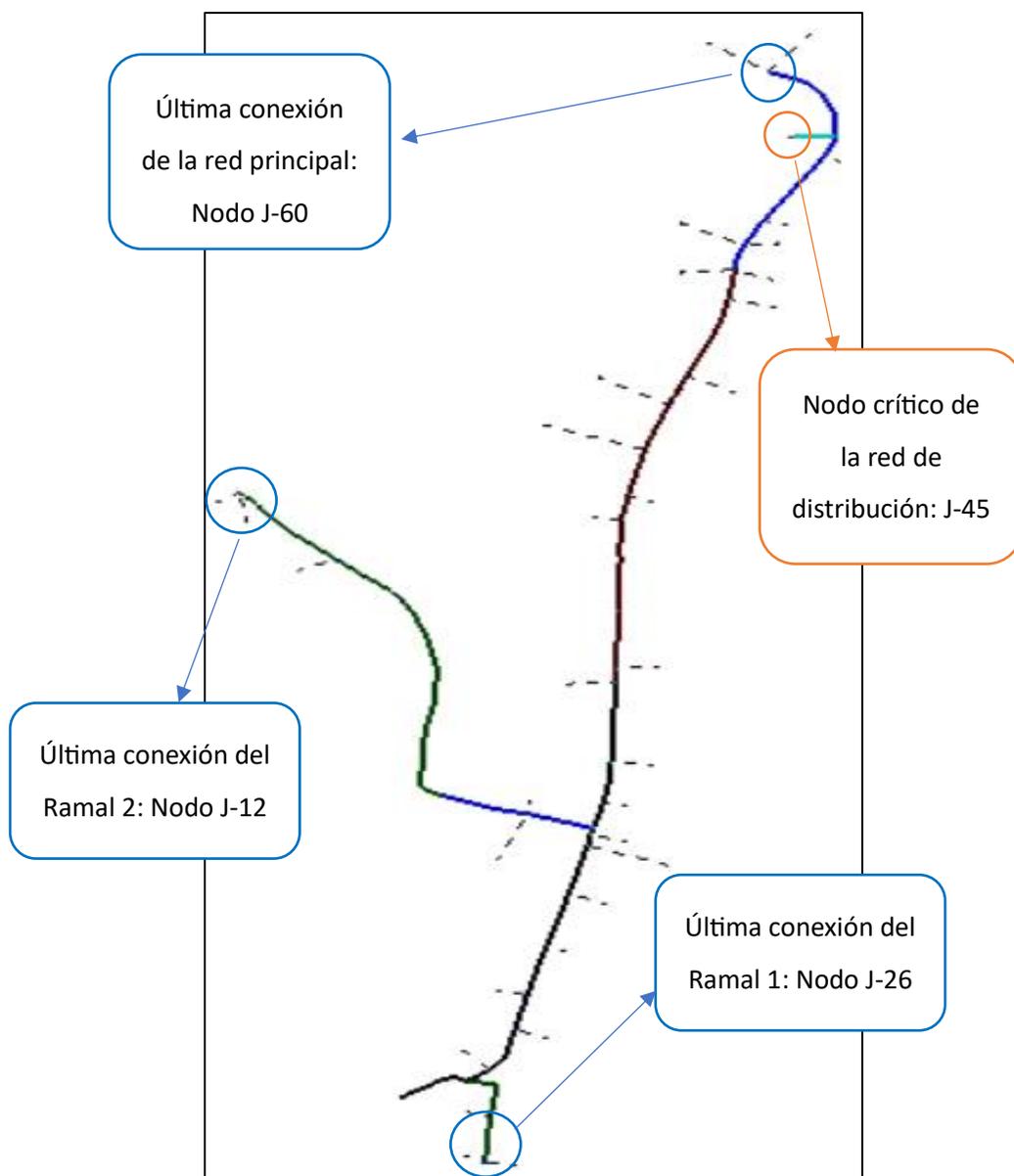
- Para verificar las velocidades tanto en la tubería principal como en cada uno de los ramales, se utiliza la herramienta **“Selection Sets”**. Esta permite seleccionar individualmente cada ramal o tramo del sistema. Una vez seleccionado el conjunto correspondiente, se accede a la FlexTable de tuberías (Pipes), donde se revisan los parámetros hidráulicos, Velocidad (columna Velocity), para verificar que las velocidades estén dentro del rango permitido por la norma NB-689, tomando en cuenta sus recomendaciones adicionales.
- De igual forma, la verificación de las presiones dinámicas se realiza mediante la FlexTable de nodos (Junctions), en el intervalo de tiempo correspondiente al nivel mínimo del tanque (en el tiempo 4,67 h). En dicha tabla se revisa el valor de presión

registrado en cada nodo, el cual representa la presión dinámica mínima bajo condiciones de máxima demanda, exclusivamente en el ramal seleccionado.



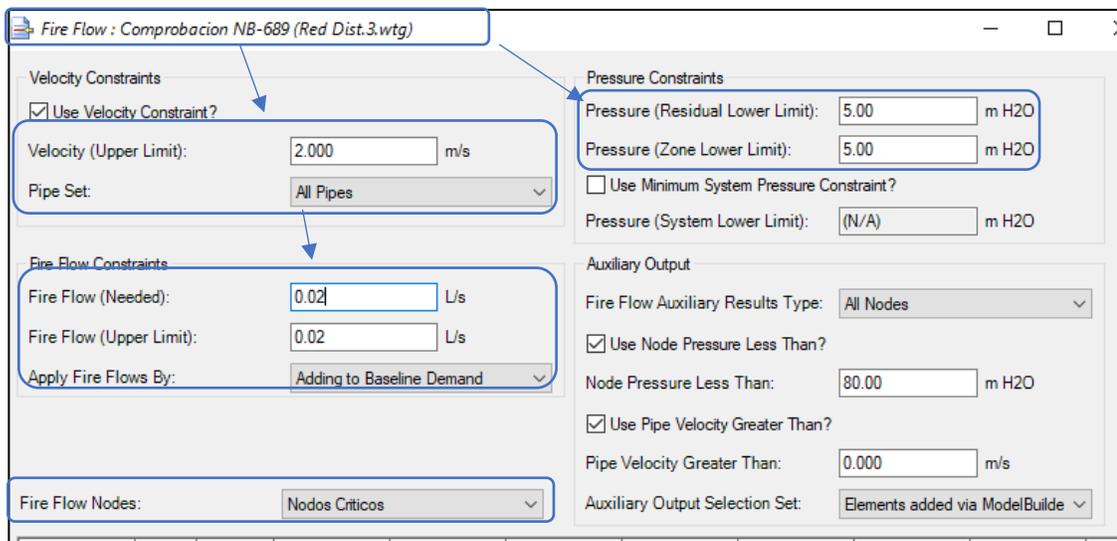
Observamos cada uno de los ramales y la tubería principal de la misma manera mencionada anteriormente, utilizando la herramienta Selection Sets para seleccionar individualmente cada tramo, y luego accediendo a la FlexTable de tuberías (Pipe) para revisar parámetros como velocidad, diámetro, longitud y pérdidas de carga, verificando que cumplan con los criterios establecidos por la norma NB-689. Esta revisión detallada permite identificar tramos que requieren ajustes para optimizar el diseño hidráulico del sistema.

- También se observó que el caudal mínimo que circula en los ramales 1 y 2, así como en el último tramo de la tubería principal, es inferior a 0,10 l/s, lo cual no cumple con el valor mínimo establecido por la NB-689. Por esta razón, se procedió a realizar una verificación adicional utilizando la herramienta "Fire Flow". Esta herramienta permite simular una condición crítica de demanda puntual en los nodos más críticos, con el objetivo de comprobar si los diámetros seleccionados son adecuados. Cabe aclarar que esta verificación no tiene como finalidad redimensionar el sistema en función de este caso extremo, sino validar la confiabilidad del diseño frente a exigencias normativas mínimas.



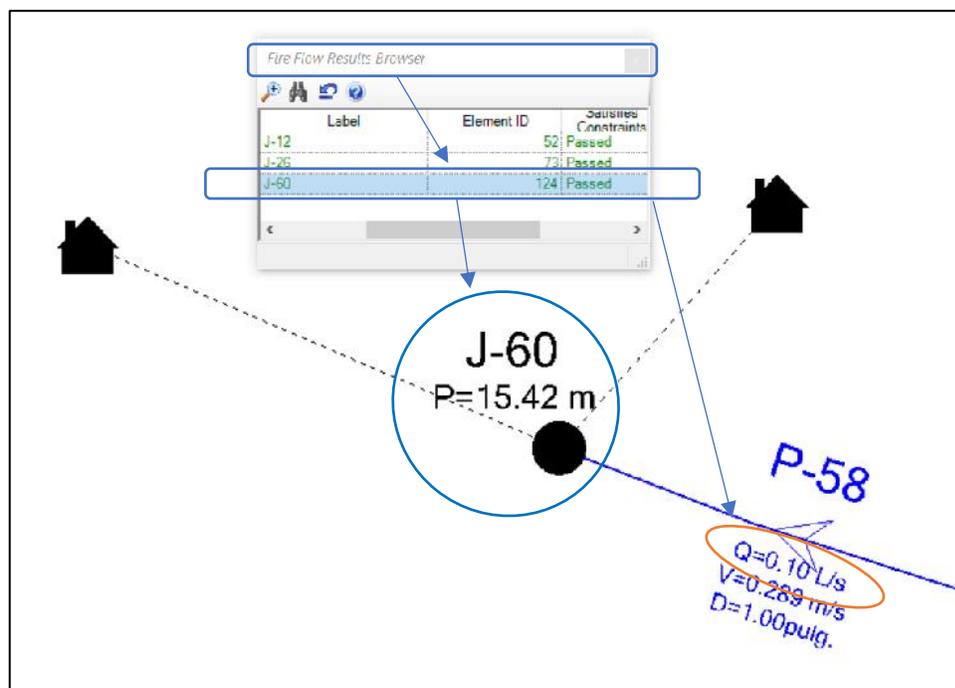
- Se realizó un análisis exclusivo de la red, sin considerar las acometidas domiciliarias. Para ello, se generó una copia del modelo con el objetivo de simular un escenario de verificación, utilizando la herramienta “Skelebrator”, la cual permite simplificar la red de distribución conservando su comportamiento hidráulico. De esta manera, se enfoca únicamente en los ramales principales. Posteriormente, se reasignó la asociación de los Customer Meters al nodo final de cada ramal, de modo que este represente una demanda equivalente a dos viviendas, acumulando un caudal de 0,084 l/s.
- Para cumplir con estas exigencias normativas sin incurrir en un sobredimensionamiento del sistema se recurrió al uso de la herramienta "Fire Flow". Esta herramienta permite asignar una demanda adicional o eventual en un nodo específico con fines de comprobación. En este caso, se añadió una demanda de 0,016 l/s en el nodo más alejado del Ramal 2 (J-12), la misma acción se realiza en el nodo más alejado de la Tubería principal (J-60) y ramal 1 (J-26), con el objetivo de elevar el caudal en el tramo final hasta 0,10 l/s, valor mínimo exigido por la norma para dicho tramo, sin tener una elevación considerable en el caudal total de la red (1,442 l/s.)
- Para realizar la verificación mencionada previamente, se creó un escenario hijo (Child Scenario) en el entorno de modelación de WaterCAD. Este escenario replica las condiciones hidráulicas del modelo base, pero incorpora una configuración específica para el análisis con la herramienta Fire Flow, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema frente a una demanda crítica adicional.
- En primer lugar, dentro del menú de alternativas, se creó una nueva alternativa hija en la categoría Fire Flow. La configuración aplicada en esta alternativa fue la siguiente:
 - Velocidad máxima permitida en tuberías: se restringió a 2 m/s, en cumplimiento con los límites establecidos por la normativa para evitar pérdidas excesivas de energía por fricción.

- Fire Flow (Needed): se definió un caudal puntual requerido de 0,016 l/s, correspondiente a la demanda adicional necesaria para alcanzar el mínimo normativo en el tramo final del ramal.
- Fire Flow (Upper Limit): se fijó también en 0,016 l/s, con el fin de evitar que el software simule valores mayores si la presión lo permite. Esta medida garantiza que la simulación represente fielmente el escenario previsto, sin permitir sobreestimaciones.
- Pressure (Residual Lower Limit): se estableció en 5 m.c.a. (metros de columna de agua), valor mínimo aceptable de presión residual según la normativa, para asegurar condiciones de servicio adecuadas en el nodo evaluado.
- Apply Fire Flows By: se seleccionó la opción "Add to baseline demand", lo cual indica que el caudal adicional será sumado a la demanda base ya existente en el nodo, reflejando un escenario de mayor exigencia.
- Finalmente, en la sección Fire Flow Nodes, se seleccionaron los nodos críticos correspondientes al Ramal 1, Ramal 2 y al tramo final de la tubería principal, con el fin de comprobar si el sistema es capaz de conducir los caudales requeridos en cada punto sin comprometer la presión ni exceder los límites hidráulicos establecidos.



- Una vez configurado el escenario, se procedió a ejecutar la simulación en WaterCAD. El software realiza el análisis del sistema considerando tanto las demandas normales como las demandas adicionales, simuladas mediante la herramienta Fire Flow. Los resultados específicos del análisis se visualizan a través del panel "Fire Flow Results Browser", el cual presenta cada simulación de forma individual.
 - Nodo J-12: nodo terminal del Ramal 2.
 - Nodo J-26: nodo más alejado del Ramal 1.
 - Nodo J-60: nodo crítico ubicado en el extremo de la tubería principal.

Es importante destacar que cada simulación es independiente, es decir, en cada una se incrementa el caudal únicamente en uno de los nodos seleccionados. El software evalúa si las condiciones hidráulicas —presión mínima y velocidad máxima— cumplen con las restricciones configuradas previamente. Cuando un nodo y sus tuberías asociadas cumplen con todos los parámetros establecidos, el resultado se muestra en color verde; en caso de que alguna condición no se satisfaga, el resultado aparece en color rojo. Al seleccionar cualquiera de estos nos muestra la simulación con el aumento en ese nodo.



- Los resultados nos muestran que en todos los casos cumplen.

II. Presión estática máxima (P.E. máx.)

- Para verificar la presión estática máxima, se realiza una simulación en condiciones sin consumo, dado que el programa no presenta una opción directa para este análisis (entrega solo presiones dinámicas). Para ello, se selecciona el intervalo de tiempo 0,00 horas (inicio de la simulación), con el tanque completamente lleno y sin ninguna unidad de demanda activa. Esta condición se configura desde la FlexTable de Customer Meter, estableciendo la cantidad de unidades en cero para cada consumidor. Así, se genera un escenario sin movimiento del flujo en la red, donde las presiones resultantes en los nodos corresponden únicamente a la carga estática, determinada por la diferencia de altura entre el nivel del agua en el tanque y cada nodo, despreciando las pérdidas de carga por fricción.

The image shows a screenshot of the 'FlexTable: Customer Meter Table' interface. The table lists various demand units (CU-5, CU-15, CU-9, CU-31, CU-2, CU-1, CU-16, CU-13, CU-30, CU-21, CU-10) with columns for ID, Label, Associated Element, Demand (L/s), Pattern (Demand), Number of Unit Demands, Unit Demand (L/s), and Unit Demand (Base) (L/s). A context menu is open over the 'Number of Unit Demands' column, with 'Global Edit...' selected. Below the main table, a 'Global Edit' dialog box is shown, where the 'Operation' is set to 'Set' and the 'Value' is 0. The dialog also shows a 'WHERE' field with '<no filter active>'. The main table is partially obscured by the dialog box.

ID	Label	Associated Element	Demand (L/s)	Pattern (Demand)	Number of Unit Demands	Unit Demand (L/s)	Unit Demand (Base) (L/s)	Pattern Dem
221: CU-5	221 CU-5	J-1	0.00	Fixed	1	1.00	0.00	H
231: CU-15	231 CU-15	J-3	0.00	Fixed	1	1.00	0.00	H
225: CU-9	225 CU-9	J-5	0.00	Fixed	1	1.00	0.00	H
247: CU-31	247 CU-31	J-7	0.00	Fixed	1	1.00	0.00	H
218: CU-2	218 CU-2	J-9	0.00	Fixed	1	1.00	0.00	H
217: CU-1	217 CU-1	J-11	0.00	Fixed	1	1.00	0.00	H
232: CU-16	232 CU-16	J-13	0.00	Fixed	1	1.00	0.00	H
229: CU-13	229 CU-13	J-15	0.00	Fixed	1	1.00	0.00	H
246: CU-30	246 CU-30	J-17	0.00	Fixed	1	1.00	0.00	H
237: CU-21	237 CU-21	J-19	0.00	Fixed	1	1.00	0.04	Hydrau
226: CU-10	226 CU-10	J-21	0.00	Fixed	1	1.00	0.06	Hydrau

Label	Associated Element	Demand (L/s)	Pattern (Demand)	Number of Unit Demands	Unit Demand (L/s)	Unit Demand (Base) (L/s)	Pattern Dem
U-5	J-1	0.00	Fixed	1.00	Vivienda	0.00	H
U-15	J-3	0.00	Fixed	1.00	Vivienda	0.00	H
U-9	J-5	0.00	Fixed	1.00	Vivienda	0.00	H
U-31	J-7	0.00	Fixed	1.00	Vivienda	0.00	H
U-2	J-9	0.00	Fixed	1.00	Vivienda	0.00	H
U-1	J-11	0.00	Fixed	1.00	Vivienda	0.00	H
U-16	J-13	0.00	Fixed	1.00	Vivienda	0.00	H
U-13	J-15	0.00	Fixed	1.00	Vivienda	0.00	H
U-30	J-17	0.00	Fixed	1.00	Vivienda	0.00	H
U-21	J-19	0.00	Fixed	1.00	Vivienda	0.00	H
U-10	J-21	0.00	Fixed	1.00	Vivienda	0.00	H
U-29	J-21	0.00	Fixed	1.00	Vivienda	0.00	H
U-14	J-21	0.00	Fixed	1.00	Vivienda	0.00	H

Se valida y computa el sistema con la modificación de las demandas establecidas en cero, lo cual permite simular una condición sin consumo. De esta forma, se obtiene la presión estática en los nodos.

- Para visualizar la presión estática máxima en el sistema, se accede a la FlexTable de nodos (Junctions), y dentro de ella se selecciona la opción “Statistics”. Allí se revisa el valor de Pressure Head (carga de presión), correspondiente al intervalo de tiempo 0,00 horas, cuando el tanque está lleno y no existe demanda.

Pressure (m H2O)	Customer Meter Demands	Unit Demand Collection	Customer Meter Unit Demands	Pressure Head (m)	Pressure (Maximum)
42.61	<Collection>	<Collection: 0 items>	<Collection>	42.61	42.61
45.03	<Collection>	<Collection: 0 items>	<Collection>	45.03	45.03
44.78	<Collection>	<Collection: 0 items>	<Collection>	44.78	44.78
42.11	<Collection>	<Collection: 0 items>	<Collection>	42.11	42.11
44.38	<Collection>	<Collection: 0 items>	<Collection>	44.38	44.38
42.57	<Collection>	<Collection: 0 items>	<Collection>	42.57	42.57
47.65	<Collection>	<Collection: 0 items>	<Collection>	47.65	47.65
33.08	<Collection>	<Collection: 0 items>	<Collection>	33.08	33.08
32.74	<Collection>	<Collection: 0 items>	<Collection>	32.74	32.74
32.72	<Collection>	<Collection: 0 items>	<Collection>	32.72	32.72
33.07	<Collection>	<Collection: 0 items>	<Collection>	33.07	33.07

Statistics	
Count:	72
Maximum:	54.86 m
Mean:	40.65 m
Minimum:	26.08 m
Standard Deviation:	7.00 m
Sum:	2,927.03 m

- Para el cálculo hidráulico de la red se utilizó la fórmula de Darcy-Weisbach, ya que proporciona resultados más precisos en sistemas presurizados, especialmente en redes con diámetros reducidos, como es el caso del presente proyecto. Adicionalmente, se aplicó la ecuación de Hazen-Williams, al igual que en el análisis de la aducción, con fines comparativos. Sin embargo, es importante señalar que las condiciones de esta red no se ajustan a los límites de aplicación recomendados por los autores de dicha fórmula, ya que el diámetro máximo de las tuberías en la red es de 2 pulgadas, mientras que la ecuación de Hazen-Williams es más adecuada para tuberías de 3 pulgadas o más de diámetro. Esto limita su precisión en redes con diámetros pequeños y justifica el uso preferente del método de Darcy-Weisbach en este análisis.

Para facilitar la comparación, el análisis y una comprensión clara de los resultados obtenidos, se presentan las Tablas 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4 y 4.3.5.

Tabla 4.3.2: Resultados de La tubería principal de la red (WaterCAD).

Parámetro.	Darcy Weisbach.	Hazen-Williams.
Presión Dinámica mínima Demanda caudal máximo horario.	16,47 m.c.a.	17,94 m.c.a.
Presión Dinámica mínima Comprobación NB-689.	15,42 m.c.a.	16,99 m.c.a.
Presión estática máxima.	54,86 m.c.a.	54,86 m.c.a.
Velocidad mínima.	0,12 m/s.	0,12 m/s.
Velocidad máxima.	0,87 m/s.	0,87 m/s.
Tubería.	PVC; C-9; e =2,50mm; DN=2,00 pulg; L = 525,59 m.	
	PVC; C-12; e =2,50mm; DN=1,50 pulg; L = 456,85 m.	
	PVC; C-15; e =2,20mm; DN=1,00 pulg; L = 271,68 m.	
Pérdida de carga unitaria mínima.	0,0010 m/m.	0,0012 m/m.
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0468 m/m.	0,0426 m/m.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3.3: Resultados Ramal N°1 (WaterCAD).

Parámetro.	Darcy Weisbach.	Hazen-Williams.
Presión Dinámica mínima Demanda caudal máximo horario.	26,11 m.c.a.	26,76 m.c.a.
Presión Dinámica mínima Comprobación NB-689.	25,17 m.c.a.	25,89 m.c.a.
Presión estática máxima.	34,74 m.c.a.	34,74 m.c.a.
Velocidad mínima.	0,23 m/s.	0,23 m/s.
Velocidad máxima.	0,69 m/s.	0,69 m/s.
Tubería.	PVC; C-15; e =1,90mm; DN=0,75 pulg; L= 112,31 m.	
Pérdida de carga unitaria mínima.	0,0068 m/m.	0,0055 m/m.
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0489 m/m.	0,0422 m/m.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3.4: Resultados Ramal N°2 (WaterCAD).

Parámetro.	Darcy Weisbach.	Hazen-Williams.
Presión Dinámica mínima Demanda caudal máximo horario.	21,00 m.c.a.	23,63 m.c.a.
Presión Dinámica mínima Comprobación NB-689.	17,50 m.c.a.	20,47 m.c.a.
Presión estática máxima.	51,51 m.c.a.	51,51 m.c.a.
Velocidad mínima.	0,23 m/s.	0,23 m/s.
Velocidad máxima.	0,69 m/s.	0,69 m/s.
Tubería.	PVC; C-15; e =1,90mm; DN=0,75 pulg; L=322,47 m.	
	PVC; C-15; e =2,20mm; DN=1,00 pulg; L=213,35 m.	
Pérdida de carga unitaria mínima	0,0068 m/m.	0,0055 m/m.
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0489m/m.	0,0422 m/m.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3.5: Resultados Conexión domiciliaria (WaterCAD).

Parámetro.	Darcy Weisbach.	Hazen-Williams.
Velocidad máxima.	0,33 m/s.	0,33 m/s.
Presión Dinámica mínima Demanda caudal máximo horario.	6,00 m.c.a.	7,52 m.c.a.
Presión Dinámica mínima Comprobación NB-689.	5,14 m.c.a.	6,76 m.c.a.
Tubería.	PVC; C-15; e =1,70mm; DN=0,50 pulg; L=1115,27 m.	
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0177 m/m.	0,0135 m/m.

Fuente: Elaboración propia.

- Se resalta que el punto crítico del sistema corresponde al nodo **J-45 (coordenadas: X=449694,22; Y=7590661,17)**, donde se registra la presión dinámica mínima de todo el sistema: **6,00 m.c.a. y 5,14 m.c.a. (comprobación NB-689)**.

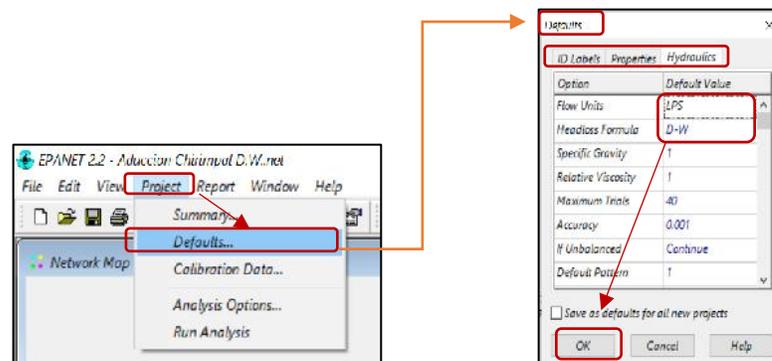
4.3.4. Aplicación EPANET

4.3.4.1. Aducción

Se presenta la estructuración detallada del proceso para configurar, editar y construir una aducción por bombeo en el software EPANET. Este proceso incluye la incorporación de todos los elementos hidráulicos necesarios que requiere el sistema.

a) Configuración

Para configurar correctamente el entorno de trabajo en EPANET, se debe definir primero el sistema de unidades y el método de cálculo de pérdidas por fricción, lo cual se realiza ingresando al menú "Project" y luego a "Defaults". En la opción "Flow Units", se selecciona el sistema de unidades apropiado para el proyecto, como litros por segundo (LPS) si se trabaja en el sistema internacional, lo que implica que todos los datos de entrada —como longitudes, diámetros y caudales— deben estar en metros y litros por segundo respectivamente. A continuación, en la opción "Headloss Formula", se elige el método de cálculo de pérdidas por fricción, pudiendo optar entre Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Chezy-Manning.



b) Construcción topológica

EPANET, por sí solo, no permite importar directamente el trazado de tuberías desde AutoCAD u otros formatos CAD, lo que representa una limitación para el diseño de sistemas de agua potable. Con el objetivo de superar esta deficiencia, la Universidad Politécnica de Valencia desarrolló el software complementario “EpaCAD”, que permite realizar una exportación topológica parcial desde AutoCAD hacia EPANET. Sin embargo, esta herramienta solo transfiere datos básicos como la ubicación y elevación de las

tuberías, omitiendo aspectos cruciales como el tipo de material, el diámetro interno o el tramo hidráulico diferenciado. Además, carece de funciones que automatizan la asignación de propiedades, por lo que se requiere ingresar manualmente estos datos, elemento por elemento, lo cual incrementa tanto la posibilidad de errores como el tiempo requerido para modelar redes, especialmente en sistemas medianos o grandes.

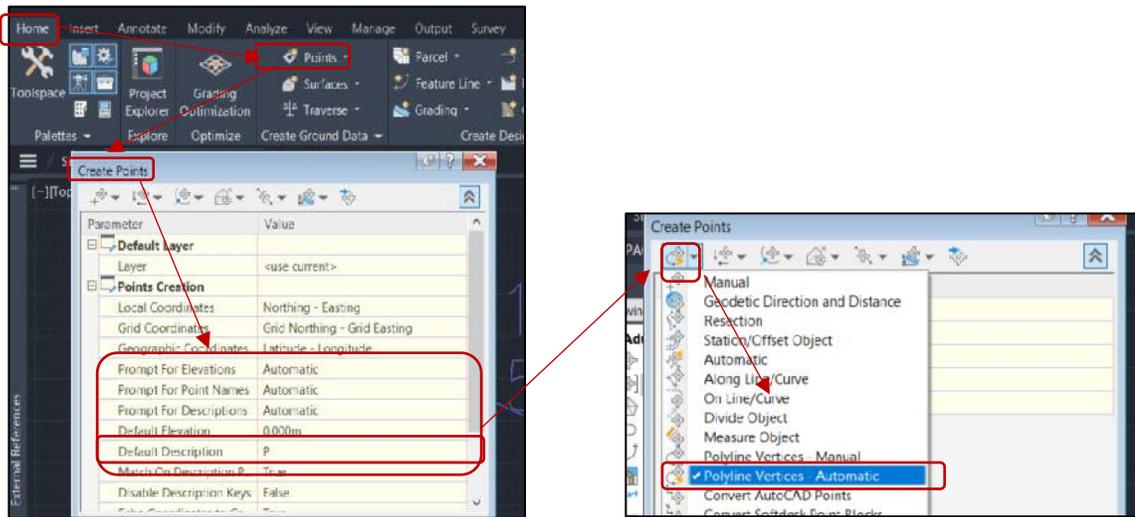
Por otro lado, EPANET tampoco permite importar directamente datos desde hojas de cálculo Excel. Su estructura de archivo es estricta, basada en la extensión. Inp, la cual requiere un formato específico de codificación y orden.

Frente a estas limitaciones, y considerando que el sistema diseñado corresponde a una red de aducción de tipo disperso —aunque de escala pequeña—, se optó por una solución más eficiente. Se desarrolló una hoja de cálculo en Excel, programada con macros, capaz de organizar automáticamente la información de nodos, tuberías y parámetros hidráulicos, y exportarla directamente en el formato. Inp. compatible con EPANET. Esta herramienta personalizada permitió agilizar el proceso de modelado, garantizar la coherencia en el manejo de datos y evitar errores comunes por ingreso manual, demostrando ser una alternativa eficaz y viable para sistemas similares.

