

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

VICERRECTORÍA DE DOCENCIA

ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



INFORME DE TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PRESENTADO A LA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OPTAR AL GRADO DE LICENCIADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA

EVALUACIÓN Y ESTUDIO DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA  
COMUNIDAD DE SAN FRANCISCO DE BIRRSITO, UBICADO EN PARAÍSO DE  
CARTAGO

ALEXANDER CHANTO SÁNCHEZ

CARTAGO, 2019

EVALUACIÓN Y ESTUDIO DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA  
COMUNIDAD DE SAN FRANCISCO DE BIRRISITO, UBICADO EN PARAÍSO DE  
CARTAGO.

ALEXANDER CHANTO SÁNCHEZ

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la  
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para  
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

---

Ing. Laura Segura Serrano

Asesor

---

Ing. Marvin Villalobos Araya

Director Escuela

Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2019

## **Dedicatoria**

A mis padres Hernán Alexander Chanto y Kattia Sánchez

Por su apoyo incondicional y amor que pude recibir todo este tiempo

A la Escuela de Ingeniería Agrícola y el Instituto Tecnológico de Costa Rica

Por todo el aprendizaje académico y de vida que pude adquirir

## **Agradecimientos**

A Dios creador omnipotente de todas las cosas

A mis padre Alexander y Kattia y hermanos Erick y Monserrath

Por su apoyo, paciencia y confianza en este proceso

A todos mis profesores de la Escuela de Ingeniería Agrícola y aquellos profesores del TEC  
de quienes obtuve aprendizajes muy importantes

A la profesora Laura por su paciencia y oportunas correcciones para la conclusión de este  
trabajo

Al profesor Mario por su aporte a las correcciones de este trabajo

A la Municipalidad de Paraíso, en especial a Dennis Corrales por su confianza en el  
estudiantado del TEC para el estudio y evaluación de proyectos

A todos aquellos compañeros y compañeras del TEC, lista interminable de amistades que  
me enseñaron y fortalecieron los valores de hermandad y trabajo en equipo

A mis “compas” y socios Mauro Rodríguez, Giancarlos Barquero, Adrián Garita y  
Leonardo Corella, por encontrarlos en este camino indescriptible de la vida

## INDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCION.....	12
1.1. OBJETIVO GENERAL. ....	13
1.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS. ....	13
2. ANTECEDENTES. ....	14
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
3.1. ADMINISTRACIÓN DEL AGUA EN COSTA RICA.....	18
3.1.1. Población de diseño. ....	18
3.1.2. Factores de demanda máxima.....	18
3.1.3. Dotaciones. ....	18
3.1.4. Velocidad.....	19
3.1.5. Consignas de presiones ....	19
3.2. ESTUDIO POBLACIONAL. ....	19
3.3. PRINCIPIOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS PARA SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUAS.....	20
3.3.1. Principio de Bernoulli ....	20
3.3.2. Principio de Continuidad.....	21
3.3.3. Pérdidas de energía. ....	21
3.4. REDES DE DISTRIBUCIÓN.....	22
3.4.1. Pérdidas de integridad hidráulica.....	22
3.4.2. Elementos en las redes de distribución ....	23
3.4.3. Instalación de una válvula reductora de presión.....	27
3.4.4. Caja de registro para válvula ....	27
3.5. ESTUDIO ECONÓMICO.....	28
3.6. ESTUDIO AMBIENTAL ....	28

3.6.1. Matriz de Arboleda. ....	28
3.7. ESTUDIO SOCIAL .....	29
3.7.1. Problemas recurrentes en las redes de distribución. ....	29
3.7.2. Situación de abastecimiento en la red de San Francisco de Birrisito. ....	30
4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	31
4.1. DEMANDA HÍDRICA. ESTUDIO POBLACIONAL. ....	32
4.1.1. Cálculo de caudal máximo por abonado. ....	32
4.1.2. Estudio poblacional. ....	33
4.2. LEVANTAMIENTO Y PROCESO DE DATOS.....	34
4.2.1. Levantamiento de los puntos. ....	34
4.2.2. QGIS (2.14.17). ....	35
4.2.3. Confección de mapas. ....	36
4.3. MODELACIÓN DE LA RED EN WATERCAD (V8i).....	36
4.3.1. Pérdidas de carga en tubería. ....	36
4.3.2. Pérdidas en accesorios.....	37
4.3.3. Diámetro y material. ....	37
4.3.4. Elevación, demanda y longitud.....	37
4.3.5 Caudal, velocidad, pérdidas y carga en tuberías y nodos.....	38
4.4. ESTUDIO ECONÓMICO.....	38
4.5. ESTUDIO AMBIENTAL. ....	39
4.6. ESTUDIO SOCIAL. ....	39
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
5.1. ESTUDIO POBLACIONAL. ....	41
5.1.1. Demanda actual del recurso hídrico.....	41
5.1.2. Demanda futura (2040) de recurso hídrico.....	41

5.2. LEVANTAMIENTO DE PUNTOS. ....	44
5.2.1 Distribución de abonados. ....	44
5.2.2 Tanques de abastecimiento.....	46
5.2.3. Curvas de nivel. ....	48
5.3. DISTRIBUCIÓN DE TRAMOS Y TUBERÍAS.....	48
5.3.1. Distribución de tubería. ....	48
5.3.2. Distribución de tramos. ....	50
5.4. MODELACIÓN DE LA RED EN WATERCAD. ....	52
5.4.1 Modelación de la red actual. Modelo Estático. ....	52
5.4.2. Modelación de la red actual. Período extendido.....	54
5.4.3. Modelación de la red actual con válvula nueva. Estático y período extendido...	57
5.4.4. Modelación de la demanda proyectada al 2040. Período extendido.....	60
5.5. ESTUDIO ECONÓMICO PARA INSTALACIÓN DE VÁLVULA Y CAJA DE REGISTRO. ....	63
5.5.1. Compra e instalación de una caja de registro para válvula reductora de presión.63	
5.5.2. Compra e instalación de una válvula reductora.....	64
5.5.3. Reemplazo de tubería para el tramo 7.....	64
5.5.4. Análisis Costo – Beneficio. ....	66
5.6. ESTUDIO AMBIENTAL SOBRE LA INSTALACIÓN DE UNA VÁLVULA Y CAJA DE REGISTRO.....	68
5.7. ESTUDIO SOCIAL SOBRE LA EVALUACIÓN DE LA RED.....	71
6. CONCLUSIONES.....	72
7. RECOMENDACIONES.....	75
8. BIBLIOGRAFÍA.....	77
ANEXOS .....	82
APÉNDICES.....	92

## **INDICE DE CUADROS**

Cuadro 1. Cálculo de caudal máximo. Fuente: AyA, 2017. ....	32
Cuadro 2. Modelo para Matriz de Arboleda. Fuente: Arboleda, 2008.....	39
Cuadro 3. Estimación de la demanda teórica actual en San Francisco de Birrisito. ....	41
Cuadro 4. Proyección de crecimiento poblacional. Método aritmético. Paraíso. ....	42
Cuadro 5. Tasa de crecimiento San Francisco de Birrisito.....	43
Cuadro 6. Proyección de crecimiento poblacional San Francisco de Birrisito.....	43
Cuadro 7. Proyección de la demanda teórica para San Francisco de Birrisito, año 2040. .	44
Cuadro 8. Especificaciones de los tanques de almacenamiento. ....	46
Cuadro 9. Especificaciones de tubería en la red San Francisco de Birrisito. ....	49
Cuadro 10. Caudal conducido por cada uno de los tramos.....	51
Cuadro 11. Cotización para la compra e instalación de una caja de registro. ....	63
Cuadro 12. Cotización para la compra de una válvula reductora y materiales.....	64
Cuadro 13. Cotización de material para reemplazo de tubería en el tramo 7.....	64
Cuadro 14. Costos por concepto de contratación de mano de obra. ....	65
Cuadro 15. Costos por concepto de equipo herramienta e implemento de seguridad. ....	65
Cuadro 16. Reajustes (gastos administrativos, imprevistos, utilidades). ....	66
Cuadro 17. Evaluación de Impacto Ambiental. Matriz de Arboleda. ....	68



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comunidad principal San Francisco de Birrisito. Elaborado con: QGIS (2.14.17) .....	15
Figura 2. Modelo de una válvula reguladora no modulante. Fuente: CLA-VAL, 2019. ...	25
Figura 3. Modelo de una válvula reguladora automática. Fuente: CLA-VAL, 2019. ....	25
Figura 4. Crecimiento poblacional esperado al 2040, cantón de Paraíso. Elaborado con (Excel 2013).....	43
Figura 5. Distribución de abonados de la red de San Francisco de Birrisito. Elaborado con: QGIS (2.14.17.).....	45
Figura 6. Tres medidores pertenecientes a la red de distribución de la comunidad de San Francisco de Birrisito. ....	46
Figura 7. Tanque de plástico de San Francisco de Birrisito con volumen de 22000 L. ....	47
Figura 8. Tanque San Francisco con capacidad de 30000 L.....	47
Figura 9. Curvas de nivel, red de San Francisco de Birrisito. Elaborado con: QGIS (2.14.17.).....	48
Figura 10. Distribución de tubería de la red de San Francisco de Birrisito. Elaborado con: QGIS (2.14.17.).....	50
Figura 11. Distribución de tramos de la red de San Francisco de Birrisito. Elaborado con: QGIS (2.14.17.).....	51
Figura 12. Modelación para la red actual. Escenario estático. Elaborado con: WaterCAD (V8i). ....	53
Figura 13. Modelación para la red actual. Período extendido (10:00 am). Elaborado con: WaterCAD (V8i).....	55
Figura 14. Velocidad en cada tramo. Modelación período extendido. Elaborado con: WaterCAD (V8i).....	56
Figura 15. Caudal en cada tramo. Modelación período extendido. Elaborado con: WaterCAD (V8i).....	57

Figura 16. Modelación con una válvula nueva. Escenario estático. Elaborado con: WaterCAD (V8i).....	59
Figura 17. Modelación con válvula nueva. Período extendido (10:00 am). Elaborado con: WaterCAD (V8i).....	60
Figura 18. Proyección 2040. Período extendido (10:00 a.m.). Elaborado con: WaterCAD (V8i). ....	61
Figura 19. Caudal en cada tramo. Proyección 2040. Período extendido. Elaborado con: WaterCAD (V8i).....	62
Figura 20. Velocidad en cada tramo. Proyección 2040. Período extendido. Elaborado con: WaterCAD (V8i).....	62
Figura 21. Curva de cavitación de la válvula HELMAN VCH. Fuente: (HELMAN S.A.S., 2016).....	70

## **INDICE DE ECUACIONES**

Factor de demanda máximo 3.1.2 .....	18
Dotaciones 3.1.3 .....	19
Estudio poblacional 3.2.1 .....	19
Factor de Crecimiento aritmético $R$ 3.2.2 .....	20
Principio de Bernoulli 3.3.1 .....	20
Principio de Continuidad 3.3.2 .....	21
Ecuación de Hazen Williams 3.3.3 .....	21
Pérdidas en accesorios 3.3.4 .....	22
Clasificación ambiental 3.6.1 .....	28

## **RESUMEN**

Este trabajo corresponde a un estudio y análisis realizado en la red de distribución de agua potable de la comunidad de San Francisco de Birrisito, Paraíso de Cartago, como parte del trabajo de mejoramiento que el acueducto de la municipalidad de Paraíso ha estado desarrollando desde hace unos años, con el objetivo de mitigar el faltante de agua en este sector.

La metodología se resume en trabajo de campo (levantamiento topográfico), obtención de datos en Quatum GIS y modelación con el software WaterCAD para la determinación de variables físicas (presión, velocidad y caudal) en nodos y tuberías. Se concluyó que la gran mayoría de los nodos para acometidas domiciliarias presentan presiones de trabajo estables, sin embargo se propuso la instalación de una válvula reguladora de presión para disminuir presión en aquellos puntos de riesgo, ubicados en las zonas más bajas.

Basado en los resultados de la modelación, se realizaron los análisis pertinentes (ambiental, económico y social), concernientes a la instalación y operación de una válvula y caja de registro. De esta manera se espera que este análisis funja como una herramienta complementaria para la toma de decisiones en la municipalidad.

Palabras clave: modelación en redes cerradas, red de distribución, agua potable, período extendido, PRV.

## **ABSTRACT**

The present work consists in the analysis of the drinking water distribution network of the community of San Francisco de Birrisito, Paraíso de Cartago, as part of the improvement program that the city of Paraíso has been developing for several years, to mitigate the impact of lack of water supply in this sector.

The methodology is summarized as field work (topographic survey), data management in Quatum GIS and modeling with the software WaterCAD for the determination of physical variables (pressure, velocity and flow) in nodes and pipes. It was concluded that the vast majority of the nodes for household connections have stable working pressures, however the installation of a pressure regulating valve to reduce the pressure at some risk points, located in the lowest areas, was proposed.

Based on the results of the modelling a series of complementary analyzes (environmental, economic and social) were carried out, with regard to the installation of a inspection chamber and a pressure reducing valve. Thus it is expected that this analysis would provide a complementary tool to support the decision process in the municipality.

Keywords: closed network modeling, distribution network, drinking water, extended period, PRV

## **1. INTRODUCCION**

Las redes de abastecimiento de agua potable son sistemas de conducción y distribución para el consumo humano ya sea de uso doméstico, industrial o comercial, cuyos puntos de captación pueden ser naturales o artificiales. En este caso la red de estudio es la correspondiente a la comunidad de San Francisco de Birrisito.

La red cuenta con 58 abonados, y una totalidad de 232 personas. Esta comunidad se encuentra ubicada en una zona rural y actualmente, junto con otras comunidades de la zona alta de Paraíso, están viéndose afectados por la falta de agua, debido a una diversidad de factores tales como: falta de una nueva fuente de agua, baja capacidad del sistema de almacenamiento, sistema de tubería antiguo (de hasta 50 años) y la ubicación geográfica (zona alta).

La finalidad de llevar a cabo este estudio corresponde principalmente a facilitar la toma de decisiones con miras a un futuro rediseño de la red, como parte de los objetivos que el acueducto municipal ha establecido, de forma que se logre alcanzar una solución oportuna a los problemas del faltante de agua que se han suscitado en este sector.

### **1.1. OBJETIVO GENERAL.**

- Evaluar la red de abastecimiento de agua de modo que el estudio otorgue información que resulte en un apoyo para el acueducto municipal.

### **1.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS.**

- Calcular la demanda hídrica para la obtención del caudal de diseño actual y el esperado para el año 2040
- Analizar las disposiciones de caudal, presión, pérdidas y velocidad en la red para el período actual y para el año 2040.
- Realizar un estudio económico de costo-beneficio de una inversión correspondiente a la instalación de una válvula reguladora y una caja de registro para optimizar el funcionamiento de la red.
- Realizar un estudio de impacto ambiental correspondiente a la instalación y operatividad de una válvula reguladora de presión y una caja de registro.
- Realizar un estudio social enfocado en la importancia de llevar a cabo una evaluación en la red de agua de una comunidad hídricamente vulnerable.

## **2. ANTECEDENTES.**



San Francisco de Birrisito (ver Figura 1) es una pequeña comunidad ubicada en la provincia de Cartago, precisamente en el cantón de Paraíso.

Hacia el norte se ubica el Volcán Irazú, hacia el sureste la cordillera de Talamanca y Cerro de la Muerte. En la zona baja de Paraíso se ubica el valle de Orosí, el embalse de Cachí (cuenca del río Reventazón). La red fluvial de este cantón es considerable, con ríos como: Reventazón (Ujarrás), río Grande de Orosí, Río Macho, Pejibaye y Purisil. Entre las actividades económicas resalta el turismo en el Valle de Orosí, las ruinas de Ujarrás. La producción agrícola de hortalizas, legumbres, tubérculos y café. El tipo de clima se considera tropical. La temperatura promedio es de 19 °C. San Francisco de Birrisito está a una altura que ronda los 1400 *msnm*. En cuanto a la precipitación, se alcanzan los 2005 *mm* anuales (INDER, 2016).

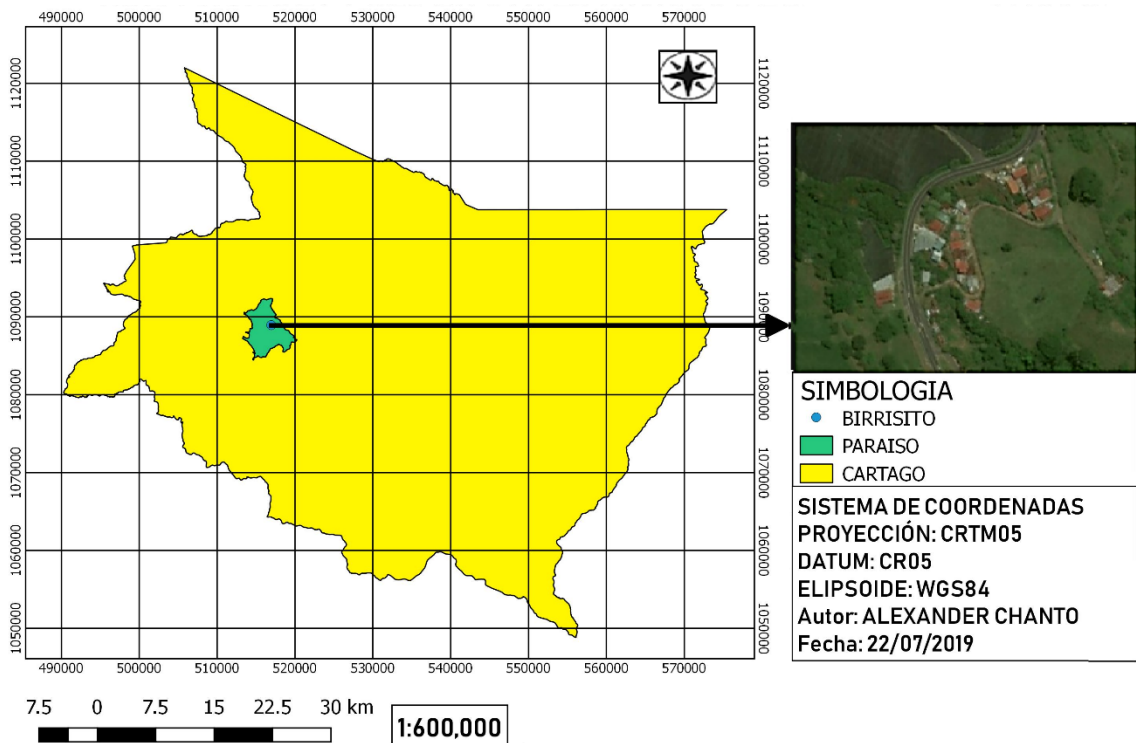


Figura 1. Comunidad principal San Francisco de Birrisito. Elaborado con: QGIS (2.14.17)

En la Figura 1 se observa la ubicación de la comunidad principal de San Francisco de Birrisito. La ubicación geográfica (latitud) de los desarrollos urbanos, además de la falta de fuentes de agua, resultan ser un problema para el abastecimiento de agua a la comunidad. Este análisis corresponde a una herramienta complementaria para el acueducto municipal,

de forma que se puedan llevar a cabo acciones sobre la red de agua y el sistema de abastecimiento, con un estudio basado en las disposiciones hidráulicas de la red de agua, obtenidas en la modelación para el período actual y futuro (año 2040).

### **3. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **3.1. ADMINISTRACIÓN DEL AGUA EN COSTA RICA.**

En Costa Rica una de las instituciones que se encarga de suministrar agua a la población, principalmente en la GAM (ver glosario, apéndice A.1) y algunos sectores en zonas costeras y rurales, es el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados por sus siglas en español AyA (apéndice A.1). Por otro lado, cuando el AyA por diversas razones no ejerce función alguna en la distribución de ciertas zonas, son las ASADAS las que fungen como órganos organizados por los vecinos y miembros de la comunidad para la administración y distribución del recurso agua.

Algunos aspectos importantes considerados por el AyA (2017) para el diseño de redes de agua son los siguientes:

#### **3.1.1. Población de diseño.**

Contempla la unidad habitacional. Este se multiplica por el factor de hacinamiento obtenido de los censos.

