

Estimación de parámetros del consumo instantáneo de agua potable de lecturas acumuladas

Instantaneous Water Demand Parameter Estimation from Accumulated Readings

V.H. Alcocer-Yamanaka

*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México.
E-mail: yamanaka@tlaloc.imta.mx*

V. Tzatchkov

*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México.
E-mail: velitchk@tlaloc.imta.mx*

(Recibido: junio de 2007; aceptado: noviembre de 2008)

Resumen

El consumo de agua potable a nivel doméstico tiene carácter estocástico, caracterizado por la intensidad, duración y frecuencia de los pulsos de demanda; cada una de ellas representada estadísticamente. Estos parámetros se pueden obtener por medio de medición directa de la demanda instantánea, pero esta forma necesita mediciones con registro de cada segundo, por lo que genera una enorme cantidad de datos por manejar. En este artículo se presenta un nuevo método para estimar los parámetros para la generación de las series de consumo, con base en mediciones con intervalos mayores a un segundo. El método propuesto considera principios del proceso de Neyman-Scott (N-S) en la desagregación temporal del volumen acumulado. La estimación de los parámetros se fundamenta en la comparación de los momentos estadísticos observados con los momentos teóricos. Se plantea una función objetivo que expresa la relación entre ambos momentos, la cual se minimiza obteniéndose así los parámetros que caracterizan estadísticamente el consumo instantáneo. Una vez estimados tales parámetros, el modelo estocástico permite abordar el problema de generación de series sintéticas de consumo, empleando cualquier intervalo de agregación temporal. El método se validó por comparación entre series generadas con los parámetros resultantes y series medidas en campo.

Descriptores: Consumo estocástico de agua potable, modelación del consumo de agua potable, estimación de parámetros, series de consumo de agua, desagregación temporal, método de Neyman-Scott.

Abstract

Residential water demand is a highly unsteady stochastic process, defined statistically by the frequency of water use, and intensity and duration of stochastic demand pulses. Known procedures for obtaining those parameters are based on direct observation of the instantaneous water demand by registering it every second. That direct technique turns out to be impractical because of the enormous amount of data generated and to be processed. A new method for estimating the necessary parameters for simulating the instantaneous water demand from larger than one second meter readings is presented in this paper. The proposed method considers principles from the Neyman-Scott (N-S) process, such

as the disaggregation of the accumulated water volume, based on a comparison between the statistical moments of the observed larger interval demand series and the theoretical moments of the instantaneous water demand. An objective function expressing the relation between both theoretical and observed moments is formulated and minimized by a non linear programming technique obtaining the intensity, duration and arrival rate of the instantaneous demand pulses. Using these results instantaneous water demand series, or demand series with any averaging interval, can be generated. The method is validated by comparing the generated demand series with observed demand series.

Keywords: *Stochastic water demand, water demand modeling, parameter estimation, water demand series, temporal disaggregation, Neyman-Scott method.*

Introducción

En las últimas décadas se han realizado avances en la modelación matemática de redes de distribución de agua; sin embargo, no es así en cuanto a la modelación del consumo. Existen ahora programas computacionales (software), como Epanet (Rossman, 2000), Scadred (Tzatchkov e Izurieta, 1996) y otros, que permiten introducir la red completa (incluyendo red secundaria) y modelar su operación en estado permanente (análisis estático) y no permanente (análisis dinámico). Usualmente para representar los consumos de agua potable para modelación dinámica se emplean curvas de variación horaria (método tradicional). La modelación de las redes con el uso de ese tipo de curvas resulta aceptable para las tuberías principales, donde la variación del caudal conducido es continua, pero poco realista en las tuberías secundarias que proporcionan el servicio, dado que el consumo real en un domicilio se presenta con pulsos instantáneos de poca duración seguidos de periodos prolongados sin consumo. El consumo esporádico se relaciona con tiempos de residencia más largos en las tuberías secundarias, que a su vez, afectan la calidad del agua que llega al usuario (Buchberger *et al.*, 2003). Por estas razones, mientras que para muchas aplicaciones de la modelación de redes en su aspecto hidráulico se puede trabajar con modelos esqueletonizados, que incluyen ante todo tuberías principales y manejan una curva de variación horaria de la demanda global para toda la red, para la modelación de la calidad del agua es importante incluir también las tuberías secundarias (Haestad *et al.*, 2003, Alcocer y Tzatchkov 2007). Ante esta situación, para modelar con mayor certeza el comportamiento hidráulico (caudal en tuberías, demanda y presión en nodos, por citar algunas variables) y la calidad del agua (expresada por la concentración del desinfectante) dentro de las redes de distribución, incluyendo las tuberías secundarias; surge la necesidad de enfoques más

realistas, que incluyan una definición temporal más precisa del consumo doméstico con escalas inferiores a la horaria. Un ejemplo de lo anterior es el “estancamiento” ($V=0$) que se presenta con frecuencia dentro de las tuberías en servicio.