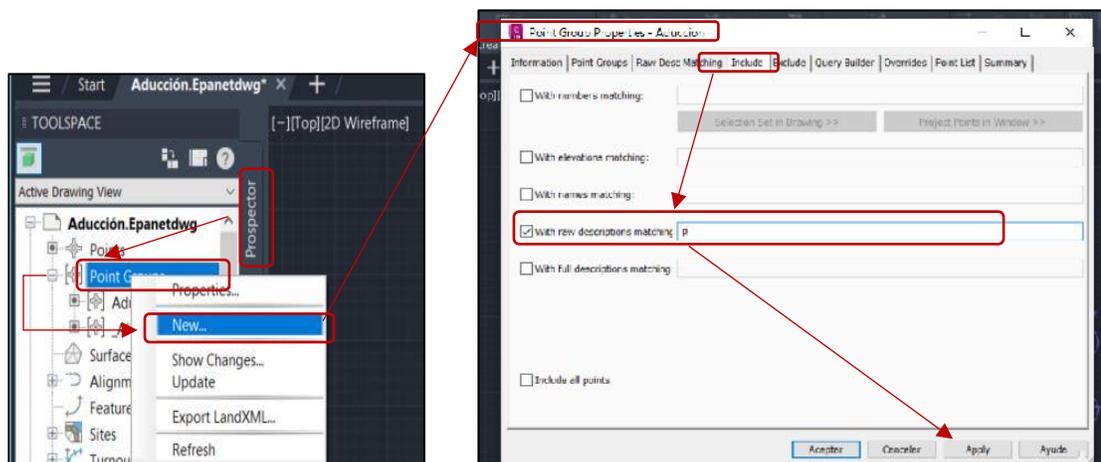
Para que la hoja de cálculo pueda generar correctamente el archivo. Inp. es necesario contar previamente con la información de ubicación geográfica (coordenadas) y elevación de los puntos que conforman la red. Estos datos deben obtenerse mediante procedimientos adicionales, desde AutoCAD Civil 3D.

- Para la preparación de los datos necesarios en la modelación hidráulica, se realiza la creación de puntos en AutoCAD Civil 3D utilizando el trazado de la línea de aducción y la superficie topográfica previamente generada. El procedimiento se inicia desde la pestaña Home, accediendo a Points > Create Points. Se configuran las coordenadas adecuadamente, modificando las solicitudes (prompts) a modo automático y asignando una descripción adecuada para los puntos (“P”). Posteriormente, se crea una polilínea 3D que se genera seleccionando el trazado de la aducción; con esta polilínea, se generan vértices automáticos, lo que permite a Civil 3D asignar coordenadas y elevaciones a cada punto según la superficie topográfica. De este

modo, se genera un grupo de puntos con información precisa, que puede ser exportada.

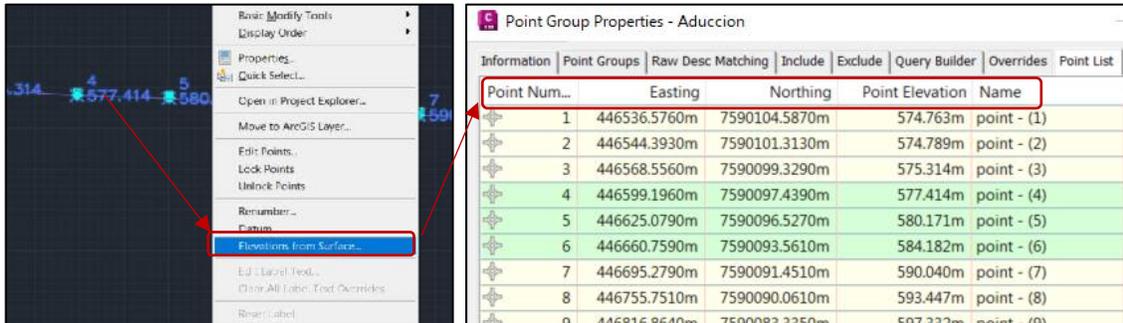


- Una vez generados los puntos, se procede a organizarlos en un grupo desde el Prospector de Civil 3D. Para ello, se ubica el apartado Point Groups, se hace clic derecho y se selecciona New. Se define un nombre para el grupo y se configuran las características del estilo de punto deseado. En la pestaña Include, se asignan todos los puntos que contienen la descripción previamente establecida ("P"), y luego se aplica (Apply).

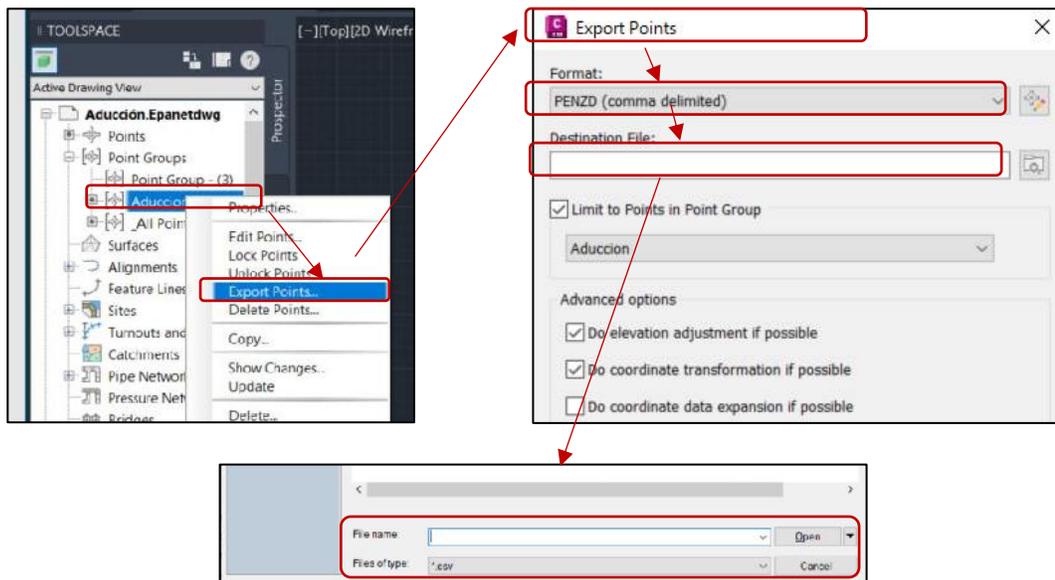


- Si los puntos aún no tienen asignada una elevación, se debe seleccionar todos los puntos creados, hacer clic derecho (anticlick) y elegir la opción "Elevación a partir de una superficie". Luego, se selecciona la superficie topográfica previamente generada en el proyecto, de modo que cada punto adquiriera automáticamente la cota

correspondiente según el relieve del terreno. Este paso es esencial para asegurar que los datos exportados reflejen correctamente la topografía real en el modelado hidráulico.



- Una vez asignadas las elevaciones, se procede a exportar el grupo de puntos a un archivo en formato CSV delimitado por comas, útil para su procesamiento posterior. Para ello, se hace clic derecho (anticlick) sobre el grupo de puntos creado en el Prospector, y se selecciona la opción "Export Points". En la ventana que se abre, se define el formato de exportación, indicando el orden de los datos (por ejemplo: número, norte, este, elevación, descripción) y el tipo de archivo como CSV. Finalmente, se elige la ubicación de guardado y se ejecuta la exportación.



- Ordenar los datos en Excel, asegurando que las columnas de coordenadas (Este, Norte), elevación y descripción estén correctamente ubicadas. Luego, se copia únicamente el texto necesario, según el formato requerido por la hoja de cálculo

programada con macros para generar el archivo. Inp. compatible con EPANET. Este paso es crucial para evitar errores en la estructura del archivo final y garantizar una importación exitosa del modelo hidráulico.

Propiedades de los Nodos de la Red				
ID Nudo	Coord X	Coord Y	Cota	Demanda
1	446536.58	7590104.59	574.76	
2	446544.39	7590101.31	574.79	
3	446568.56	7590099.33	575.31	

- La definición de las tuberías en el modelo hidráulico se realiza especificando su ID, nodo inicial, nodo final, longitud, diámetro y coeficiente de rugosidad.
 - El proceso más crítico es la asignación manual de los nodos de inicio y fin, ya que el usuario debe decidir con precisión qué tramos desea modelar y en qué dirección fluye el agua, lo que requiere especial atención para evitar errores.
 - La longitud (m) de cada tubería se calcula automáticamente mediante la fórmula de distancia entre dos puntos, utilizando las coordenadas de los nodos previamente organizados. Esta operación se ejecuta con funciones de búsqueda que vinculan los ID de los nodos iniciales y finales con sus respectivas posiciones espaciales, asegurando coherencia en la topología de la red.

ID Línea	Nudo 1	Nudo 2	Longitud
1	1	2	8.47
2	2	3	24.24
3	3	4	30.70
4	4	5	25.90

- El diámetro de cada tubería será definido manualmente por el usuario, según su criterio de diseño hidráulico, considerando factores como caudal, velocidad y pérdidas de carga permitidas. Este valor debe ingresarse en unidades de milímetros (mm) en la hoja de cálculo, asegurando consistencia con los demás parámetros del sistema. Esta flexibilidad permite ajustar el diseño a condiciones reales siguiendo normativas específicas.

Nudo 1	Nudo 2	Longitud	Diámetro
1	2	8.47	50
2	3	24.24	50
3	4	30.70	50
4	5	25.90	50

- La rugosidad de las tuberías se define automáticamente en la hoja de cálculo mediante una búsqueda de coincidencias basada en el material especificado por el usuario y la ecuación seleccionada para el cálculo de pérdida de carga. En la parte superior de las propiedades de la red, se indica si se empleará Darcy-Weisbach (1) o Hazen-Williams (2). Según esta elección, se asignará el valor correspondiente del coeficiente de rugosidad: “e” en milímetros para Darcy-Weisbach o coeficiente “C” para Hazen-Williams. Las unidades de caudal deben estar en litros por segundo (LPS). Una vez definidos todos los parámetros, se debe hacer clic en el botón de exportación, establecer la ubicación y nombre del archivo, y guardarlo como archivo Inp. compatible con EPANET.
- Una vez completada la importación de datos desde Excel a EPANET, la hoja de cálculo genera un mensaje final que confirma la operación exitosa.

The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet with a red box around the 'Exportar Archivo' button. A red arrow points from this button to a file save dialog box. The dialog box shows the file name field, file type 'EPANET Input File', and the 'Guardar' button. A red arrow points from the 'Guardar' button to a Microsoft Excel message box that says 'La exportación a archivo .inp compatible con EPANET ha finalizado.' with an 'Aceptar' button.

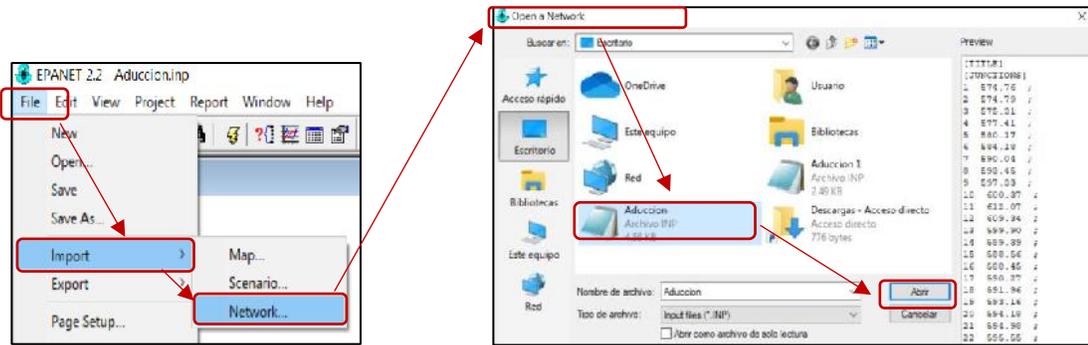
The spreadsheet contains the following data:

Propiedades de las Líneas de la Red							
ID Línea	Nudo 1	Nudo 2	Longitud	Diámetro	Rugosida	Material	
1	1	2	8.47	50	150	2	
2	2	3	24.24	50	150	2	
3	3	4	30.70	50	150	2	
4	4	5	25.90	50	150	2	
5	5	6	35.80	50	150	2	
6	6	7	34.58	50	150	2	

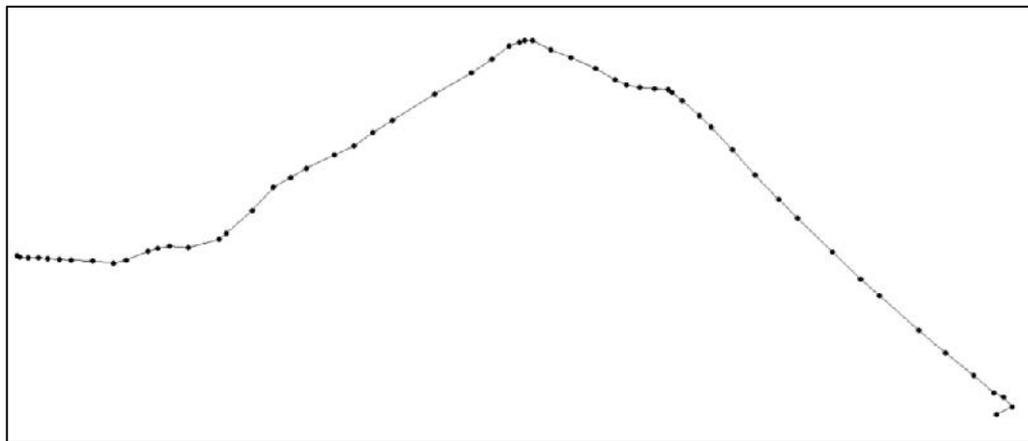
Codigo	Material	Rugosidad	
		C	e(mm)
1	Asbesto C.	140	0.0015
2	PVC	150	0.0015
3	Acero G.	120	0.15
4	Fiero F.	130	0.26
5	Concreto S.	135	0.36
6			

- Para importar la red a EPANET, se debe ir a Archivo > Import > Network, y seleccionar el archivo Inp. recién creado con la hoja de cálculo programada. Al

completar esta acción, EPANET cargará automáticamente todos los elementos de la red (nodos, tuberías, materiales, diámetros, longitudes, rugosidades, etc.) con las configuraciones previamente definidas en el Excel, permitiendo la optimización de la configuración, reduciendo a revisar y afinar datos específicos para iniciar la simulación hidráulica sin necesidad de ingresar los todos datos manualmente.

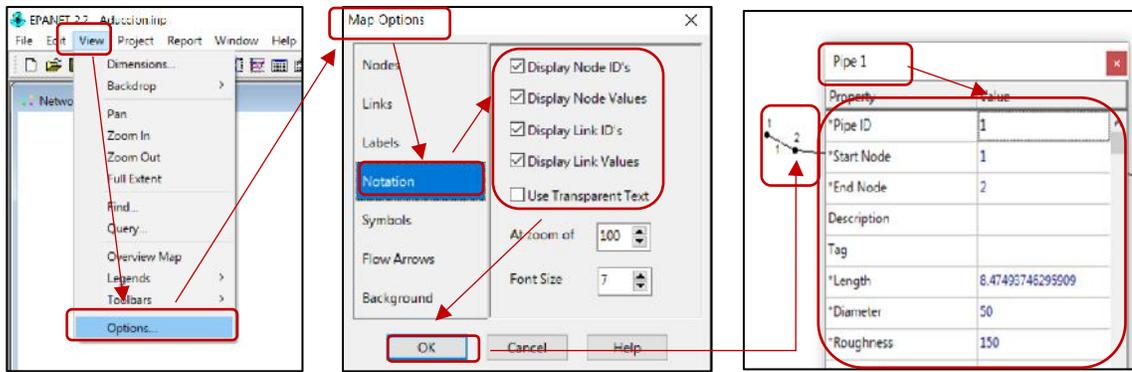


- Topología de Aduccion ya importada en ventana de trabajo EPANET.

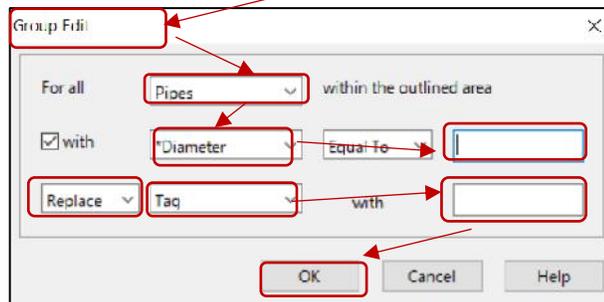
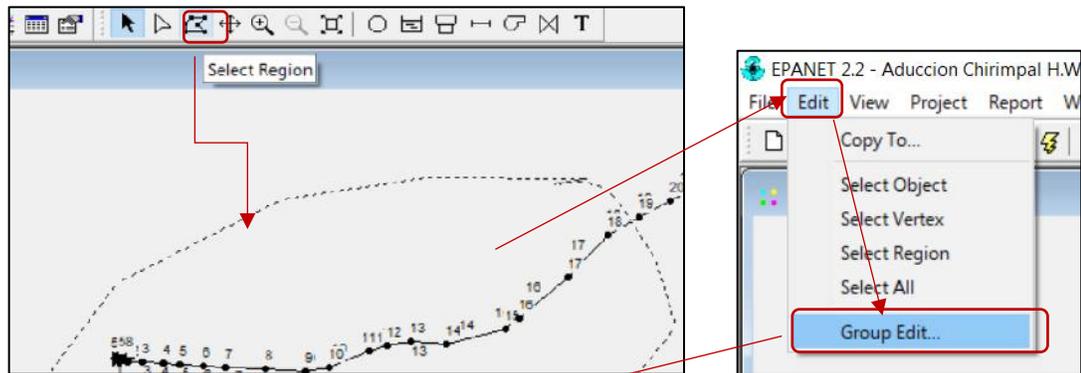


c) Edición de datos

- Para identificar los nodos y tuberías en EPANET después de importar la red, se debe ir a View > Options > Notations y activar las casillas correspondientes para mostrar los ID de nodos y tuberías en el plano. Para revisar las propiedades específicas de una tubería importada (como diámetro, longitud y rugosidad), se debe hacer clic sobre la tubería y seleccionar Options, donde se desplegarán todos los parámetros asignados desde el archivo inp. generado por la hoja de cálculo. Esto permite verificar que la importación se haya realizado correctamente y que cada elemento tenga los valores esperados.

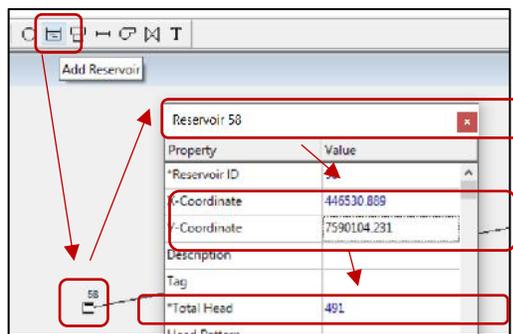


- Para editar y completar las propiedades de nodos y tuberías en EPANET, se puede utilizar la función Edit > Select Region para seleccionar un área específica donde se encuentran los elementos a modificar. Si se desea modificar toda la red, se puede usar Edit > Select All y luego Edit > Group Edit. En esta herramienta, se elige el tipo de elemento (nodo o tubería), se define la propiedad que se desea modificar (como diámetro, elevación, demanda, etc.), y se selecciona el tipo de modificación: Equal To (igual a un valor), Above (mayor que) o Below (menor que). Posteriormente, se decide si la acción será Replace (reemplazar) o Add (adicionar), y se especifica el valor deseado. Este proceso permite realizar modificaciones masivas de forma precisa y eficiente.

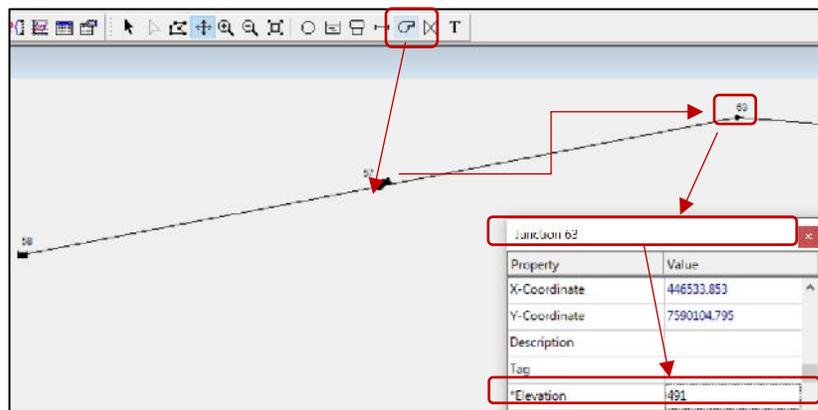


d) Representación elementos más complejos

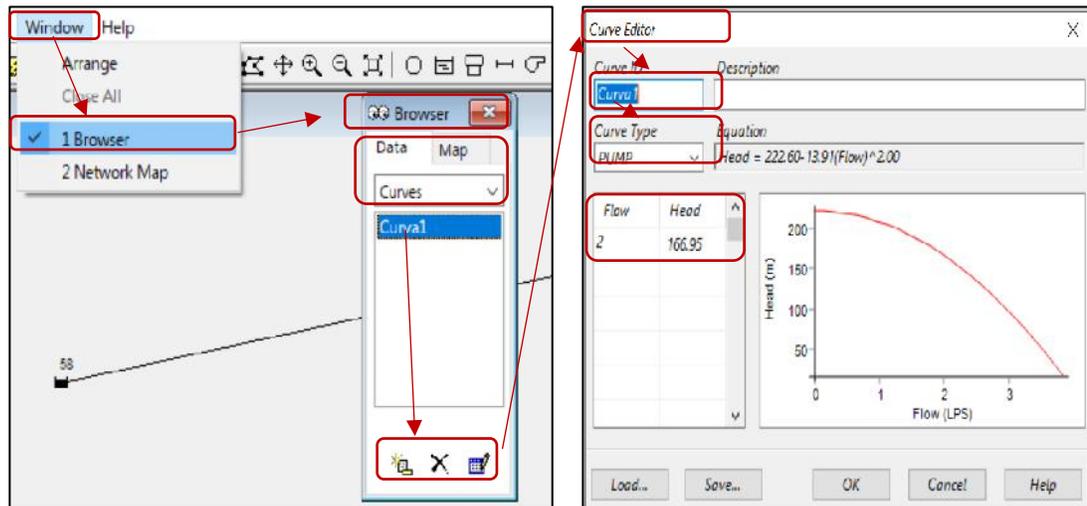
- Para representar topológicamente un **pozo profundo** en EPANET, se utiliza el elemento “reservorio” desde la barra de herramientas, haciendo clic sobre el espacio de trabajo para colocarlo, luego se accede a sus propiedades mediante clic derecho y se definen manualmente las coordenadas y la altura total del agua. En este caso, se asigna una carga equivalente a la elevación (Total Head) donde está ubicada la bomba, es decir, 491 m.s.n.m., simulando así la altura del nivel constante del agua subterránea.



- Para la construcción de una **bomba** en el modelo hidráulico, es necesario utilizar un nodo auxiliar como parte obligatoria de su configuración. Para su representación gráfica, se traza una desde el elemento (reservorio) del cual se desea elevar la carga hidráulica, hasta el nodo auxiliar, al cual se le asigna una elevación correspondiente a la instalación de la bomba, en este caso 491 m.s.n.m. El nodo auxiliar actúa como una conexión técnica entre la fuente de agua y la bomba con el resto del sistema de impulsión y es esencial para que el software identifique correctamente el cambio de carga producido por el equipo de bombeo. Figura 4.3.7.



- Para definir la curva característica de una bomba en el modelo hidráulico, se accede al menú "Data" > "Curves" desde la ventana de navegación (Browser Window). Se debe añadir una nueva curva seleccionando el tipo "Pump". A continuación, se genera la curva introduciendo al menos un punto de diseño, que relaciona el caudal de bombeo con la altura manométrica. Este punto debe corresponder a las condiciones de operación previstas para el sistema. Posteriormente, se ajustan o iteran los valores de la curva hasta que la altura desarrollada por la bomba cubra adecuadamente la altura geométrica del sistema, incluyendo las pérdidas de carga y otros factores de diseño relevantes. Esta curva es fundamental para simular correctamente el comportamiento del equipo de bombeo dentro del sistema hidráulico.



- Una vez definida la curva característica de la bomba en el apartado "Curves", se debe volver a las propiedades de la bomba dentro del modelo y asignar dicha curva ingresando su identificador (ID de la curva) en el campo correspondiente en nuestro caso curva 1. Esta curva representa la relación entre el caudal de bombeo y la altura manométrica que puede desarrollar la bomba. Durante el proceso de diseño, es común realizar una iteración sobre la altura de diseño, ajustando los valores de la curva hasta que la bomba sea capaz de impulsar el caudal requerido hasta el tanque de almacenamiento.

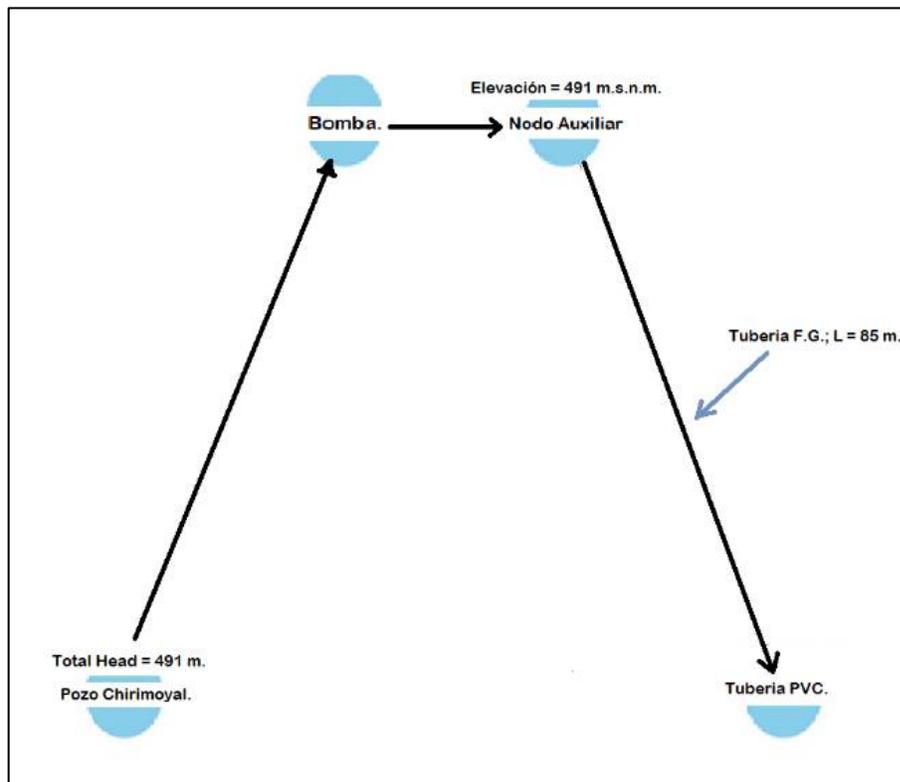
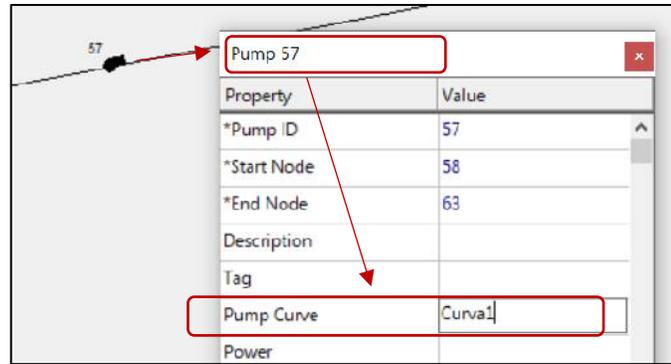


Figura 4.3.7: Esquema configuración pozo y bomba.

Fuente: Elaboración propia.

- Para representar topológicamente un **tanque elevado** en el modelo hidráulico, se utiliza la herramienta "Tanque" desde la barra de herramientas. Una vez insertado el elemento, se accede a sus propiedades mediante doble clic o clic derecho. En este apartado se deben ingresar las coordenadas del tanque, su elevación (correspondiente al nivel del terreno en el punto de instalación), y los niveles de agua. En el caso de un tanque elevado, la base del tanque se encuentra a una altura de 20 metros sobre el nivel del terreno en este parámetro **adicionamos los 2 m de presión de llegada que**

recomienda a NB-689 (22m.). El nivel mínimo indica la altura del agua cuando el tanque está prácticamente vacío se debe tomar en cuenta la altura de la base del tanque (22,15 m.), mientras que el nivel máximo representa el nivel del agua cuando el tanque está completamente lleno (24,15 m.). El nivel inicial corresponde al estado inicial del agua al comenzar la simulación (22,30m.). Figura 4.3.8.