#### **3.1.2. Factores de demanda máxima.**

Asegura que esté disponible la cantidad de agua destinada por persona, multiplicando este factor por el caudal que esta necesita; este factor puede ser diario (1.2) u horario (1.8).

$$QMD = QPD \times FMD \times Ec \dots (3.1.2)$$

Donde:

*QMD*: caudal máximo diario (*L/d*).

*QPD*: caudal promedio diario (*L/d*).

*FMD*: factor demanda máximo diario u horario (1.2 y 1.8 respectivamente, AyA, 2017)

Complementario a ello, se emplea un factor de seguridad del 50 % para la determinación del caudal destinado para incendios (Bomberos de Costa Rica, 2013).

#### **3.1.3. Dotaciones.**

Es la cantidad de agua que requiere una persona por día según el sector geográfico, por ejemplo: en zona rural se necesita 200 *L*. Urbana 300 *L*. Costera y metropolitana 375 *L*.

$$Q_{MH} = \frac{QT}{A} \quad Ec \dots (3.1.3)$$

Donde:

$Q_{MH}$ : caudal máximo horario por abonado ( $L/d$ ).

$QT$ : caudal total (consumo humano total) ( $L/d$ ).

$A$ : total de abonados (58 para el caso de San Francisco).

### **3.1.4. Velocidad.**

Es la velocidad máxima que debe poseer el fluido en la tubería la cual no debe superar los 3 m/s y como mínima debe ser 0.6 m/s.

### **3.1.5. Consignas de presiones**

Son las presiones toleradas en la red de distribución. Estática: entre 12 *mca* y 50 *mca*. En puntos aislados la presión máxima admisible puede alcanzar los 70 *mca*. En período extendido la presión mínima puede ser de hasta 15 *mca*.

## **3.2. ESTUDIO POBLACIONAL.**

Debido a que un diseño o rediseño de una red de abastecimiento de agua corresponde a un proyecto a largo plazo, es preponderante realizar un estudio de crecimiento poblacional, con el objetivo de obtener una estimación de la población para un año determinado. De manera que el caudal de diseño esperado para el futuro pueda ser otorgado por el sistema. Para obtener la población futura se debe desarrollar la siguiente ecuación:

$$P(\text{año } n) = P(\text{año } 1) + R \times (\text{Año } n - \text{Año } 1) \quad Ec \dots 3.2.1$$

Donde:

$P$  (año  $n$ ): es la población del año futuro (a conocer).

$P$  (año 1): población del año anterior (conocida).

$R$ : factor de crecimiento.

$Año n$ : año futuro.

$Año 1$ : año anterior.

El factor  $R$ , se calcula conociendo 2 pares ordenados en población como demuestra a continuación:

$$R = \frac{(P_2 - P_1)}{(A_2 - A_1)} Ec \dots 3.2.2$$

Donde:

$P_2$ : Población estimada del año 2025 en el cantón de Paraíso (INEC, 2011).

$P_1$ : Población del año 2020 en el cantón de Paraíso (INEC, 2011).

$A_2$ : Año 2025.

$A_1$ : Año 2020.

Esta metodología resulta conveniente trabajarla en el orden de quinquenios o decenios. Así pues los años a trabajar serán incrementos de 5 o 10.

### **3.3. PRINCIPIOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS PARA SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUAS.**

#### **3.3.1. Principio de Bernoulli**

Relaciona los estados de energía en un fluido. El estado de energía potencial, de energía cinética y el flujo de energía. Es una relación basada en el principio de la conservación de la energía. La primera parte de la ecuación es la energía en forma de carga por presión, la segunda parte se refiere a la carga en forma de elevación y la última es carga en forma de velocidad. (Blasco, B., et al, 2007).

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho_1 v_1^2 + \rho_1 g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho_2 v_2^2 + \rho_2 g h_2 + Hf \quad Ec \dots (3.3.1)$$

Donde:

$P$ : energía de presión ( $m$ ).

$\rho v$ : energía cinética ( $m$ ).

$\rho g h$ : energía potencial ( $m$ ).

$Hf$ : pérdidas por fricción ( $m$ ).

### 3.3.2. Principio de Continuidad.

Esta relación permite conocer la velocidad de flujo de un líquido o gas a través de un sistema dado en cualquier punto, siempre que sean conocidos el caudal y los diámetros de la sección en estudio (Mott, 2006). La ecuación de continuidad es una representación del principio de conservación de la materia.

$$Q = VA \quad Ec \dots (3.3.2)$$

Donde:

$Q$ : caudal ( $m^3/s$ ).

$V$ : velocidad ( $m/s$ ).

$A$ : área ( $m^2$ ).

### 3.3.3. Pérdidas de energía.

Ocurren debido a la fricción generada por el movimiento de un fluido en un espacio confinado tal como una tubería. Existen tres posibilidades para que ocurran pérdidas por fricción:

- Contacto con la tubería.
- Rozamiento entre capas del mismo fluido (régimen laminar).
- Colisiones de partículas (régimen turbulento).

A continuación se presenta la ecuación 3.1.3 referente al cálculo de pérdidas por fricción en tuberías por el método de Hazen Williams (Mott, 2006):

$$H_f = 1,131 * 10^9 * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} * D^{-4,872} * L \quad Ec \dots (3.3.3)$$

Donde:

$H_f$ : pérdida de carga ( $m$ ).

$Q$ : caudal en ( $m^3/h$ ).

$C$ : coeficiente adimensional de Hazen Williams que depende del material (PVC = 150).

$D$ : diámetro interno de la tubería ( $mm$ ).

$L$ : Longitud de la tubería en ( $m$ ).

Las pérdidas de carga en el sistema presurizado no solo se deben al rozamiento que existe entre el líquido y la tubería, pues los accesorios pueden generar pérdidas en menor o mayor medida, las cuales se calculan mediante la ecuación 3.3.4.

$$Hf_2 = k * \left(\frac{v^2}{2g}\right) \text{ Ec ... (3.3.4)}$$

Donde:

$Hf_2$ : pérdida de carga debido a accesorios en (m).

$k$ : coeficiente de pérdida adimensional que depende del accesorio.

$v$ : velocidad del fluido en la tubería en (m/s).

$g$ : Aceleración de la fuerza de gravedad en (m/s<sup>2</sup>).

### **3.4. REDES DE DISTRIBUCIÓN.**

Las redes de distribución de agua son sistemas diseñados para múltiples propósitos (Arístegui-Maquinaría, 2016). Entre ellos están:

- Distribución de agua potable para industria, comercio o uso doméstico.
- Almacenamiento y distribución de agua contra incendios.

Una red de distribución está diseñada con:

- Una línea de distribución primaria y secundaria.
- La unión de una tubería secundaria a una primaria se le conoce como acometidas.

#### **3.4.1. Pérdidas de integridad hidráulica.**

La demanda de agua es son el motor de acción de los acueductos o entes distribuidores de agua. Una de las razones de esta afirmación es debido a que las fuentes de agua naturales son fluctuantes en muchos casos. Los profesionales o trabajadores encargados sector conocen en cierta medida, el comportamiento de las cantidades de agua que serán utilizadas a un momento específico, o bien, dónde serán utilizadas. Además, conocen las demandas por sector (Galuppini, et al., 2019). Antes de decidir el volumen de agua por sector, se debe considerar:

- Demanda base, que corresponde a las condiciones de un día promedio.
- El horario: si este es diurno o nocturno.
- La época del año.
- El caudal destinado para incendios.



Una caída de presión puede deberse al fallo de una bomba o de una válvula. Una baja de presión conlleva a una pérdida de caudal (según el principio de Bernoulli). Por otro lado, una presión alta puede llevar a un aumento de la cabeza de agua que puede ser perjudicial para el sistema. Para ello la determinación de bomba y tubería resulta vital en los diseños de distribución de agua de manera que las cargas de agua sean vencidas por la fricción.

Para garantizar la integridad hidráulica es muy importante la confiabilidad en la entrega. El sistema debe ser capaz de entregar aún en ausencia de energía eléctrica, cuando se presenten bucles dentro del sistema de distribución.

Otros factores que atentan con la integridad son: fugas o roturas en las tuberías, cambios súbitos en el flujo o la presión, emergencias, control inoportuno del sistema, deterioro de las tuberías (NRC, 2006).

### **3.4.2. Elementos en las redes de distribución**

Una red de distribución de agua potable es un sistema que contiene una diversidad importante de elementos, capaces de cuantificar y medir variables físicas específicas. Los aparatos y elementos imprescindibles para el funcionamiento de una red de distribución, tal como menciona Rebollo (2017), son los siguientes:

- Fuentes de agua: tales como ríos, acequias, nacientes o pozos de agua. Indica el punto de inicio para la distribución en una red, pues sin el recurso es imposible llevar a cabo la operación.
- Depósitos: consisten en los almacenamientos del recurso hídrico para poder dar abastecimiento a lo largo de un período de tiempo. Puede tratarse de depósitos naturales tal como los reservorios, o bien, depósitos construidos en concreto a nivel, enterrados o semi – nivel. También los tanques plásticos cilíndricos constituyen parte importante en los depósitos.
- Tubería: son elementos fundamentales para transportar el agua en los distintos puntos. Entre los materiales más utilizados en tuberías se encuentran: PVC, PE, fibrocemento, acero, hierro, hormigón.
- Bombas: son elementos importantes para proveer carga a puntos alejados o bien en sectores altos de una red de distribución. Las bombas también pueden ser empleadas para la obtención de agua.

- Filtros: elementos utilizados para la limpieza del agua. Evitan la turbiedad del agua por la presencia de partículas gruesas. Y además proveen de una protección a las tuberías, disminuyendo el paso de residuos a lo largo de ellas.
- Caudalímetros (medidores): son aparatos utilizados básicamente para la contabilización del volumen de agua del que un abonado pueda hacer uso a lo largo de un determinado período de tiempo. Importante para efectos tarifarios y cobros municipales.
- Codos, T, Y: elementos básicos para formar derivaciones y cambios de dirección en la red.
- Juntas (bridas, adaptadores, uniones): según el tipo de conexión que tenga una válvula o un accesorio, así variara la elección de una unión. Así pues, es frecuente que las válvulas requieran bridas para su acople, y las tuberías acoples o uniones (cementos, termo fusión u otros). La conexión tipo brida es empleada en sistema de media a alta presión, otorgando mayor resistencia, además de ser mecanismo útiles para la separación de dos segmentos de tubería, evitando un proceso destructivo (Cinca, 2018).
- Válvulas: son elementos de diversa índole. Algunas de las más utilizadas en las redes son entre ellas, se encuentran las válvulas reguladoras. Estas son válvulas que pueden modificar las condiciones del flujo después de su paso por la misma. Forman parte de este grupo válvulas de bola, mariposa o compuerta. La válvula que para efectos de este proyecto adquiere relevancia es la válvula reguladora de presión o bien PRV por sus siglas en inglés *Pressure reducing valve*.

El funcionamiento en estas válvulas se puede denominar de dos tipos:

- a. Control no modulante: este tipo de control es simple. Es decir, la apertura de la válvula es predeterminada de manera manual por un operario, y por ende, la válvula no hará cierres ni aperturas parciales al pasar caudal. En la Figura 2 se aprecia el diseño de una válvula no modulante, es decir, de operación manual por medio de un tornillo.

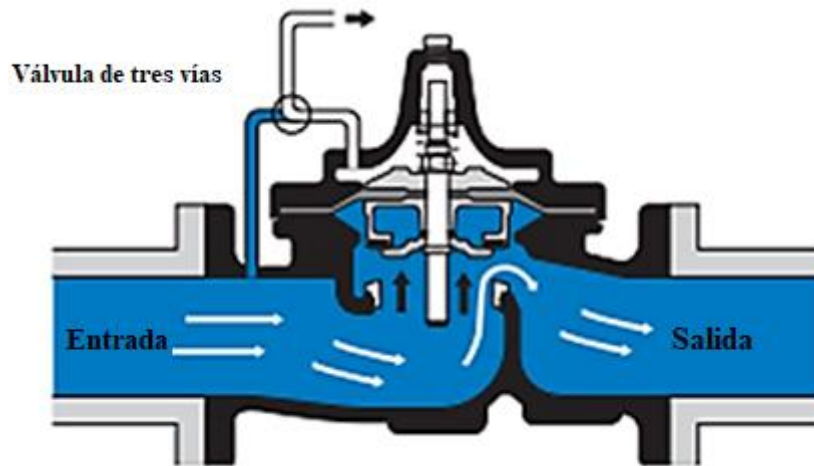


Figura 2. Modelo de una válvula reguladora no modulante. Fuente: CLA-VAL, 2019.

- b. Control modulante (válvulas automáticas): el funcionamiento por medio de resorte permite, ajustarse para modificar las condiciones de carga a la salida de ella. Están diseñadas para que su operación sea controlada automáticamente. El diafragma de control (resorte) mantiene la salida de la válvula a una presión estable (CLA-VAL, 2019).

En la Figura 3 se aprecia el diseño de una válvula de control automático, donde por medio de un control estrangulado y resorte principal, la válvula permite el cierre o apertura parcial.

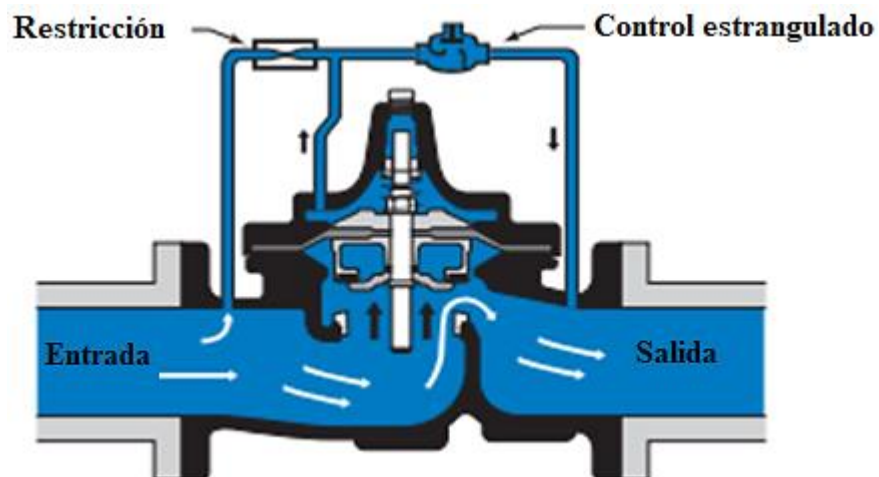


Figura 3. Modelo de una válvula reguladora automática. Fuente: CLA-VAL, 2019.

Corcho y Duque (2005) mencionan que una válvula reguladora está conformada por:

- Cuerpo: conocida también como carcasa. Alberga todo el conjunto de piezas móviles.

- Conjunto móvil: formado por un diafragma, dos émbolos y un eje. Además de los empaques.
- Cubierta: pieza instalada sobre el cuerpo y que alberga el conjunto móvil.

El funcionamiento de una válvula de control modulado se debe al accionamiento automático de la válvula auxiliar (o control estrangulado). La válvula piloto está diseñada, de igual manera, con un diafragma y un resorte ajustable. Dicho resorte, se ajusta manualmente (siguiendo las indicaciones en el manual del usuario), de manera que la presión de salida sea constante.

Cuando la presión en la salida del sistema empiece a exceder la presión preestablecida, la válvula auxiliar se empezará a cerrar (el resorte se comprime). Este cierre provoca que el flujo aumente su velocidad (ver ecuación de continuidad, apartado 3.3.2) provocando que la presión en el interior de la válvula principal aumente.

Este aumento de presión es percibido por el resorte de la válvula principal, cuya cámara superior se cierra, hasta que la válvula principal encuentre la presión adecuada de salida, según el ajuste que el usuario haya realizado inicialmente.

El proceso ocurre de manera inversa cuando la presión de salida de la válvula principal es menor a la preestablecida. Así pues, el resorte en el control estrangulado se dilatará, provocando que el flujo se expanda (a menor velocidad). La entrada de este flujo a la válvula principal provocará una caída de presión en la cámara, por lo que la válvula principal empezará a abrirse hasta equilibrar la presión de salida (Corcho & Duque, 2005).

Una de las desventajas en la operación de una válvula hidráulica es el ruido que puede generarse. De las Heras (2011) menciona que el ruido en la operación de una válvula de control puede ser del tipo hidráulico, es decir, el que provoca el fluido cuando se mueve a grandes velocidades, por cambios fuertes de dirección, restricciones o contracciones, así como también el ruido mecánico, originado por vibraciones y choques entre el fluido y el cuerpo de la válvula, provocadas por fluctuaciones de presión.

No obstante, cuando estos fenómenos se presentan en una válvula, se debe principalmente a que la válvula trabaja a su capacidad más alta (niveles críticos).

Las soluciones que De las Heras (2011) menciona para mitigar el ruido corresponden inicialmente a una adecuada selección de la válvula, cuyo diseño de obturador y zona de expansión permita una velocidad estable (uniforme) de salida para el fluido.

La instalación de un silenciador en el cuerpo de la válvula o bien aguas debajo de ella corresponde a una segunda solución para suprimir en buena medida el sonido.

### **3.4.3. Instalación de una válvula reductora de presión.**

AyA (2018) menciona que para llevar a cabo la instalación de una válvula nueva de control, se debe seguir las siguientes recomendaciones:

- Remoción de la sección de tubería donde se localizará la válvula y su caja.
- Instalación de las uniones correspondientes (bridas) en la tubería.
- Construcción del bloque de soporte para la válvula.
- Calibración según el manual del usuario (HELMAN S.A.S., 2016) y operación de la válvula.

Adicionalmente, en la publicación del AyA (2018) se menciona que una vez instalada la válvula se debe realizar un informe de instalación de la misma para actualizar el inventario.

Entre los datos de interés resaltan:

- Datos generales: Fecha de instalación, nombre y código.
- Características (marca, modelo, diámetro).
- Manual del usuario, consignas de operación.
- Ubicación georreferenciada de la válvula (archivo tipo shape).

### **3.4.4. Caja de registro para válvula**

El AyA (2017) menciona que cualquier válvula reguladora, sostenedora, control o de alivio deben estar instaladas en una caja protectora. Esta corresponde a una estructura en concreto, con una tapa metálica de 90 *cm* de lado que evite el hurto o el daño a la válvula que pudiesen provocar terceros. La función principal de una caja de registro es permitir el acceso a la válvula reguladora de presión para su debido mantenimiento u operación. Además, es importante que la caja esté diseñada con los drenajes correspondientes, para evitar la anegación y el exceso de humedad dentro de ella.

### 3.5. ESTUDIO ECONÓMICO

El estudio económico corresponde a uno de los trabajos complementarios dentro de una investigación o proyecto de tipo ingenieril. Existen numerosas variantes para un estudio económico, pues en ellos se contemplan distintas formas de inversión, costos y utilidades que dependen del tipo de proyecto, así como de los plazos de tiempo (corto o largo plazo). El estudio económico actual se basa en el análisis de tipo costo – beneficio sobre una válvula reductora de presión. El análisis costo - beneficio es un ejercicio en el que se pretende determinar es cuál la mejor forma de inversión, siendo la elegida aquella que cumpla con el presupuesto establecido y los requerimientos técnicos que se demanden. El análisis económico se reduce a decidir si la válvula a instalar sea del tipo control modulante (automática) o manual, roscada o bridada (Boulanger, Espinoza & Fonseca, 2007).

### 3.6. ESTUDIO AMBIENTAL

Los estudios de impacto ambiental son parte importante dentro de un proyecto de índole ingenieril, dado que actualmente las empresas e instituciones deben garantizar la protección medio ambiente y de los recursos naturales, en cuyo caso son tareas obligatorias. El objetivo principal entre muchos otros, es lograr la sustentabilidad del planeta para las generaciones futuras. Deben ser incluidas dentro de los proyectos de mejora, ampliación, optimización u otros donde se pueda generar un impacto ambiental sobre las condiciones iniciales del entorno donde se desenvuelve el trabajo. Para ello se puede llevar a cabo el desarrollo de una matriz, como lo es la matriz de Arboleda. En ella se asigna valores de impacto a los distintos criterios que se han de considerar en un proyecto de infraestructura o construcción.

#### 3.6.1. Matriz de Arboleda.

Arboleda (2008) hace referencia a su método de evaluación de impacto ambiental, el cual cuenta con ciertas ventajas tales como: fácil empleabilidad, versátil, es modificable y puede emplearse aun cuando la información no es del todo completa.

