

02-011

COST-BENEFIT ANALYSIS OF SUDS BASED ON HYDROLOGICAL SIMULATIONS. THE CASE OF LA SOLANA DE VALDEBEBAS (MADRID)

Zubelzu Mínguez, Sergio ⁽¹⁾; Bernal, Carlota ⁽¹⁾; Esteve, Paloma ⁽¹⁾; López, Jesús ⁽¹⁾; Gómez, María Teresa ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Politécnica de Madrid

Sustainable urban drainage systems (SUDS) spread over the world with the aim of mimicking the initial drainage conditions of urban watersheds. Literature has paid extensive attention to such systems including economic impacts and evaluation. A large number of previous works addressed economic evaluation of SUDS comprising economic and social aspects. Many base on cost-benefit approaches even feeding the models with monetized environmental and social benefits. However, those studies often lack of accurate hydrological modelling so the most relevant economic impacts in terms of runoff management are not accurately determined. In this work we present a cost benefit analysis based on time-dependent events based hydrological modelling so that both costs and benefits from the SUDS operation are accurately determined. The results of the La Solana de Valdebebas urban development in Madrid are presented.

Keywords: urban hydrology; Sustainable Urban Drainage Systems; Runoff

ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE. APLICACIÓN A LA SOLANA DE VALDEBEBAS (MADRID)

Los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) se extienden por todo el mundo con el objetivo de imitar las condiciones iniciales de drenaje de las cuencas urbanas. La literatura ha prestado gran atención a tales sistemas, incluidos los impactos económicos y su evaluación. Un gran número de trabajos anteriores abordaron la evaluación económica de SUDS que comprende aspectos económicos y sociales. Muchos se basan en enfoques de coste-beneficio incluso alimentando los modelos con beneficios ambientales y sociales monetizados. Sin embargo, esos estudios a menudo carecen de un modelo hidrológico preciso, por lo que no se determinan con precisión los impactos económicos más relevantes en términos de gestión de la escorrentía. En este trabajo presentamos un análisis de costo-beneficio basado en modelos hidrológicos basados en eventos dependientes del tiempo para que tanto los costos como los beneficios de la operación SUDS se determinen con precisión. Se presentan los resultados de la urbanización de La Solana de Valdebebas en Madrid.

Palabras clave: Hidrología urbana; sistemas de drenaje sostenible; escorrentía

Agradecimientos: Acción financiada por la Comunidad de Madrid en el marco del Convenio Plurianual con la Universidad Politécnica de Madrid en la línea de actuación estímulo a la investigación de jóvenes doctores.



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La gestión tradicional de las aguas de escorrentía en las ciudades persigue proteger usuarios e infraestructuras ante los efectos perniciosos de los fenómenos extremos. Este paradigma, que data de principios del siglo XIX (Delleur, 2003), se traduce en un conjunto de infraestructuras que persiguen captar el agua de escorrentía con la mayor rapidez posible para a través de un sistema de conducciones (enterradas en la mayoría de las ocasiones) verterlas a los cauces en lugares alejados de los cauces. Esta concepción garantista no considera las aguas de escorrentía como un recurso sino como una fuente de peligro potencial.

Frente a la gestión tradicional de las aguas de escorrentía fijada en el párrafo anterior, el concepto amparado por los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) supone un cambio radical de paradigma.

Los SUDS son sistemas de gestión de las aguas de lluvia que persiguen la gestión local del recurso imitando las condiciones originales de las cuencas.

En las ciudades se impermeabilizan superficies lo que hace que el equilibrio original entre infiltración (reserva de agua en el suelo para la vegetación o recarga de acuíferos) y escorrentía (alimenta a los cauces superficiales -ríos-) se altere minimizándose la infiltración y por lo tanto generando mucha más escorrentía.

A consecuencia de ello, la gestión tradicional de las aguas de escorrentía en las ciudades ha perseguido captar el agua, conducirla por sistemas de tuberías enterrados y verterla a los cauces en puntos alejados para evitar los riesgos derivados de episodios torrenciales sobre las personas y las ciudades.

Los SUDS persiguen captar de forma local en las zonas en las que se produce la escorrentía y reponer el equilibrio infiltración/escorrentía favoreciendo la primera. Los SUDS no pueden sustituir completamente a los sistemas tradicionales sino que los complementan. Se trata de un conjunto de estructuras destinadas bien a facilitar la infiltración directamente (zonas urbanas permeables) o bien a captar y retener la escorrentía facilitando así su infiltración.

Entre los ejemplos de SUDS a menudo se incluyen los siguientes:

- Pavimentos con mayor permeabilidad de los frecuentes (pavimentos terrizos o porosos o de piezas frente pavimentos aglomerados o similares).
- Estanques de infiltración (lagunas, o tanques con base de material terrizo permeable en lugar de bases de hormigón o continuas)
- Zanjas o cunetas permeables (de forma similar, cunetas que no solo conducen sino que retienen y facilitan la infiltración del agua en el terreno).