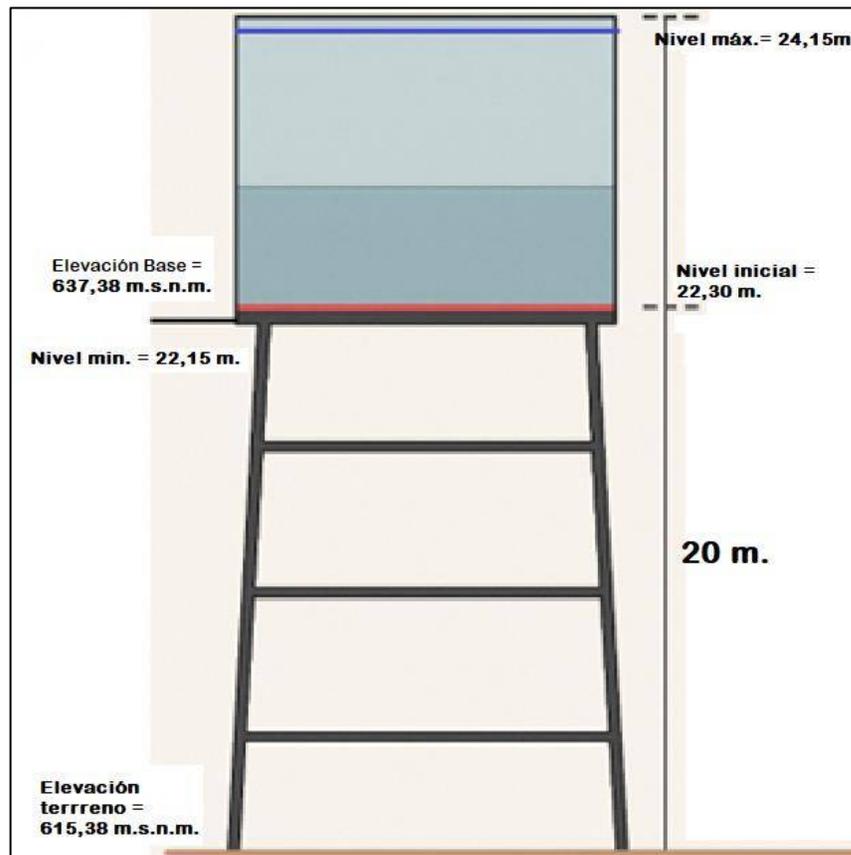
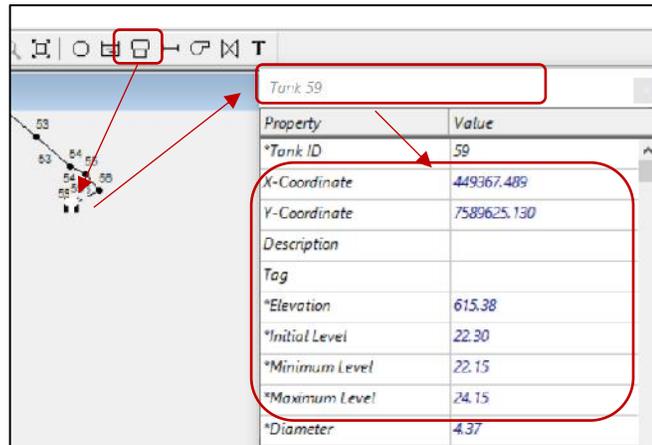
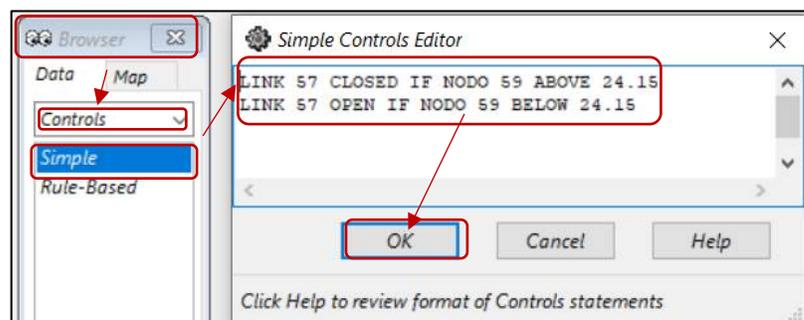


Figura 4.3.8: Esquema configuración Tanque elevado.

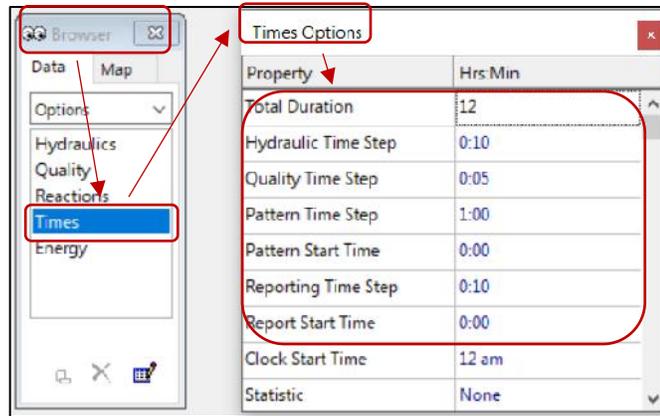
Fuente: Elaboración propia.

e) Análisis de Resultados Iniciales y Ajuste del Diseño (proceso de diseño iterativo)

- Para calcular correctamente el tiempo de llenado del tanque y evitar que el software ignore la altura real del agua una vez que el tanque se llena (considerando que el llenado inicia desde la base), es necesario configurar controles simples dentro del modelo hidráulico. Estos controles permiten definir condiciones lógicas que activan o desactivan elementos del sistema según el estado hidráulico en tiempo real. La estructura básica consiste en definir una acción sobre un componente (tubería) condicionada al estado de otro elemento (tanque). La tubería (Link) 57 cambie a estado Closed (cerrado) if (si) el Nodo 59 alcanza un nivel de agua Above 24,15 (mayor a 24,15 m.). Es fundamental redactar tanto las acciones como las condiciones en inglés, siguiendo la sintaxis reconocida por el software.

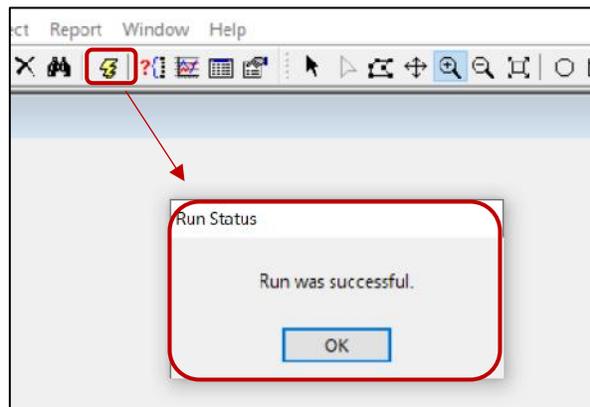


- Para ejecutar la simulación en un modelo hidráulico, se debe acceder a la opción Browser > Data > Options > Times, donde se configuran los parámetros de tiempo de modelación. En esta sección, se define la duración total de la simulación, es decir, el período durante el cual se analizará el comportamiento del sistema. Dado que en este caso no se emplean patrones de demanda y el caudal es constante, no es necesario configurar el apartado de patterns (patrones).
 - Otro parámetro clave es el reporting time step (intervalo de reporte), que determina cada cuánto tiempo el software registrará y mostrará los resultados, como presiones, velocidades y niveles de agua en los diferentes elementos de la red.



f) Validación del Modelo y Cálculo Hidráulico

- Una vez configurados los parámetros de tiempo, se procede a correr el modelo de simulación utilizando la herramienta de ejecución disponible en el entorno del software. Es importante tener en cuenta que, durante este proceso, el programa no cuenta con una herramienta automática de validación que advierta errores estructurales, como nodos desconectados, curvas mal asignadas o datos incompletos. Por esta razón, es responsabilidad del usuario verificar manualmente que todos los elementos estén correctamente conectados y configurados antes de iniciar la simulación.



g) Creación de escenarios

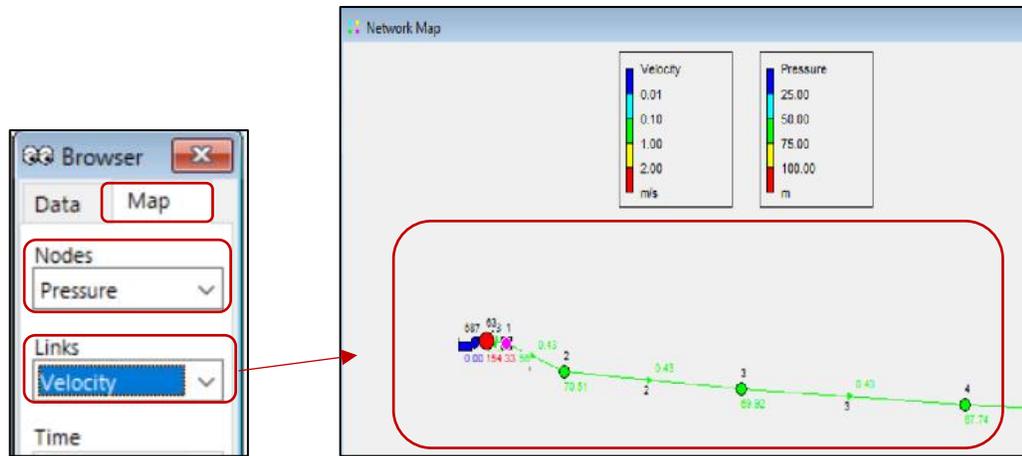
- EPANET no permite la creación de múltiples escenarios de forma nativa dentro de un mismo archivo de proyecto. Para analizar distintos escenarios, es necesario guardar copias separadas del archivo original y realizar manualmente los cambios correspondientes en cada uno (por ejemplo, variaciones en la demanda, operación de

bombas o configuración del método de cálculo de pérdida de carga). Aunque EPANET permite modificar parámetros como patrones, controles y condiciones iniciales, no cuenta con una herramienta integrada para gestionar o comparar directamente múltiples escenarios dentro del entorno del software.

- EPANET ofrece tres métodos para el cálculo de las pérdidas de carga: **Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Chezy-Manning**. Sin embargo, en nuestro medio, los métodos más comúnmente empleados son Hazen-Williams, por su simplicidad y aplicación empírica en redes de agua potable, y Darcy-Weisbach, por su mayor precisión en el cálculo de pérdidas por fricción.
- Para aplicar el método de Hazen-Williams en la estimación de pérdidas por fricción, se realizó una copia del modelo original y se modificó el método de cálculo de pérdidas seleccionando Hazen-Williams como fórmula principal. Posteriormente, se ajustaron los valores del coeficiente de rugosidad (C) para cada tubería, lo cual se puede hacer de forma individual o mediante la herramienta de edición de grupos, que permite asignar valores comunes a múltiples elementos. Una vez configurados estos parámetros, se procedió a ejecutar la modelación hidráulica con el nuevo enfoque, permitiendo así evaluar el comportamiento del sistema bajo esta metodología de cálculo.

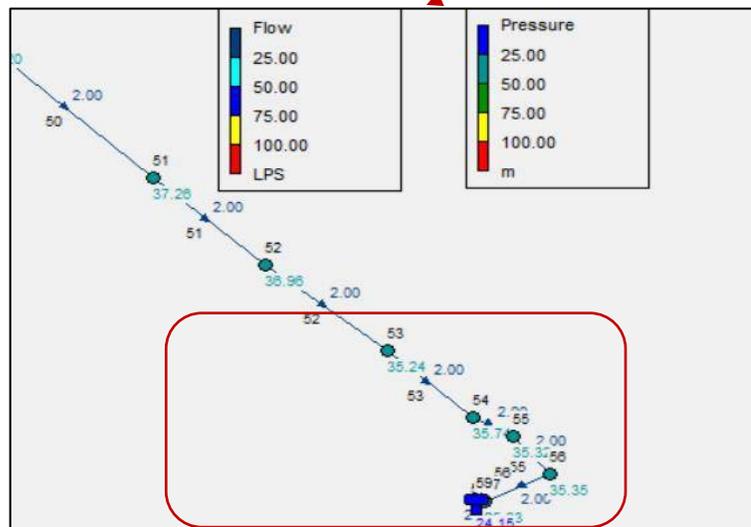
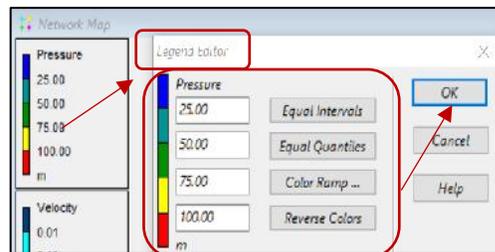
h) Resultados

- Para visualizar los resultados obtenidos en la simulación (en el área de trabajo), como velocidad y presión, se utiliza la herramienta de exploración de resultados ubicada en Browser > Map. Desde allí, se puede acceder a dos categorías principales: Nodos (nodos) y Links (enlaces o tuberías). En cada una de estas secciones, se puede seleccionar la variable que desea visualizar, como la presión en los nodos o la velocidad en las tuberías.



Es importante destacar que el software solo permite mostrar una variable por tipo de elemento a la vez, es decir, no se pueden visualizar simultáneamente varias variables sobre nodos o tuberías.

- Para personalizar la visualización gráfica de los resultados, como velocidad o presión, se debe hacer clic derecho sobre la leyenda correspondiente en el mapa de resultados. Esta acción permite acceder a las opciones de edición, donde es posible modificar los intervalos de valores y asignar colores personalizados a cada rango.



- El software permite la visualización de resultados mediante **tablas** de nodos y tuberías, tanto de forma conjunta como individual, a través del menú Report > Table. Una vez allí, se debe seleccionar el tipo de elemento (nodos o tuberías) y confirmar con OK para generar la tabla correspondiente. Estas tablas presentan un conjunto limitado de variables, aunque permiten editar columnas y aplicar filtros básicos, lo cual facilita el análisis de los datos obtenidos en la simulación.
 - Es importante destacar que no es posible añadir campos personalizados dentro de estas tablas; se debe trabajar únicamente con la estructura y variables predeterminadas que ofrece el software.

The screenshot illustrates the process of generating a table from the software. It shows the 'Table Selection' dialog box with the 'Columns' tab selected. The 'Demand' checkbox is checked, indicating that the 'Demand' variable will be included in the table. The 'Table Selection' dialog box is shown in two states: first, with the 'Type' dropdown set to 'Network Nodes at' and the 'Columns' tab selected; second, with the 'Columns' tab selected and the 'Demand' checkbox checked. Red boxes and arrows highlight the 'Report' menu, the 'Table Selection' dialog, the 'Columns' tab, and the 'Demand' checkbox.

The resulting tables are shown below:

Network Table - Nodes at 3:54 Hrs

Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m	Quality
Junc 1	0.00	646.90	72.14	0.00
Junc 2	0.00	646.88	72.09	0.00
Junc 3	0.00	646.81	71.50	0.00
Junc 4	0.00	646.73	69.32	0.00
Junc 5	0.00	646.66	66.49	0.00

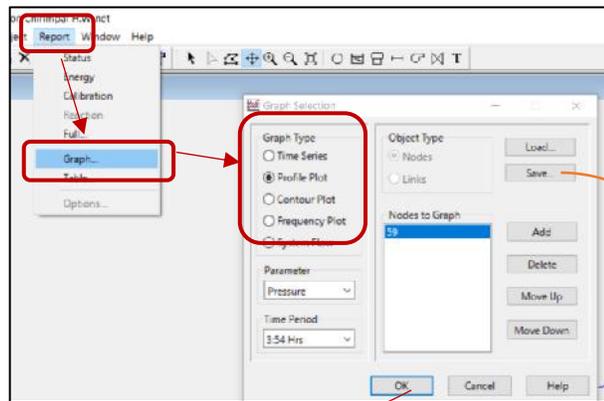
Network Table - Links at 3:54 Hrs

Link ID	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor	Reaction Rate mg/L/d
Pipe 1	1.95	0.43	2.67	0.022	0.00
Pipe 2	1.95	0.43	2.67	0.022	0.00
Pipe 3	1.95	0.43	2.66	0.022	0.00
Pipe 4	1.95	0.43	2.67	0.022	0.00
Pipe 5	1.95	0.43	2.66	0.022	0.00
Pipe 6	1.95	0.43	2.67	0.022	0.00

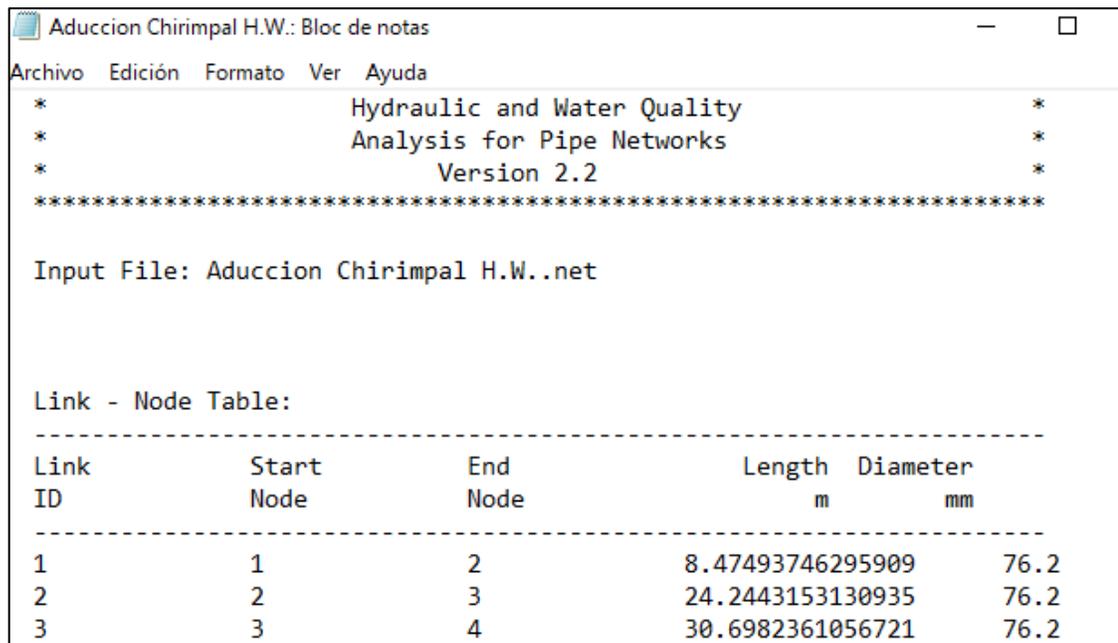
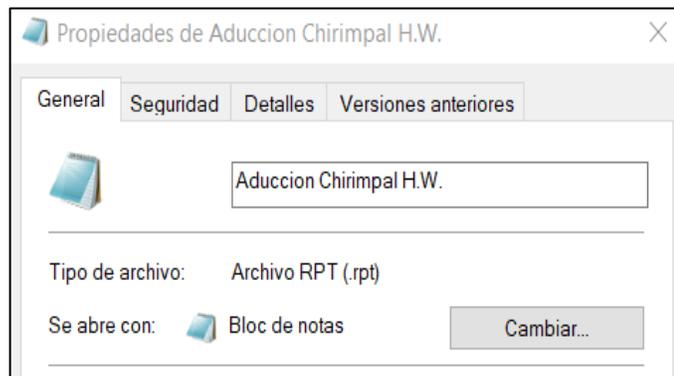
- El software ofrece herramientas gráficas para representar diversos aspectos del comportamiento hidráulico de la red. Entre las opciones disponibles se encuentran los

perfiles de presión o carga, los cuales permiten visualizar el comportamiento de una variable a lo largo de un grupo de nodos o tuberías seleccionados. También se pueden generar gráficos de frecuencia, que muestran la distribución de una variable (como presión o velocidad) a lo largo del sistema.

- Otra opción destacada es la representación mediante gráficos de contorno, los cuales dividen el área del sistema en zonas según la clasificación de los valores de la variable seleccionada (Presión), como se muestra en las gráficas siguientes.



- El software permite generar un reporte total de la simulación a través de la opción Report > Full. Esta función exporta un archivo con extensión .RPT, que contiene un resumen detallado en formato de texto de cada uno de los estados calculados durante la simulación. El archivo incluye información clave como presiones, caudales, niveles, advertencias del sistema, condiciones de frontera y comportamiento de elementos especiales como bombas o tanques. Este reporte es útil tanto para la validación del modelo como para la documentación técnica del proyecto.



- En resumen, de los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.3.6.

Tabla 4.3.6: Resultados Aducción EPANET.

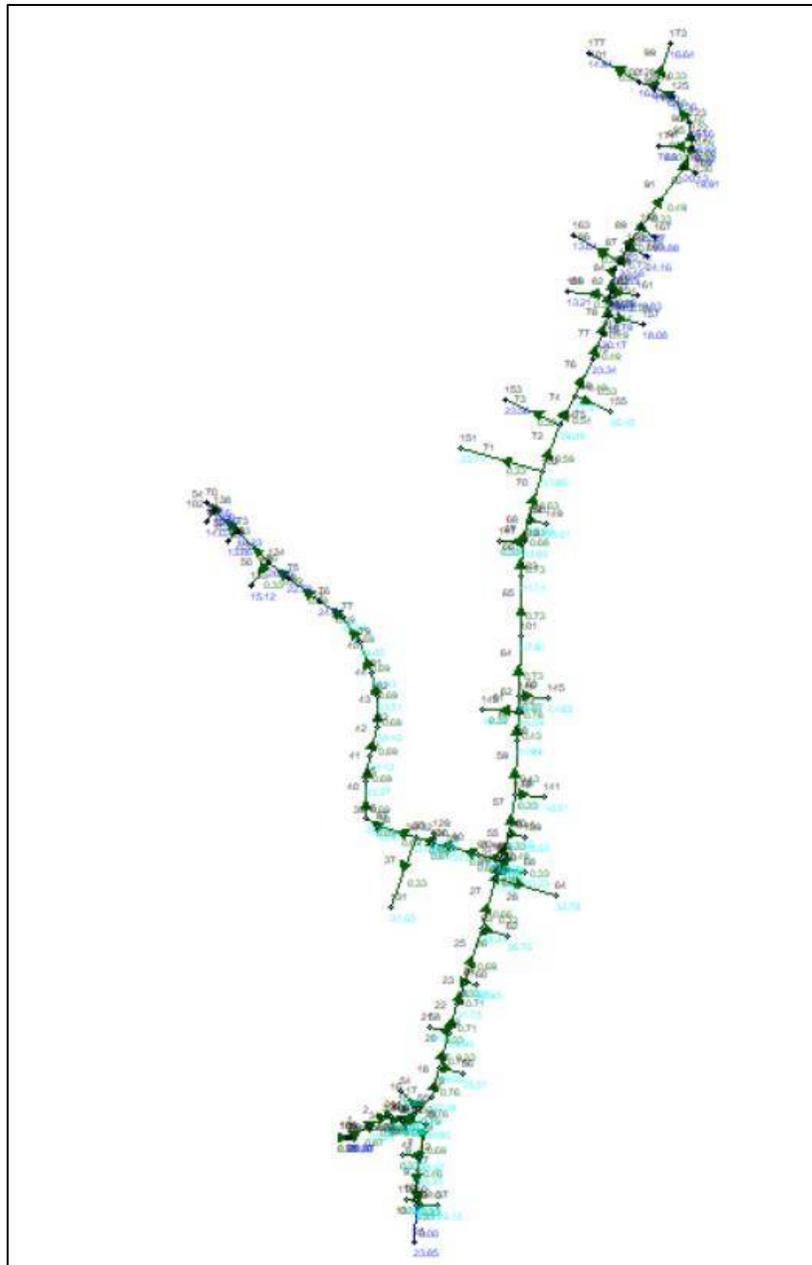
Parámetro.	Hazen-Williams.	Darcy Weisbach.
Caudal.	2,00 l/s.	2,00 l/s.
Velocidad.	0,57 m/s.	0,57 m/s.
Presión máxima dinámica.	83,43 m.c.a.	83,85 m.c.a.
Presión mínima dinámica.	24,15 m.c.a.	24,15 m.c.a.
Pérdida de carga unitaria.	0,0052 m/m.	0,0054 m/m.
Altura de bombeo.	168,00 m.	168,95 m.
Tubería.	PVC; C-12; C=150.	PVC; C-12; k=0,0015mm.
Diámetro.	DN= 76,2mm.; e =4,6mm.	DN= 76,2mm.; e =4,6mm.
Tiempo llenado tanque.	229,00min.	230,00 min.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4.2. Red de distribución

a) Construcción topológica y configuración

- Para la construcción topológica y la configuración de los datos de la red se siguen procedimientos similares a los utilizados en el sistema de aducción. Las diferencias, así como las variables complementarias necesarias para la modelación en EPANET, se detallan a continuación.
- En la siguiente imagen se presenta la topología de la red de distribución ya cargada en el espacio de trabajo de EPANET.



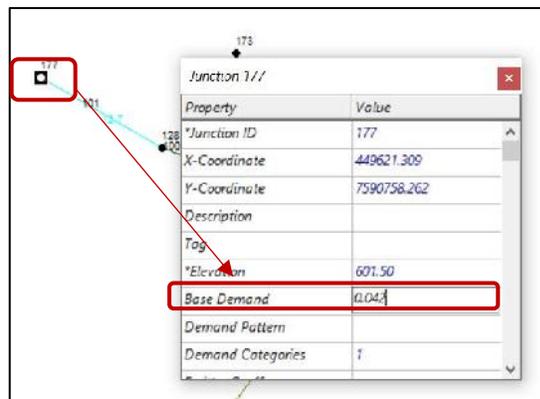
b) Creación de secciones de la red

- En EPANET, **no existe** una herramienta específica o automatizada que permita "seccionar" o dividir la red hidráulica en ramales de manera directa. La identificación y agrupación de ramales debe realizarse manualmente por el usuario, ya sea mediante una planificación previa del diseño o usando estrategias auxiliares. Esta limitación obliga a que el análisis por sectores o ramales se gestione externamente, ya sea

organizando visualmente los elementos dentro del modelo o exportando los datos para filtrarlos y analizarlos con herramientas como hojas de cálculo Excel.

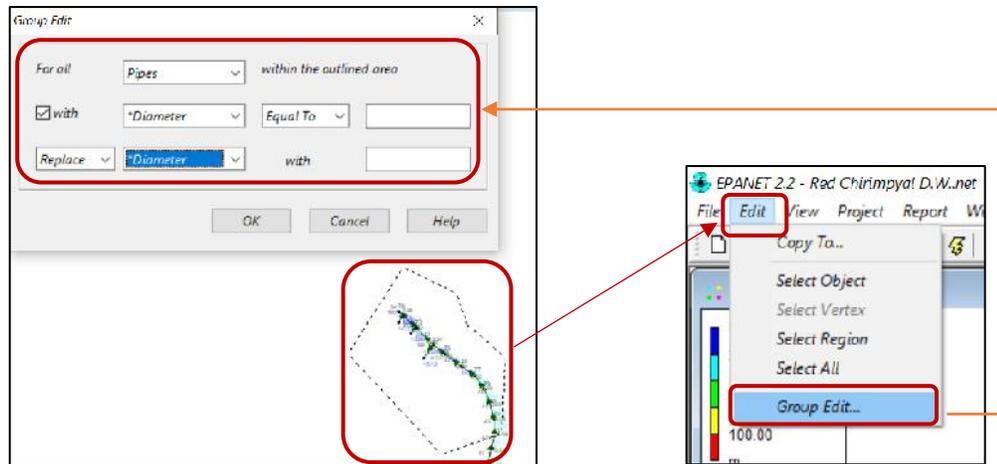
c) Asignación de demandas

- La asignación del caudal de demanda debe realizarse manualmente nodo por nodo, siempre que estos representen puntos de consumo y no se haya cargado dicha información previamente mediante la importación de la topología. Este procedimiento consiste en ingresar el valor de demanda base directamente en las propiedades del nodo correspondiente.



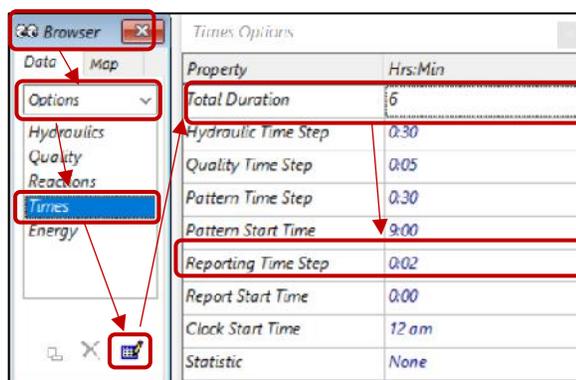
d) Edición y configuración masiva de los elementos

- EPANET permite la edición y configuración masiva de elementos a través de la herramienta "Group Editing" (Edición por grupos), la cual facilita la modificación de propiedades comunes para múltiples nodos o tuberías al mismo tiempo. Esta funcionalidad es especialmente útil cuando se requiere aplicar valores uniformes, como coeficientes de rugosidad, demandas o diámetros, sin tener que editar cada elemento individualmente. Para utilizarla, se debe seleccionar un conjunto de elementos (ya sea manualmente en el mapa o mediante la opción select all), hacer clic derecho y acceder a la opción "Edit" > "Group Edit". Desde allí, se puede modificar parámetros clave, como el método de cálculo de pérdidas por fricción (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach), el valor del coeficiente C o diámetro de tuberías, entre otros. No obstante, es importante realizar una verificación posterior para asegurar que los cambios se aplicaron correctamente y que no se generaron inconsistencias en el sistema, por la selección manual de los sectores que se hacen.