Los criterios que forman parte de esta matriz son los siguientes:

- Calificación ambiental ( $Ca$ ): es la representación de la gravedad o grado de beneficio que un impacto pueda generar. Se calcula según la fórmula:

$$Ca = C x (P (E x M + D)) Ec \dots (3.6.1)$$

Donde:

- Clase (*C*): define si el cambio a analizar afecta o favorece el medio ambiente. Adopta los valores: 1 y -1.
- Presencia (*P*): se refiere a la posibilidad de ocurrencia. Toma un valor de 0 a 1 siendo 0 “muy poco probable” y 1 “cierto”.
- Duración (*D*): hace referencia al período de tiempo por el cual se prolonga el cambio y las consecuencias y efectos del mismo. Adopta valores de 0 si es menor a 1 año. 0.2 – 0.4 de 1 a 4 años. 0.4 – 0.7 de 12 a 18 meses. 0.7 - 0.99 de 1 a 12 meses. 1 cuando el tiempo es menor a 1 mes.
- Evolución (*E*): se refiere a la velocidad con que transcurre el despliegue del impacto desde que se originan los primeros problemas. La escala empleadas es la misma aplicada en la duración.
- Magnitud (*M*): es la magnitud del cambio ocasionado por el aspecto ambiental analizado. Se emplea 0 cuando el daño es menor al 20%. 0.2 -04 para un 20 – 40% de daño. 0.4 – 0.7 para 40 – 70%. 0.7 – 0.99 para 60 – 80%. 1 para 80% o más.

### **3.7. ESTUDIO SOCIAL**

Un estudio social es un trabajo complementario a la investigación o proyecto técnico, cuyo objetivo principal es dilucidar el impacto que el proyecto de ingeniería generará sobre una determinada población o comunidad a corto o largo plazo. En el caso del estudio y evaluación de la red de agua, la importancia recae en reconocer la utilidad de un informe técnico como el presente para la toma de decisiones en el acueducto, en una comunidad que puede considerarse como hídricamente vulnerable.

#### **3.7.1. Problemas recurrentes en las redes de distribución.**

Una red de distribución de agua potable puede operar hidráulicamente de una manera óptima, pero eso no significa que con el paso del tiempo, su capacidad sea suficiente para satisfacer la demanda en un sector en crecimiento. Además, existen errores de tipo humano (negligencia o desconocimiento), que pueden ser perjudiciales a la vida útil y calidad del sistema. Durán & Rodríguez (2006) mencionan problemas comunes que los administradores de redes de agua potable han de hacer frente:

- Crecimiento poblacional. Con el paso del tiempo, las comunidades tienden a crecer y por lo tanto la demanda de agua se incrementa. Los diámetros de las tuberías, la capacidad de bombeo (de ser el caso) y las fuentes de agua pueden resultar, en el peor de los casos, insuficientes para dotar a los habitantes en horario y volumen. Falta de válvulas para desviar caudal a otros sectores es un problema común también.
- Gestión. Una distribución inadecuada del recurso hídrico que derive en faltantes de este recurso para ciertos sectores. En algunos casos la tramitación (burocracia), pueda ser para algunos entes administrativos, un obstáculo para la obtención del derecho (concesión) sobre una fuente de agua.
- Falta de inversión en infraestructura. En ocasiones el recurso destinado para la atención de la demanda hídrica resulta ser “insuficiente”, dando origen a una limitante para la ejecución de proyectos competentes y visionarios.
- Mantenimiento inadecuado. Errores de los cuales no están exentos los elementos de una red. La mitigación de estas fallas de tipo humano, se alcanza por medio de una buena capacitación, preparación y conocimiento del sistema en estudio.

### **3.7.2. Situación de abastecimiento en la red de San Francisco de Birrisito.**

En el año 2014 se puso en evidencia la problemática que aqueja al sector norte del cantón de Paraíso. Por ejemplo Torres (2014) menciona, que a criterio de los funcionarios de la municipalidad, los problemas de abastecimiento de agua se deben principalmente a:

- Pérdida de una concesión de agua.
- En verano, las fuentes bajan el caudal por lo que los tanques se mantienen bajo los niveles óptimos de abastecimiento.
- Tubería antigua (50 años) de un diámetro bajo incapaz de solventar la demanda hídrica actual.

González (2014) menciona también que la tubería antigua es considerada una carencia para el actual sistema de abastecimiento, por lo que el acueducto analiza la posibilidad de realizar un cambio de tubería. El AyA inspeccionó un pozo que es capaz de otorgar hasta 8 L/s, y que actualmente es utilizado para satisfacer la demanda en este sector.

Finalmente Rojas (2014) apunta que las comunidades se ven afectadas por faltantes de agua (cortes), y esto se debe en parte al creciente desarrollo urbanístico en el sector.



## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**

## 4.1. DEMANDA HÍDRICA. ESTUDIO POBLACIONAL.

### 4.1.1. Cálculo de caudal máximo por abonado.

Para modelar la red de distribución es importante establecer el caudal que se transporta en las tuberías. Para ello se calculó, según las indicaciones del Cuadro 1 el caudal para abastecer una determinada población. La dotación empleada depende de la ubicación geográfica (rural, costera o metropolitana), además se realizó la corrección de caudal máximo para las hora de mayor demanda (ver apartado 3.1.2.).

Cuadro 1. Cálculo de caudal máximo. Fuente: AyA, 2017.

Columna.	Descripción.
1	Número de abonados según registro.
2	Subtotal de abonados (4 habitantes por habitación).
3	Dotación ( $L/p/d$ ).
4	Caudal total en ( $L/d$ ).
5	Factor de demanda máximo diario (1.2) ( $L/d$ ).
6	Factor de demanda máximo horario (1.8) ( $L/d$ ).
7	Caudal total máximo horario en ( $m^3/s$ ).

En la primera casilla referente al número de abonados, se ingresó la cantidad de casas de habitación, comercios o aquellas empresas que hacen uso del sistema de agua. Para esta evaluación el valor utilizado fue 58 casas (correspondientes a los 58 medidores levantados, ver apartado 4.2.1). En la siguiente casilla, se multiplica el valor correspondiente a la cantidad de habitantes. En el caso de esta red de abastecimiento, solo se cuenta con casas de habitación, por lo que el valor de habitantes correspondiente a una comunidad rural es de: cuatro por abonado (AyA, 2017).

La casilla tres corresponde a la dotación  $L/p/d$ , el cual es un valor de 200  $L/p/d$  para el caso de comunidades rurales. Si se tratase de zonas costera o urbana, se puede consultar los datos en la bibliografía correspondiente a las dotaciones de agua del AyA (2017). La casilla cuatro

corresponde simplemente a la multiplicación de la dotación por el número total de habitantes obtenido en la casilla dos.

La casilla cinco y seis corresponde a la aplicación de un factor de demanda máxima diario obligatorio según lo norma el diseño del AyA (2017) para efectos de variaciones en la demanda. Para ello se sigue la ecuación 3.1.2.

Finalmente se calcula el consumo humano actual total considerando un factor de seguridad del 50%, correspondiente al valor destinado para caudal de incendio (Bomberos de Costa Rica, 2013).

Una vez obtenido el consumo humano total actual, se obtuvo el valor de caudal destinado por abonado (demanda). Se dividió este consumo humano total entre la totalidad de los abonados (58 abonados) (ver relación 3.1.3).

#### **4.1.2. Estudio poblacional.**

Para efectos de una modelación proyectada a un período de tiempo futuro, resulta conveniente realizar un estudio de crecimiento poblacional. En el caso de la comunidad de San Francisco de Birrisito, se realizó un estudio de crecimiento poblacional para un período de 20 años, es decir, con miras al año 2040. Para ello se desarrolló la ecuación 3.2.1 correspondiente a un crecimiento aritmético.

Se empleó este método debido a que esta ecuación es conveniente utilizarla en poblaciones cuyo crecimiento proyectado no es muy significativo, es decir, para comunidades rurales o bien, ciertas comunidades costeras.

Se tomó como valor actual de la población como el valor correspondiente a 58 abonados y se multiplicó por 4 habitantes. Es decir, 232 personas.

Posteriormente, el factor  $R$  utilizado (factor de crecimiento) corresponde al del cantón de Paraíso. El cálculo de este factor se desarrolló siguiendo la ecuación 3.2.2. El cálculo de  $R$  corresponde a 338.4 (sección 5.1.2 de resultados).

El factor  $R$  se calculó sobre un dato de población conocido (2020), y un dato de población proyectado (2025). Como se mencionó, el cálculo de  $R$  se llevó a cabo con datos conocidos y datos proyectados, así pues, el  $R$  debe ser el mismo en cada cálculo de proyección, dado que no es matemáticamente certero calcular un nuevo  $R$  únicamente sobre datos proyectados.

Finalmente los años empleados en la ecuación 3.4.2 fueron 2020 y 2025. De esta manera se obtuvo la población proyectada para la comunidad de San Francisco de Birrisito para el año 2025. El proceso se repitió por cada quinquenio hasta el año 2040. Como se mencionó con anterioridad, el valor de  $R$  es el mismo para cada uno de los cálculos.

## **4.2. LEVANTAMIENTO Y PROCESO DE DATOS.**

La modelación de flujo en la tubería se realizó con el software WaterCAD (V8i). Este es un software de licencia comercial que permite el cálculo de parámetros hidráulicos en una red de distribución de agua potable (abierta o cerrada). Para ello se requirió previamente de datos de elevación de cada uno de los nodos (caudalímetros), así como los datos de longitud, diámetro, SDR y material de las tuberías.

Los datos de longitud de tubería fueron obtenidos por medio del software QGIS (2.14.17) y la imagen aérea satelital Bing (2019). Los datos de diámetros, SDR y material es información que el acueducto municipal maneja y de donde fue posible obtenerla. Los datos de accesorios (ubicación y tipo) fue facilitada de igual manera por el acueducto municipal.

Para los datos de elevación se procedió a realizar el levantamiento respectivo, como se detalla a continuación.

### **4.2.1. Levantamiento de los puntos.**

Se realizó el levantamiento de cada uno de los medidores (caudalímetros) (ver Figura 6), localizados en la red de distribución de la comunidad de San Francisco de Birrisito. Se solicitó el consejo del ingeniero encargado, quién de manera general con miembros del acueducto, optaron por discriminar el uso de una estación total para el levantamiento.

Se argumentó que para la finalidad de este trabajo de evaluación, específicamente en esta comunidad del cantón de Paraíso, la precisión de un navegador de mano era adecuada. De manera que el instrumento que se utilizó para llevar a cabo el levantamiento de los puntos fue un navegador de mano marca: Garmin GPS, modelo: Map 62s. Consideraciones importantes acerca de este dispositivo:

- Precisión de  $\pm 10$  m, sentido horizontal.
- Precisión de  $\pm 3$  m, altímetro.

- Si el navegador de mano se utiliza cerca de dispositivos que emplean frecuencias cercanas a las frecuencias de los sistemas de posicionamiento global, es posible que se presente una degradación en el uso (interferencia) (Garmin, 2011).

El levantamiento de los puntos fue realizado el día: 12 de septiembre de 2019. Las condiciones climáticas fueron medianamente favorables. Cielo con indicios de nubosidad, sin presencia de lluvias o vientos.

El dispositivo electrónico de comunicación móvil (celular) se mantuvo en modo avión durante el proceso. En esta comunidad rural, la gran mayoría de los terrenos son de uso agrícola mas no de uso forestal, por lo que la presencia boscosa ubicada específicamente alrededor de los medidores (caudalímetros) fue despreciable. Esta información es relevante, pues la cobertura satelital es más intensa en terrenos despejados.

Posteriormente el archivo de puntos obtenido del navegador de mano, fue cargado al Sistema de Información Geográfico de licencia libre denominado QGIS (versión 2.14.17).

#### **4.2.2. QGIS (2.14.17).**

Este software de licencia libre permite el análisis de información geográfica. En este caso: la topografía y ubicación de la red de distribución, la altitud de los nodos y la distancia de las tuberías. Además, presenta facilidades para la confección de mapas y cartografía.

Los puntos obtenidos en el levantamiento fueron cargados al programa como un archivo shape (.shp). Este corresponde a un archivo shape de puntos, y cada punto representa cada uno de los medidores levantados en campo.

Se trabajó un segundo archivo shape (de líneas) correspondientes al trazado de las tuberías. Se procedió a cargar la imagen satelital: Bing Aerial (2019). Para cargar esta imagen, se ingresó a la pestaña plug-in del panel de opciones y luego se ingresó a los recursos digitales. Con la imagen satelital cargada, se realizó el acercamiento a la zona de interés, en este caso: la comunidad de San Francisco de Birrisito, Paraíso de Cartago. Con la ayuda de dos funcionarios (ingeniero y fontanero) y con su conocimiento acerca de la ubicación de las tuberías, se realizó el trazado de la red sobre la imagen satelital. Una vez realizado el trazado completo de la red de agua, se generó el archivo shape correspondiente a las tuberías.

En la herramienta de atributos de QGIS se trabajó con dos comandos importantes, el primero se utiliza para medir la distancia de un nodo a otro (comando: medir línea) y el segundo para identificar la altura de dichos nodos (comando: identificar objetos espaciales).

Con respecto a la ubicación y tipo de accesorios (para efectos de determinar el factor  $k$ ), se procedió a consultar a los fontaneros.

Con la información completa de los nodos, tuberías y accesorios, se procedió a trabajar con el software denominado WaterCAD (V8i) para la consiguiente determinación de los parámetros de pérdidas, caudal, velocidad y carga (apartado 4.2.)

#### **4.2.3. Confección de mapas.**

Todos los mapas fueron realizados con la herramienta: “New Print Composer”, ubicada en el panel de herramientas del Software QGIS 2.14.17.

El mapa de curvas de nivel sea realizó generando un archivo tipo ráster de los datos de elevación obtenidos del levantamiento de los puntos. Se ingresó a la herramienta “Raster”, luego en la opción “Interpolation”. Posteriormente, al archivo ráster obtenido se le extrajo un archivo tipo shape con las curvas de nivel, ingresando nuevamente a la herramienta “Raster”, en la opción “Extraction”, y se ingresó a “Contour”.

### **4.3. MODELACIÓN DE LA RED EN WATERCAD (V8i).**

#### **4.3.1. Pérdidas de carga en tubería.**

Las pérdidas de carga en tuberías se calculan respecto al caudal que se transporta, el material de fabricación, diámetro interno, y longitud de la tubería, con el método de Hazen Williams, como se muestra en la ecuación 3.3.3.

En el software WaterCAD (V8i), se encuentra habilitado en el panel izquierdo, el tipo de método que se puede emplear en el cálculo de pérdidas. Dichos métodos son Darcy Weisbach y Hazen Williams. El profesional a cargo del acueducto municipal recomendó la aplicación del método de Hazen Williams para diámetros de tubería de 1 ½” o más.

Dado que la gran parte del sistema contempla tuberías de diámetros superiores a la 1 ½”, se optó por configurar el software con la opción de Hazen Williams.

#### **4.3.2. Pérdidas en accesorios.**

El software WaterCAD (V8i) interpreta las pérdidas secundarias como pérdidas longitudinales y no puntuales. Para digitar el valor de pérdida secundaria en el software se seleccionó la tubería siguiente al nodo, es decir, aquella tubería posterior al accesorio según el sentido de flujo. En la pestaña “propiedades” se digitó el valor correspondiente de pérdidas en la opción “Minor Loss Coefficient”. La ecuación que el software emplea es la correspondiente a la ecuación 3.3.4.

#### **4.3.3. Diámetro y material.**

Para simplificar la introducción de los datos, el proceso realizado consistió en seleccionar simultáneamente todos aquellos elementos que compartieran información. Así pues para introducir el valor de diámetro por ejemplo, primero se seleccionó todas aquellas tuberías cuyo valor de diámetro fuese el mismo. Seguidamente se presionó el click derecho y se ingresó a la opción “Data Table”.

Una vez allí se debe ubicó la columna correspondiente al diámetro (“diameter”) y se dió click derecho en la parte superior de la columna, de modo que la opción “Global Edit” fuese visible.

En “Global Edit” se introdujo el valor deseado de diámetro. De esta manera, el valor de diámetro digitado fue el mismo para todas las tuberías que previamente seleccionadas.

Este proceso se realiza de igual manera para el establecer el material de tubería (“material”).

#### **4.3.4. Elevación, demanda y longitud.**

Para ingresar la longitud se procedió de manera individual por cada tubería. Se ingresó a la pestaña “propiedades” y luego al parámetro “length”. La distancia calculada de tubería en el software QGIS 2.14.17 (apartado 4.1.2.) se ingresó al parámetro “length” del software WaterCAD (V8i).

De manera similar, se procedió a ingresar el valor de elevación a cada nodo. Individualmente, se seleccionó un nodo, y en la pestaña “propiedades” se ingresó al parámetro “elevation”. Allí se digitó el valor de altitud correspondiente al nodo según los datos de altitud obtenidos del levantamiento de los puntos (apartado 4.1.1.).

Para la demanda, se procedió de manera global a cambiar el valor para todos los nodos. En la barra de herramientas “tools”, se ingresó a la opción “Demand Control Center”. Allí, se localizó el parámetro “Base Demand”, en el cual se ingresó el valor de la demanda de manera global.

Dado que se realizó dos modelaciones (actual y año 2040) se emplearon dos valores de demanda, determinados en la secciones 5.1.1. y 5.1.2 de resultados, respectivamente. El cálculo de la demanda se explicó en el apartado 4.1.1.

#### **4.3.5 Caudal, velocidad, pérdidas y carga en tuberías y nodos.**

Para el cálculo del valor de estas disposiciones, el software WaterCAD realiza una ejecución iterada. En cuanto al número de repeticiones en las opciones de iteración, no se manipuló el valor predeterminado del sistema.

Antes de obtener los resultados de cada una de las tuberías y nodos, es importante que cada elemento del proyecto posea sus respectivas características y no quede información sin digitar. Para ello resulta útil el comando “Validate” ubicado en el sector superior del programa.

Una vez que el software corrobore que la información es correcta y completa, se procede a la ejecución. Las ecuaciones que emplea el software como se hizo mención anteriormente son: Bernoulli (3.3.1), Hazen Williams (3.3.3.) y pérdidas secundarias (3.3.4).

Para conocer los resultados, se ingresó a la pestaña “Report”, en el apartado “Element tables”. Allí se seleccionó los resultados deseados, ya sea en tuberías, nodos, válvulas u otro elemento de interés.

#### **4.4. ESTUDIO ECONÓMICO.**

Por medio de un estudio de ingeniería económica, se consideró una alternativa de inversión correspondiente a una válvula reguladora y caja de registro, con miras a solventar el problema de presión que los resultados arrojaron en la zona baja de la red de distribución.

Se determinó los costos por concepto de mejoras y rediseño de la red de abastecimiento. Se realizó la sumatoria de los precios de cada uno de los procesos que conforman la instalación de la válvula y la caja de registro.



Posteriormente se realizó el análisis costo – beneficio, donde se contempló las características y ventajas de una válvula de control modulado (bridada) sobre una válvula reguladora roscada y se seleccionó aquella alternativa que cumpliera con el requerimiento técnico en el sistema.

#### 4.5. ESTUDIO AMBIENTAL.

El análisis ambiental se enfocó al estudio de una mejoría en el sistema de distribución, como lo es la construcción y operación de la caja de registro y válvula reguladora. Se realizó un estudio por medio del método de Arboleda para determinar el impacto ambiental que puede existir al instalar la caja de registro u operar el sistema con la válvula. Tal como se muestra en el Cuadro 2, la asignación de los valores a cada una de las casillas, se llevó cabo de manera subjetiva, estimando los parámetros según el grado de impacto esperado.

Cuadro 2. Modelo para Matriz de Arboleda. Fuente: Arboleda, 2008.

<b>Fase</b>	<b>ASPI</b>	<b>Medio</b>	<b>Clase</b>	<b>Presencia</b>	<b>Duración</b>	<b>Evolución</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Ca</b>	<b>Impacto ambiental</b>
Fase 1	A	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	-	-	-	-	-	-	-	-
Fase 2	D	-	-	-	-	-	-	-	-
	E	-	-	-	-	-	-	-	-
Fase n	F	-	-	-	-	-	-	-	-

#### 4.6. ESTUDIO SOCIAL.

Por otra parte, el estudio social se enfocó en la consulta de fuentes de información digitales sobre el avance de las obras hidráulicas en la comunidad de San Francisco de Birrisito, así como la zona alta del cantón de Paraíso (afectado por el faltante de agua). El estudio se abordó con un enfoque perspectivo sobre la situación que a futuro se podría percibir en la red de abastecimiento, con las medidas y acciones adoptadas en el presente.

