

Enfoque multiobjetivo para determinar la combinación óptima de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible a escala ciudad. El Caso de San Luis Potosí (México)

Multi-objective approach for determining optimal Sustainable Urban Drainage Systems combination at city scale. The Case of San Luis Potosí (México)

Nicolás Alan Pérez Durán¹, Rodolfo Cisneros Almazán¹, Sergio Zubelzu², Clemente Rodríguez Cuevas¹.

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma San Luis de Potosí Dr. Manuel Nava No. 8, Col. Zona Universitaria Poniente, San Luis Potosí C.P. 78290, S. L. P., México; A302262@alumnos.uaslp.mx (A.P.-D.); cisnerro@uaslp.mx (R.C.-A.)

² Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, España; sergio.zubelzu@upm.es

Palabras clave: balance volumétrico de agua; captación urbana; escorrentía; desarrollo de bajo impacto; manejo de aguas pluviales; reutilización de agua; sistemas urbanos de drenaje sostenible

Keywords: low impact development; stormwater management; surface runoff; sustainable urban drainage systems; urban catchment; volumetric water balance; water reuse

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) han adquirido relevancia como soluciones basadas en la naturaleza para la gestión óptima de los recursos hídricos en zonas urbanas. Mientras que la gestión tradicional de aguas se ha basado en la captación de la escorrentía para su posterior tratamiento y descarga en cuerpos de agua, los SUDS incorporan un nuevo paradigma para la gestión local de la escorrentía urbana. Los SUDS incluyen diferentes infraestructuras orientadas al manejo de aguas pluviales tales como captación de agua de lluvia, techos verdes, pavimentos permeables, áreas de infiltración, etc.

Una serie de investigaciones, principalmente europeas, se han desarrollado para la instalación de SUDS en áreas urbanas. Algunas de ellas centradas en la revisión de sus enfoques, en la evaluación espaciotemporal y en la incorporación de los sistemas a los procesos de planificación urbana (Dietz, 2007; Fletcher et al., 2015). Mientras que otras se enfocan en la determinación de sitios óptimos para su implementación y en proponer funciones para la identificación de estos (Wang, Sweetapple, Fu, Farmani, & Butler, 2017). Aun así, existen muchas incógnitas por resolver. La definición de objetivos de diseño más claros, pues ahora no se va más allá de un diseño basado en eventos de precipitación, y sus criterios de diseño se acoplan a los estándares tradicionales, como la reducción de la escorrentía, la maximización de la recarga del acuífero, o la disminución de las funciones de costos (Zubelzu, Rodríguez-Sinobas, Andrés-Domenech, Castillo-Rodríguez, & Perales-Momparler, 2019); garantizando que su función no irá más allá del cumplimiento de dicho objetivo y limitará la obtención de múltiples beneficios potenciales.

El presente documento propone un método para determinar la combinación óptima de SUDS a escala ciudad que abarca todo el sistema hidrológico. Se consideró un conjunto integral de SUDS que comprenden infraestructura destinada a la retención y reutilización local de la escorrentía o la precipitación. Para este propósito, la dinámica hidrológica se modela con un

Así mismo, se establece un proceso multi-criterio que abarca objetivos económicos e hidrológicos para completar el estudio.

METODOLOGIA

Balance volumétrico

La ecuación de estado para un sistema hidrológico lineal (Ecuación (1)) relaciona entradas (IP), salidas (O) y una variación interna del sistema (S) como funciones del tiempo:

$$\frac{dS}{dt} = IP(t) - O(t), \quad (1)$$

Para el ciclo hidrológico urbano propuesto (Ecuación (2)), el contenido de agua (θ) varía como resultado de la evapotranspiración (ETk), la precipitación (P), la recarga del acuífero (D) y la escorrentía (R).

$$\frac{d\theta}{dt} = P(t) + I(t) - ETk(t) - D(t) - R(t), \quad (2)$$

Se consideraron tres tipos de categorías de SUD las cuales son comprendidas en la mayoría de las instalaciones de SUD:

1. SUDS destinados al control local.

Definidos por la tasa de escorrentía (k_i) detenida en cada uso de suelo (i), mientras que la porción restante de (R) va dirigida al sistema urbano de drenaje convencional (CUD) (Ecuación (3)).

$$R(t) = \sum k_i R_i(t) + CUD(t), \quad (3)$$

2. SUDS destinados a la infiltración directa de la precipitación.

Las propiedades de infiltración de cada uso de suelo se incorporan al modelo a través de pavimentos permeables. Para esto, se definen tasas $Kppi$ que representan la porción total del área que es ocupada por el SUD para cada uso de suelo (i), y se asignaron valores específicos de infiltración a cada porción.