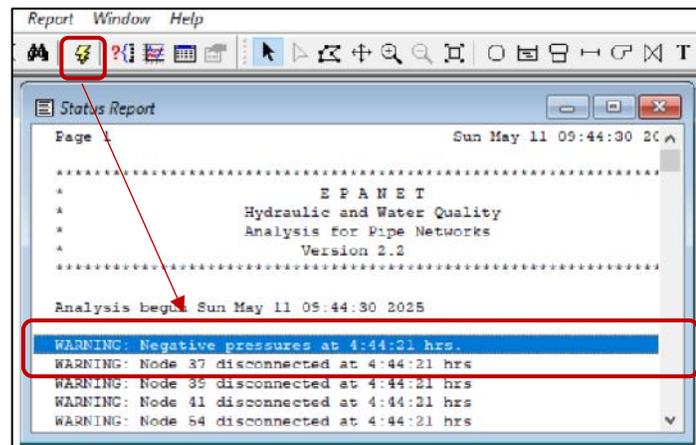
e) Análisis de Resultados Iniciales y Ajuste del Diseño (proceso de diseño iterativo)

- Para obtener la presión dinámica mínima en un sistema hidráulico modelado en EPANET, es necesario realizar una simulación extendida en el tiempo hasta que el tanque alcance su nivel mínimo de operación.
 - Para ello, se debe ingresar al menú Options > Times, donde se configura la duración de la simulación (Simulation Duration) en función del tiempo estimado de vaciado del tanque. Asimismo, se define el Reporting Time Step, que corresponde al intervalo de tiempo en el que se reportarán los resultados (presión, velocidad, etc.). Esta configuración permite observar cómo evoluciona la red a lo largo del tiempo y, especialmente, identificar el momento en que se alcanza la presión más baja, lo cual es clave para verificar el cumplimiento de los requerimientos normativos de la NB-689 de presión dinámica mínima en la red.



- Una vez configurados correctamente los parámetros de simulación en Options > Times, incluyendo la duración total del análisis y el intervalo de reporte (Reporting

Time Step), y asignadas las demandas en los nodos correspondientes, se puede proceder a ejecutar la simulación hidráulica del sistema.



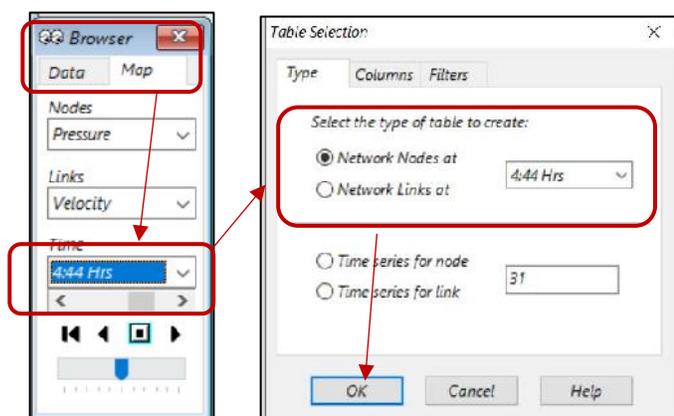
El programa reporta que a las 4:44 horas de simulación, el sistema ya no puede abastecer adecuadamente la demanda, debido a que el tanque elevado ha descendido por debajo de su nivel mínimo operativo y ya no dispone del caudal necesario para mantener el suministro. Esto indica que la capacidad de almacenamiento del tanque puede abastecer hasta 4:44 horas al sistema en su máxima demanda horaria sin reposición, cruzada esta frontera existe una caída de presión en la red.

f) Resultados

I. Presión dinámica mínima (P.D. min.) y velocidades

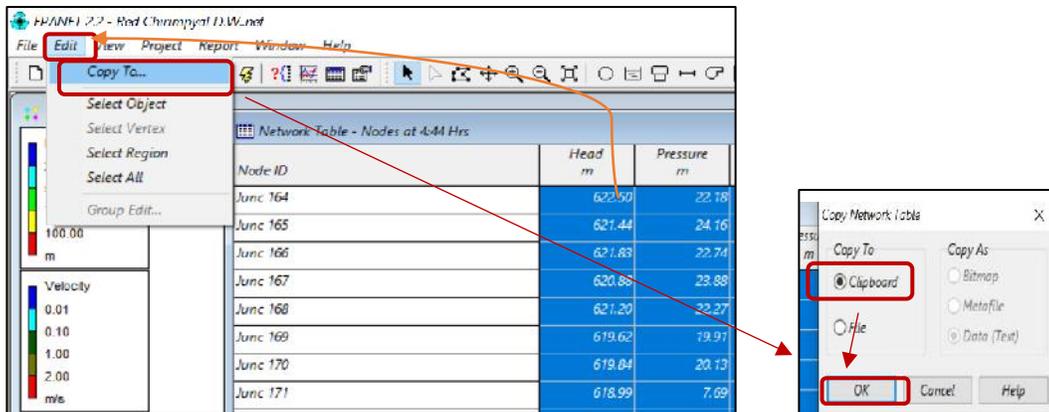
- Para verificar el cumplimiento de los parámetros hidráulicos establecidos en la NB-689, se analiza el comportamiento de la red en el tiempo crítico de simulación, correspondiente a las 4:44 horas, momento en el cual el tanque elevado alcanza su nivel mínimo operativo. En este punto, se evalúan las presiones dinámicas mínimas y las velocidades del flujo en cada tramo de la red. Esta verificación permite determinar si los diámetros seleccionados aseguran un desempeño hidráulico adecuado bajo condición de operación mínima.
 - Para este análisis se utiliza la herramienta **"Table"** del menú Report > Table en EPANET, la cual permite visualizar de forma estructurada las variables hidráulicas asociadas a los elementos de la red (nodos y tuberías) en un instante específico de la simulación, en este caso a las 4:44 horas. A través de esta función, se extraen los

valores de presión dinámica en los nodos y velocidad del flujo en las tuberías, los cuales se comparan con los rangos establecidos por la NB-689.

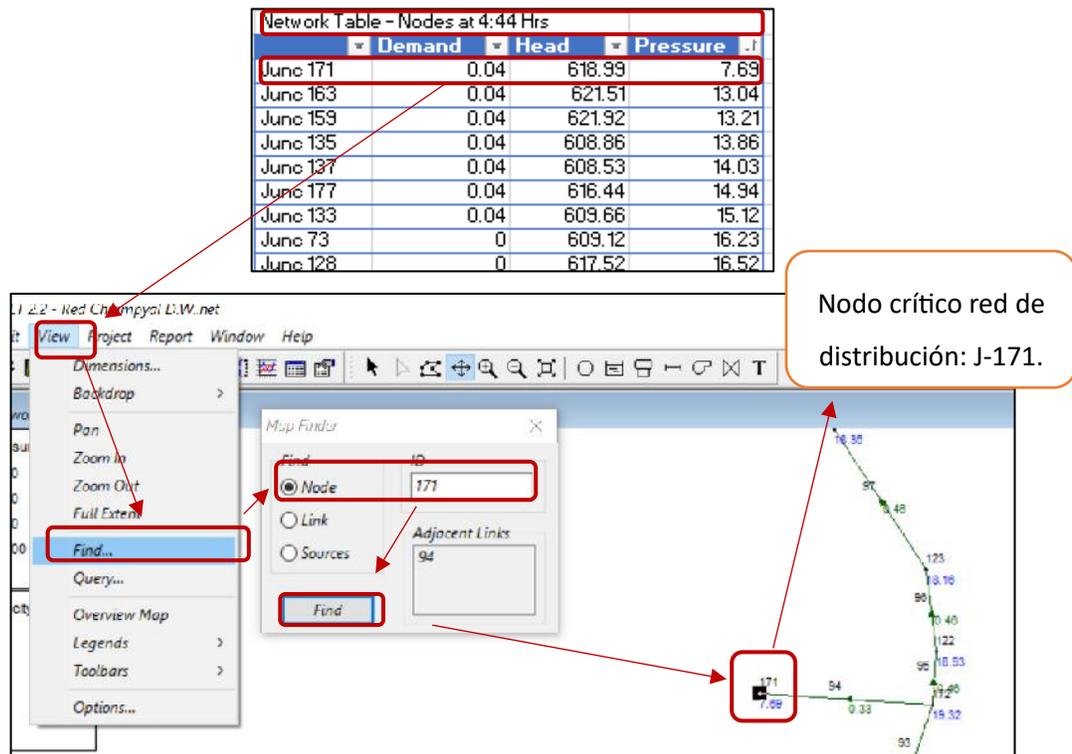


Node ID	Elevation m	Demand LPS	Head m	Pressure m
Junc 25	604.40	0.00	630.55	26.15
Junc 27	602.97	0.00	631.32	28.35
Junc 29	602.60	0.00	633.40	30.80
Junc 31	603.62	0.00	634.64	31.02
Junc 32	604.74	0.00	634.84	30.10
Junc 33	606.27	0.00	635.01	28.74
Junc 34	610.01	0.00	635.29	25.28
Junc 36	613.38	0.00	635.75	22.37

- Las tablas generadas en EPANET no presentan herramientas estadísticas integradas, como el cálculo automático de valores mínimos, máximos o promedios. Esta limitación dificulta la identificación directa de condiciones críticas como la presión dinámica mínima. Por ello, se opta por copiar los datos de las tablas a una hoja de cálculo de Excel, donde pueden aplicarse filtros, ordenamientos y funciones estadísticas que permiten una evaluación más precisa del comportamiento hidráulico de la red. Para ello, se realiza un clic sobre el encabezado "Node ID", lo cual selecciona toda la tabla. Luego, mediante la opción Edit > Copy to Clipboard, se copian los datos seleccionados y se pegan directamente en una hoja de cálculo de Excel.



- En la hoja de cálculo Excel, se aplicaron filtros para facilitar la revisión y análisis de los nodos con base en sus propiedades hidráulicas. Una vez identificado el ID del **nodo de interés J-171** (presión dinámica mínima), este fue localizado en el modelo mediante la herramienta Find del entorno de EPANET (disponible en View > Find) lo que permitió su visualización y análisis espacial dentro de la red de distribución simulada. De esta manera, se evaluó si las condiciones hidráulicas en dicho nodo requerían ajustes en el diseño, tales como modificación de diámetros o cambios en la topología. Para el caso de las velocidades tanto mínima como máxima se realiza de la misma manera que con los nodos.



El análisis descrito anteriormente se realizó a nivel global de toda la red debido a que EPANET no permite aplicar filtros espaciales directos que permitan generar tablas de resultados seleccionando nodos o tuberías según su ubicación geográfica (ramales) dentro del modelo.

i. Verificación de tubería principal y ramales

- Una de las limitaciones más importantes que genero un gasto de tiempo de gabinete mayor a lo previsto fue que EPANET no dispone de herramientas nativas para clasificar o segmentar automáticamente las tuberías o nodos de la red (de acuerdo a su ubicación) en distintos segmentos, como líneas principales o ramales. Esta carencia representa una dificultad importante al momento de realizar análisis detallados por tramos o zonas específicas del sistema, ya que el programa trata la red como un conjunto integrado sin jerarquías estructurales.
- Para superar esta limitación, es necesario copiar los datos de la red hidráulica desde EPANET y realizar un tratamiento externo de la información. Esto se lleva a cabo mediante la importación de las tablas de nodos y tuberías a una hoja de cálculo (como Microsoft Excel), donde se procede a una clasificación manual o semiautomática de los elementos. En este proceso, se identifican los ramales a partir de criterios técnicos como el número de conexiones por nodo (identificando nodos), el diámetro de las tuberías, su ubicación en el sistema, o el caudal circulante.
- Una vez identificados los ramales (visualmente por el modelador), se realiza un cruce de información con los resultados hidráulicos obtenidos de la simulación en EPANET. A través de tablas dinámicas, se verifica el cumplimiento de los parámetros de diseño para cada ramal, tales como velocidades mínimas y máximas en tuberías, presiones dinámicas y estáticas en los nodos, así como caudales distribuidos. Esta metodología permite realizar un análisis sectorizado y más detallado de la red, facilitando la detección de problemas locales como el cumplimiento que exige la NB-689.
 - Para la identificación visual (Ramal 1), para el caso de las tuberías desactivamos el display Junctions (visualización de los nodos), identificamos el número de tuberías y cotejamos con la tabla dinámica en Excel, filtramos, identificamos la velocidad máxima (m/s); velocidad mínima (m/s); Pérdida de carga unitaria min.

(m/km.); pérdida de carga unitaria máxima(m/km); en etiquetas de filas representa el diámetro interno(mm); longitud de la tubería clasificada en diámetros(m).



Etiquetas de fila	Máx. de Velocity	Mín. de Velocity	Máx. de Unit Headloss	Mín. de Unit Headloss	Suma de Length	Promedio de Diameter
Ramal 1	0.69	0.23	49.13	6.73	148.57	15.25
Pipe 11	0.23	0.23	6.73	6.73	5.42	15.25
Pipe 13	0.23	0.23	6.73	6.73	38.55	15.25
Pipe 5	0.69	0.69	49.13	49.13	25.11	15.25
Pipe 6	0.69	0.69	49.13	49.13	35.36	15.25
Pipe 8	0.46	0.46	24.44	24.44	14.16	15.25
Pipe 9	0.46	0.46	24.44	24.44	29.97	15.25
Total general	0.69	0.23	49.13	6.73	148.57	15.25

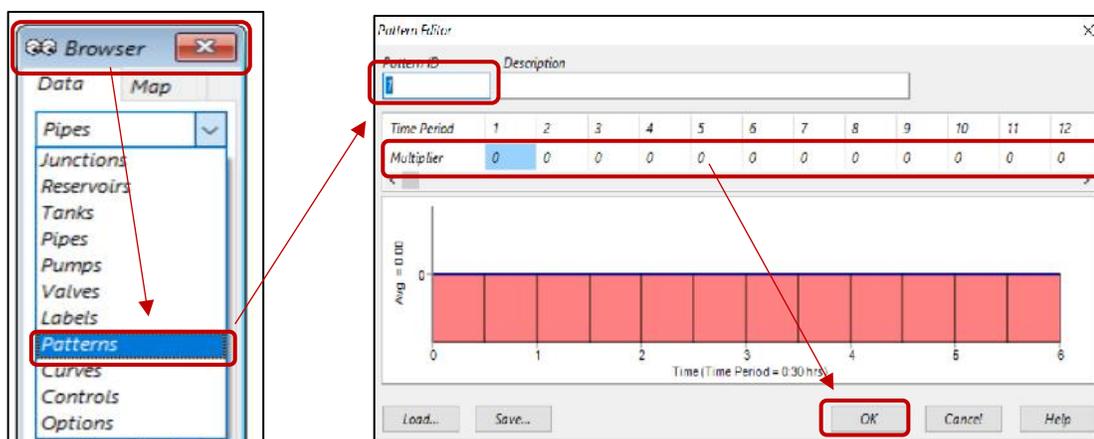
- De forma análoga al procedimiento realizado para determinar las velocidades máxima, mínima, etc. se aplicó para identificar el nodo (Ramal 1) con menor presión mínima dinámica (m.c.a.) bajo condiciones de máxima demanda.

Etiquetas de fila	Cuenta de	Mín. de Pressure
25	1	26.15
27	1	28.35
29	1	30.80
37	1	26.12
38	1	26.51
39	1	26.02
40	1	26.98
41	1	26.72
42	1	28.97
Total general	9	26.02

Observamos cada uno de los ramales y la tubería principal de la misma manera mencionada anteriormente.

II. Presión estática máxima

- Para determinar la presión estática máxima en la red, se implementó una metodología basada en la eliminación del consumo en los nodos del sistema. Esto se logró mediante la creación de un patrón de demanda cuyo múltiplo es igual a cero, lo que anula temporalmente cualquier extracción de caudal en los puntos de consumo. Bajo esta condición, y al simular el sistema en el intervalo de tiempo inicial ($t = 0;00$ horas), cuando el nivel del tanque elevado se encuentra en su punto máximo, se garantiza que no existen pérdidas de carga por fricción ni variaciones dinámicas en las tuberías.
- En este escenario, la carga total disponible en cada nodo corresponde exclusivamente a la carga geométrica proporcionada por la diferencia de altura entre el nivel del agua en el tanque y la cota del nodo en cuestión. Es decir, se obtiene la presión estática máxima que puede experimentar cada punto del sistema en condiciones sin consumo.



- Una vez definido el patrón de consumo con un factor multiplicador igual a cero, fue necesario habilitar su uso en el modelo hidráulico de EPANET. Para ello, se procedió a asignar el patrón creado mediante su identificador (ID), en este caso "1", dentro del apartado de Opciones Hidráulicas del programa. Esta asignación garantiza que, durante la simulación, todos los nodos de demanda utilicen dicho patrón, anulando efectivamente el consumo en toda la red. Se procede a ejecutar la simulación.



- Para identificar el nodo con mayor presión estática dentro del sistema, se utilizó la herramienta “Tabla” de EPANET, la cual permite visualizar y analizar los resultados hidráulicos simulados. Dentro de la tabla de resultados, se seleccionó la columna de presiones y se ordenaron los valores de menor a mayor, lo que permitió ubicar fácilmente el nodo con la mayor presión estática del sistema.

Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m
Junc 81	0.00	637.38	49.58
Junc 79	0.00	637.38	49.60
Junc 139	0.00	637.38	49.76
Junc 140	0.00	637.38	49.98
Junc 142	0.00	637.38	51.19
Junc 82	0.00	637.38	51.55
Junc 83	0.00	637.38	51.59
Junc 148	0.00	637.38	51.99
Junc 147	0.00	637.38	52.36
Junc 98	0.00	637.38	52.37
Junc 145	0.00	637.38	53.08
Junc 144	0.00	637.38	54.13
Junc 143	0.00	637.38	54.43
Junc 103	0.00	637.38	54.62
Junc 101	0.00	637.38	54.68
Junc 146	0.00	637.38	54.86

- Particularmente, para la verificación del comportamiento hidráulico en condiciones de caudal mínimo en ramales, se hace necesario generar una copia independiente del archivo de modelación y modificar individualmente las demandas en los nodos específicos de interés. Esta metodología, aunque funcional, puede volverse operativamente ineficiente cuando se requiere evaluar múltiples nodos o escenarios, ya que implica la creación de varios modelos paralelos, uno por cada situación a analizar.

Para resumir, comparar y tener un entendimiento claro se presentan las tablas.

Tabla 4.3.7: Resultados de La tubería principal de la red (EPANET).

Parámetro.	Darcy Weisbach.	Hazen-Williams.
Presión Dinámica mínima Demanda caudal máximo horario.	16,41 m.c.a.	17,96 m.c.a.
Presión estática máxima.	54,76 m.c.a.	54,76 m.c.a.
Velocidad mínima.	0,12 m/s.	0,12 m/s.
Velocidad máxima.	0,87 m/s.	0,87 m/s.
Tubería.	PVC; C-9; e =2,50mm; DN=2,00 pulg; L = 525, 59 m.	
	PVC; C-12; e =2,50mm; DN=1,50 pulg; L = 456, 86 m.	
	PVC; C-15; e =2,20mm; DN=1,00 pulg; L = 271,68 m.	
Pérdida de carga unitaria mínima.	0,0010 m/m.	0,0012 m/m.
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0470 m/m.	0,0426 m/m.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3.8: Resultados Ramal N°1 (EPANET).

Parámetro.	Darcy Weisbach.	Hazen-Williams.
Presión Dinámica mínima Demanda caudal máximo horario.	26,14 m.c.a.	26,81 m.c.a.
Presión estática máxima.	34,78 m.c.a.	34,78 m.c.a.
Velocidad mínima.	0,23 m/s.	0,23 m/s.
Velocidad máxima.	0,69 m/s.	0,69 m/s.
Tubería.	PVC; C-15; e =1,90mm; DN=0,75 pulg; L= 112,31 m.	
Pérdida de carga unitaria mínima.	0,0067 m/m.	0,0055 m/m.
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0491 m/m.	0,0422 m/m.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3.9: Resultados Ramal N°2 (EPANET).

Parámetro.	Darcy Weisbach.	Hazen-Williams.
Presión Dinámica mínima Demanda caudal máximo horario.	20,93 m.c.a.	23,43 m.c.a.
Presión estática máxima.	51,59 m.c.a.	51,59 m.c.a.
Velocidad mínima.	0,23 m/s.	0,23 m/s.
Velocidad máxima.	0,69 m/s.	0,69 m/s.
Tubería.	PVC; C-15; e =1,90mm; DN=0,75 pulg; L=322,16 m.	
	PVC; C-15; e =2,20mm; DN=1,00 pulg; L=213,76 m.	
Pérdida de carga unitaria mínima.	0,0067 m/m.	0,0055 m/m.
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0491 m/m.	0,0422 m/m.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3.10: Resultados Conexión domiciliaria (EPANET).

Parámetro.	Darcy Weisbach.	Hazen-Williams.
Velocidad.	0,33 m/s.	0,33 m/s.
Presión dinámica mínima.	5,95 m.c.a.	7,55 m.c.a.
Tubería.	PVC; C-15; e =1,70mm; DN=0,50 pulg; L=1119,15m.	
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0178 m/m.	0,0123 m/m.

Fuente: Elaboración propia.

- Se resalta que el punto crítico del sistema corresponde al **nodo J-171** (coordenadas: **X=449694,217; Y=7590661,174**), donde se registra la presión dinámica mínima de todo el sistema: **5,95 m.c.a.**

4.3.5. Aplicación AquasystemS PRO

4.3.5.1. Aducción

a) Configuración

A diferencia de otros softwares hidráulicos que requieren configuraciones internas, ajustes de parámetros, AquasystemS PRO no requiere una configuración compleja una vez instalado. Su funcionamiento se integra directamente sobre la plataforma AutoCAD, utilizando comandos y menús personalizados orientados al diseño de sistemas de agua potable lo que facilita su uso para usuarios familiarizados con AutoCAD.

Sin embargo, la principal dificultad no radica en su configuración técnica, sino en el acceso al software y a los requisitos específicos para su instalación, lo cual representa una barrera considerable para su uso generalizado. En primer lugar, el programa fue diseñado para funcionar exclusivamente con **AutoCAD 2015 y 2016**, por lo que versiones posteriores o anteriores del entorno CAD no son compatibles.

Además, AquasystemS PRO requiere una **llave física USB (dongle)** para su activación, lo que implica que el uso del software está condicionado a la disponibilidad de esta licencia física. Esta modalidad de licenciamiento, además de ser obsoleta en comparación con los modelos de activación digital actuales, presenta riesgos logísticos: en caso de extravío o daño del dispositivo, el usuario no puede acceder al programa ni recuperar la licencia fácilmente.

Adicionalmente, el acceso al software es limitado debido a **la falta de canales oficiales de distribución**. Actualmente, no existe una página web oficial, plataforma de soporte ni documentación pública que permita su adquisición formal o consulta técnica de manera abierta. Esto representa una dificultad importante para su implementación en entornos académicos. En la práctica, el software solo puede obtenerse a través de profesionales específicos que ya lo utilizan, usualmente mediante contacto directo, lo que restringe significativamente su difusión y acceso generalizado.

b) Construcción topológica

AquasystemS PRO incorpora herramientas que permiten trabajar directamente sobre el entorno gráfico del software desde etapas iniciales como la importación topográfica, el

trazado de líneas de aducción y la configuración de redes de distribución. Esto facilita una transición fluida desde los datos de campo hasta el diseño hidráulico completo.

- La herramienta "Terreno", permite importar puntos topográficos obtenidos en campo. Estos puntos deben ser organizados conforme a una codificación específica que el software reconoce y asocia con funciones hidráulicas, gráficas y topográficas particulares. En la Tabla 4.3.11. se muestra un ejemplo de cómo debe estructurarse la tabla de puntos, donde:
 - En la columna descripción se consignan etiquetas tales como:
 - Ejes de tubería: para trazar el alineamiento principal. BMs (Bench Marks): puntos de control altimétrico para referencia. Válvulas: nodos especiales dentro de la red.
 - En la columna Viviendas: puntos de demanda identificados.

Esta codificación permite al programa identificar automáticamente los elementos y asociarlos a funciones específicas del diseño, como la generación de perfiles longitudinales, inserción de accesorios, estimación de demandas o colocación de elementos hidráulicos.

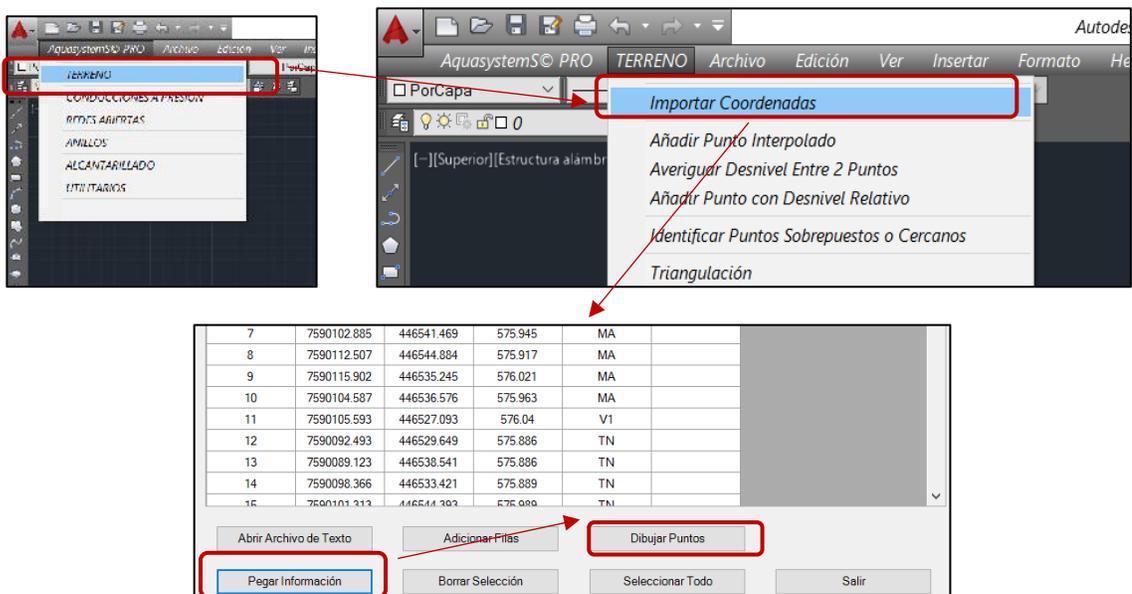
El entorno de AquasystemS PRO permite además trabajar directamente sobre planos georreferenciados, lo cual mejora significativamente la precisión del diseño y reduce los errores durante la transferencia de datos entre etapas del proyecto.

Tabla 4.3.11: Tabla de importación Puntos para construcción Topológica.

N°	Norte (m)	Este (m)	Cota (m.s.n.m.)	Descripción	Viviendas.
1	7590097	446539,001	576,01	BM1	
80	7590096.43	446868,816	603,875	V5	
172	7590127.33	447108,994	588,881	EJE	
281	7590616.86	447796,061	599,627	V16	
533	7589608.16	449428,756	605,64		Vivienda
550	7589554.91	449463,143	604,522		Vivienda
551	7589562.79	449431,403	605,215		Vivienda
571	7589675.26	449425,305	603,973		Vivienda
573	7589692.89	449490,393	608,589		Vivienda

Fuente: Elaboración propia.

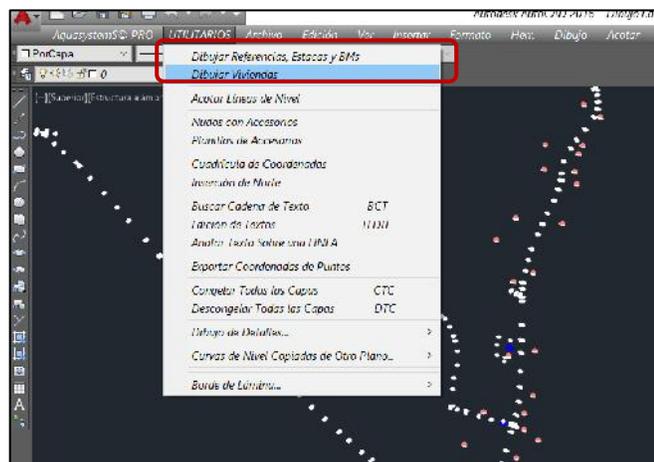
- Una vez estructurada y codificada la tabla de puntos topográficos, se procede a su incorporación al entorno gráfico de trabajo mediante la herramienta "Terreno" del módulo AquasystemS PRO en AutoCAD. Para ello, se siguen los siguientes pasos:
 - Ingresar al entorno AutoCAD con el complemento AquasystemS PRO previamente instalado.
 - En la barra de herramientas del software, se selecciona la pestaña correspondiente a AquasystemS PRO y se accede a la opción "Terreno".
 - A continuación, se elige la función "Importar puntos", la cual habilita un cuadro de diálogo para el ingreso de datos.
 - Desde la tabla previamente organizada (como la mostrada en la Tabla 4.3.11), se seleccionan y copian únicamente las filas de datos, omitiendo los encabezados.
 - En el cuadro de diálogo de la herramienta (importar puntos), se elige la opción "Pegar información", lo que permite insertar directamente los puntos topográficos en el entorno de dibujo.
- Esta operación genera una representación gráfica de los puntos sobre el plano, respetando las coordenadas y elevaciones correspondientes (siguientes imágenes).



- La herramienta "Utilitarios", la cual permite representar gráficamente las descripciones previamente definidas en la tabla de puntos.