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 5.1. ESTUDIO POBLACIONAL.

### 5.1.1. Demanda actual del recurso hídrico.

En el Cuadro 3 se presentan datos relevantes al tamaño de la población, la información de la demanda y el resultado del caudal máximo diario requerido para abastecer la población.

Cuadro 3. Estimación de la demanda teórica actual en San Francisco de Birrisito.

Descripción	Valor numérico
Número de abonados según registro	58
Subtotal de abonados (4 habitantes por habitación)	232
Dotación ( $L/h/d$ )	200
Caudal total en ( $L/d$ )	46400
Factor de demanda máximo diario (1.2) ( $L/d$ )	55680
Factor de demanda máximo horario (1.8) ( $L/d$ )	100224
Caudal total máximo horario en ( $m^3/s$ )	0.0012

El dato de caudal máximo horario es relevante para efectos de la modelación en período extendido realizada en el software WaterCAD, de manera que se pueda comprender el comportamiento de la red en la hora de mayor demanda de recurso hídrico.

Se obtuvo que el valor del consumo humano actual total es de  $6.12 m^3/h$ , del cual:  $0.1055 m^3/h$  corresponde al valor de caudal destinado por abonado (demanda).

### 5.1.2. Demanda futura (2040) de recurso hídrico.

Los Cuadros 4, 5 y 6 son los resultados obtenidos del seguimiento de la metodología para la determinación del crecimiento poblacional, según el modelo aritmético. Cabe destacar que para la obtención del factor (3.4.2), se utilizó datos de población de Paraíso,

$$R = \frac{(P_2 - P_1)}{(A_2 - A_1)}$$
$$R = \frac{(62932 - 61240)}{(2025 - 2020)}$$
$$R = 338.4$$

Los datos de población utilizados, corresponden a los consultados en el estudio de proyección poblacional del INEC (2011). Los resultados de proyecciones de población para el cantón de Paraíso y para el distrito de Birrisito se presentan a continuación en los cuadros 4, y 6 respectivamente:

Cuadro 4. Proyección de crecimiento poblacional. Método aritmético. Paraíso.

Quinquenio	Población (Número de Habitantes)
2000	52858
2005	55490
2010	56330
2015	58450
2020	61240
2025	62932
2030	64624
2035	66316
2040	68008

En la Figura 4 se observa un gráfico alusivo a la proyección de crecimiento poblacional para el año 2040 en el Cantón de Paraíso, Cartago, con un factor de correlación del 0.99 % y un comportamiento lineal.

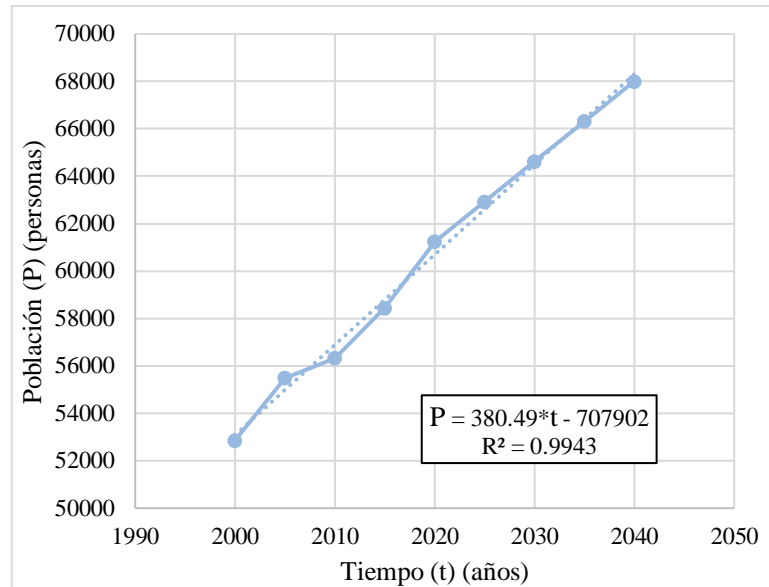


Figura 4. Crecimiento poblacional esperado al 2040, cantón de Paraíso. Elaborado con (Excel 2013).

Cuadro 5. Tasa de crecimiento San Francisco de Birrisito.

Quinquenio	Tasa de crecimiento (%)
2025	102.76
2030	102.69
2035	102.62
2040	102.55

Cuadro 6. Proyección de crecimiento poblacional San Francisco de Birrisito.

Quinquenio	Población (Número de habitantes)
2020	232
2025	238
2030	245
2035	251
2040	258

Con la población estimada para el año 2040, se realizó el procedimiento 4.1.1 nuevamente, para el cálculo de la demanda hídrica en el año 2040. En el Cuadro 7 se observa el resultado

del caudal máximo horario y el caudal máximo horario considerando un factor de seguridad del 50% respectivamente.

Cuadro 7. Proyección de la demanda teórica para San Francisco de Birrisito, año 2040.

Descripción	Valor numérico
Subtotal habitantes	258
Dotación ( $L/h/d$ )	200
Caudal total en ( $L/d$ )	51600
Factor de demanda máximo diario (1.2) ( $L/d$ )	61920
Factor de demanda máximo horario (1.8) ( $L/d$ )	111456
Caudal total máximo horario en ( $m^3/s$ )	0.0013

Posteriormente se calculó considerando el factor de seguridad del 50%, dando como resultado un valor de consumo humano total para el año 2040 de  $7.20 m^3/h$ , donde:  $0.1241 m^3/h$  corresponde al valor de caudal destinado por abonado (demanda).

## 5.2. LEVANTAMIENTO DE PUNTOS.

### 5.2.1 Distribución de abonados.

Los resultados obtenidos del levantamiento topográfico para cada uno de los medidores, realizado con navegador de mano, se presentan a continuación en la Figura 5.

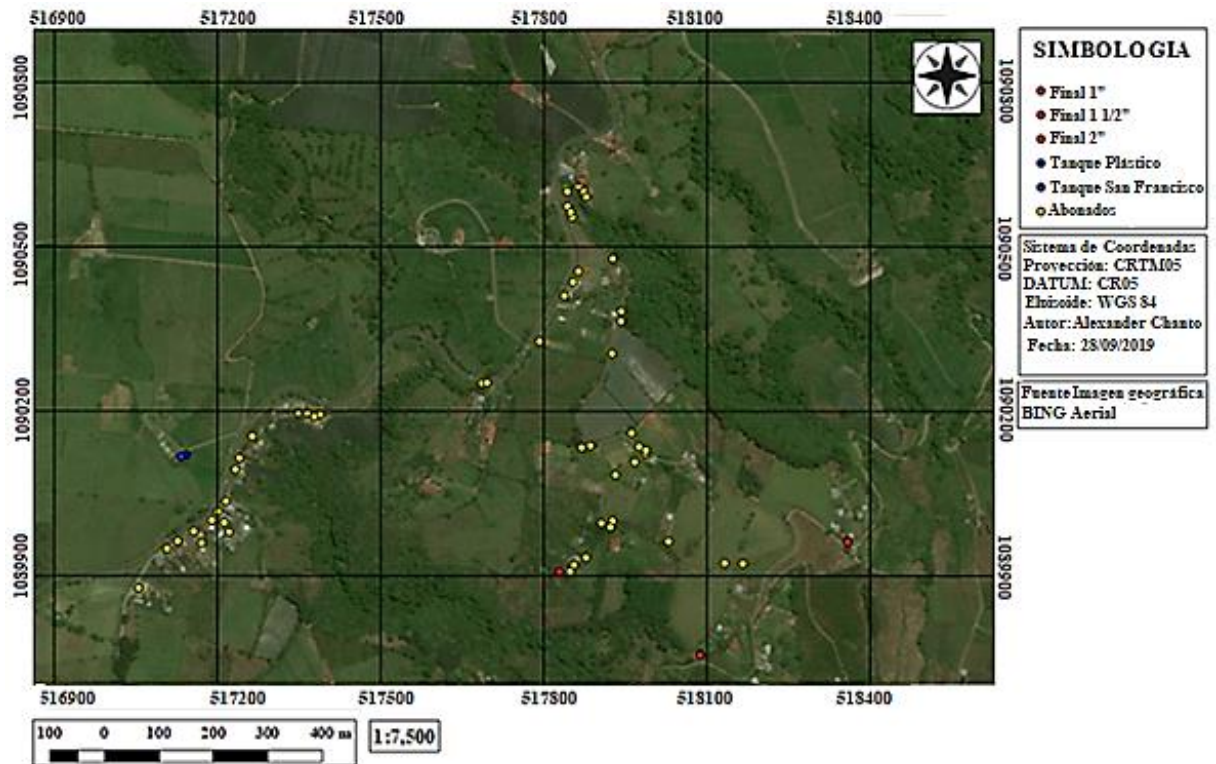


Figura 5. Distribución de abonados de la red de San Francisco de Birrisito. Elaborado con: QGIS (2.14.17.).

Como se presenta en la simbología de la Figura 5, la cantidad de abonados (amarillo) es de 58. La comunidad de San Francisco de Birrisito es demográficamente pequeña. Por otra parte, los puntos azules representan la ubicación de los dos tanques con los que cuenta la red de distribución. Los puntos rojos hacen referencia a los finales de tubería de la red. Más adelante se detallarán estos resultados (apartado 5.3.1.).

Las coordenadas de los puntos obtenidas por el navegador de mano se consideraron relativamente precisas, dado que no se detectaron variaciones espaciales con respecto a la ubicación real de los medidores en la red, según lo observado en la imagen 5.

La Figura 6 representa parte de los elementos de la red que fueron levantados los días de trabajo de campo. Hace referencia a los medidores que fueron levantados, y que conforman los puntos amarillos en la Figura 5.



Figura 6. Tres medidores pertenecientes a la red de distribución de la comunidad de San Francisco de Birrisito.

### 5.2.2 Tanques de abastecimiento.

Respecto a los tanques de abastecimiento, la comunidad San Francisco cuenta con dos. El tanque principal llamado “Tanque San Francisco”, se aprecia en la Figura 7. Por otro lado, se instaló un tanque circular (Figura 8), con tal de satisfacer la demanda de agua que en ocasiones incrementa según las franjas horarias. Las características de los tanques se pueden leer en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Especificaciones de los tanques de almacenamiento.

Tanque	Tipo	Material	Capacidad (L)	Dimensiones (m)
Rectangular (Tanque San Francisco)	Semi-Enterrado	Concreto	30000	3.0 x 4.0 x 2.5
Circular	A nivel	Plástico	22000	2.92 x 3.30

Cabe destacar la capacidad de estos tanques, puesto que en conjunto suman  $55 m^3$ , y en ocasiones que las fuentes no son capaces de abastecer los tanques oportunamente, la población sufre el problema del faltante de agua. La situación actual de abastecimiento de la comunidad requiere la colocación de un tanque de mayor capacidad, que sea capaz de satisfacer la demanda de agua, que en ocasiones resulta ser considerablemente más alta que la disponible.





Figura 7. Tanque de plástico de San Francisco de Birrisito con volumen de 22000 L.



Figura 8. Tanque San Francisco con capacidad de 30000 L.

### 5.2.3. Curvas de nivel.

Las curvas de nivel en donde la tubería se ubica, pueden observarse en la Figura 9.

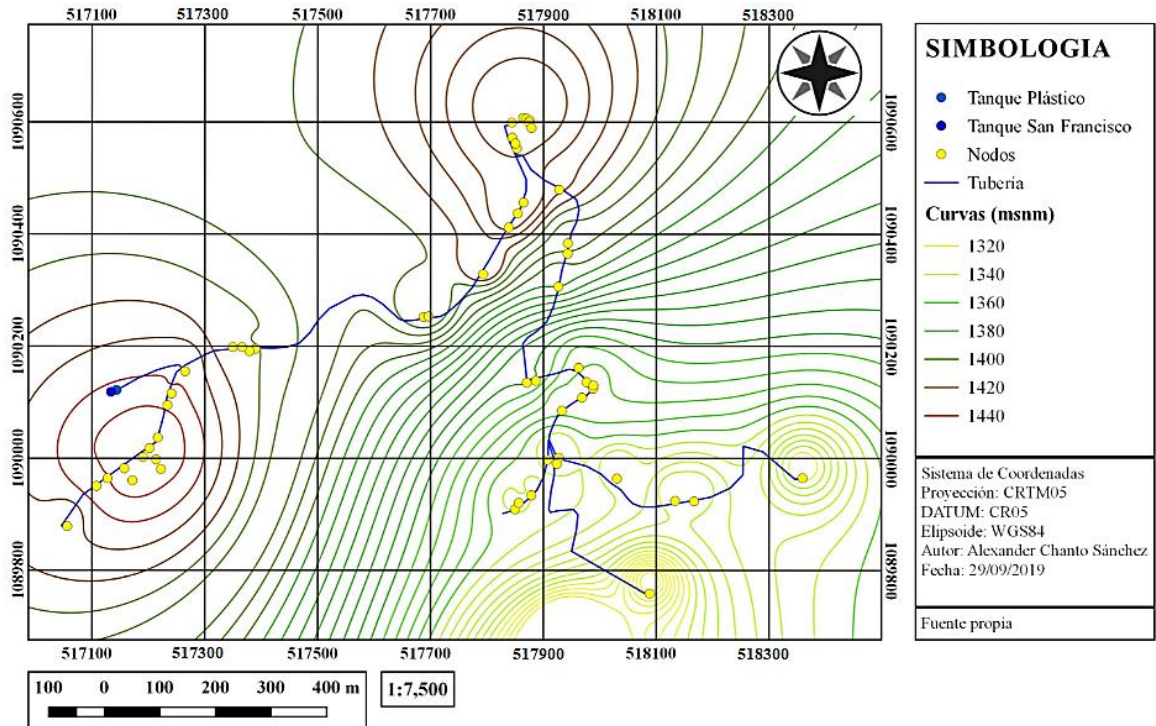


Figura 9. Curvas de nivel, red de San Francisco de Birrisito. Elaborado con: QGIS (2.14.17.).

Como menciona el INDER (2016), la altura media de San Francisco son los 1400 *msnm*. El mapa observado en el Figura 9 fue obtenido del software QGIS 2.14.17 (4.1.3). El levantamiento de los puntos coincide con el dato otorgado por el INEC, dado que la mayoría de las curvas observadas en el mapa están contenidas en el rango: 1380 – 1400 *msnm*.

Cabe destacar que los nodos ubicados en el rango de los 1320 – 1340 *msnm* (curvas amarillas y verde amarillas), son los que presentan sobrepresiones en el sistema. Por otra parte, dos puntos ubicados en curvas rojas presentan problemas de baja presión, al ubicarse en un sector de mayor elevación (menor carga hidráulica).

## 5.3. DISTRIBUCIÓN DE TRAMOS Y TUBERÍAS.

### 5.3.1. Distribución de tubería.

Con la utilización de la imagen satelital (Bing Aerial, 2019), y el recorrido realizado con el navegador de mano siguiendo la trayectoria iniciada por el inspector de campo

(fontanero), fue posible la ubicación de la red de tubería en el del sector de San Francisco de Birrisito. Parte de los resultados se demuestran a continuación en el Cuadro 9 y la Figura 10.

Cuadro 9. Especificaciones de tubería en la red San Francisco de Birrisito.

Tubería	Color	Φ Nom. (pulg)	Φ Int. (mm)	Material	SDR	Longitud (m)
Principal	Verde	2	55.71	PVC	26	132.00
	Azul	3	82.04			1284.00
Secundaria	Verde	2	55.71			935.00
Terciaria	Verde	1 ½	44.56			592.00
	Amarillo	1	30.36			425.00

En el Cuadro 9 se observa que las tuberías fueron elegidas para soportar presiones de hasta 70 mca (Ver anexo 2). El sistema actual oscila con operaciones de entre: 40 -70 mca. Dando como resultado una elección apropiada de tubería, con respecto a los requerimientos operativos.

No obstante, surge la limitante física (integridad de la tubería), dado que gran parte de esta red posee tuberías que han excedido el tiempo de vida esperado, incrementando el riesgo de rupturas, fugas o daños considerables en las paredes. El dato de SDR, diámetro y material fue compartido por fontaneros y trabajadores del acueducto. La longitud total de tubería en el sistema es: 3.00 km y 368.00 m.



Figura 10. Distribución de tubería de la red de San Francisco de Birrisito. Elaborado con: QGIS (2.14.17.).

Como se puede observar conjuntamente en el Cuadro 9 y Figura 10, la red de distribución de San Francisco de Birrisito cuenta con tuberías de 4 diámetros distintos. Todas ellas con un SDR 26 y en PVC.

Para observar la red de distribución, se procederá a visualizarla de izquierda a derecha. La red de distribución inicia con tubería de 2" (verde) en los tanques de abastecimiento (puntos azules), siendo la longitud de esta de 132 *m*. La diferencia de altura, desde los tanques al final de esta tubería, es de 18 *m*.

Seguidamente, se visualiza la tubería en azul, la de mayor diámetro en toda la red de distribución (3"). Como se observa, esta tubería abastece 31 abonados (puntos amarillos). Debajo de los de los tanques se ubican 13 de estos abonados. Arriba del tanque, se ubican los 18 restantes. La longitud de toda esta tubería es de 1284 *m*.

Finalizado el recorrido de la tubería azul, se observa que se realiza nuevamente un cambio de diámetro (obsérvese la tubería verde). La longitud de esta tubería es de 935 *m*. Tal y como se muestra en la Figura 10, el final de esta tubería corresponde a la ubicación del punto color verde.

Realizada la observación de las tuberías primaria y secundaria, resta solamente la ubicación de la tubería terciaria. Según la información del Cuadro 9, la tubería terciaria cuenta con dos trayectos. Un trayecto en tubería 1 ½ "(color verde) de una longitud de 592 *m*. Siendo el final de esta tubería en la ubicación del punto naranja.

El otro trayecto de tubería terciaria es la tubería color amarillo de 1". Tal y como muestra el Cuadro 9, la tubería en amarillo se extiende a lo largo de 425 *m*, finalizando en la ubicación del punto color rojo.

### **5.3.2. Distribución de tramos.**

Para determinar el caudal que ha de transportar cada una de las tuberías, se procedió a dividir la totalidad de la red de distribución. Cada uno de estos tramos, como se demuestra en la Figura 11, abastece un número determinado de abonados.





Figura 11. Distribución de tramos de la red de San Francisco de Birrisito. Elaborado con: QGIS (2.14.17).

A continuación, se presenta en el Cuadro 10 el caudal que transporta cada uno de los tramos. El valor de caudal de cada tramo se calculó según el siguiente procedimiento: caudal destinado por abonado (o demanda) por el número de abonados ubicados en el tramo respectivo.

El caudal destinado por abonado, como se mencionó anteriormente, es de  $0.1055 \text{ m}^3/\text{h}$  (apartado 5.1.1.).

Cuadro 10. Caudal conducido por cada uno de los tramos.

Tramo	Q ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Abonados
1	0.53	5
2	0.21	2
3	0.42	4
4	2.85	27
5	4.75	45
6	1.37	13
7	6.12	58

En el Cuadro 10 se aprecian los valores de caudal por tramo. Estos caudales, como recién se mencionó, se calcularon multiplicando el caudal destinado por abonado (demanda) por el número de abonados localizados a lo largo del tramo.

Así por ende, el caudal en el tramo 7 (correspondiente a la tubería principal que sale desde los tanques de abastecimiento) es el valor de caudal total obtenido en el Cuadro 10. Este tramo por consiguiente, es el que transporta la totalidad del caudal para dar abastecimiento a la comunidad. Vale aclarar también que los cálculos de los caudales de los tramos 4 y 5 corresponden a un caudal acumulado.

El caudal en el tramo 4 se calculó: sumando los caudales de los tramos 1, 2 y 3 y el caudal obtenido para los abonados localizados en el tramo 4.

De igual manera, el caudal del tramo 5, corresponde a la suma del caudal 4 (que incluye los caudales 1, 2, y 3) y el caudal obtenido para los abonados del tramo 5.