Los SUDS son por tanto infraestructuras de gestión hidrológica cuyo fin es el anterior. De forma complementaria, determinados tipos de SUDS pueden formar parte de usos que facilitan la provisión de funciones complementarias entre las que cabe citar las funciones recreativas, estéticas o ambientales. Este es el caso de los elementos anteriores integrados en parques públicos o áreas estanciales en las que la integración de los SUDS con el diseño puede facilitar la presencia de flora o fauna, mejorar el aspecto visual o la integración con el usuario propiciando el uso recreativo de los mismos. La literatura se ha ocupado de este aspecto tratando de analizar la disponibilidad a pagar de los usuarios por tales bienes con el fin de internalizar los beneficios generados (Baptiste et al, 2015; Chui et al., 2016).

Muchos trabajos previos se han ocupado de analizar la rentabilidad de los SUDS en

términos económicos incorporando las funciones sociales (recreativas o estéticas) y ambientales supuestamente aparejadas a los SUDS. Ejemplos de tales estudios son por ejemplo los llevados a cabo por Oluwayemi et al. (2022) o Johnson y Geisendorf, (2019).

Sin embargo, la provisión de los bienes descritos en el párrafo anterior no puede ser considerada de manera transversal para todos los SUDS puesto que están vinculadas a un determinado tipo de SUD ubicado en una zona de uso público. Por otra parte, los trabajos previos adolecen de estudios hidrológicos con el detalle suficiente que permitan realizar un análisis en profundidad de la posible generación del recurso, obvian el posible uso de las aguas captadas o estiman los costes de manera superficial de manera que los resultados obtenidos no son suficientemente extrapolables ni permiten la toma de decisiones fundamentada acerca de la viabilidad real de los sistemas.

Por tanto, sobre la base de las necesidades descritas en el apartado anterior, en el presente trabajo se pretende sentar las bases sobre las que encarar el análisis coste-beneficio de los SUDS y aplicar tal modelo a un desarrollo urbanístico en concreto en la ciudad de Madrid.

2. Metodología

2.1 Caso de estudio

Se ha seleccionado como caso de estudio el desarrollo urbanístico La Solana de Valdebebas. Se trata de un ámbito de una superficie de poco más de 100 ha ubicado en el noreste de la ciudad de Madrid lindando con Alcobendas al norte y oeste y las autovías M-12 y R-2 al este y sur, respectivamente. La figura 1 muestra la localización, ordenación y las líneas de agua existentes en el interior del ámbito.

Figura 1: Ubicación del ámbito y caracterización urbanística e hidrológica



Fuente: <https://www.solanamadrid.com/>

Se han estudiado de forma específica las cuencas cuyas superficies están definidas en la

tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de las superficies (m²) de cada una de las cuencas estudiadas

Cuenca	Impermeable	Arbustivas	Arbolado	Pradera
C1	2204.9	439.41	1274.87	247.68
C2	1505.26	1481.84	3879.49	707.8

2.2 Información climatológica

Para la estimación de las demandas de riego se ha supuesto un balance de conservación de la masa en cada cuenca. Para el balance se han empleado datos diarios de precipitación y ET₀ procedentes de la estación de Madrid-Aeropuerto de la red de estaciones meteorológicas del AEMET con información de todo el histórico disponible. Para el estudio del comportamiento frente a tormentas concretas se han empleado datos diarios de precipitación de la estación meteorológica ubicada en el Parque Juan Carlos I perteneciente a la red de estaciones meteorológicas pertenecientes al Ayuntamiento de Madrid. Se han empleado datos horarios desde en enero del año 2019 hasta octubre de 2022. Se han identificado las tormentas (conjunto de datos con precipitación mayor que cero entre dos registros de precipitación nulos).

2.3 Modelo hidrológico

El objetivo del modelo hidrológico es doble, por un lado determinar el agua que deja de enviarse al sistema de saneamiento y por otro lado determinar las necesidades de riego asumiendo que el agua captada y retenida por los SUDS se emplearía para el riego de zonas verdes. Para obtener estas variables se ha planteado un balance de conservación de la masa en cada una de las cuencas en las que se localizarían los SUDS.

$$\Delta\theta = \theta_t - \theta_{t-1} = I_t + \text{Inf}_{t-1} - \text{ETa}_{t-1} - D_{t-1} \quad (1)$$

$$P_t = R_t + \text{Inf}_{t-1} \quad (2)$$

Se asume que la variación del contenido de agua en el suelo ($\Delta\theta$) entre dos instantes t-1 y t es el resultado de la diferencia entre los aportes (infiltración, Inf, riego I) y las salidas (Evapotranspiración del cultivo, ETa y recarga del acuífero, D). La ecuación 2 completa el balance de masa repartiendo la precipitación entre infiltración y escorrentía.