Mediante "Utilitarios", el software identifica y grafica automáticamente elementos clave como:

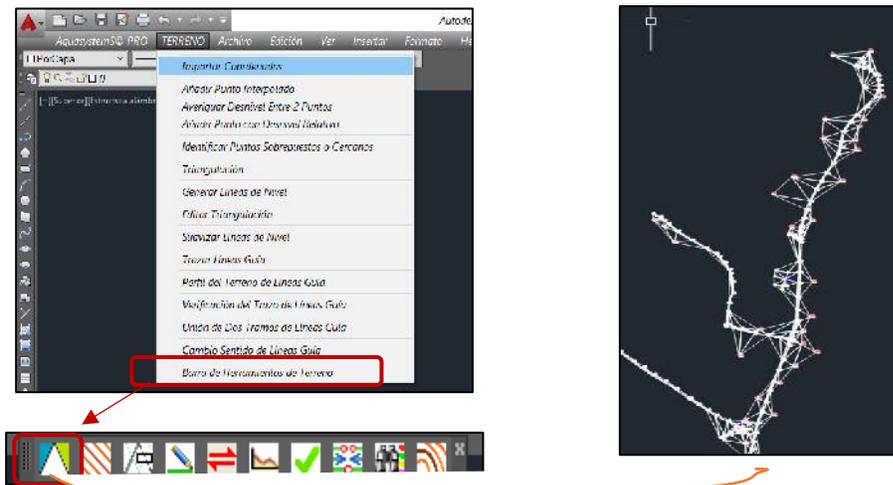
- Bench Marks (BMs): Representados con símbolos específicos (📍) de control altimétrico, sirven como referencia para el diseño de perfiles longitudinales.
- Ejes de tubería: Son alineamientos que orientan el trazado de aducción o redes de distribución.
- Viviendas: El software representa gráficamente (🏠) los puntos de demanda, asociados a viviendas u otras edificaciones, lo cual permite posteriormente calcular caudales y demandas unitarias.



- La generación de curvas de nivel en AquasystemS PRO se realiza mediante las herramientas incluidas en el módulo "Terreno", las cuales permiten modelar la topografía a partir de los puntos topográficos previamente ingresados.

- Una de las funciones principales dentro de este módulo es la "**Triangulación**", la cual se encarga de construir una superficie tridimensional utilizando los puntos importados. Esta herramienta genera una red de triángulos irregulares (TIN - Triangulated Irregular Network) que modela el terreno de forma continua. Para ejecutar esta herramienta, se debe ingresar un valor de longitud máxima para los lados de los triángulos, lo que controla la densidad de la malla y, por ende, la

precisión del modelo topográfico. Este parámetro debe definirse en función de la dispersión de los puntos y el nivel de detalle deseado.

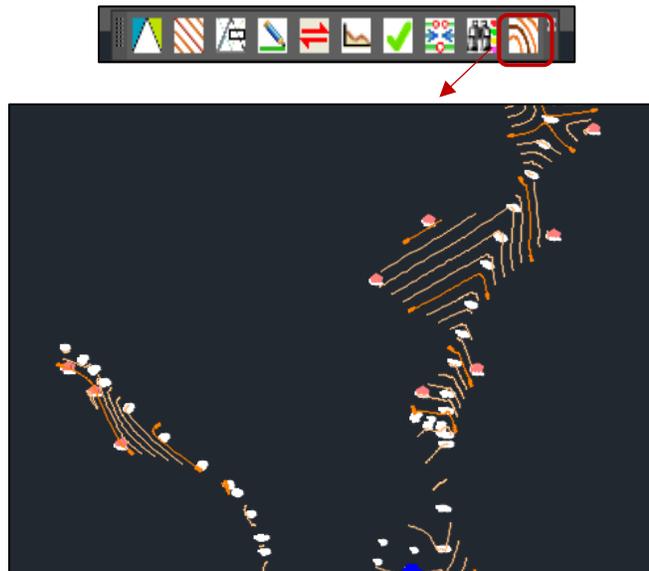


- Seguidamente, dentro de la misma barra de herramientas "Terreno", se procede a la generación de curvas de nivel. Una vez ejecutada la triangulación, el usuario puede definir la precisión deseada para la representación topográfica, estableciendo dos tipos de curvas:
 - Curvas mayores: con un intervalo de 5 metros, utilizadas para representar los cambios de altitud más generales del terreno.
 - Curvas menores: con un intervalo de 1 metro, que permiten un mayor detalle en zonas críticas o de interés específico para el diseño.
 - Asimismo, en la misma barra de herramientas se dispone de opciones para editar los triángulos generados durante la triangulación, lo que permite ajustar manualmente la superficie en caso de inconsistencias o errores topográficos detectados.

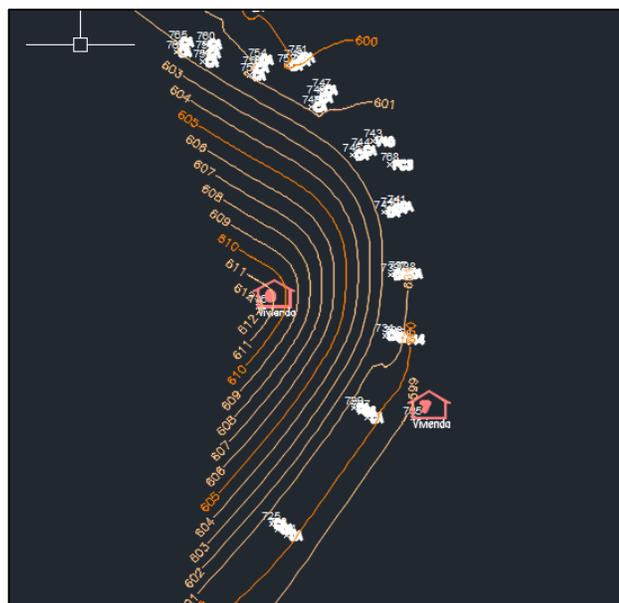


Estas configuraciones se ajustan según las necesidades del proyecto y el nivel de detalle requerido en la modelación del terreno.

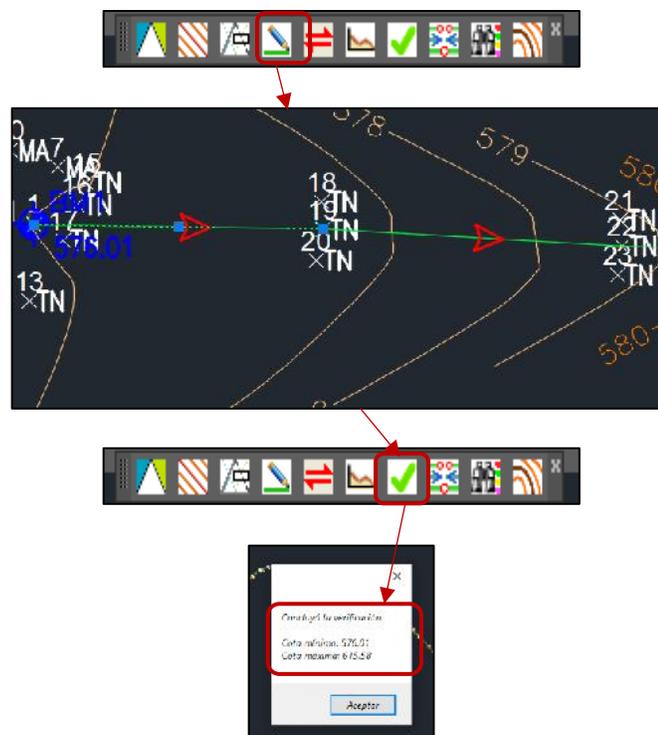
- Posteriormente, el software permite el suavizado de curvas, una función que mejora la representación gráfica de las líneas de nivel, eliminando vértices innecesarios y generando trayectorias más continuas y naturales.



- Finalmente, mediante la herramienta "Utilitarios", se puede realizar la acotación de curvas de nivel, añadiendo etiquetas de elevación que facilitan la interpretación visual del relieve.



- Las Líneas Guía (LG) son elementos gráficos fundamentales dentro del entorno de trabajo de AquasystemS PRO. Se definen como líneas trazadas directamente sobre el dibujo de AutoCAD que contiene la información topográfica del proyecto. Su principal característica es que poseen un sentido direccional, es decir, cada línea tiene un punto de inicio y un punto final. Este sentido es esencial para el análisis hidráulico, ya que permite definir la dirección del flujo en las conducciones. La orientación se establece mediante la selección del punto inicial y final durante el trazado de la línea, y su dirección se representa gráficamente a través de una flecha de color rojo ubicada en el centro de la línea. Estas líneas guía permiten vincular la topografía con los elementos hidráulicos del sistema, facilitando la creación del perfil longitudinal y la posterior definición de los componentes del sistema de aducción.
- Para finalizar se debe verificar la línea guía.



c) Edición de datos

- A diferencia de otros programas como EPANET o WaterCAD, AquasystemS PRO requiere la introducción previa de los parámetros generales del proyecto antes de

iniciar el modelado hidráulico. Esta configuración se divide en cuatro apartados principales:

- **El primero es datos generales del proyecto**, este cuenta con los siguientes campos:
 - **Datos generales del proyecto:** En este apartado se especifica el método de cálculo de pérdidas por fricción, el cual está restringido exclusivamente a la ecuación de Darcy-Weisbach, sin posibilidad de elegir otros métodos empíricos como Hazen-Williams. Además, se deben ingresar datos relativos a las propiedades físicas del agua, como la temperatura y la viscosidad cinemática, necesarios para la correcta determinación del factor de fricción.

PARAMETROS GENERALES DE PROYECTO
Los datos con asterisco son de llenado obligatorio.

Cálculo de Pérdidas por Fricción

Método empleado: Darcy - Weisbach

Viscosidad Cinemática (Agua)

Temperatura 15 °C

* Viscosidad [mm²/seg] 1.142

- **Material y dimensiones de las tuberías:** Aquí se selecciona el material de la tubería, como PVC, HDPE u otros, así como la clase correspondiente en caso de tratarse de PVC. Posteriormente, se definen los diámetros a utilizar en el proyecto, donde se incluyen tanto el diámetro nominal como el diámetro interno, el cual puede ajustarse manualmente en función de la clase de tubería seleccionada. Es importante destacar que el usuario debe seleccionar previamente los diámetros disponibles para el diseño, ya que el programa propondrá soluciones con base en esta selección, aunque dichas propuestas pueden ser posteriormente modificadas por el proyectista.

Tuberías

Material PVC

Rugosidad Absoluta [mm] 0.0015

Tipo de Tubería Clase 12

Elección de Diámetros

Diámetros

Diámetro Nominal [plg]	Diámetro Interior [mm]	
1/2	12.5	<input type="checkbox"/>
3/4	19.0	<input type="checkbox"/>
1	25	<input type="checkbox"/>
1 1/2	37.5	<input type="checkbox"/>
2	50.0	<input type="checkbox"/>
2 1/2	62.5	<input checked="" type="checkbox"/>
3	67	<input checked="" type="checkbox"/>
4	100	<input type="checkbox"/>
5	125	<input type="checkbox"/>

- **Profundidad de instalación:** En este campo se introduce la profundidad de instalación (sobre la clave de la tubería) de la tubería, un dato relevante para el análisis y cálculo de cómputos métricos de excavación y del perfil topográfico del terreno y la tubería de aducción.

Zanjas	
Recubrimiento [mts]	1
Altura Cama de Asiento [mts]	0.1
Relleno Compactado [mts]	0.30
Ancho de Zanja [mts]	0.50

- **En el apartado 2 Población y dotación de consumo:**

- Este apartado está diseñado para realizar los cálculos de demanda de agua conforme a lo establecido en la Norma Boliviana NB-689. El software permite realizar el cálculo de manera automática, requiriendo únicamente el ingreso de tres datos fundamentales: la población inicial, el periodo de diseño y la dotación inicial (l/Hab.d). Con esta información, el programa estima la evolución poblacional y proyecta las demandas correspondientes.
- No obstante, también existe la posibilidad de asignar manualmente los valores de población futura, dotación futura en los campos correspondientes para mayor control o precisión. En ese sentido, es importante mencionar que el programa no calcula automáticamente las demandas puntuales, entendidas como los consumos de instituciones, industrias, escuelas, fábricas, etc.; estas deben ser ingresadas manualmente por el proyectista si es que lo hubiese.

Población de Proyecto	
* Población Inicial	210
* Período de Diseño (años)	20
Tasa de Crecimiento [%]	1.7
Proyección de la Población	Crecimiento Geométrico
* Población Proyectada	288
Población Flotante	

Dotaciones por Habitante	
Dotación Inicial [lts./hab./día]	90
Variación Anual de la Dotación %	7.5
* Dotación Futura [lts./hab./día]	126.08
Previsiones Adicionales (% dotación)	
Consumo no residencial %	
Pérdidas en Planta %	
Pérdidas en Tuberías %	
Demandas Puntuales [lts./seg]	
Sumatoria Demandas Puntuales	0.04

- **Apartado 3 es son los caudales de diseño:**

- En este apartado, se debe definir los coeficientes de consumo diario (K_1) y coeficientes de variación horaria (K_2), parámetros necesarios para estimar los caudales máximos de diseño conforme a lo indicado en la NB-689. Una vez completados estos campos, se accede a la opción "Procesar información", donde el programa realiza automáticamente el cálculo de los caudales de diseño, mostrando valores como el caudal máximo diario (Q_{maxd}) y el caudal máximo horario (Q_{maxh}).
- Es importante señalar que, a diferencia de otros softwares como EPANET o WaterCAD, este módulo no permite la introducción manual de los caudales de diseño. Esto puede representar una limitación en ciertos casos, como en sistemas de aducción por bombeo, donde se requiere establecer un caudal fijo previamente calculado (Q_b). En este estudio, como alternativa, se optó por manipular el valor del caudal puntual hasta alcanzar el valor deseado de 2 l/s, ajustándolo progresivamente en dicho campo hasta reflejar el caudal objetivo del sistema (1.37 l/s).

The screenshot shows a software interface for calculating design flow rates. It includes input fields for K_1 (1.5) and K_2 (2.2), buttons for "Procesar Información" and "Aplicar", and two tables of flow rates. Red boxes and arrows highlight the flow rate for "Caudal de la Aducción [QMD + DP]" which changes from 0.67 to 2.00.

Caudales de Diseño [lts/seg]	
Caudal Medio QM	0.42
Caudal Máximo Diario QMD	0.63
Caudal de la Aducción [QMD + DP]	2.00
Caudal Máximo Horario QMH	1.39

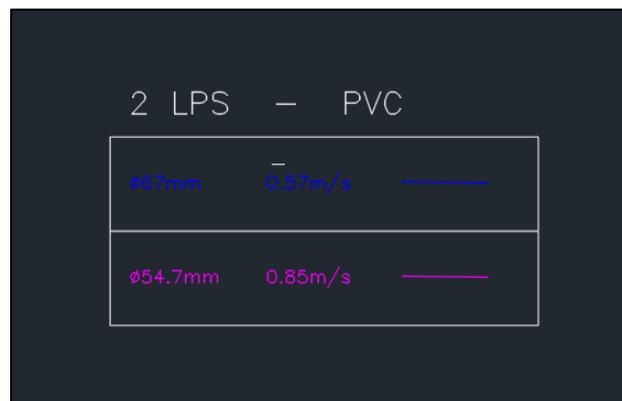
- Limitaciones en la edición de puntos y elevaciones:
 - Una de las particularidades del entorno de trabajo en AquasystemS PRO es que no permite realizar modificaciones puntuales o individuales sobre la ubicación o elevación de los puntos topográficos ya introducidos, al menos no de forma directa e inmediata dentro del entorno gráfico. Cualquier cambio en la ubicación de un punto debe gestionarse a través de la modificación de las líneas guía, lo cual obliga a reestructurar el trazado original si se desea actualizar la geometría de la aducción o la red.
 - En cuanto a la elevación de puntos específicos del terreno, como en el caso de tanques elevados cuya cota supera el terreno natural, esta información debe ser configurada correctamente desde el inicio, es decir, al momento de cargar los puntos topográficos en la herramienta "Terreno".
- Este comportamiento refleja que el software está especialmente diseñado para sistemas de aducción por gravedad, lo que introduce limitaciones en proyectos con bombeo, donde se requiere una mayor flexibilidad para definir condiciones hidráulicas específicas que no siempre responden a la topografía del terreno.

d) Representación elementos más complejos

- Una vez editados y completados los parámetros generales del proyecto, el siguiente paso consiste en transformar las líneas guía en tramos de tubería. Esta operación se realiza accediendo al apartado de Conducción, dentro del cual se encuentra el submenú Herramientas de Conducción. En este, se selecciona la opción "Transformar líneas guía a tramos", lo que permite que el software reconozca automáticamente las líneas previamente trazadas como elementos hidráulicos activos del sistema.
- El software AquasystemS PRO presenta limitaciones en la representación de componentes hidráulicos especiales, ya que no cuenta con herramientas específicas para modelar ni graficar elementos como pozos, estaciones de bombeo o tanques de almacenamiento. Esta ausencia de funciones dedicadas restringe el desarrollo de proyectos más complejos donde dichos componentes son esenciales, como en sistemas de aducción por bombeo. La configuración de estos elementos debe

realizarse de manera indirecta o forzada, utilizando recursos alternativos, lo cual afecta la precisión del modelo y limita su aplicabilidad a sistemas que no se ajusten al flujo gravitacional convencional para el que fue originalmente concebido el software.

- En el caso particular de elementos como pozos de bombeo, AquasystemS PRO no contempla una herramienta específica para representarlos ni modelarlos hidráulicamente dentro del sistema. Esto se debe a que el enfoque del software es principalmente gráfico, basado en el trazado de líneas de gradientes hidráulicas asociadas al terreno y al diámetro de las tuberías, sin considerar condiciones piezométricas impuestas por equipos de bombeo. Para que el programa reconozca una condición como piezométrica válida, esta debe estar asociada a una elevación topográfica superior, lo que implica que mientras exista elevación del terreno, el software asumirá que el sistema opera por gravedad. Por ello, representar un pozo dentro del flujo hidráulico del sistema no es viable directamente, y deben buscarse soluciones externas o aproximaciones gráficas que no siempre reflejan fielmente el comportamiento real del sistema. En la siguiente imagen se muestra una tabla de valores del gradiente hidráulica generada por el programa AquasystemS PRO. Esta tabla es uno de los resultados clave del software, ya que permite utilizar la pendiente de la línea de gradiente hidráulica en función del caudal de diseño, el material seleccionado y el diámetro de la tubería.

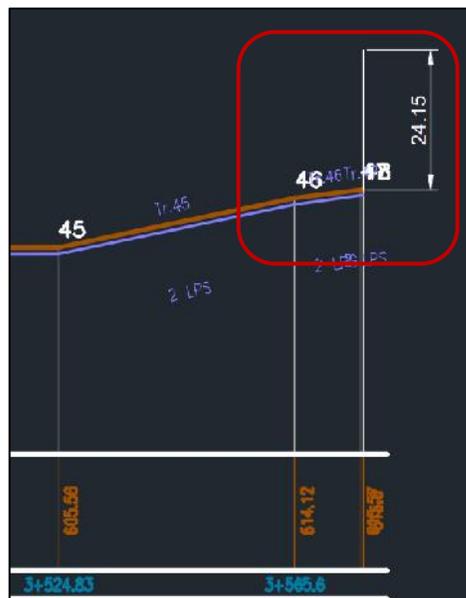


2 LPS — PVC		
∅67mm	0.57m/s	
∅54.7mm	0.85m/s	

- El cálculo de la altura de la bomba debe realizarse de manera externa al programa, considerando el tramo desde la instalación de la bomba hasta la superficie, ya que AquasystemS PRO no realiza este análisis automáticamente. Sin embargo, el software

brinda una herramienta útil para la comparación visual, ya que permite graficar las gradientes hidráulicas resultantes para diferentes diámetros de tubería, lo que facilita al proyectista evaluar la diferencia entre alternativas y seleccionar aquella que mejor se adecúe a los requerimientos hidráulicos del sistema. Esta funcionalidad es especialmente valiosa en proyectos por bombeo con tubería de impulsión largas, donde la selección de un diámetro adecuado influye directamente en la pérdida de carga y, por ende, en la altura manométrica total requerida.

- Para la representación de un tanque elevado, AquasystemS PRO no cuenta con una herramienta específica para definir estructuras de almacenamiento a cota superior directamente en el modelo. Por esta razón, su representación se realiza de manera gráfica, trazando manualmente la línea de gradiente hidráulica desde la altura del tanque elevado (nivel máx.), tomando esta cota como referencia piezométrica para el sistema.

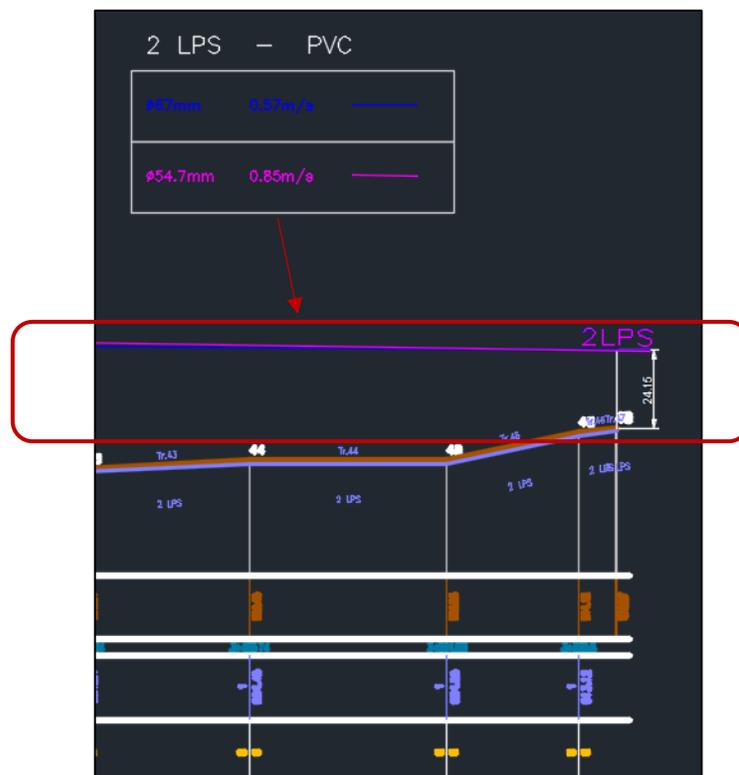


e) Validación del Modelo y Cálculo Hidráulico

- Es importante señalar que AquasystemS PRO no cuenta con una herramienta explícita de validación o comprobación automática que permita verificar si todos los elementos del sistema están correctamente conectados o contienen la información necesaria. Sin embargo, el software está diseñado con una lógica de trabajo estructurada y secuencial, en la cual cada procedimiento depende del cumplimiento del anterior. Es

decir, si un paso no se ha realizado correctamente, el sistema no permite avanzar al siguiente, funcionando de manera implícita como un mecanismo de control. Esta estructura obliga a completar correctamente cada etapa del diseño, asegurando que todos los datos esenciales y elementos del modelo hayan sido introducidos y vinculados adecuadamente antes de proceder.

- Como se mencionó anteriormente, el método de diseño implementado por AquasystemS PRO es fundamentalmente gráfico. En este sentido, una vez distribuido el caudal de diseño en nuestro caso, 2 l/s., se procede a generar el perfil longitudinal del sistema. Sobre este perfil, se representa la línea de gradiente hidráulica (LGH) correspondiente a cada alternativa de diseño. Esto se realiza seleccionando la pendiente de la LGH de diferentes diámetros disponibles (3" y 2,5") para la conducción y trazando estas mismas sobre el mismo perfil, lo cual permite visualizar comparativamente el comportamiento hidráulico de cada opción.

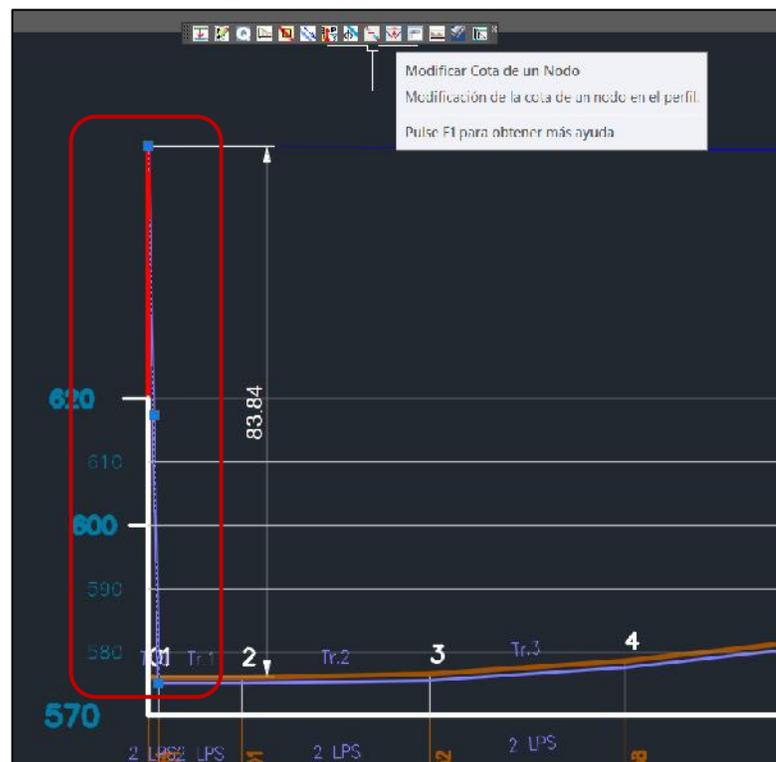


f) Análisis de Resultados Iniciales y Ajuste del Diseño (proceso de diseño iterativo)

- A diferencia de otros programas de diseño hidráulico, Aquasystems PRO no presenta los resultados mediante planillas de cálculo, sino que el análisis depende directamente de la representación gráfica del perfil hidráulico definido por el proyectista. Esta metodología permite comparar visualmente distintas alternativas de diseño. En las imágenes siguientes se muestra un ejemplo de esta comparación, donde se representa la diferencia de comportamiento hidráulico entre dos conducciones de PVC clase 12. El primer criterio de evaluación se realiza verificando la velocidad en cada una de ellas: una conducción de 3" de diámetro con una velocidad de 0,57 m/s (línea azul) y otra de 2,5" de diámetro con una velocidad de 0,85 m/s (línea rosada). Si bien la segunda opción presenta una velocidad más eficiente desde el punto de vista del régimen de flujo, la pérdida de carga resultante es más de 30 metros superior, lo que implica una mayor altura de bombeo y, por consiguiente, un incremento significativo en los costos operativos del sistema. Esta representación gráfica permite al proyectista visualizar con claridad el impacto que tienen las decisiones de diámetro sobre la eficiencia energética y económica del sistema.



- Una vez definido el perfil hidráulico, se deben limpiar las líneas que no son necesarias para una mejor visualización. A continuación, se representa gráficamente la altura que la bomba debe superar, desde el punto de ubicación en la superficie del pozo hasta el tanque elevado, que en este caso corresponde a 83,84 m. Para este fin, se utiliza la opción de cálculo de piezometría, mediante la cual se determina la diferencia de altura entre la Línea de Gradiente Hidráulico (LGH) en el punto 0 (representada con una línea vertical roja). Este procedimiento permite cerrar correctamente el perfil hidráulico. De forma análoga, se realiza la representación gráfica correspondiente para el tanque elevado, asegurando la continuidad del sistema.



- Una vez cerrado el perfil hidráulico, se procede a generar la planilla de cálculo utilizando la herramienta del programa con el mismo nombre. Esta opción permite obtener una representación detallada del cálculo hidráulico correspondiente a cada tramo de la conducción. Es fundamental verificar que, en el punto final del sistema, la línea piezométrica alcance un valor de cero, lo cual indica que el perfil ha sido

correctamente definido y que la energía disponible ha sido completamente consumida al llegar al destino (en este caso, el tanque elevado).