Cada uso individual de agua se puede representar como un pulso con una altura (intensidad) x y un ancho (duración) aleatorios. La generación de una serie de consumo utiliza los siguientes parámetros básicos: tasa de llegada o frecuencia de los pulsos individuales λ , intensidad promedio de los pulsos \bar{x} , varianza de esa intensidad $Var(\bar{x})$, duración promedio de los pulsos \bar{d} y la varianza de esa duración $Var(\bar{d})$. La obtención de estos parámetros se ha realizado con mediciones de consumo cada segundo, lo que requiere de sofisticados equipos de medición y almacenamiento de datos y de un elevado esfuerzo computacional en el análisis de los datos generados (Buchberger *et al.*, 2003). Paralelamente, se han desarrollado en los últimos años técnicas orientadas a la estimación indirecta de los parámetros de series observadas de la demanda con intervalos de registro más largos (Alcocer *et al.*, 2006; Guercio *et al.*, 2001, Alvisi *et al.*, 2003). Métodos de esta naturaleza han sido desarrollados y validados para la modelación de la lluvia también (Rodríguez *et al.*, 1984, Salsón y García 1998). Nadimpalli y Buchberger (2003) realizaron una comparación entre esas técnicas, aplicadas al problema de estimación de los parámetros. Los resultados de su análisis demuestran que ninguna de las técnicas satisfactoriamente conocidas cumple con la condición de poder trabajar con diferentes escalas de tiempo.

En este trabajo se propone un método para estimar los parámetros básicos necesarios para generar las series de consumo a partir de la desagregación temporal de mediciones con intervalo de registro de mayores a un segundo. A diferencia de los métodos mencionados, la estimación se realiza con datos de series de consumo medidos en los propios domicilios, lo que elimina el

error debido a la agregación espacial. Parte de la formulación matemática está basada en un tipo de proceso estocástico, conocido como proceso o esquema de Neyman y Scott (N-S). El método se validó con datos de consumo de agua potable de domicilios ubicados en la ciudad de Culiacán, México.

Formulación del método propuesto

El comportamiento estocástico de la lluvia ha sido un campo de aplicación de esquemas como N-S; sin embargo, en la modelación del consumo doméstico no se han realizado este tipo de trabajos, por lo que es ilustrativo establecer las analogías que existen entre ambas acciones dentro de la formulación. En términos generales se establece que los eventos incluidos dentro del esquema de N-S, podrán definirse como lluvia o series de pulsos de consumo doméstico, según sea el caso (tabla 1).

Se trata de un proceso de cierta tasa de llegada (frecuencia) de eventos donde el evento por tratar (

registros de consumo doméstico ó lluvia) se presenta simulando un proceso de Poisson con parámetro λ , que representa el número de ocurrencias por unidad de tiempo y donde existe un número aleatorio de celdas (pulsos de demanda) asociadas a cada evento. El tiempo entre el inicio del evento y el origen de cada celda o pulso se encuentra distribuido de forma exponencial, representado con un parámetro η , en otras palabras, este parámetro representa el tiempo promedio entre el origen del evento y cada una de las celdas (figura 1).

Por convención dentro del esquema de N-S, el inicio del primer pulso o celda, no obligatoriamente coincide con el origen del evento al que pertenezca. Otra consideración del esquema es que el origen de cada celda ó pulso rectangular es independiente de la ocurrencia de otra celda dentro del evento, por lo que es posible que exista un traslape entre los pulsos. Un argumento adicional del esquema es que la magnitud de la intensidad x y la duración τ de los pulsos se gobiernan por una distribución exponencial.

Tabla 1. Definición de variables del proceso de Neyman-Scott aplicado a lluvia y a consumo de agua potable

Variable	Tormenta	Consumo de agua potable
$Y(t)$	Intensidad acumulada de la tormenta. Altura de lluvia total de la tormenta en un tiempo t .	Volumen acumulado. La suma del volumen de todos los pulsos de consumo en un tiempo t .
$X_u(\)$	Intensidad aleatoria de un pulso.	Caudal o gasto asociado a un pulso. Se mide en volumen por unidad de tiempo.
$N(t)$	Número de ocurrencias dentro del proceso de Poisson.	Número de ocurrencias dentro del proceso de Poisson.
λ	Número promedio de pulsos dentro de un evento de lluvia	Número promedio de pulsos que se presentan en un evento de consumo.

