

ENFOQUE ESTOCÁSTICO Y DETERMINÍSTICO PARA MODELAR LA RED DE AGUA POTABLE: SECTOR ZAMORA HUAYCO, LOJA, ECUADOR

STOCHASTIC AND DETERMINISTIC APPROACH FOR MODELLING DRINKING WATER NETWORK: ZAMORA HUAYCO SECTOR, LOJA, ECUADOR

Richard Germán Serrano Agila¹
Ángel Antonio Ruiz Pico²
Roberth Augusto Tandazo Palacio³

Fecha de recepción: 05 septiembre 2018

Fecha de aprobación: 25 septiembre 2018

DOI: <https://doi.org/10.26495/rtzh1810.328135>



Resumen

La modelación matemática describe por medio de fórmulas las variables, parámetros y operaciones que intervienen en un determinado sistema. La red de agua potable del sector Zamora Huayco de la ciudad de Loja, Ecuador, se modeló hidráulica y matemáticamente en la presente investigación. En ella se aplicaron dos modelos matemáticos diferentes: determinístico y estocástico. El Modelo determinístico consistió en la obtención de la Curva de Variación Horaria de Demanda (CVHD). La CVHD fue obtenida de los consumos y presiones de la red principal, y de puntos seleccionados estratégicamente. Para el procesamiento de datos de la CVHD se utilizó los softwares EPANET y MatLab. El método de Pulsos Rectangulares de Poisson (PRP) se aplicó para el enfoque estocástico y fue desarrollado con el software MatLab. En el modelo PRP se consideró la variación instantánea de consumos y presiones domésticas como una distribución aleatoria uniforme. Los resultados obtenidos en esta investigación fueron evaluados y correlacionados, determinando cuál de los dos modelos matemáticos es el más eficiente en la solución al elevado consumo y presiones en la zona de estudio.

Palabras clave: agua potable, curva de variación horaria, determinista, estocástica, modelación.

Abstract

Mathematical modeling describes the variables, parameters and operations that intervene in a system. The potable water network of Zamora Huayco sector in Loja, Ecuador, was modeled hydraulically and mathematically in this investigation. It was applied two different mathematical models: deterministic and stochastic. The deterministic model solved the Demand Time Variation Curve (DTVC). The DTVC was obtained from the consumption and pressures of the main network, and from strategically selected points. For the DTVC data processing the EPANET and MatLab softwares were used. The Poisson Rectangular Pulse (PRP) method was applied for the stochastic approach and was developed with MatLab software. In the PRP model, the instantaneous variation of domestic consumption and pressures was considered as a uniform random distribution. The results obtained in this research were evaluated and correlated, determining the most efficient model in solving the high consumption and pressures in the study area.

Keywords: drinking water, time variation curve, deterministic, stochastic, modelling.

¹ Doctor en Infraestructura y Geomática, Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, rgserrano@utpl.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-1765-4126>

² Doctor en Ingeniería Civil, Parque Científico y Tecnológico, Vicerrectorado de Investigación, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú, aruizpico@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-2638-0593>

³ Ingeniero Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador, ratandazo37@gmail.com

1. Introducción

El análisis en redes de agua potable es un método utilizado para estimar la disponibilidad del recurso hídrico en zonas urbanas y rurales. Existen varias metodologías desarrolladas para analizar el estado de una red de agua potable: (1) método gráfico de Freeman, (2) método de la tubería equivalente, (3) método de Cross, (4) método del Nudo Simultáneo, (5) método del Circuito Simultáneo, (6) método de la Tubería Simultánea o (7) método del Gradiente.

En los métodos de análisis de redes de agua potable el factor con mayor impacto es el consumo doméstico, ya que su complejidad incide en el funcionamiento adecuado de los circuitos que conforman la red de agua potable. Además, se pensaba que los caudales y presiones se producían en régimen permanente sin considerar la aleatoriedad de los consumos. Por esta razón, los caudales y presiones se analizaban a través de la Curva de Variación Horaria de Demanda.

A mediados de la década de 1980 en países como Estados Unidos, se realizaron investigaciones para plantear nuevos modelos matemáticos para establecer el comportamiento de caudales y presiones con mayor exactitud en una red de agua potable. Se observó que los consumos y presiones se ajustan a un modelo de Pulsos Rectangulares de Poisson (PRP), (Alcocer, Arreguín, Bourgett, & Tzatchkov, 2014). La aplicación de algoritmos y programas desarrollados en computadora fueron claves en la obtención resultados precisos en menor tiempo (Saldarriaga, (2008)

En Latinoamérica países como México y Colombia utilizan modelos PRP en diseño de redes. Estos modelos permiten conocer el comportamiento real de una red de agua potable y la existencia de fugas domiciliarias.

En el caso de Ecuador, aún no se han adoptado estos modelos matemáticos vinculados al diseño hidráulico. Según el régimen pluviométrico en el Ecuador, CEPAL (2014) estima que el cada ciudadano ecuatoriano podría disponer potencialmente de 21000 metros cúbicos al año. El agua potable llega al 97% de las zonas urbanas mientras que en las zonas rurales el 82% (Martínez, 2015).

El elevado consumo de agua potable de los ecuatorianos se debe también al desperdicio del líquido en actividades como: aseo personal sin cerrar la llave o debido a la existencia de fugas internas en el domicilio (Sorgato, 2015).

Particularmente en la ciudad de Loja, los problemas provocados por un excesivo consumo se ocasionan por: (1) negligencia o descuido respecto a las fugas producidas, (2) mal estado de las piezas sanitarias, (3) tuberías de rebose de las que escapa el agua, (4) goteo en grifos, (5) mangueras abiertas, (6) lavado de autos en la vía pública, entre otros (El Telégrafo, 2013).

Un análisis detallado de las redes de agua potable en la ciudad de Loja mejoraría el servicio del recurso hídrico. Por lo tanto, para la presente investigación se consideró analizar el subsector Zamora Huayco de la ciudad de Loja. Se aplicó la modelación Determinística (Curva de Variación Horaria) y la modelación Estocástica (Pulsos Rectangulares de Poisson).

