

02-017

## EVALUATION OF THE IMPACT OF GREEN ROOFS IN THE REDUCTION OF FLOOD CONFLICT AREAS IN THE CENTRAL REGION OF CHILE

Mora-Melia, Daniel<sup>(1)</sup>; Lopez-Aburto, Carlos Samuel<sup>(1)</sup>; Pablo, Ballesteros-Perez<sup>(2)</sup>; Iglesias-Rey, Pedro Luis<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Universidad de Talca, <sup>(2)</sup>Loughborough University, <sup>(3)</sup>Universitat Politècnica de València

The development of Chile in terms of population growth and urbanization during the last two decades has meant that many of drainage and evacuation of rains systems have become obsolete. Particularly, many of the cities of the central region present numerous conflictive sectors that are flooded during the winter rains. On the other hand, the lack of green spaces in cities leads to complications related to biodiversity loss, increased temperatures, greater energy demand, impermeability, etc. In this sense, the green roofs are valued as an element of mitigation of climate change and they can reduce the surface runoff flow rate in cities.

This work proposes the installation of green roofs as a partial solution to the problem. The methodology includes the identification of conflicting sectors in a case study (Curicó), the construction of the hydrological model by means of a specialized software (SWMM), the addition to the model of green surfaces in different points and the computational simulation, in order to determine the viability of the method to avoid floods. The final results show the percentage of cover necessary for the runoff reduction to be sufficient to avoid flooding.

**Keywords:** *sustainable drainage systems; SWMM; green roofs; climate change*

## EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE TECHOS VERDES EN LA REDUCCIÓN DE SECTORES CONFLICTIVOS DE INUNDACIÓN EN LA REGIÓN CENTRAL DE CHILE

El desarrollo de Chile en cuanto a aumento de población y urbanización durante las dos últimas décadas ha provocado que muchos de los sistemas de drenaje y evacuación de aguas lluvias hayan quedado obsoletos. Particularmente, muchas de las ciudades de la región central de Chile presentan sectores conflictivos que quedan inundados durante las lluvias invernales. Además, la falta de espacios verdes en las ciudades acarrea complicaciones relacionadas con pérdida de biodiversidad, aumento de temperaturas, mayor demanda energética, impermeabilidad, etc. En este sentido, los techos o cubiertas verdes están valorados como elemento de mitigación del cambio climático y pueden disminuir el caudal de escorrentía superficial en las ciudades.

Este trabajo plantea la instalación de techos verdes como solución parcial al problema. La metodología incluye la identificación de sectores conflictivos en un caso de estudio (Curicó), la realización del modelo hidrológico mediante un software especializado (SWMM), la incorporación al modelo de superficies verdes en distintos puntos y la simulación computacional a efectos de determinar la viabilidad del método para evitar inundaciones. Los resultados finales muestran el porcentaje de cubierta necesario para que la reducción de escorrentía sea suficiente como para evitar la inundación.

**Palabras clave:** *sistemas de drenaje sostenible; SWMM; cubiertas verdes; cambio climático*

Correspondencia: Daniel Mora Melia (damora@utalca.cl)



©2018 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

Durante las dos últimas décadas, la mayoría de las ciudades latinoamericanas han experimentado un crecimiento desmesurado de población y urbanización, con la consiguiente sustitución de suelos que antes eran naturales y/o agrícolas por superficies impermeables urbanas (Romero-Lankao et al., 2014). Obviamente, este cambio en el uso del suelo genera aumentos en la escorrentía superficial cuando se producen precipitaciones. Por ello, una consecuencia directa del crecimiento urbano en Latino-América es la insuficiencia en los actuales sistemas de drenaje y evacuación de aguas lluvias, debido principalmente a la densificación urbana, la escasez de sumideros y las dimensiones de las redes de evacuación, que originalmente no fueron calculadas para un crecimiento demográfico como el experimentado.

Adicionalmente, la urbanización excesiva genera contaminación ambiental y otros efectos negativos como la conformación de islas de calor, pérdida de biodiversidad, polución atmosférica, inundaciones, etc (Xing, Jones, & Donnison, 2017). A este respecto, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) generan una serie de beneficios desde el punto de vista social, económico, medioambiental y de sostenibilidad, por lo que habitualmente son considerados como elementos de mitigación del cambio climático y como una solución tecnológica que contribuye al desarrollo sostenible de nuestras ciudades (Chiesura, 2004).

En el caso particular de Chile, el gobierno está comprometido a integrar políticas públicas que permitan lograr un desarrollo sustentable y una economía baja en carbono para el país. En particular, el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022 (Ministerio de Medio Ambiente, 2016) se encuentra orientado a la implementación efectiva de medidas identificadas como prioritarias que permitan aumentar la resiliencia de las ciudades y fomentar la implementación de tecnologías sustentables.

Dentro del conjunto de las SUDS, las cubiertas verdes son capaces de mitigar el impacto generado por la urbanización en cuanto a las condiciones de infiltración del suelo. Así, la implementación de estos sistemas mejora las condiciones de retención del agua lluvia, retrasan su llegada a los drenajes pluviales y permiten la evapotranspiración del agua almacenada (VanWoert et al., 2005; Viola, Hellies, & Deidda, 2017). Todas estas acciones contribuyen a reducir la escorrentía superficial en las ciudades y, por tanto, reducen la probabilidad de inundaciones (Stovin, 2010). Además, la implementación de SUDS en general y cubiertas verdes en particular, puede disminuir a largo plazo el consumo de agua potable en las edificaciones mediante el uso y la reutilización de las aguas lluvias retenidas en la cubierta. Estos volúmenes de agua pueden ser utilizados en WC, riego de zonas verdes, lavado de pisos y fachada, entre otros (Dierkes, Lucke, & Helmreich, 2015).

Por todo ello, la realidad es que las cubiertas verdes están siendo utilizadas de modo extensivo en Europa y Norte América, donde incluso algunos países han introducido leyes que fomentan su uso. Así, en Europa ciudades como Munich (Alemania), Copenhague (Dinamarca) o Paris (Francia) tienen leyes que obligan a la instalación de cubiertas verdes en determinados tipos de edificación (Ansel & Appl, 2014). En Norte América, Toronto (Canadá) fue la primera ciudad en el mundo en obligar por ley a que todas las edificaciones superiores a 2000 m<sup>2</sup> tuvieran entre un 20 y un 60% de techos verdes. Análogamente, ciudades estadounidenses como Portland o Minneapolis ya han incorporado las cubiertas verdes en sus leyes de planificación urbanística (Carter & Fowler, 2008).

En otros continentes como Australia (Tassicker, Rahnamayezekavat, & Sutrisna, 2016) o Sudamérica todavía no hay un uso tan extendido de estos elementos. Sin embargo, países como Argentina o Chile ya están introduciendo políticas y fuertes incentivos fiscales que

ayuden a promover la adopción de prácticas y tecnologías más sustentables. En Chile, de acuerdo a los datos disponibles en el Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) ([www.cedeus.cl](http://www.cedeus.cl)), se estima que las políticas de incentivo han ayudado a la instalación de más de 60 mil m<sup>2</sup> de techos y cubiertas verdes. No obstante, todavía no existen leyes que generen obligatoriedad en su uso.

El objetivo de este trabajo es la generación de un modelo basado en cubiertas verdes que permita reducir la escorrentía urbana y por tanto, mitigar las inundaciones en determinados sectores conflictivos de las ciudades. En base a lo anterior, este trabajo establece un marco operativo de actuación en las calles de una ciudad de la región central de Chile (Curicó), identificando una serie de sectores donde se registran inundaciones cuando se producen precipitaciones. De acuerdo al levantamiento de información en terreno y con la colaboración de las instituciones públicas se construye un modelo hidrológico, donde se simula el efecto de instalar distintos modelos de cubierta verde comercial en edificios cercanos a los puntos de inundación cuando se registran distintos eventos de precipitación. Las simulaciones permiten identificar el área que debería ser permeabilizada con cubiertas verdes para evitar inundaciones y revela información valiosa respecto de los datos de los nodos, la escorrentía en las sub-cuencas y el desempeño de los SUDS.

Los resultados demuestran que la utilización de techos verdes en el entorno de estos sectores conflictivos produce una reducción considerable en la escorrentía superficial, pudiendo en algunos de los eventos de lluvia considerados evitar la saturación de los mismos.

## **2. Metodología**

### **2.1 Selección y descripción física de los casos de estudio**

En base a los antecedentes entregados por la Dirección de Protección Civil (DPC) y las salidas a terreno realizadas durante los meses de mayor intensidad de lluvias (Mayo, Junio, Julio y Agosto) se identifican hasta 27 puntos críticos donde se producen inundaciones en eventos cortos de lluvia (hasta 24 horas). Sin embargo, para la elaboración del modelo computacional se descartan todas. Adicionalmente, los siguientes criterios son considerados a hora de seleccionar los puntos sobre los que se aplicará el modelo computacional:

- Inspección visual. Tras un evento de lluvia, las zonas en las que visualmente se aprecia una mayor cantidad de agua son las que requieren de una intervención más urgente.
- Disponibilidad de m<sup>2</sup> de cubierta en los alrededores. Las localizaciones con reducida densificación de viviendas son descartadas, dado que la cantidad de m<sup>2</sup> disponible es un factor clave para reducir la escorrentía hasta niveles de no inundación.
- Pendiente en las cubiertas ya construidas. Se consideran únicamente edificaciones que posean pendientes hasta de un 30% en consonancia con los modelos comerciales de cubierta verde que van a ser introducidos en el modelo computacional.
- Capacidad y resistencia de las viviendas elegidas que permita soportar el peso estructural de la cubierta verde. La instalación de cubiertas y/o techos verdes aumentan la masa inercial de la vivienda. Por este motivo, las viviendas seleccionadas deberán poseer fundaciones, muros, losas, vigas y cadenas de hormigón armado y albañilería reforzada o armada. De este modo se asegura que los pesos adicionales de las cubiertas verdes no superan la resistencia de la vivienda tras la adición de las nuevas cargas gravitacionales.

En base a los criterios anteriores, seis puntos son seleccionados en primera instancia para la aplicación del modelo computacional y la evaluación de los resultados. Estos puntos se

consideran suficientemente representativos de la tipología de vivienda en el centro de la ciudad. A modo de ejemplo, la figura 1 muestra el caso de estudio situado entre las calles Sargento Aldea y Yungay, conectado al colector Aldea-Vidal de la red unitaria de Curicó. En particular, este colector registra habitualmente problemas relacionados con la evacuación de las aguas lluvias. La figura muestra la situación de este sector en un día no lluvioso (a) y en un día lluvioso (b).



**Figura 1: Caso de estudio 1: Intersección Yungay-Sargento Aldea en: (a) día no lluvioso; (b) día lluvioso**

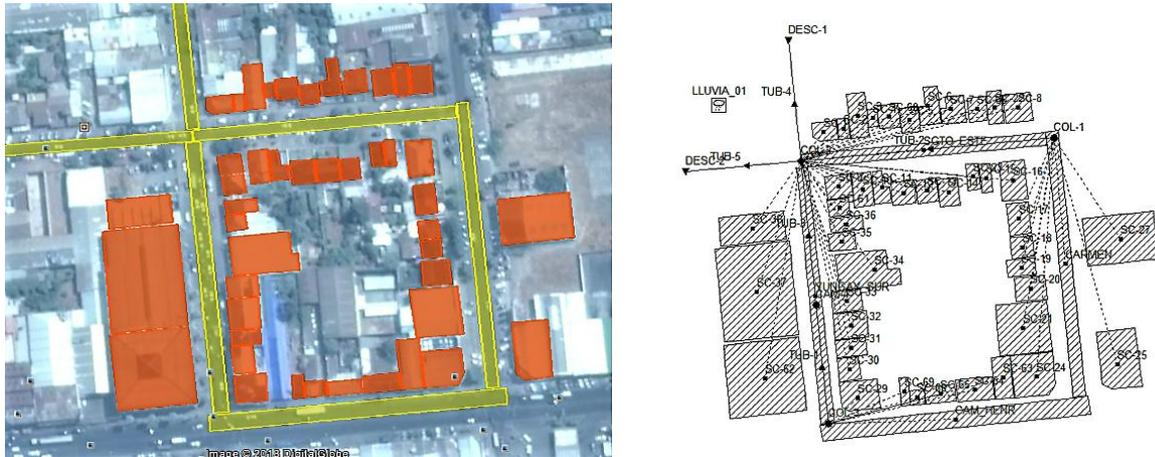
En la construcción del modelo hidrológico es imprescindible realizar un levantamiento de información de distintos parámetros y variables. En este sentido, la mayor parte de datos fueron tomados del Plan Maestro de Aguas Lluvias de la ciudad de Curicó y de la guía de Diseño y Especificaciones de Elementos Urbanos de Infraestructuras, desarrollada por el Departamento de Obras Urbanas del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2005).

En primer lugar y utilizando aplicaciones de software libre como Google Earth se identifican, delimitan y calculan todas las superficies donde es viable la instalación de cubiertas verdes. Así, el contorno de cada techumbre y de las calles pavimentadas circundantes que aportan caudal al punto conflictivo de inundación es definido (figura 2a). Además, fue necesario definir con exactitud la ubicación de nudos de conexión y vertidos (colectores y cámaras de inspección), dado que parámetros como la cota de fondo (m), la profundidad máxima (m), el nivel inicial (m) y el área de inundación ( $m^2$ ) para cada nudo también deben introducirse en el modelo. De igual modo, para las conducciones (tuberías) debe definirse forma de la conducción, diámetro (mm), longitud (m), material, rugosidad, pendiente ( $\text{‰}$ ), cota de entrada (m), cota de salida (m), desnivel de entrada (m), desnivel de salida (m), caudal inicial (L/s) y caudal máximo (L/s). Por último, en los puntos de vertido (descargas) se introduce la cota de fondo y el tipo de descarga.

Las techumbres donde se instalan las cubiertas verdes son introducidas en el modelo como sub-cuencas, donde se define el colector al que descarga, el área ( $H_a$ ), el ancho de escorrentía (m), la pendiente (%), el área impermeable (%), y los coeficientes de Manning (n) para los estratos permeable e impermeable, tomados de (Te Chow, 1959).

Una vez recopilada toda la información se construye el modelo hidrológico bajo el entorno del Storm Water Management Model (SWMM). A este respecto, la figura 2b) muestra el modelo computacional creado para el caso de estudio 1, donde quedan definidos los nudos de descarga (colectores), los conductos existentes, los puntos de vertido y el pluviómetro, a fin de crear un evento de lluvia. El detalle del modelo hidrológico empleado en este trabajo,

así como las lluvias de diseño utilizadas en la simulación computacional se detalla en los siguientes apartados.



**Figura 2: a) Superficie disponible para cubiertas verdes (área naranja); b) Modelo hidrológico en SWMM.**

## 2.2 Entorno computacional

Los modelos hidrológicos permiten simular los procesos de transformación lluvia-escorrentía en una cuenca representada como un sistema de componentes hidrológicos e hidráulicos interconectados. Este trabajo utiliza SWMM, modelo de simulación dinámica desarrollado por la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) de los EEUU. En particular, SWMM puede resolver sistemas hidráulicos bajo tres escenarios: flujo uniforme, onda cinemática y onda dinámica (James, Rossman, & James, 2010).

EPA-SWMM puede simular el escurrimiento de aguas pluviales y alcantarillas sanitarias, así como eventos de lluvia tanto discretos como continuos. La robustez y fiabilidad del motor de cálculo hidráulico de SWMM ha sido probado en miles de proyectos académicos y profesionales desde principios de los 70. Adicionalmente el software es de uso libre, es actualizado periódicamente por la EPA y es de código abierto. Por tanto, es posible introducir mejoras o personalizarlo creando e incorporando funciones adicionales (Martínez-Solano, Iglesias-Rey, Saldarriaga, & Vallejo, 2016).

La última versión de este software (v. 5.1) permite la simulación de siete técnicas de drenaje sostenibles mediante controles LID (Low Impact Development) entre las que se encuentran las cubiertas verdes. En el caso de las cubiertas verdes, el software las considera como una variante de una célula de bio-retención con una capa drenante bajo la capa suelo que evacúa el exceso de agua percolada tras un episodio de lluvia.

## 2.3 Lluvia de diseño

El modelo hidrológico computacional requiere de una descripción detallada del evento de lluvia, ya que si se desea estudiar el comportamiento de la lluvia en el tiempo, debemos poner atención en cómo se distribuye la intensidad a lo largo del mismo. Normalmente, el concepto de intensidad es utilizado para referirnos a cierta cantidad de precipitación registrada en un tiempo determinado: una hora, un minuto, etc. Estos valores medios de intensidad permiten clasificar los diferentes eventos de precipitación en hasta cinco categorías (débil, moderado, fuerte, muy fuerte y torrencial).

Para determinar la intensidad de lluvia, cuyos registros son generalmente bastante limitados, la literatura ofrece distintos procedimientos estadísticos. Entre todos ellos, este trabajo ha

considerado la utilización de curvas IDF, construidas a partir de la información disponible en los anuarios Climatológicos de la Dirección Meteorológica de Chile. En base a estas curvas se han construido dos series de precipitación (figura 3) bajo las que se analiza computacionalmente el desempeño de las cubiertas verdes. La primera serie temporal (ST\_01) acumula una precipitación máxima de 55.698 mm en 24 horas, donde en la hora de máxima intensidad se registran 15 mm, valor correspondiente a una lluvia de intensidad moderada. La segunda serie temporal (ST\_02) acumula 87.291 mm en 24 horas, con 23.38 mm en la hora de mayor intensidad, correspondiendo con una lluvia de intensidad fuerte. Ambas series corresponden con valores de precipitación máxima esperada durante los meses más lluviosos del año, donde la serie TS\_01 ha sido calculada considerando un periodo de retorno de 2 años, mientras que la serie TS\_02 considera un periodo de retorno de 10 años.

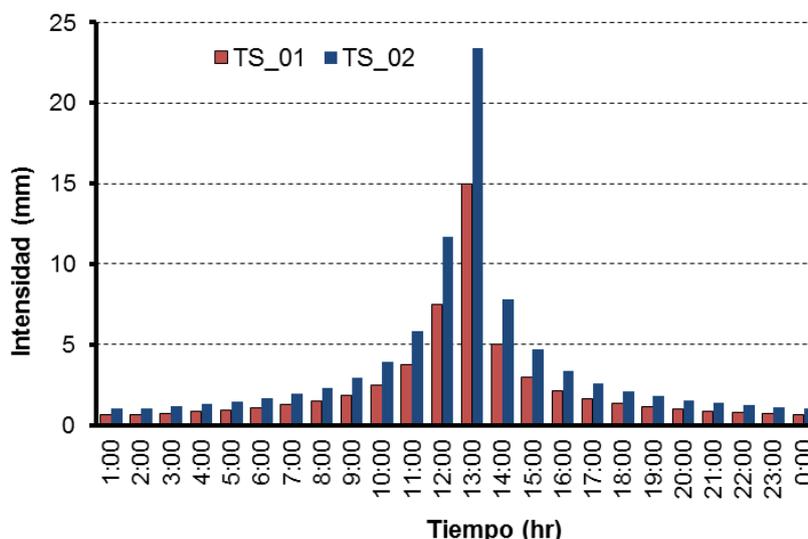


Figura 3: Lluvias de diseño utilizadas en el modelo.

## 2.4 Selección de las cubiertas verdes apropiadas

Dado el nivel socio-económico promedio de la región analizada es deseable que las cubiertas verdes sean económicas y que no requieran mucho mantenimiento. Además, debido a la tipología de edificación predominante en los sectores de estudio, es necesario instalar cubiertas inclinadas entre un 10 y un 30%. Por último, teniendo en cuenta que las fuerzas de empuje aumentan con la pendiente de las cubiertas y que estas deberán ser transferidas a la estructura mediante bordes perimetrales fuertes o barreras de retención estables, se consideró que las cubiertas de tipo extensivo y semi-extensivo serían las más aconsejables, dado que su peso es inferior.

En las cubiertas inclinadas cobra especial incidencia la estabilidad del sustrato y la retención de agua. Por este motivo la selección de plantas y métodos de plantación de las mismas deberán ajustarse a la pendiente, siendo imprescindible la instalación profesional de una impermeabilización anti-raíces y una manta de protección con gran capacidad de retención de agua. En el caso particular de la región central de Chile cobra especial interés controlar la resistencia de las plantas, dado que durante el invierno las cubiertas se verán sometidas a fuertes vientos y heladas, mientras que en verano sufrirán una alta radiación solar.

Respecto al mantenimiento, este tipo de cubiertas son construidas habitualmente con plantas que crecen naturalmente sin ser sembradas y con escaso espesor de sustrato. Una vez la vegetación cubre entre el 60-70% de la superficie total, los trabajos de mantenimiento se reducen a dos o tres visitas de inspección al año. En estas visitas periódicas

principalmente se controla la aparición de plantas adventicias, la necesidad de riego o un crecimiento no deseado de vegetación.

En cuanto al tipo de vegetación, este tipo de cubiertas son conformadas habitualmente por una vegetación tapizante formada por plantas autóctonas de la región. En cada región existen multitud de plantas autóctonas aptas para formar una alfombra natural siendo hoy en día muy habitual la utilización de distintas variedades de sedum, herbáceas y aromáticas.

Finalmente, las simulaciones computacionales del modelo hidrológico fueron realizadas con tres soluciones comerciales distintas de cubiertas verdes, donde las variaciones principales entre unas y otras son el tipo de vegetación, la inclinación, el espesor del sustrato, el espesor de la vegetación, y el espesor de la capa de drenaje. La tabla 2 resume las características principales de cada uno de los tipos de cubierta adoptados en las simulaciones.

**Tabla 1. Características principales de los sistemas comerciales de cubierta verde utilizados**

	GR_01	GR_02	GR_03
Tipo	Extensiva	Extensiva	Semi-extensiva
Altura máxima sistema	160 mm	120 mm	320 mm
Pendiente de inclinación	20°	30°	10°
Tipo de vegetación	Flora de hoja corta	Césped	Flora semi- densa
Altura de vegetación	45 mm	30 mm	150 mm
Tipo de sustrato	Arena arcillosa	Arcilla limosa	Arcilla orgánica
Espesor máximo sustrato	95 mm	55 mm	130 mm
Espesor estera drenante	20 mm	35 mm	40 mm
Peso saturado de agua	160 kg/m <sup>2</sup>	185 kg/m <sup>2</sup>	195 kg/m <sup>2</sup>

La utilización de los módulos LID en el modelo SWMM permite implementar las cubiertas verdes a toda el área de estudio o únicamente a determinadas sub-cuencas. En este trabajo, cada caso de estudio considera cuatro alternativas de instalación, a fin de determinar la relación entre m<sup>2</sup> de cubierta verde instalados y reducción de escorrentía superficial. Por ejemplo, para el caso de estudio 1, el modelo analizado consideró la incorporación de cubiertas verdes a un total de 21, 31, 39 y 45 sub-cuencas, equivalentes aproximadamente al 25, 50, 75 y 100% de superficie total disponible en cada caso. La distribución de cubiertas verdes considerada se muestra en la figura 4.

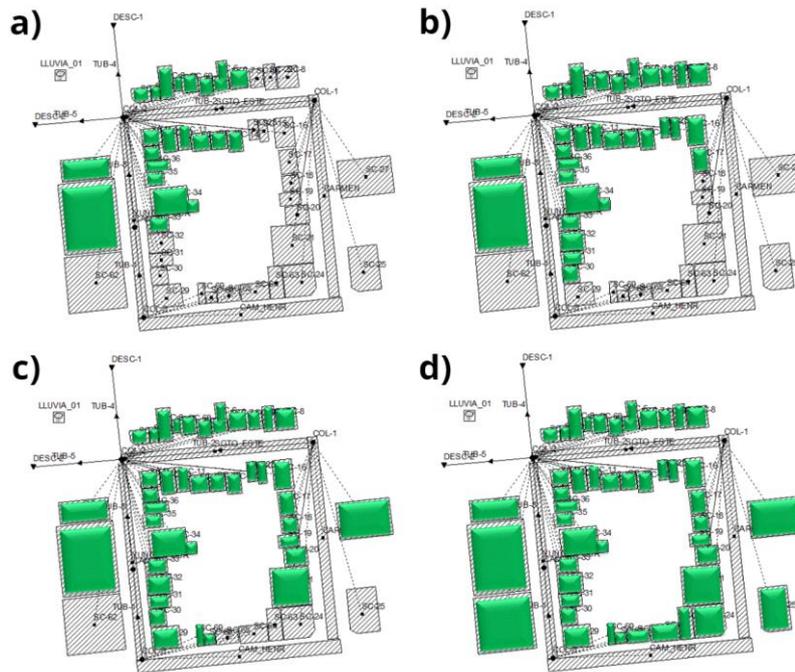
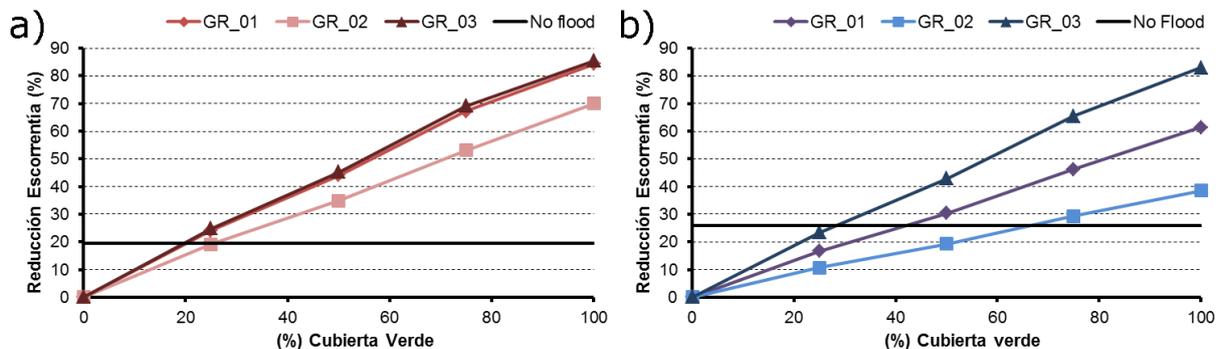


Figura 4: Superficie de cubierta verde en caso de estudio 1. a) 25% superficie disponible; b) 50% superficie disponible; c) 75% superficie disponible; a) 100% superficie disponible.

### 3. Resultados

Una vez construido el modelo se realiza una primera simulación sin modificaciones a la situación original, con la intención de replicar las inundaciones observadas en terreno. Los resultados obtenidos por SWMM representaron correctamente las inundaciones en todos los casos de estudio planteados. Una vez validados los modelos hidrológicos, estos son modificados para incluir en cada caso las distintas opciones de cubierta verde comercial (según tabla 1). Cada uno de los tres modelos de cubierta verde se analiza por separado, determinando en cada caso de estudio la superficie verde necesaria para reducir suficientemente la escorrentía urbana y evitar la inundación bajo las lluvias de diseño testadas. Cabe destacar que los resultados no consideraron pérdidas por evaporación, por no considerarse relevantes en los objetivos de este trabajo. Sin embargo, y de acuerdo a los datos proporcionados por las instituciones, los resultados sí consideraron la capacidad de infiltración del terreno, la cual es dependiente de variables como el tipo de suelo, la topografía, la pendiente, el espesor de suelo, etc. La figura 5 muestra la reducción de escorrentía (%) en función de la superficie de cubierta verde instalada en relación a la superficie total disponible para el primer caso de estudio.



**Figura 5: Eficiencia de las cubiertas verdes como elemento mitigador de inundación en caso de estudio 1: a) Reducción de escorrentía con TS\_01; b) Reducción de escorrentía con TS\_02**

La figura evalúa, para el primer caso de estudio, la eficiencia de las tres soluciones comerciales como elemento mitigador de inundación bajo dos escenarios diferentes de intensidad de precipitación. Así, el lado izquierdo de la figura representa un evento de lluvia moderadamente intenso (TS\_01), mientras que el lado derecho representa un evento de lluvia fuerte (TS\_02). En ambos escenarios, la línea negra representa la reducción de escorrentía (%) necesaria para evitar la inundación (19.53% para TS\_01 y 25.92% para TS\_02). Los resultados muestran que, para la serie de lluvia TS\_01, las tres soluciones comerciales evitan la inundación incluso cubriendo solo el 25% de la superficie de techo disponible. Para el segundo evento de lluvia TS\_02, con una intensidad más alta, es necesario aumentar la superficie del techo verde al menos hasta el 40% de superficie disponible para las configuraciones de techo verde GR\_01 y GR\_03. Para GR\_02, es necesario aumentar el área del techo verde hasta más del 60%. En términos de área total, esto equivale a decir que la superficie total de cubierta verde necesaria sería de prácticamente 4000 m<sup>2</sup> para evitar colapsos durante lluvias de fuerte intensidad.

Analizando de igual manera el resto de casos de estudio seleccionados, los resultados muestran como la tendencia general es la misma que la del primer caso de estudio. En términos generales es posible concluir que para la serie de precipitaciones de menor intensidad TS\_01, las cubiertas verdes GR\_01 y GR\_03 se comportan prácticamente igual, pero que al aumentar la intensidad de la lluvia (TS\_02), GR\_03 es capaz de retener una mayor cantidad de agua, por lo que reduce más la escorrentía. En todos los casos de estudio y lluvias de diseño analizadas, la cubierta tipo GR\_02 fue la que obtuvo peores resultados en cuanto a reducción de la escorrentía urbana, probablemente debido al menor espesor de sustrato respecto de los otros dos modelos.

En cuanto a la superficie de cubierta verde necesaria para mitigar las inundaciones, los resultados muestran como para lluvias de intensidad moderada todos los sectores críticos evitan la inundación si al menos el 50% de la superficie disponible en los alrededores tiene incorporados los techos verdes. Por otro lado, si las lluvias son de fuerte intensidad no todas las soluciones comerciales testadas evitan la inundación, independientemente de la superficie de cubierta verde instalada. Así, la cubierta GR\_02 no es capaz de evitar la inundación en cuatro de los seis casos de estudio, ni siquiera cubriendo el 100% de superficie disponible. En este sentido, para lluvias de fuerte intensidad, la cubierta GR\_03 es la que mejor comportamiento tiene, dado que es capaz de retener suficiente agua y evitar la inundación en todos los casos. No obstante, hay que destacar que alguno de los puntos conflictivos estudiados requiere la implementación de cubiertas verdes en prácticamente el 100% de la superficie total disponible, lo que probablemente no sea viable en todos los casos desde un punto de vista económico. A modo de resumen, la tabla 2 muestra la superficie mínima de cubierta verde necesaria para todos los escenarios analizados.

**Tabla 2. Área mínima de cubierta verde requerida para evitar inundación**

Lluvia diseño	Caso Estudio	Escorrentía inicial (mm)	Reducción necesaria escorrentía (%)	Área requerida GR_01 (%)	Área requerida GR_02 (%)	Área requerida GR_03 (%)
Moderada	1	42.205	19.53	20–25	25–30	20–25

	2	44.982	28.16	40–45	50–60	40–45
	3	43.84	27.17	35–40	50–60	35–40
	4	42.185	34.15	30–35	40–45	30–35
	5	43.906	29.4	35	45–50	35
	6	43.801	25.54	30–35	50–55	30–35
Fuerte (TS_02)	1	67.271	25.92	40–45	65–70	25–30
	2	70.875	46.56	85–90	Flood	60–65
	3	70.26	29.94	55–60	95–100	40–45
	4	67.874	65.66	95–100	Flood	65–70
	5	70.337	48.73	75–80	Flood	55–60
	6	70.184	45.88	75–80	Flood	55–60

Atendiendo a las características constructivas de las tres cubiertas analizadas, los resultados muestran como el espesor de la capa de vegetación y del sustrato influyen considerablemente en la capacidad de retención del agua. En este sentido, la cubierta GR\_02 requiere de mucha mayor superficie que las otras dos para reducir la misma escorrentía y evitar la inundación.

Por otro lado, las cubiertas GR\_01 y GR\_03 ofrecen un rendimiento muy similar en eventos de precipitación moderada, mientras que evidencian sus diferencias en eventos de precipitación fuerte, donde la cubierta GR\_03 rinde de forma muy superior. Sin embargo, la cubierta GR\_03 también tiene sus inconvenientes, puesto que requiere de mayor mantenimiento por el tipo de vegetación (cubierta semi-extensiva), además de ser más pesada para la estructura. Por ello, dependiendo del tipo de edificación donde se instale, estos dos aspectos podrían ser un factor limitante.

Analizando la fiabilidad de los resultados obtenidos, existen numerosos trabajos que muestran SWMM como un software capaz de predecir con éxito el comportamiento hidráulico de las aguas pluviales a largo plazo. Sin embargo, el motor hidráulico de SWMM introduce algunas simplificaciones en la formulación del modelo. Por un lado, SWMM simula los procesos de precipitación-escorrentía, pero no simula los procesos físicos detallados en los SUDS. Por tanto, existen propiedades de las cubiertas verdes que no son consideradas, como el contenido inicial de agua, la especie de las plantas, etc. A este respecto, los datos de entrada son la distribución de la intensidad de precipitación y una estimación de la capacidad de retención del techo verde mediante características de superficie (altura de la capa de tierra, fracción de volumen de vegetación, rugosidad y pendiente superficial), características del suelo (espesor, porosidad, conductividad, etc.), almacenamiento (espesor, índice de vacío, índice de filtración, etc.) y drenaje (coeficiente de flujo, exponente de flujo y altura de desplazamiento). Adicionalmente, los parámetros requeridos para la simulación son numerosos y algunas veces difíciles de obtener. Consecuentemente, como SWMM no considera directamente los procesos físicos detallados, los resultados de la respuesta hidrológica del sistema deben considerarse como meras estimaciones de rendimiento del techo verde.

Respecto a los resultados esperados, la reducción del volumen total de escorrentía no es fácilmente comparable con estudios previos, debido a diferentes condiciones, propiedades y supuestos en el modelo. A pesar de estas limitaciones, la reducción observada del volumen de escorrentía en la literatura generalmente se encuentra entre un 40% un 80% (Fassman-Beck, Voyde, Simcock, & Hong, 2013; Speak, Rothwell, Lindley, & Smith, 2013; Stovin, Vesuviano, & Kasmin, 2012), por lo que los resultados generales obtenidos en este trabajo parecen estar en concordancia con los estudios previos. Sin embargo, prácticamente todos

los trabajos revisados analizan únicamente la capacidad de los techos verdes cuando ocupan el 100% de la superficie disponible del techo. Esto no parece realista. Por esta razón, este trabajo evaluó el porcentaje que podría estar disponible en un entorno urbano real y el porcentaje que debería cubrirse para evitar problemas de inundación. Esto también forma una idea más realista sobre la inversión económica requerida.

De acuerdo a lo anterior parece obvio que para evaluar la viabilidad de la solución propuesta es necesario considerar el factor económico. A este respecto, la solución de techo verde más simple y económica es la extensiva. Los costos aproximados generalmente varían entre los 55,000 y 65,000 CLP/m<sup>2</sup> (75 a 95 EUR /m<sup>2</sup>) incluyendo impermeabilización, sistemas de drenaje, sustrato, vegetación e irrigación. Por otro lado, las cubiertas verdes intensivas se asemejan a jardines y están diseñadas para uso recreativo. Estas soluciones son más caras (a partir de 110,000 CLP/m<sup>2</sup> o 150 EUR/m<sup>2</sup>), por lo que no fueron considerados en este análisis. A partir de los resultados expuestos y teniendo en cuenta la instalación de una cubierta semi-extensiva (GR\_03), es posible estimar que al menos el 60% de la superficie disponible debería convertirse en cubierta verde para evitar inundaciones en eventos de lluvias de intensidad fuerte. Esto implica instalar entre aproximadamente 2400 y 5000 m<sup>2</sup> en cada uno de los puntos analizados. En términos monetarios, esto supone una fuerte inversión que normalmente no puede cubrirse únicamente por los usuarios particulares.

Por lo tanto, promover las tecnologías verdes debería ser una prioridad para países en desarrollo como Chile. Sin embargo, las condiciones socioeconómicas particulares de cada ciudad requieren una atención especial a la hora de elegir el tipo de techo verde.

Finalmente, los beneficios económicos relacionados con el ahorro energético que suponen los techos verdes también están bien documentados en la literatura (Berardi, GhaffarianHoseini, & GhaffarianHoseini, 2014; Cai et al., 2015). Sin embargo, de nuevo los altos costos de construcción de los techos verdes disuaden a muchos propietarios particulares de edificios. En Chile, las políticas de incentivos para la adopción de tecnologías sostenibles y energéticamente eficientes se están implementando lentamente. Sin embargo, por el momento, la falta de legislación sobre techos verdes está causando que muchos usuarios desconozcan su derecho a solicitar beneficios fiscales después de la instalación. Estudios como el propuesto aquí pueden ayudar a crear conciencia en el futuro cercano.

#### **4. Conclusiones**

El crecimiento de las zonas urbanas durante las dos últimas décadas junto con el fenómeno de cambio climático ha producido efectos devastadores en las ciudades en cuanto a calidad del aire, calentamiento, inundaciones, etc. En el caso particular de Chile, el gran desarrollo urbanístico y la ausencia de espacios verdes ha provocado que la infraestructura de evacuación de aguas pluviales sea insuficiente en determinados sectores de las ciudades donde se producen inundaciones durante la época invernal. Entre los numerosos beneficios socio-económicos y medioambientales aportados por las cubiertas verdes se encuentra la reducción de la escorrentía urbana, por lo que este trabajo propone su uso localizado para limitar las inundaciones en algunos sectores conflictivos en las ciudades de la zona central de Chile.

La metodología propuesta, a partir de datos reales proporcionados por organismos públicos, identificó una serie de sectores conflictivos en una ciudad de la zona central de Chile y simuló computacionalmente la aplicación de cubiertas verdes en seis casos de estudio. El objetivo del trabajo era definir si es posible controlar la inundación en sectores localizados mediante sistemas de drenaje sostenible. De acuerdo a los resultados obtenidos, es posible afirmar que:

- La instalación de cubiertas verdes en los sectores críticos analizados reduce considerablemente la escorrentía urbana. En el caso de precipitaciones de intensidad

moderada, dos de los tres tipos de cubiertas comerciales analizados (GR\_01 y GR\_03) evitan la inundación en todos los casos instalando cubiertas verdes en menos del 50% de superficie disponible.

- Ante precipitaciones de fuerte intensidad, la superficie de cubierta verde necesaria para controlar la inundación es mucho mayor. Concretamente, las cubiertas GR\_01 y GR\_03 necesitan cubrir más de un 60% de la superficie total disponible en prácticamente todos los casos. La cubierta GR\_02 no puede controlar la inundación en cuatro de los seis casos de estudio.
- En eventos de precipitación fuerte, la cubierta semi-extensiva analizada (GR\_03) funciona considerablemente mejor que las dos cubiertas extensivas (GR\_01 y GR\_03), pero introduce inconvenientes adicionales, como puede ser el mayor peso de la misma o una mayor necesidad de mantenimiento.
- De lo anterior, se deduce que entre los 3 modelos testados de cubierta verde, el GR\_02 es el que menos capacidad de retención ofrece. Este tipo de cubierta verde tiene menor espesor de sustrato y menor espesor de la capa de vegetación que los otros dos, por lo que ambos parámetros resultan realmente determinantes a la hora de seleccionar una cubierta verde si el principal interés es la reducción de escorrentía urbana.

De acuerdo a lo anterior, en términos generales puede concluirse que las cubiertas verdes pueden ayudar a controlar la inundación en los sectores conflictivos de las ciudades, al menos cuando estas se producen con precipitaciones de intensidad moderada.

## 5. Referencias bibliográficas

- Ansel, W., & Appl, R. (2014). Green roof policies—an international review of current practices and future trends. International Green Roof Association (IGRA), Nürtingen, Germany.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., & GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411–428.
- Cai, W., Santoso, A., Wang, G., Yeh, S.-W., An, S.-I., Cobb, K. M., ... Wu, L. (2015). ENSO and greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(9), 849–859. <http://doi.org/10.1038/nclimate2743>
- Carter, T., & Fowler, L. (2008). Establishing Green Roof Infrastructure Through Environmental Policy Instruments. *Environmental Management*, 42(1), 151–164. <http://doi.org/10.1007/s00267-008-9095-5>
- Centro de Desarrollo Urbano Sostenible. Disponible online: [www.cedeus.cl](http://www.cedeus.cl) (accedido en 04 Abril 2018).
- Chiesura, A. (2004). The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning*, 68(1), 129–138. <http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.08.003>
- Dierkes, C., Lucke, T., & Helmreich, B. (2015). General Technical Approvals for Decentralised Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)—The Current Situation in Germany. *Sustainability*, 7(12), 3031–3051. <http://doi.org/10.3390/su7033031>
- Fassman-Beck, E., Voyde, E., Simcock, R., & Hong, Y. S. (2013). 4 Living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation? *Journal of Hydrology*, 490, 11–20. <http://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2013.03.004>
- James, W., Rossman, L. A., & James, W. R. C. (2010). User's guide to SWMM 5:[based on original USEPA SWMM documentation]. CHI.
- Martínez-Solano, F., Iglesias-Rey, P., Saldarriaga, J., & Vallejo, D. (2016). Creation of an

- SWMM Toolkit for Its Application in Urban Drainage Networks Optimization. *Water*, 8(12), 259. <http://doi.org/10.3390/w8060259>
- Ministerio de Medio Ambiente. “Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022”; Gobierno de Chile: Santiago, Chile, 2016. (in Spanish). Disponible online: <http://portal.mma.gob.cl> (accedido en 04 Abril 2018)
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. “Guía de Diseño y Especificaciones de Elementos Urbanos de Infraestructuras”. Gobierno de Chile: Santiago, Chile, 2016 (in Spanish). Disponible online: <http://bcn.cl/2423i> (accedido en 04 April 2018)
- Romero-Lankao, P., Hughes, S., Qin, H., Hardoy, J., Rosas-Huerta, A., Borquez, R., & Lampis, A. (2014). Scale, urban risk and adaptation capacity in neighborhoods of Latin American cities. *Habitat International*, 42, 224–235. <http://doi.org/10.1016/J.HABITATINT.2013.12.008>
- Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., & Smith, C. L. (2013). Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. *Science of The Total Environment*, 461–462, 28–38. <http://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2013.04.085>
- Stovin, V. (2010). The potential of green roofs to manage urban stormwater. *Water and Environment Journal*, 24(3), 192–199.
- Stovin, V., Vesuviano, G., & Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414–415, 148–161. <http://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.10.022>
- Tassicker, N., Rahnamayiezekavat, P., & Sutrisna, M. (2016). An Insight into the Commercial Viability of Green Roofs in Australia. *Sustainability*, 8(7), 603. <http://doi.org/10.3390/su8070603>
- Te Chow, V. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, Inc; New York.
- VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., Fernandez, R. T., & Xiao, L. (2005). Green Roof Stormwater Retention. *Journal of Environment Quality*, 34(3), 1036. <http://doi.org/10.2134/jeq2004.0364>
- Viola, F., Hellies, M., & Deidda, R. (2017). Retention performance of green roofs in representative climates worldwide. *Journal of Hydrology*, 553, 763–772. <http://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2017.08.033>
- Xing, Y., Jones, P., & Donnison, I. (2017). Characterisation of Nature-Based Solutions for the Built Environment. *Sustainability*, 9(1), 149. <http://doi.org/10.3390/su9010149>

## Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (Conicyt), Chile, quien ha financiado el Proyecto de Iniciación a la Investigación n° 1180660