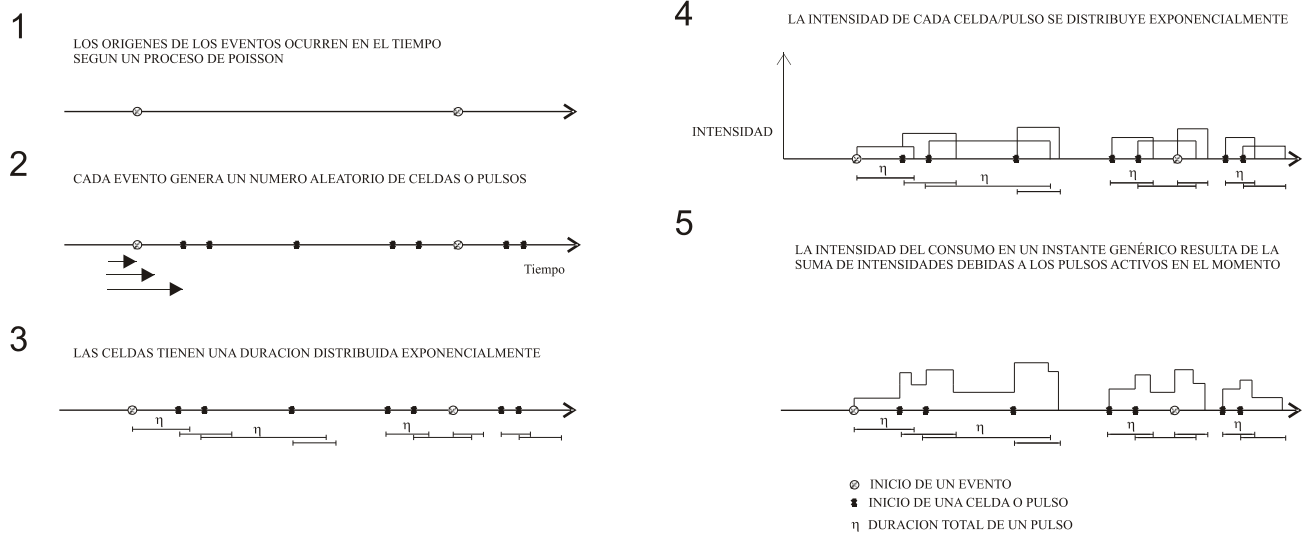


Figura 1. Esquemización del modelo Neyman-Scott, (Cowpertwait, 1991)

Las expresiones analíticas que describen el esquema, expresadas a través de momentos teóricos de segundo orden que involucran la media, varianza y covarianza de los pulsos, están dadas por Rodríguez-Iturbe *et al.* (1984); Rodríguez *et al.* (1987); Rodríguez-Iturbe *et al.* (1988), y Cowpertwait *et al.* (1996^a; 1996^b). El proceso $Y_i^{(h)}$ se define de la forma siguiente (Rodríguez-Iturbe *et al.*, 1987; Enthekabi *et al.* 1989):

$$E Y_i^{(h)} = c_x h \quad (1)$$

$$Var[Y_i^{(h)}] = c_x^2 (h^2 - 1) e^{-h} \quad (2)$$

$$Cov[Y_i^{(h)}, Y_{i+k}^{(h)}] = c_x^2 (1 - e^{-h})^2 e^{-(k+1)h} \quad (3)$$

donde: \bar{t} representa el tiempo promedio entre dos eventos, \bar{t}_i representa el tiempo promedio entre cada pulso individual y el origen del evento, \bar{t}_p representa la duración promedio de los pulsos, \bar{x} es la intensidad promedio de los pulsos y h el intervalo de agregación/desagregación analizado.

Definidas las expresiones del esquema de N-S, se formula la función objetivo:

$$Z = \frac{F_1(\cdot)}{F_1'} - 1^2 - \frac{F_2(\cdot)}{F_2'} - 1^2 \dots - \frac{F_n(\cdot)}{F_n'} - 1^2, \quad (4)$$

donde F_1', F_2', \dots, F_n' son los valores de los momentos observados, es decir, la media, varianza y correlación lag-1, entre otros. Por su parte, $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ son los momentos teóricos, funciones del vector de parámetros, $(\bar{x}, \bar{t}, \bar{t}_p, c_x)$. Para este caso de aplicación en consumos domésticos, se consideró $n=3$, que representa la media, varianza y covarianza en la ecuación (4).

Metodología

En la realización del proceso de desagregación se abordan diferentes etapas como el análisis de datos, formulación del modelo propuesto, estimación de parámetros y su validación (figura 2). Dentro de la estimación de parámetros se considera una técnica de optimización que emplea dos tipos de momentos: teóricos y observados. Los momentos observados se calculan a partir de los registros de consumo en campo.