La evapotranspiración del cultivo se ha definido como el producto de la evapotranspiración potencial (ET₀) por el coeficiente de cada cultivo (kc). Se ha supuesto que el cultivo requiere riego en caso de que la humedad del suelo en el día t descienda bajo un nivel fijado que resulta ser una fracción (tasa de agotamiento por defecto supuesta el 30%) de la diferencia entre los contenidos de humedad a capacidad de campo ($\theta_{fc}=0.2$ empleando los modelos de conductividad y retención de Mualem, 1976 y van Genuchten, 1987, respectivamente y usando los parámetros publicados por Carsel y Parrish, 1988 para un suelo franco) y punto de marchitez permanente ($\theta_{pmp}=0.1$ empleando los mismos modelos, tipo de suelo y parámetros que para la capacidad de campo). El volumen de agua a aportar mediante riego cada día es el necesario para incrementar el contenido de humedad del suelo hasta el nivel

a capacidad de campo. La profundidad del suelo promedio para todas las zonas es de 60 cm.

Para estimar la disponibilidad de aguas pluviales se ha aplicado el modelo del número de curva (eq. 3) a los datos promedio diarios (con ánimo de dimensionar una infraestructura capaz de aprovechar el máximo volumen disponible se han empleado promedios de valores positivos únicamente) y así se han obtenido los volúmenes de escorrentía diario (suponiendo que cada precipitación diaria ocurriría en un único evento).

$$R_t = [P_t - 0.2 * 25.4 * (1000 / CN - 10)]^2 * [P_t + 0.8 * 25.4 * (1000 / CN - 10)]^{-1} \quad (3)$$

Donde CN es el número de curva, R_t y P_t la escorrentía y precipitación en el instante t . Se ha considerado un valor de $CN=84$ para pavimentos discontinuos y $CN=99$ para pavimentos continuos (NRCS, 1985). Para los cálculos se ha considerado que en las zonas verdes únicamente se conducen y reutilizan para el riego con este sistema las aguas pluviales procedentes de zonas con tratamiento duro.

Se ha estudiado el comportamiento del sistema ante tormentas concretas para evaluar el comportamiento ante eventos extremos. En este caso se ha supuesto que los pavimentos son completamente impermeables y para determinar la infiltración ante hietogramas de precipitación se ha empleado el modelo de Green-Ampt (1911).

Se ha supuesto que en cada una de las cuencas se provecha el agua de escorrentía generada y se pone a disposición del riego en las zonas plantadas.

2.4 Análisis económico

Se propone el cálculo del Valor Actual Neto (VAN, eq. 4) para el estudio de la viabilidad económica del sistema. Los cálculos se han realizado asumiendo una vida útil de 50 años y una tasa de descuento del 5%.

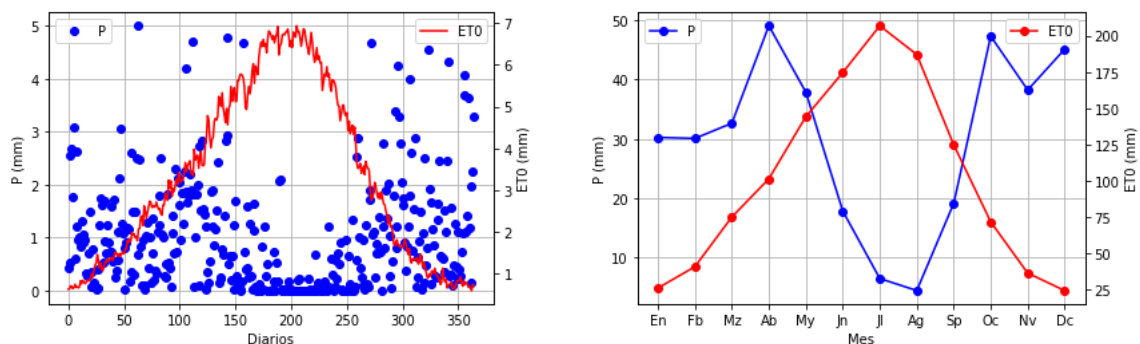
$$VAN = \sum (I - G) / (1 + r)^i \quad (4)$$

3. Resultados

3.1 Información climatológica

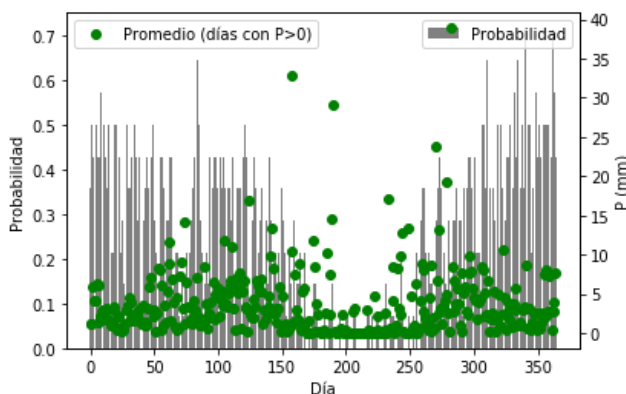
La figura 2 muestra los resultados promedio de precipitación y evaporación registrados

Figura 2: Valores promedio de precipitación y evapotranspiración potencial registrados



La precipitación anual acumulada con los datos promedio empleados es de 358.58 mm y la ET0 1212.68 mm. Los datos de ET0 presentan un patrón claro con valores mayores en la franja central del año. En principio, la precipitación es mayor en las etapas inicial y final del año en las que la ET0 es menor. La figura 2 presenta los valores de probabilidad de lluvia y promedios considerando únicamente los días en los que se ha registrado precipitación.