Modelo Hidráulico de la Aducción

Tramo	Nodo Inicial	Nodo Final	Cota Terr. Inicial	Cota Terr. Final	Prof. Tub. Inicial	Prof. Tub. Final	Desnivel del Tramo	Desnivel Acumulado (m)	Longitud Tramo (m)	Longitud Acumulada (m)	Caudal Q (lts/seg)	Diámetro (mm)	Material	Rugosidad Absoluta	Lezométrico Inicial	Lezométrico Final	dh Atm. Final	Velocidad (m/seg)	Entrada
30	30	31	603.41	602.65	1.00	1.00	0.77	58.23	64.50	1-962.90	2.00	67.00	PVC	0.005	46.78	47.19	58.23	0.57	
31	31	32	602.65	604.33	1.00	1.00	-1.68	56.55	83.15	2-046.04	2.00	67.00	PVC	0.005	47.19	45.04	56.55	0.57	
32	32	33	604.33	604.11	1.00	1.00	0.22	56.77	65.19	2-111.23	2.00	67.00	PVC	0.005	45.04	44.89	56.77	0.57	
33	33	34	604.11	601.23	1.00	1.00	2.88	59.65	120.08	2-231.31	2.00	67.00	PVC	0.005	44.89	47.10	59.65	0.57	
34	34	35	601.23	600.81	1.00	1.00	0.42	60.07	13.04	2-244.36	2.00	67.00	PVC	0.005	47.10	47.44	60.07	0.57	
35	35	36	600.81	602.66	1.00	1.00	-1.85	58.22	104.92	2-349.28	2.00	67.00	PVC	0.005	47.44	45.00	58.22	0.57	
36	36	37	602.66	607.67	1.00	1.00	-5.02	53.21	244.79	2-594.07	2.00	67.00	PVC	0.005	45.00	38.61	53.21	0.57	
37	37	38	607.67	604.11	1.00	1.00	3.57	56.77	178.71	2-772.78	2.00	67.00	PVC	0.005	38.61	41.17	56.77	0.57	
38	38	39	604.11	607.54	1.00	1.00	-3.44	53.34	166.92	2-939.70	2.00	67.00	PVC	0.005	41.17	36.79	53.34	0.57	
39	39	40	607.54	602.80	1.00	1.00	4.74	58.08	130.16	3-069.86	2.00	67.00	PVC	0.005	36.79	40.80	58.08	0.57	
40	40	41	602.80	604.30	1.00	1.00	-1.50	56.58	159.16	3-229.02	2.00	67.00	PVC	0.005	40.80	38.41	56.58	0.57	
41	41	42	604.30	605.45	1.00	1.00	-1.15	55.43	131.28	3-360.30	2.00	67.00	PVC	0.005	38.41	36.52	55.43	0.57	
42	42	43	605.45	602.91	1.00	1.00	2.54	57.97	134.87	3-495.17	2.00	67.00	PVC	0.005	36.52	38.31	57.97	0.57	
43	43	44	602.91	605.45	1.00	1.00	-2.55	55.43	50.81	3-545.98	2.00	67.00	PVC	0.005	38.31	35.47	55.43	0.57	
44	44	45	605.45	605.56	1.00	1.00	-0.11	55.31	61.08	3-607.07	2.00	67.00	PVC	0.005	35.47	35.02	55.31	0.57	
45	45	46	605.56	614.12	1.00	1.00	-8.56	46.75	40.77	3-647.84	2.00	67.00	PVC	0.005	35.02	26.23	46.75	0.57	
46	46	47	614.12	615.57	1.00	1.00	-1.45	45.31	11.33	3-659.17	2.00	67.00	PVC	0.005	26.23	24.72	45.31	0.57	
47	47	48	615.57	615.60	1.00	1.00	-24.15	-25.18	20.13	3-684.35	2.00	67.00	PVC	0.005	24.72	-0.60	20.13	0.57	

Ocultar/Mostrar Columnas Registrar Información

Exportar Planilla Cerrar Planilla

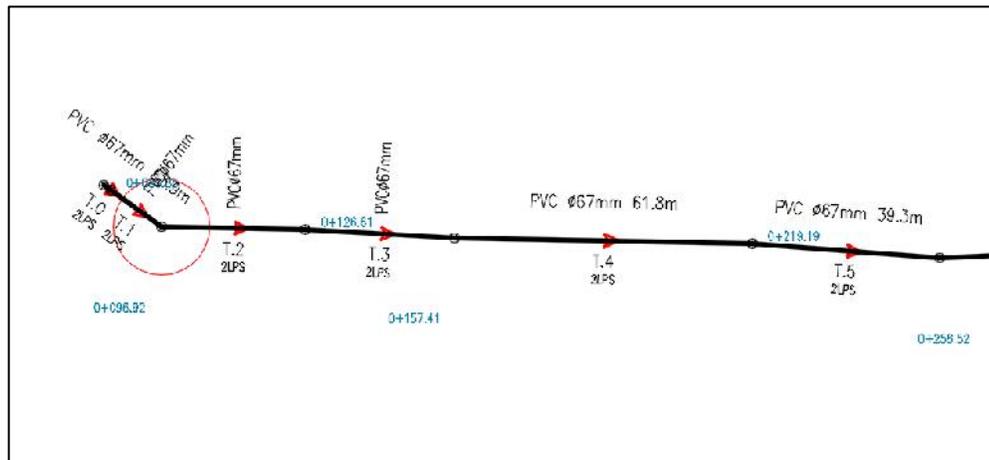
g) Creación de escenarios

El software AquasystemS PRO, no permite la creación de alternativas de diseño dentro del mismo archivo, lo cual obliga al proyectista a generar múltiples archivos independientes para evaluar distintas configuraciones del sistema. Además, el programa solo contempla el método de Darcy-Weisbach para el cálculo de pérdidas por fricción, sin ofrecer la posibilidad de utilizar otros métodos reconocidos como Hazen-Williams o Manning.

h) Resultados

- Como resultado final, el programa AquasystemS PRO ofrece una tabla de cálculo hidráulico, la cual contiene los resultados por tramo en función de los parámetros definidos previamente por el proyectista. Esta tabla debe ser registrada y archivada como parte de la documentación técnica del diseño, ya que constituye el respaldo del análisis hidráulico realizado. Aunque el software basa sus cálculos en una metodología gráfica, esta planilla resume de manera ordenada los valores obtenidos para cada segmento de la aducción, permitiendo su verificación y posterior validación del sistema propuesto.

- Con la información ya registrada, se debe eliminar el perfil hidráulico preliminar elaborado manualmente por el proyectista, para dar lugar al perfil hidráulico final generado por el programa, el cual representa los resultados consolidados del diseño. Este perfil incluye datos fundamentales como la altura piezométrica, caudal conducido, material de la tubería, velocidad del flujo, diámetro, profundidad de instalación, cota del terreno, así como las progresivas del sistema. Además, incorpora de manera automática la línea de gradiente hidráulico correspondiente a la aducción, permitiendo una representación técnica precisa y confiable del comportamiento hidráulico de toda la conducción.
- Para la representación en el área de trabajo, se utiliza la opción "Tuberías", la cual grafica los tramos de conducción con sus respectivas características técnicas, tales como el material, diámetro y caudal conducido. Esta herramienta facilita la visualización y validación del sistema diseñado, brindando una referencia clara de los elementos hidráulicos en el proyecto.



- Para la estimación de la altura de la bomba, el programa no cuenta con una herramienta específica que permita calcularla de forma directa. Sin embargo, es posible obtener una estimación aproximada a partir de los datos generados en el perfil hidráulico. Esta se obtiene sumando la altura piezométrica en el punto 0 (superficie del pozo), que, en el presente caso, corresponde a la línea de gradiente hidráulico con pendiente del diámetro de 3", igual a 83,84 m, más la profundidad de instalación de la bomba, que es de 85 m, lo que da como resultado una altura total estimada de

168,84 m. Cabe aclarar que este cálculo debe realizarse externamente, mediante una hoja de cálculo, ya que el programa no lo realiza automáticamente.

- Adicionalmente, el programa genera una planilla de cómputos métricos que incluye los movimientos de tierra requeridos y las cantidades de tuberías utilizadas en el diseño.

En resumen, tenemos a tabla 4.3.12.

Tabla 4.3.12: Resultados Aducción AquasystemS PRO.

Parámetro.	Darcy Weisbach.
Caudal.	2,00 l/s.
Velocidad.	0,57 m/s.
Presión máxima dinámica.	83,84 m.c.a.
Presión mínima dinámica.	24,72 m.c.a.
Pérdida de carga unitaria.	0,0056 m/m.
Altura de bombeo.	168,84 m.
Tubería.	PVC; C-12; k=0,0015mm.
Diámetro.	DN= 76,2mm.; e =4,6mm.
Tiempo llenado tanque.	-

Fuente: Elaboración propia.

4.3.5.2. Red de distribución

a) Construcción topológica y configuración

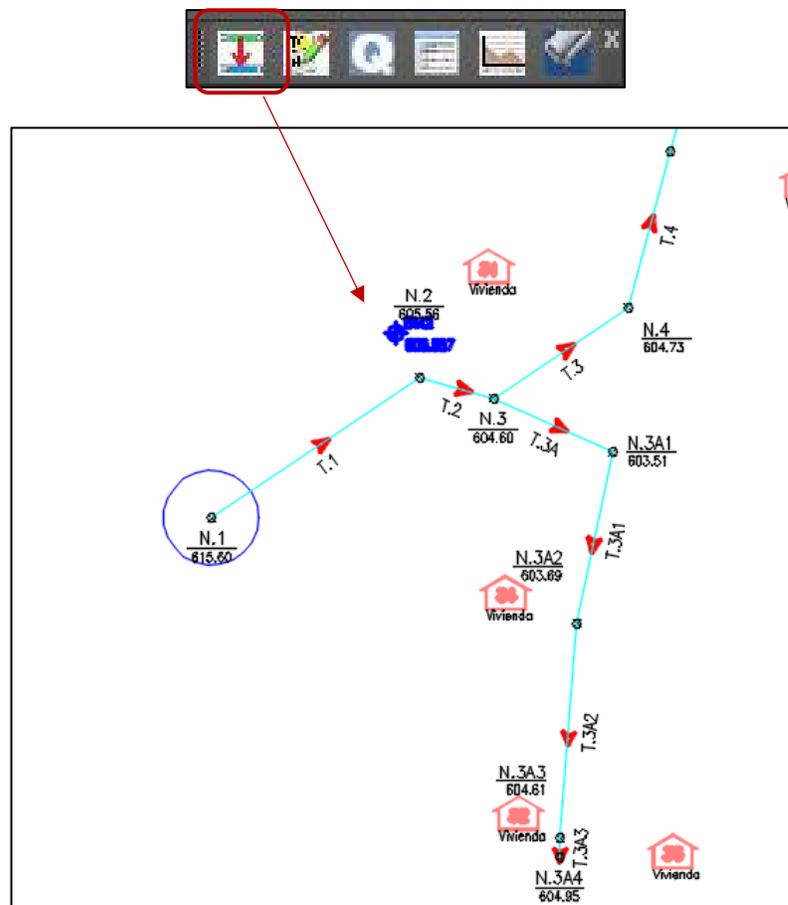
- La configuración topológica y la construcción de la red de distribución dentro de AquasystemS PRO se realiza mediante un procedimiento similar al utilizado para la aducción. Sin embargo, existen diferencias importantes en cuanto a los parámetros de diseño, la configuración de demanda y la naturaleza de los flujos, los cuales se detallan a continuación.

b) Creación de secciones de la red

- Al igual que en la construcción de la aducción, la red de distribución se configura a partir de líneas guía que representan los trazados de las tuberías. Sin embargo, AquasystemS PRO automatiza el reconocimiento y codificación de los elementos de la red en esta etapa.

Una vez definidas las líneas guía (trazar primero la red principal y luego continuar con los ramales secundarios) y los nodos de demanda, el programa:

- Reconoce automáticamente los ramales y los nodos de demanda a partir de las intersecciones.
- Codifica de forma automática cada tramo de tubería, asignándoles identificadores únicos (Ramal 1(3A), Ramal 2 (9A)).



c) Asignación de demandas

- AquasystemS PRO calcula automáticamente el caudal unitario y el caudal máximo horario a partir de los datos de población ingresados, conforme a la NB-689. Sin embargo, la asignación de demandas debe realizarse manualmente, especificando en cada nodo el número de viviendas asociadas, tanto en la red principal como en los ramales. Asimismo, se debe identificar el nodo correspondiente a los caudales puntuales, como en nuestro caso, donde se asignó a la escuela.
- Es importante destacar que:
 - Cada nodo final, ya sea en la tubería principal o en los ramales secundarios, debe tener una demanda asignada.
 - El programa ajusta automáticamente cualquier valor de caudal asignado menor a 0,10 l/s, en cumplimiento con la normativa técnica vigente (como lo establece la NB-689 para redes abiertas).

Este control automático asegura que la red cumpla con las condiciones mínimas de funcionamiento hidráulico, especialmente en ramales con pocas conexiones.

Ramal	Nodo	Número (*)	Q Puntual [lts/seg]
Ramal 9A			
	9A1	2	
	9A2		
	9A3		
	9A4		
	9A5		
	9A6		
	9A7		
	9A8		
	9A9		
	9A10		
	9A11	1	
	9A12	2	
Ramal 3A			
	3A1		
	3A2	1	
	3A3		
	3A4	2	

* Número de habitantes, o viviendas o familias por tramo para determinar el consumo.

Caudal mínimo por tramo: [lts/seg]

d) Edición y configuración masiva de los elementos

- AquasystemS PRO no cuenta con herramientas específicas para la edición manual de elementos como diámetros, materiales o longitudes de tuberías, ya que el propio programa se encarga de asignar automáticamente estos parámetros en función de la demanda y las condiciones hidráulicas del sistema. Es decir, el software sugiere los diámetros aproximados para cada tramo según los criterios normativos y el cálculo hidráulico realizado, por lo que no es necesario (ni posible en muchos casos) modificar directamente estos elementos. Esta automatización simplifica el proceso de diseño.

e) Análisis de Resultados Iniciales y Ajuste del Diseño (proceso de diseño iterativo)

- A diferencia del diseño de la aducción, en el caso de la red de distribución el siguiente paso consiste en generar la planilla de cálculo hidráulico, donde se pueden verificar los parámetros de diseño establecidos por la norma NB-689 utilizando los diámetros nominales sugeridos por el programa. Es en esta planilla donde se realiza la edición manual, tramo por tramo, ya que AquasystemS PRO no permite una edición directa desde la interfaz gráfica. En nuestro caso particular, para representar correctamente el tanque elevado, modificamos manualmente la profundidad de la tubería inicial del sistema: un valor negativo indica que el elemento está por encima del nivel del terreno. De esta forma, se puede simular la condición de tanque lleno para verificar la presión estática (-22 m), o el nivel mínimo operativo para validar las presiones dinámicas (-20,20 m).

f) Resultados.

I. Presión dinámica mínima (P.D. min.) y velocidades

- Para verificar la presión dinámica y las velocidades en la red, es necesario configurar manualmente en la planilla de cálculo hidráulico la altura mínima del tanque, que en nuestro caso corresponde a 20,20 m. Esta modificación permite analizar el comportamiento del sistema en condiciones críticas. Dado que AquasystemS PRO no ofrece herramientas estadísticas, gráficas o filtros para el análisis detallado de resultados, dicha planilla debe ser exportada a una hoja de cálculo en Excel, donde se puede realizar un análisis completo de los parámetros hidráulicos, como presiones,

velocidades y pérdidas de carga. Además, esta planilla presenta los resultados de manera separada para cada ramal y para la tubería principal, lo que facilita una revisión segmentada y más precisa del diseño hidráulico.

Tramo	Nodo Inicial	Nodo Final	Cota Terr. Inicial	Cota Terr. Final	Prof. Tub. Inicial	Prof. Tub. Final
Línea Prin...						
1	1	2	615.60	605.56	-20,20	0.80
2	2	3	605.56	604.60	0.80	0.80
3	3	4	604.60	604.73	0.80	0.80
4	4	5	604.73	605.64	0.80	0.80
5	5	6	605.64	604.59	0.80	0.80

II. Presión estática máxima

- Para la verificación de la presión estática máxima se sigue el mismo procedimiento que en el caso de la presión dinámica; sin embargo, en este caso se debe modificar manualmente en la planilla de cálculo hidráulico el valor inicial correspondiente al nivel del tanque lleno, que en nuestro caso es de 22 m. Esta configuración permite evaluar las condiciones del sistema en reposo, es decir, cuando no hay consumo y la presión alcanza su valor máximo. Al igual que en el caso anterior, esta planilla debe ser exportada a Excel para realizar un análisis detallado de los parámetros hidráulicos bajo esta condición.

Modelo Hidráulico de la Distribución											
Tramo	Nodo Inicial	Nodo Final	Cota Terr. Inicial	Cota Terr. Final	Prof. Tub. Inicial	Prof. Tub. Final	Desnivel del Tramo	Desnivel Acumulad	Longitud Tramo	Longitud Acumulad	
			Inicial	Final	Inicial	Final		fnte1	fnte1	fnte1	
Línea Prin...											
1	1	2	615.60	605.56	-22	0.80	32.84	32.84	61.16	0+061.16	
2	2	3	605.56	604.60	0.80	0.80	0.97	33.80	15.85	0+077.00	
3	3	4	604.60	604.73	0.80	0.80	-0.13	33.67	33.34	0+110.35	
4	4	5	604.73	605.64	0.80	0.80	-0.91	32.76	33.23	0+143.58	

- Con fines de síntesis, se exponen las tablas con los resultados derivados del análisis de la red de distribución a continuación.

Tabla 4.3.13: Resultados de La tubería principal de la red (AquasystemS PRO).

Parámetro.	Darcy-Weisbach.
Presión Dinámica mínima Demanda caudal máximo horario.	15,76 m.c.a.
Presión estática máxima.	54,75 m.c.a.
Velocidad mínima.	0,29 m/s.
Velocidad máxima.	0,87 m/s.
Tubería.	PVC; C-9; e =2,50mm; DN=2,00 pulg; L = 525,59 m.
	PVC; C-12; e =2,50mm; DN=1,50 pulg; L = 456,85 m.
	PVC; C-15; e =2,20mm; DN=1,00 pulg; L = 271,68 m.
Pérdida de carga unitaria mínima.	0,0056 m/m.
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0484 m/m.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3.14: Resultados Ramal N° 1 (AquasystemS PRO).

Parámetro.	Darcy Weisbach.
Presión Dinámica mínima Demanda caudal máximo horario.	25,62 m.c. a.
Presión estática máxima.	34,89 m.c.a.
Velocidad mínima.	0,55 m/s.
Velocidad máxima.	0,69 m/s.
Tubería.	PVC; C-15; e =1,90mm; DN=0,75 pulg; L= 112,31 m.
Pérdida de carga unitaria mínima.	0,0337 m/m.
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0507 m/m.

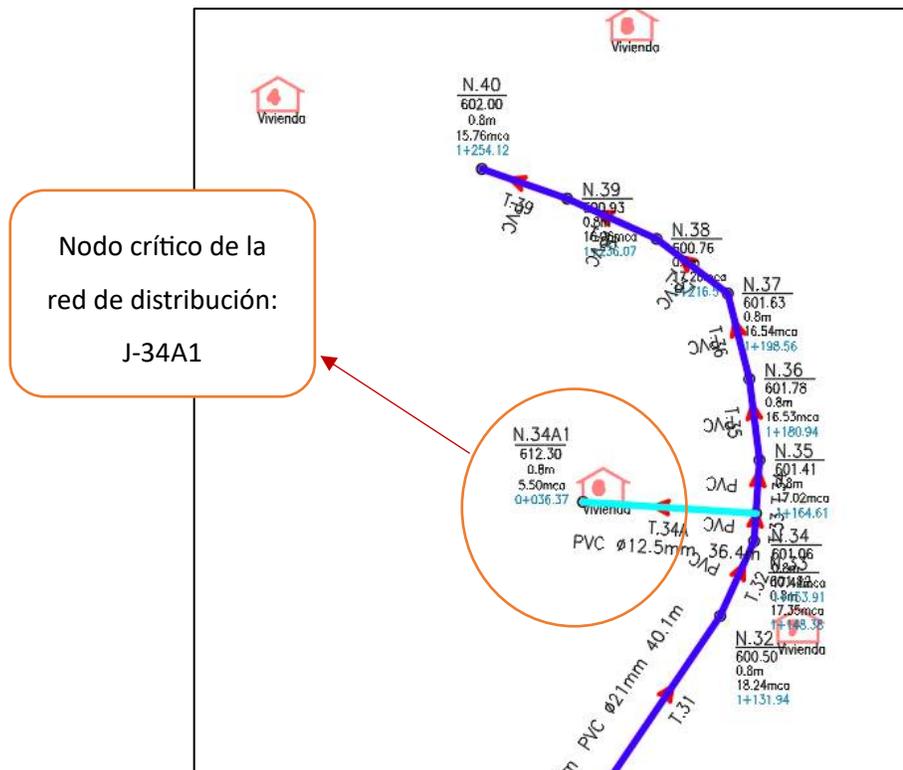
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3.15: Resultados Ramal N° 2 (AquasystemS PRO).

Parámetro.	Darcy Weisbach.
Presión Dinámica mínima Demanda caudal máximo horario.	19,99 m.c.a.
Presión estática máxima.	51,61 m.c.a.
Velocidad mínima.	0,36 m/s.
Velocidad máxima.	0,69 m/s.
Tubería.	PVC; C-15; e =1,90mm; DN=0,75 pulg; L=322,47 m..
	PVC; C-15; e =2,20mm; DN=1,00 pulg; L=213,34 m.
Pérdida de carga unitaria mínima.	0,0110 m/m.
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0505 m/m.

Fuente: Elaboración propia.

- Se resalta que el punto crítico del sistema corresponde al **nodo 34A1** (coordenadas: X=449694,217; Y=7590661,174), donde se registra la presión dinámica mínima de todo el sistema: **5,50 m.c.a.**



CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

La selección de un software adecuado para el modelado y diseño de redes de agua es crucial para ingenieros y proyectistas. Esta decisión impacta directamente la eficiencia, precisión y confiabilidad de los proyectos hidráulicos. Con una variedad de herramientas disponibles en el mercado, cada una con sus propias fortalezas y debilidades, es fundamental contar con una comparación detallada que facilite una elección informada.

Para abordar esta necesidad, hemos elaborado tres matrices comparativas exhaustivas. La primera se centra en los criterios generales de configuración, construcción y operación del modelo, ofreciendo una visión de la usabilidad, flexibilidad y capacidad de integración de cada software. La segunda y tercera matriz, más centradas y especializadas, profundiza en los criterios específicos de análisis de resultados y comprobación normativa en la simulación de aducciones y redes de distribución, vitales para asegurar que los diseños cumplan con los estándares técnicos y reglamentarios, con la Norma Boliviana NB-689.

Las matrices evalúan tres softwares: WaterCAD, EPANET y AquasystemS PRO, proporcionando una descripción detallada de sus funcionalidades y una evaluación para cada criterio, permitiendo una comparación rápida y objetiva.

5.1. Análisis de manejo y Operación

Esta matriz se enfoca en los aspectos fundamentales y operativos de cada software de modelado hidráulico, evaluando su facilidad de uso para la configuración inicial, la construcción de la topología de la red, la gestión de elementos hidráulicos básicos y avanzados, y su capacidad de adaptación a diferentes escenarios. Además, considera la flexibilidad para el rediseño, la escalabilidad para proyectos de diversa envergadura, y la interoperabilidad con otras herramientas cruciales como GIS y CAD. También se analiza el soporte técnico, los recursos de aprendizaje y la aplicabilidad general para proyectos complejos. Esta sección es clave para entender la capacidad del software para manejar la estructura y la dinámica general de una red de distribución de agua.

Tabla 5.1.1: Matriz comparativa de Manejo de Softwares.

Criterio	WaterCAD	EPANET	AquasystemS PRO
Configuración inicial del modelo	Entorno gráfico amigable con asistentes y plantillas. Permite seleccionar unidades de diseño (métrico, imperial), métodos de fricción (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, Manning), configurar múltiples escenarios (demanda, operación, fallas), definir patrones horarios de demanda y operación de elementos, y establecer condiciones iniciales para simulaciones de período extendido. Integración completa de todos los parámetros en un solo archivo.	Interfaz simple y de código abierto. Permite seleccionar unidades de trabajo y el método de cálculo (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, Manning). Carece de un gestor de escenarios integrado, lo que requiere crear archivos duplicados o modificarlos manualmente para cada caso de estudio. No admite diagramas o esquemas gráficos complejos.	Solo admite el método de Darcy-Weisbach para cálculos de fricción. La configuración de los parámetros hidráulicos y del sistema se realiza de forma manual y fragmentada, utilizando interfaces de AutoCAD para la topología y hojas de cálculo en Excel para los datos. No tiene capacidad nativa para modelar sistemas de bombeo, enfocándose principalmente en la gravedad.
Construcción topológica	Trazado gráfico directo e intuitivo. Ofrece herramientas de auto-snap y validación automática de la conectividad y consistencia topológica, identificando y permitiendo la corrección de errores (nodos flotantes, tuberías duplicadas). Permite importar de diversas fuentes GIS (Shapefiles) y CAD (DXF, DWG), definir altitudes, tramos, y estructuras específicas como tanques, válvulas y reasignar nodos con facilidad. Incluye topología de sistemas a bombeo y gravedad.	Construcción manual de la red nodo por nodo y tubería por tubería. Puede agilizarse mediante importación desde EpaCAD o a través de hojas de Excel programadas con macros. Sin embargo, la validación de la topología no es automática en la interfaz principal; debe verificarse visualmente o mediante exportación de datos y análisis externo.	El trazado se realiza mediante líneas guía y polígonos dentro de AutoCAD. Reconoce automáticamente elementos como nodos, tramos de tubería, bocas de visita (BM) y conexiones. La topología se define por intersección de capas de AutoCAD y requiere una codificación y manejo específico en tablas externas de Excel para su interpretación por el software su validación es estructurada.
Elementos hidráulicos modelables	Soporta un amplio rango de elementos hidráulicos, incluyendo bombas (con modelado de curva real o definida por puntos), tanques	Permite modelar elementos esenciales como bombas, tanques, válvulas de control, fuentes (depósitos), nudos y tramos. Soporta la	Principalmente se enfoca en sistemas de gravedad. No modela bombas ni pozos. Solo admite aducciones de caudal por gravedad o aportes

	(elevados, enterrados, con control de nivel), válvulas de control (reductoras/sostenedoras de presión, check, limitadoras de caudal), hidrantes, fuentes (depósitos), emisores, pozos y medidores de cliente (Customer Meter).	implementación de controles lógicos básicos para la operación de bombas y válvulas, pero carece de un modelado gráfico avanzado o de elementos complejos como los medidores de cliente.	externos definidos. Su representación se limita a nodos y tramos de tuberías.
Jerarquización y ramales	Utiliza "Selection Sets" y propiedades personalizadas para una división flexible y lógica de la red en sectores, troncales y ramales. Esta funcionalidad es crucial para la simulación sectorial, análisis de sectorización y gestión de la red.	No posee una herramienta de jerarquización automática. El usuario debe definir y agrupar manualmente los elementos de la red (principales, secundarias, etc.) mediante el uso de hojas de cálculo o funciones de filtrado, lo que puede ser laborioso en redes grandes.	Los ramales se definen implícitamente por el trazado en CAD. El software asigna códigos por intersección de líneas y conexiones. Puede identificar automáticamente tramos secundarios y principales basándose en la configuración de la topología y los parámetros definidos en Excel.
Asignación de demandas	Permite una asignación flexible de demandas, ya sea manual nodo por nodo o de forma automática y masiva mediante la herramienta LoadBuilder , que integra datos de usuarios (tipos, número de habitantes) con patrones horarios. También permite definir dotaciones por tipo de usuario o área de servicio.	La asignación de demandas es fundamentalmente manual, nodo por nodo. Aunque permite la vinculación con datos externos de Excel, el proceso de carga masiva gráfica no es tan intuitivo. No tiene funcionalidades avanzadas para la asignación de demandas por tipos de usuario.	Realiza el cálculo automático de demandas basándose en datos de población, índice de crecimiento poblacional y dotación según la normativa NB-689. asignación manual por el usuario desde puntos codificados. Define la demanda por cantidad de viviendas y tipo de usuario, calculando el caudal total por nodo y distribuyendo siguiendo con la NB-689.
Conexiones domiciliarias	Las conexiones domiciliarias pueden ser representadas de forma explícita mediante nodos con demanda específica o a través de elementos de medición (Customer Meter), que pueden asociarse automáticamente a la red. Esto permite un control específico del consumo.	Cada conexión domiciliar se representa como un nodo independiente en el modelo. No existe un elemento gráfico o lógico específico para acometidas, lo que puede resultar en modelos muy densos para redes grandes. Requiere un modelado individual de cada punto de consumo.	Las conexiones domiciliarias pueden representarse como un ramal. Ya que el programa lo interpreta como uno y caudal circulante en un ramal puede ajustarse manualmente para incluir la contribución de una conexión, Permite correcciones al caudal mínimo de diseño de 0,10 l/s.