El caudal del tramo 6 corresponde únicamente a los 13 abonados localizados a lo largo de este tramo (ver Figuras 10 y 11).

#### **5.4. MODELACIÓN DE LA RED EN WATERCAD.**

##### **5.4.1 Modelación de la red actual. Modelo Estático.**

Con la operación del software WaterCAD se logró realizar la modelación para observar el comportamiento de la carga de agua en la red para un escenario estático (ver glosario del apéndice A.1.). Los resultados de la Figura 12 corresponden a la modelación para la situación actual de la red.

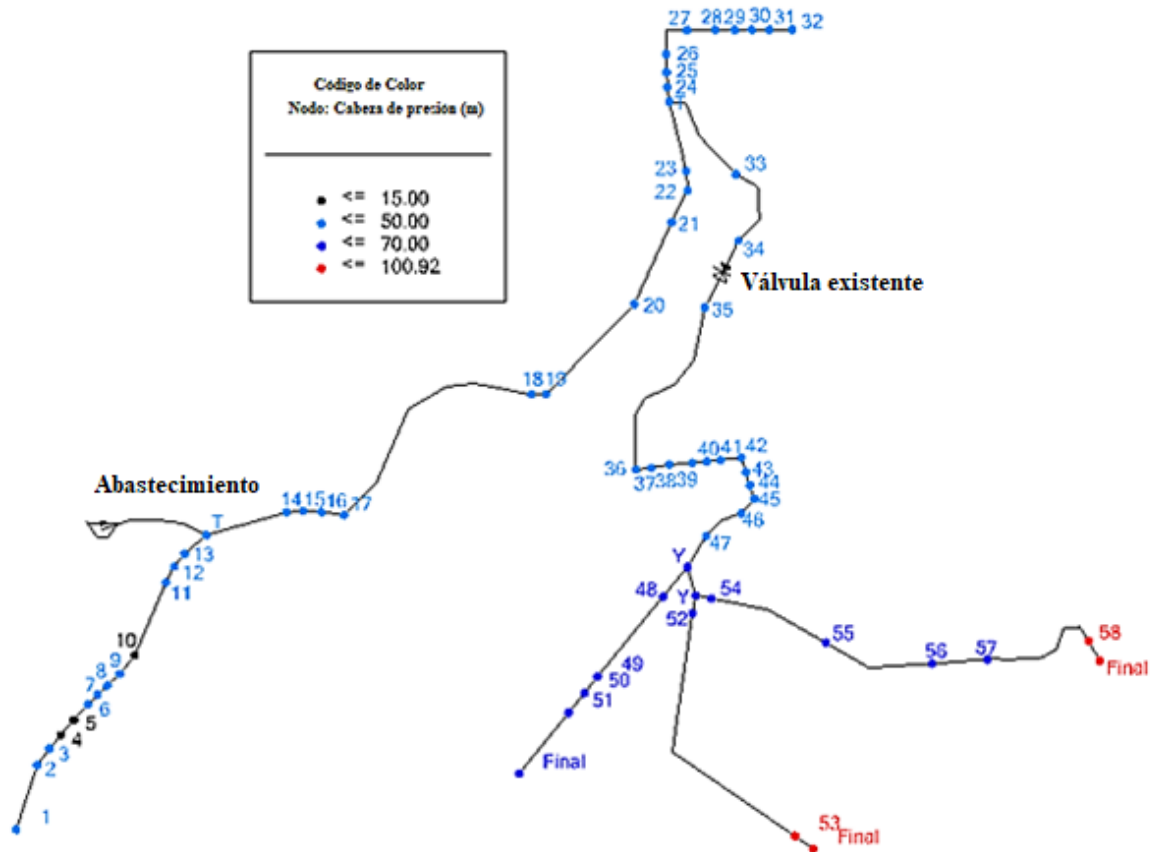


Figura 12. Modelación para la red actual. Escenario estático. Elaborado con: WaterCAD (V8i).

Tal como se aprecia en la leyenda de la Figura 12: los nodos de color celeste son todos aquellos nodos que presentan carga estática de entre los 15 *mca* y los 50 *mca*.

En el manual del (AyA, 2017), los nodos deben presentar una presión para carga estática entre los 15 *mca* y los 50 *mca*, para que sean consideradas presiones óptimas de operación.

Los nodos en color negro, rojo o azul oscuro, son aquellos nodos que no alcanzan o bien, exceden este rango de presión. Aquellos nodos que se encuentren en zonas muy alejadas de la red, es decir, aquellos nodos probables a experimenten una carga hidráulica mayor pueden, en casos excepcionales, alcanzar hasta los 70 *mca* de presión estática (apartado 3.1.5.). Para la Figura 12, estos nodos corresponden aquellos identificados en color azul oscuro y efectivamente, estos nodos se encuentran en los sectores más bajos de la red.

Los resultados tabulados de presión de toda la red de distribución se pueden observar en el Anexo 3 de este informe.

Se pueden considerar como casos excepcionales con los nodos 53, 58 y los puntos finales de tubería. Estos nodos están identificados en color rojo, es decir sus presiones exceden enormemente la presión máxima admisible tolerable en puntos aislados de 70 *mca*. Dada esta situación, es imperativo sugerir una solución para reducir la presión en estos puntos, la cual se analizará más adelante.

#### **5.4.2. Modelación de la red actual. Período extendido.**

Se ingresó en la modelación los datos de factores de demanda a lo largo del día para obtener una modelación conocida como “período extendido” (ver glosario del apéndice A.1.). Es importante recordar que el valor de 1.8 de la revisión de literatura, es el de factor de demanda máximo horario, y se puede ver reflejado a las 10 a.m. en las Figuras 13 y 14. Las horas de mayor demanda de caudal se encuentran entre las 9 a.m. a la 1 p.m.

La Figura 13 representa las presiones con la que operan los nodos a lo largo de la red para una modelación en período extendido. Los valores de la Figura 13 son los resultados para la hora 10:00 a.m. del período extendido. Esto pues, como se mencionó anteriormente, es la hora de mayor demanda de caudal, por lo tanto, es también el momento del día en que la carga en los nodos es más baja, pues se producen mayores pérdidas por fricción en las tuberías.



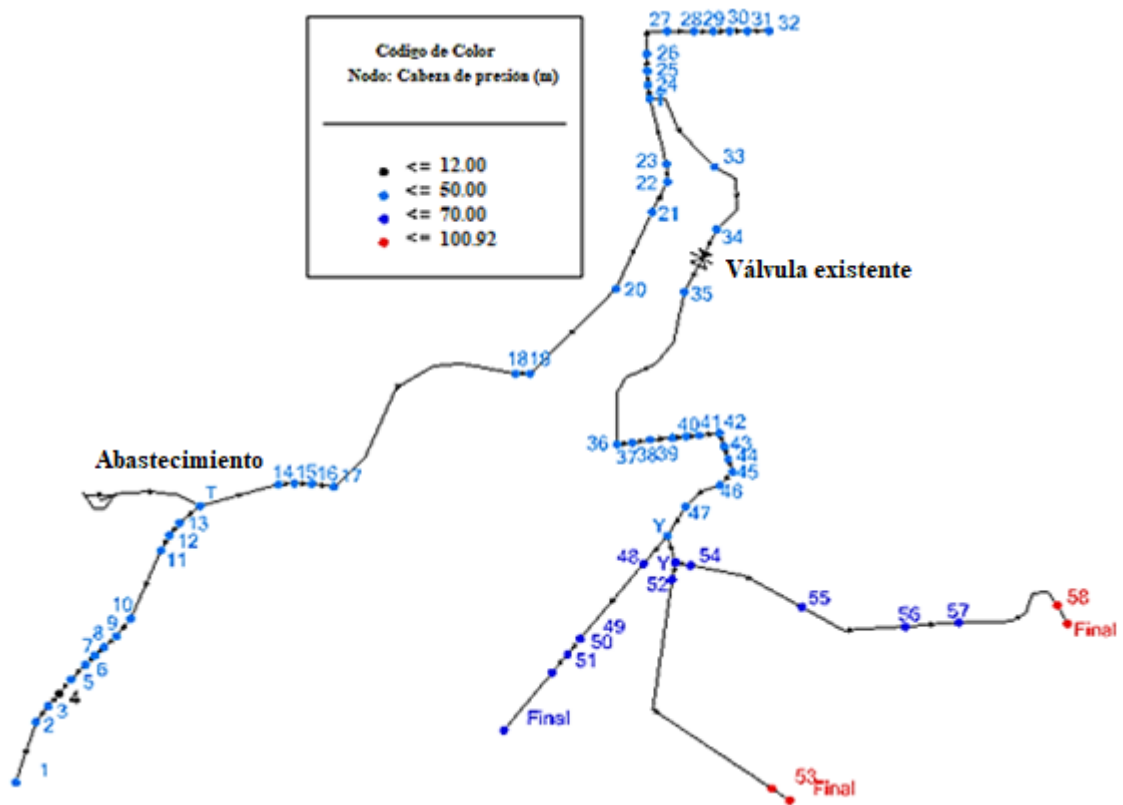


Figura 13. Modelación para la red actual. Período extendido (10:00 am). Elaborado con: WaterCAD (V8i). Se observa que a diferencia de la Figura 12, la leyenda en la Figura 13 apunta un valor mínimo de presión los 12 *mca*, pues se trata de un período extendido (apartado 3.1.5.).

Como es de esperar según la teoría de la mecánica de fluidos (apartado 3.3.3.), un fluido en movimiento experimentará una pérdida de carga por efecto de la fricción. Así pues, los resultados de carga en la Figura 13, son menores a los obtenidos en la Figura 12 de modelación estática. Los resultados tabulados de las Figuras 12 y 13 se pueden observar en los Anexos 3 y 4.

Tal como se observa en la leyenda, los colores de estos nodos son celeste en la mayoría, reflejando valores de presión dentro del rango de 12 -50 *mca*. Al igual que en el escenario de modelación estática, los tres ramales inferiores (1, 2 y 3) son los que presentan las cargas hidráulicas más altas, pues son aquellos nodos que se encuentran en la zona más baja de la red.

La Figura 14 muestra los resultados de velocidad en cada una de las tuberías que conforman la red de distribución.

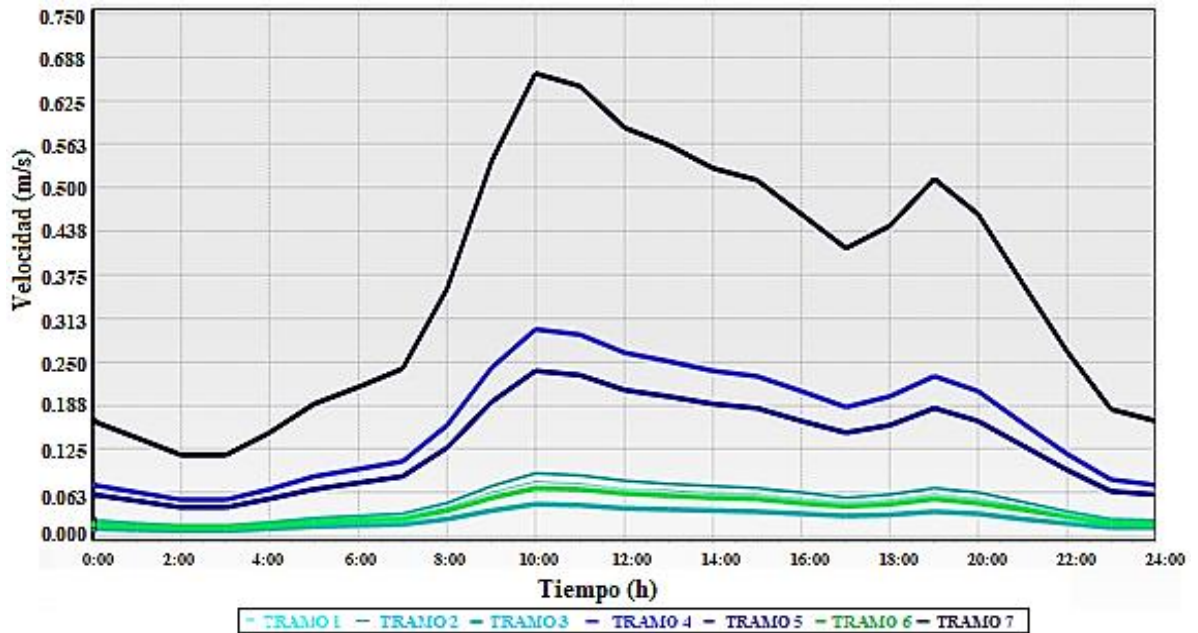


Figura 14. Velocidad en cada tramo. Modelación período extendido. Elaborado con: WaterCAD (V8i).

Las velocidades alcanzadas en las tuberías no cumplen con las normas de velocidad fijadas para el diseño correcto de redes de distribución (AyA, 2017, apartado 3.1.4), puesto que son menores a 0.6 m/s, y dependiendo de la calidad del agua, las paredes de estas tuberías podrían haber presentado una deposición considerable de sedimentos.

Bajo estas condiciones, se realizó una modelación de prueba. Se empleó caudales mayores, esto puesto que: un incremento de caudal (manteniendo un diámetro constante) implica el incremento de velocidad proporcionalmente, según el principio de continuidad (apartado 3.3.2.).

Bajo el escenario de prueba antes mencionado, se obtuvo que las velocidades en la red de agua, se encontraron en el rango que el AyA (2017) sugiere (apartado 3.1.4). Sin embargo las pérdidas por fricción aumentaron considerablemente. Como indica la ecuación de Hazen-Williams (3.3.3.): las pérdidas por fricción son directamente proporcionales al incremento de caudal.

Las pérdidas por fricción obtenidas en la simulación de prueba demostraron que la carga que alcanzaron ciertos nodos de la red, fue considerablemente menor al valor mínimo de 12 mca sugerido por la norma técnica del AyA (2017).

Finalmente para la modelación en período extendido se presenta la Figura 15 que representa los caudales conducidos por cada una de las tuberías.

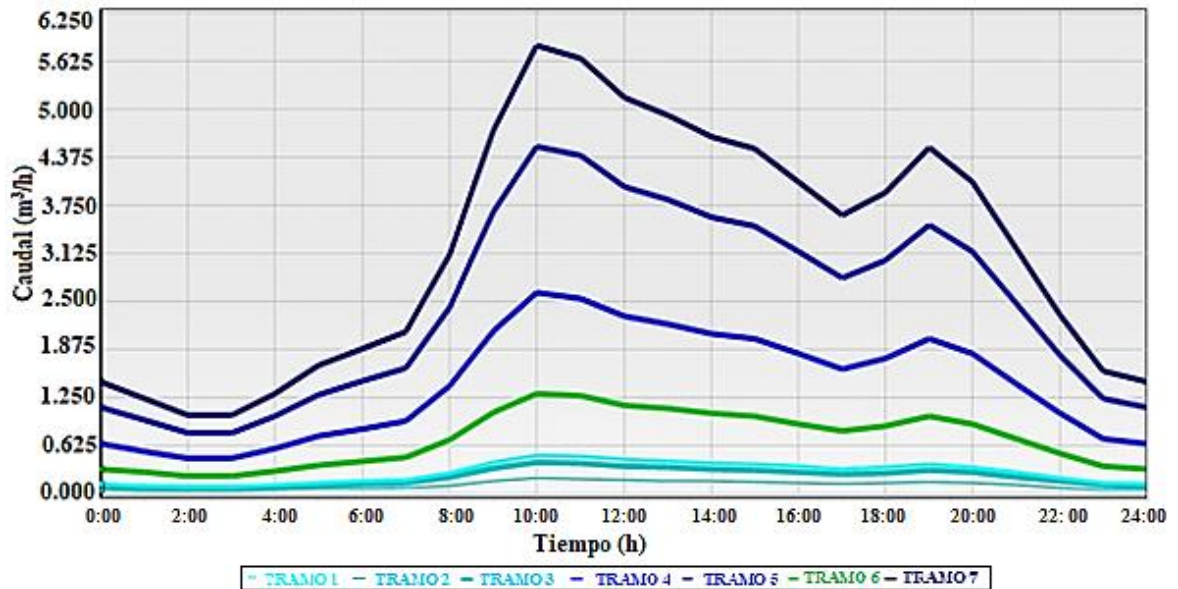


Figura 15. Caudal en cada tramo. Modelación período extendido. Elaborado con: WaterCAD (V8i).

Como se observa en la hora 10:00 a.m., los caudales conducidos son los máximos a lo largo del período extendido. Los caudales a las 10:00 a.m. coinciden con los caudales calculados del Cuadro 10. Los caudales transportados de las 0:00 a.m. a las 3:00 a.m. resultan ser bastante menores, debido a que las demandas a estas horas cesan de manera importante.

#### 5.4.3. Modelación de la red actual con válvula nueva. Estático y período extendido.

Como parte del cumplimiento de las normas establecidas para el diseño y operación de redes de distribución por parte del AyA (2017), se analizó una opción para reducir la sobrepresión en los puntos de menor altitud.

Esta medida consistió en colocar y modelar en el software WaterCAD (V8i), el funcionamiento de una válvula reductora de presión.

Se determinó ubicar la válvula entre los nodos 47 y 48, puesto que el AyA (2017) menciona que la presión estática máxima en un nodo debe ser 50 *mca*. Aunado a esto, la presión alcanzada por el nodo 47 es 46.89 *mca* (ver anexo 4). La presión en el nodo 48 es de 53.33 *mca*.

Estos resultados permiten inferir que a partir del nodo 48 se originan los problemas de sobrepresión. Dado que el terreno entre el nodo 47 al nodo 48 es de pendiente negativa (aumento de la carga hidráulica), se determinó que el tramo entre estos dos nodos resulta ser adecuado para la ubicación.

La válvula reductora de presión corresponde a la de la compañía: HELMAN S.A.S. Modelo: VCH. (HELMAN, 2016), (ver apartado 5.5.2). Esta válvula es de operación modulada (automática). Las válvulas automáticas funcionan con una válvula auxiliar, la cual se encarga de compensar las diferencias de presión a la entrada de la válvula principal.

Si la válvula auxiliar detecta una disminución de presión (según la calibración inicial determinada por el usuario), su resorte se estira, otorgando una expansión del flujo en la cámara principal. Esta expansión en el flujo de entrada, provoca una caída de presión en el interior de la válvula, por lo que la cámara superior de la válvula principal se abre, estrangulando la salida del flujo y equilibrando la presión.

De manera inversa, si la válvula auxiliar detecta un aumento de presión, el resorte dentro de ella se comprime, provocando que el flujo a la entrada se estrangule. Dentro de la válvula principal, el ingreso de este flujo provoca el aumento de presión, por lo que la cámara superior de la válvula principal se cierra, equilibrando la presión de salida del flujo (Corcho y Duque, 2005).

Los resultados de presión para la modelación estática contemplando la instalación de una válvula reductora, se aprecian en la Figura 16.