Figura 3: Probabilidad de ocurrencia y promedio de precipitación



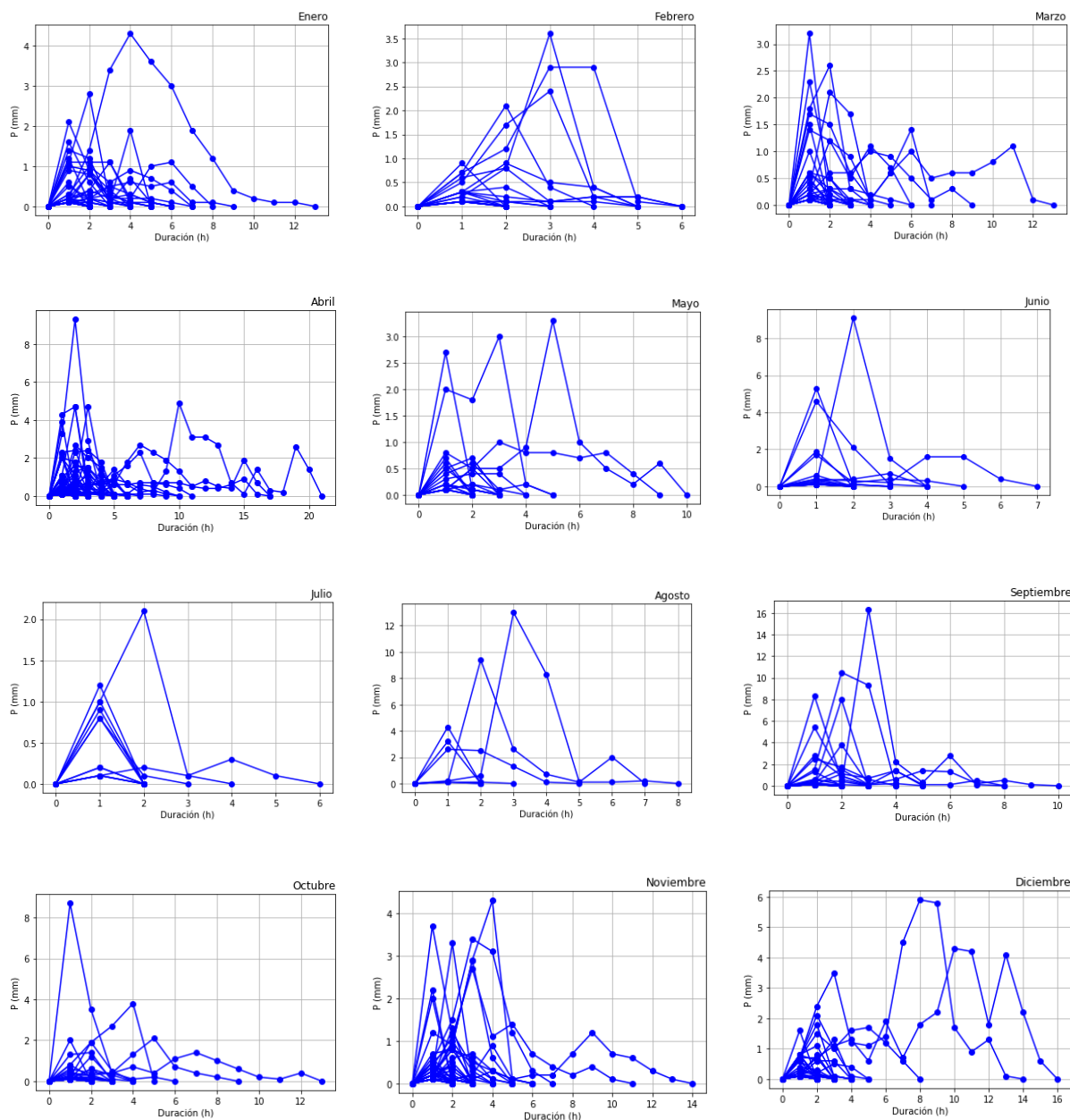
La tabla 2 muestra las principales características de las tormentas identificadas con datos horarios.

Tabla 2. Estadísticos más representativos de las tormentas registradas por meses

Mes	D promedio (h)	P promedio (mm)	D max (h)	P max (mm)	Cuantil 80 D (h)	Cuantil 80 P (mm)
Enero	2.7	1.5	12	19.8	5	2.3
Febrero	2.45	1.48	5	7.8	4	3.2
Marzo	2.4	1.4	12	9.2	3	3.2
Abril	3.29	2.73	20	25.7	4	5.5
Mayo	2.52	1.5	9	7.6	3	1.3
Junio	1.81	1.72	6	10.8	3	2.6
Julio	1.58	0.79	5	3.2	2	1.0
Agosto	2.88	6.4	7	22.5	6	14.9
Septiembre	2.21	3.31	9	21.9	3	7.8
Octubre	2.03	1.32	12	12.9	2	1.4
Noviembre	2.64	1.7	13	10	4	2.2
Diciembre	2.59	2.47	15	30.5	3	2.0

La figura 4 muestra los hietogramas de precipitación registrados por meses.