<p>Correcciones caudales < 0,10 l/s</p>	<p>Ofrece herramientas para verificar y analizar caudales bajos, como el análisis de Fire Flow (flujo contra incendios), Demandas dependientes de la presión y la capacidad de filtrar y visualizar nodos o tuberías con caudales inferiores a un umbral definido en tablas hidráulicas. El ajuste final de diseño es manual y responsabilidad del proyectista.</p>	<p>No incluye funcionalidades automáticas para la detección o corrección de caudales bajos. El usuario debe revisar manualmente cada nodo o tubería para identificar estas situaciones y, si es necesario, redefinir las demandas o modificar el diseño.</p>	<p>Realiza un ajuste automático de los caudales según lo estipulado por la normativa NB-689 para caudales mínimos. Todos los ramales que presenten caudales inferiores a 0,10 l/s son corregidos automáticamente y se reportan detalladamente en la hoja técnica generada por el software.</p>
<p>Modificación de caudales y parámetros</p>	<p>Editable desde tablas hidráulicas o interfaz gráfica. Los cambios se aplican en tiempo real, con filtros, cálculo de impacto y actualización de resultados.</p>	<p>Se modifican uno a uno o en grupos mediante código. No hay visualización inmediata del efecto en la red.</p>	<p>Caudales de aducción no se pueden modificar si se requiere bombeo. Las modificaciones en nodos deben hacerse en Excel y regenerar toda la red. No simula ni acepta caudales de bombeo.</p>
<p>Flexibilidad para rediseño</p>	<p>Alta flexibilidad. Permite modificar fácilmente trazados de tuberías, nodos, propiedades hidráulicas de los elementos, y configurar múltiples escenarios (demandas futuras, expansiones) sin necesidad de rehacer el modelo base. Se pueden guardar y gestionar versiones de prueba o alternativas de diseño.</p>	<p>Media. Es posible realizar cambios en el modelo, pero la ausencia de un gestor de escenarios integrado complica la comparación de alternativas. Requiere duplicar el archivo principal para cada variación de diseño que se desee probar, lo que puede generar muchos archivos.</p>	<p>Baja. Si se requiere cambiar significativamente el trazado de la red o parámetros clave (como elevaciones, caudales o trazados de la red), es necesario editar directamente en AutoCAD o en las plantillas de Excel, y posteriormente reconstruir el modelo en AquasystemS. Carece de un manejo de escenarios o versiones dentro del propio software.</p>
<p>Análisis de Escenarios con Demandas Dependientes de Presión (PDD)</p>	<p>WaterCAD es capaz de simular escenarios donde la demanda de agua en un nodo no es fija, sino que depende de la presión disponible en ese punto (Pressure Dependent Demands - PDD). Esto es crucial para simular condiciones de baja presión donde el suministro se restringe, permitiendo analizar el</p>	<p>EPANET, de forma nativa, no puede hacer una simulación completa con demandas dependientes de la presión (PDD, <i>Pressure-Dependent Demand</i>), ya que el motor hidráulico original de EPANET trabaja bajo el supuesto de demanda fija (<i>Demand Driven Analysis, DDA</i>). Es decir, el programa intenta satisfacer la</p>	<p>AquasystemS PRO no tiene la capacidad de modelar demandas dependientes de presión. Las demandas se asumen como fijas para el cálculo hidráulico, lo que limita su utilidad en escenarios de restricción de suministro o baja presión donde el caudal entregado a los usuarios se ve afectado.</p>

	funcionamiento de ciertos sectores mientras otros estén parcial o totalmente cerrados por falta de presión	demanda especificada en cada nodo, sin importar la presión disponible	
Integración con SCADA	WaterCAD permite una integración avanzada con sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) para la importación de datos en tiempo real (presiones, caudales, niveles) y calibración del modelo, así como para la simulación operativa y la toma de decisiones. Es posible exportar datos SCADA para análisis o monitoreo.	EPANET (clásico), por sí solo, no tiene integración directa con sistemas SCADA, ya que fue diseñado principalmente como una herramienta de simulación hidráulica <i>offline</i> , no en tiempo real. Sin embargo, sí es posible integrar EPANET con SCADA mediante herramientas intermedias, adaptaciones personalizadas.	AquasystemS PRO no ofrece funcionalidades de integración con sistemas SCADA. Está diseñado para análisis de diseño y planificación, no para la operación en tiempo real o el monitoreo de sistemas.
Escalabilidad	Excelente para la modelación de redes de gran envergadura (miles de nodos y kilómetros de tuberías). Soporta el trabajo por zonas o sectores, lo que permite un análisis más eficiente de modelos complejos. Genera reportes masivos y facilita la comparación entre diferentes escenarios de diseño.	Escalable en cuanto a la cantidad de elementos que puede manejar. Sin embargo, carece de herramientas avanzadas para dividir o analizar sectores automáticamente en grandes modelos. El rendimiento y la eficiencia en modelos muy grandes dependen en gran medida de la experiencia y perspicacia del modelador para optimizar la estructura de datos.	Limitado por las capacidades de AutoCAD, especialmente en modelos con un gran número de conexiones. El rendimiento del software puede volverse lento y poco manejable. No incluye funcionalidades para el manejo de escenarios ni herramientas para el control de sectorización o zonificación.
Interoperabilidad	Alta interoperabilidad. Es compatible con diversos softwares CAD AutoCAD Civil 3D), sistemas GIS (ESRI ArcGIS), SCADA y otros formatos de datos. Permite la importación y exportación de datos en formatos estándares de la industria como INP (EPANET), CSV, DXF, entre otros.	Media Compatible con archivos INP (formato nativo de EPANET) y hojas de cálculo Excel. Se integra con otras herramientas mediante el uso de scripts personalizados o macros, lo que requiere habilidades de programación.	Cerrado. Funciona exclusivamente dentro del entorno de AutoCAD (versiones 2015/2016). Permite importar datos desde Excel para la configuración, pero no tiene la capacidad de exportar el modelo o los resultados a otros entornos hidráulicos o GIS.
Soporte técnico y recursos	Amplia disponibilidad de documentación oficial de Bentley (manuales, guías), tutoriales en video, foros de usuarios	Gratuito y de código abierto. Cuenta con una amplia y activa comunidad de usuarios en foros online. Dispone de guías y documentación	Carece de soporte oficial público. Su uso requiere una llave USB (dongle) para la licencia. La documentación es escasa (no hay manuales

	<p>activos y soporte técnico directo de Bentley. Ofrece actualizaciones frecuentes del software. Las licencias pueden ser perpetuas o por suscripción, con acceso a recursos y ejemplos.</p>	<p>proporcionada por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.), así como numerosos ejemplos y recursos educativos creados por la comunidad. No ofrece soporte técnico formal directo.</p>	<p>detallados ni una comunidad activa en línea). El aprendizaje y el uso del software dependen en gran medida de capacitación directa o de la experiencia previa del usuario con el software AutoCAD y el conocimiento de la hidráulica aplicada.</p>
<p>Curva de Aprendizaje</p>	<p>Facilidad de Interfaz: Media-Alta (Interfaz profesional con muchas. Disponibilidad de Tutoriales: Alta (Muchos recursos de Bentley y comunidad). Tiempo Estimado: Media-Alta (3 a 5 semanas para funcionalidades avanzadas). Requiere una capacitación estructurada para dominar completamente los escenarios, resultados y edición avanzada</p>	<p>Facilidad de Interfaz: Alta (Interfaz simple y limpia). Disponibilidad de Tutoriales: Alta (Abundantes recursos de la EPA y comunidad). Tiempo Estimado: Medio (2 a 3 semanas). Es considerado intuitivo y de fácil comprensión, ideal para estudiantes o usuarios principiantes en modelado hidráulico o para proyectos de menor complejidad.</p>	<p>Facilidad de Interfaz: Alta (Dependencia de AutoCAD y Excel). Disponibilidad de Tutoriales: Muy Baja (Casi inexistentes o privados). Tiempo Estimado: Alto (1 mes o más). Exige conocimientos sólidos en AutoCAD para el trazado, manejo avanzado de plantillas de Excel para la entrada de datos, y por, sobre todo, un profundo conocimiento de hidráulica aplicada a diseño de conducciones a presión bajo la NB-689. No cuenta con guías o materiales de autoaprendizaje públicos que permitan un dominio autónomo del software.</p>
<p>Soporte de NB-689.</p>	<p>No tiene soporte nativo para la normativa específica de Bolivia (NB-689) pero es adaptable mediante la entrada manual de parámetros y la configuración de escenarios.</p>	<p>No tiene soporte para la normativa específica, pero es un motor de cálculo que puede ser adaptado a requisitos normativos con entrada manual de datos y comprobación de resultados.</p>	<p>Alto (Integración explícita con la NB-689 para cálculo de demandas y correcciones de caudal mínimo). Su diseño está exclusiva y fuertemente influenciado por esta normativa boliviana.</p>

Fuente: Elaboración propia.

- WaterCAD se posiciona como la herramienta de mayor nivel profesional, caracterizada por un ecosistema de diseño integrado que incorpora herramientas avanzadas (entendidas estas como el conjunto de funcionalidades que van más allá del cálculo hidráulico básico) y por una versatilidad notable. Su eficiencia radica en

la centralización de todos los parámetros en un único archivo y en la automatización de procesos complejos mediante asistentes y validación topológica en tiempo real. Su principal fortaleza, sin embargo, es su robusto gestor de escenarios y su capacidad nativa para realizar análisis dinámicos avanzados (EPS y PDD), lo que le otorga una alta flexibilidad para el rediseño y la simulación de condiciones operativas complejas. Precisamente en un sistema como el de Chirimoyal, que incluye bombeo y almacenamiento, su capacidad de Simulación en Período Extendido (EPS) resultó ser indispensable y no un lujo, para analizar correctamente la dinámica del bombeo, el tiempo de llenado y la autonomía del tanque, aspectos críticos que un análisis estático simple no puede capturar.

- En contraste, EPANET representa el estándar de accesibilidad y simplicidad, ideal para el aprendizaje de fundamentos de modelación hidráulicos. Su trabajabilidad en proyectos de mayor escala se ve mermada por la carencia de herramientas integradas para la gestión de datos. La falta de un gestor de escenarios obliga a una administración manual de archivos duplicados y, a menudo, depende de herramientas externas, como EpaCAD o macros en Excel, para la carga de datos y análisis detallados, lo que fragmenta el flujo de trabajo. No obstante, es importante señalar que para la escala de un proyecto rural como Chirimoyal, estas limitaciones son manejables y su simplicidad, junto a la inexistencia de costos de licencia, lo convierten en una alternativa viable y funcional.
- En el extremo opuesto, AquasystemS PRO presenta el paradigma más rígido y especializado. Su flujo de trabajo, dependiente de un ecosistema cerrado basado en AutoCAD y Excel, así como su enfoque en el análisis estático y en sistemas por gravedad, limitan drásticamente su versatilidad para sistemas más complejos. No obstante, es precisamente en el contexto de sistemas rurales de baja a mediana complejidad donde estas limitaciones resultan menos críticas y sus fortalezas se ven amplificadas. Su principal ventaja competitiva es su alineamiento normativo explícito con la NB-689, lo que agiliza enormemente la preparación de proyectos para su aprobación en entidades públicas bolivianas. Además, su capacidad para realizar el diseño de manera integral generando no solo el cálculo hidráulico, sino también los

planos, perfiles y cómputos métricos finales directamente en formato CAD representa un ahorro de tiempo significativo en proyectos de esta escala.

5.2. Análisis de resultados de simulación de Aducción

La segunda matriz se adentra en el análisis hidráulico de la aducción, detallando cómo cada software maneja la verificación y presentación de resultados críticos, así como su capacidad para comprobar el diseño según nuestra normativa. Se evalúan aspectos fundamentales como el cálculo de alturas de bombeo, los tiempos de llenado de tanques, las velocidades, presiones dinámicas en la aducción, las pérdidas de carga unitarias y el cómputo métrico de tuberías.

Tabla 5.2.1: Matriz comparativa de Resultados de simulación de Aducción.

criterio	WaterCAD	EPANET	AquasystemS PRO
Altura de bombeo	Alta precisión y automatización (System Head Curve). Calcula la altura de bombeo requerida y el punto de operación óptimo de la bomba al superponer automáticamente la curva de la bomba (definida por el usuario) con la curva del sistema. Muestra gráficamente y analíticamente el punto de intersección y permite validar la eficiencia hidráulica.	Requiere cálculo manual o externo. No genera automáticamente la curva del sistema. El usuario debe realizar cálculos manuales con Excel para determinar la altura de bombeo y el punto de operación, o bien, iterar en EPANET ajustando la altura de bombeo hasta converger con el caudal de bombeo.	Estimación visual y manual. La altura de bombeo se estima gráficamente desde el perfil hidráulico, sumada a la profundidad de instalación de la bomba. No cuenta con una herramienta automatizada ni curvas de sistema o bomba para el cálculo del punto de operación. Se basa en la lectura visual del gradiente hidráulico desde el plano presentado en AutoCAD y el conocimiento del proyectista.
Tiempo de llenado del tanque	Simulado mediante análisis de régimen extendido (Extended Period Simulation). Muestra la evolución del nivel del tanque y calcula el tiempo requerido para alcanzar niveles deseados.	Puede estimarse configurando condiciones iniciales y simulación extendida . Requiere análisis manual y visual del volumen y caudal entrante.	No se simula directamente. El usuario debe calcularlo aparte en Excel, usando volumen útil del tanque y el caudal de diseño. No hay visualización progresiva ni registro automático.
Velocidades del flujo	Comprobación avanzada a la normativa configurable. Ofrece una visualización dinámica y clara de las velocidades de flujo mediante códigos de colores en el plano de la aducción. Permite análisis de tramos críticos y validación visual o mediante filtros con los rangos permitidos por la norma (NB-689: 0,3–2,0 m/s). Incluye estadísticas detalladas en tablas flexibles (FlexTables) para un análisis numérico.	Listado numérico con visualización básica. El software muestra las velocidades de flujo en un listado numérico por tramo dentro de las tablas de resultados. La visualización es básica, permitiendo observar un solo parámetro a la vez mediante un sistema de códigos de colores. El análisis de cumplimiento normativo y la identificación de valores	Comprobación automática y advertencias visuales. Los valores de velocidad se reportan en la hoja de cálculo hidráulico por tramo. Se comparan automáticamente con los parámetros normativos (NB-689), emitiendo advertencias visuales (valores en rojo) cuando sobrepasan los límites permitidos. La codificación visual en leyendas en el plano de AutoCAD facilita el análisis rápido.

		críticos deben realizarse manualmente. Para obtener estadísticas más completas, los datos pueden exportarse a una hoja de cálculo donde se facilita su análisis y evaluación detallada.	
Presiones dinámicas en nodos	Monitoreo detallado y escenarios críticos. Reportadas gráficamente y por tabla. Permite simular condiciones críticas como tanque lleno o cambios de caudal. Compatible con los límites de presión dinámica establecidos en NB-689.	Identificación manual de momentos críticos. Requiere identificar manualmente el momento de menor presión. Los valores deben exportarse y analizarse fuera del software.	Representación gráfica limitada. La simulación de presión dinámica se enfoca en el nivel del tanque como referencia. Los resultados de presión en nodos se reportan gráficamente en perfiles y en la planilla de cálculo hidráulico, donde la validación de cumplimiento normativo (presiones mínimas) es similar a la de velocidades (con advertencias visuales).
Pérdida de carga unitaria (m/m)	Cálculo y visualización integral. Calculada y visualizada por tramo. Se incluye en tablas técnicas y se muestra en planos con codificación visual. Ayuda a detectar sobredimensionamiento o fricción excesiva.	Listado básico con tratamiento externo. Listado básico por tramo. Se requiere tratamiento externo para evaluar cumplimiento con valores recomendados.	Reporte en planilla y base para diseño. Reportada por tramo en la planilla hidráulica generada por el software. Es una base importante para la propuesta automática de diámetros que realiza AquasystemS PRO. No visible gráficamente.
Cantidad de tuberías por diámetro	Cómputo automático y detallado. Genera un cómputo métrico detallado y automático por tipo de tubería, diámetro y material. Los datos son fácilmente exportables y se clasifican automáticamente en informes y tablas.	Requiere exportación y procesamiento manual. No ofrece una agrupación automática por diámetro o material en su interfaz. Se requiere exportar la base de datos de tuberías y luego filtrar y agrupar manualmente por diámetro y material utilizando herramientas externas como Excel.	Listado automatizado desde base de datos. Ofrece un listado automatizado con la longitud total de tuberías por cada diámetro utilizado en el proyecto. Este listado está vinculado directamente a la base de datos técnica generada en la planilla de cálculo hidráulico, permitiendo su exportación y análisis en Excel.
Comprobación NB-689	Comprobación visual y herramientas de filtro. Realiza validaciones mediante visualización gráfica (código de colores) y herramientas de filtro para criterios clave de la norma NB-689 (presión dinámica mínima >2 m.c.a., velocidades entre 0,3–2,0 m/s, y el dimensionamiento de tuberías). Incluye alertas gráficas que señalan incumplimientos. La interpretación final para el diseño recae en el proyectista.	Comprobación parcial, manual y externa. La validación de los requisitos de la NB-689 es parcial y predominantemente manual. El usuario debe revisar los valores resultantes en las tablas y contrastarlos con los requisitos de la norma utilizando hojas de cálculo externas o su propio conocimiento de la normativa.	Comprobación automática y estructurada. Ofrece una comprobación estructurada y automática de todos los criterios principales de la norma NB-689. Está diseñado específicamente para asegurar el cumplimiento con esta normativa boliviana, reportando advertencias explícitas sobre cualquier incumplimiento.

Fuente: Elaboración propia.

- En el diseño de la aducción por bombeo, la diferencia fundamental entre los softwares no radica en el cálculo del régimen estático, sino en la capacidad de análisis y la profundidad de las herramientas para el diseño y selección de componentes críticos, como el equipo de bombeo. WaterCAD demuestra una capacidad técnica superior al automatizar la determinación del punto de operación mediante su herramienta “System Head Curve”. Esta funcionalidad, que superpone la curva de la bomba con la del sistema, es crucial para una selección de equipos eficiente y la optimización de costos operativos a largo plazo. En cambio, EPANET exige un proceso manual e iterativo, donde el proyectista debe calcular la curva del sistema externamente o ajustar la altura de bombeo hasta converger con el caudal deseado, un método más laborioso. AquasystemS PRO se posiciona en el extremo más básico, dependiendo de una estimación visual a partir del perfil hidráulico, lo que representa un riesgo técnico en diseños que requieren precisión analítica.
- Un segundo diferenciador clave es la capacidad para simular el comportamiento operativo dinámico del sistema. La simulación en período extendido (EPS) es vital para comprender la operativa real, como el tiempo de llenado de un tanque. Tanto WaterCAD como EPANET son capaces de modelar este proceso, pero WaterCAD ofrece una visualización más directa y herramientas de análisis que muestran claramente la evolución del nivel. AquasystemS PRO, por su parte, carece por completo de esta capacidad, obligando a que el tiempo de llenado sea un cálculo externo y privando al diseñador de una visión integral de la interacción entre la bomba, la aducción y el tanque.
- Finalmente, en lo que respecta a la verificación de parámetros normativos y la generación de reportes, cada plataforma ofrece un nivel de automatización distinto. AquasystemS PRO destaca por su comprobación automática y estructurada de la NB-689, señalando explícitamente los incumplimientos de velocidad o presión con advertencias visuales. WaterCAD, si bien no automatiza una norma específica, ofrece un enfoque más flexible a través de herramientas de visualización avanzada (códigos de colores), filtros y tablas detalladas (FlexTables), permitiendo al proyectista verificar cualquier parámetro de forma rigurosa. Adicionalmente, su cómputo métrico es automático y clasificado, a diferencia de EPANET, que queda rezagado al requerir

un procesamiento manual y externo tanto para la comprobación normativa como para la cuantificación de materiales.

5.3. Análisis de resultados de la Red de Distribución

La siguiente matriz profundiza en la capacidad de cada software para el análisis y la presentación de resultados hidráulicos, evaluando su robustez para la comprobación de diseños frente a la NB-689. Se analizan criterios cruciales como la determinación de presiones dinámicas mínimas y estáticas máximas, la verificación de velocidades de flujo, la cuantificación de pérdidas de carga y la generación de cómputos métricos. Un aspecto central es el manejo de caudales mínimos en ramales y el cumplimiento integral con la Norma Boliviana, factores de suma importancia para la aprobación y ejecución de proyectos en el contexto nacional.

Tabla 5.3.1: Matriz comparativa Red de Distribución.

Criterio	WaterCAD	EPANET	AquasystemS PRO
Presión dinámica mínima de servicio.	Simulación extendida con análisis directo. Permite simular la red en análisis de periodo extendido (EPS) con el nivel mínimo del tanque o en las condiciones más desfavorables. Ofrece visualización directa e inmediata de los nodos con menor presión tanto en tablas de resultados (FlexTables) como en el plano de la red mediante simbología. Facilita la validación visual y tabular del cumplimiento con normativas como la NB-689 (>5 m.c.a.).	Identificación manual y exportación. Para encontrar la presión dinámica mínima, el usuario debe configurar una condición crítica (ej. hora de máxima demanda) y luego exportar los resultados para identificar y filtrar manualmente los valores de presión más bajos fuera del software. No hay una herramienta de detección automática o visualización de "puntos críticos de presión mínima".	Comprobación automática con advertencias. El nivel del tanque se ajusta manualmente en la planilla de cálculo hidráulico para simular condiciones de presión mínima. El software calcula y muestra la presión en cada nodo. Realiza una verificación automática y lanza advertencias explícitas (valores en rojo) si algún nodo no cumple con la presión mínima exigida por la NB-689. Sin embargo, carece de herramientas para filtrar u ordenar fácilmente los resultados dentro de la interfaz.
Presión estática máxima	Simulación y detección automática visual o numérica. Permite simular la condición de presión estática máxima (típicamente con el tanque lleno y demanda cero). El	Configuración manual y análisis externo. Para obtener la presión estática máxima, el usuario debe configurar un patrón de demanda nula y ejecutar la simulación. Los	Comprobación automática. El usuario define la cota máxima del tanque. El software calcula la presión estática para cada nodo en la planilla de cálculo

	<p>valor máximo de presión en cualquier nodo es identificado automáticamente y se muestra claramente en tablas de estadísticas y en el plano de la red. Es compatible con los límites de presión máxima establecidos en normativas como la NB-689 (70 m.c.a.).</p>	<p>resultados deben ser exportados y analizados externamente (Excel, para mejor manejo) para identificar el valor máximo y compararlo con la normativa.</p>	<p>hidráulico, donde se realiza una comprobación automatizada contra los límites establecidos por la NB-689, alertando sobre cualquier excedencia.</p>
<p>Velocidad mínima y máxima</p>	<p>Visualización interactiva y adaptable a la normativa. Ofrece una codificación de colores intuitiva en el plano de la red para identificar rápidamente los tramos de tubería que están por debajo o por encima de los límites de velocidad mínimos y máximos establecidos por las normativas (NB-689: 0,3–2,0 m/s). Permite la visualización y filtrado inmediato de estos tramos para un análisis rápido y eficiente.</p>	<p>Herramienta gráfica básica con exportación. Cuenta con una herramienta gráfica sencilla para visualizar las velocidades. Sin embargo, para una comprobación detallada y un análisis comparativo contra rangos normativos, los datos de velocidad deben exportarse a una hoja de cálculo (Excel) y ser comprobados posteriormente de forma manual.</p>	<p>Reporte detallado y alertas visuales. La visualización de las velocidades se realiza directamente en la hoja de cálculo por tramo. El software destaca automáticamente las velocidades que no cumplen con los criterios normativos. Adicionalmente, se generan alertas automáticas en el entorno CAD, mostrando visualmente los tramos críticos y facilitando su identificación.</p>
<p>Cantidad de tuberías por ramales y diámetros.</p>	<p>Informes automáticos y clasificados. Genera informes automáticos y detallados que incluyen la cantidad y longitud total de los tramos de tubería por cada diámetro utilizado en la red y si se quiere más específico en ramales. Esta información es fácilmente exportable y clasificada automáticamente</p>	<p>Requiere filtrado manual de datos. No ofrece una funcionalidad de cómputo automático o agrupación por diámetro en su interfaz. Los datos de las tuberías deben exportarse desde la base de datos del modelo y luego ser filtrados y agrupados manualmente (Excel) para obtener las cantidades por diámetro.</p>	<p>Tabla exportable con clasificación inmediata. Ofrece una tabla exportable directamente a Excel con una clasificación inmediata y clara de las tuberías por diámetro, incluyendo la longitud total para cada uno. Los resultados son concisos, precisos y directamente utilizables para la elaboración de la memoria de cálculo</p>
<p>Verificación caudales Ramales < 0,10 l/s</p>	<p>Simulación de demanda mínima y filtros. Aunque no tiene una función específica de "ajuste automático de caudal mínimo", permite verificar esta condición. Mediante la herramienta Fire Flow (simulación de demanda mínima en</p>	<p>Revisión manual y ajuste individual. No hay herramienta dedicada. El proyectista debe revisar manualmente cada nodo y ajustar caudales individualmente.</p>	<p>Detección y ajuste automático normativo. Detecta automáticamente los caudales en los ramales que son inferiores al mínimo normativo (0,10 l/s) según la NB-689. Además de la detección, el software realiza ajustes</p>

	<p>nodos) o DDP se puede verificar la presión disponible. Además, los filtros avanzados permiten identificar fácilmente nodos y ramales con caudales críticos o por debajo de umbrales definidos, facilitando la identificación manual de tramos a ajustar.</p>		<p>automáticos en el cálculo para asegurar que estos ramales cumplan con la norma.</p>
<p>Cumplimiento NB-689 integral</p>	<p>Comprobación gráfica y tabular adaptable. Permite una comprobación directa e integral de múltiples criterios establecidos en la NB-689 (presión, velocidad, caudal, diámetro) mediante el entorno gráfico (codificación de colores, simbología) y la visualización tabular detallada. Aunque no tiene la norma incluida en su programación, su flexibilidad permite al proyectista configurar los parámetros y filtros para una verificación simultánea y eficiente de todos los requisitos.</p>	<p>Comprobación manual y externa. El cumplimiento con la NB-689 se logra principalmente mediante la interpretación visual parámetro por parámetro y el uso de hojas de cálculo externas para contrastar los resultados del modelo con los requisitos de la norma. El software no se adapta específicamente a la normativa boliviana de forma nativa.</p>	<p>Comprobación completa y automática (integral). Ofrece una comprobación completa y altamente automatizada de la mayoría de los criterios de la NB-689. Ajusta parámetros de cálculo (como caudales mínimos), propone diámetros según la norma y emite alertas claras y explícitas si se incumplen requisitos técnicos, facilitando un diseño conforme a la normativa boliviana.</p>

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de redes de distribución, la diferencia fundamental entre los softwares radica en la eficiencia y el enfoque para la verificación de los parámetros críticos de servicio, como presiones y velocidades.

- WaterCAD se posiciona como una plataforma de diagnóstico hidráulico integral. Mediante simulaciones de período extendido (EPS), permite identificar de forma proactiva y visual los puntos críticos de presión. A través de herramientas como la codificación por colores y las tablas dinámicas (FlexTables), el proyectista puede explorar interactivamente el comportamiento de la red, entendiendo no solo si se cumple con la norma, sino dónde y por qué ocurren las deficiencias. AquasystemS PRO, en cambio, opera como un auditor normativo automatizado. Su enfoque no es la exploración, sino la verificación. Realiza una comprobación automática de los

parámetros contra los umbrales de la NB-689 y emite advertencias explícitas si no se cumplen, acelerando la detección de incumplimientos a costa de flexibilidad analítica. Finalmente, EPANET exige un análisis manual y desarticulado, dependiendo de la exportación de datos a herramientas externas como Excel para poder filtrar, ordenar e identificar los valores fuera de la normativa.

- La divergencia de enfoques se hace aún más evidente al evaluar el manejo de requisitos normativos específicos, como la verificación del caudal mínimo en ramales ($< 0,10$ l/s) estipulada por la NB-689. Aquí, AquasystemS PRO muestra su especialización de manera contundente, ya que no solo detecta los tramos con caudal insuficiente, sino que realiza ajustes automáticos corrigiendo el valor del mismo asegurando el cumplimiento normativo. WaterCAD aborda el problema desde la flexibilidad, permitiendo al proyectista modelar y verificar esta condición de forma precisa utilizando herramientas de simulación avanzada como Fire Flow, lo que otorga un control sobre el escenario. EPANET, por su parte, carece de herramientas específicas para esta tarea, relegando la verificación a un proceso manual válido, pero poco eficiente, especialmente en redes de mayor tamaño.
- La eficiencia en la generación de entregables de proyecto, como reportes y cómputos métricos, constituye otro diferenciador clave. Tanto WaterCAD como AquasystemS PRO sobresalen al ofrecer informes automáticos y tablas exportables con las cantidades de tubería clasificadas por diámetro. Sin embargo, AquasystemS PRO presenta una ventaja única: su capacidad para generar planos técnicos finales, incluyendo perfiles longitudinales, planos en planta y cómputo métrico de excavación de zanjas, directamente en el entorno CAD. Esta integración agiliza notablemente la producción de la documentación del proyecto, una etapa que en los otros softwares es un proceso de post-procesamiento completamente separado.

5.4. Análisis numérico de resultados modelación aducción

La siguiente tabla resume los principales resultados numéricos obtenidos en la simulación del sistema de aducción de Chirimoyal, utilizando tres programas de modelado hidráulico: WaterCAD, EPANET y AquasystemS PRO. Para asegurar una comparación directa y objetiva, en cada software se empleó el mismo conjunto de datos de entrada (topografía,

caudales), lo que permite contrastar de manera precisa las magnitudes de los parámetros hidráulicos más relevantes.

Este análisis de los resultados numéricos es fundamental para validar la consistencia entre los modelos, detectar posibles variaciones en los cálculos y evaluar el grado de precisión, así como las particularidades que cada herramienta presenta en el diseño y análisis de sistemas de aducción.

Tabla 5.4.1: Comparación de resultados Aducción.

Parámetro.	WaterCAD.	EPANET.	AquasystemS PRO.
Caudal.	2,00 l/s.	2,00 l/s.	2,00 l/s.
Velocidad.	0,57 m/s.	0,57 m/s.	0,57 m/s.
Presión máxima dinámica.	84,26 m.c.a.	83,85 m.c.a.	83,84 m.c.a.
Presión mínima dinámica.	24,15 m.c.a.	24,15 m.c.a.	24,72 m.c.a.
Pérdida de carga unitaria.	0,0054 m/m.	0,0054 m/m.	0,0056 m/m.
Altura de bombeo.	169,30 m.	168,95 m.	168,84 m.
Tiempo llenado tanque.	230,05 min	230,00 min.	-

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la Tabla 5.4.1 confirma una alta consistencia en los resultados numéricos entre los tres softwares, validando sus motores de cálculo hidráulico para el régimen permanente y estático en el caso del AquasystemS PRO. Sin embargo, las pequeñas variaciones observadas, especialmente en la altura de bombeo y la pérdida de carga unitaria, no son aleatorias, sino que son consecuencia directa de las distintas metodologías y niveles de precisión de cada herramienta.

- La principal divergencia metodológica se encuentra en la determinación de la altura de bombeo. WaterCAD arroja el valor más alto y preciso (169,30 m) porque su herramienta “System Head Curve” calcula analíticamente el punto de operación óptimo exacto de la bomba. En cambio, el valor de EPANET (168,95 m) es el

resultado de una iteración manual aproximada, y el de AquasystemS PRO (168,84 m) es una estimación gráfica-visual (omisión de la pérdida de carga tubería vertical del pozo). Esta diferencia subraya que, aunque numéricamente cercanos, la confiabilidad y optimización del diseño de la bomba son superiores en WaterCAD.

- Por su parte, las discrepancias en la pérdida de carga unitaria, como la mayor pérdida calculada en AquasystemS PRO (0,0056 m/m), se atribuyen directamente a la diferencia en la temperatura configurada (15°C vs 20°C). Esta variación modifica la viscosidad cinemática del agua, demostrando la alta sensibilidad del modelo hidráulico, cuando se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach, a las propiedades físicas del fluido y la importancia de definir correctamente dichos parámetros para un análisis de precisión.