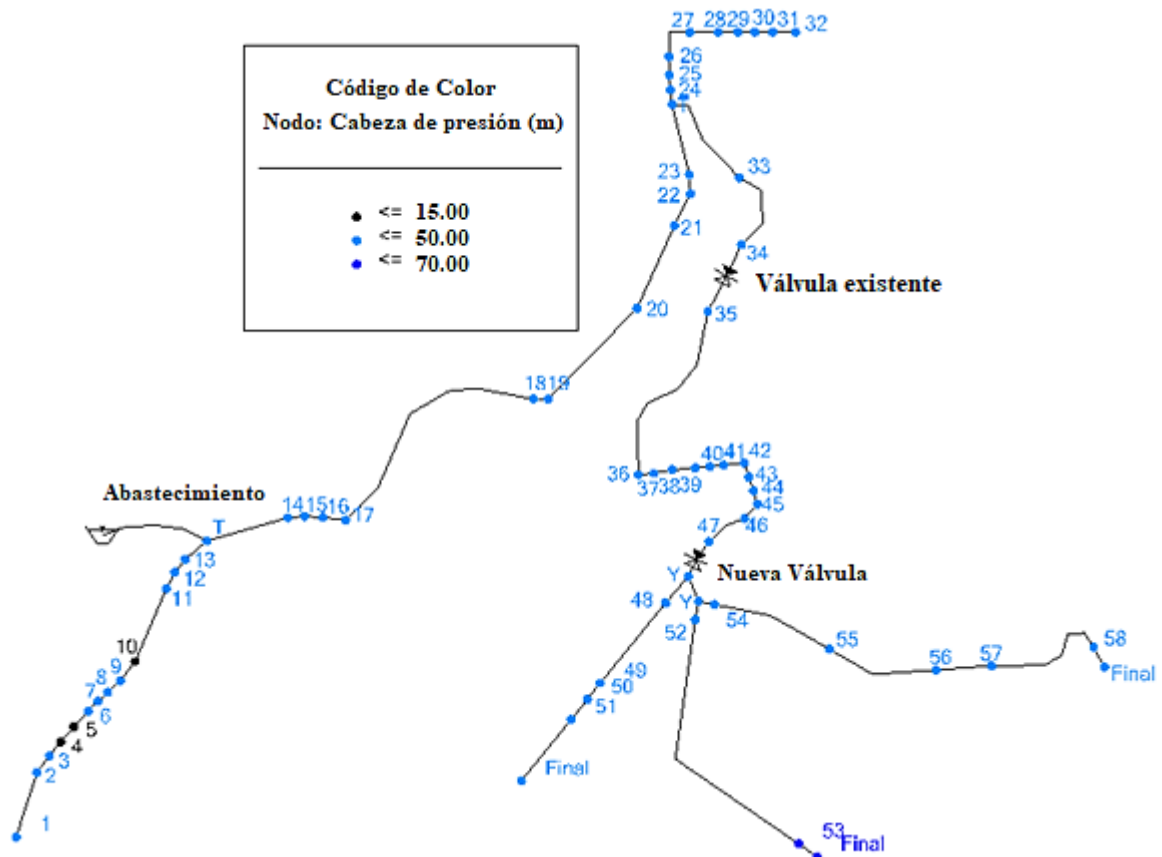


Figura 16. Modelación con una válvula nueva. Escenario estático. Elaborado con: WaterCAD (V8i).

La Figura 16 revela una disminución importante de presión en los nodos ubicados en los tres ramales inferiores. Prácticamente el 94 % de los nodos se encuentran en color celeste, es decir, con presiones de trabajo dentro de los 15 – 50 *mca*.

A diferencia de estos nodos, el nodo 53 y el final de tubería alcanzan presiones superiores a los 50 *mca*, pero tal como menciona el AyA (2017) (apartado 3.1.5), los nodos pueden alcanzar hasta los 70 *mca* en condiciones especiales, cuando los mismos se encuentran ubicados en los finales de tubería.

Este es el caso correspondiente para estos nodos, por lo que sus valores de presión podrían considerarse dentro del rango de “aceptable”.

Los nodos 4, 5 y 10 presentan presiones inferiores a 15 *mca* y es probable que en horas de alta demanda (9 am a las 12 pm), estos abonados estén experimenten problemas como llegada de un caudal bajo, o bien que la presión con la que el agua llega estas acometidas domiciliarias sea un poco más baja, en comparación con otras casas de habitación (Galuppini, et al., 2019).

En la Figura 17 se presentan los valores de carga para una modelación con la válvula reductora de presión instalada, en un escenario de período extendido.

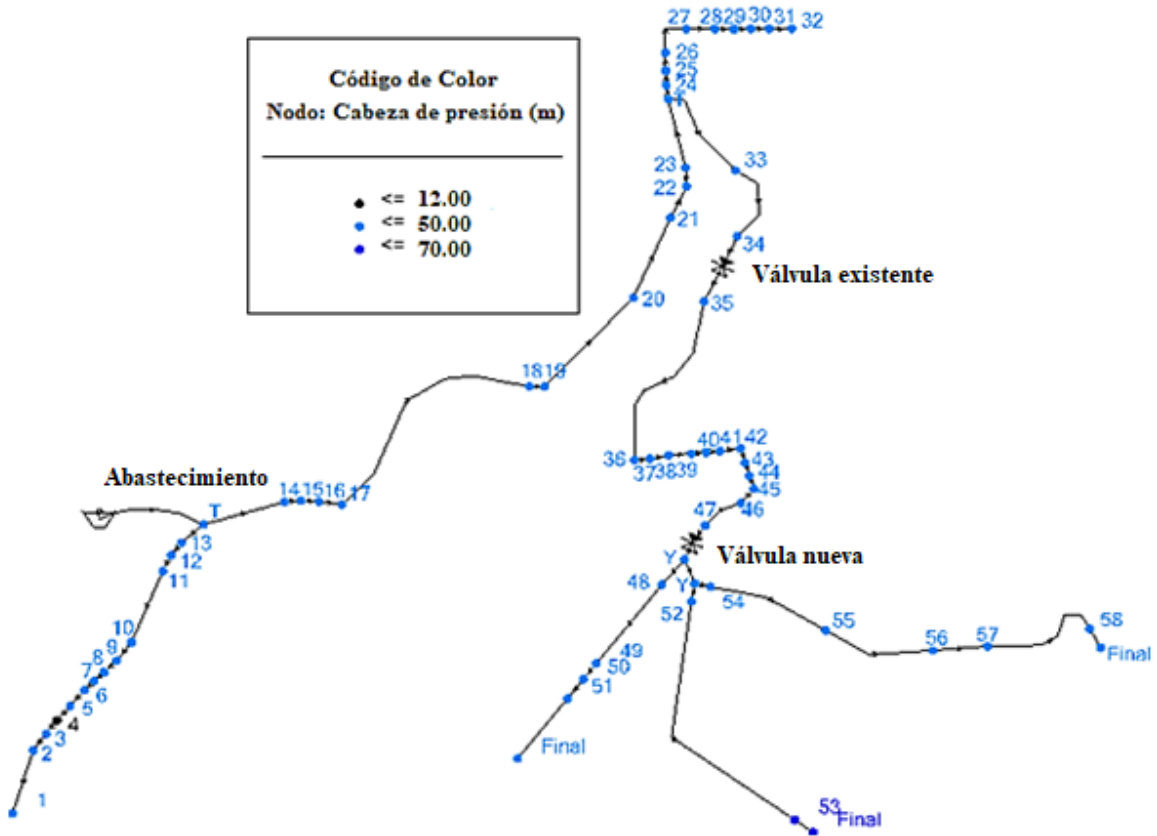


Figura 17. Modelación con válvula nueva. Período extendido (10:00 am). Elaborado con: WaterCAD (V8i).

De igual manera, para la simulación de período extendido se obtuvo resultados favorables de carga en prácticamente la totalidad de los nodos de la red.

#### 5.4.4. Modelación de la demanda proyectada al 2040. Período extendido.

Como parte de un estudio acertado en la red de distribución, es importante considerar un estudio de la población para décadas futuras, de manera que se pueda conocer la demanda y el comportamiento de la red tiempo a futuro (ver apartado 5.1.2.).

En este caso, el análisis se ha realizado con una demanda proyectada para el año 2040. La Figura 18 refleja los resultados de presión para una demanda hídrica proyectada al año 2040 en período extendido.

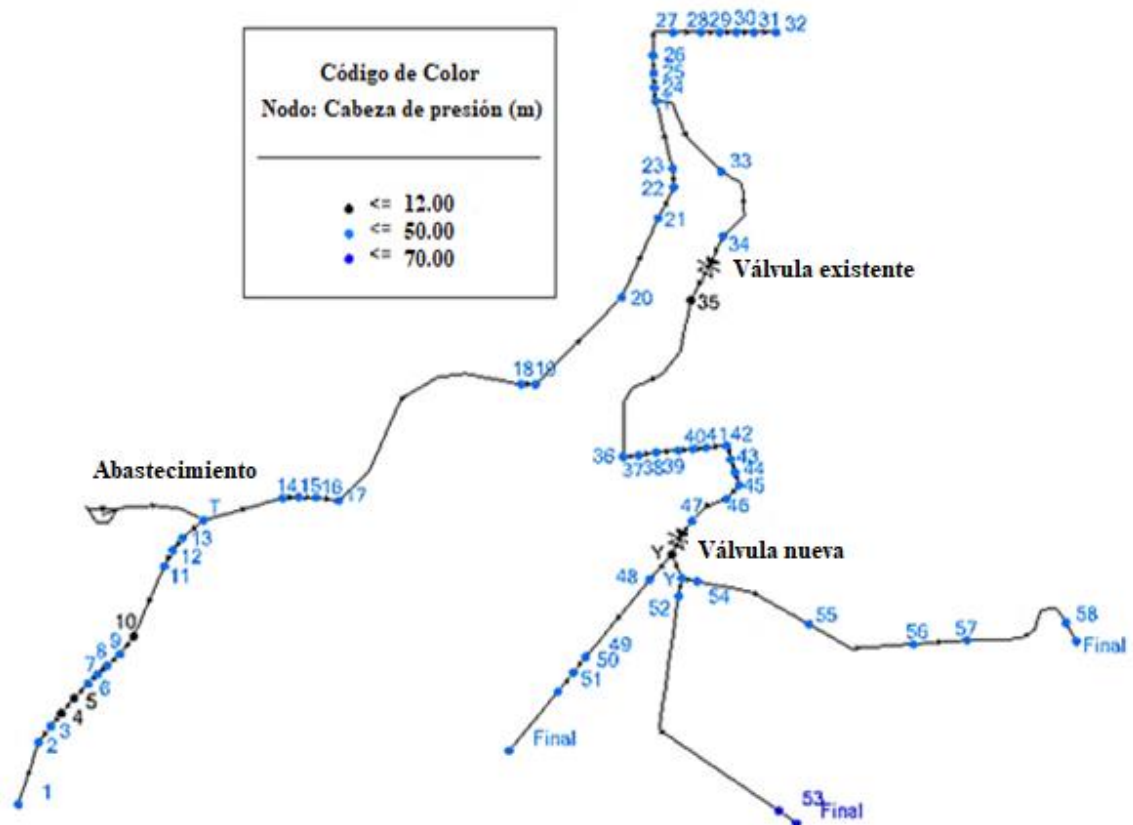


Figura 18. Proyección 2040. Período extendido (10:00 a.m.). Elaborado con: WaterCAD (V8i).

Cabe destacar las diferencias entre las Figuras 17 y 18. Dado que para 2040 se espera una reducción de presión considerables en los nodos: 4, 5, 10 y 35. En la modelación observada de la Figura 15 (situación actual), se evidencia que únicamente el nodo 4 presenta problemas de baja presión.

Estos resultados son predecibles, pues como se indica en la ecuación de Hazen Williams (3.3.3): el aumento de caudal (aunado al crecimiento poblacional), conlleva al aumento de pérdidas por fricción. Estas pérdidas conllevan a la disminución de carga en los puntos de mayor altitud.

Adicionalmente, se adjuntan las Figuras 19 y 20 correspondientes a los valores de velocidad y caudal proyectados para el año 2040.

Es evidente que los valores de caudal presenten un incremento (debido al crecimiento poblacional), en comparación a los obtenidos en la Figura 15.



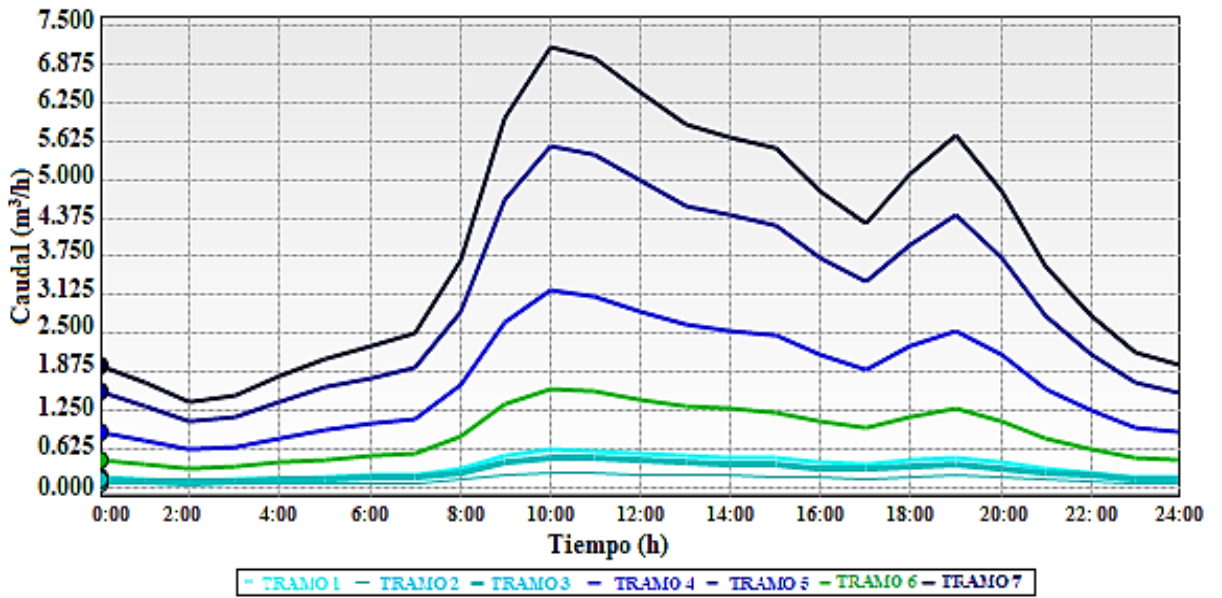


Figura 19. Caudal en cada tramo. Proyección 2040. Período extendido. Elaborado con: WaterCAD (V8i).

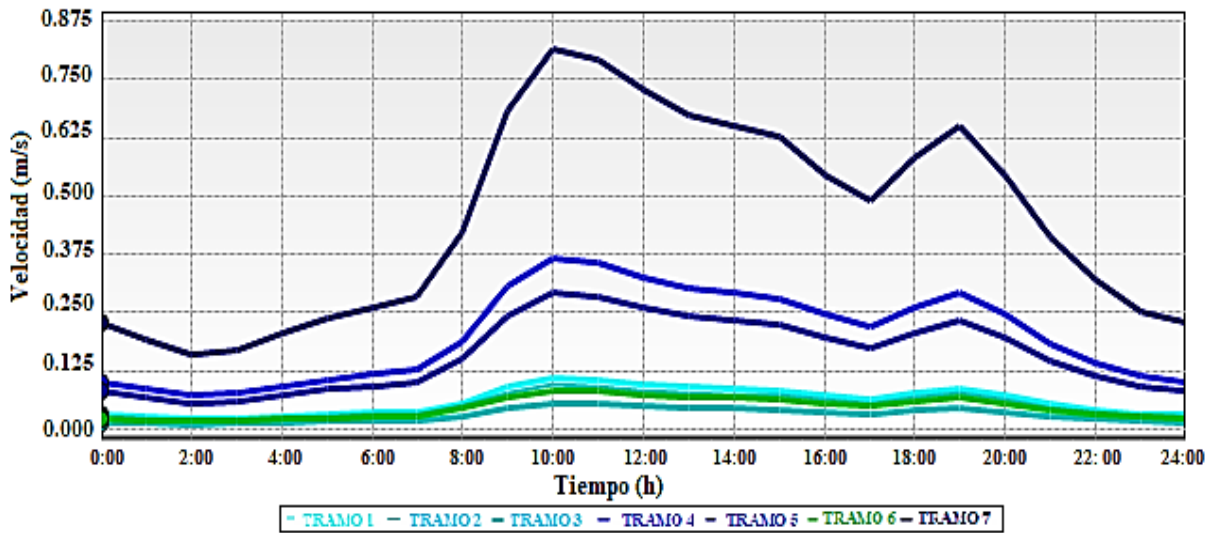


Figura 20. Velocidad en cada tramo. Proyección 2040. Período extendido. Elaborado con: WaterCAD (V8i).



## 5.5. ESTUDIO ECONÓMICO PARA INSTALACIÓN DE VÁLVULA Y CAJA DE REGISTRO.

### 5.5.1. Compra e instalación de una caja de registro para válvula reductora de presión.

Como propuesta para llevar a cabo la reducción de presión en los nodos en el área baja de la red, se sugiere instalar una válvula reductora de presión (como se hizo mención en el apartado 5.4.3) con su respectiva caja de registro, entre los nodos 47 – 48.

Esto con el objetivo de alcanzar valores dentro del rango de presiones de trabajo adecuado, normadas por el AyA (2017).

La caja de registro es un montaje en concreto necesario que ofrece un acceso sencillo para la operación y mantenimiento de la válvula. Además funciona como una protección contra posibles hurtos (ver AyA, 2017). En el Cuadro 11 se observa en la columna izquierda el producto o servicio y en la columna derecha la cotización correspondiente para la adquisición de una caja de registro.

Cuadro 11. Cotización para la compra e instalación de una caja de registro.

Producto/servicio.	Costo (\$).	Costo (₡).	IVA (13%)	Costo total Colocación (₡)
Caja de registro.	515.00	291,779.40	37,931.19	425,741.51
Transporte e instalación.	150.00	84,984.00	11,047.92	

El precio de venta del dólar para el día 28 de noviembre de 2019 es de ₡ 566,56.00. La cotización fue llevada a cabo con un grupo especializado en manufactura e instalación de productos de concreto prefabricado denominado: Mucho Tanque S.A. El trabajador mencionó que los servicios contemplan todo el proceso de instalación (ver Cuadro 11), lo que incluye: excavación y transporte del material.

Se realizó la consulta acerca de si el producto está diseñado con las normas técnicas establecidas por el AyA (2017) para cajas de registro, y se obtuvo como respuesta que todos sus productos contemplan las normas hidráulicas correspondientes a Costa Rica (Mucho Tanque S.A., 2016).

En este caso, las disposiciones de interés son: un espacio entre la tubería y la pared de 0.5 m como mínimo, drenajes a ambos lados y una resistencia mínima del concreto de 280 kg/cm<sup>2</sup> (AyA, 2017). Además de un soporte en concreto en el piso de la caja de registro para la colocación de la válvula (AyA, 2018).

### 5.5.2. Compra e instalación de una válvula reductora.

En el Cuadro 12 se observa los resultados obtenidos de la cotización llevada a cabo con el proveedor nacional de válvulas denominado: Grupo Válvulas y Equipos. Así como de la consulta al catálogo de productos para la construcción de la empresa: Mexichem Amanco (2018).

Cuadro 12. Cotización para la compra de una válvula reductora y materiales.

Producto.	Costo (C\$).	Total (C\$).
Válvula Helman VCH.	219,110.00	228,181.00
Cemento PVC.	6,195.00	
Dos bridas PVC.	2,876.00	

El costo de la válvula observado en el Cuadro 12 corresponde a una cotización realizada el día: 28 de noviembre de 2019. Se cotizó los precios de bridas PVC, dado que la válvula es bridada, además estas bridas son para tubería de 2 pulgadas. Los precios para el cemento y bridas para PVC, son los correspondientes para el año 2018, por lo que se debe considerar un reajuste en los precios de estos productos al momento de realizar la compra.

Todos los productos observados en el Cuadro 12 consideran el valor del IVA (13%) en la columna de costo.

La instalación de la válvula podrá ser llevada a cabo por uno de los fontaneros del acueducto, por lo que estos costos de mano de obra no fueron considerados.

El costo total para este proyecto corresponde a: C\$ 653,922.51.

### 5.5.3. Reemplazo de tubería para el tramo 7

El estudio económico realizado, consideró la compra de tubería y material, así como contrato de servicios para: excavación, instalación, transporte de materiales y residuos. El cálculo de los costos se pueden observar a continuación.

Cuadro 13. Cotización de material para reemplazo de tubería en el tramo 7.

Cantidad.	Descripción.	Precio Unitario (C\$).	Costo total (C\$).
22	Tubo PVC 3" SDR 26	30,700.00	675,400.00
22	Unión PVC 3" SDR 26	4,100.00	90,200.00
1	Tee PVC 3" SCH 40	6,850.00	6,850.00
		Total (C\$)	772,450.00

Estos precios fueron consultados en el catálogo de Mexichem Amanco (2018), los cuales consideran el valor del IVA (13%). El costo total no incluye el transporte de materiales por parte del proveedor. Es importante mencionar de igual manera, que para efectos de adquisición de materiales por parte de una Municipalidad, existe una posibilidad previa para solicitar un descuento en el costo.

Cuadro 14. Costos por concepto de contratación de mano de obra.