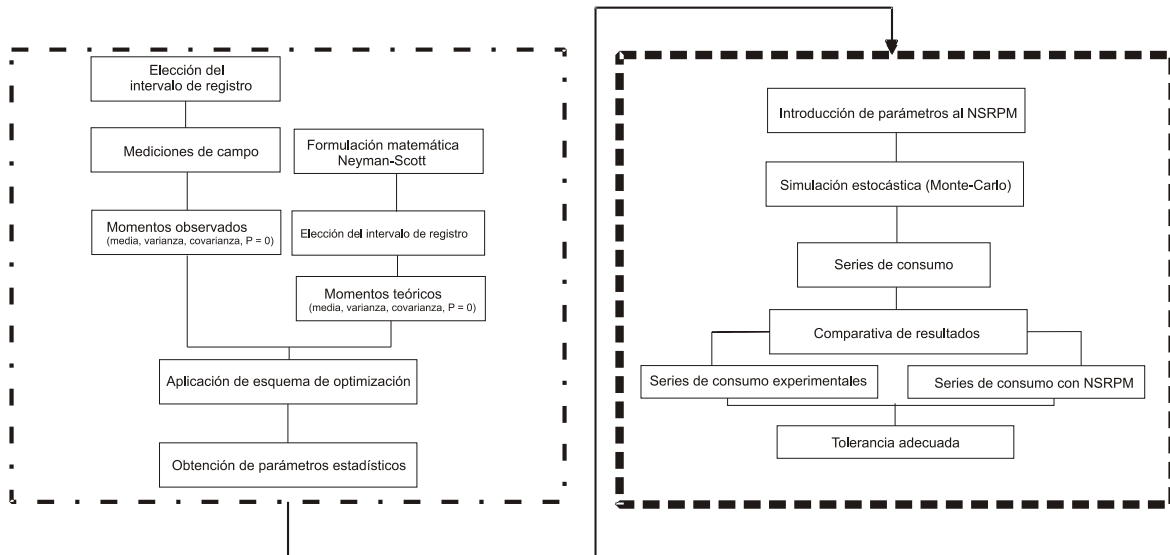


Figura 2. Metodología utilizada en el desarrollo del trabajo

Posteriormente, estos momentos se introducen dentro de la función objetivo (ecuación 4), cuyo mínimo se obtiene a través de técnicas de programación matemática no lineal, NLP (método de gradiente conjugado con derivadas centrales y estimación cuadrática), la minimización de la función objetivo. A partir de la solución del esquema de optimización, se obtienen los parámetros estadísticos necesarios $\{ \mu, \sigma^2, \rho \}$ para su introducción en un modelo computacional de generación de series de consumo aleatorio, como lo es el modelo Neyman-Scott de Pulsos Rectangulares de Poisson (NSRPM). Dado que se trata de un evento estocástico, es importante señalar que se deberá realizar cierto número de simulaciones dentro del NSRPM, considerando una semilla de generación de números aleatorios diferente entre una simulación y otra. Finalmente, con fines de comprobación se comparan las series sintéticas obtenidas a partir del NSRPM, con la serie original medida en campo. La generación de las series fue realizada con base en el modelo de dominio público contenido en el Rainfall Data Modelling Portal, RDMP (<http://www.rdmp.org/>).

Validación

El esquema se validó con una base de datos generada producto de mediciones realizadas en nueve casas habitación de la zona Humaya en Culiacán, Sinaloa (Alcocer y Tzatchkov, 2004; Alcocer y Tzatchkov, 2005). El equipo de medición empleado se compone de tres partes: 1) sensor de pulsos magnético, 2) unidad de almacenamiento de registros y, 3) micromedidor nuevo calibrado.

Momentos observados

Con el objetivo de demostrar la metodología planteada se tomaron los registros de cada minuto durante siete días en una casa habitación. Cabe aclarar que el esquema de Neyman-Scott es estadísticamente estacionario

en el tiempo, lo que obliga, por lo tanto, a aplicar el modelo en lapsos de tiempo concretos y no a lo largo de todo el día. Lo anterior se debe a que el proceso diario de consumo de agua para una vivienda dada, sigue patrones temporales claramente no estacionarios, con probabilidades de eventos distintas entre unas horas y otras. Por lo anterior, se seleccionó la medición en una casa habitación de la zona “Humaya” en el horario de 7 a 8 de la mañana, debido a que presenta una actividad elevada en los consumos de las casas monitoreadas. La metodología posteriormente se aplicó a las nueve casas habitación restantes, todas ellas con el fin de realizar un análisis comparativo considerando el mismo horario, esto es de 7 a 8 de la mañana. Posteriormente se obtienen los momentos observados que se componen de la media, varianza y covarianza de los registros seleccionados en este horario. En la tabla 2 se presentan sus parámetros estadísticos.

Aplicación del esquema de Neyman-Scott (momentos teóricos)

Los resultados derivados de la optimización se muestran en la tabla 3. Los resultados reflejan que el tiempo promedio entre la ocurrencia de dos eventos durante las 7 y 8 de la mañana es de $\frac{1}{\lambda} = 19.20$ minutos. Asimismo es importante mencionar que a diferencia de Alvisi *et al.* (2003) en la solución del problema de optimización no fue necesario introducir pesos a la función objetivo y tampoco establecer valores fijos a ciertos parámetros para garantizar valores razonables de los parámetros en la solución óptima.