Figura 4: Hietogramas de precipitación registrados por meses



3.2 Simulación hidrológica

La tabla 3 muestra el balance anual agregado resultado de aplicar el modelo de conservación de la masa descrito en el apartado metodológico. Se observa que en términos agregados cuatro de las cinco cuencas dispondrían de volumen de agua de escorrentía suficiente para cubrir las necesidades de riego.

Tabla 3. Balance de disponibilidad-necesidades por cuencas

Cuenca	Necesidades de riego (m ³)	Volumen de escorrentía disponible (m ³)	Balance (m ³)
--------	--	---	---------------------------

C1	469.1	1292.01	822.91
C2	1477.92	1194.61	-283.31

Las cifras prueban la existencia de volumen disponible pero la disponibilidad de recursos a lo largo del año condiciona su uso y las necesidades de almacenamiento. La tabla 4 muestra el balance por meses y cuencas.

Tabla 4. Balance (m³) disponibilidad-necesidades por meses y cuencas

Mes	C1	C2
Enero	61.73	43.54
Febrero	87.24	61.54
Marzo	150.83	106.37
Abril	166.08	97.02
Mayo	16.61	-389.67
Junio	-71.47	-620.87
Julio	-184.56	-853.67
Agosto	-213.90	-839.08
Septiembre	-12.20	-473.98
Octubre	247.37	85.30
Noviembre	451.86	1194.61
Diciembre	76.11	77.54

El problema se centra en este punto en determinar el volumen de almacenamiento óptimo que permite aprovechar el volumen de escorrentía disponible. Las figuras 5 y 6 muestran la simulación realizada para diferentes escenarios de aprovechamiento de agua en cada una de las cuencas.

Figura 5: Simulación hidrológica de la evolución de los principales parámetros de la cuenca 1