Descripción.	Cantidad (h).	Precio Unitario (₡).	Costo total (₡).
Jefe cuadrilla	5.00	2,570.00	12,850.00
Operario	10.00	1,425.00	14,250.00
Ayudantes	10.00	1,165.00	11,650.00
Operador Back hoe	5.00	1,723.00	8,615.00
Chofer de vagoneta	3.50	1,245.00	4,357.50
		Cargas sociales (36.67%)	18,967.00
		Total (₡)	70,689.50

Cuadro 15. Costos por concepto de equipo herramienta e implemento de seguridad.

Descripción	Cantidad (h)	Precio Unitario (₡)	Costo total (₡)
Back hoe	10.00	11,472.88	114,728.80
Vagonetas	5.00	14,073.61	70,368.05
		Herramienta menor (25%)	46,274.21
		Total (₡)	231,371.06

Los resultados de los Cuadros 14 y 15 corresponden a la contabilización de los costos para contratación de mano de obra y uso de equipo. Estos costos fueron obtenidos de una cotización realizada en 2014 (MECO, 2014) para un acueducto en la Gran Área Metropolitana (GAM), por lo que existe una variación en el monto de los salarios que debe ser considerada a la hora de formalizar la cotización.

Cuadro 16. Reajustes (gastos administrativos, imprevistos, utilidades).

Descripción	Monto (C\$)
Material	772,450.00
Mano de obra	70,689.50
Herramienta	231,371.06
Subtotal	1,074,510.56
Gastos administrativos (10%)	107,451.06
Imprevistos (5%)	53,725.53
Utilidades (10%)	107,451.06
Total	1,343,138.20

#### 5.5.4. Análisis Costo – Beneficio.

La compañía para la manufactura de válvulas automáticas CLA-VAL (2019), menciona que la diferencia entre las válvulas de control modulado y las válvulas de control no modulado, consiste en que las primeras permiten aperturas o cierres parciales de la válvula según las diferencias de presión detectadas. Con ello se obtiene beneficio de un control automático en la presión de salida, no requiriendo así de la operación de la válvula de manera manual o por algún mecanismo motriz externo.

La válvula cotizada con el proveedor nacional Grupo Válvulas y Equipos corresponde efectivamente a una válvula reductora de presión de operación automática (control modulado), marca: HELMAN, modelo: VCH (ver anexo 8). Entre las características principales consultadas en el catálogo (HELMAN S.A.S., 2016), se obtuvo:

- Bridada de 2 pulgadas.
- Hierro fundido (carcaza).
- Piloteada.
- Aplicación en acueducto o industria.

El proveedor consultado mencionó también que poseen en su inventario otra válvula reductora de presión, marca: Zurn, modelo: NR3XL (ver anexo 9). Precio de C\$ 95.500,00. Entre las características consultadas en el catálogo (Zurn, 2019), se obtuvo:

- Roscada de 2 pulgadas.
- Bronce (carcaza).
- Piloteada.

- Aplicaciones residenciales.

Es evidente que el costo de la válvula Zurn es menor al de la válvula Helman, siendo la primera un 44% más económica. Sin embargo la ventaja que ofrece una válvula bridada sobre una roscada, para aplicación en acueducto, es muy considerable. Las bridas permiten que se pueda realizar la separación entre dos tramos de la tubería sin realizar una operación destructiva (Cinca, 2018).

Además las válvulas bridadas se emplean en sistemas que trabajan a mayores presiones. En acueductos las válvulas utilizadas son bridadas, en su gran mayoría. Esto pues las líneas en estos sistemas son de presiones medias a altas.

Por lo que la elección de la válvula corresponde a: Válvula de control hidráulico: HELMAN VCH.

Por otra parte, correspondiente al reemplazo de la tubería en el tramo 7 por una tubería de 3", el análisis costo – beneficio se fundamentó en la apreciación de los resultados de los apartados 5.1.2 y 5.4.2.

El análisis de la red para un período de 20 años (2040), reveló resultados acerca de un aumento en la demanda hídrica (aumento de caudal).

Aunado a esto, en los resultados de velocidad del flujo en las tuberías para un período extendido (análisis de la Figura 14, 5.4.2), se obtuvo que estas no superan los 0,6 m/s, la cual es la velocidad mínima recomendada por el AyA (2017).

Estas condiciones fueron tomadas en cuenta dentro de la propuesta para la optimización de la red. De manera que se propuso el cambio de diámetro de 2" a 3" en el tramo 7 en PVC, SDR 26 considerando que:

- El aumento de diámetro en la tubería del tramo 7, implica la reducción de pérdidas primarias. Esto conlleva al aumento de carga hidráulica en el tramo 6. Según el principio de Bernoulli (3.3.1), la energía de presión y la energía potencial permanecen constantes, mientras que la reducción en las pérdidas por fricción conllevan al aumento de la energía cinética, es decir, al incremento de la velocidad en tubería. Con la instalación de tubería de 3", se espera el incremento en la velocidad del fluido, a partir del tramo 6.

- El aumento de la demanda hídrica proyectada al año 2040, sugiere el reemplazo de la tubería, de manera que se pueda transportar este caudal en un diámetro de mayor capacidad.

## 5.6. ESTUDIO AMBIENTAL SOBRE LA INSTALACIÓN DE UNA VÁLVULA Y CAJA DE REGISTRO.

Todo proyecto a realizar conlleva riesgos que producirán efectos y consecuencias de distinta índole y magnitud. En este caso, para la evaluación de la red de San Francisco de Birrisito, se sugiere llevar a cabo la instalación de una válvula reductora de presión y una caja de registro. Para todo proyecto de optimización, modernización o ampliación es necesario realizar un estudio sobre el impacto ambiental, para garantizar que el efecto nocivo que puedan generar determinadas fases, pueda ser controlable en el margen de lo posible, con las medidas de mitigación o reducción.

Así pues, a pesar de que la instalación y operación de una caja de registro y la válvula reductora no resultan ser acciones que impliquen un impacto ambiental considerable, es imperativo realizar el estudio de manera que se logre detectar algún impacto negativo. A continuación se presentan los resultados del Cuadro 17 que revelan el impacto ambiental para las acciones anteriormente mencionadas.

Cuadro 17. Evaluación de Impacto Ambiental. Matriz de Arboleda.

Fase	ASPI	Medio	Clase	Presencia	Duración	Evolución	Magnitud	Ca	Impacto ambiental
Instalación	Mano de obra	Social	+	1.0	0.8	1.0	0.5	1.3	Irrelevante
	Excavación	Físico	-	1.0	1.0	1.0	0.5	-1.5	Irrelevante
	Transporte de materiales	Físico	-	1.0	0.5	1.0	0.2	-0.7	Irrelevante
	Transporte de desechos	Físico	-	0.5	0.5	1.0	0.2	-0.4	Irrelevante
Operación	Ruido	Físico	-	1.0	1.0	1.0	0.6	-1.6	Irrelevante
	Panorama	Físico	-	1.0	1.0	1.0	0.1	-1.1	Irrelevante

En el Cuadro 17 se puede apreciar las dos fases más importantes, antes y después de la instalación de la caja y la válvula. En la fase I se llevan a cabo los procesos de transporte,

excavación y mano de obra. Los resultados arrojan que el impacto ambiental generado por estos procesos es irrelevante, sin embargo los funcionarios deben garantizar que los desechos y el movimiento de tierra sea efectivamente, el adecuado.

A la hora de realizar la excavación, no se debe exceder el volumen requerido, y los materiales sobrantes sean transportados y depositados en lugares apropiados.

La fase II consta del proceso operativo, donde el mayor impacto lo puede generar el ruido, por el funcionamiento de la válvula. Para De las Heras (2011), el modelo seleccionado de válvula y las condiciones del sistema, serán determinantes para prever la magnitud del ruido que pueda generar la operación.

En el catálogo de la válvula HELMAN VCH (2016) se puede leer que el diseño del obturador permite la reducción de la turbulencia y el ruido de operación. Adicionalmente, en el sector que se recomienda instalar la válvula no se presentan constricciones, expansiones o cambios bruscos de dirección en la tubería que deban ser considerados.

En la Figura 21, se observa la curva de cavitación de la válvula HELMAN VCH, siendo la zona en rojo, la curva de cavitación (operación crítica) y la zona verde, la curva de operación.

## TABLA DE CAVITACIÓN

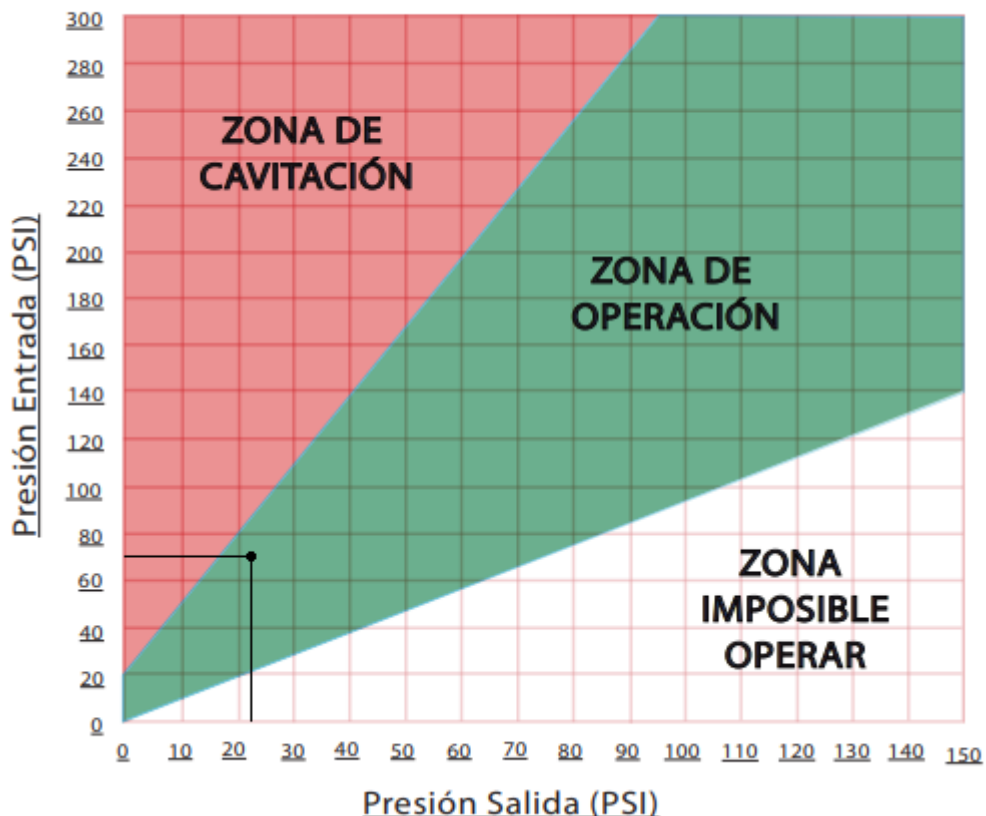


Figura 21. Curva de cavitación de la válvula HELMAN VCH. Fuente: (HELMAN S.A.S., 2016).

De las Heras menciona también que el ruido excesivo se produce cuando la válvula opera cerca de las condiciones críticas.

La válvula nueva se recomienda instalarla después del nodo 47 (cuya presión es 46.89 *mca*, ver anexo 4) y antes del nodo 48 (53.33 *mca*), La presión de entrada a la válvula será un poco superior a la del nodo 47, y menor a la del nodo 48. Por tanto es un valor que ronda los 50 *mca* (71.0 *psi*). La presión de salida de la válvula será la mínima presión normada por el AyA de 15 *mca* (21.3 *psi*) (AyA, 2017).

Al observar la curva de cavitación de la válvula en la Figura 21, se aprecia que para una presión de entrada de 71.0 *psi* y una presión de salida de 21.3 *psi*, la válvula trabaja en la zona de operación. Esto significa que la válvula no trabajaría en condiciones críticas que puedan generar ruidos excesivos (De las Heras, 2011).



## **5.7. ESTUDIO SOCIAL SOBRE LA EVALUACIÓN DE LA RED.**

Los sectores de San Esteban, Birrisito, y San Francisco son las comunidades más afectadas por cortes de agua para sus habitantes en la zona norte del cantón de Paraíso (Rojas, 2014). Se trata de las comunidades ubicadas en el sector de mayor latitud, en comparación a las demás comunidades del cantón de Paraíso. Combinado con las deficiencias de bombeo, suponen un escenario típico de una carga hidráulica baja. En el caso de San Francisco, la altitud no supone en primera instancia un problema relevante para los abonados más cercanos a la ubicación del tanque. Sin embargo, según la modelación realizada para el año 2040 (apartado 5.4.4) se prevé una disminución de carga en ciertos nodos.

Otra de las causas relacionadas a la falta de agua en estos sectores se debe a la edad de la red de distribución. Muchas de estas tuberías son bastante antiguas (tubería principal con 50 años de instalada) (Torres, 2014). Como se explicó anteriormente, las poblaciones tienden al crecimiento y la demanda que pudo haber años atrás, no será la misma tiempo después. Por lo que analizar un cambio de tubería, resulta ser un plan importante para tomar en consideración.

Sin embargo la causa de mayor afectación en estos sectores se debe a la falta de fuentes de agua, especialmente en época seca. Aunado a esto, las concesiones y derechos sobre fuentes cercanas, alrededor de la zona alta de Paraíso son pocas. En época de estiaje, las acequias y nacientes disminuyen su aporte hídrico, quedando los tanques de almacenamiento bajo los niveles mínimos adecuados, cortando el servicio de agua potable especialmente en horas de alta demanda (Torres, 2014).

Esta afectación es un problema complejo, especialmente entre grupos más vulnerables, como lo son personas de la tercera edad o niños. Para ello la municipalidad adquirió el compromiso de solucionar de la mejor manera este faltante de agua en estas áreas.

En 2014 se propuso la habilitación de un pozo que puede otorgar hasta 8 L/s, según los estudios realizados. Así pues, el problema de la deficiencia de caudal, es sanado considerablemente adoptando esta medida (González, 2014).

La evaluación que se ha efectuado en esta red, resulta ser un elemento complementario de importancia para el análisis y proceso de toma de decisiones y adopción de medidas entre los profesionales encargados del acueducto, para la de abastecimiento de agua en Birrisito.

## **6. CONCLUSIONES**

1. Se ha calculado las demandas hídricas actual y futura a 20 años (2040), así como los caudales de diseño, siendo estos caudales de  $6.12 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $7.20 \text{ m}^3/\text{h}$  respectivamente.
2. Se ha analizado exhaustivamente la red de distribución en sus parámetros más relevantes como lo son: presión, velocidad y caudal en los escenarios de presión estática y en período extendido. El 95 % de estas presiones superan los 12 *mca* en el sistema. Las presiones obtenidas en la mayoría de los nodos no superan los 50 *mca*, sin embargo para aquellos nodos que superan los 70 *mca* (ubicados en la zona baja), se propuso la instalación y operación de una caja de registro y válvula reguladora de presión. De igual manera los caudales transportados para los tramos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 son: (0.53, 0.21, 0.42, 2.85, 4.75, 1.37 y 6.12)  $\text{m}^3/\text{h}$  respectivamente. Respecto a las velocidades que se presentan, estas no exceden los 0.6 *m/s*, por lo que las tuberías pueden estar expuestas a problemas de acumulación de sedimentos y reducción de diámetro.
3. Se realizó el análisis económico costo – beneficio en donde se obtuvo que la elección de la válvula de tipo no modulada (pilotada) prevalece sobre la del tipo modulada (automática). La válvula seleccionada corresponde a la marca: HELMAN, modelo: VCH. El costo de la inversión para instalar una válvula y una caja de registro estación reductora completa es de ¢ 653.922,51 (al 28 de noviembre de 2019).
4. Se ha llevado a cabo el estudio de impacto ambiental cuya Fase 1, correspondiente a la instalación de una caja de registro, se determinó que el impacto es irrelevante, siempre y cuando se cumplan a cabalidad las recomendaciones. Además para la Fase 2, correspondiente a la operación del sistema con una válvula nueva, el factor ruido no es un aspecto de impacto ambiental de consideración, dado que la operación de la válvula no se desarrolla en condiciones críticas.
5. En un sector hídricamente vulnerable la ejecución de obras y proyectos hidráulicos son una tarea de primera prioridad. Los resultados de esta evaluación significan una herramienta complementaria para los funcionarios, de manera que logren detectar valores de presión por debajo de los niveles mínimos normados, según las franjas

horarias y los patrones de consumo, de modo que puedan, según su criterio, intervenir la red posteriormente.

6. El levantamiento de puntos llevado a cabo en este proyecto es poco preciso (navegador de mano), y fue realizado de esta manera según la decisión del ingeniero encargado, por lo que se concluye que la información revelada en esta evaluación, es únicamente de interés para este acueducto.

## **7. RECOMENDACIONES**

1. Realizar un análisis acerca del cambio de diámetro del tramo 7 (cambio de 2" a 3") para efectos de disminuir las pérdidas de carga en los nodos más cercanos a los tanques, así como para aumentar la capacidad del sistema, de modo que se pueda satisfacer la demanda a 20 años (2040).
2. Llevar a cabo un estudio complementario de índole técnico y económico sobre la adquisición de un tanque nuevo o la ampliación del mismo, debido a que la capacidad se ha vuelto limitada en los últimos años.
3. Respecto a la instalación de la caja de registro, es responsabilidad de la empresa contratada hacer una correcta disposición de los desechos. Es responsabilidad de esta misma empresa garantizar que la excavación no sea excesiva.
4. El estudio ambiental arroja que no hay existencia de un impacto ambiental provocado por el aspecto ruido. Sin embargo, si en condiciones reales llegara a producirse, es recomendable instalar un silenciador aguas abajo del cuerpo de la válvula.
5. En el caso de que esta evaluación fuese utilizada como una guía para trabajos de evaluación similares, se sugiere realizar el levantamiento con una estación total, de modo que se pueda obtener datos de elevación más precisos.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

Arboleda, J. (2008). *Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades*. Medellín, Colombia.

Arístegui-Maquinaria. (2016). *¿Cómo funciona una red de abastecimiento de agua?* Barcelona. Obtenido de: <https://www.aristegui.info/como-funciona-una-red-de-abastecimiento-de-agua-potable/>

Amanco Mexichem. (2018). *Listado de precios 2018*. Mexichem, Guatemala S.A. Obtenido de: <http://expoamanco.com/images/amanco-listado-de-precios.pdf>

Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica. Unidad de Ingeniería de bomberos. (2013). *Manual de disposiciones técnicas generales sobre seguridad humana y protección contra incendios*. Costa Rica. Obtenido de: [https://www.bomberos.go.cr/upl0dz/2013/06/Manual\\_de\\_Disposiciones\\_Tecnicas\\_2013.pdf](https://www.bomberos.go.cr/upl0dz/2013/06/Manual_de_Disposiciones_Tecnicas_2013.pdf)

Bentley Systems. (2011). *WaterCAD (V8i)*. Bentley Systems, Inc.