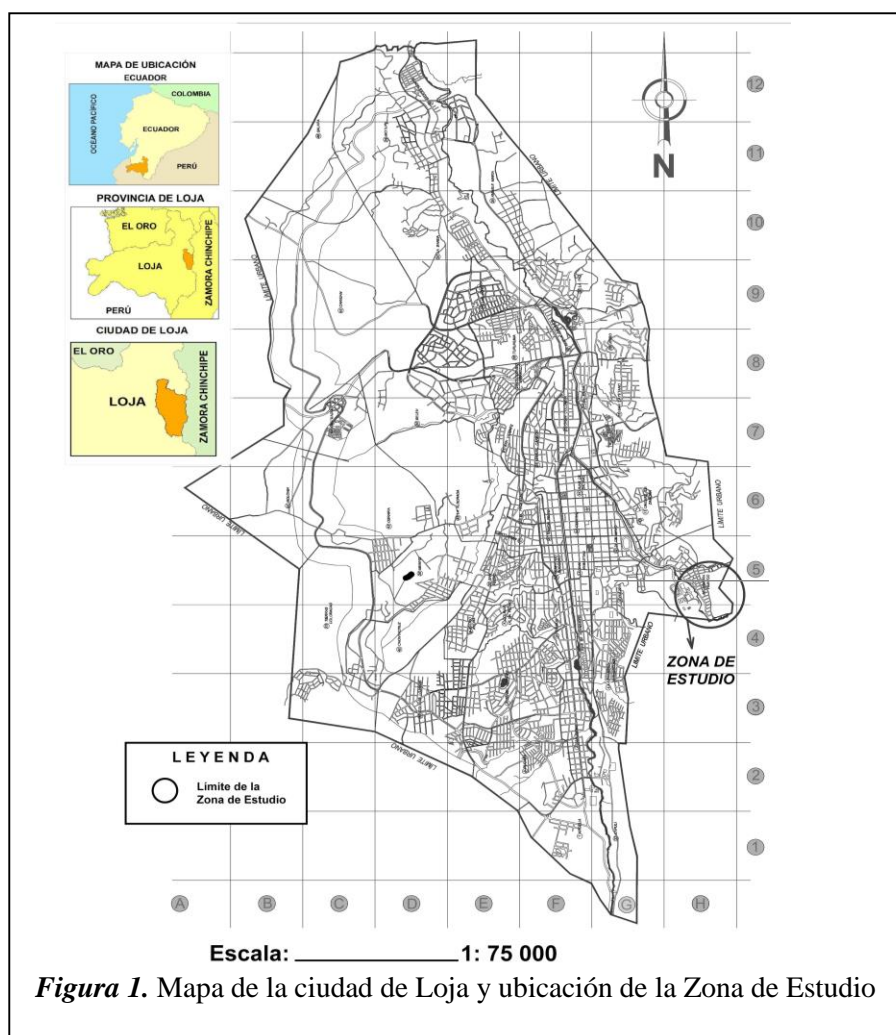
Para analizar el estado de la red de agua potable y cuantificar el consumo doméstico la presente investigación tiene como objetivo general modelar la red de agua potable con enfoques determinísticos y estocásticos del subsector Zamora Huayco de Loja. Para este fin se analizó el consumo doméstico del distrito hidrométrico Zamora Huayco en Loja aplicando la Curva de Variación Horaria. Además, se aplicaron los modelos de: Pulsos Rectangulares de Poisson. Los modelos Determinístico y Estocásticos fueron correlacionados para establecer la mejor alternativa de solución respecto a la zona de estudio.

Área de estudio

El sector Zamora Huayco está ubicado en la ciudad de Loja, al sur del Ecuador. Loja tiene una altitud de 2100 m.s.n.m.; sus coordenadas geográficas son 04° 30' 38" de Latitud Sur y 79° 05' 58" de Longitud Oeste. Su extensión es de 57 Km² (PNUMA, 2007). La ubicación de la ciudad de Loja se muestra en la Figura 1. Según datos de (PNUMA, 2007, p. 37), la ciudad de Loja tiene un clima de tipo temperado-ecuatorial subhúmedo. La temperatura promedio es de 16°C, con una precipitación anual alrededor de 900 mm.

La ciudad de Loja se localiza sobre una cuenca sedimentaria de origen lacustre, perteneciente al período terciario. Por tanto, la presencia de movimientos de compresión causó levantamientos o hundimientos en el terreno. De esta forma, surgieron pliegues suaves al lado occidental de la hoya y marcada pendiente en la parte oriental (PNUMA, 2007, p. 41).

La red de distribución de agua potable investigada se ubica en el sector Zamora Huayco, al sur oriente de la ciudad de Loja. De acuerdo a técnicos de UMAPAL (Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja), esta red se conoce como Zona "Z E1" (UMAPAL, 2017).



Según Maza (2009) y UMAPAL (2017) el subsector Zamora Huayco dispone de una población: 4 144 hab, Dotación: 250 lit/hab/día, Clima: Lluvioso-Templado, Temperatura media anual: 15,3 °C, Altura: 2101,50 m.s.n.m.

Entre los datos requeridos para el desarrollo de esta investigación, se encuentran:

- Planimetría del subsector Zamora-Huayco y Plano de rediseño hidráulico de la red de distribución de agua potable que comprende: diámetro de tuberías, material que está compuesta la tubería, válvulas de control y regulación, caudales y presiones en los nudos que conforma la red en mención. Esta información fue proporcionada por (UMAPAL, 2017).
- Hidrografía: La zona de estudio limita con el río Zamora Huayco, este tiene como afluentes las quebradas: Mendieta y Las Minas (Maza, 2009). La hidrografía mencionada se presenta en la Figura 12.
- Ubicación del distrito hidrométrico Zamora Huayco: 4°00'23.2"Sur; 79°11'13.1"Oeste. (Maps, 2017)

La ubicación de la zona de estudio de la presente investigación se indica en la Figura 2.

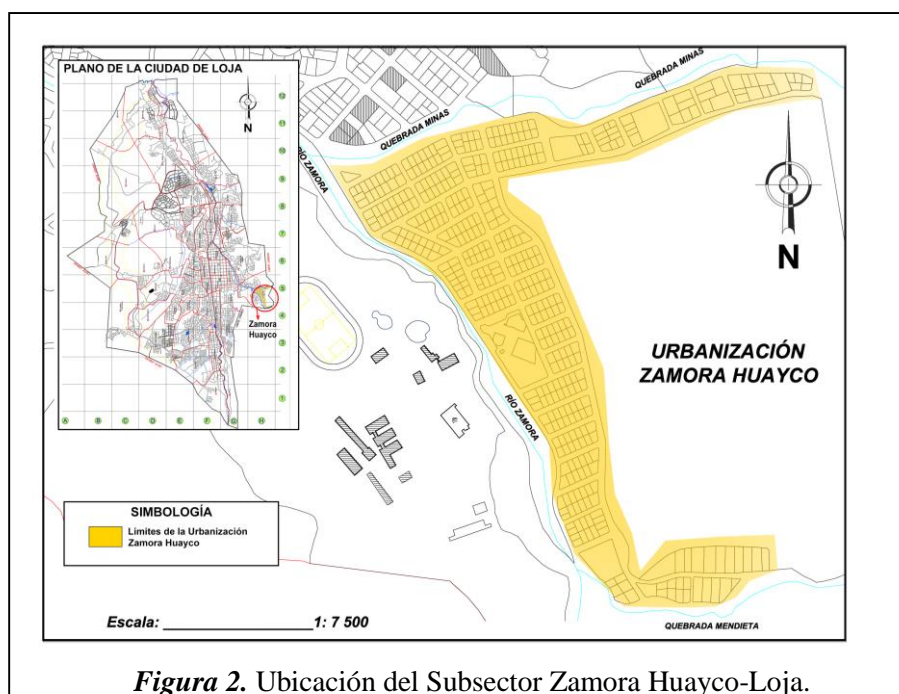


Figura 2. Ubicación del Subsector Zamora Huayco-Loja.

2. Material y métodos

El hidrómetro es un instrumento de precisión que sirve para registrar la cantidad de agua potable consumida en el interior de un predio. La unidad de medida del equipo es metros cúbicos.

El volumen de agua consumido se registró con los medidores de predios estratégicamente elegidos del subsector Zamora Huayco. En la figura 3, se muestra uno de los medidores de agua utilizado para la presente investigación.



Figura 3. Medidor de agua (Hidrómetro).

El manómetro Bourdon es un instrumento de forma circular. Sirve para medir la presión estática. Está conformado por un tubo curvo y aplanado que se expande hacia el exterior al someterse a una presión interna. En la Figura 4 se presentan las partes que componen un manómetro de presión de Bourdon.

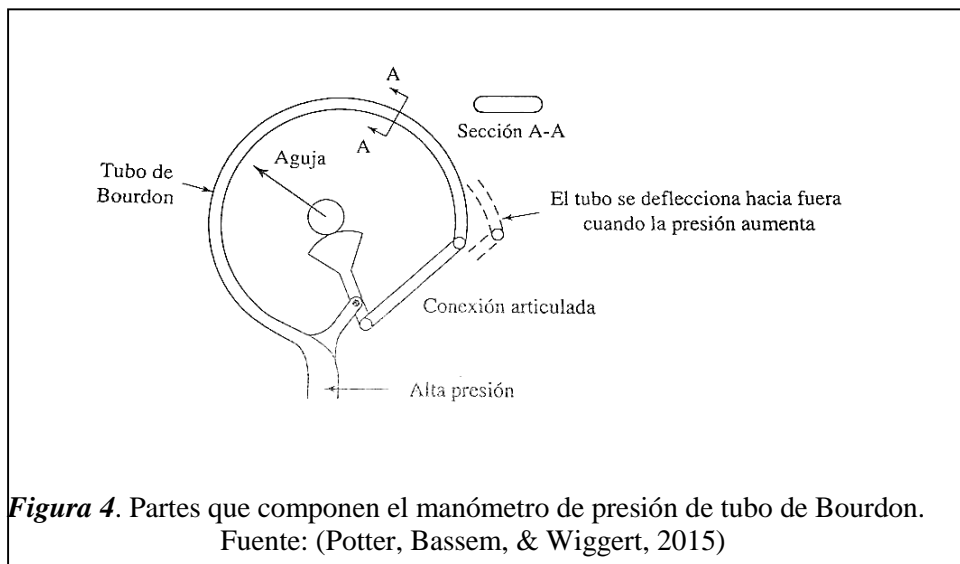


Figura 4. Partes que componen el manómetro de presión de tubo de Bourdon.
Fuente: (Potter, Bassem, & Wiggert, 2015)

Para la presente investigación se utilizó un manómetro Bourdon en el registro de presiones domiciliarias. Se encuentra calibrado para lecturas con doble escala en PSI y bares. Los rangos de lectura en psi son de 0 a 100 (0 a 70.31 metros de la columna de agua) y de 0 a 7 bares. La figura 5, muestra el instrumento utilizado para la medición de presión.



Figura 5. Manómetro de presión de tubo de Bourdon

El software EPANET fue creado por la US EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) en el año 1993. Posteriormente, se desarrollaron sus características gráficas para presentar un entorno más amigable con el usuario. Su principal objetivo es el diseño y análisis de redes de agua potable. Actualmente dispone de licencia libre. También se dispone la versión en español que se desarrolló en la UPV (Universidad Politécnica de Valencia en el año 2002 y 2010 (EPA, 2017).

MatLab es un software de cálculo técnico desarrollado en el año 1984 por Cleve Molder. Inicialmente realizaba el cálculo con matrices de grandes dimensiones. Posteriormente se incorporaron herramientas para la ejecución de análisis numérico, procesamiento de señales, desarrollo de algoritmos, gráficos, programación orientada a objetos. En la actualidad existen versiones como la estudiantil y la profesional para el manejo del software. Se caracteriza por presentar una amplia base de datos para la aplicación de fórmulas y funciones matemáticas.

Métodos

Se escogieron 5 puntos de control:

- **PB:** Correspondiente al Punto Base de la Red de Distribución de Agua Potable de Zamora Huayco.
- **PR 1:** Punto de Registro 1 - Vivienda 1
- **PR 2:** Punto de Registro 2 - Vivienda 2
- **PR 3:** Punto de Registro 3 - Vivienda 3
- **PR 4:** Punto de Registro 4 - Vivienda 4

Los puntos de registro se ubican según se indica en la Figura 8.

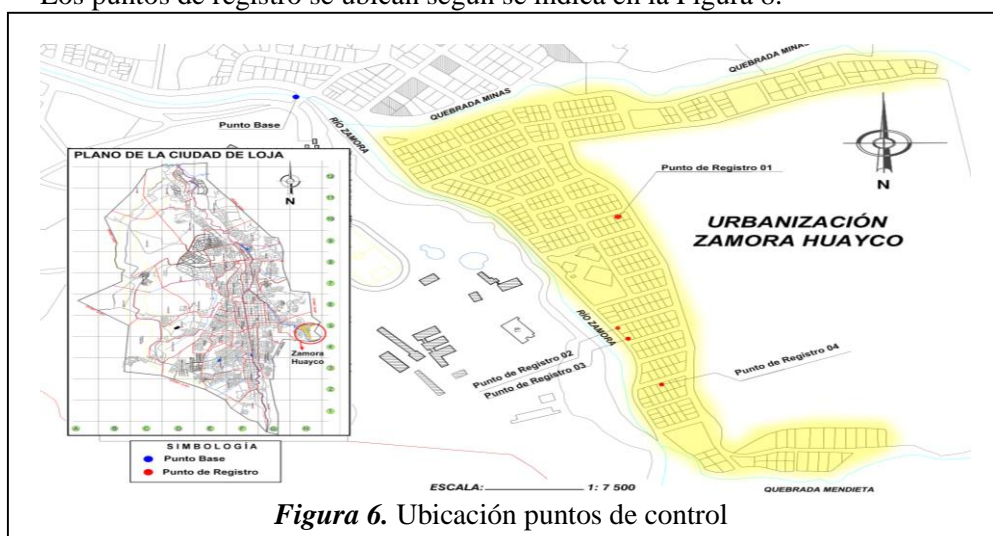


Figura 6. Ubicación puntos de control

Aplicación de la curva de variación horaria de demanda (CVH).