En conclusión, si bien los resultados numéricos son convergentes, la calidad y fiabilidad del diseño de la aducción están directamente ligadas a las capacidades analíticas de la herramienta.

5.5. Análisis numérico de resultados modelación red de distribución

Las tablas que se presentan a continuación son la comparación de los resultados numéricos obtenidos al modelar la red de distribución de agua potable de la comunidad del Chirimoyal. A diferencia del sistema de aducción, las redes de distribución presentan una mayor complejidad en la gestión de presiones y caudales en múltiples puntos de entrega bajo diferentes escenarios de demanda.

Los datos incluidos en esta comparación se centran en la verificación de parámetros críticos para el diseño hidráulico, tales como las presiones dinámicas mínimas, bajo la comprobación específica establecida por la norma boliviana NB-689; así como la presión estática máxima, y los rangos de velocidad, pérdida de carga unitaria en los ramales y tubería principal.

Esta comparación tiene como objetivo evidenciar cómo cada software cuantifica estos parámetros esenciales y analizar su grado de concordancia con los criterios técnicos y normativos exigidos para el diseño y operación eficiente de redes de distribución.

Tabla 5.5.1: Comparación resultados Tubería Principal.

Parámetro.	WaterCAD.	EPANET.	AquasystemS PRO.
Presión Dinámica mínima Demanda caudal máximo horario.	16,47 m.c.a.	16,41 m.c.a..	15,76 m.c.a.
Presión Dinámica mínima Comprobación NB-689.	15,42 m.c.a.	----	15,76 m.c.a.
Presión estática máxima.	54,75 m.c.a.	54,76 m.c.a.	54,75 m.c.a.
Velocidad mínima.	0,12 m/s.	0,12 m/s.	0,29 m/s.
Velocidad máxima.	0,87 m/s.	0,87 m/s.	0,87 m/s.
Pérdida de carga unitaria mínima.	0,0010 m/m.	0,0010 m/m.	0,0056 m/m.
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0468 m/m.	0,0470 m/m.	0,0484 m/m.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.5.2: Comparación resultados Ramal N°1.

Parámetro.	WaterCAD.	EPANET.	AquasystemS PRO.
Presión Dinámica mínima Demanda caudal máximo horario.	26,31 m.c.a.	26,14 m.c.a.	25,62 m.c.a.
Presión Dinámica mínima Comprobación NB-689.	25,17 m.c.a.	----	25,62 m.c.a.
Presión estática máxima.	34,74 m.c.a.	34,78 m.c.a.	34,89 m.c.a.
Velocidad mínima.	0,23 m/s.	0,23 m/s.	0,55 m/s.
Velocidad máxima.	0,69 m/s.	0,69 m/s.	0,69 m/s.
Pérdida de carga unitaria mínima.	0,0068 m/m.	0,0067 m/m.	0,0337 m/m.
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0489 m/m.	0,0491 m/m.	0,0507 m/m.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.5.3: Comparación resultados Ramal N°2.

Parámetro.	WaterCAD.	EPANET.	AquasystemS PRO.
Presión Dinámica mínima Demanda caudal máximo horario.	21,00 m.c.a.	20,75 m.c.a.	19,99 m.c.a.
Presión Dinámica mínima Comprobación NB-689.	17,49 m.c.a.	----	19,99 m.c.a.
Presión estática máxima.	51,51 m.c.a.	51,59 m.c.a.	51,61 m.c.a.
Velocidad mínima.	0,23 m/s.	0,23 m/s.	0,36 m/s.
Velocidad máxima.	0,69 m/s.	0,69 m/s.	0,69 m/s.
Pérdida de carga unitaria mínima.	0,0068 m/m.	0,0067 m/m.	0,0110 m/m.
Pérdida de carga unitaria máxima.	0,0489 m/m.	0,0491 m/m.	0,0505 m/m.

Fuente: Elaboración propia.

- El análisis comparativo de los resultados numéricos de la red de distribución (Tablas 5.5.1 a 5.5.3) revela que, si bien existe una notable convergencia en condiciones de flujo, las diferencias más relevantes y reveladoras surgen en la evaluación de los parámetros críticos como presión dinámica y velocidad mínima. Estas diferencias no son errores de cálculo, sino el resultado directo de las distintas filosofías de modelado y metodologías de comprobación normativa propias de cada software.
- Una diferencia adicional radica en la filosofía de asignación de demandas. AquasystemS PRO está orientado al análisis de la red principal, por lo que agrupa las demandas de viviendas cercanas en un solo nodo. Este enfoque, en comparación con la asignación más granular que permiten WaterCAD y EPANET (a nivel de acometida), tiende a modificar la distribución del caudal a lo largo del ramal. Si las demandas se agrupan aguas arriba, el modelo subestima las pérdidas de carga aguas abajo y sobreestima las presiones finales. En cambio, si se agrupan aguas abajo, el tramo inicial del ramal transporta un caudal mayor al real, lo que puede generar una sobreestimación de las pérdidas y conducir a un sobredimensionamiento del diseño.

Esta diferencia metodológica explica en parte las variaciones observadas en las presiones dinámicas reportadas por cada software.

- Otro factor adicional es la temperatura del agua, que se analizó en el subtítulo anterior (Análisis numérico de resultados modelación Aducción), lo que explica las presiones dinámicas ligeramente menores reportados en algunos nodos por el AquasystemS PRO.
- La disparidad más significativa se manifiesta en la metodología de comprobación del caudal mínimo normativo (NB-689). La presión mínima reportada por WaterCAD (15,42 m.c.a.) es más conservadora porque la simulación mediante Fire Flow propaga la demanda adicional para alcanzar los 0,10 l/s a través de todos los tramos aguas arriba del punto crítico, incrementando la pérdida de carga total. En contraste, AquasystemS PRO (15,76 m.c.a.) aplica este caudal mínimo de forma localizada solo en el tramo final, optimizando el diseño para un cumplimiento puntual y menos exigente para el resto de la red.
- Esta misma lógica explica la diferencia en la velocidad mínima y la pérdida de carga mínima. El diseño forzado de AquasystemS PRO, al forzar el flujo mínimo de 0,10 l/s a través de una tubería final de diámetro reducido (1"), garantiza una velocidad mínima más alta (0,29 m/s y una pérdida de carga mayor), favoreciendo la autolimpieza. Mientras tanto, los modelos de WaterCAD y EPANET reflejan velocidades más bajas (0,12 m/s y pérdidas de carga menor) que se corresponden con el consumo unitario familiar en los puntos de menor demanda.

Por lo tanto, se concluye que las diferencias numéricas no son indicativas de un error, sino a decisiones metodológicas de diseño. WaterCAD prueba la robustez de la red de forma integral y más exigente, mientras que AquasystemS PRO ofrece un diseño optimizado para el cumplimiento específico y localizado de la norma.

5.6. Hallazgos y Principios para la Buena Práctica de la Modelación Hidráulica

El análisis comparativo del sistema de Chirimoyal no solo evidenció las divergencias entre los softwares, sino que permitió validar un conjunto de Principios de Buena Práctica, diseñados para mitigar errores conceptuales comunes y elevar la fiabilidad en el diseño de

redes de agua potable. Es importante destacar que, si bien estos principios son de naturaleza general, fueron identificados y validados en el contexto de un sistema de aducción por bombeo y una red de distribución principalmente abierta o ramificada, características comunes en los sistemas rurales de Bolivia.

5.6.1. Principio de Precisión: Influencia de los Diámetros Internos Reales y Temperatura del Agua

Se determinó que la precisión de un modelo hidráulico basado en la ecuación de Darcy-Weisbach depende críticamente de dos parámetros físicos a menudo subestimados o asumidos incorrectamente: el diámetro interno real de las tuberías y la temperatura del agua.

El primer factor, el diámetro, es el más influyente en el cálculo de pérdidas. La ecuación de Darcy-Weisbach es exponencialmente sensible a este valor. Como consecuencia, utilizar el diámetro nominal en lugar del interno real (que es menor debido al espesor de la pared de la tubería) lleva inevitablemente a una subestimación sistemática de las pérdidas de carga.

De igual forma, la temperatura del agua es crucial, pues determina la viscosidad del fluido (ν), la cual modifica el Número de Reynolds y, por ende, el factor de fricción (f). Aguas más frías son más viscosas y aumentan las pérdidas de carga reales, un efecto que fórmulas empíricas como Hazen-Williams ignoran.

Por lo tanto, se establece como buena práctica fundamental que el proyectista debe siempre consultar los catálogos técnicos de los fabricantes para obtener el diámetro interno real de la tubería especificada y configurar manualmente este valor en el software, como la temperatura del agua representativa de la ubicación proyecto, garantizando así la precisión y fiabilidad del modelo hidráulico.

5.6.2. Principio de Simulación Dinámica: La Superioridad del Análisis en Período Extendido (EPS)

Se constató que las simulaciones estáticas, si bien útiles para comprobaciones puntuales, son insuficientes para capturar la complejidad del comportamiento operativo de una red. Esto se debe a que las redes operan bajo condiciones inherentemente variables

(fluctuaciones de la demanda, ciclos de llenado de tanques y operación de bombas) que un análisis estático ignora. Dependiendo exclusivamente de este enfoque puede ocultar problemas críticos como presiones mínimas en horas pico o la incapacidad del sistema para recuperar niveles de almacenamiento. Un ejemplo particularmente crítico de esta deficiencia, validado en este estudio, es la incapacidad del análisis estático para modelar correctamente la dinámica de llenado de un tanque elevado por bombeo. Por defecto, plataformas como WaterCAD y EPANET asumen que el ingreso de agua a un tanque ocurre en su cota base. Sin embargo, en la realidad física, la tubería de impulsión descarga en la parte superior, obligando a la bomba a vencer la contrapresión de la columna de agua a medida que el tanque se llena. Un análisis estático desprecia esta altura manométrica adicional y variable, lo que puede conducir a una subestimación peligrosa de la altura de bombeo requerida y a la selección de un equipo inadecuado. Por ello, se establece como buena práctica priorizar las Simulaciones de Período Extendido (EPS) en softwares que lo permitan (como WaterCAD y EPANET), ya que es la única metodología que ofrece una visión completa y realista del desempeño de la infraestructura bajo un rango completo de condiciones operativas.

5.6.3. Principio de Claridad Conceptual: La Distinción entre Presiones Dinámicas y Estáticas Reportadas por los Softwares

Se identificó un riesgo significativo de error de interpretación si el modelador no distingue claramente entre la presión dinámica y la estática. La causa de esta posible confusión es que los programas calculan y reportan la presión de manera diferente: WaterCAD y EPANET entregan por defecto la presión dinámica, que resulta del flujo y las pérdidas por fricción. Para obtener la presión estática (sin flujo), se requiere que el proyectista cree un escenario de simulación específico con demanda cero. AquasystemS PRO, en cambio, incorpora en su planilla de cálculo un parámetro dedicado para el reporte directo de la presión estática (dh), diseñada específicamente para la comprobación normativa sin necesidad de alterar el escenario de demanda. La falta de diferenciación entre los tipos de presión analizados y reportados puede conducir a interpretaciones con consecuencias técnicas significativas, ya que comparar una presión dinámica con un límite normativo estático (o viceversa) llevaría a conclusiones erróneas sobre la seguridad y funcionalidad de la red. En consecuencia, la buena práctica exige que el proyectista tenga total claridad

sobre el tipo de presión que está analizando y utilice los métodos apropiados en cada software para verificar correctamente tanto las presiones dinámicas como las estáticas contra sus respectivos límites normativos.

5.6.4. Principio de Granularidad: La Ubicación Precisa de las Demandas

Se identificó que un error crítico común en la práctica del modelado es la asignación imprecisa de múltiples demandas en un único nodo, especialmente en ramales de diámetro reducido. Este error se debe a que el software asume que el caudal se consume instantáneamente en el nodo asignado, esto distorsiona la disminución gradual real del caudal a lo largo de la red. Esto genera dos efectos contrapuestos, pero igualmente problemáticos.

- **Agrupación aguas arriba:** Concentrar las demandas al inicio del tramo de la tubería provoca que el caudal disminuya prematuramente en los tramos siguientes, lo que conduce a una subestimación sistemática de las pérdidas de carga. Como resultado, se obtienen presiones finales falsamente optimistas, que pueden ocultar deficiencias reales de presión en los extremos de la red.
- **Agrupación aguas abajo:** Por el contrario, ubicar todas las demandas en un nodo terminal obliga a los tramos iniciales a transportar un caudal superior al real durante un trayecto mayor, generando una sobreestimación de las pérdidas de carga. Esto puede derivar en un diseño sobredimensionado y, por tanto, innecesariamente costoso.

En consecuencia, la buena práctica de modelado exige granularidad en la representación de la demanda, ubicando cada consumo lo más cerca posible de su posición real. Esto puede requerir la incorporación de nodos adicionales que representen conexiones individuales, pero constituye un paso más para lograr una simulación que refleje el comportamiento hidráulico del sistema y garantice la confiabilidad del diseño.

5.6.5. Principio de Criticidad Real: La Identificación del Verdadero Punto Crítico

Se demuestra que es un error conceptual y un riesgo de diseño asumir que el punto más desfavorable de una red (con menor presión) es siempre el más alejado topográficamente de la fuente. Se sabe que la presión en un nodo es una función de la energía disponible

menos las pérdidas de carga acumuladas y la propia cota de elevación del nodo. Por ello, un punto intermedio con una alta demanda concentrada o una elevación pronunciada puede generar pérdidas de carga o una reducción de la presión estática tan significativas que lo conviertan en el verdadero punto crítico, incluso por encima de un nodo más distante, pero con menor consumo o cota como en este proyecto (nodo J-45; J-171; 34A1). En consecuencia, diseñar la red basándose únicamente en la presión del punto más lejano puede llevar a que otros nodos clave (de alto consumo o en zonas elevadas) no reciban la presión mínima de servicio requerida por la norma, resultando en un fallo funcional del diseño en puntos de servicio cruciales. Por lo tanto, la práctica correcta exige identificar y analizar explícitamente un conjunto de puntos críticos potenciales: los extremos topográficos, los nodos de mayor elevación y los de mayor demanda. Si bien WaterCAD y EPANET permiten modelar estos puntos sin configuraciones adicionales, se debe tener especial cuidado en AquasystemS PRO. Al modelar un punto crítico que corresponde a una sola acometida, el software interpreta por defecto que es un ramal secundario y aplica la corrección de caudal mínimo (0,10 l/s) de la NB-689. Para reflejar la demanda real, es indispensable una intervención manual del proyectista para ajustar dicho caudal y asegurar la coherencia hidráulica del modelo.

5.6.6. Principio de Simulación Adaptable: La Verificación de Requisitos Normativos Específicos

Se establece que la verificación de requisitos normativos específicos, como el caudal mínimo de 0,10 l/s en tramos de ramales o tubería principal estipulado por la NB-689, requiere un enfoque de modelado deliberado, ya que los métodos simplistas resultan metodológicamente ineficientes o incluso incorrectos. La causa del error radica en que un enfoque no controlado, como simplemente incrementar la demanda base en los nodos críticos en el modelo para alcanzar dicho caudal en un tramo final, propaga un flujo artificial a lo largo de toda la red aguas arriba, y su efecto se multiplica según la cantidad de nodos críticos considerados. Como consecuencia directa, el proyectista podría verse forzado a sobredimensionar las tuberías principales para transportar un flujo de verificación que no existe en la operación real, lo que conlleva a costos más elevados.

La alternativa a este método sería configurar manualmente un escenario distinto para cada nodo crítico, ajustando las condiciones de demanda para verificar el cumplimiento normativo en cada caso. Sin embargo, esta solución, resulta ineficiente y laboriosa, especialmente en redes con múltiples puntos críticos (tramos con caudal menor a 0,10 l/s).

La buena práctica, por lo tanto, exige aislar la condición de prueba mediante herramientas de simulación avanzada. La funcionalidad "Fire Flow" de WaterCAD, utilizada en este estudio, es ideal para este propósito. Esta herramienta ejecuta simulaciones independientes para cada nodo crítico seleccionado (tal como se explicó en el párrafo anterior) de forma automática y dentro de un único escenario; es decir, realiza la verificación "uno a la vez".

En cada simulación, se añade únicamente la demanda puntual mínima necesaria para alcanzar el umbral de 0,10 l/s en ese tramo específico, mientras el resto de nodos del sistema mantienen su demanda base. Este enfoque verifica la capacidad hidráulica del ramal (diámetros) de forma aislada y automatizada, asegurando el cumplimiento normativo sin propagar un caudal artificial acumulativo (exagerado o multiplicado) a lo largo del sistema, evitando así el sobredimensionamiento de la red principal.

5.6.7. Principio de Consistencia Lógica: Coherencia entre Topología y Demandas en Simulaciones de Período Extendido (EPS)

Se establece como un principio crítico que, al simular escenarios operativos como el cierre de ramales o el aislamiento de sectores, la fiabilidad del modelo depende indispensablemente de mantener la coherencia lógica entre la topología física de la red y la asignación de demandas. La causa de esta potencial incoherencia radica en la naturaleza de los motores de cálculo hidráulico (como el de EPANET, en el que se basa WaterCAD), que operan bajo un paradigma de "demanda dirigida" (demand-driven). Esto significa que el objetivo principal del software es resolver las ecuaciones para satisfacer las demandas asignadas a cada nodo, sin tener una "conciencia física" de si un nodo está hidráulicamente conectado a la fuente o no. Si una válvula se cierra en el modelo, pero las demandas de los nodos ahora aislados se mantienen activas, el software seguirá intentando "abastecer" esas demandas fantasmas. Ignorar este principio falsea gravemente los resultados operativos del sistema de múltiples maneras. Primero, el balance hídrico se vuelve incorrecto, ya que el modelo registrará una salida de agua del tanque o la fuente muy

superior a la real, pues "envía" caudal a nodos que no pueden recibirlo. Segundo, esto lleva a una simulación errónea de los niveles del tanque, mostrando un vaciado mucho más rápido del que ocurriría en la realidad y llevando a conclusiones equivocadas sobre la autonomía y capacidad de almacenamiento del sistema. Finalmente, este flujo artificialmente alto en las partes activas de la red distorsiona las presiones y velocidades en el resto del sistema.

La buena práctica exige asegurar la consistencia lógica mediante la creación de escenarios específicos. La solución manual, aplicable en cualquier software, consiste en desactivar (poner a cero) las demandas de todos los nodos que quedan aislados en un escenario de cierre. Sin embargo, herramientas avanzadas como las presentes en WaterCAD ofrecen soluciones más elegantes y automatizadas. La función de Demanda Dependiente de Presión (PDD) es la mejor práctica, ya que el modelo reduce o anula automáticamente la demanda requerida en ese nodo si la presión cae por debajo de un umbral o una presión de referencia definida por el proyectista, simulando lo más cercano a la realidad (si no hay presión, no llega el agua). Alternativamente o conjuntamente, se pueden usar controles lógicos para automatizar el cierre o apertura de válvulas. Estas herramientas garantizan que el modelo mantenga la coherencia lógica mencionada.

5.6.8. Principio de Configuración Explícita: El Estado Inicial de los Elementos de Control

Finalmente, se establece como un principio fundamental que la fiabilidad de una simulación dinámica depende de la configuración explícita y deliberada del estado inicial (tiempo $t=0$) de todos los elementos de control de la red, como válvulas y bombas. La causa es una característica inherente a los modelos de flujo a presión como WaterCAD y EPANET. Estos programas no simulan el llenado físico gradual de las tuberías desde vacío; en su lugar, calculan el estado de equilibrio hidráulico bajo la suposición de que la red ya está completamente llena y presurizada. Por defecto, el software asume que todos los componentes están en su estado operativo (válvulas abiertas, bombas disponibles) a menos que el usuario indique explícitamente lo contrario. La consecuencia de omitir esta configuración es la obtención de resultados iniciales incorrectos que invalidan toda la simulación de período extendido (EPS). Por ejemplo, si una válvula de seccionamiento

debe estar cerrada en la realidad, pero no se establece como "Cerrada" en el modelo para el tiempo 0:00, el software calculará un flujo a través de ella, generando un estado hidráulico inicial (presiones y caudales) que no se corresponde con la realidad y que afectará la evolución de los niveles en los tanques en todos los pasos de tiempo subsiguientes. Por lo tanto, la buena práctica indispensable es que, antes de ejecutar cualquier simulación, el proyectista debe definir y verificar explícitamente el estado inicial (abierto/cerrado, activo/inactivo) de cada válvula y bomba para que el modelo refleje con precisión las condiciones operativas reales desde el primer instante. Esto es especialmente crítico al modelar diferentes escenarios de operación, mantenimiento o contingencia.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Del análisis exhaustivo y la comparación de los tres softwares aplicados al caso de estudio, se desprende que la consistencia en los resultados hidráulicos básicos no implica que las herramientas sean intercambiables. La elección del software más adecuado es una decisión técnica que depende del contexto del proyecto, el perfil del usuario y los objetivos específicos del diseño.

- Se concluye que WaterCAD emerge de este análisis comparativo como la herramienta de mayor versatilidad y robustez técnica. Su superioridad no radica en una única funcionalidad, sino en la integración de un ecosistema completo de herramientas avanzadas: su potente gestor de escenarios facilita el análisis de alternativas; su motor de simulación dinámica (EPS) permite una evaluación operativa realista; y su alta interoperabilidad con plataformas CAD y GIS garantiza un flujo de trabajo eficiente. Particularmente, su capacidad para modelar con precisión componentes críticos como las curvas de bomba lo posiciona como la solución más confiable para la optimización técnica y la seguridad del diseño en sistemas de mediana a alta complejidad.
- Se concluye que AquasystemS PRO se consolida como una herramienta de nicho altamente especializada, cuya eficacia se basa en su alineamiento estricto para el diseño bajo la normativa boliviana NB-689. Su fortaleza no reside en la simulación hidráulica avanzada, sino la automatización del cumplimiento normativo y la generación integrada de entregables de proyecto (planos, perfiles, cómputos) directamente en el entorno CAD. Esta orientación lo convierte en una solución pragmática y eficiente para proyectos por gravedad de pequeña y mediana escala, aunque esta especialización se logra a costa de una notable rigidez metodológica y una versatilidad analítica limitada.
- Se concluye que EPANET se posiciona como la herramienta de mayor accesibilidad y como el pilar fundamental para la formación académica en modelación hidráulica de redes. Su carácter gratuito y su simplicidad operativa eliminan las barreras económicas y técnicas de entrada, convirtiéndolo en una alternativa óptima para

estudiantes, investigadores y para el diseño de proyectos de menor complejidad o con recursos limitados. Sin embargo, esta simplicidad conlleva a limitaciones en su aplicación práctica profesional a gran escala ya que se ve mermada por una fuerte dependencia de procesos manuales y herramientas externas, lo que incrementa los tiempos de desarrollo y el riesgo de error en la gestión de datos complejos.

- Se concluye que las diferencias numéricas observadas entre los modelos son mínimas y no se deben a errores de cálculo, sino a las distintas filosofías de modelado inherentes a cada software, especialmente en la asignación de demandas y en la metodología de aplicación de requisitos normativos específicos.

Finalmente, y como conclusión fundamental que trasciende la comparación de los softwares, este trabajo establece que el método computacional, por más sofisticado que sea, no sustituye el juicio, el conocimiento y la responsabilidad del ingeniero. La investigación demuestra que la eficacia de estos programas depende directamente de un sólido dominio de los fundamentos teóricos de la hidráulica y un profundo conocimiento de la normativa vigente, como la NB-689. Por lo tanto, se afirma que el criterio técnico, la integridad profesional y la responsabilidad del ingeniero representa el componente más indispensable para el diseño de infraestructura de agua potable que sea segura, eficiente y sostenible.

6.2. Validación de la Hipótesis

En base a los hallazgos de este estudio, la hipótesis inicial, que planteaba que "Todos los métodos computacionales tienen buena trabajabilidad, versatilidad y brindan una presentación óptima de resultados", se considera parcialmente validada. Si bien los tres softwares demostraron ser herramientas competentes y capaces de producir diseños hidráulicamente correctos, la investigación reveló diferencias sustanciales y fundamentales en sus niveles de trabajabilidad y versatilidad, lo que demuestra que cada uno presenta una "óptimalidad" distinta dependiendo de la complejidad del proyecto, el perfil del usuario y el contexto de aplicación.

6.3. Recomendaciones

- **Recomendaciones en base a los resultados**

- Para usuarios sin experiencia previa o recursos económicos limitados, se recomienda comenzar con EPANET por su facilidad de instalación, bajo requerimiento técnico y abundante documentación gratuita. Se sugiere complementar su uso con herramientas de cálculo externo (Excel) y esquemas gráficos de apoyo.
- EPANET es perfecto para proyectos educativos o de investigación, donde la precisión del cálculo es importante, pero la visualización avanzada y las herramientas de comprobación automática pueden ser suplidas.
- Para ingenieros que deben diseñar sistemas complejos, bombeados o de riego presurizado, se recomienda el uso de WaterCAD. Su funcionalidad avanzada, integración con otras plataformas (GIS, AutoCAD) y visualización dinámica lo convierten en la mejor opción técnica, aunque se debe prever el costo de licencia y la capacitación del equipo técnico.
- Para proyectos rurales que deben cumplir estrictamente con la normativa boliviana NB-689, AquasystemS PRO es la opción más alineada al marco legal nacional. Es particularmente útil en contextos donde los consumos son bajos y la red incluye múltiples ramales finos. Sin embargo, su uso exige experiencia previa en AutoCAD, conocimiento de la hidráulica aplicada a la conducción bajo presión. Como dijeron sus creadores: “Le dan las decisiones técnicas al proyectista” y paciencia frente a la falta de soporte oficial.
- AquasystemS PRO para Constructoras y proyectos con Norma NB-689 en Bolivia que requieran generación automática de planos y cómputos métricos de manera inmediata.
- Para instituciones educativas y de formación técnica, se recomienda implementar un enfoque mixto: utilizar EPANET como base para la enseñanza de hidráulica y WaterCAD o AquasystemS PRO para mostrar aplicaciones reales, normativas o especializadas.

- Para entidades públicas y organismos financiadores, se sugiere facilitar licencias académicas o comunitarias de WaterCAD y AquasystemS PRO.
- **Recomendaciones de uso de los Softwares**
 - Siempre ingresar manualmente los diámetros internos reales de las tuberías (según material y clase) con información de catálogos técnicos locales de comercializadoras o fabricantes.
 - Prioriza siempre las simulaciones de Periodo Extendido (EPS) sobre las estáticas.
 - Comprender que WaterCAD y EPANET siempre reportan presiones dinámicas.
 - Ser preciso al modelar la reducción de caudal en ramales de pequeño diámetro, aunque sea necesario crear nodos individuales.
 - No asumir que el punto más alejado es el más crítico. Identificar y modelar explícitamente los nodos con demandas significativamente altas, o elevaciones pronunciadas.
 - En WaterCAD aplicar la verificación ($Q < 0,10$ l/s) solamente en la red (sin conexiones domiciliarias) considerando los puntos más críticos, incluyendo este caudal mínimo directamente en los nodos finales de los ramales donde esperan dos o más viviendas.
 - Garantiza la Coherencia entre Topología y Demandas en EPS. Utiliza las Demandas Dependientes de Presión (PDD) y controles lógicos en WaterCAD para garantizar que el caudal suministrado sea coherente con la red operativa.
 - Configurar la condición inicial de los elementos (válvulas o tuberías) como "cerrado" si se quiere simular un sector aislado desde el principio de la simulación.
 - Tener presente las diferencias metodológicas: AquasystemS PRO aplica el caudal mínimo solo en el tramo final, WaterCAD (Fire Flow) propaga y acumula el este caudal.
 - Tener presente la sensibilidad de los softwares ante la temperatura de agua en la pérdida de carga por fricción mediante Darcy-Weisbach.

- **Recomendaciones para futuras investigaciones**

- Para desarrolladores del software nacional AquasystemS PRO, se recomienda ampliar la documentación, mejorar la interoperabilidad con otras versiones de AutoCAD y desarrollar funciones de exportación de resultados, así como escenarios alternativos para su análisis comparativo.
- Desarrollar alternativas que permitan a AquasystemS PRO implementar más métodos de cálculo de fricción y, fundamentalmente, capacitarlo para modelar caudales por bombeo. Esto implicaría integrar la lectura de curvas de bomba y del sistema. Esto transformaría AquasystemS PRO, ampliando significativamente su alcance de diseño más allá de los sistemas por gravedad y la estricta verificación normativa.
- Se recomienda promover la investigación y desarrollo de plugins (complementos) de código abierto para EPANET que automaticen la comprobación directa con la NB-689. Esto permitiría a estudiantes y pequeñas consultoras acceder a verificaciones automáticas de presiones, velocidades y caudales mínimos, eliminando el tedioso procesamiento manual en Excel y reduciendo drásticamente errores y tiempos de diseño. Además de optimizar el flujo de trabajo, esta iniciativa fomentaría la innovación y el desarrollo comunitario en el software, elevando la calidad general de los proyectos de agua potable en el país.
- Se recomienda ampliar esta línea de investigación mediante un estudio comparativo enfocado en las capacidades de simulación de calidad de agua. Una revisión de la documentación técnica de los programas sugiere que tanto WaterCAD como EPANET cuentan con módulos robustos para el análisis de parámetros como la edad del agua y el decaimiento de cloro, mientras que AquasystemS PRO se limita exclusivamente en el diseño hidráulico. La incorporación de un análisis práctico de estas funciones, que no fue considerado dentro del alcance de este proyecto de grado, representaría un aporte valioso para la gestión operativa de los sistemas de agua potable en nuestro país.