Blasco, B., Blasco, E., Fernández, J.M., Losada, J.C. & Viñas, C. (2007). *Fundamentos físicos de la Educación II*. Delta publicaciones. Obtenido de: [https://books.google.co.cr/books?id=kfCx8se\\_0zgc&printsec=frontcover&dq=Fundamentos+f%C3%ADsicos+de+la+Edificaci%C3%B3n&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwio1P3gjpThAhVGpFkKHT9IB2sQ6AEIKDAA#v=onepage&q=Fundamentos%20f%C3%ADsicos%20de%20la%20Edificaci%C3%B3n&f=false](https://books.google.co.cr/books?id=kfCx8se_0zgc&printsec=frontcover&dq=Fundamentos+f%C3%ADsicos+de+la+Edificaci%C3%B3n&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwio1P3gjpThAhVGpFkKHT9IB2sQ6AEIKDAA#v=onepage&q=Fundamentos%20f%C3%ADsicos%20de%20la%20Edificaci%C3%B3n&f=false)

Boulanger, F.J.J., Espinoza, C., & Fonseca, L. (2007). *Ingeniería Económica*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Obtenido de: [https://books.google.co.cr/books?id=LVLZA74NNwwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.co.cr/books?id=LVLZA74NNwwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)



Cinca, G. (2018). *Básico de Válvulas: Tipos de válvulas. Tablas con rendimiento d emano de obra.* Obtenido de: <https://books.google.co.cr/books?id=wLmxDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

CLA-VAL. (2019). *Soluciones integrales con válvulas de control automático.* Costa Mesa, California. Obtenido de: [http://www.cla-val.com/documents/pdfs2/Catalogo\\_Espanol.pdf](http://www.cla-val.com/documents/pdfs2/Catalogo_Espanol.pdf)

Corcho, F., & Duque, J.I. (2005). *Acueductos: teoría y diseño.* Universidad de Medellín. Colombia. Obtenido de: [https://books.google.co.cr/books?id=194g9lx5vpcC&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.co.cr/books?id=194g9lx5vpcC&source=gbs_navlinks_s)

De las Heras Jiménez, S. (2011). *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas.* UPCGrau: Enginyeries industrials. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica. Obtenido de: [https://books.google.co.cr/books?id=y\\_hoBQAAQBAJ&hl=es&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.co.cr/books?id=y_hoBQAAQBAJ&hl=es&source=gbs_navlinks_s)

Durán, J.M., & Rodríguez, A. Universidad de Guadalajara. (2006). *Los problemas de abastecimiento de agua potable en una ciudad media.* México. Obtenido de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/esprial/v12n36/v12n36a5.pdf>

Galuppini, G., Creaco, E., Toffanin, C., & Magni, L. (2019). *Service pressure regulation in water distribution networks.* Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066119300310>

Garmin International, Inc. (2011). *Serie NAVEGADOR DE MANOMAP 62. Manual de usuario.* 1200 East 151 Street, Olathe, Kansas 66062, EE.UU. Obtenido de: [http://static.garmin.com/pumac/NAVEGADOR DE MANOMAP62\\_OM\\_ES.pdf](http://static.garmin.com/pumac/NAVEGADOR DE MANOMAP62_OM_ES.pdf)

González, A. (Septiembre 12 de 2014). *Nuevo pozo y tanques darían agua a vecinos de Paraíso.* La Nación. Obtenido de: <https://www.nacion.com/el-pais/servicios/nuevo-pozo-y->

tanques-darian-agua-a-vecinos-de-  
paraiso/DEVNVCVU2Y5DLHGRPC6VEKZSRDY/story/

HELMAN S.A.S. (2016). Válvula de control hidráulico. Modelo VCH. Calle 49 # 8-25  
León XIII Soacha – Colombia. Obtenido de:  
[https://helman.co/images/PRODUCTOS/ACUEDUCTOS-PDF/FICHA\\_VCH-ilovepdf-compressed.pdf](https://helman.co/images/PRODUCTOS/ACUEDUCTOS-PDF/FICHA_VCH-ilovepdf-compressed.pdf)

INDER. (2016). *Caracterización del territorio Paraíso - Alvarado*. Costa Rica. Obtenido de: <https://www.inder.go.cr/istaru/Caracterizacion-Territorio-Paraiso-Alvarado.pdf>

INEC. Centro Centroamericano de Población (CCP). (2011). *Estimaciones y proyecciones de población*. Obtenido de: <http://inec.cr/poblacion/estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion>

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. (AyA). Dirección de proveeduría. (2018). *Suministro, instalación o reemplazo de válvulas de control hidráulico para el acueducto metropolitano*. Obtenido: [https://www.AyA.go.cr/transparenciaInst/datos\\_abiertos/contratadm/PUBLICACION%20DE%20CARTELES/Licitaciones%20P%20BAblicas/2018LN-00005-PRI/2018LN-000005-PRI.pdf](https://www.AyA.go.cr/transparenciaInst/datos_abiertos/contratadm/PUBLICACION%20DE%20CARTELES/Licitaciones%20P%20BAblicas/2018LN-00005-PRI/2018LN-000005-PRI.pdf)

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). (2017.). *Norma técnica para diseño y construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable, de saneamiento y pluvial*. Costa Rica. Volumen 4. Obtenido de <https://www.AyA.go.cr/Noticias/Documents/Norma%20dise%C3%B1o%20y%20construccion%20sistemas%20agua,%20saneamiento%20y%20pluvial.pdf>

MECO. (Noviembre 03 de 2014). DTP-IPA-113-2014. La Uruca, Costa Rica. Obtenido de:

Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos, 6ta edición*. Pearson Education. Obtenido de: [https://books.google.co.cr/books?id=LbMTKJ4eK4QC&vq=secundarias&dq=hazen+williams&hl=es&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.co.cr/books?id=LbMTKJ4eK4QC&vq=secundarias&dq=hazen+williams&hl=es&source=gbs_navlinks_s)

Mucho Tanque S.A. (2016). *Productos prefabricados en concreto reforzado*. Obtenido de: <http://www.muchotanque.com/Downloads/Productos/Catalogo.pdf>

National Research Council (NRC). (2006). *Drinking water distribution systems. Assesing and reducing risks*. Washington, D.C. The National Academic Press. (En Físico)  
QGIS Project. (2017). *Quatum GIS (2.14.17)*. QGIS Development team.

Rebollo, J.M. (2017). *Montaje de redes de distribución de agua. ENAT0108*. IC Editorial. Obtenido de: [https://books.google.co.cr/books?id=C5gkDwAAQBAJ&dq=V%C3%A1lvulas+en+redes+de+agua&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.co.cr/books?id=C5gkDwAAQBAJ&dq=V%C3%A1lvulas+en+redes+de+agua&source=gbs_navlinks_s)

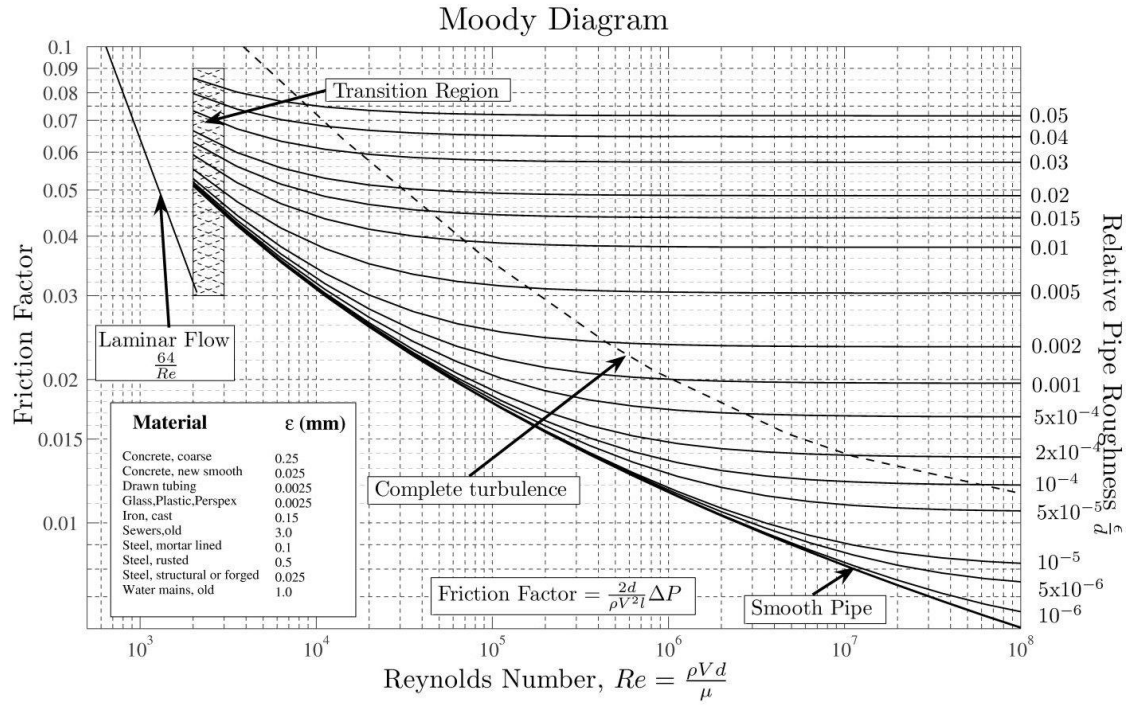
Rojas, L. (Julio 04 de 2014). *Comunidades de Paraíso siguen sufriendo por el faltante de agua*. CRHoy. Obtenido de: <https://archivo.crhoy.com/comunidades-de-paraíso-siguen-sufriendo-por-el-faltante-de-agua-potable/nacionales/>

Torres, J. (Septiembre 18 de 2014). *Municipalidad de Paraíso analiza cambio de tubería para mitigar faltante de agua en el cantón*. CRHoy. Obtenido de: <https://archivo.crhoy.com/municipalidad-de-paraíso-analiza-cambio-de-tuberia-para-mitigar-faltante-de-agua-en-el-canton/nacionales/>

Zurn Industries, LLC. Wilkins. (2019). Model NR3XL. Water ressure Reducing Valve with Integral By-Pass Check Valve and Strainer. 1747 Commerce Way, Paso Robles, CA U.S.A. 93446 Ph. Obtenido de: [https://www.zurn.com/media-library/web\\_documents/pdfs/specsheets/reg-nr3xl-pdf](https://www.zurn.com/media-library/web_documents/pdfs/specsheets/reg-nr3xl-pdf)

## **ANEXOS**

# Anexo 1. Diagrama de Moody



Anexo 2. Especificaciones técnicas tubería de PVC

Diámetro Nominal		SDR	Presión de trabajo Kg/cm <sup>2</sup>	Lon. tubo (m)	Dia. Exterior	Dia. Interior	Presión de ruptura Kg/cm <sup>2</sup>	Peso por tubo (Kg)
(mm)	Pulg.				(mm)	(mm)		
12	½	13,5	22,1	6	21,34	18,2	70,2	0,87
12	½	Sch40	42	6	21,34	15,8		1,34
18	¾	17	17,6	6	26,67	23,53	56,2	1,11
18	¾	Sch40	34	6	26,7	20,9		1,79
25	1	17	17,6	6	33,4	29,48	56,2	1,73
25	1	Sch40	32	6	33,4	26,6		2,67
31	1 1/4	17	17,6	6	42,16	37,18	56,2	2,75
38	1 1/2	17	17,6	6	48,26	42,58	56,2	3,62
50	2	17	17,6	6	60,33	53,21	56,2	5,62
62	2 1/2	17	17,6	6	73,03	54,45	56,2	8,22
75	3	17	17,6	6	88,9	78,44	56,2	12,19
100	4	17	17,6	6	114,3	100,84	56,2	20,16
150	6	17	17,6	6	168,28	148,46	56,2	43,69
200	8	17	17,6	6	219,08	193,28	56,2	74,24
25	1	26	11,2	6	33,4	30,36	35,1	30,36
31	1 1/4	26	11,2	6	42,16	38,9	35,1	38,90
38	1 1/2	26	11,2	6	48,26	44,56	35,1	44,56
50	2	26	11,2	6	60,33	55,71	35,1	55,71
62	2 1/2	26	11,2	6	73,03	67,45	35,1	67,45
75	3	26	11,2	6	88,90	82,04	35,1	82,04
100	4	26	11,2	6	114,30	105,52	35,1	105,52
150	6	26	11,2	6	168,28	155,32	35,1	155,32
200	8	26	11,2	6	219,08	202,22	35,1	202,22

250	10	26	11,2	6	273,05	252,07	35,1	252,07
300	12	26	11,2	6	323,85	298,95	35,1	298,95
31	11/4	32,5	8,8	6	42,2	39,0	28,1	1,67
38	11/2	32,5	8,8	6	48,26	45,22	28,1	1,855
50	2	32,5	8,8	6	60,33	56,63	28,1	2,899
62	21/2	32,5	8,8	6	73,03	68,55	28,1	4,249
75	3	32,5	8,8	6	88,90	83,42	28,1	6,58
100	4	32,5	8,8	6	114,30	107,28	28,1	10,84
150	6	32,5	8,8	6	168,28	157,92	28,1	23,54
200	8	32,5	8,8	6	219,08	205,62	28,1	39,94
250	10	32,5	8,8	6	273,05	256,23	28,1	62,22
300	12	32,5	8,8	6	323,85	303,93	28,1	87,51
31	11/4	41	7,0	6	42,16	39,80	22,1	1,08
38	11/2	41	7,0	6	48,26	45,90	22,1	1,45
50	2	41	7,0	6	60,32	57,38	22,1	2,23
62	21/2	41	7,0	6	73,03	69,46	22,1	3,10
75	3	41	7,0	6	88,90	84,58	22,1	5,18
100	4	41	7,0	6	144,30	108,72	22,1	8,74
150	6	41	7,0	6	168,28	160,08	22,1	18,9
200	8	41	7,0	6	219,08	208,42	22,1	31,92
250	10	41	7,0	6	273,05	259,75	22,1	49,58
300	12	41	7,0	6	323,85	308,05	22,1	69,86
380	15	41	7,0	6	388,60	369,70	22,1	93,6

Anexo 3. Presiones modelación estática, actual

Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)
1	26.24	27	18.95	52	60.01	54	58.91
2	22.21	28	19.73	53	100.71	55	64.55
3	17.75	29	21.25	Final	100.72	57	67.65
4	12.72	30	23.24			56	67.87
5	13.26	31	19.92			58	76.4
6	16.26	32	23.51			Final	76.4
7	16.76	33	29.31				
8	17.71	34	40.48				
9	15.76	35	15.00				
10	14.26	36	34.09				
11	20.25	37	35.65				
12	22.42	38	39.63				
13	22.69	39	37.48				
T	17.91	40	40.98				
14	28.95	41	42.26				
15	29.95	42	44.21				
16	30.73	43	46.28				
17	30.95	44	47.01				
18	31.23	45	48.42				
19	30.73	46	48.31				
20	24.24	47	49.67				
21	23.24	Y	51.67				
22	21.92	Y	58.91				
23	21.25	48	56.13				
T	23.74	49	55.66				
24	23.58	50	54.72				
25	23.51	51	57.26				
26	23.19	Final	58.50				



Anexo 4. Presiones modelación período extendido. 10 am, actual

Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)
1	25.08	27	16.16	52	57.20	54	56.10
2	20.09	28	17.20	53	97.87	55	61.72
3	16.56	29	18.50	Final	97.87	56	65.02
4	11.57	30	20.94			57	64.80
5	12.11	31	17.98			58	73.55
6	14.60	32	21.76			Final	73.55
7	15.10	33	27.35				
8	15.60	34	38.30				
9	14.60	35	12.72				
10	13.11	36	31.51				
11	18.77	37	33.05				
12	20.77	38	36.98				
13	21.06	39	34.87				
T	16.61	40	38.32				
14	27.73	41	39.58				
15	28.71	42	41.50				
16	29.47	43	43.55				
17	29.68	44	44.27				
18	29.71	45	45.67				
19	29.21	46	45.55				
20	22.64	47	46.89				
21	21.58	Y	48.86				
22	19.56	Y	56.10				
23	18.55	48	53.33				
T	22.00	49	52.86				
24	21.83	50	51.91				
25	21.44	51	54.45				
26	20.67	Final	55.69				

Anexo 5. Presiones modelación estática, con válvula

Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)
1	26.24	27	17.91	52	25.00	54	23.90
2	21.25	28	18.95	53	65.70	55	29.54
3	17.71	29	20.25	Final	65.70	56	32.86
4	12.72	30	22.69			57	32.63
5	13.26	31	19.73			58	41.39
6	15.76	32	23.51			Final	41.39
7	16.26	33	29.31				
8	16.76	34	40.48				
9	15.76	35	15.00				
10	14.26	36	34.09				
11	19.92	37	35.65				
12	21.92	38	39.63				
13	22.21	39	37.48				
T	17.75	40	40.98				
14	28.95	41	42.26				
15	29.95	42	44.21				
16	30.73	43	46.28				
17	30.95	44	47.01				
18	31.23	45	48.42				
19	30.73	46	48.31				
20	24.24	47	49.67				
21	23.24	Y	16.65				
22	21.25	Y	23.90				
23	20.25	48	21.12				
T	23.74	49	20.65				
24	23.58	50	19.71				
25	23.19	51	22.25				
26	22.42	Final	23.49				

Anexo 6. Presiones modelación período extendido. 10 am, con válvula

Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)
1	25.08	27	16.16	52	22.18	54	21.09
2	20.09	28	17.20	53	62.86	55	26.70
3	16.56	29	18.50	Final	62.86	56	30.01
4	11.57	30	20.94			57	29.78
5	12.11	31	17.98			58	38.53
6	14.60	32	21.76			Final	38.53
7	15.10	33	27.35				
8	15.60	34	38.30				
9	14.60	35	12.72				
10	13.11	36	31.51				
11	18.77	37	33.05				
12	20.77	38	36.98				
13	21.06	39	34.87				
T	16.61	40	38.32				
14	27.73	41	39.59				
15	28.71	42	41.51				
16	29.47	43	43.55				
17	29.51	44	44.27				
18	29.71	45	45.67				
19	29.21	46	45.56				
20	22.64	47	46.89				
21	21.58	Y	13.85				
22	19.56	Y	21.09				
23	18.55	48	18.32				
T	22.00	49	17.84				
24	21.83	50	16.90				
25	21.44	51	19.44				
26	20.67	Final	20.68				

Anexo 7. Presiones modelación período extendido. Año 2040

Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)	Nodo	P (mca)
1	24.56	27	15.38	52	20.93	54	19.83
2	19.57	28	16.42	53	61.58	55	25.44
3	16.04	29	17.72	Final	61.59	56	28.74
4	11.05	30	20.16			57	28.51
5	11.59	31	17.20			58	37.26
6	14.09	32	20.98			Final	37.26
7	14.59	33	26.48				
8	15.09	34	37.32				
9	14.09	35	11.71				
10	12.59	36	30.35				
11	18.26	37	31.89				
12	20.25	38	35.80				
13	20.55	39	33.70				
T	16.10	40	37.13				
14	27.18	41	38.39				
15	28.15	42	40.30				
16	28.91	43	42.33				
17	29.12	44	43.05				
18	29.04	45	44.45				
19	28.53	46	44.32				
20	21.92	47	45.65				
21	20.83	Y	12.60				
22	18.81	Y	19.83				
23	17.79	48	17.06				
T	21.22	49	16.59				
24	21.05	50	15.64				
25	20.66	51	18.18				
26	19.89	Final	19.43				

Anexo 8. Válvula bridada HELMAN, VCH. Fuente: (HELMAN S.A.S., 2016).



Anexo 9. Válvula ZURN, roscada. Fuente: (Zurn Industries, LLC. Wilkins., 2019).



# APÉNDICES

## A.1. Glosario (abreviaturas y simbología)

- AyA. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.
- ASADAS. Asociaciones administradoras de Acueductos y Alcantarillados de Costa Rica.
- Consumo total. Es la sumatoria total de las dotaciones.
- Diámetro mínimo de tubería principal. Se establece en 60 *mm*
- Diámetro máximo de tubería principal. Se establece en 300 *mm*
- Dotación. Referente al consumo medio atribuido por persona.
- Factor *k*: factor adimensional de fricción que depende del tipo de accesorio en la tubería.
- GAM. Gran Área Metropolitana
- Modelación en carga estática. Modelación realizada suponiendo que no existe flujo de agua, se modela con una carga estática.
- Modelación en período extendido. Modelación realizada suponiendo que las tuberías transportan el caudal horario demandado
- Prevista. Corresponde a una sección longitudinal de tubería, la cual está instalada desde la red de distribución hasta el punto de conexión privado (en este caso al abonado). La longitud depende de la ubicación del inmueble. Se le conoce con el nombre de “acometida” una vez que se efectúa el servicio.
- Presión nominal. Corresponde a la presión interna máxima de referencia a la cual puede estar sometida una tubería. Ya tiene considerada un factor de seguridad.
- Presión mínima de trabajo. Se establece una presión mínima de 12 *mca*
- Presión máxima de trabajo. Es un valor de presión límite del cual, una vez superado, la tubería corre el riesgo de fallo. Se establece una presión máxima de 50 *mca*
- PRV. Por sus siglas en inglés “Pressure reducing valve”, se refiere a la válvula reguladora de presión.
- PVC. Policloruro de vinilo, material empleado en la fabricación de tuberías para transporte de fluidos, en este caso, de agua potable.
- Red primaria o colectores. Traslada las aguas residuales hasta la zona de tratamiento

- Red secundaria o subcolectores. Tributa directamente a los colectores y recogen agua de la red General.
- Red terciaria o General. Se ubica en la vía pública, además conecta la red de la vía pública con la red privada por medio de la prevista.
- SDR. Relación entre el diámetro exterior de la tubería y el espesor de su pared
- $\Phi$  Nom. Diámetro nominal (*mm*)
- $\Phi$  Int. Diámetro interior (*mm*)