Generación estocástica del consumo

Los valores de los parámetros obtenidos por el esquema de N-S, son introducidos en el modelo de generación de consumo, NSRPM. Dado que el esquema de N-S basa la

Tabla 2. Parámetros estadísticos de la serie observada

Horario	$E[Y_i^{(h)}]$ (L/min)	$Var[Y_i^{(h)}]$ (L/min) ²	$Cov[Y_i^{(h)}, Y_i^{(h)}]$
7 a 8	0.572	2.455	1.230

Tabla 3. Parámetros teóricos obtenidos a partir del esquema de Neyman-Scott. Horario de 7-8

λ_1 (min ⁻¹)	c_1 (número)	λ_1 (min ⁻¹)	λ_1 (min ⁻¹)	x_1 (L/min)
0.052	5.376	3.884	0.7804	7.935

ocurrencia de los eventos siguiendo una distribución de probabilidades de tipo exponencial, por definición el valor de la varianza será igual al cuadrado del valor medio (Devore, 2000). Esta situación se aplicará en el cálculo de las varianzas de la duración e intensidad de los pulsos.

Simulación de series de consumo empleando el modelo NSRPM

Una vez obtenidos los cinco parámetros necesarios, λ , μ , σ , γ y δ , además del caudal promedio, se realizan las simulaciones para generar series de consumo empleando el modelo NSRPM. Recordar que el intervalo analizado es de siete horas (420 minutos), que es equivalente a la medición realizada de una hora, en cada uno de los siete días de la semana analizados.

Se realizaron 50 simulaciones a través del NSRPM considerando diferente semilla de generación de números aleatorios en cada una de ellas (método de Monte-Carlo). En la figura 3 se muestran las series generadas

a partir del modelo NSRPM en el horario de 7 a 8 horas y se comparan con la serie original. La tabla 4 muestra los parámetros estadísticos obtenidos a partir de las series generadas por el NSRPM.

La comparación entre tablas 2 y 4 demuestra que la media y covarianza de la serie original y de las 50 series generadas son similares en orden de magnitud.

De forma posterior se obtiene el número de pulsos μ . Para el caso específico de las nueve casas, se obtuvo un promedio en el número de pulsos en el horario de 7 a 8 horas de 7.30 pulsos por evento. Por estudios previos (Alcocer *et al.*, 2004; Alcocer y Tzatchkov, 2005) se tiene que el número de usos del agua durante el día en la zona de "Humaya" de la ciudad de Culiacán, es de aproximadamente 87 usos.

Por tanto, considerando 18 horas de actividad se obtienen aproximadamente 5 usos por hora. Con ello el número de pulsos obtenido a través del esquema de NSRPM teniendo en cuenta que es una hora de una actividad elevada, resulta de un orden de magnitud similar.

Tabla 4. Parámetros estadísticos de las series generadas

Horario	$E[Y_i^{(h)}]$ (L/min)	$Var[Y_i^{(h)}]$ (L/min) ²	$Cov[Y_i^{(h)}, Y_i^{(h)}]$
7 a 8	0.516	3.95	1.20

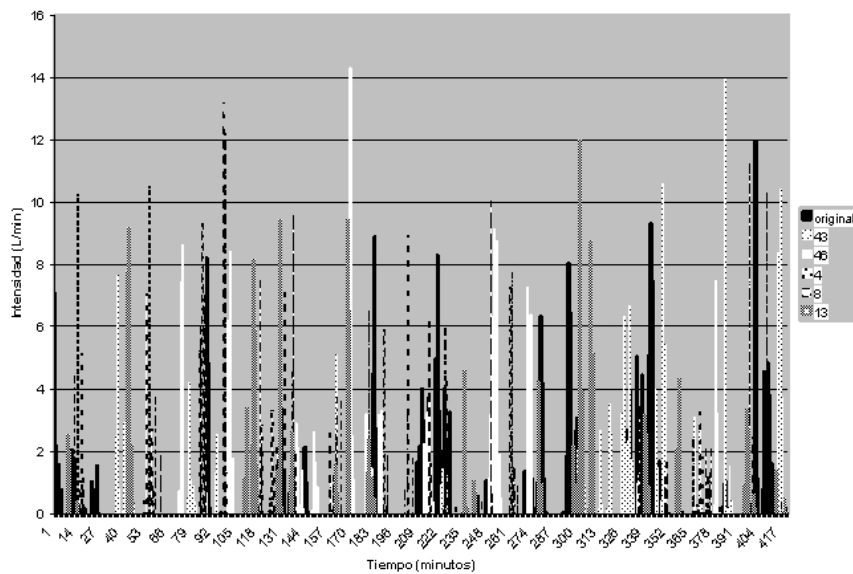


Figura 3. Comparación de series de consumo generadas con diferentes semillas (Horario de 7 a 8 horas) empleando el método NSRPM y la serie original medida en campo