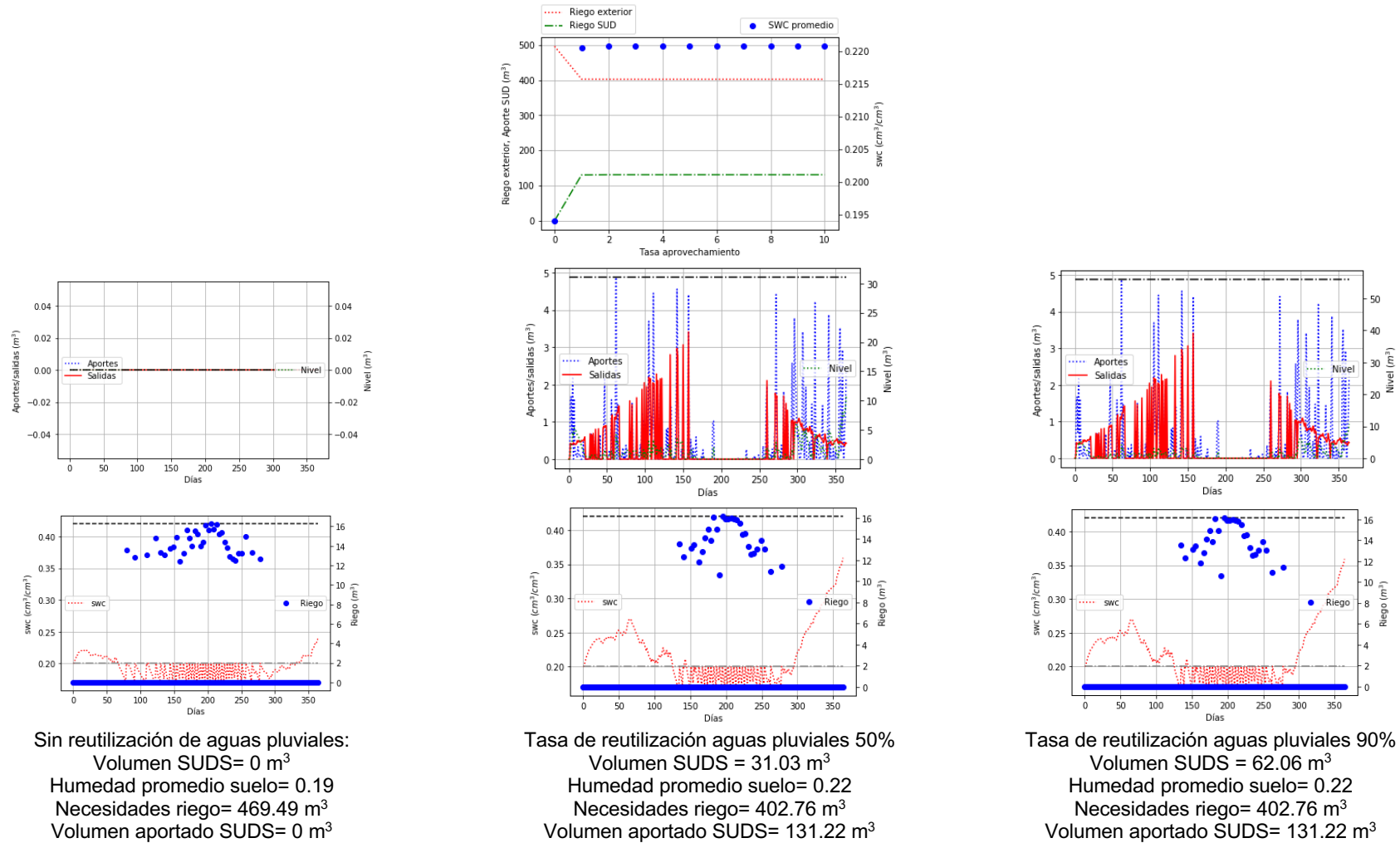
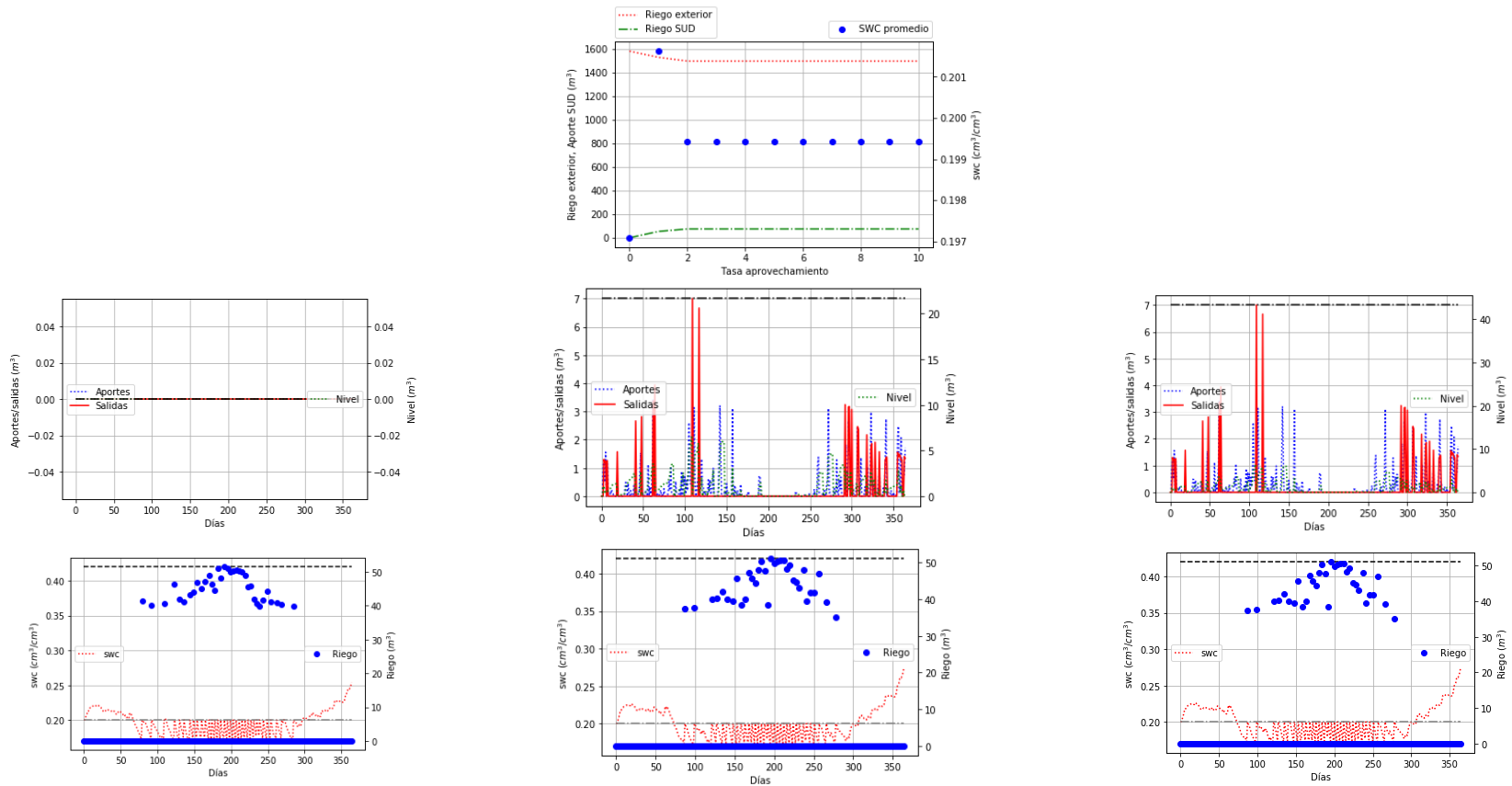


Figura 6: Simulación hidrológica de la evolución de los principales parámetros de la cuenca 2



Sin reutilización de aguas pluviales:
 Volumen SUDS= 0 m³
 Humedad promedio suelo= 0.2
 Necesidades riego= 1581.57 m³
 Volumen aportado SUDS= 0 m³

Tasa de reutilización aguas pluviales 50%
 Volumen SUDS = 21.66 m³
 Humedad promedio suelo= 0.2
 Necesidades riego= 1498.19 m³
 Volumen aportado SUDS= 74.88 m³

Tasa de reutilización aguas pluviales 100%
 Volumen SUDS = 75.25 m³
 Humedad promedio suelo= 0.31
 Necesidades riego= 986.89 m³
 Volumen aportado SUDS= 151.98 m³

Las figuras 7 y 8 muestran el comportamiento hidrológico ante tormentas concretas en cada una de las dos cuencas.