3. Cubierta vegetales.

La incorporación de cubiertas vegetales al modelo es como áreas verdes; la escorrentía se dirige directamente a CUD , la infiltración se almacena en el suelo hasta el nivel de saturación, y al ser alcanzada el resto de la infiltración se descarga al CUD , las plantas consumen el contenido de humedad del suelo a una tasa de ETk y el déficit es cubierto por I . La porción del área total cubierta por el SUD para cada uso de suelo es definida por kgr_i .

El balance hídrico se calculó para cada una de las combinaciones posibles de SUDS implementados por k_i , kgr_i , kpp_i , diariamente, con valores diarios de P y ETk (se consideró un coeficiente de cultivo $kkc = 1$ para transformar $ET0$ en ETk) y se supone un valor de $\theta_0 = 0.2$. además se estimó el agregado anual de D , I , CUD y se calculó una función de costo para cada combinación de SUD. Se seleccionaron los conjuntos de SUDS que lograron minimizar el coste agregado (TC) y aquellos que cumplieron con las restricciones planteadas.

Caso de Estudio

La Zona metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP) cuenta con un clima semiárido con una temperatura media, precipitación, y evapotranspiración potencial alrededor de 17°C, 400 mm, y 2033 mm, respectivamente (CONAGUA, 2018b). La disponibilidad total de agua superficial almacenada en presas para el abastecimiento de la ZMSLP es de 10.176 Mm³ (CONAGUA, 2018a). El promedio anual de extracción de agua subterránea asciende aproximadamente a 125.6 Mm³ por año. La capacidad instalada de las plantas de tratamiento es de 1,889.4 l/s y un caudal tratado de 1575.89 l/s, el cual representa el 83.40% del total del agua residual generada. El agua tratada es utilizada para procesos industriales y riego de áreas de cultivo (Interapas, 2018).

Se delimitaron tres cuencas en la ZMSLP para el análisis de las alternativas de SUDS, en las cuales se identifican cuatro categorías de uso de suelo dentro del área de estudio: urbano-intensivo (áreas con un grado de permeabilidad superior al 50%), urbano-semi-intensivo (áreas con un grado de permeabilidad inferior al 50%), áreas verdes y áreas rurales.

RESULTADOS

En las tablas 1 y 2 se presentan los resultados de la ejecución del modelo utilizando la distribución actual de los usos de suelo o la hipotética situación original en la que el suelo estaría completamente ocupada por usos rurales.

Tabla 1. Principales Variables de balance de agua para el estado actual.

Captación	D (m ³ /año)	CUD (m ³ / año)	I (m ³ / año)	TC (€/año) *
SZ1	50,497,634.69	3,741,781.23	1,965,519.25	11,409,716.99
SZ2	64,526,169.28	4,607,891.62	4,172,428.50	16,840,884.21
SZ3	25,238,222.93	2,209,662.10	3,102,213.31	10,270,445.96

*TC calculados en euros por año

Tabla 2. Principales variables del balance de agua para el estado previo al desarrollo.

Captación	D (m ³ /año)	Escurrentía superficial a cursos de agua (m ³ /año)
SZ1	54,328,896.67	2,356,980.36
SZ2	71,236,927.95	3,090,510.77
SZ3	30,007,351.85	1,301,825.42

La tabla 3 presenta las principales variables del balance hídrico para las combinaciones óptimas de SUDS. Como es de esperarse, las combinaciones óptimas de SUDS lograron reducir la CUD hasta alcanzar prácticamente el estado previo al desarrollo mientras que D

supera ampliamente los umbrales mínimos establecidos. D y CUD proviene principalmente de las zonas rurales, mientras que la escorrentía almacenada en VSUD se retiene casi por completo en los usos de suelo urbano-intensivo y urbano-semi-intensivo.