Implicaciones en la modelación hidráulica de una red de distribución

Actualmente en los modelos de simulación de redes de distribución de agua comerciales (WATERCAD®, InfoWorks®, etc) o de dominio público (EPANET), las demandas se asignan por medio de valores constantes ó por un patrón con la variación horaria durante el día para el caso de simulaciones con periodos extendidos. Esta situación es poco realista a nivel de toma domiciliaria, dado que el consumo se expresa mediante pulsos instantáneos de duración corta. En la figura 4 se realiza una comparación entre el consumo promediado e introducido posteriormente al programa EPANET (0.572 L/min) la variación del consumo doméstico medida en campo y la serie generada a partir de las simulaciones realizadas a través del modelo NSRPM.

Este procedimiento que involucra estimación de parámetros y generación de series sintéticas se repite en cada una de las horas de interés de la casa habitación analizada. Con el objetivo de ampliar la validación del método, se consideraron nueve casas habitación y un horario de interés de 7 a 8 horas. Una vez aplicado el método de NSRPM se tiene que la periodicidad (inverso de la tasa de llegada) de cada evento en la muestra seleccionada, resultó de $\lambda = 38.83$ minutos en promedio.

Finalmente se tiene la duración t_x e intensidad x de los pulsos de consumo. La duración promedio de los

pulsos resultante en las nueve casas habitación es de 35.32 segundos. Ambos valores son del mismo orden de magnitud que los obtenidos por (Feliciano, 2005), que reporta una duración promedio de los pulsos de 44.61 segundos en una casa habitación con nivel socioeconómico medio y de 54.35 segundos en una vivienda con nivel clasificado como alto o residencial.

En el caso de la intensidad x , el valor promedio resultó de 6.10 L/min. Este resultado es del mismo orden de magnitud que el intervalo de valores comprendido entre 5.18 y 7.54 L/min, previamente obtenidos en estudios realizados en la zona "Humaya", (Alcocer *et al.*, 2004; Alcocer y Tzatchkov, 2005).

Los valores de los parámetros (λ , t_x , x , ρ) en las nueve casas habitación, obtenidos a través del esquema de NSRPM, presentan similitudes con respecto a trabajos de caracterización de consumos domésticos previamente realizados. Esto genera confiabilidad al momento de aplicar el método. Asimismo el esquema permite representar adecuadamente los consumos en intervalos de registros menores, comparados al originalmente medido.

Siendo la presente metodología un primer intento de introducir esquemas estocásticos dentro del comportamiento de la demanda, existen aún interrogantes por resolver como la de establecer un mejor tratamiento de los datos, a través de series continuas de proceso no homogéneo, y no a través de conjuntos de series discontinuas

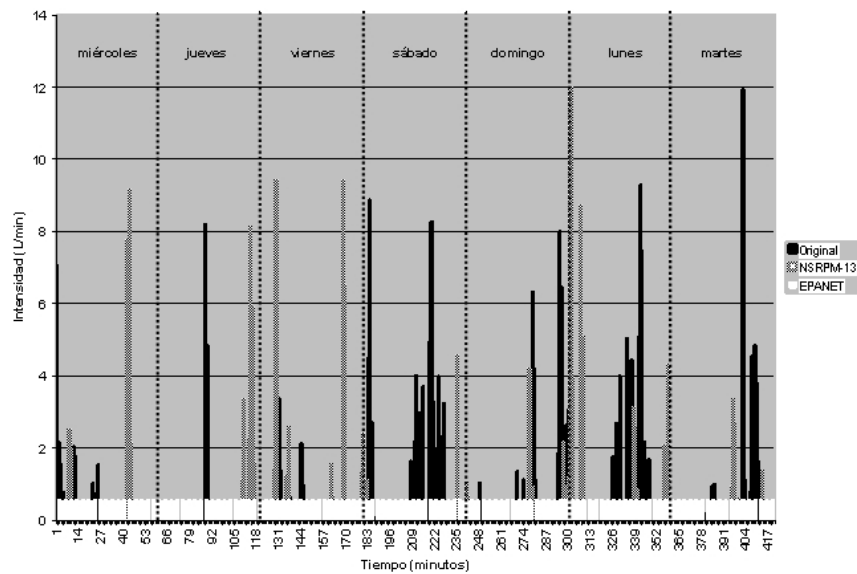


Figura 4. Comparación de resultados entre los consumos generados por el método NSRPM, la demanda promedio (EPANET) y la serie original medida en campo

de proceso homogéneo como se aborda en el presente artículo. Lo anterior conlleva a obtener, por el momento, resultados más bien probabilísticos que estocásticos debido a la duración del intervalo seleccionado (una hora); asimismo, se refleja en la variabilidad de los parámetros observados y calculados a partir de las series generadas de forma específica la varianza.