Figura 7: Simulación hidrológica ante tormenta tipo (infiltración. curva de gasto de conducción e hidrograma de entrada a SUD de almacenamiento) cuenca 1

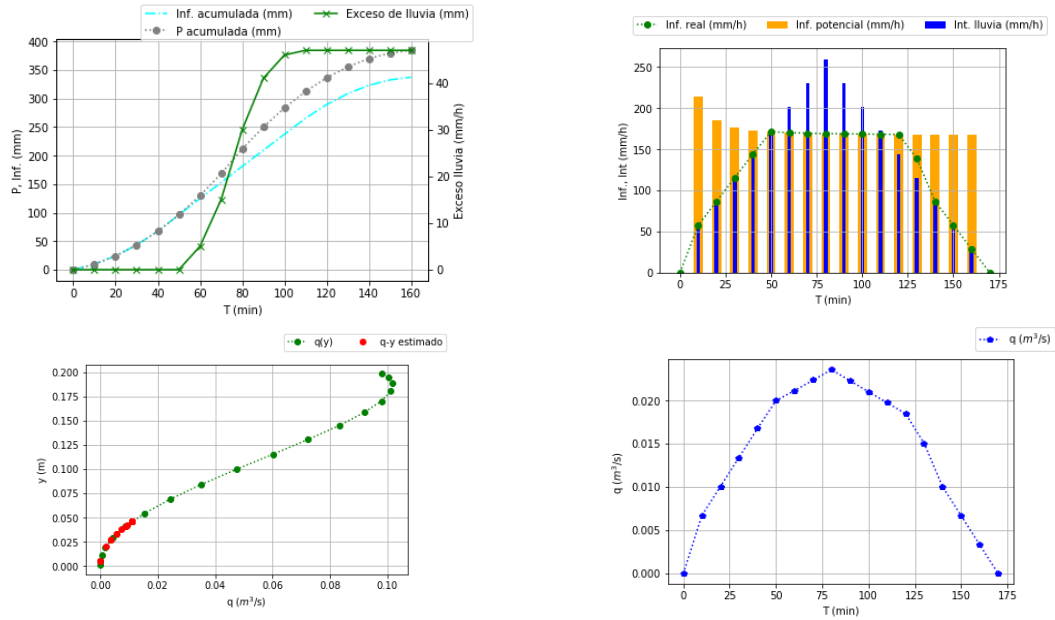
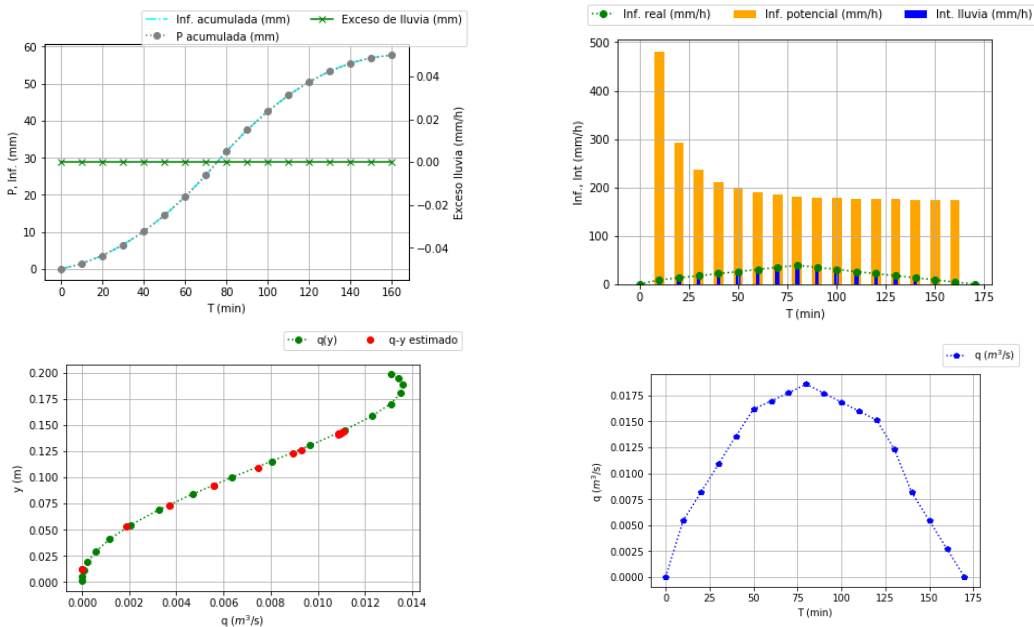


Figura 8: Simulación hidrológica ante tormenta tipo (infiltración. curva de gasto de conducción e hidrograma de entrada a SUD de almacenamiento) cuenca 2



3.3 Análisis económico

La determinación del VAN es sencilla en términos de comparación entre soluciones propias de un sistema tradicional y el sistema con reutilización del agua captada en los SUDS para

el riego.

Sumiendo que en ninguno de los casos existen ingresos los flujos de caja serán negativos y si el objetivo es comparar los costes de mantenimiento del sistema de riego tradicional serían los mismos para los dos casos puesto que el sistema de riego convencional debe ejecutarse en cualquiera de los dos casos (ya fuese como principal fuente de riego o como sistema de reserva ante situaciones extremas en el caso de los sistemas basados en SUDS).

En la acepción más sencilla del problema entonces únicamente el coste del agua para riego, el coste del tratamiento del agua pluvial, el coste de ejecución de los SUDS (amortado en la vida útil del proyecto) y las necesidades de mantenimiento adicionales derivadas de la presencia de los SUDS son los elementos diferenciales.

La estimación de los costes de mantenimiento de los SUDS está sujeta a una elevada incertidumbre debido a ser altamente dependiente del tipo de SUDS y de la pluviometría. En este trabajo se ha estimado un coste promedio de $1,50 \text{ €/m}^2 \cdot \text{mes}^{-1}$ a partir de una dedicación estimada de 10 h/mes de un operario para el mantenimiento mensual de 100 m^2 de superficie tipo de SUDS. También el coste de ejecución esta sujeto a una gran incertidumbre por las mismas razones. En este caso se ha supuesto un coste de 100 €/m^3 .

Se ha estimado un coste del agua regenerada para riego de zonas verdes de 1.32 €/m^3 y un coste de tratamiento del agua de escorrentía de 0.75 €/m^3 .

La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos para cada una de las dos cuencas estudiadas en cada uno de los tres escenarios simulados descritos en las figuras 5 y 6. En rojo se ha identificado la opción más ventajosa en términos financieros.

Tabla 4. VAN (€) por cuencas y escenarios

Mes	VAN
C1 sin reutilización	-28855.91
C1 tasa reutilización 50%	-29433.92
C1 tasa reutilización 90%	-32566.92
C2 sin reutilización	-51722.93
C2 tasa reutilización 50%	-54561.27
C2 tasa reutilización 90%	-37372.13

4. Conclusiones

La implementación de soluciones de reutilización del agua de escorrentía para suplementar las necesidades de riego en zonas verdes permite reducir las necesidades de agua de riego. Esta solución permite además una reducción del volumen de agua que debe ser tratado por los sistemas de saneamiento, reduciendo también por tanto el coste de este concepto.

Los estudios y normas existentes no contemplan la posible reutilización del agua recogida en los SUDS para riego zonas verdes sino que se limitan a manejar tormentas. El modelo incluido en este trabajo completa los métodos existentes en la actualidad y permite el diseño de SUDS basado en un criterio de reutilización de agua de lluvia. Sin embargo, la investigación presentada se limita al plano teórico. Se requiere en todo caso desarrollos futuros que mejoren la precisión del modelo mediante la calibración de los parámetros a partir de datos experimentales obtenidos bien en parcelas testigo o en instalaciones reales.

La evaluación financiera muestra que en los escenarios analizados los sistemas provistos son capaces de proporcionar resultados indicativos de la eficiencia del sistema

5. Referencias

- Baptiste, A. K., Foley, C., & Smardon, R. (2015). Understanding urban neighbourhood differences in willingness to implement green infrastructure measures: A case study of Syracuse, NY. *Landscape and Urban Planning*, 136, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.012>.
- Carsel, R.F. and Parrish, R.S. (1988). "Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics." *Water Resour. Res.*, 24, 755-769.
- Chui, T. F. M. C., & Ngai, W. Y. (2016). Willingness to pay for sustainable drainage systems in a highly urbanised city: A contingent valuation study in Hong Kong. *Water and Environment Journal*, 30, 62–69. <https://doi.org/10.1111/wej.12159>.
- Delleur, J.W. (2003). The evolution of urban hydrology: past, present, and future. *Journal of hydraulic engineering*, 129(8), 563-573.
- Johnson, G., & Geisendorf, S. (2022). Valuing ecosystem services of sustainable urban drainage systems: A discrete choice experiment to elicit preferences and willingness to pay. *Journal of Environmental Management* (307). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114508>.
- Mualem, Y. (1976). "A new model for predicting the hydraulic of unsaturated porous media." *Water Resour. Res.*, 12, 513-522.
- Oluwayemi, O., Proverbs, D., & Hong, X. (2022). Retrofitting Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS): A Cost-Benefit Analysis Appraisal. *Water* 14 (mayo). <https://doi.org/10.3390/w14162521>.
- Van Genuchten, M.T. (1987). A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Res. Rep. 121, U.S. Salinity Laboratory Agricultural Research Service, U.S. Department of -Agriculture, Riverside, California, USA.