Tabla 3. Principales variables de balance hídrico para una combinación óptima de SUDS

Captación	D (m ³ /año)	CUD (m ³ / año)	I (m ³ / año)
SZ1	50497634.69	2357176.78	853518.62
SZ2	64526169.28	3115913.90	3030168.29
SZ3	25238222.93	1305844.86	2379628.70

DISCUSION

La investigación ha abordado el estudio de la combinación óptima de SUDS para cumplir con objetivos tanto económicos como hidrológicos. Para ello se desarrolló un código Python en lugar de utilizar otros modelos ya establecidos como SWMM, ya que brinda una mayor flexibilidad para realizar estudios específicos tales como los requisitos de los desarrollos emergentes, con la finalidad de garantizar el cumplimiento de los objetivos hidrológicos iniciales. Si bien la ZMSLP no cuenta con una red de monitoreo para la calibración y validación de los resultados, las estimaciones concuerdan con la información de las plantas de tratamiento, lo que podría considerarse como una validación indirecta del desempeño del modelo. Idealmente, los procesos de validación son fundamentales para asegurar la idoneidad de los supuestos y se deben incorporar si es que están disponibles.

El enfoque se dirige a la provisión óptima de SUDS desde una perspectiva abierta sin más limitaciones que las relacionadas con los costos, la recarga de acuíferos y la contribución a los cauces de agua. Se busca proporcionar la mejor combinación de SUDS para imitar las condiciones naturales previas al desarrollo de la ZMSLP; otros autores se han centrado en encontrar la mejor combinación de SUDS entre el conjunto adjunto de combinaciones SUDS (Her et al., 2017; Palla & Gnecco, 2015) o en la determinación de la ubicación óptima de SUDS (Martin-Mikle, de Beurs, Julian, & Mayer, 2015). En esta investigación, no se muestran ejemplos sobre dónde se ubican las instalaciones de SUDS ni propone la integración de SUDS. Está enfocada en toda la cuenca urbana y en la definición de la solución óptima en términos de costos mínimos, los requerimientos de recarga del acuífero y en la contribución a los cursos de agua.

CONCLUSIONES

Se propone un modelo con enfoque multiobjetivo que comprende criterios económicos e hidrológicos para la estimación de la combinación óptima de SUDS a escala de cuenca urbana. Los criterios económicos se incorporaron a través de una función de costos que abarca la instalación y operación de los SUDS. Los criterios hidrológicos consisten en umbrales para asegurar una tasa mínima de recarga de agua subterránea y límites de escorrentía para los cursos de agua. Se realizó un método conceptual basado en un balance hídrico volumétrico para estimar la evolución diaria de los procesos hidrológicos.

El método se basa en captación urbana y en la combinación óptima de SUDS considerando la retención y reutilización local, techos verdes y pavimentos permeables. Se probó la validez del método y del marco teórico en general para encontrar la combinación óptima de SUDS

en las tres cuencas urbanas de la ZMSLP. las soluciones óptimas promovieron la detención y reutilización de la escorrentía superficial sobre pavimentos permeables y cubiertas verdes.

BIBLIOGRAFIA

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San Luis Potosí (2411), Estado de San Luis Potosí. In *Diario Oficial de la Federación*. <https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018b). *Estadísticas del Agua en México: 2018*. <https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>

Dietz, M. E. (2007). Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 186(1–4), 351–363. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9484-z>

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>

Her, Y., Jeong, J., Arnold, J., Gosselink, L., Glick, R., & Jaber, F. (2017). A new framework for modeling decentralized low impact developments using Soil and Water Assessment Tool. *Environmental Modelling and Software*, 96, 305–322. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.005>

Interapas. (2018). Informe Anual 2018. In *Dirección General*. San Luis Potosí.

Martin-Mikle, C. J., de Beurs, K. M., Julian, J. P., & Mayer, P. M. (2015). Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed. *Landscape and Urban Planning*, 140, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.04.002>

Palla, A., & Gnecco, I. (2015). Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, 528, 361–368. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050>

Wang, M., Sweetapple, C., Fu, G., Farmani, R., & Butler, D. (2017). A framework to support decision making in the selection of sustainable drainage system design alternatives. *Journal of Environmental Management*, 201, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.034>

Zubelzu, S., Rodríguez-Sinobas, L., Andrés-Domenech, I., Castillo-Rodríguez, J. T., & Perales-Momparler, S. (2019). Design of water reuse storage facilities in Sustainable Urban Drainage Systems from a volumetric water balance perspective. *Science of the Total Environment*, 663, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.342>