Conclusiones

El método propuesto basado en el esquema de NSRPM, tuvo resultados satisfactorios comparados con las mediciones realizadas en campo.

Esta situación manifiesta que con el método propuesto es posible obtener los parámetros del consumo estocástico a partir de mediciones con intervalo de registro mayor a segundo, sin perder exactitud en el cálculo de las series de consumo.

La desagregación temporal podrá en un futuro acoplarse con esquemas de agregación espacial (Tzatchkov *et al.*, 2006) y así generar guías que definan el intervalo de medición, así como el grado de esquetización más adecuado, dependiendo del tipo de estudio, de vivienda y de la simulación que se aborde, incluyendo modelos que requieren de mayor detalle hasta a nivel de tuberías con las tomas domiciliarias.

Con el empleo de las técnicas de estimación propuestas en este trabajo será posible lograr lo siguiente:

- 1) Medir con intervalos de registro mayores a un segundo para obtener los parámetros del consumo instantáneo,
- 2) Ampliar la aplicabilidad de métodos de generación de consumo,
- 3) Reducir considerablemente el esfuerzo asociado a la medición del consumo doméstico instantáneo,
- 4) Realizar cálculos hidráulicos y de calidad del agua con mayor exactitud, a través de la introducción de las series generadas de consumo en los modelos de redes.

Con la generación de los parámetros de los pulsos de consumo instantáneos y acumulados se pueden generar las series de consumo que podrán emplearse para diferentes objetivos como:

- 1) Integración con un modelo de simulación hidráulica, como EPANET, WATERCAD, entre otros,
- 2) Obtención de los patrones de consumo reales en la zona,

- 3) Análisis indirecto del porcentaje de fugas (Alcocer *et al.*, 2004),
- 4) Comparación entre las series estocásticas y la curva tradicional de la demanda (CNA, 2004).

Las técnicas descritas han sido desarrolladas y probadas para redes con servicio continuo. A pesar de que en principio la metodología que se propone es general, su aplicación tendría que validarse aparte en servicios con discontinuidad dado que los patrones de demanda o consumo serían diferentes a los que sí presentan continuidad en el servicio de agua. Otro punto importante es la relación entre el consumo promedio total (mensual, por ejemplo) y el tipo de vivienda. Por estudios previos (SRH 1978) se sabe que el consumo es muy diferente dependiendo si la vivienda es residencial (hasta 62 m³/vivienda.mes en promedio), media (hasta 40 m³/vivienda.mes) o popular (12 m³/vivienda.mes en promedio). En la metodología que se propone en este artículo, el consumo total en una vivienda se obtiene por medio de medición, por lo que es independiente del tipo de vivienda. No obstante, en el proceso subsiguiente de *agregación* de la demanda de un grupo de usuarios (que no se trata en este artículo) hay que considerar los tipos de vivienda con su distribución porcentual y demanda promedio.

Agradecimientos

Se reconoce la colaboración de M.Sc. Gayatri Nadimpalli de la Universidad de Cincinnati, EUA, por facilitarnos su informe técnico sobre la estimación de parámetros.

Referencias

- Alcocer V., Tzatchkov V., Buchberger S., Arreguín C.F. y Feliciano G. Stochastic Residential Water Demand Characterization. En: World Water & Environmental Resources Congress - 6th. Annual Symposium on Water Distribution System Analysis, June 2004, Salt Lake City, Utah, USA.
- Alcocer V. y Tzatchkov V. *Estudio de la variación espacial y temporal de la demanda en redes de agua potable*. Informe técnico. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2004. 272 p.
- Alcocer V. y Tzatchkov V. *Estudio de la variación espacial y temporal del consumo intradomiciliario*. Informe técnico. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2005. 99 p.
- Alcocer V., Tzatchkov, V. y Buchberger, S. Instantaneous Water Demand Parameter Estimation from Coarse Meter