La aplicación de software EPANET permitió determinar la Curva de variación horaria de demanda, CVH; para esto se modeló el distrito hidrométrico Zamora Huayco. En este modelo constan: la topología, alturas y demandas de los nudos, diámetros, longitudes y rugosidad de tuberías. Cabe señalar que la red se realizó como un modelo dinámico de 24 horas (es decir en período cuasi-estático). En la figura 7 se presenta la modelación del distrito hidrométrico Zamora Huayco:

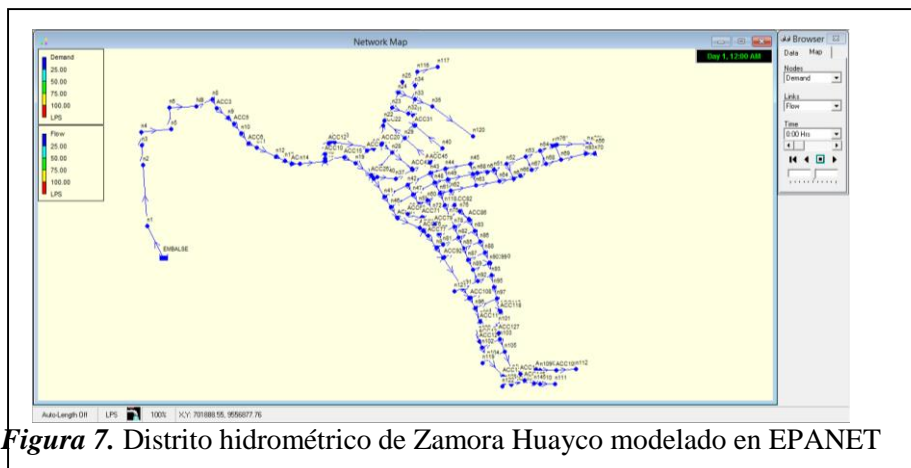


Figura 7. Distrito hidrométrico de Zamora Huayco modelado en EPANET

La Curva de Variación Horaria de Demanda (CVHD) del distrito hidrométrico Zamora Huayco, fue elaborada a partir de datos históricos de Medina (2016) y UMAPAL (2017). Las demandas de cada nudo de la red fueron registradas en litros por segundo. La CVHD se muestra en la figura 8.

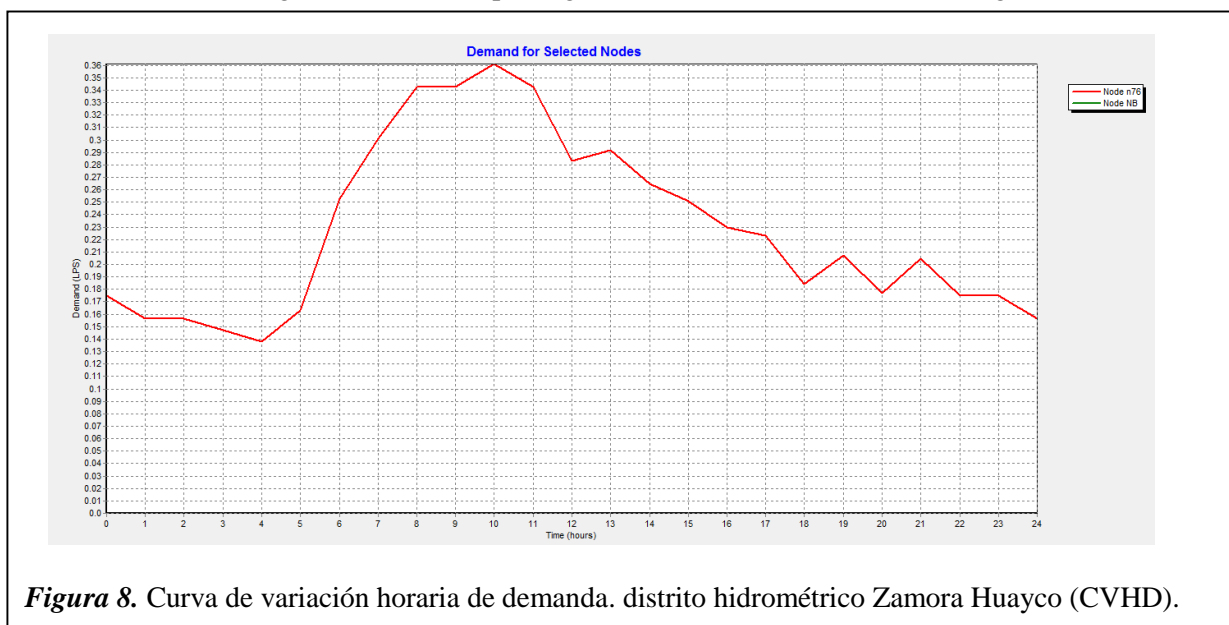


Figura 8. Curva de variación horaria de demanda. distrito hidrométrico Zamora Huayco (CVHD).

La serie temporal de demanda y presión se realizó en los domicilios con registros en campo. Estos registros fueron tomados en horas pico, de lunes a domingo en intervalos de 2 minutos durante una hora. En este período de tiempo los usuarios consumen con mayor frecuencia el agua para usos diversos.

Para obtener las demandas domiciliarias, se registró el volumen de agua consumido con el medidor instalado en cada vivienda, así como el tiempo transcurrido. Se determinó por medio de un cronómetro digital con exactitud de centésimas de segundo.

Con el manómetro de tubo de Bourdon se realizaron los registros de las presiones domiciliarias en libras por pulgada cuadrada. Los intervalos de tiempo de presión fueron tomados de formar similar a las demandas. Posteriormente a las presiones obtenidas, se realizaron las respectivas transformaciones a metros de la columna de agua de presión.

Los registros domiciliarios de demandas y presiones fueron realizados desde el 13 de noviembre de 2017, hasta el 13 de enero de 2018. Debido a la extensa cantidad de datos registrados, se elaboró la serie temporal Demanda-Presión domiciliar en el software MatLab. En la figura 9, se indica la serie temporal Demanda-Presión semanal típica de una vivienda.

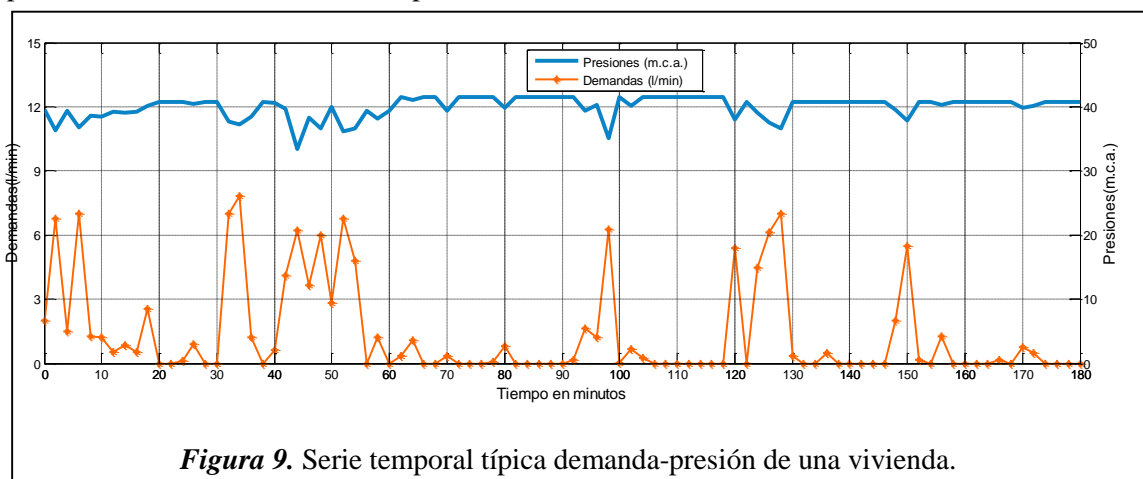


Figura 9. Serie temporal típica demanda-presión de una vivienda.

Modelación de los pulsos rectangulares de Poisson (PRP) en la red analizada.

Para diseñar el modelo de Pulsos Rectangulares de Poisson (PRP), se consideró un registro diario de 90 datos con registros cada 2 minutos las 3 horas pico, se transformaron en 1,5 horas. Aplicando un nivel de confianza del 90% y un margen de error del 5%, se depuró hasta obtener una muestra de 70 registros. La frecuencia de uso del agua fue diaria. Los registros obtenidos se analizaron en 3 fases:

(1) En la fase 1 se ordenaron los registros obtenidos de forma secuencial según el intervalo de tiempo, aplicando una distribución normal entre los números aleatorios y el lapso de tiempo en que ocurre cada suceso obtenido a través de la Ec. 1.0.

$$t = \frac{1}{N\lambda} \ln x$$

(2) En la fase 2 se obtuvo la función que representa la tasa de llegada acumulada de los pulsos a través de integración numérica. Por medio del Método del Trapecio se estableció el área bajo la curva de la función de la tasa de llegada mediante la programación de una rutina en MatLab.

(3) En la fase 3 se obtuvo una serie sintética de la duración aleatoria en cada pulso.

Para determinar la intensidad aleatoria de cada demanda (l/s) y cada presión (m.c.a.), se aplica el mismo proceso indicado en las fases 1 a 3, es decir,

a. Duración media y desviación estándar de la duración de los pulsos de: demanda y presión en cada domicilio.

b. Intensidad media y desviación estándar de la intensidad de los pulsos de: demanda y presión en cada domicilio.

Para establecer la secuencia de los cálculos para cada hora u otro intervalo de tiempo, se utilizan números aleatorios para generar los instantes en que se producen los pulsos de demanda. De este modo, se obtiene la frecuencia correspondiente al intervalo de tiempo.

Asimismo, se utilizan números aleatorios, intensidad media y la desviación estándar, para generar la intensidad aleatoria de cada pulso de demanda.

Finalmente, se utilizan números aleatorios, duración media y desviación estándar para producir la duración aleatoria de cada pulso de demanda. En este proceso los pulsos de demanda se pueden traslapar.

Para mayor conocimiento del procesamiento de datos y metodología en el modelo de PRP, se detallan en (Tzatchkov, 2016) y (Alcocer-Yamanaka, Arreguín, & Feliciano, 2003).

3. Resultados

Para validar los resultados se realizó un muestreo con datos obtenidos en campo, para aplicar PRP. Este muestreo fue de 70 datos diarios, en demandas (l/s) y presiones (mca) respectivamente.

Resultados y discusión de la modelación determinística

La Curva de Variación Horaria (CVHD) del Distrito Zamora Huayco, obtenida del Nudo Base con el software EPANET, se presenta en la figura 10:

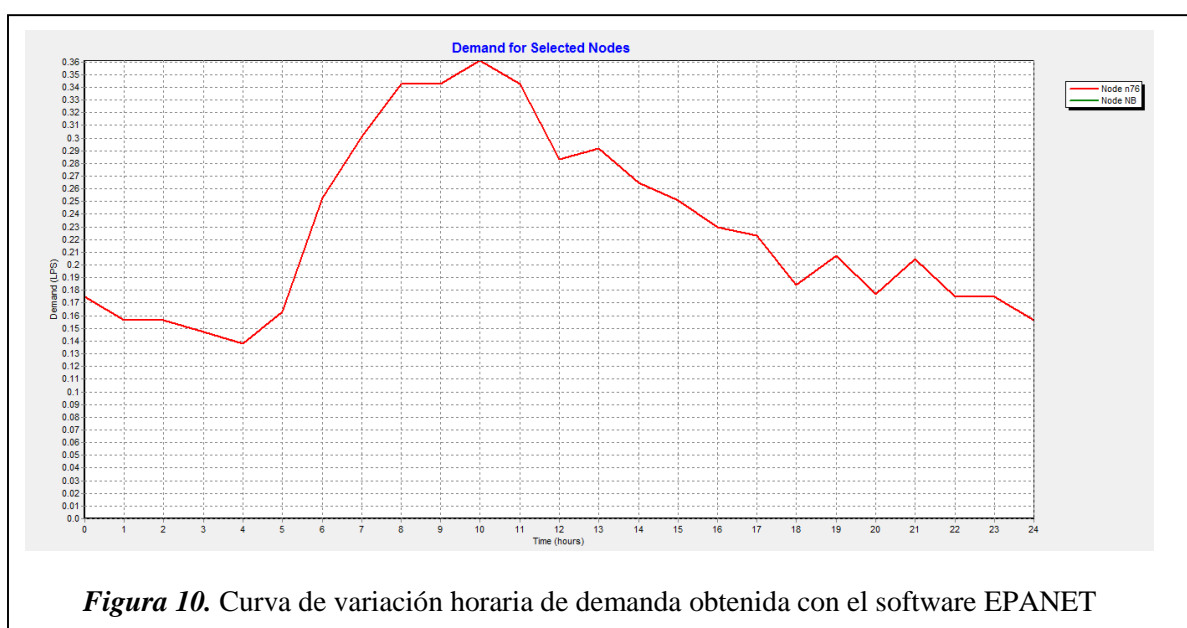
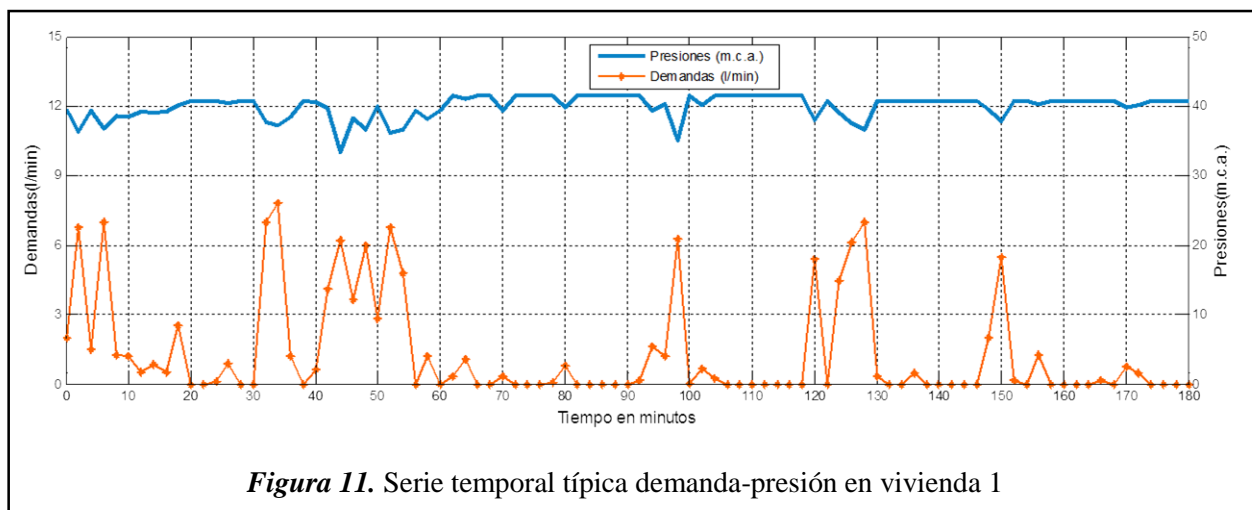


Figura 10. Curva de variación horaria de demanda obtenida con el software EPANET

Las simulaciones realizadas en MatLab establecieron que los comportamientos de las demandas domésticas son inversamente proporcionales a la presión del flujo. Este fenómeno se produce aplicando la curva de variación horaria de demanda (CVHD), como se indica en la Figura 11. Esto sucede porque la presión hidrodinámica en un líquido en movimiento es inversamente proporcional a la rapidez de este, y la presión es inversamente proporcional a la rapidez del líquido. Por ejemplo, el caudal máximo diario de la vivienda 1 es 10 l/min el mediodía del domingo, mientras que la presión máxima es de 44.76 m.c.a. (metros de la columna de agua) al mediodía del martes.



Discusión de la modelación Estocástica

En la Tabla 1 se muestra el total de pulsos producidos por demandas, presiones, volumen y duración en el Punto Base (PB) y cuatro Puntos de Registro (PR) considerados en la red.

Tabla 1.

Resultados de demanda obtenidos en el Punto Base y los Puntos de Registro para el período de medición de 7 días en Horas Pico.

Punto de registro	Volumen total de consumo (l)	Total, de pulsos de consumo	Total, de pulsos de presión	Dotación media por habitante (l/hab/día)
Punto Base	731121.10	12201.00	1859.00	
PR1	437.50	239.00	2754.00	250.00
PR2	539.12	277.00	2079.00	250.00
PR3	507.73	275.00	2733.00	250.00
PR4	385.73	205.00	2757.00	250.00

El volumen total de consumo en el Punto Base (P.B.) es mayor al del resto de puntos de registro, debido a que del PB se derivan todos los caudales de consumo para la red de Zamora Huayco. Además, el volumen total de consumo entre los puntos de registro PR1 a PR4 el de mayor incidencia es el PR2. Por tanto, en horas pico la demanda de agua excede el nivel de demanda medio como se muestra en la figura 12.

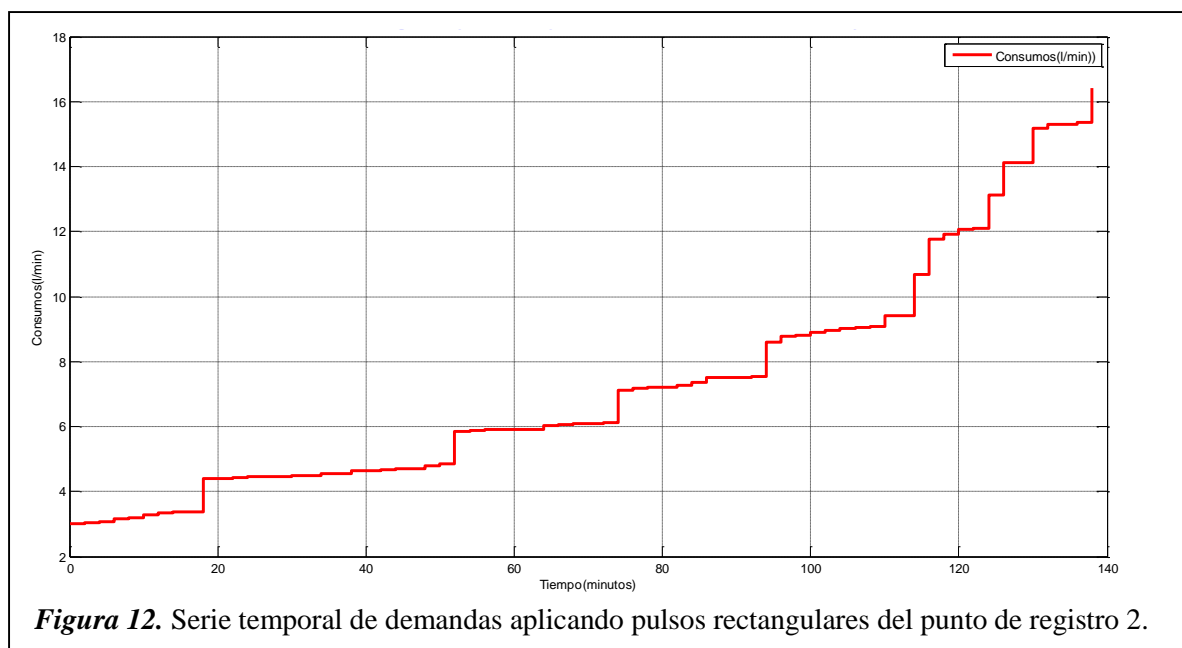


Figura 12. Serie temporal de demandas aplicando pulsos rectangulares del punto de registro 2.

La máxima cantidad de volumen de agua producida en el PB es de 47 831 litros (es decir 47.831 m³). Esto indica que en horas pico existe una gran demanda de agua en el distrito hidrométrico Zamora Huayco, siendo el medio día el lapso de tiempo donde se evidencia este resultado (ver Tabla 2).

Asimismo, entre el Punto de registro 2 (PR2) y el Punto de registro 4 (PR4) existe una diferencia significativa respecto a las demandas promedio. Esto se debe a que en el PR4 la hora pico de demanda de agua es diferente que en el P2. Mientras en el PR2, la demanda máxima de agua se produce desde las 11:30 de la mañana. En cambio, en el punto PR4 se origina la demanda de agua a partir de las 13:00

Tabla 2.

Parámetros estadísticos del volumen de los pulsos de demanda obtenidos en el Punto Base y en los cuatro Puntos de Registro para el período de medición de 7 días en Horas Pico.

Punto de registro	Promedio (l)	Mínimo (l)	Máximo (l)	Desviación estándar (l)	Varianza (l²)
Punto Base	30463.79	18361	47831	9456.14	89418613.8
PR1	6.83	2.00	20.00	4.88	23.81
PR2	7.34	2.00	22.00	4.54	20.61
PR3	6.87	2.00	38.00	5.19	26.93
PR4	5.40	2.00	20.00	2.81	7.89

En la Tabla 3 se muestra las intensidades de demanda en el Punto Base con escala de medición en l/s. La información obtenida de este punto correspondió a datos históricos registrados con esas unidades de medida. En caso de transformarlas a l/min se altera la varianza de las intensidades. Para los puntos P1 a P4, la intensidad de demanda fue uniforme con una ligera variación respecto al Punto P1. En este punto de registro, los habitantes del domicilio consumían el agua de forma esporádica.

Tabla 3

Parámetros estadísticos de la intensidad de los pulsos de demanda obtenidos en el Punto Base y en los cuatro Puntos de Registro para el período de medición de 7 días en Horas Pico.

Punto de registro	Promedio (l/min)	Mínimo (l/min)	Máximo (l/min)	Desviación estándar (l/min)	Varianza (l/min) ²
Punto Base	*	**	***	1.55 (l/s)	2.40 (l/s) ²
P1	3.52	2.03	5.44	0.94	0.88
P2	3.38	2.01	5.42	1.01	1.02
P3	3.34	2.08	5.41	0.98	0.96
P4	3.39	2.04	5.38	1.00	1.00

Nota: *Promedio = 1.80 l/s ; **Mínimo=0.211 l/s ; ***Máximo= 5.403 l/s, se determinó los parámetros del Punto Base con litros por segundo, para una mejor exactitud de los resultados.

En la Tabla 4 se muestran las intensidades promedio de presión. Entre PR1 y PR4 presentan gran similitud. En general, presenta uniformidad en los valores de las presiones domiciliarias como se muestra en la desviación estándar. Para comprender mejor este proceso, se presenta la Figura 16 correspondiente a PR3. Se puede observar el incremento de intensidad de presión desde 85 a 125 minutos. La pendiente de este intervalo es debida al uso excesivo del agua al interior del domicilio

Tabla 4.

Parámetros estadísticos de la intensidad de los pulsos de presión obtenidos en los cuatro puntos de registro para el período de medición de 7 días en Horas Pico.

Punto de registro	Promedio (m.c.a.)	Mínimo (m.c.a.)	Máximo (m.c.a.)	Desviación estándar (m.c.a.)	Varianza (m.c.a.) ²
PR1	3.43	2.00	5.43	1.07	1.14
PR2	3.53	2.02	5.34	0.96	0.92
PR3	3.36	2.01	5.34	1.05	1.10
PR4	3.55	2.01	5.35	0.92	0.84

El promedio de las duraciones mostradas en la Tabla 5 indica la semejanza existente entre los puntos PR1 al PR2, siendo el PR2, el de mayor intensidad promedio respecto a los demás puntos de registro. Sin embargo, al referirse al nivel máximo de duración, se indica que el PR3 es el de menor duración. Una de las razones que produce esta duración, es la menor cantidad de uso del recurso hídrico. En este domicilio habitan dos personas de avanzada edad.

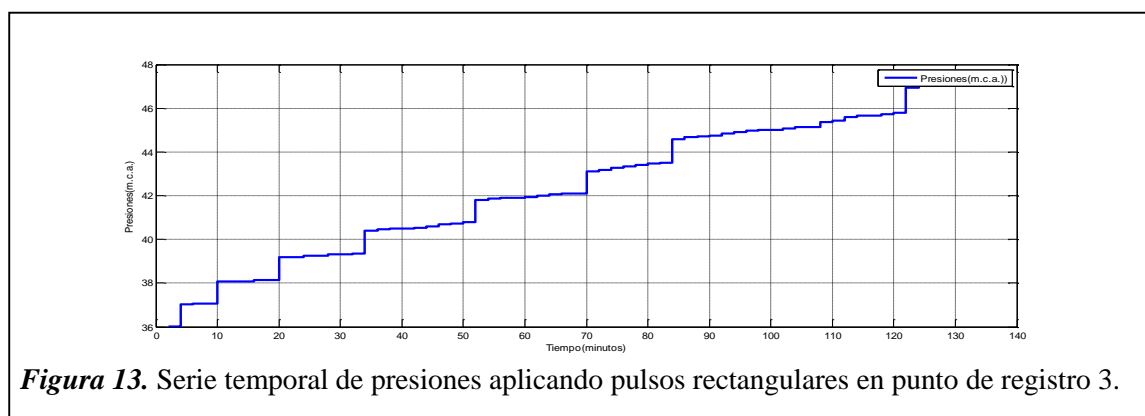


Tabla 5.

Parámetros estadísticos de la duración de los pulsos en los cuatro puntos de registro para el período de medición de 7 días en Horas Pico.

Punto de registro	Promedio (minutos)	Mínimo (minutos)	Máximo (minutos)	Desviación estándar (minutos)	Varianza (minutos)²
PR1	3.39	2.04	5.44	1.03	1.06
PR2	3.53	2.01	5.40	1.01	1.02
PR3	3.15	2.08	5.11	0.88	0.77
PR4	3.40	2.04	5.40	0.92	0.92

4. Conclusiones

- Las variaciones de consumo domiciliario se producen básicamente por hábitos y usos diversos del agua por parte de los usuarios, así como posibles fugas internas en los domicilios. Debido a los alcances de esta investigación, el índice de fugas queda planteado para posteriores trabajos de investigación.

- La tendencia de la Curva de Variación Horaria de Demanda (CVHD) está influenciada principalmente por el gasto medio horario producido en una red. Sin embargo, este criterio varía dependiendo de las características de la red de agua potable. La CVHD de una red principal tendrá una tendencia diferente respecto a una red domiciliaria.

- Utilizando el software EPANET se obtuvo la CVHD de la red del distrito hidrométrico Zamora Huayco. Con esta curva se determinó la tendencia existente en el consumo general de la red, teniendo como limitante el intervalo de tiempo de análisis en horas. Asimismo, usando MatLab se determinó la CVHD de cada punto de registro seleccionado para esta investigación.

- Los Pulsos Rectangulares de Poisson (PRP) se analizaron en hojas Excel y mediante la programación de rutinas en MatLab. La aplicación de series temporales con los PRP permitió conocer las variaciones producidas de forma instantánea en cada consumo.

- Se obtuvieron modelos matemáticos para cada punto de registro según la distribución uniforme de los datos, al aplicar los PRP. Punto Base: $y = -1 \ln(x)$; Punto de Registro 01: $y = -0,278 \ln(x) - (7)^{-16}$; Punto de Registro 02: $y = -0,26 \ln(x) - (4)^{-16}$; Punto de Registro 03: $y = -0,254 \ln(x) - (3)^{-16}$; Punto de Registro 04: $y = -0,278 \ln(x) + (7)^{-17}$. A través de estos modelos, se determinó el comportamiento particular de los consumos producidos en cada domicilio seleccionado.

- Las pendientes medias ponderadas de las curvas de tendencia fueron negativas, debido al descenso producido por la aleatoriedad de los datos. Las pendientes en cada punto fueron: Punto Base: -58,19%; Punto de registro 01: -61,50%; Punto de registro 02: -59,93%; Punto de registro 03: -62,42%; Punto de registro 04: -64,82%.

- La Curva de Variación Horaria de Demanda es útil para el abastecimiento de redes de agua potable. En tanto que el modelo de Pulsos Rectangulares de Poisson permite determinar variación instantánea de consumos y fugas domiciliarias. Por consiguiente, lograr un mejor tarifado de consumos domésticos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal técnico y administrativo de la Unidad Municipal de Agua Potable del Gobierno Autónomo de la ciudad de Loja, Ecuador, por toda la colaboración brindada durante el desarrollo de esta investigación. También agradecemos los aportes académicos de los profesores del Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja. Finalmente expresamos nuestro agradecimiento al editor y a los revisores anónimos por sus acertados comentarios que hicieron posible la publicación de este documento.

5. Referencias

- Alcocer-Yamanaka, V. H., Arreguín, F. I., & Feliciano, D. (2003). *Medición y caracterización estocástica de la demanda instantánea de agua potable* (20 No. 1). México, D.F. Recuperado a partir de <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1236>
- Alcocer, V., Arreguín, F., Bourgett, V., & Tzatchkov, V. (2014). *Avances en la hidráulica de redes de distribución de agua potable*. (Primera Ed). México, D.F.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado a partir de <https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/avances-en-la-hidraulica-de-redes-de-distribucion-de-agua-potable>
- El Telégrafo. (2013, noviembre 14). *Seis microcuencas abastecen de agua a Loja*. Recuperado a partir de <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/regional-sur/1/seis-microcuencas-abastecen-de-agua-a-loja>
- Interagua. (2017). *Medidor de Agua*. Recuperado el 27 de octubre de 2017, a partir de https://www.interagua.com.ec/clientes_medidor_agua#faq1
- Martínez, A. (2015). *El consumo de agua en el Ecuador*. Recuperado el 19 de septiembre de 2017, a partir de <https://www.elmercurio.com.ec/470834-el-consumo-de-agua-en-el-ecuador/>
- Maza, C. (2009). *Clasificación y Análisis de la cobertura vegetal sobre la sucesión Zamora Huayco-Cantón Loja*. UTPL. Recuperado a partir de <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/2218?locale=es>
- Medina, B. (2016). *Determinación muestral de las curvas de consumo de agua domiciliar y su relación con la evolución de la presión en los puntos de demanda concatenado con la proyección del error del parque de contadores*. UTPL. Recuperado a partir de <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/14194>
- PNUMA, et al. (2007). *Perspectivas del Medio Ambiente Urbano: GEO-Loja*. Recuperado a partir de [www.naturalezaycultura.org/docs/Geo Loja.pdf%0A](http://www.naturalezaycultura.org/docs/Geo%20Loja.pdf%0A)
- Potter, M., Bassem, R., & Wiggert, D. (2015). *Mecánica de Fluidos*. En Cengage Learning Editores (Ed.), *Mecánica de Fluidos* (Cuarta Edición). México, D.F.: Cengage Learning.
- Saldarriaga, J. (2008). *Hidráulica de tuberías: abastecimiento de agua, redes, riegos*. (U. de los Andes, Ed.) (Segunda). México, D.F.: Alfaomega.
- Sorgato, V. (2015, noviembre 14). *Ecuador consume más agua en la región*. PLANETA. Recuperado a partir de <http://especiales.elcomercio.com/planeta-ideas/planeta/noviembre-14-del-2015/ecuador-consume-mas-agua-en-la-region>
- Tzatchkov, V. G. (2016). *Modelación de la variación del consumo de agua potable con métodos estocásticos*, 20. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000300115