- Readings. En: 8th Annual Water Distribution System Analysis, Symposium. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Cincinnati, OH, USA. 2006.
- Alcocer V. y Tzatchkov V. *Modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de distribución de agua potable*. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS). Comisión Nacional del Agua. México, DF. 2007.
- Alvisi S., Franchini M. y Marinelli A. A Stochastic Model for Representing Drinking Water Demand at Residential Level. *Water Resources Management*, 17(3):197-222. 2003.
- Buchberger S. y Wu L. A Model for Instantaneous Residential Water Demands. *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, 121(3):232-246. 1995.
- Buchberger S.G., Carter J.T., Lee Y. y Schade. T.G. *Random Demands, Travel Times, and Water Quality in Deadends*. AWWA Research Foundation. 2003.
- CNA. *Datos Básicos (2a. edición)*. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Subdirección General Técnica-Comisión Nacional del Agua. Tercera edición. 2007.
- Cowperrwait P. Further Developments of the Neyman-Scott Clustered Point Process for Modeling Rainfall. *Water Resources Research*, 27(7):1431-1438. July, 1991.
- Cowperrwait P., O'Connell P., Metcalfe A. y Mawdsley J. Stochastic Point Process Modeling of Rainfall I. Single-Site Fitting and Validation. *Journal of Hydrology*, 175:17-46. 1996a.
- Cowperrwait P., O'Connell P., Metcalfe A. y Mawdsley J. Stochastic Point Process Modeling of Rainfall II. Regionalisation and disaggregation. *Journal of Hydrology*, 175:47-65. 1996b.
- Devore J. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 5th Edition. México, DF. Thomson Learning. 2000.
- Entekhabi D., Rodríguez-Iturbe I. y Eagleson P. Probabilistic Representation of the Temporal Rainfall Process by a Modified Neyman-Scott Rectangular Pulses Model: Parameter Estimation and Validation. *Water Resources Research*, 25(2):295-302. February 1989.
- Feliciano D. Análisis y caracterización estocástica del consumo de agua potable en viviendas de Culiacán, Sinaloa. Tesis (maestría). México DF. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. 2005.
- Guercio R., Magini R. y Pallavicini I. *Instantaneous Residential Water Demand as Stochastic Point Process*. *Water Resources Management*. Eds. Brebbia et al. WIT Press. 2001. Pp. 129-138.
- Haestad-Methods, Walski T.M., Chase D.V., Savic D.A., Grayman W., Bechwith S. and Koelle E. *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Haestad Press. Waterbury. CT USA. 2003.
- Nadimpalli, G. y Buchberger, S. *Estimation of Parameters for Poisson Pulse Model of Residential Water Demands*. Informe técnico. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Cincinnati. Agosto 2003. P. 43.
- Rodríguez-Iturbe I., Gupta V. y Waymire E. Scale Considerations in the Modelling of Temporal Rainfall. *Water Resources Research*, 20(11):1611-1619. 1984.
- Rodríguez-Iturbe I., Cox D. e Isham V. Some Models for Rainfall Based on Stochastic Point Process. *Proc. R. Soc. London*. A410:269-288. 1987.
- Rodríguez-Iturbe I., Cox D. e Isham V. A Point Process Model for Rainfall: Further Developments. *Proc. R. Soc. London*, A417:283-298. 1988.
- Rossman L.A. *EPANET Users Manual*. US Environmental Protection Agency. National Risk Management Research Laboratory. Office of Research and Development, Cincinnati, OH. 2000.
- Salsón S. y García R. Desagregación de lluvias para aplicaciones en simulación de sistemas de recursos hidráulicos. *Revista Obras Públicas*, (3.378):25-35, julio-agosto, 1998.
- SRH. *Uso del agua en ciudades*. Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1978.
- Tzatchkov V., Alcocer V. y Buchberger S. Stochastic Demands Generated Unsteady Flow in Water Distribution Networks. En: 8th Annual Water Distribution System Analysis, Symposium. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Cincinnati, OH, USA. 2006.
- Tzatchkov V. e Izurieta J. Sistema de cómputo para el análisis y diseño óptimo de redes de distribución de agua potable. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, XI:55-63, enero-abril de 1996, México.

Semblanza de los autores

Víctor Hugo Alcocer-Yamanaka. Ingeniero civil con estudios de maestría en ingeniería hidráulica (2001) y doctorado (2007) por la Universidad Nacional Autónoma de México. Desde el 2000 funge como especialista en hidráulica en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y como profesor de asignatura (2001) y tutor activo en la Facultad de Ingeniería de la UNAM (Posgrado). Ha dirigido 16 proyectos de investigación e ingeniería. Autor y coautor de 55 publicaciones en revistas arbitradas y congresos nacionales e internacionales, capítulos en libros y libros. Premio Nacional de Ingeniería Civil “Miguel A. Urquijo” del Colegio de Ingenieros Civiles de México 2005 y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

Velitchko Tzatchkov. Ingeniero civil, originario de Bulgaria. Realizó sus estudios en su país natal. Doctor en hidráulica computacional. Laboró como investigador en Bulgaria y de 1984 a 1990, como asesor internacional en el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Cuba. Desde 1991 es especialista en hidráulica en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Autor o coautor de más de 100 artículos en revistas y congresos nacionales e internacionales, capítulos en libros y libros. Premio Best Theoretical Paper de la ASCE 2003. Premio Nacional de Ingeniería Civil “Miguel A. Urquijo” del Colegio de Ingenieros Civiles de México 2005. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI).