

# CIUDADES SENSIBLES AL AGUA

Guía de Drenaje Urbano Sostenible para la Macrozona Sur de Chile

## VOLUMEN II



## Ciudades sensibles al agua

### Guía de drenaje urbano sostenible para la macrozona sur de Chile

Patagua, Fundación Legado Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile  
Primera Edición 2021

Esta obra se distribuye bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0. Consulte las condiciones de la licencia en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



No se permite el uso comercial de la obra original ni de las posibles obras derivadas, cuya distribución se debe hacer con una licencia igual a la que regula la obra original.

Sobre los Autores:

Esta guía es fruto de más de un año de trabajo colaborativo por parte de un equipo multidisciplinario de profesionales de Patagua, Fundación Legado Chile y la Pontificia Universidad Católica de Chile, a través de sus unidades Centro de Desarrollo Urbano Sustentable y Magíster de Arquitectura del Paisaje. El proyecto contó con el apoyo de Corfo y Serviu Los Lagos.



**Patagua** es una empresa B dedicada a la gestión integrada del agua y el territorio, a través de asesorías especializadas y proyectos innovadores que promueven la conservación de ecosistemas y el bienestar social. Una de sus principales líneas de trabajo es la recuperación y puesta en valor de espacios de agua y naturaleza urbana.



**Fundación Legado Chile (FLC)** es una organización sin fines de lucro que crea, gestiona y articula proyectos de conservación del patrimonio natural en la región de Los Lagos para contribuir al desarrollo sostenible del país. Entre sus ámbitos de acción destacan el diseño urbano resiliente y la educación socioambiental.



El **Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS)** es un centro de investigación de la Pontificia Universidad Católica y la Universidad de Concepción, que, a través de un enfoque interdisciplinario, busca aportar a la discusión sobre los principales desafíos de sustentabilidad urbana que enfrentan las ciudades chilenas en el siglo XXI.



El **Magister de Arquitectura del Paisaje (MAPA)** es un programa académico de postgrado impartido por la Escuela de Arquitectura de la Pontificia Universidad Católica de Chile, orientado a consolidar competencias de investigación y proyecto en arquitectura del paisaje e infraestructura verde, conformado por un equipo de docentes reconocido y formado a nivel nacional e internacional.

Edición, diseño y diagramación:



**Indaga** es una consultora especializada en el desarrollo integral de estrategias, campañas y productos comunicacionales asociados a la sostenibilidad, el medio ambiente, la cultura y la ciencia.

## **EQUIPO**

### **Dirección de Proyecto**

Camila Teutsch Barros

### **Hidrología e Hidráulica**

Juan Carlos Domínguez Vilaza

Teresita Scheuch Pereira

Jorge Gironás León

### **Clima y Calidad de Agua**

Felipe Briceño Jacques

Catalina Vattuone Troncoso

### **Infraestructura Verde**

Andrés Riveros Cristoffanini

Tomás Gárate Silva

Inés Provoste Torres

Osvaldo Moreno Flores

### **Cartografía y SIG**

Javiera Carraha Molina

Francisca Riveros Cristoffanini

### **Edición, Diseño y Diagramación**

Tomás Valdivieso Sierpe

Julieta Torres Etcheberry

# Agradecimientos

Los autores agradecemos a todas las personas y organizaciones que contribuyeron en distintos momentos al desarrollo de este trabajo:

A los representantes de instituciones públicas y privadas que participaron del proceso inicial de entrevistas para contextualizar las brechas y oportunidades asociadas a la implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible en Chile en general, y en la macrozona sur en particular: Robinson Díaz (Dirección de Obras Hidráulicas, Región de Los Lagos); Sigisfredo Ojeda (Servicio de Vivienda y Urbanización, Región de Los Lagos); Álvaro Cumilef (Ilustre Municipalidad de Llanquihue); Francisco Acuña, Carolina Jara y Claudia Salazar (Ilustre Municipalidad de Valdivia); Patricio Bahamondes (MNK Inmobiliaria); y Mauricio Gárate (EBCO Inmobiliaria).

Al grupo de especialistas externos que participaron en la evaluación de funciones hidrológicas y servicios ecosistémicos de los elementos de infraestructura verde presentados en el Volumen II de esta guía: Alexis Vásquez (Departamento de Geografía, Universidad de Chile), Ángela Mimica (Facultad de Arquitectura y Artes, Universidad Austral de Chile), Bárbara Corrales (Parques Australes), Carolina Rojas (Centro de Desarrollo Urbano Sustentable CEDEUS, Pontificia Universidad Católica de Chile), Diego Urrejola (Fundación Cosmos), Flavio Sciaraffia (GeoAdaptive, Coastal Solution Fellow Cornell University), Francisco Vásquez (investigador independiente), Joaquín Aguirre (consultor independiente), Lina Castro (Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María) y María Luisa Cruzat (Consultora Mejores Prácticas).

A los profesionales que apoyaron la investigación y generación de datos: Claudia Villarroel (Oficina de Cambio climático, Dirección Meteorológica de Chile); Martín Jacques Coper (Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción; Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Concepción); Christian Segura (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Concepción); Carol Yubano e Iván Rogel (Dirección de Obras Portuarias, Región de Los Lagos); Fernando Díaz (Oficina Nacional de Emergencia); Cristián Henríquez (Centro de Desarrollo Urbano Sustentable CEDEUS, Pontificia Universidad Católica de Chile); Alberto Fernández (Patagua); Inao Vásquez (Fundación Legado Chile); y Sebastián Arteaga (estudiante de ingeniería civil, Universidad Católica de Chile).



# **CIUDADES SENSIBLES AL AGUA**

Guía de drenaje urbano sostenible para la macrozona sur de Chile

## **Volumen II**

Propuesta metodológica para la planificación, diseño e implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible

# Índice

---

## 7 Glosario

## 12 Volumen II: Propuesta metodológica para la planificación, diseño e implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible

### 18 Etapa 1: Preparación de un proyecto de drenaje urbano sostenible

- 20 1. Ruta para la preparación de un proyecto de drenaje urbano sostenible
- 25 2. Participación ciudadana
- 29 Referencias

### 30 Etapa 2: Estudio de antecedentes

- 32 1. Identificación de infraestructura verde
- 37 2. Estudio de la calidad del agua de cuerpos receptores
- 45 3. Clasificación del uso de suelos
- 52 4. Recopilación de antecedentes meteorológicos
- 55 5. Caracterización de la red de drenaje superficial
- 60 6. Caracterización de aguas subterráneas
- 63 7. Caracterización socioeconómica y urbanística
- 66 Referencias

### 67 Etapa 3: Modelación de la situación base

- 69 1. La modelación hidrológica como herramienta para la toma de decisiones, planificación urbana y gestión de aguas lluvias
- 71 2. Conceptualización del modelo
- 84 3. Calibración del modelo
- 87 4. Análisis de resultados
- 93 Referencias

### 94 Etapa 4: Diseño y evaluación de alternativas optimizadas

- 96 1. Enfoque de optimización
- 99 2. Fichas de optimización de la infraestructura verde
- 134 3. Modelación de alternativas optimizadas e iteración
- 142 4. Evaluación de proyectos DUS
- 148 Referencias

**149****Etapa 5: Diseño e implementación de obras**

|     |                                                                  |
|-----|------------------------------------------------------------------|
| 151 | 1. Plan de implementación                                        |
| 155 | 2. Procesos administrativos                                      |
| 159 | 3. Fundamentos de diseño de obras de infraestructura verde       |
| 165 | 4. Consideraciones socio-ambientales en la construcción de obras |
| 171 | Referencias                                                      |

**172****Etapa 6: Sostenibilidad de los sistemas de drenaje urbano sostenible**

|     |                                 |
|-----|---------------------------------|
| 174 | 1. Monitoreo y evaluación       |
| 179 | 2. Actividades de mantenimiento |
| 186 | 3. Prácticas para la prevención |
| 189 | 4. Financiamiento               |
| 193 | 5. Gobernanza                   |
| 196 | Referencias                     |

# Glosario

## Conceptos Clave

**Antrópico:** Adjetivo que se utiliza para designar algo hecho por, o enfocado en, el ser humano.

**Batimetría:** Estudio del relieve de un fondo lacustre o marino.

**Calidad del agua:** Conjunto de variables físicas, químicas y biológicas que pueden ser aceptables o inaceptables para cumplir con los estándares preestablecidos para un determinado uso (p. ej. agua potable, producción agrícola, generación hidroeléctrica, conservación de la biodiversidad, entre otros usos).

**Cambio climático:** Cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (CMNUCC, 1992).

**Ciudades resilientes:** Centros urbanos que cuentan con una mejor capacidad de enfrentar el impacto del cambio climático y recuperarse de sus efectos (Muñoz et al., 2019).

**Cuerpos o espacios azules:** Espacios naturales o artificiales al aire libre que cuentan con agua de manera prominente.

**Cuerpos o espacios verdes:** Espacios naturales o artificiales al aire libre que cuentan con vegetación de manera prominente.

**Cuerpos receptores:** Masas de agua, tanto de agua dulce como marinas, asociadas a la red natural de drenaje que se ven influenciadas tanto por la escorrentía originada aguas arriba, como por descargas de residuos sólidos y/o líquidos de las cuencas aportantes.

**Curva de nivel:** Líneas que en la superficie de un terreno, unen los puntos de elevación (cotas) con respecto a un plano de referencia, comúnmente, la altura media con respecto al nivel del mar.

**Drenaje Urbano Sostenible:** Conjunto de medidas, soluciones, tecnologías y técnicas usadas para manejar las aguas lluvias de una ciudad, predominantemente a partir de infraestructura verde, con el fin de replicar tan cercanamente como sea posible su sistema natural de drenaje y potenciar los servicios ecosistémicos asociados a sus espacios de agua y naturaleza.

**Eutrofización:** Proliferación de algas en un cuerpo de agua producto de un exceso de nutrientes, que trae como consecuencia la disminución del oxígeno disuelto en el agua y pone en riesgo la vida de distintas comunidades acuáticas.

**Exposición:** La presencia de personas, medios de subsistencia, servicios, infraestructura, o activos económicos, sociales o culturales en lugares que podrían verse afectados negativamente (p. ej. número de viviendas expuestas).

**Gobernanza:** Interacciones, acuerdos o mecanismos para abordar desafíos colectivos, idealmente bajo principios de participación y colaboración.

**Impactos intermedios:** Eventos potencialmente peligrosos que pueden verse influenciados por medidas o actividades sobre un sistema.

**Índice Topográfico de Humedad:** Indica el nivel de concentración de la humedad o acumulación del agua en un punto de interés. A mayor humedad, mayor es la probabilidad de saturación de los suelos.

**Infraestructura gris:** Infraestructura convencional de drenaje, orientada a la evacuación rápida de las aguas lluvias (p. ej. sumideros, colectores subterráneos, canales, etc.).

**Infraestructura verde:** Componentes del paisaje urbano capaces de cumplir funciones hidrológicas y prestar servicios ecosistémicos relevantes para favorecer la resiliencia de centros urbanos.

**Macrozona sur:** Territorio comprendido por las regiones del Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos en el sur de Chile.

**Medidas preventivas o no estructurales:** Son todas las medidas que promueven el tratamiento, la infiltración, la evaporación y la evapotranspiración del agua lluvia en el sitio donde cae, manteniendo a su vez un paisaje más natural y funcional.

**Medidas estructurales:** Son todas las medidas físicas o construcciones que reducen o evitan el riesgo asociado a las aguas lluvias.

**Modelo superficial y subterráneo acoplado:** Modelo que integra la simulación de procesos superficiales y subterráneos a través de la transferencia de información entre dos modelos (uno superficial y otro subterráneo) existentes. Al acoplarse, el modelo superficial impacta en el subterráneo y viceversa.

**Modelo Digital de Elevación (MDE):** Representación visual y matemática de los valores de altura que permite caracterizar las formas del relieve. También conocido por su acrónimo DEM, el que se desprende del concepto en inglés.

**Modelo de Simulación Continua:** Modelo que simula la transformación lluvia-escorrentía por un largo periodo de tiempo. Se dispone de una serie continua de varios eventos de precipitación.

**Modelo de Simulación por Eventos:** Modelo de transformación lluvia-escorrentía que utiliza tormentas especiales seleccionadas según periodo de retorno.

**Peligros climáticos:** Corresponden a las amenazas derivadas de la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos repentinos o tendencias climáticas paulatinas que podrían generar impactos físicos directos. Por ejemplo, eventos de precipitaciones intensas. Los peligros son influenciados por la variabilidad natural del clima y por los cambios producto de la actividad antropogénica (cambio climático).

**Periodo de retorno:** Tiempo esperado entre la ocurrencia de dos eventos (meteorológicos o hidrológicos) que superan una magnitud determinada. También se conoce como periodo de recurrencia.

**Plan Maestro de Aguas Lluvias:** Instrumento de planificación de la infraestructura para el manejo de las aguas lluvias, definiendo para ello la red primaria del sistema de evacuación y drenaje de un centro poblado.

**Precipitación base:** Corresponde a la magnitud del evento de precipitación representativo de cierto percentil de tormentas en un área (entre 70 y 90) y que suele no estar relacionada con la precipitación anual total de una zona.

**Red domiciliaria de drenaje de AALL:** Parte del sistema de gestión de las aguas lluvias que queda al interior de domicilios y pertenece a privados.

**Red natural de drenaje de AALL:** Corresponde a los cuerpos de agua que forman parte del drenaje natural de una cuenca y actúan como receptores finales.

**Red primaria de drenaje de AALL:** Corresponde a todo aquello que queda descrito en los planes maestros de aguas lluvias y que, por tanto, depende directamente del MOP a través de la DOH.

**Red secundaria de drenaje de AALL:** Todo el espacio físico por el que transitan las aguas lluvias desde que dejan la red domiciliaria hasta que ingresan a la red primaria o red natural.

**Resiliencia:** Capacidad de un sistema para recuperar su estado inicial después de haber sido perturbado.

**Riesgo climático:** Potencial ocurrencia de un desastre dada la existencia de una amenaza climática en un territorio y la presencia de personas, viviendas, infraestructura y/o ecosistemas susceptibles a sufrir impactos negativos.

**Servicios ecosistémicos:** Contribución directa e indirecta de los ecosistemas al bienestar humano (TEEB, 2010).

**Sostenible:** Adjetivo que hace alusión a la capacidad de un elemento o sistema de cumplir una función u objetivo en el tiempo, garantizando el cuidado del medio ambiente y el bienestar social.

**Volumen de captura:** Cantidad de escorrentía que se genera en la red domiciliaria y secundaria, que debe ser manejada antes de su descarga aguas abajo, con el objetivo de limitar el número de eventos que generan escorrentía.

**Vulnerabilidad:** Propensión o predisposición de aquello expuesto a ser afectado negativamente producto de la susceptibilidad del sistema al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación, (p. ej. alta superficie impermeable).

## Elementos de infraestructura verde

**Avenida parque:** Corresponden a los ejes viales públicos y privados (comúnmente contruidos de materiales impermeables) incluyendo sus calzadas, aceras, ciclovías, caminos peatonales, bandejones y todos aquellos otros elementos presentes hasta la línea oficial de edificación. Se diferencian de las calles y pasajes por poseer bandejones centrales, mayores espacios de áreas verdes y por ser elementos de carácter más continuo.

**Calles urbanas:** Corresponden a los ejes viales públicos y privados (comúnmente contruidos de materiales impermeables) incluyendo sus calzadas, aceras, ciclovías, caminos peatonales, bandejones y todos aquellos otros elementos presentes hasta la línea oficial de edificación.

**Bordes de lago:** Borde urbano de grandes extensiones de agua dulce con espejo de agua permanente.

**Espacios urbanizados:** Áreas urbanizadas con alto potencial para el manejo de aguas lluvias a nivel de escala domiciliaria.

**Estacionamientos:** Áreas públicas y privadas de gran tamaño destinadas al estacionamiento de vehículos de distinto tipo. Generalmente contruidos en su totalidad con asfalto u hormigón.

**Estero y arroyo:** Comúnmente identificados como ríos de menores dimensiones.

**Humedal urbano:** Todas aquellas extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina, cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros y que se encuentren total o parcialmente dentro del límite urbano (Ley 21.202, 2020, Artículo N°1).

**Parques o bosques urbanos:** Espacios urbanos de vasta vegetación (tanto nativa como exótica), que suelen ser utilizados con fines recreativos, culturales y como áreas de protección de la biodiversidad.

**Plazas de barrio:** Espacios de recreación comunitaria caracterizados por mantener áreas verdes con vegetación de distintos tipos e infraestructura de esparcimiento (bancas, juegos infantiles, caminos peatonales, entre otros). Su escala es menor que la de parques o bosques urbanos.

**Quebrada:** Ejes de drenaje en los que el agua fluye de manera encajonada entre montañas o lomas, dando origen a cortes en forma de "V" (Patagua, 2018).

**Redes de ferrocarriles:** Elementos de vialidad lineal sobre los cuales transitan trenes y ferrocarriles, que tienden a cruzar los centros urbanos.

**Río:** Área comprendida por los cursos de agua que fluyen sobre cauces y las riberas que los contienen.

**Rotondas:** Elementos de intersección de la trama vial de distintos tamaños en que los flujos vehiculares acceden desde distintas ramas y maniobran al interior de un anillo vial que las conecta.

## Acrónimos

**AALL:** Aguas Lluvias

**APR:** Agua Potable Rural

**BCN:** Biblioteca del Congreso Nacional de Chile

**CAC:** Comité Ambiental Comunal

**CC:** Cambio Climático

**CCME WQI:** Índice de Calidad de Agua Ambiental del Consejo de Ministros de Canadá

**CEDEUS:** Centro de Desarrollo Urbano Sustentable

**CGM:** Modelos de Circulación General de la atmósfera

**CIREN:** Centro de Información de Recursos Naturales

**CMNUCC:** Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

**CR2:** Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia

**DGA:** Dirección General de Aguas

**DIA:** Declaración de Impacto Ambiental

**DMC:** Dirección Meteorológica de Chile

**DOF:** Departamento de Obras Fluviales de la DOH

**DOH:** Dirección de Obras Hidráulicas del MOP

**DOM:** Dirección de Obras Municipales

**DUS:** Drenaje Urbano Sostenible

**EAE:** Evaluación Ambiental Estratégica

**EIA:** Estudio de Impacto Ambiental

**EPA:** Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

**ERD:** Estrategia Regional de Desarrollo

**FPA:** Fondo de Protección Ambiental del MMA

**GDB:** Geodatabase

**GOBRE:** Gobierno Regional

**IC:** Infraestructura Crítica

**ICA:** Índice de Calidad del Agua

**ICC:** Índice de Cambio Climático

**IDE:** Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile

**INE:** Instituto Nacional de Estadística

**IPCC:** Panel Intergubernamental de Cambio Climático

**IPT:** Instrumentos de Planificación Territorial

**ITH:** Índice Topográfico de Humedad

**IV:** Infraestructura Verde

**LGUC:** Ley General de Urbanismo y Construcciones

**LID:** Low Impact Development

**MDE:** Modelos Digitales de Elevación

**MIDESO:** Ministerio de Desarrollo Social

**MINVU:** Ministerio de Vivienda y Urbanismo

**MMA:** Ministerio del Medio Ambiente

**MOP:** Ministerio de Obras Públicas

**NSCA:** Norma Secundaria de Calidad del Agua

**OCDE:** Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

**ODS:** Objetivos de Desarrollo Sostenible

**OGUC:** Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones

**OMS:** Organización Mundial de la Salud

**ONEMI:** Oficina Nacional de Emergencia

**ONG:** Organización No Gubernamental

**PLADECO:** Plan de Desarrollo Comunal

**PM:** Plan Maestro de Aguas Lluvias

**PNUD:** Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

**PRC:** Plan Regulador Comunal

**PRI:** Plan Regulador Intercomunal

**PRM:** Plan Regulador Metropolitano

**PROT:** Plan Regional de Ordenamiento Territorial

**RCA:** Resolución de Calificación Ambiental

**RILES:** Residuos Industriales Líquidos

**RSH:** Registro Social de Hogares

**SAT:** Sistema de Alerta Temprana

**SCAM:** Sistema de Certificación Ambiental Comunal

**SEA:** Servicio de Evaluación Ambiental

**SEIA:** Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

**SEREMI:** Secretaría Regional Ministerial

**SERVIU:** Servicio de Vivienda y Urbanización

**SSEE:** Servicios ecosistémicos

**SUDS:** Sustainable Urban Drainage Systems

**SWMM:** Storm Water Management Model

**SII:** Servicio de Impuestos Internos

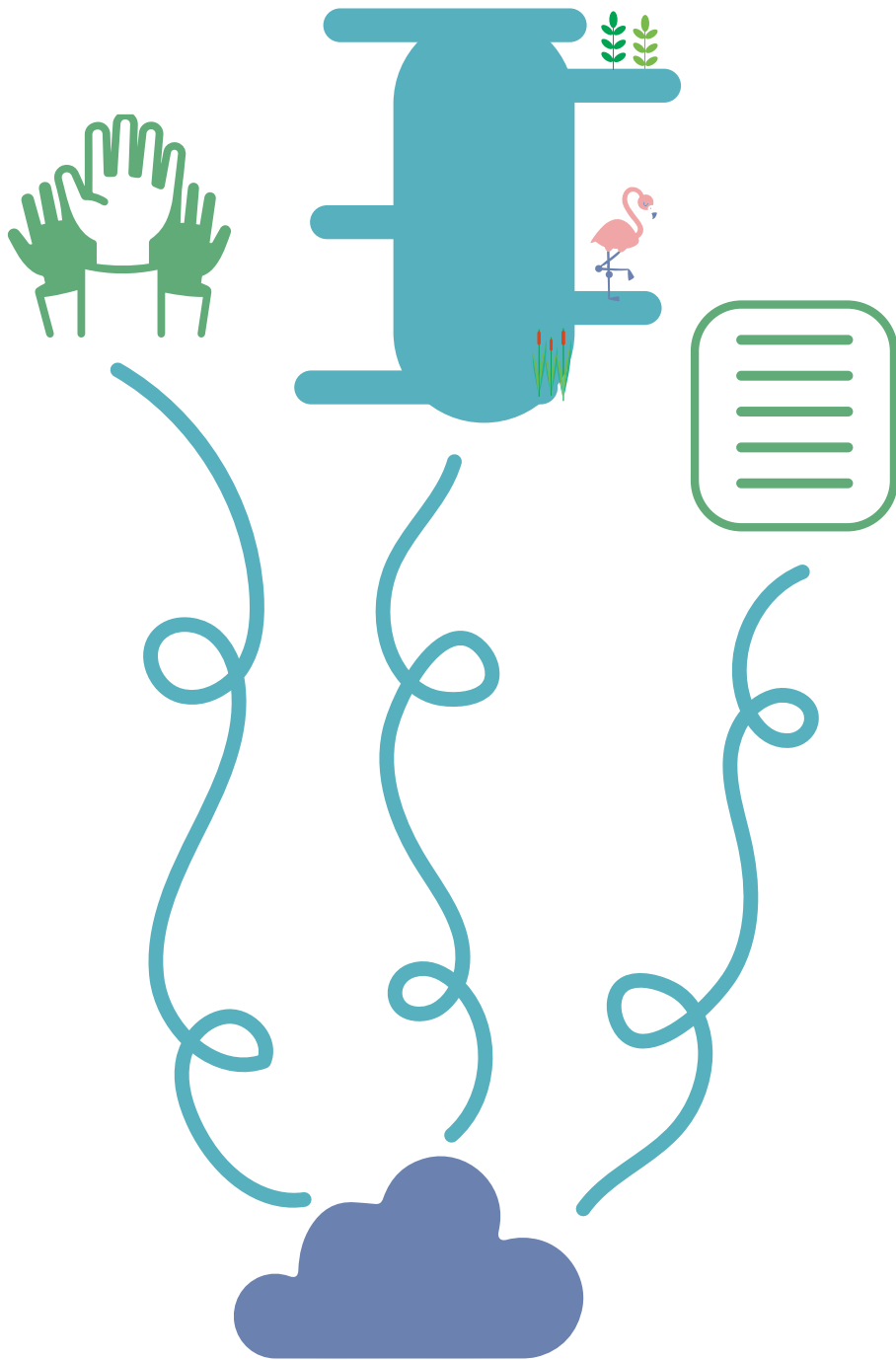
**SIG:** Sistemas de Información Geográfica

**USGS:** U.S. Geological Survey's

**VC:** Volumen de captura

**WSUD:** Water Sensitive Urban Design





## **VOLUMEN II**

### **Propuesta metodológica para la planificación, diseño e implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible**

---

## INTRODUCCIÓN

Este volumen pretende guiar el proceso de planificación, diseño, implementación, monitoreo y conservación de los proyectos drenaje urbano sostenible (DUS) basados en el uso y optimización de la infraestructura verde (IV) en contextos urbanos. Por lo mismo, su uso está enfocado en un espectro amplio de actores públicos y privados: planificadores, equipos de diseño y modelación, desarrolladores y constructores, tomadores de decisión, entre otros.

La metodología que se presenta en este volumen es específica para proyectos DUS y se basa en el principio de que los **elementos de infraestructura verde deben ser capaces de controlar siempre lluvias frecuentes, mas no necesariamente eventos de tormentas mayores. En estos últimos casos, la infraestructura verde debe ser capaz de conducir balanceada y controladamente las aguas lluvias a otros sistemas de drenaje**, como los sistemas subsuperficiales, en cuyo caso se entiende que la solución es del tipo mixta (combinación de infraestructura verde e infraestructura gris).

Los principios y guías que se presentan en este volumen se enfocan en proyectos diseñados a escala de ciudad o barrio, sin embargo, la información puede ser también utilizada en espacios menores como urbanizaciones pequeñas (p. ej. condominios) o incluso en espacios privados o públicos individuales (p. ej. casas, edificios, universidades, hospitales, centros comerciales, edificios públicos, etc.).

**La metodología que aquí se presenta se basa en el seguimiento de seis etapas:**

**1**

### Preparación



Usuarios como los Gobiernos Regionales (GORE), Subsecretarías de Desarrollo Regional (SUBDERE), Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU / SERVIU) y Ministerio de Obras Públicas (MOP) encontrarán en esta guía los principios de drenaje urbano sostenible que será deseable incluir como requisitos mínimos asociados a proyectos de inversión pública.

**2**

### Estudio de antecedentes



Etapa orientada a generar un nivel adecuado de comprensión del territorio de interés del proyecto, a través del levantamiento, sistematización y análisis de antecedentes que luego apoyarán la toma de decisiones asociadas al proceso de diseño y modelación. Se presentan herramientas que ayudarán a los usuarios a dar respuesta a, al menos, las siguientes preguntas:

- *¿Cuál es la oferta de infraestructura verde y cuál es su estado?*
- *¿Cómo es la red de drenaje superficial y subterránea de la ciudad, barrio o urbanización?*
- *¿Cómo le afectan las precipitaciones al territorio de estudio?*
- *¿Cómo afecta la escorrentía de la zona de estudio a la cuenca aguas abajo?*
- *¿Cómo se encuentran ecológicamente los cuerpos receptores de agua?*
- *¿Cuál es la realidad socioeconómica de los distintos sectores del área de interés del proyecto?*

## 3

**Modelación de la situación base**

Etapa enfocada en la modelación de la situación actual, en base a antecedentes recabados en la etapa previa. La modelación base pretende identificar zonas críticas de inundación y caracterizar el comportamiento de la ciudad, barrio o urbanización frente a tormentas de diversas magnitudes. A partir de estos resultados, se podrá iterar sobre soluciones sostenibles de drenaje en la etapa siguiente.

**Esta etapa tiene un carácter más técnico que el resto y por lo tanto se recomienda especialmente para los modeladores del equipo de trabajo.** Está enfocada en la utilización de modelos superficiales de aguas lluvias, particularmente el modelo Storm Water Management Model (SWMM); y modelos acoplados superficiales-subterráneos (SWMM y MODFLOW) para aquellos casos de estudio en que la interacción entre ambas redes cobra importancia. En esta etapa se entregarán guías sobre:

- Cómo conceptualizar el modelo con la información que ha sido levantada en la Etapa 2.
- Cómo calibrar el modelo con antecedentes hidrológicos e hidráulicos escasos.
- Cuáles son los resultados del modelo que aportan, tanto al proceso de calibración, como a la toma de decisiones.

## 4

**Elaboración, evaluación y selección de alternativas optimizadas**

Etapa altamente iterativa, orientada al diseño de alternativas optimizadas de drenaje que solucionen o prevengan los problemas de inundación y cumplan los objetivos definidos en la etapa de preparación del proyecto DUS.

Para ello, se presentan **escenarios optimizados de elementos de infraestructura verde** comunes en la macrozona sur, que ponen en valor la capacidad de los elementos de IV para:

- **Cumplir funciones hidrológicas** relevantes en la red de drenaje, como la infiltración, almacenamiento y conducción.
- **Proveer servicios ecosistémicos**, como la reducción del riesgo de inundaciones por precipitaciones extremas, depuración de aguas, provisión de hábitat y conectividad ecológica, y provisión de espacios de recreación.

Se presentan **guías para la incorporación de las características optimizadas de los elementos de IV en los modelos superficiales o acoplados, y los criterios de diseño que deben cumplir las alternativas.** Estas son construidas a través de la implementación de los escenarios optimizados de IV en diversas configuraciones sobre el área de estudio.

Esta etapa está dirigida tanto a los modeladores, quienes serán los encargados de construir alternativas factibles en el modelo de acuerdo a las condiciones de diseño, como a otros integrantes del equipo de trabajo y tomadores de decisión, cuyos conocimientos sobre las posibilidades, implicancias y consideraciones asociadas a la intervención de los espacios verdes y azules de las ciudades serán gravitantes para alcanzar soluciones adecuadas.

Finalmente, se presentarán **metodologías para la evaluación ambiental**, social y económica del caso base y de las alternativas optimizadas, con el objetivo de seleccionar aquella que será implementada.

**5****Diseño e implementación de obras**

Etapa cuyo objetivo es entregar consideraciones generales sobre los siguientes aspectos:

- El diseño de obras de los elementos de infraestructura verde.
- Los factores a considerar para la priorización de soluciones DUS.
- Los procesos administrativos a seguir para su implementación.
- Los factores ambientales y sociales a tener en cuenta antes y durante el proceso de construcción.

**6****Sostenibilidad**

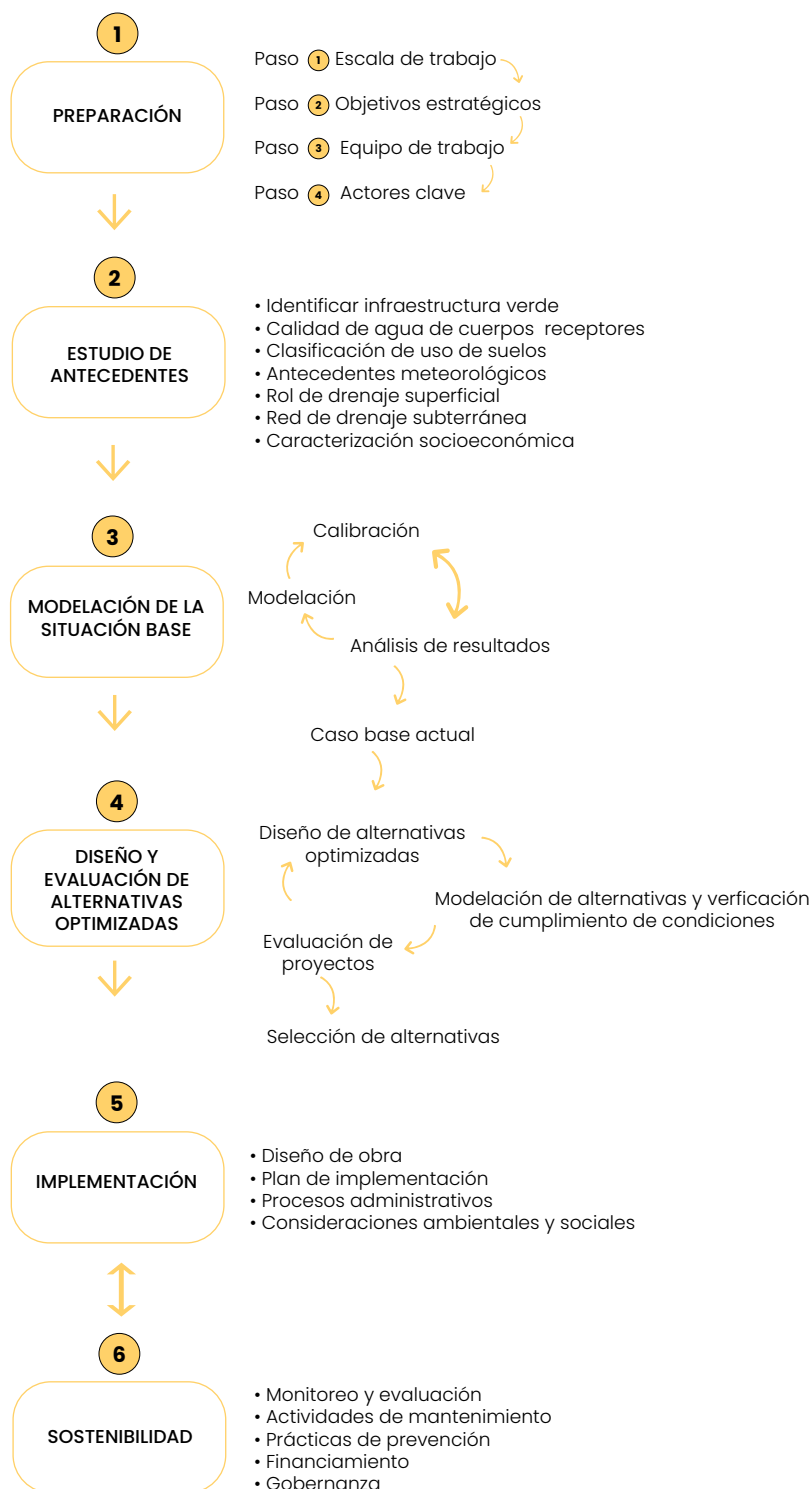
Esta etapa pretende presentar y describir las medidas y principios que permitirán que los elementos de infraestructura verde cumplan sus funciones hidrológicas y ecológicas en el tiempo. Esto se refiere particularmente a:

- Monitoreo y evaluación, incluyendo el rol que puede jugar la ciudadanía.
- Actividades de mantenimiento, incluyendo sus consideraciones técnicas y frecuencias.
- Prácticas de prevención que permitirán aumentar la vida útil de los sistemas.
- Financiamiento, sus desafíos y propuestas.
- Gobernanza.

**En el diagrama de la página siguiente se resumen las etapas y contenidos de este volumen.**

Como se puede ver, la **participación ciudadana es un eje transversal** que se diseña por etapas según el ciclo de vida de los proyectos. En la etapa de Preparación, se propone la creación de un plan de participación e involucramiento ciudadano.

Asimismo, **existen procesos que son iterativos** y dependen los unos de los otros. Por ejemplo, la sostenibilidad de los sistemas DUS dependerá del diseño de sus obras y, especialmente, del grado de consideración de la realidad social del territorio y del trabajo con la ciudadanía para su apropiación.

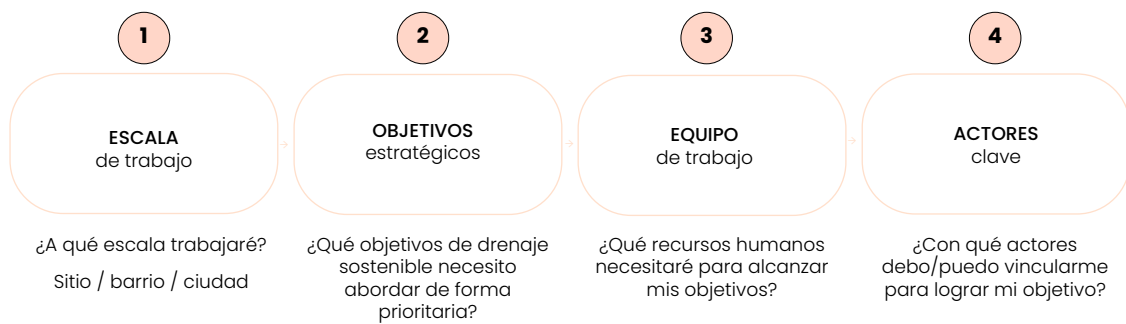




## ETAPA 1

# Preparación de un proyecto de drenaje urbano sostenible

## ETAPA 1

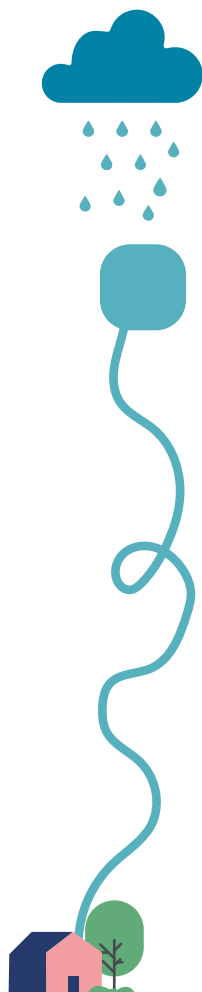




1

# Ruta para la preparación de un proyecto de drenaje urbano sostenible

---



Por su carácter integral y multidimensional, los proyectos DUS requieren ser abordados de forma metódica y planificada para llegar a buen puerto. Este capítulo sugiere una ruta crítica de cuatro pasos o definiciones clave a considerar previo al inicio del proyecto.

## 1

## ESCALA DE TRABAJO

Antes de iniciar un proyecto de drenaje sostenible es necesario **establecer claramente a qué escala se trabajará**, ya sea a escala de lote o sitio, a escala de barrio, o a escala de ciudad. En la mayoría de los casos, la escala de intervención se encuentra definida a priori por el planificador, desarrollador o mandante, sin embargo, pueden darse situaciones en las que la escala se modifique en función de los objetivos de drenaje sostenible a abordar, produciéndose una iteración entre los pasos 1 y 2.

## 2

## OBJETIVOS ESTRATÉGICOS

Para optimizar recursos y asegurar una ruta de diseño e implementación efectiva, es fundamental plantear objetivos claros de drenaje sostenible que se requieran abordar de forma prioritaria. Estos objetivos deben **responder a necesidades concretas identificadas con participación de actores relevantes, y estar alineados con instrumentos normativos y estratégicos** de escala local, regional, nacional e internacional según corresponda (para profundizar en estos instrumentos, ver Volumen I, Sección B).

Los objetivos se enmarcarán en los ámbitos de impacto del drenaje sostenible descritos en el Volumen I, Sección A:

- Reducción de riesgos climáticos. La metodología presentada en este volumen se enfocará específicamente en el **riesgo de inundaciones por precipitaciones**, no obstante, un proyecto DUS podría también plantear objetivos asociados a la reducción del riesgo de remoción en masa u otros riesgos climáticos.
- Protección de la calidad de agua de los cuerpos receptores.
- Provisión de hábitat para vida silvestre y conectividad ecológica.
- Aporte en espacio público y calidad de vida.

Se considera **deseable definir al menos un objetivo específico para cada ámbito de impacto**, con el fin de asegurar que el carácter multifuncional de las soluciones DUS sea aprovechado en todo su potencial. En este sentido, será importante **establecer cuál es el objetivo prioritario y cuáles los objetivos secundarios** de diseño. Algunos ejemplos de objetivos a plantear son:

- Controlar el volumen de captura asociado a una urbanización.
- Mitigar o prevenir las inundaciones asociadas a un período de retorno T en puntos críticos de la ciudad.
- Mejorar la calidad de agua de un humedal, río, lago, quebrada o estero receptor de aguas lluvias.
- Proveer hábitat para especies polinizadoras.
- Aumentar la superficie de áreas verdes urbanas en N metros cuadrados por habitante.

Al definir objetivos asociados a la regulación de flujos (cantidad de agua), es importante tener presente que **el drenaje urbano sostenible busca conservar la red hidrológica en su condición natural**, manteniendo sus caudales máximos, especialmente para tormentas menores. Si bien el enfoque DUS puede implementarse con una mirada preventiva (y es deseable que así sea), **es muy común que se utilice para resolver problemas de inundación urbana ya existentes**; en este último caso, será de utilidad conocer la localización, envergadura y frecuencia de las inundaciones para plantear objetivos específicos de control.

## 3

## EQUIPO DE TRABAJO

El diseño de soluciones DUS requiere de equipos multidisciplinarios, cuya composición variará dependiendo de los objetivos planteados y la escala de trabajo. El siguiente cuadro detalla los roles necesarios según escala, y presenta las áreas de formación profesional sugeridas para cumplir cada rol. Es importante tener presente que **un mismo profesional podría asumir más de un rol en el equipo** (a escala de sitio, por ejemplo, comúnmente bastará con dos profesionales para abordar los cuatro roles requeridos).

| ROL                             | FORMACIÓN PROFESIONAL                                                       | ESCALA |        |        |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
|                                 |                                                                             | SITIO  | BARRIO | CIUDAD |
| Coordinador/a general           | Ing. Civil, Ing. Recursos Naturales, Arquitecto/a                           | ●      | ●      | ●      |
| Especialista en hidrología      | Ing. Civil, Agrónomo, Ing. Recursos Naturales                               | ●      | ●      | ●      |
| Modelador/a hidráulico          | Ing. Civil                                                                  |        | ●      | ●      |
| Especialista ambiental          | Ing. Recursos Naturales, Ing. Ambiental, Biólogo/a Ambiental, Ecólogo/a     | ●      | ●      | ●      |
| Especialista en calidad de agua | Ing. Recursos Naturales, Ing. Ambiental, Biólogo/a Ambiental, Ing. Acuícola |        | ●      | ●      |
| Especialista en SIG             | Geógrafo/a, Recursos Naturales, Ing. Civil, Ing. Ambiental                  |        |        | ●      |
| Planificador/a urbano           | Arquitecto/a, Geógrafo/a,                                                   |        |        | ●      |
| Diseñador/a                     | Arquitecto/a, Arquitecto/a del Paisaje, Ecólogo/a Paisajista, Ing. Civil    | ●      | ●      | ●      |
| Participación                   | Sociólogo/a, Psicólogo/a, Trabajador/a Social                               |        | ●      | ●      |
| Comunicador                     | Periodista                                                                  |        |        | ●      |

## 4

## ACTORES CLAVE

Por último, antes de comenzar un proyecto DUS es importante contar con un **mapa de actores involucrados que describa el rol o relación de cada uno con el proyecto, y los mecanismos y estrategias de comunicación que se utilizarán en las distintas etapas**. Entre los ámbitos de relación con el proyecto, es importante considerar elementos como capacidades técnicas, permisos sectoriales, visión estratégica, y financiamiento. En cuanto a la comunicación, dependiendo de los grupos de interés y necesidades del proyecto, podrán adoptarse estrategias masivas (a través de canales como prensa y redes sociales), o de nicho (incluyendo mecanismos como reuniones bilaterales o multilaterales).

La siguiente tabla presenta una matriz tipo para construir el mapa de actores, considerando un listado referencial de actores clave para este tipo de proyectos. Cabe destacar que este listado podrá variar dependiendo de la escala de trabajo, los objetivos del proyecto, los elementos de infraestructura verde involucrados y la figura de tenencia de la tierra que aplique a cada caso.

| Actores clave               | Rol vinculación con el proyecto |                               |               | Mecanismos de estrategias de comunicación |                               |               |
|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------------------|-------------------------------|---------------|
|                             | Planificación y diseño          | Implementación y construcción | Mantenimiento | Planificación y diseño                    | Implementación y construcción | Mantenimiento |
| 1. GORE                     |                                 |                               |               |                                           |                               |               |
| 2. MOP                      |                                 |                               |               |                                           |                               |               |
| 3. MINVU                    |                                 |                               |               |                                           |                               |               |
| 4. MMA                      |                                 |                               |               |                                           |                               |               |
| 5. Otros Ministerios        |                                 |                               |               |                                           |                               |               |
| 6. Municipalidad            |                                 |                               |               |                                           |                               |               |
| 7. Desarrolladores privados |                                 |                               |               |                                           |                               |               |
| 8. Empresas                 |                                 |                               |               |                                           |                               |               |
| 9. ONG                      |                                 |                               |               |                                           |                               |               |
| 10. Consultores             |                                 |                               |               |                                           |                               |               |
| 11. Comunidad               |                                 |                               |               |                                           |                               |               |
| 12. Otros                   |                                 |                               |               |                                           |                               |               |

## Relación de actores clave con proyectos DUS

A continuación se presentan algunos actores relevantes y su ámbito de vinculación con proyectos DUS. Tanto el listado como la descripción de dichos actores no pretende ser exhaustiva, sino más bien dar cuenta de la diversidad del espectro.

- **Gobiernos Regionales (GORE):** Elaboran estrategias de desarrollo regional y otros documentos de planificación estratégica en los que pueden enmarcarse las intervenciones de drenaje sostenible. Disponen de distintas líneas de financiamiento que pueden aplicar a estos proyectos dependiendo de su escala, tales como el Fondo Regional de Inversión Local (FRIL) y el Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR).
- **Ministerio de Obras Públicas (MOP):** Responsable de la elaboración de planes maestros de aguas lluvias a través de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), incluyendo el diseño, ejecución y mantenimiento de las obras que contemplan. También está a cargo de la otorgación de permisos para intervenciones sobre cauces naturales a través de la Dirección General de Aguas (DGA). Otras divisiones del MOP, como las Direcciones de Vialidad y de Obras Portuarias, podrán vincularse con proyectos DUS dependiendo de sus alcances.
- **Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU):** A través del Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU), está a cargo de las labores de diseño, construcción y mantenimiento de proyectos de aguas lluvias a escala de red secundaria. El mismo servicio se encarga también de otorgar permisos para la ejecución de proyectos privados a esta escala. Por otro lado, el MINVU cuenta con programas en los que podrían enmarcarse proyectos DUS, tales como el Programa de Recuperación de Barrios (Quiero Mi Barrio) y los Programas de Construcción y Conservación de Parques Urbanos.
- **Ministerio de Medio Ambiente (MMA):** Elabora las normas secundarias de calidad de agua que deberán ser consideradas en el diseño de soluciones DUS cuando corresponda. Facilita Mesas Provinciales de Humedales en diversos territorios, cuyos integrantes podrán ser involucrados en las instancias de participación. Dispone de una pequeña línea de financiamiento, el Fondo de Protección Ambiental (FPA), que podría apoyar la implementación de soluciones DUS a nivel comunitario.
- **Municipalidades:** Los gobiernos locales, a través de los Planes Reguladores Comunes (PRC), definen los lineamientos de planificación urbana en los que se enmarcarán los proyectos DUS a escala de barrio o ciudad. Además, administran los bienes nacionales de uso público, categoría que tienen elementos de la red natural de drenaje. Las Direcciones de Obras Municipales fiscalizan el cumplimiento de regulaciones contenidas en la LGUC y la OGUC respecto a la red domiciliar y secundaria. Pueden financiar (o canalizar financiamiento) para la realización de proyectos DUS. En la actualidad, son los principales encargados de la mantención y evaluación de los espacios verdes y azules de las ciudades.

- **Desarrolladores privados:** Los desarrolladores inmobiliarios podrán ser impulsores de proyectos DUS, principalmente a nivel de red domiciliaria y, en algunos casos, secundaria. Para planes y proyectos a escala de ciudad, impulsados desde el sector público, será relevante involucrar a este segmento en una etapa temprana y propender a la generación de alianzas público-privadas que faciliten su implementación y mantenimiento.
- **Comunidad:** Las comunidades locales serán siempre actores clave en proyectos DUS a escala de barrio o ciudad, ya que son quienes mejor conocen las funciones sociales, culturales y, en ocasiones, ambientales, de sus respectivos territorios. Sus visiones, intereses, aprensiones, expectativas y saberes deberán ser considerados en una etapa temprana y a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto, con el fin de mantener con ellas una relación de colaboración y diálogo.
- **Otros actores:** Existen organizaciones, individuos y seres vivos que se relacionan con los proyectos DUS, dependiendo de sus características particulares. Por ejemplo:
  - Para proyectos que involucren vías de ferrocarril, la **Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE)** será un actor clave.
  - En zonas dotadas de redes unitarias, que evacúan simultáneamente aguas lluvias y aguas servidas, será relevante involucrar a las **empresas sanitarias**.
  - Las **Organizaciones No Gubernamentales (ONG)** pueden también ser parte de estos proyectos, así como **empresas locales** de diversa índole.
  - En algunos casos, puede ser de interés individualizar al **medio ambiente** como un actor relevante, con el fin de asegurar que sus intereses sean adecuadamente ponderados y resguardados a lo largo del proyecto.

## 2

# Participación ciudadana

---



A lo largo del Volumen II de esta guía, este ícono permitirá identificar procesos específicos del proyecto en que la participación de la comunidad es particularmente útil, por lo que debiese ser promovida. Así también, acciones ciudadanas de interés.

En cada proyecto existe una comunidad que puede verse afectada y/o beneficiada por los impactos de los proyectos en las distintas etapas de su ciclo de vida, desde los estudios preliminares hasta su operación y abandono. **La opinión de la comunidad es gravitante en el éxito de los proyectos públicos y privados de desarrollo**, así como el nivel de conocimiento de los desarrolladores sobre el territorio a intervenir, incluyendo sus comunidades, intereses, actividades, sueños, aprensiones y problemas. Las intervenciones deben **promover un involucramiento activo y temprano de la comunidad**, lo que aportará al desarrollo de proyectos con un mayor grado de apropiación social y, por tanto, más sostenibles en el tiempo.

Asimismo, la ciudadanía tiene derechos constitucionales y legales que deben ser protegidos en todo momento, entre ellos, la Ley 20.500 consagra el **derecho de las personas de participar en las políticas, planes, programas y acciones efectuadas por los distintos órganos del estado**, regulando aspectos como la participación ciudadana en la gestión pública, especialmente en temáticas relativas al derecho de participación, materias de interés ciudadano y publicidad de información.

### Participación de Pueblos Indígenas

El Convenio N°169 OIT Sobre Pueblos Indígenas y Tribales en Países Independientes promulgado en Chile por el Decreto Supremo N°236 del Ministerio de Relaciones Exteriores, consagra el **derecho de consulta de los pueblos indígenas en Chile**. Esta consulta debe implementarse bajo, al menos, los siguientes principios generales: (1) efectuarse de buena fe, (2) ser desarrollada e inspirada con la finalidad de llegar a un acuerdo, (3) la participación debe ser libre e informada, y (4) todas las partes deben buscar el diálogo en una atmósfera de respeto mutuo y de participación. El Decreto Supremo N°66 del Ministerio de Desarrollo Social regula la implementación de la consulta a los pueblos indígenas consagrada según el Convenio y define, entre otros temas, qué medidas deben ser consultadas por el Estado de manera obligatoria y cuáles son los mecanismos a través de los cuales los pueblos pueden solicitar el inicio de una consulta.

En el caso de la macrozona sur, donde existe una presencia importante de personas del pueblo mapuche, es particularmente relevante involucrarlos y considerar el rol de los espacios de agua y naturaleza en su cosmovisión. Tener una comunicación activa y efectiva con ellos es clave para responder oportunamente a sus solicitudes y para facilitar las iniciativas que de ellos puedan surgir. Las rogativas, por ejemplo, son ceremonias de gran valor espiritual y religioso que pueden implementarse al inicio de las obras y que permiten poner en valor el lugar que se interviene. Siempre que estas ceremonias sean propuestas por la misma comunidad y se desarrollen en sus propios términos, pueden convertirse en instancias tremendamente valiosas y enriquecedoras.

Con el objetivo de lograr una adecuada articulación con la comunidad a lo largo de las distintas etapas del proyecto, **se recomienda elaborar un plan de participación e involucramiento ciudadano que responda a los principios de inclusión, transparencia y flexibilidad**. Se recomienda revisar los siguientes manuales para guiar su elaboración y conocer buenas prácticas asociadas:

- “Guía para la gestión de participación ciudadana” (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2017)
- “Selección de buenas prácticas de participación ciudadana” (Ministerio de Vivienda y Urbanismo [MINVU], 2018)
- “The Public Participation Manual: shaping the future together” (Arbter et al., 2007)

Dos aspectos clave en la elaboración de un plan de participación ciudadana en el marco de proyectos DUS son la **definición de los niveles de participación y la selección de técnicas y metodologías de involucramiento** según etapa de su ciclo de vida: (1) Preparación, (2) Estudio de antecedentes, (3) Modelación de la situación base, (4) Diseño y evaluación de alternativas optimizadas, (5) Implementación de obras, y (6) Sostenibilidad.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Notar que estas etapas pueden diferir de acuerdo a los mecanismos de gestión de cada organismo. Por ejemplo, las etapas del ciclo de vida de los proyectos de infraestructura del MOP, declarados en su guía para la gestión ciudadana (MOP, 2017) son: idea y perfil, prefactibilidad y factibilidad, diseño, ejecución y conservación, operación/explotación y seguimiento y monitoreo.

## Niveles de participación

Los niveles de participación se diferencian en el grado de involucramiento e influencia de la sociedad civil. Destacan los siguientes (adaptado de MOP, 2017):



**Nivel informativo:** Grado básico de involucramiento. Pretende que los actores, particularmente la ciudadanía, conozcan los antecedentes de los proyectos y cualquier información que les competa. Debe ser siempre utilizado como un piso de transparencia base para el resto de los niveles, pues es necesario promover opiniones y decisiones informadas. Sin embargo, en la mayoría de los casos el nivel informativo no es suficiente por sí mismo, e incluso algunos autores no lo reconocen como participación real.



**Nivel Consultivo:** La ciudadanía participa dando su opinión, haciendo aportes a los temas que se tratan y proponiendo iniciativas; mientras que los organismos responsables (públicos o privados) definen en qué grado y forma tomarán en consideración esas opiniones y las analizan en sus diversas dimensiones (ambiental, técnica, normativa, económica y social). En la mayoría de los casos, la consulta tiene un carácter no vinculante, aunque podría serlo.



**Habilitación comunitaria:** La ciudadanía participa de las definiciones y de la toma de decisiones de forma vinculante. La comunidad adquiere diversas destrezas y capacidades, fortalece sus espacios y organizaciones, y actúa con sentido de identidad propio. El fortalecimiento de las organizaciones civiles y el trabajo en redes facilita una acción eficiente orientada al cumplimiento de metas.

## Herramientas y técnicas para la participación en proyectos DUS

- **Encuestas:** La aplicación de encuestas, ya sea presenciales o en línea, permitirá recoger información relevante desde la comunidad a nivel masivo, con el fin de orientar la toma de decisiones en las distintas etapas del proyecto.  
Algunos ejemplos de temáticas a abordar a través de este instrumento son: la percepción respecto a valores naturales o culturales que es de interés resguardar con la intervención; los usos actuales y potenciales que se reconocen para la infraestructura verde involucrada en la intervención; la percepción respecto a potenciales externalidades negativas asociadas a la intervención; la disposición a participar en procesos de diseño participativo; la disposición a involucrarse activamente en los procesos de implementación y mantenimiento de la infraestructura; entre otros.
- **Entrevistas:** Conversaciones guiadas a través de una pauta previamente elaborada, mediante la cual se espera conocer las ideas y percepciones que tienen las distintas personas u organizaciones dentro del proceso participativo. Este mecanismo pretende conocer posiciones o estudiar el nivel de conocimiento de las personas sobre algún tema en particular.
- **Asambleas:** Actividades comunitarias abiertas de amplio alcance que se convocan para dar a conocer o presentar un tema previamente planificado, y promover el diálogo. Se recomienda impulsar dinámicas que propicien ambientes gratos y participativos. Generalmente, su estructura involucra una apertura en que se expone la temática, un espacio de consultas sobre esa exposición, un desarrollo en el que participan en mayor o menor medida los asistentes, y una síntesis de las conclusiones del diálogo. Se recomienda finalizar estas asambleas con la definición de un canal de comunicación futuro.
- **Grupos focales:** Los grupos focales permiten recoger información comunitaria relevante, incluyendo saberes locales, percepciones respecto a amenazas y oportunidades, e intereses, motivaciones y aprensiones de la comunidad. La metodología consiste en entrevistas grupales (típicamente dirigidas a grupos de entre 4 y 10 personas), en las que se busca promover la interacción entre participantes como estrategia para generar información y profundizar en ella. Es importante conformar los grupos focales bajo criterios de representatividad, inclusión y equidad.
- **Redes sociales:** Será de interés difundir objetivos, lineamientos e hitos centrales del proyecto a través de redes sociales para llegar a un mayor número de personas de la comunidad. A través de gráficas e infografías, podrán comunicarse de mejor manera los conceptos detrás de la intervención, así como los principales resultados esperados. De este modo, se cumple también una función de educación y sensibilización comunitaria.



- **Mapeo colaborativo:** Al igual que los grupos focales, la estrategia de mapeo colaborativo permite levantar información comunitaria de diversa índole, con la diferencia de que en este caso se busca que la información tenga una representación espacial. Los mapeos pueden realizarse de forma análoga, a través de talleres diseñados especialmente para estos fines, o bien 'al paso', en puntos estratégicos de la ciudad o barrio con alta afluencia de personas; en ambos casos se utilizan mapas de gran tamaño, en los que se registra in situ la información levantada. También pueden realizarse de forma digital, a través de herramientas web como Humedales Urbanos Plataforma Interactiva ([www.humedalesurbanos.com](http://www.humedalesurbanos.com)), quedando la información sistematizada y disponible para todo el que la requiera.
- **Prensa y radio:** Al igual que con las redes sociales, la comunicación a través de medios locales de prensa y radio permitirá llegar a una mayor proporción de personas interesadas; para comunicar lineamientos, conceptos, hitos y resultados esperados, informando y sensibilizando a la comunidad respecto al proyecto, sus beneficios y limitaciones.

En la siguiente tabla se presentan los **propósitos de la participación ciudadana** según etapa de los proyectos DUS. Se sugieren niveles de participación y herramientas de involucramiento de acuerdo a las descripciones antes mencionadas.

| Etapa                                                           | Propósito de la participación ciudadana                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Herramientas útiles                                                                                                                                       | Nivel de participación                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1</b><br><br>Preparación                                     | Identificar a los grupos clave de la sociedad civil.<br>Establecer los primeros acercamientos informando a la ciudadanía sobre el proyecto.<br>Definir los medios de convocatoria y deliberar conjuntamente sobre los canales de comunicación que se mantendrán a lo largo del ciclo de vida del proyecto.                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Entrevistas</li> <li>Grupos focales</li> <li>Redes sociales</li> <li>Prensa y radio</li> </ul>                     | Informativa y de habilitación comunitaria<br><br>               |
| <b>2</b><br><br>Estudio de antecedentes                         | Comprender el territorio y su entorno social y ambiental para identificar necesidades y requerimientos.<br>Levantar información que será clave en el proceso de modelación del caso base y las alternativas optimizadas.                                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Asambleas</li> <li>Encuestas</li> <li>Entrevistas</li> <li>Mapeos colaborativos</li> <li>Grupos focales</li> </ul> | Consultiva<br><br>                                            |
| <b>3</b><br><br>Modelación de la situación base                 | Levantar información cualitativa que permita aprovechar el conocimiento de los vecinos y vecinas sobre los espacios que habitan para calibrar el modelo y asegurar una representación realista del caso base.                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>Entrevistas</li> </ul>                                                                                             | Consultiva<br><br>                                            |
| <b>4</b><br><br>Diseño y evaluación de alternativas optimizadas | Levantar información que apoye la toma de decisiones del modelador en la construcción de alternativas optimizadas.<br>Dar cuenta a la ciudadanía de cómo sus aportes y observaciones a lo largo del proceso han sido acogidos en el diseño, evaluación y selección de las alternativas optimizadas.                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Asambleas</li> <li>Entrevistas</li> <li>Encuestas</li> <li>Grupos focales</li> </ul>                               | Consultiva e informativa<br><br>                              |
| <b>5</b><br><br>Implementación                                  | Co-diseñar el detalle de los elementos de IV optimizados.<br>Deliberar conjuntamente sobre las medidas de prevención y mitigación de perturbaciones durante el proceso de construcción.<br>Mantener medios de comunicación permanentes que permitan canalizar la denuncia de problemas que no pudieron ser previstos para darles solución. | <ul style="list-style-type: none"> <li>Grupos focales</li> <li>Entrevistas</li> <li>Prensa y radio</li> <li>Redes sociales</li> </ul>                     | Informativa, consultiva y de habilitación comunitaria<br><br> |
| <b>6</b><br><br>Sostenibilidad                                  | Extender y facilitar el proceso de monitoreo y conservación de los elementos de infraestructura verde y sus componentes.<br>Definir conjuntamente estrategias de prevención ciudadana para extender el ciclo de vida de las obras y proteger los cuerpos receptores de aguas.                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>Asambleas</li> <li>Mapeos colaborativos</li> <li>Redes sociales</li> </ul>                                         | Habilitación comunitaria<br><br>                              |

## REFERENCIAS:

Arbter, K., Handler, M., Purker, E., Tappeiner, G., & Trattnigg, R. (2007). The public participation manual: Shaping the Future Together. ÖGUT (Austrian Society for Environment and Technology), Vienna.

Ministerio de Obras Públicas. (2017). *Guía para la Gestión de Participación Ciudadana*. Santiago: Dirección General de Obras Públicas.

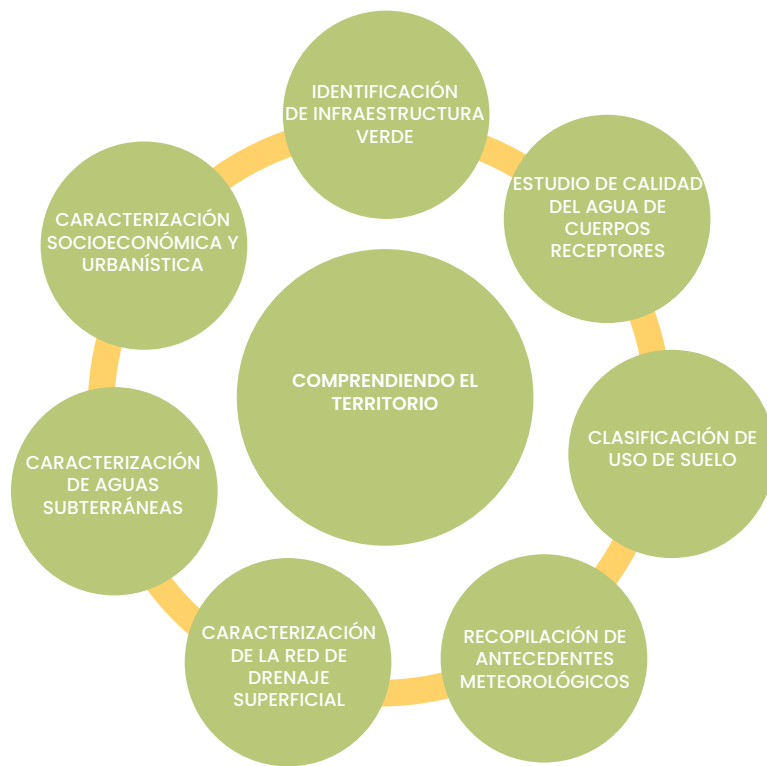
Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2018). Selección de *Buenas Prácticas de Participación Ciudadana: Sector vivienda y urbanismo*. Santiago: Oficina de Participación Ciudadana.



## ETAPA 2

# Estudio de antecedentes

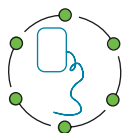
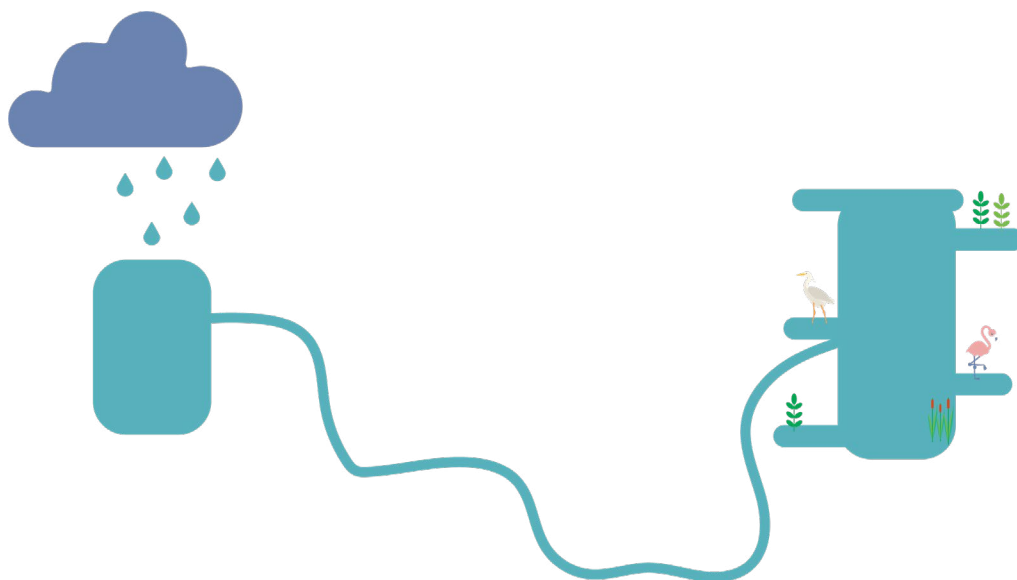
## Comprendiendo el territorio



## 1

# Identificación de infraestructura verde

---



La infraestructura verde (IV), entendida como **soluciones basadas en la naturaleza que aportan a la sustentabilidad y eficiencia de las ciudades gracias a las múltiples funciones hidrológicas y servicios ecosistémicos que proveen**, son el soporte central para los sistemas de drenaje urbano sostenible (DUS) en los que se enfoca esta guía. Como se revisó en el Volumen I, la IV abarca una amplia diversidad de elementos, que pueden observarse con múltiples variantes en términos de forma, tamaño y tipología dentro de la ciudad; por lo que **será fundamental realizar un proceso detallado que permita identificarlos y caracterizarlos previo a la planificación y diseño de proyectos DUS**.

# ¿Cómo se identifica la infraestructura verde en una ciudad o territorio?

La identificación de IV puede abordarse a través de distintos métodos, herramientas, y fuentes de información, dependiendo de la escala de trabajo y los recursos disponibles. Típicamente, se realiza primero una **recopilación y sistematización de información disponible**, seguida por un proceso de **verificación en terreno**. Posteriormente, toda la información levantada es integrada en un **Sistema de Información Geográfica (SIG)**, idealmente en formato poligonal.



## 1 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES

Los antecedentes territoriales pueden encontrarse en fuentes gratuitas y oficiales como las que provee el Estado y en fuentes privadas como CEDEUS. Todas ellas pueden ser útiles para un primer acercamiento al territorio y permiten descargar archivos en formato *shapefile* para posteriormente integrarlos a un SIG. La siguiente tabla presenta fuentes oficiales según tipo de información.

| Información Espacial                                                                                                                                        | Fuente                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Información hidrológica:</b> red hidrográfica, cuencas, canales, lagos, lagunas, hielos y calidad de agua.                                               | IDE Chile, Ministerio de Bienes Nacionales, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN) |
| <b>Información vegetacional:</b> catastros de usos de suelo y vegetación, pisos vegetacionales según Leubert y Pliscoff, formaciones vegetacionales Gajardo | IDE Chile, Ministerio de Bienes Nacionales                                                  |
| Catastro de <b>humedales urbanos</b>                                                                                                                        | Ministerio de Medio Ambiente (MMA)                                                          |
| <b>Zonificación</b> de instrumentos de planificación territorial (PRC, PRI, PRM, PROT)                                                                      | IDE Chile, Ministerio de Bienes Nacionales                                                  |
| <b>Parques urbanos</b>                                                                                                                                      | Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN)                                             |
| <b>Infraestructura vial:</b> red vial, caminos, carreteras, ciclovías, puentes, caletas, entre otros.                                                       | IDE Chile, Ministerio de Bienes Nacionales                                                  |
| <b>Infraestructura:</b> edificación pública, infraestructura portuaria, recursos hídricos, planes regionales de infraestructura, entre otros.               | Ministerio de Obras Públicas (MOP)                                                          |
| <b>Caracterización predial:</b> predios de recintos educacionales, ejes comerciales, sitios eriazos, áreas verdes, de salud y privadas.                     | Servicio de Impuestos Internos (SII)                                                        |
| <b>Modelos Digitales de Elevación (MDE)</b> y/o imágenes satelitales multiespectrales*                                                                      | Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS)                                                 |

\*Respecto MDE que proveen información topográfica, para Chile se recomienda el satélite *ALOS PALSAR*, que posee una resolución de 12,5 metros por píxel. En el caso de imágenes satelitales multiespectrales, se recomienda utilizar los satélites *Landsat* o *Sentinel*, que cubren el territorio nacional de manera periódica con una resolución de 15 y 10 metros por píxel, respectivamente.

## 2

### VERIFICACIÓN EN TERRENO

Una vez recopilada la información disponible del área de interés, es importante que esta se valide y se correlacione directamente con el territorio. Para esto, lo ideal es que pueda realizarse un levantamiento de información en terreno para confirmar los elementos de IV identificados y catastrar aquellos que no se encontraron en las fuentes disponibles de datos espaciales.

Esta verificación puede ser apoyada y complementada con las herramientas *Google Earth* y *Google Street View*, que permiten segmentar el área de estudio en polígonos para así orientar, ordenar y facilitar la validación en terreno. Además, permiten corroborar aquellos elementos más evidentes, como parques urbanos, plazas de barrio, humedales, entre otros, debido a la buena resolución que proporciona.

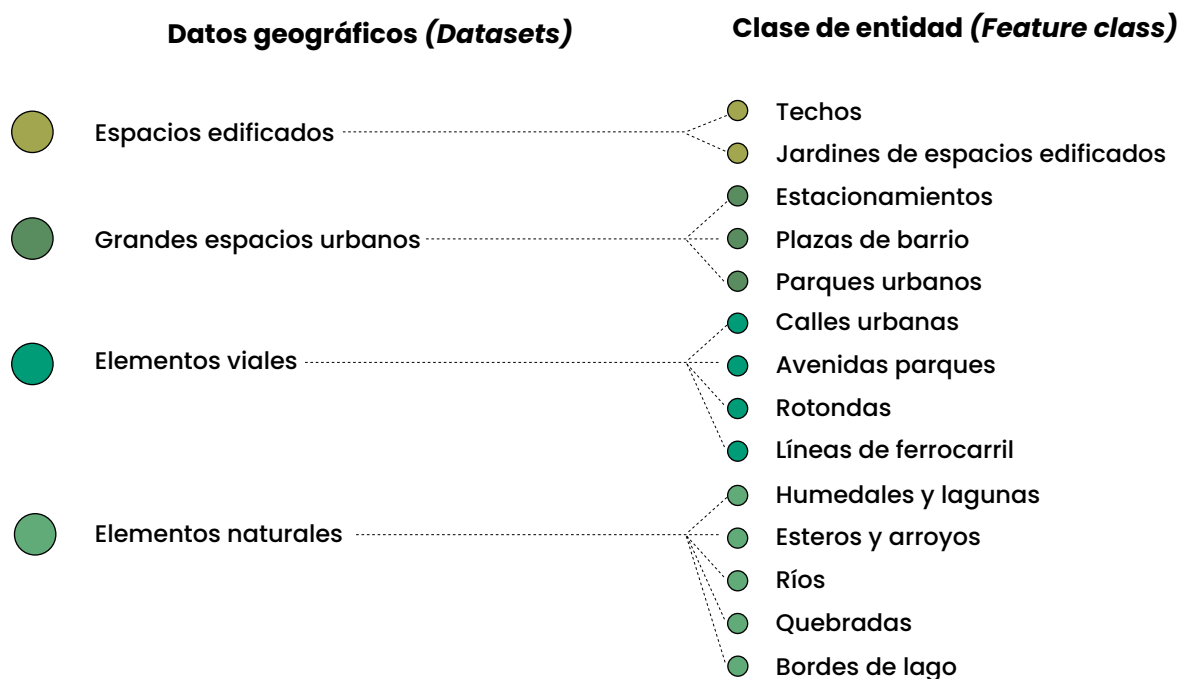
Por otra parte, es importante que la información espacial levantada se cruce con la zonificación del instrumento de planificación territorial normativo que corresponda según la escala del área de interés (comunal, intercomunal, metropolitana o regional), ya que estos orientan y regulan los usos permitidos y restringidos del territorio. De esta forma, es posible identificar -de los elementos catastrados- aquellos que pueden mejorarse para que sean adaptados a un DUS.

## 3

### INTEGRACIÓN VÍA SIG

Una vez validada la información espacial obtenida y catastrados aquellos elementos de IV faltantes, deben integrarse a un SIG. Para ello, se debe utilizar un software como *QGis* o *ArcGis*, en el cual se podrá desplegar, visualizar, ordenar y editar dicha información.

Para organizar la información recopilada se recomienda construir una *geodatabase* (GDB), que corresponde a una colección de datos geográficos (*datasets*) de diversos tipos (puntos, líneas, polígonos y tablas de atributos), contenida en una "carpeta" de sistema común. Así, la GDB permite el almacenamiento centralizado de información y de los elementos geográficos, incluyendo los atributos y el comportamiento de cada objeto.



Se recomienda utilizar tipos de datos que permitan visualizar, con el mayor detalle posible, los elementos de IV catastrados. Esto facilitará el trabajo de modelación posterior.

## Caracterización de la infraestructura verde

Cuando se realice la validación y catastro en terreno de la IV, es importante conocer el estado en que se encuentra, identificando las ventajas y desventajas que presenta para el DUS. Así, las soluciones podrán orientarse a potenciar los elementos para el DUS. Además, la caracterización de la IV servirá como insumo para el posterior desarrollo del modelo hidráulico y la toma de decisiones en el diseño urbano de IV.

A continuación, se listan aquellos aspectos relevantes a considerar una vez que se realice el catastro de la IV:

- **Vegetación:**  
Describir la vegetación presente en el lugar en términos de composición, especies dominantes, densidad y origen (nativa, endémica o introducida).
- **Amenazas:**  
Reconocer las presiones antrópicas o naturales que puedan estar perturbando negativamente la salud del ecosistema, como por ejemplo, presencia de especies de flora invasora (como loto y zarzamora), presencia de animales domésticos o silvestres invasores, rellenos o modificaciones de cauces, presencia de basura domiciliaria y/o escombros, contaminación puntual o difusa de aguas, caza de fauna silvestre y tala de arbolada, entre otras.
- **Suelo:**  
Identificar las zonas impermeables y permeables del lugar, reconocer escorrentías, sectores erosionados y topografía.
- **Equipamiento:**  
Describir qué tipos de equipamientos existen en el lugar, tales como bancas, juegos para niños, máquinas de ejercicio, veredas, iluminación, infraestructura patrimonial, entre otros.
- **Movilidad:**  
Identificar accesos y flujos, senderos aledaños o interiores, caminos formales e informales, ensanches proyectados, ciclovías, etc.
- **Usuarios:**  
Reconocer el tipo de usuarios que hacen uso del lugar y el tipo de actividades que desarrollan en él, identificar actores relevantes, actividades comerciales, etc.

El nivel de detalle puede variar según la escala del área de interés y los alcances que se definan. Sin embargo, entre más información disponible exista para conceptualizar el modelo hidráulico de drenaje del área de estudio, menor será la incertidumbre y mayor la precisión. Asimismo, contar con información más completa facilita el proceso de diseño de los elementos de IV en concordancia con las condiciones del territorio.

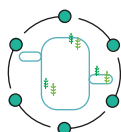
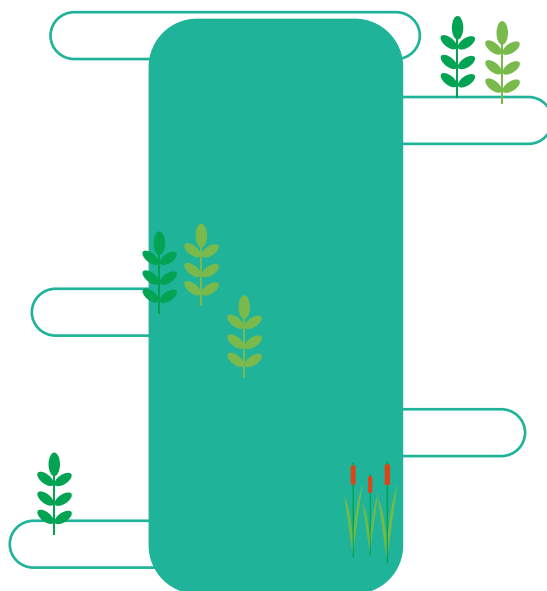




## 2

## Estudio de la calidad del agua de cuerpos receptores

---



En un contexto de drenaje urbano, el estudio de calidad del agua permite caracterizar un cuerpo de agua receptor en términos de sus variables físicas, químicas y biológicas. A partir de los cambios de estas variables, es posible identificar los riesgos de contaminación de estos cuerpos originados por aguas residuales domiciliarias e industriales. En este capítulo, se revisan los principales aspectos técnicos para la implementación de un programa de monitoreo de cuerpos de aguas basado en un índice de calidad de agua.



## ¿Qué es la calidad de agua?

Se entiende por **calidad de agua** a un conjunto de variables físicas, químicas y biológicas que pueden ser aceptables o inaceptables para cumplir con los estándares preestablecidos para un determinado uso (p. ej. agua potable, producción agrícola, generación hidroeléctrica, conservación de la biodiversidad, entre otros). De esta forma, el concepto de calidad de agua dependerá del uso de un cuerpo hídrico y se deberán utilizar diferentes criterios de evaluación. Si el agua no cumple con una norma específica, ésta debe ser tratada o no considerada para el uso deseado (Parra et al., 2013).

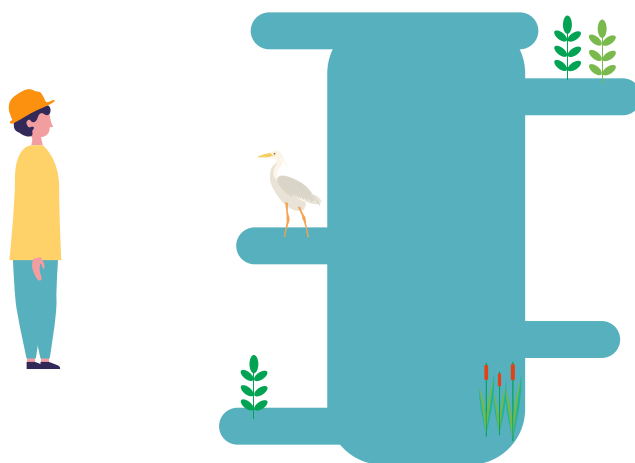
**En el caso del drenaje urbano, la calidad de agua se estudia para evaluar los cambios de las variables físicas, químicas y biológicas relacionadas con la contaminación de cuerpos receptores causada por aguas residuales de origen domiciliario, industrial, agrícola y urbano.**

Para efectos de esta guía, se entiende como **cuerpos receptores** a aquellas masas de agua, tanto de agua dulce como marinas, asociadas a la red natural de drenaje e influenciadas por la escorrentía originada aguas arriba, así como por descargas de residuos sólidos y/o líquidos de las cuencas aportantes. Las aguas residuales urbanas pueden contaminar los cuerpos receptores de forma superficial y/o subterránea. **La escorrentía de AALL es capaz de movilizar una variedad de contaminantes hacia cuerpos receptores, por medio del lavado de calles y superficies impermeables en general.** Este riesgo varía en función de la temporada de lluvia, siendo su inicio la que genera un mayor impacto, sobre todo durante las primeras horas (proceso también conocido como *first-flush* o primer lavado). Además, las escorrentías de AALL pueden causar el colapso del sistema de alcantarillado, aumentando el riesgo de mezcla con aguas residuales que tienen alta carga de contaminantes, y que finalmente ejercen una fuerte presión sobre la calidad de agua de los cuerpos receptores.

Estudios internacionales han indicado que las lluvias fuertes son capaces de incrementar el riesgo a la salud humana por agentes patógenos presentes en aguas residuales (p. ej. enfermedades gastrointestinales por exposición de fecas humanas y animales) (Olds et al., 2018). Se evidencia también la alteración de ecosistemas acuáticos por la contaminación originada por sistemas de drenaje urbano.

## ¿Cómo se estudia la calidad del agua?

En términos generales, **un programa de monitoreo de calidad de agua se basa en la medición de largo plazo y frecuencia establecida de parámetros físicos, químicos y biológicos determinados**, siguiendo metodologías estandarizadas para uno o varios cuerpos de agua y para una o varias áreas de interés. Dentro de un programa de monitoreo existen parámetros utilizados como indicadores de afectación de calidad de agua, tanto generales como específicos (parámetros complementarios). Dentro de los parámetros generales o básicos, se incluyen aquellos de carácter **físico/hábitat** (p. ej. temperatura, pH y oxígeno disuelto), **químico/toxicológico** (p. ej. demanda biológica y química de oxígeno), y **biológico/ecológico** (p. ej. clorofila) que permiten, de forma rutinaria, evaluar en el tiempo el cumplimiento de estándares de calidad de agua, así como el grado de eutrofización de un cuerpo de agua. A su vez, existen **parámetros específicos o complementarios** (p. ej. metales y metaloides, compuestos nitrogenados y coliformes fecales), los cuales permiten examinar fuentes de contaminación específica presentes en una cuenca hidrográfica del cuerpo de agua de interés (Parra et al., 2013).



**El análisis de las variables físicas, químicas y biológicas por separado muchas veces no permite identificar claramente el estado de un cuerpo receptor en términos de su calidad, siendo necesario integrar en conjunto estas variables en un único valor,** dando origen a un índice de calidad agua (ICA). En términos simples, un ICA es una herramienta basada en una expresión numérica que incorpora una serie de variables, la cual permite evaluar cambios de calidad de agua de un determinado cuerpo de agua.

El uso de estos índices es múltiple, incluyendo el manejo de recursos hídricos, clasificación de áreas, análisis de tendencias, aplicación de normativa, información pública e investigación científica (Parra et al., 2013). Además, en comparación al análisis de variables aisladas, esta expresión es de fácil interpretación, y puede ser utilizada para la clasificación de cuerpos en función de diferentes usos (agua potable, recreación, uso agrícola, etc), así como para el desarrollo de un programa de monitoreo.

**Una de las principales ventajas de los ICA es que permiten mejorar, aumentar o difundir la información sobre calidad de agua, lo cual es fundamental para la toma de decisiones, divulgación del estado de un cuerpo de agua y gestión de su calidad.**

Existe una diversidad de ICA a nivel mundial, que se diferencian principalmente por las variables que incluyen, así como por el grado de flexibilidad para la evaluación de uno o más usos del cuerpo de agua. Dentro de los índices generales más utilizados, se encuentran:

- **CCME WQI:** Índice de calidad de agua del Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (*Canadian Council of the Ministers of the Environment Water Quality Index*).
- **NSF WQI:** Índice de calidad del agua de la Fundación Nacional de Saneamiento de Estados Unidos (*National Sanitation Foundation Water Quality Index*).
- **UWQI:** Índice de calidad de agua de la comunidad europea (*Water Quality Index*).

Para el caso latinoamericano, existen ICA creados en Perú, Brasil, Colombia y México para condiciones propias de sus sistemas acuáticos.

**En Chile se han creado ICA para evaluar la calidad de cuerpos hídricos del país.** Uno de los más utilizados es el creado por la **Dirección General de Aguas (DGA)**, en la norma secundaria de calidad de agua (NSCA) del Ministerio de Medio Ambiente. Recientemente, **Fundación Chile** desarrolló un ICA para cuerpos de agua superficiales en el marco del proyecto Escenarios Hídricos 2030. Este índice, al ser desarrollado a nivel regional con base a información de la DGA y NSCA, incorpora la variabilidad hidroquímica de los cuerpos de agua en Chile. Sin embargo, una de las principales limitaciones de este índice es que no permite diferenciar el origen de la contaminación, ya sea antrópica o natural.

En relación a la normativa nacional que establece valores referenciales de calidad de agua para cuerpos receptores, existen tres normas:

- **Norma chilena NCh. 1333 de requisitos de calidad de agua para diferentes usos**
- **Norma chilena NCh. 409 de requisitos para el agua potable**
- **Normas secundarias de calidad del agua**

En la **macrozona sur**, existen **normas secundarias** para las siguientes zonas: Lago Villarrica, cuenca del río Biobío y Lago Llanquihue. Lamentablemente, las normas desarrolladas en Chile son sumamente acotadas, sobre todo para algunos usos como la protección de la vida acuática.

**Para el caso específico de cuerpos receptores de AALL, actualmente no existe un índice de calidad en Chile que permita identificar cambios de calidad de agua y sus efectos en términos biológicos y de salud humana.** Tampoco uno que considere los diversos usos y requerimientos de protección, y las características particulares que diferencian a los diversos cuerpos naturales que pueden actuar como cuerpos receptores. Esto es muy relevante para el diseño de DUS, dada la diversidad de cuerpos de agua que actúan como receptores a lo largo de los territorios de la macrozona sur.

Para efectos de esta guía, **se propone la aplicación del Índice de Calidad de Agua de Canadá (CCME WQI) para el monitoreo de calidad de agua de cuerpos receptores asociados a AALL, principalmente por la alta flexibilidad en términos de los usos** (p. ej. agua potable, protección de organismos acuáticos, uso recreacional, etc), que se obtiene mediante la selección de parámetros más relevantes y de valores referenciales –según normativas o guías– para cada uso. Una de las fortalezas de este índice es que permite distinguir diferentes cuerpos hídricos e identificar fuentes de contaminación específicas según los parámetros seleccionados; a diferencia de otros ICA que son rígidos en estos términos, y que finalmente pueden repercutir en información errada o sesgada para la toma de decisiones.

### **Índice de Calidad de Agua Ambiental del Consejo de Ministros de Canadá (CCME WQI) y su aplicación para el análisis de calidad de agua de cuerpos receptores**

El CCME WQI, es un índice que permite estudiar la calidad del agua de un cuerpo de agua específico, en relación con su capacidad de cumplir con un objetivo de protección o uso, por ejemplo, la protección de la vida acuática, el consumo humano, el riego u otros.

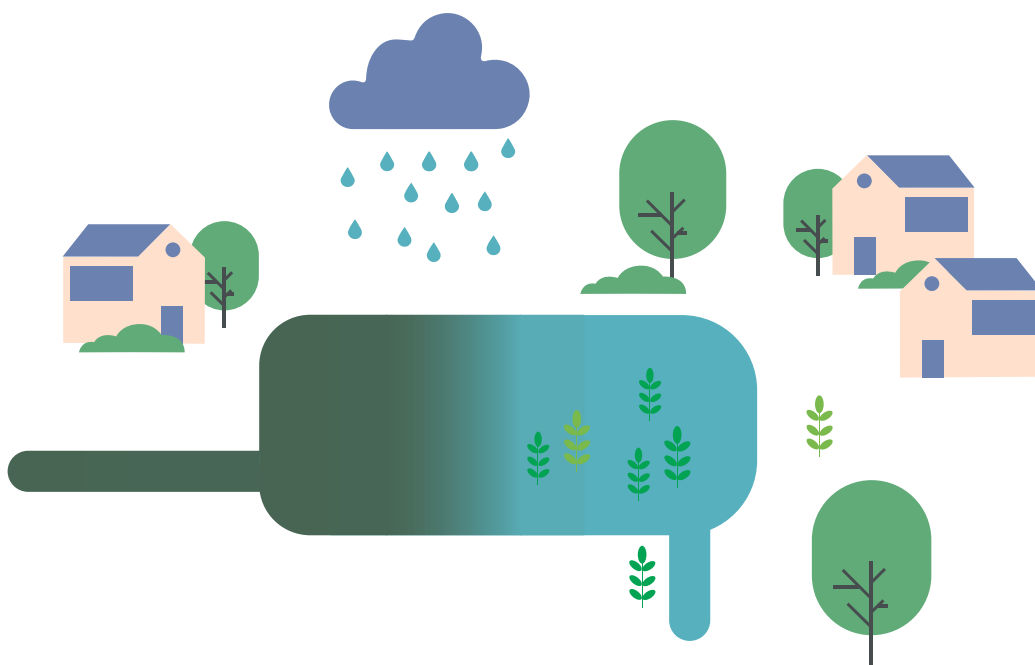
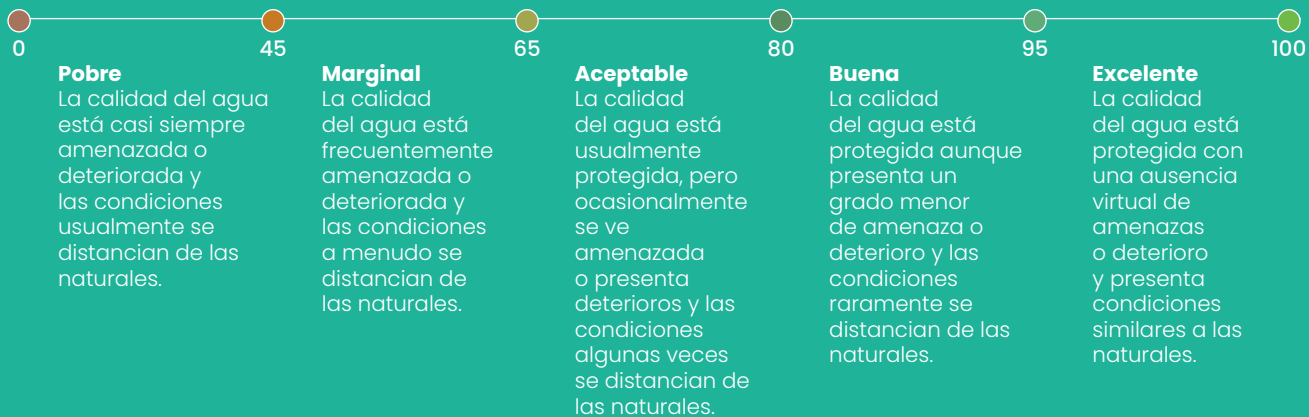
Para hacerlo, utiliza una expresión matemática que pretende analizar la frecuencia con que ciertos parámetros de interés resultan por sobre y/o bajo valores de normas o guías (concentraciones objetivo), desarrollados para asegurar una calidad del agua acorde con el uso.

$$CCME\ WQI = 100 - \left( \sqrt{\frac{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}{1.732}} \right)$$

- $F_1$  representa el alcance, es decir, el porcentaje de parámetros que no se ajustan a las concentraciones objetivo.
- $F_2$  representa la frecuencia, que corresponde al porcentaje de mediciones individuales que no se ajustan a las concentraciones objetivo (porque se realiza más de una campaña de medición por periodo de cálculo del índice).
- $F_3$  representa la amplitud, es decir, la distancia entre la medición y la concentración objetivo cuando se observa excedencia.

Para más detalle sobre el cálculo de cada factor, se recomienda revisar el **Manual del Usuario del índice** (Canadian Council of Ministers of the Environment [CCME], 2017). Importante es notar que, a diferencia de otros índices, los parámetros fisicoquímicos y biológicos que se seleccionan para el cálculo toman igual peso dentro de la expresión del CCME WQI y sus factores.

El índice toma valores entre 0 y 100 y los resultados se clasifican en las siguientes categorías:



# Cómo se diseña el índice de calidad de agua

El diseño del índice que permite estudiar la calidad del agua de los cuerpos receptores a mediano y largo plazo requiere de al menos las siguientes etapas:

1

## Definición de uso objetivo y caracterización de tipos de afluentes del cuerpo receptor

Para elaborar el índice, es clave tener claridad del objetivo de protección del cuerpo receptor: protección de la vida acuática, consumo humano, riego u otro. Esta información se utilizará en la selección de concentraciones objetivo de cada uno de los parámetros físicos, químicos y biológicos que se seleccionan (valores por sobre y/o bajo los cuales se protege el uso). Además es importante tener claridad de las descargas que recibe y las posibles fuentes de contaminación que esas aguas traen. Las aguas lluvias son fuente de contaminación de las aguas de los cuerpos receptores. Otras posibles fuentes son: descarga de aguas servidas y/o grises, descargas de residuos industriales líquidos (RILES) y deposición atmosférica.

2

## Selección de parámetros físicos, químicos y/o biológicos

Se recomienda seleccionar parámetros que den cuenta de la contaminación asociada a las distintas fuentes reconocidas, tanto puntuales como difusas, así como de otros fenómenos que surgen como consecuencia de dicha contaminación (p. ej. eutrofización en humedales urbanos), y de las características propias del cuerpo de agua. Sin embargo, **se debe tener precaución en la selección, para evitar sobre caracterizar un fenómeno o fuente por sobre otro**. El número de parámetros nunca debiera ser menor a 8 ni mayor a 20. Los valores muy altos tienden a subestimar el resultado dado que cada parámetro toma el mismo peso en la expresión. Se recomienda realizar campañas con un número más amplio de parámetros en el primer año para que, a través de un proceso iterativo, se refine la selección.

A modo de ejemplo, **la siguiente tabla presenta parámetros de calidad del agua asociados a diferentes rubros de fuentes de emisión puntual y difusa**, según la “Guía para la elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Aguas Continentales y Marinas 2017” (Ministerio del Medio Ambiente [MMA], 2017) y el “CCME Water Quality Index User’s Manual 2017 Update” (Canadian Council of the Ministers of the Environment [CCME], 2017). Es importante aclarar que esta tabla no busca representar los parámetros que necesariamente deben ser considerados, sino que una aproximación a ellos. Por ejemplo, existen otros indicadores no relacionados a descargas de un rubro en particular, como la temperatura, que pueden ser relevantes para entender el estado ecológico de un cuerpo receptor. Asimismo, no existe para todos los parámetros de la tabla una concentración límite con qué compararlos para el uso de agua esperado dentro del índice.

● Parámetros según MMA (2017)

● Parámetros según CCME (s.f.)

| Parámetros                                      | Aguas servidas | Plantas de tratamiento de aguas servidas | Plantas de agua potable | Aguas lluvias | Ganadería | Agricultura | Acuicultura | Explotación de áridos |
|-------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------|-------------------------|---------------|-----------|-------------|-------------|-----------------------|
| pH                                              | ● ●            | ● ●                                      | ●                       | ●             | ● ●       | ●           | ● ●         |                       |
| Oxígeno Disuelto                                | ●              | ●                                        |                         | ●             | ●         | ●           | ●           |                       |
| Conductividad                                   |                |                                          | ●                       |               |           |             |             |                       |
| Nitrógeno Orgánico (N org)                      | ●              |                                          |                         |               | ●         | ●           |             |                       |
| Nitrógeno Total (N total)                       | ●              |                                          |                         |               |           | ●           | ●           | ●                     |
| Amonio ( $\text{NH}_4^+$ )                      | ● ●            | ● ●                                      |                         | ●             | ● ●       | ●           | ● ●         |                       |
| Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )                     | ●              | ● ●                                      |                         | ●             | ● ●       | ●           | ● ●         |                       |
| Nitrito ( $\text{NO}_2^-$ )                     | ●              | ● ●                                      |                         | ●             | ● ●       | ●           | ● ●         |                       |
| Fósforo Total (P Total)                         | ● ●            |                                          |                         | ●             | ● ●       | ● ●         | ● ●         | ●                     |
| Clorofila - a                                   |                |                                          |                         |               | ●         | ●           | ●           |                       |
| Demanda biológica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ) | ● ●            | ● ●                                      |                         | ●             | ● ●       | ●           | ● ●         |                       |
| Demanda química de oxígeno (DQO)                | ● ●            | ● ●                                      |                         | ●             | ● ●       | ●           | ● ●         |                       |
| Carbono Orgánico Disuelto (DOC)                 |                |                                          |                         | ●             | ●         | ●           | ●           |                       |
| Coliformes fecales                              | ● ●            | ● ●                                      |                         | ●             | ● ●       | ●           | ●           |                       |
| <i>Escherichia coli</i>                         | ●              | ●                                        |                         | ●             | ●         | ●           |             |                       |
| Sólidos Suspendidos totales (SST)               | ●              | ●                                        | ●                       | ●             | ● ●       |             | ●           | ●                     |
| Sólidos Disueltos totales (SDT)                 |                |                                          |                         | ●             |           | ●           |             |                       |
| Aceites y grasas                                | ●              |                                          | ●                       |               |           |             |             |                       |
| Turbidez                                        | ●              | ●                                        |                         | ●             | ●         | ● ●         |             |                       |
| Trihalometanos                                  |                | ●                                        |                         |               |           |             |             |                       |
| Hidrocarburos totales, fijos y volátiles        |                |                                          | ●                       |               |           |             |             |                       |
| Sustancias Farmacéuticas                        | ●              |                                          |                         |               | ●         |             | ●           |                       |
| Pesticidas (fungicidas, insecticidas)           |                | ●                                        |                         |               | ●         | ● ●         | ● ●         |                       |
| <b>FERTILIZANTES</b>                            |                |                                          |                         |               |           |             |             |                       |
| Policlorobifenilos                              |                | ●                                        |                         |               |           |             |             |                       |
| Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAHs)    | ●              | ●                                        |                         | ●             |           |             |             |                       |
| Cloruro ( $\text{Cl}^-$ )                       |                |                                          |                         |               |           |             | ●           |                       |
| Formaldehído                                    |                |                                          |                         |               |           |             | ●           |                       |
| <b>METALES</b>                                  |                |                                          |                         |               |           |             |             |                       |
| Hierro (Fe)                                     |                |                                          | ●                       | ●             |           |             |             | ●                     |
| Manganeso (Mn)                                  |                |                                          | ●                       | ●             |           |             |             | ●                     |
| Aluminio (Al)                                   |                |                                          | ●                       | ● ●           |           |             |             | ●                     |
| Cobre (Cu)                                      | ●              | ●                                        |                         | ● ●           |           |             |             | ●                     |
| Plomo (Pb)                                      | ●              | ●                                        |                         | ● ●           |           |             |             | ●                     |
| Zinc (Zn)                                       | ●              | ●                                        |                         | ● ●           |           |             |             | ●                     |
| Cadmio (Cd)                                     |                |                                          |                         | ● ●           |           |             |             | ●                     |



## 3

## Definición de concentraciones objetivo

Por cada parámetro seleccionado, es necesario seleccionar una concentración objetivo. **Sobre este valor se definirá si los resultados de una campaña de medición presentan parámetros fallidos o no**, es decir, si están dentro de los límites aceptables para proteger el uso objetivo del agua, o no. Se recomienda, de existir, utilizar las concentraciones definidas en la normativa chilena vigente sobre el cuerpo receptor antes indicadas.

De no existir normativas chilenas aplicables, se recomienda la revisión de guías internacionales para la definición de concentraciones objetivo, entre ellas:

- **ANZECC & ARMCANZ (2000)**: guía australiana y neozelandesa para la protección de vida acuática, que diferencia en algunos casos valores según tipo de cuerpo de agua (humedales, ríos, lagos, entre otros).
- **CCME (s.f.)**: guía canadiense de límites para la protección de la vida acuática.
- **United States Environmental Protection Agency (s.f.)**: guía estadounidense de criterios para la protección de la vida acuática.

## 4

## Tiempos y periodicidad de campañas de medición

La definición de la cantidad de muestras que se toman en un periodo de cálculo del índice (que suele ser anual), puede ser igual o más relevante que las etapas de diseño anteriores. El CCME WQI debe ser capaz de captar la variabilidad natural del cuerpo de agua para poder, en el largo plazo, diferenciar los cambios bases de aquellos asociados a la contaminación. Para que ello ocurra, Tri-Star Environmental Consulting (2012) recomienda realizar **4 esfuerzos de monitoreo anuales**. Este calendario puede tener un costo muy alto, pero si se decide modificarlo es necesario comprender que a medida que disminuye el número de campañas, el valor del índice tiende a aumentar, mientras que si aumentan las campañas, el CCME WQI tiende a disminuir. **Para poder comparar los resultados se debe mantener un número de campañas constante para cada periodo de cálculo del índice.**

El momento en que se toma la muestra tendrá también un efecto en los resultados. Se recomienda tomar en consideración que si las muestras se obtienen durante un evento importante de precipitación, o rápidamente luego de este, es posible que los parámetros se encuentren anormalmente excedidos producto de los efectos de la resuspensión de contaminantes desde los sedimentos.

### ¿Qué consideraciones especiales hay que tener al aplicar y analizar los resultados del índice CCME WQI?

1

**Cuando se aplica el índice a distintos cuerpos de agua, solo pueden ser comparados si han sido utilizadas las mismas concentraciones objetivo.** Por ejemplo, los valores límite que se designan para la protección del agua para riego o para el consumo de ganado, son distintos de los que deben ser diseñados para proteger la vida acuática más sensible.

2

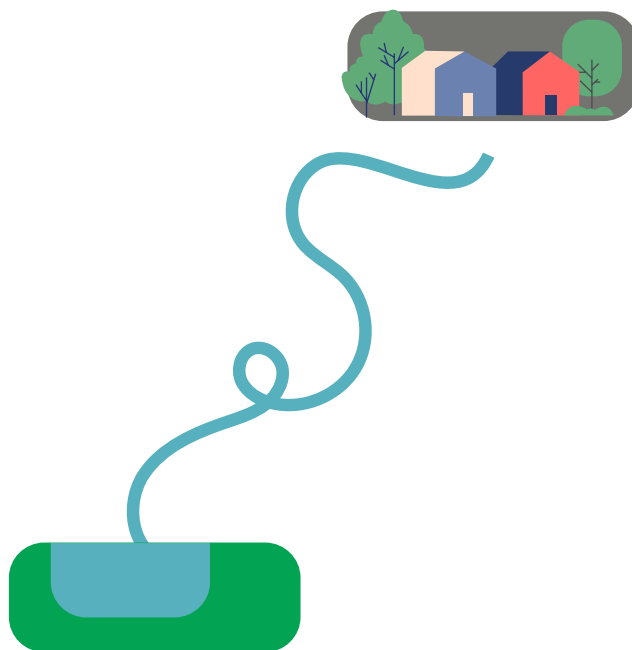
**Cuando se aplica el índice a distintos cuerpos de agua, solo pueden ser comparados si fueron seleccionados los mismos parámetros.** Es posible calcular índices con distintos parámetros, pero los resultados solo revelarán la capacidad del agua de cumplir con las concentraciones objetivo de esos parámetros, pero no de otros.

3

**Se debe tener precaución con el uso de información de antigua data.**

# 3

## Clasificación del uso de suelos



El crecimiento de las ciudades conlleva una serie de cambios en los usos y coberturas de suelo, que alteran su estado natural, prevaleciendo el avance de superficies artificiales. Esto provoca un aumento en la escorrentía superficial, que puede causar eventos de crecidas e inundaciones a consecuencia de la disminución de la capacidad de infiltración de la cuenca. Por lo mismo, la **clasificación de usos de suelo es clave para identificar las superficies permeables e impermeables dentro de la ciudad**. Mientras mejor y más detallada sea la información, más precisa será la conceptualización del modelo (más detalles en la Etapa 3 de este volumen).

Para hacer una clasificación de usos de suelo, existen **tres aproximaciones** principales:

1

### Teledetección o percepción remota

Esta herramienta, que destaca por su costo-efectividad, **utiliza imágenes satelitales multiespectrales que contienen información del coeficiente de emisividad de los cuerpos captados en una imagen**. Este coeficiente es un indicador de la habilidad de un cuerpo para irradiar energía térmica. La clasificación en estos casos puede realizarse de forma supervisada o no supervisada.

- **Clasificación supervisada:** puede ser más precisa si es que se conoce el territorio. Se basa en la disponibilidad de áreas de entrenamiento, cuya clase de uso de suelo es ya conocida (p. ej. suelo desnudo, cultivos, bosque, etc.). De esta forma, a cada elemento de la imagen se le asigna una categoría que se basa en los atributos contenidos en las áreas de entrenamiento. Esta técnica fuerza el resultado para que se corresponda con las coberturas de suelo definidas por el usuario (Borràs et al., 2017).
- **Clasificación no supervisada:** es un proceso de agrupación de píxeles con valores digitales (DN) similares, donde cada una de las agrupaciones se denomina “clase espectral” y se corresponden con tipos de cubierta de terreno (Arango Gutiérrez, Branch Bedoya & Botero Fernández, 2005).

2

### Catastros preexistentes

Los usos de suelo pueden conocerse también a través de catastros y levantamientos preexistentes asociados, por ejemplo, a instrumentos de planificación territorial como los **Planes Reguladores Comunales (PRC)**. Estos, en ocasiones, pueden no contener el nivel de detalle que se requiere para la clasificación.

Otra fuente de información son los **Estudios de Impacto Ambiental (EIA)** asociados a proyectos específicos que pueden encontrarse abierta y gratuitamente en la página web del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). Lamentablemente, solo estará disponible la información para aquellos territorios que cuenten con algún proyecto que haya requerido el estudio.

En cualquier caso, **al utilizar catastros de uso de suelo preexistentes, es importante verificar que la escala a la que fueron elaborados sea compatible con la requerida para los fines del proyecto DUS, y que el territorio no haya sufrido cambios significativos de uso de suelo desde la elaboración del catastro a la fecha**. Esto último es particularmente relevante en contextos en que la expansión y desarrollo urbano ha significado cambios recurrentes en los usos de suelo.

3

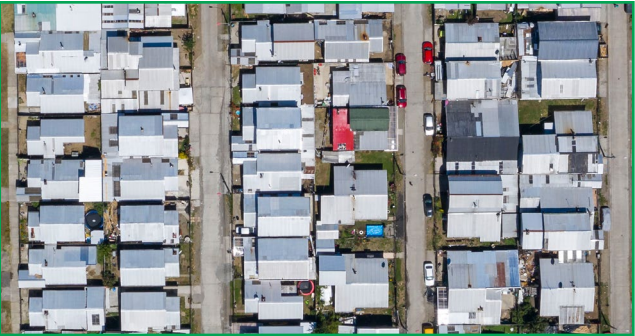
### Levantamiento en terreno

Por último, los usos de suelo pueden catastrarse en terreno, aunque esta tarea puede resultar muy demandante en términos de tiempo y recursos si se realiza a escala urbana. Los levantamientos en terreno también pueden realizarse en complemento a técnicas de percepción remota.

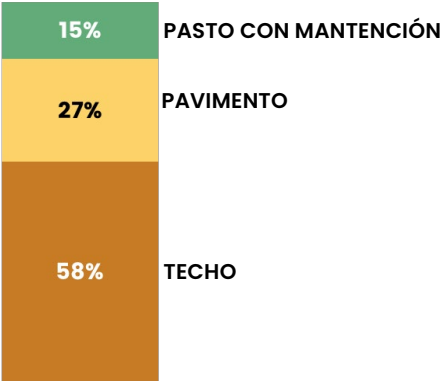
En la tabla que se muestra a continuación se propone una clasificación de usos de suelo que identifica porcentajes de áreas permeables (arbolado, pasto, maleza y suelo desnudo) y porcentajes de áreas impermeables (techos y pavimento). Se incluyen los siguientes usos de suelo:



Residencial /Alta densidad



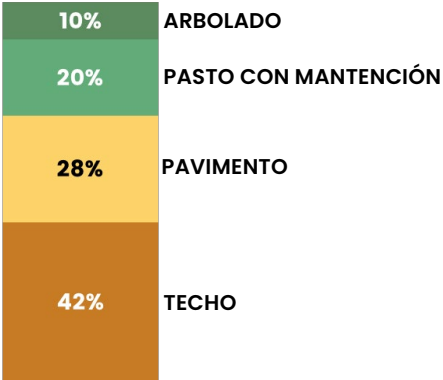
REFERENCIA



Residencial / Densidad media



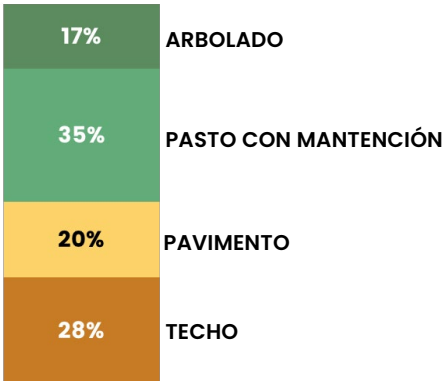
REFERENCIA



Residencial / Baja densidad



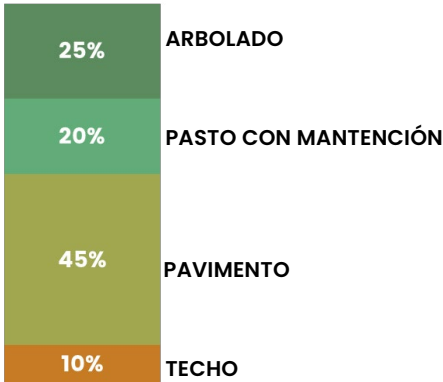
REFERENCIA



Residencial no construido  
Espacio abierto



REFERENCIA

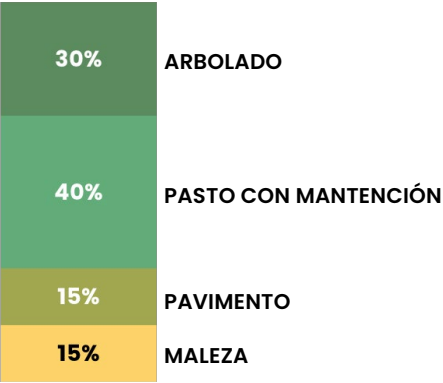




Parque urbano / Alta vegetación / Buena mantención



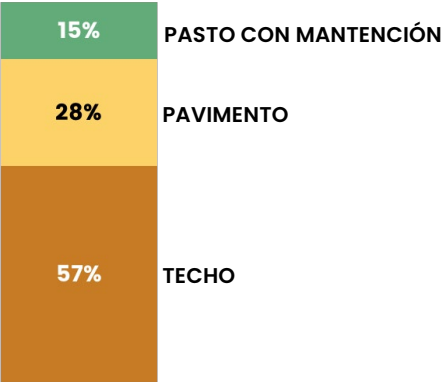
REFERENCIA



Parque urbano / Vegetación media  
Plaza de barrio / Baja mantención



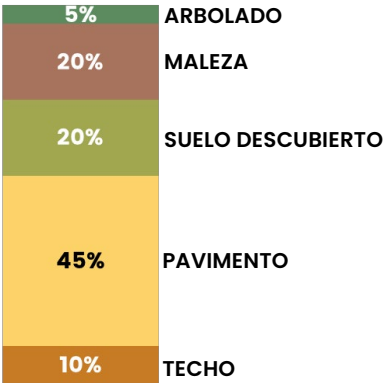
REFERENCIA



Parque urbano / Baja vegetación



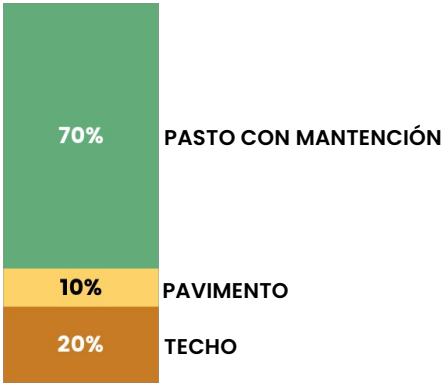
REFERENCIA



Infraestructura deportiva de pasto natural  
Cementerios  
Canchas de golf



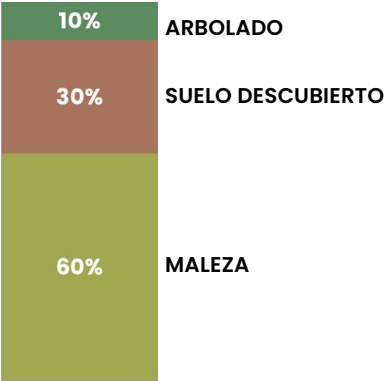
REFERENCIA



Sitio eriazo sin mantención



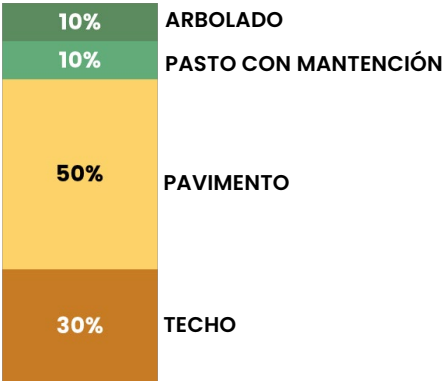
REFERENCIA



Infraestructura deportiva de baja permeabilidad



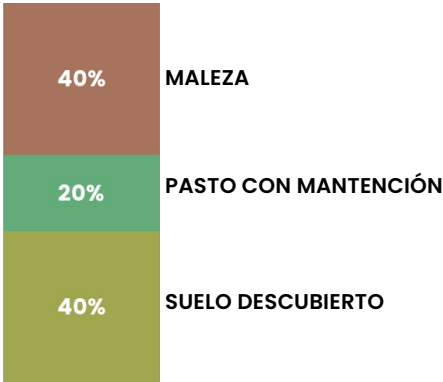
REFERENCIA



Cultivos



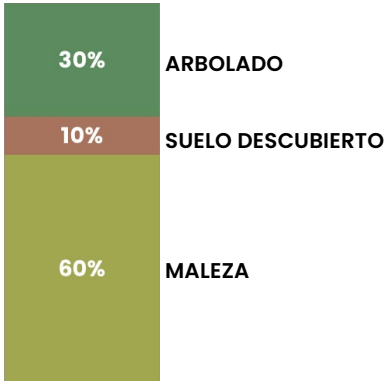
REFERENCIA



Riberas  
Humedales



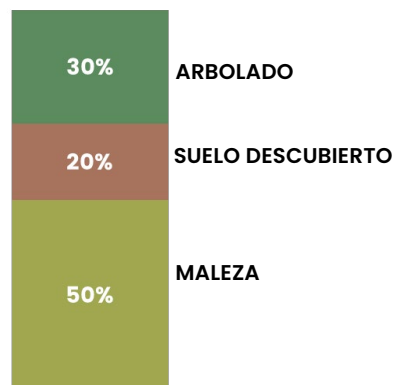
REFERENCIA



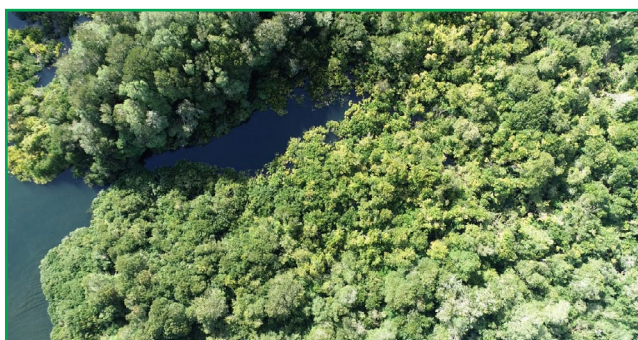
### Bosques / Baja cobertura



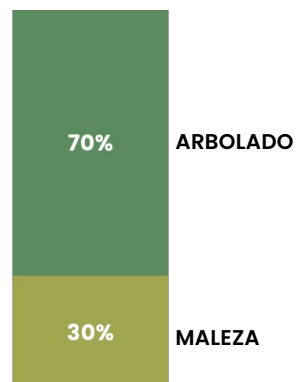
REFERENCIA



### Bosques / Cobertura densa



REFERENCIA





# 4

## Recopilación de antecedentes meteorológicos

---



---

El diseño de proyectos de drenaje urbano sostenible requiere una correcta caracterización del territorio desde un punto de vista meteorológico, con énfasis en las precipitaciones, insumo clave para la modelación hidráulica. Este capítulo presenta los principales aspectos a considerar en este proceso.

## ¿Para qué se usan los antecedentes meteorológicos en un enfoque DUS?

Como se ha demostrado a lo largo de esta guía, el conocimiento del territorio para efectos del diseño de drenaje urbano pasa por una correcta caracterización del ciclo hidrológico, especialmente en términos de precipitaciones. El diseño hidráulico incorpora las aguas lluvias mediante la descripción de precipitaciones en una zona específica en términos de las curvas IDF, precipitación base y volumen de captura (revisar Volumen I, Sección C). A su vez, para la estimación de volúmenes escurridos, se requiere comprender el territorio desde un punto de vista climatológico, siendo las variables más importantes las lluvias, la nieve y la evapotranspiración.

## ¿Dónde se pueden encontrar los datos meteorológicos para un territorio?

Chile cuenta con diferentes redes de estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo del país, las cuales dependen de diferentes instituciones públicas, siendo las principales y de mayor uso aquellas provenientes de la **Dirección Meteorológica de Chile (DMC) (Servicios Climáticos)**, la **Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (Red Hidrométrica Nacional)** y **Ministerio de Agronomía (Red Agromet)**. Por otra parte, el **Centro del Clima y Resiliencia (CR)**<sup>2</sup> integró las redes meteorológicas de la DMC y DGA en una sola plataforma, llamada Explorador Climático, que permite extraer mapas y series de tiempo de precipitación, temperatura media y caudal.

Las estaciones meteorológicas, por lo general, reportan datos observados de precipitaciones y temperatura a escala diaria, con la **excepción de la red Agromet, que provee información a escala horaria**. Desde los sitios web de estas redes, se pueden descargar series de datos de las variables meteorológicas de interés para periodos de tiempo específicos.

Los datos provenientes de estas estaciones permiten analizar **las tendencias anuales, mensuales y diarias de precipitaciones y temperaturas**, ambas variables climáticas de interés para fines del diseño de drenaje urbano. **Para el caso de la precipitación, es importante contar con una serie de datos a escala horaria, principalmente porque los modelos superficiales tienen respuestas rápidas y son sensibles a la escala o resolución temporal utilizada.**

## ¿Qué hacer cuando la información meteorológica es incompleta o inexistente?

Si bien existen numerosas estaciones meteorológicas en Chile, la información meteorológica y climatológica a lo largo del territorio presenta importantes vacíos temporales (series incompletas y de corta duración) y geográficos. Esta discontinuidad temporal y espacial de la información meteorológica aparece como una importante **debilidad en términos de la calidad de los datos para el diseño y modelación hidráulica, por lo que los profesionales a cargo deberán completar las series de tiempo en ambas escalas mediante técnicas de análisis y estadísticas específicas.**

## ¿Qué consideraciones especiales hay que tener cuando los datos meteorológicos son discontinuos o ausentes?

1

**Serie de tiempo incompletas:** Cuando las estaciones meteorológicas consultadas no presentan continuidad temporal de la información, existiendo vacíos a escala diaria, mensual y/o anual, se requiere trabajar los datos mediante técnicas que permitan completar dicha información.

2

**Ausencia de estación meteorológica en el territorio:** En muchas comunas no existen estaciones meteorológicas, representando un problema a la hora de generar información. **Para ello, se pueden utilizar estaciones de referencia y cercanas a la comuna de interés que cuenten con esta información.** Técnicas como regresión-correlación y la razón normal pueden ser utilizadas para generar datos. **Otra alternativa es utilizar información proveniente de elementos grillados mediante técnicas de reanálisis.**

3

**Información a escala horaria:** Lo más importante es contar con una serie de datos de forma horaria (los modelos superficiales responden de forma diferente según la escala) y continua (para el enfoque de modelación continua). **Una forma de generar series de tiempo a escala horaria es mediante desagregación de datos** (p. ej. desagregación estocástica) provenientes de escala diaria.

## 5

## Caracterización de la red de drenaje superficial

---



Analizar la forma en que las aguas lluvias se mueven superficialmente por la ciudad es de suma importancia para comprender el territorio, y será clave en el proceso de conceptualización del modelo con que se estudiará el caso actual y optimizado del drenaje del área de estudio (revisar Etapa 3 del Volumen II para más detalle).

# ¿Cómo se mueven las aguas en la ciudad?

A continuación, se describe una serie de **elementos de información que, en su conjunto, permitirán dar respuesta a la pregunta sobre la forma en que las aguas superficiales escurren por las ciudades o sobre las áreas de estudio particulares de un proyecto**. En cada caso, se especifican las fuentes de información a las que se puede acceder para encontrarlos.



## 1

## Topografía

Para conocer el relieve de las áreas de estudio se puede acceder a dos tipos principales de información: las curvas de nivel y los modelos digitales de elevación.

**Las curvas de nivel** son las líneas que en superficie de un terreno, unen los puntos de igual elevación (cotas) con respecto a un plano de referencia que es, comúnmente, la altura media con respecto al nivel del mar. Estas **permiten reconocer las pendientes del área de estudio**. Las aguas lluvias superficiales se mueven naturalmente desde zonas altas (cotas de mayor altitud) hacia zonas bajas (cotas de menor altitud). Mientras mayor sea la pendiente, más rápido avanzan las aguas por las superficies. **Las curvas de nivel permiten reconocer, por ejemplo, las zonas de acumulación de aguas y zonas de conducción**. Algunas fuentes de información para acceder a las curvas de nivel son: Planes Maestros de Aguas Lluvias (PM), estudios para actualización y/o modificación de PRC y estudios públicos y privados.

Los **Modelos Digitales de Elevación (MDE)**, por su parte, son una representación visual y matemática de los valores de altura que **permite caracterizar las formas del relieve**. El grado de precisión de la representación variará en función del método que se utilice para generarlos. Los MDE pueden ser elaborados a partir de las curvas de nivel y viceversa, pero también a través de otros mecanismos, como el uso de fotografías satelitales y puntos de control medidos en terreno. El Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) tiene a disposición en la plataforma IDE, modelos digitales de elevación ALOS-PALSAR (con una resolución de 12,5 m), corregidos para las regiones del Biobío, Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.

## 2

## Catastro de obras de drenaje

En las ciudades existen obras que ya han sido construidas para gestionar las aguas lluvias. Estas obras son superficiales y subsuperficiales, y algunos de sus elementos más comunes son las cunetas, los sumideros y colectores. Es importante conocer la existencia y características de todas las obras de drenaje que existan en el área de estudio y **cómo se relacionan con la red vial**, pues modifican los caminos que siguen superficialmente las aguas.

En las ciudades en las que existe un PM, estas obras están diseñadas por el MOP (cuando responden a la red primaria) o por el MINVU (cuando responden a la red secundaria). Por tanto, parte del catastro estará disponible en el PM, y parte en documentos propios del SERVIU, como entidad encargada de su construcción y mantención. En las ciudades en que no existe PM, es posible que las municipalidades mantengan información sobre las obras que han sido construidas para manejar las aguas lluvias.

## 3

## Red vial

Las calles actúan como elementos de conducción superficial de las aguas lluvias, por tanto, conocer la configuración de la red vial es clave para entender cómo se mueve el agua, particularmente, en aquellas ciudades de la macrozona que no poseen grandes obras de drenaje.

Un formato ideal para manejar esta información son los archivos *shape* georeferenciados. Estos pueden ser encontrados directamente en estudios para la actualización y/o modificación de los PRC, estudios de carácter público o privado, y PM; o bien pueden ser elaborados por el equipo del proyecto a partir de imágenes satelitales de libre acceso.

## 4

## Mapeo de cursos y cuerpos de agua naturales y artificiales

Las ciudades cuentan con redes naturales de humedales, lagunas, esteros, arroyos, quebradas y ríos que conducen las aguas desde zonas periurbanas hacia la ciudad y/o viceversa. Asimismo, pueden existir dentro de los centros urbanos canales artificiales construidos para fines como el riego. En ambos casos, estos cursos y cuerpos de agua juegan un rol dentro de la red superficial de drenaje, y caracterizarlos puede ser clave para comprender cómo se comportará el escurrimiento de las aguas lluvias en la ciudad. Entre los elementos más importantes a reconocer en cada cuerpo o curso de agua se distinguen:

- **Alturas de agua:** Conocer la variación de la altura de agua de cuerpos naturales a lo largo de un evento de precipitación o de periodos más extensos de tiempo, permite comprender la forma y grado en que las aguas lluvias están ingresando y siendo drenadas fuera de ellos. Además, permiten entender cómo las napas subterráneas influyen sobre la escorrentía superficial y viceversa. Esta información se puede encontrar en estudios previos realizados en el área de estudio (privados y públicos). En la macrozona sur, la DGA mantiene estaciones que reportan la altura de agua de canales, embalses, ríos y esteros en distintos puntos. En la página web oficial de la institución es posible acceder gratuitamente a esa información utilizando las plataformas: “Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea”, desde donde se descargan reportes oficiales; y “Red Hidrometeorológica”, desde donde se visualizan territorialmente las estaciones existentes. Es común, sin embargo, que en cuerpos de agua de menor escala, en ciudades pequeñas, esta información no exista o no esté disponible. En ese caso, se recomienda levantar los datos como parte del proyecto.
- **Caudales:** Según el caso de estudio, puede ser importante conocer las series de tiempo de los caudales de los principales cursos de agua que pasan por las ciudades, particularmente, cuando los flujos que transportan ingresan a las áreas de estudio y drenan en su recorrido distintas subcuencas. Esta información será especialmente utilizada en el proceso de calibración del modelo (revisar Etapa 3 de este volumen, para mayor detalle).

En la macrozona sur, la DGA mantiene estaciones que reportan el caudal diario y mensual de canales, ríos y esteros en distintos puntos; la información se encuentra disponible en los mismos canales señalados en el punto anterior. Es común que la información asociada a un punto particular de interés, especialmente cercano a ciudades de menor tamaño, no esté siendo medida por la DGA u otro organismo. En estos casos, se recomienda levantar la información como parte del proyecto.

- **Batimetrías:** La batimetría corresponde al estudio del relieve de un fondo lacustre o marino. Es de relevancia pues entrega información sobre el volumen de agua que puede almacenar un cuerpo, y sobre las secciones transversales de cursos de agua que pueden explicar el comportamiento de los flujos superficiales. De existir esta información, se puede encontrar en estudios previos realizados en el área de estudio (privados y públicos). Sin embargo, es poco común que esté disponible en cuerpos de agua de ciudades de menor tamaño. En ese caso se recomienda levantar la información como parte del proyecto.
- **Obras de entrada y salida:** Las obras que se construyen en la entrada, salida o a lo largo de un curso o cuerpo de agua natural o artificial, pueden modificar el movimiento superficial de las aguas. Por tanto, conocer y caracterizar estas obras es importante para reconocer la forma en que inciden sobre el comportamiento natural de la escorrentía. El catastro de estos componentes puede generarse a través de información disponible en los organismos que las planificaron, diseñaron o construyeron, entre ellos: municipalidades, MOP y MINVU.

## SITUACIÓN ACTUAL DE INUNDACIÓN

Las ciudades responden de distintas formas a distintas tormentas. Uno de los objetivos de los sistemas de drenaje urbano sostenible es el reducir los eventos que generan inundación en las ciudades y con ello, complicaciones a la organización de la vida que las habita. **Para conocer la magnitud y frecuencia de inundación se puede acceder a información de carácter cualitativa o cuantitativa.** Esta información no solo permite representar la situación actual de inundación y con ello caracterizar la red de drenaje superficial, sino que también apoyar la definición de los objetivos del proyecto y la calibración y análisis de resultados de la modelación (mayor detalle en la Etapa 3 de este volumen).

1

### Datos cualitativos

Información levantada en terreno a través de entrevistas y trabajo con vecinos, que permite aprovechar su conocimiento respecto de los espacios que habitan. Esta información puede ser luego asociada a variables cuantitativas. Algunas de las preguntas que se pueden responder incluyen:

#### ¿Con qué frecuencia se inunda el sector?

En este caso, respuestas interesantes serían aquellas que relacionan los eventos de inundación con sus tiempos de duración (p. ej. “hay inundación cada vez que llueve más de 4 horas seguidas”), o que directamente hablan de un número de eventos en un periodo de tiempo determinado (p. ej. se inunda 3 veces al mes). Otra pregunta de interés asociada a la temática sería: ¿cuándo hay flujo en una sección particular de la red?

#### ¿Cuánto se inunda?, ¿cuándo supera, cierto cuerpo de agua, una altura determinada?

En este caso, las respuestas pueden estar relacionadas con la altura y/o ancho del agua en medidas aproximadas directas, o su representación en elementos materiales, como las cunetas u otros (p. ej. “las inundaciones más frecuentes tienden a llegar hasta el borde superior de la solera o a cubrir superficialmente toda la cuneta”). En este punto, resulta de especial interés el recordar eventos de inundación inusualmente grandes, sus efectos y la fecha de ocurrencia.

#### ¿Dónde se inunda frecuentemente?

Las respuestas a esta pregunta permiten identificar puntos críticos de inundación en la ciudad. Es posible que las municipalidades cuenten también con un catastro de puntos críticos que complemente la información entregada por la comunidad.

2

### Datos cuantitativos

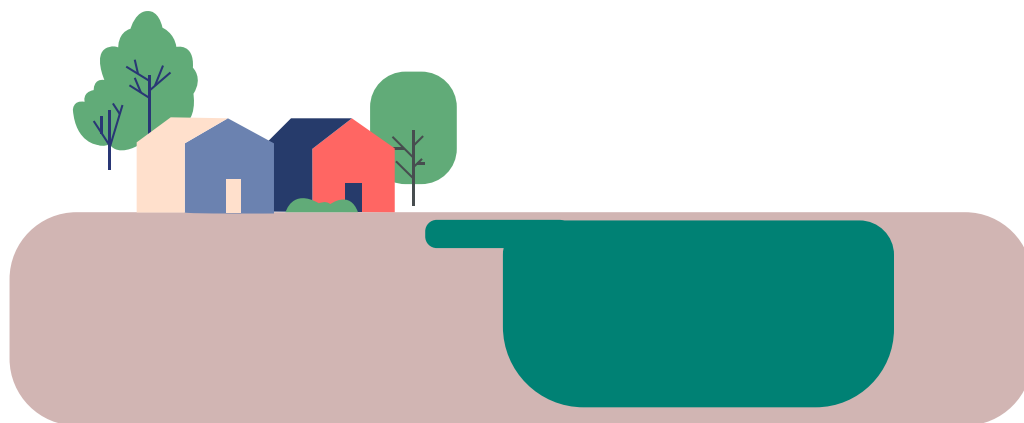
Existe información cuantitativa que puede aportar a entender cómo se inunda la ciudad cuando ocurren estos eventos. Un ejemplo, son las mediciones directas de flujo en distintos puntos de la ciudad durante eventos de precipitación, y otro, las series de tiempo de altura de agua asociadas a distintos cuerpos de agua y que fueron explicadas en el punto 5 de esta Etapa.



## 6

## Caracterización de aguas subterráneas

---



La urbanización tiene una fuerte influencia en la hidrogeología y puede impactar radicalmente en el comportamiento de las aguas subterráneas. Los efectos son variables según la geografía y región climática, los tipos de desarrollo y la gestión de aguas lluvias adoptada en la ciudad. Caracterizar las aguas subterráneas cobra aún más relevancia en aquellas de las ciudades de la macrozona donde existen humedales u otros cuerpos de agua.

Las **interacciones entre la red superficial y las aguas subterráneas** son complejas y difíciles de caracterizar. En cuanto a la gestión de aguas lluvias, **estas interacciones cobran mayor relevancia en ciudades donde el nivel freático se encuentra cercano a la superficie**, por lo que podría influir en el funcionamiento y capacidad de control de ciertas técnicas de DUS implementadas, como también en cuerpos de agua naturales.

Este es el caso de varias ciudades de la macrozona, donde el afloramiento natural de las aguas genera redes de humedales que interactúan constantemente con la red de drenaje urbana, lo que requiere el acople de un modelo subterráneo al modelo de aguas superficiales comúnmente utilizado (más detalle en la Etapa 3 del presente volumen). **La correcta integración de los humedales naturales al sistema de gestión de aguas lluvias es crucial tanto para el control de inundaciones, como para la conservación de estos ecosistemas.**

A pesar de que existe una brecha importante en el monitoreo y estudios en terreno en torno a las aguas subterráneas, para poder caracterizarlas es necesaria cierta información mínima. A continuación, se expone una serie de **elementos que, en su conjunto, permiten describir, a grandes rasgos, el comportamiento subterráneo de las aguas en una ciudad**. En cada caso, se especifican las fuentes de información a las que se puede acceder para encontrarlos.



### ● Unidades Hidrogeológicas

Para comprender y caracterizar tanto las rocas y depósitos presentes en la subcuenca en estudio, como las unidades hidrogeológicas, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) cuenta con una biblioteca de mapas y otros productos (Catálogo E-Maps, disponible en el sitio web de SERNAGEOMIN<sup>1</sup>). En ella se pueden comprar mapas con información georeferenciada de diversas temáticas del área de las geociencias: geología básica, recursos minerales, recursos hídricos, geofísica, peligros geológicos, geología ambiental y planificación territorial. Se recomienda al menos contar con la compilación geológica de la cuenca y el mapa hidrogeológico. Adicionalmente, la DGA cuenta con mapas hidrogeológicos, diagnósticos y expedientes para algunas de las cuencas en estudio que pueden apoyar la caracterización.

<sup>1</sup> <http://tienda.sernageomin.cl>

## ● Tipos de suelos

Los suelos tienen distintos estratos y materialidades; cada uno posee propiedades únicas que diferencian tanto sus capacidades de infiltración, como su conductividad hidráulica. Una fuente de información sobre los tipos de suelo de la macrozona sur son los **mapas abiertos de estudios agrológicos de suelos**, desarrollados por CIREN y disponibles en la plataforma del IDE para las 4 regiones de interés.

Otra forma de acceder a información asociada a los tipos de suelos es la revisión de estudios de suelos de proyectos públicos y privados dentro del área, y la revisión de estudios de suelos asociados a solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas ante la DGA. **El Observatorio Georeferenciado**<sup>2</sup> de la DGA permite revisar los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas concedidos en las 4 regiones de la macrozona sur y, a través de ellos, los documentos técnicos asociados a la solicitud, incluyendo estudios de suelo. Se recomienda utilizar con precaución la información disponible en estos archivos.

Es importante tener en cuenta que el proceso de urbanización va de la mano con un cambio importante en los suelos naturales del lugar, por lo que es común encontrar rellenos y suelos bastante compactados con heterogeneidad espacial. Se recomienda realizar calicatas en terreno para corroborar la información levantada o utilizar estudios de suelo recientes elaborados por otros proyectos.

## ● Piezometría / Niveles de pozos

Para conocer las elevaciones de la napa freática y su evolución temporal y espacial es necesario contar con pozos de monitoreo. La Red Hidrométrica de la DGA posee estaciones de medición de elevaciones de pozos, en general correspondientes a pozos de agua potable rural (APR). Aun así, es importante notar que existe una muy baja cobertura en zonas urbanas.

## ● Niveles de cuerpos de agua

Los cuerpos de agua superficial tienen una importante influencia en el comportamiento de las aguas subterráneas. Dependiendo del nivel de estos, podrán ser recargados por los acuíferos o bien recargar las napas subterráneas. Para incorporar su efecto en la caracterización de las aguas subterráneas, es necesario contar con series de tiempo que muestren la evolución de los niveles de agua de los cuerpos más influyentes, como lagos, lagunas, ríos o incluso humedales. La Red Hidrométrica de la DGA cuenta en muchos casos con estaciones de medición de niveles de los cuerpos de agua más relevantes de las zonas de estudio. Para el caso de cuerpos de agua pequeños, como lagunas y humedales que tengan relevancia en el sistema, deberán hacerse mediciones en terreno. En algunos casos específicos podrán utilizarse imágenes satelitales que muestren la evolución del espejo de agua en el tiempo.

---

<sup>2</sup> <https://snia.mop.gob.cl/observatorio>

## 7

## Caracterización socioeconómica y urbanística

---



El drenaje urbano impacta en múltiples dimensiones del bienestar social y el ecosistema. Por lo mismo, analizar previamente las necesidades de las comunidades y detectar aquellas con mayores índices de vulnerabilidad ayuda a tomar decisiones estratégicas y multifuncionales. Aquí se presentan los conceptos, indicadores y fuentes de datos esenciales por medio de los cuales es posible analizar aspectos socioeconómicos y urbanísticos relacionados con un plan de DUS.

El grado de novedad del drenaje sostenible en el contexto nacional hace que en algunos casos las administraciones locales, servicios sectoriales o desarrolladores inmobiliarios no cuenten con las capacidades técnicas y/o económicas para implementar planes de este tipo en el corto plazo. En consecuencia, resulta fundamental planificar y priorizar las carteras de inversión público-privada para el drenaje urbano sostenible, en perspectivas de corto y mediano plazo.

Considerando el carácter multifuncional del DUS basado en soluciones de infraestructura verde, este puede proveer diversos beneficios y oportunidades para responder a una amplia diversidad de necesidades sociales y urbanas. En función de lo anterior, es necesario evaluar ciertas condiciones socioeconómicas y urbanísticas mínimas del contexto territorial de cada caso de estudio. Esto permitirá **implementar dichas soluciones de manera focalizada, inclusiva y eficiente, atendiendo no solo criterios técnico-ambientales, sino también a las necesidades de la población con mayores índices de vulnerabilidad**. Para esto, se recogieron recomendaciones de análisis para la Evaluación del Impacto Social del Banco Interamericano de Desarrollo (2018), en conjunto a estrategias de priorización de experiencias internacionales tales como el “Cloudburst Management Plan 2012, for the City of Copenhagen”.

Una vez concluida la caracterización climática, hidrológica y ecológica del área de estudio, se propone analizar los siguientes **aspectos socioeconómicos y urbanísticos**, que podrán variar en función de la escala espacial de trabajo.

## 1

### Aspectos socioeconómicos

- **Registro Social de Hogares (RSH):** Sistema de información que facilita la priorización de beneficiarios para la asignación de diversos subsidios y programas sociales. Es elaborado a partir de datos provistos directamente por los hogares, además de información generada desde múltiples instituciones públicas. Dicho instrumento organiza a los hogares mediante una “Clasificación Socioeconómica de Hogares” (CSE), que cuenta con 7 tramos porcentuales establecidos a partir de: el ingreso respectivo por hogar; un “Índice de Necesidades” (tales como presencia de personas con discapacidad y nivel de dependencia, entre otras); y la evaluación de medios, bienes y servicios a los cuales se tiene acceso (Berner & Díaz, 2019).

| Tramo         | Percentil  | Descripción de Tramos de la CSE de los hogares                                                       |
|---------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tramo del 40  | 0% - 40%   | Hogares calificados en el 40% de menores ingresos o mayor vulnerabilidad socioeconómica              |
| Tramo del 50  | 41% - 50%  | Hogares calificados entre el 41% y el 50% de menores ingresos o mayor vulnerabilidad socioeconómica  |
| Tramo del 60  | 51% - 60%  | Hogares calificados entre el 51% y el 60% de menores ingresos o mayor vulnerabilidad socioeconómica  |
| Tramo del 70  | 61% - 70%  | Hogares calificados entre el 61% y el 70% de menores ingresos o mayor vulnerabilidad socioeconómica  |
| Tramo del 80  | 71% - 80%  | Hogares calificados entre el 71% y el 80% de mayores ingresos o menor vulnerabilidad socioeconómica  |
| Tramo del 90  | 81% - 90%  | Hogares calificados entre el 81% y el 90% de mayores ingresos o menor vulnerabilidad socioeconómica  |
| Tramo del 100 | 91% - 100% | Hogares calificados entre el 91% y el 100% de mayores ingresos o menor vulnerabilidad socioeconómica |

\* Fuente: Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2016.

## 2

## Aspectos urbanísticos

Los aspectos urbanísticos mínimos que se consideran para el análisis son los de densidad poblacional, demanda de área verde y espacio público, presencia de infraestructura crítica y presencia de otros proyectos de inversión. Adicionalmente, y como se ha visto en otros capítulos, se deben integrar las variables de regulación territorial, como aquellas que entregan los PRC y seccionales respectivos. **Se sugiere agrupar los datos a escala de barrio o subcuenca, para facilitar la posterior integración con las otras dimensiones de caracterización.**

- **Densidad poblacional:** La densidad poblacional es un indicador reconocido por el INE para conocer el nivel de concentración o dispersión de los habitantes en una zona territorial específica. Está dado por el número de habitantes, dividido por la superficie respectiva, y **permite evaluar el nivel de demanda existente y potencial del uso de múltiples servicios, equipamientos e infraestructuras por parte de los habitantes.** Dicho aspecto resulta fundamental para priorizar áreas urbanas en función de una mayor "Rentabilidad Social", en base a las metodologías establecidas por el Sistema Nacional de Inversiones (SNI). Se sugiere aplicar no solo el valor actual de este indicador, sino también su valor proyectado por los instrumentos de planificación territorial vigentes.
- **Áreas verdes y espacio público:** La cantidad, accesibilidad y calidad del espacio público y las áreas verdes (también reconocido como Bienes Públicos Urbanos) es propuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como un indicador de salud para ciudades sostenibles. Aunque no existen referencias precisas respecto a una cantidad de superficie de áreas verdes por habitante, para efectos del cálculo de la demanda se sugiere considerar **9 m<sup>2</sup>/habitante**, asumiendo una medida referencial reconocida en diversas publicaciones y estudios (Russo & Cirella, 2018). A partir de lo anterior, es posible **establecer tanto la demanda como el déficit estimado de áreas verdes y espacio público por subcuenca**, en base al número de habitantes y el levantamiento de áreas verdes y espacio público contenido en el PRC vigente.
- **Presencia de infraestructura crítica:** Se define como Infraestructura Crítica (IC) a las instalaciones, sistema o parte de este, que son esenciales para el mantenimiento de las funciones sociales básicas; y cuya perturbación o destrucción, afectaría gravemente la salud, la integridad física, la seguridad y el bienestar social y económico de la población. Considerando el rol preventivo de las soluciones de drenaje urbano sostenible basadas en infraestructura verde frente a múltiples riesgos climáticos, **la existencia de Infraestructura Crítica ha sido utilizada en experiencias internacionales como factor de priorización.**
- **Presencia de otros proyectos de inversión:** La identificación temprana de otros proyectos de carácter urbano (en carpeta, en etapa de diseño o ejecución), **contribuye a aumentar considerablemente la eficiencia, eficacia, integración y aplicabilidad de las soluciones de DUS.** Un Plan de Drenaje Urbano Sostenible puede establecer sinergias con múltiples programas de inversión existentes, ejecutados tanto por la municipalidad y los servicios públicos regionales, como por desarrolladores inmobiliarios privados. Para esto, se sugiere consultar directamente a la Secretaría de Planificación (SECPLAN) y a la Dirección de Obras Municipales (DOM) correspondiente, además del Gobierno Regional y los Servicios Regionales de MINVU y MOP.
- **Otros factores o indicadores:** Existen diversas plataformas que evalúan el desarrollo urbano mediante múltiples factores, los cuales pueden profundizar la caracterización socioeconómica y urbanística del caso de estudio. Uno de ellos es el **Sistema de Indicadores y Estándares de Desarrollo Urbano (SIEDU)**, desarrollado por el INE, el MINVU, el Consejo Nacional de Desarrollo Urbano y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), y que establece 8 indicadores de desarrollo urbano. Otra plataforma digital de libre acceso que puede complementar la caracterización es el **Índice de Bienestar Territorial**, desarrollado por el Centro de Inteligencia Territorial. Este busca poner a disposición información clave para la planificación y el desarrollo de distintas ciudades a lo largo del país y funciona en base a la medición de cinco dimensiones (Accesibilidad, Ambiental, Socioeconómica, Infraestructura, Seguridad), desagregadas en 24 indicadores.

## REFERENCIAS:

ANZECC & ARMCANZ. (2000). Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality.

Arango Gutiérrez, M. A., Branch Bedoya, J. W., & Botero Fernández, V. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores Remotos: "landsat-etm+". *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(1), 2611-2634. Recuperado de: <http://www.scielo.unal.edu.co/pdf/rfnam/v58n1/a04v58n1.pdf>

Banco Interamericano de Desarrollo. (2018). *Evaluación del Impacto Social: integrar las cuestiones sociales en los proyectos de desarrollo*. Recuperado de <https://webimages.iadb.org/publications/2019-01/Evaluaci%C3%B3n-del-impacto-social-Integrando-los-aspectos-sociales-en-los-proyectos-de-desarrollo.pdf>

Berner, H., & Díaz, L. (2019). El Registro Social de Hogares: una innovación al servicio de la protección social. En Paris, E. & Rodríguez, J. (Ed.), *Apurando el Paso: 10 Experiencias de Reformas y Modernización del Estado de Chile* (1a. ed., pp. 59-88). Santiago, Chile.: Editorial Universitaria - Ediciones FLACSO. Recuperado de [https://flacsochile.org/doc/2019/libros/Libro\\_Apurando\\_el\\_paso.pdf](https://flacsochile.org/doc/2019/libros/Libro_Apurando_el_paso.pdf)

Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, (48), 55-66.

Canadian Council of Ministers of the Environment. (2017). Canadian Water Quality Guidelines for the protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index User's Manual 2017 Update. In *Canadian environmental quality guidelines - 1999*. Winnipeg, Canadá.

Canadian Council of Ministers of the Environment. (s.f.). Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: Factsheets. En *Canadian Environmental Quality Guidelines*. Recuperado de <https://www.ccme.ca/en/resources>

Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2016). *Informe de Desarrollo Social*. Santiago, Chile.

Ministerio del Medio Ambiente. (2017). *Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad ambiental en aguas continentales y marinas 2017*. Santiago, Chile. Recuperado de: <http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=57f4f33c-e43c-495d-a82a-8f081ec981d3&fname=Guia%20NSCA%20Agua.pdf&access=public>

Olds, H. T., Corsi, S. R., Dila, D. K., Halmo, K. M., Bootsma, M. J., & McLellan, S. L. (2018). High levels of sewage contamination released from urban areas after storm events: A quantitative survey with sewage specific bacterial indicators. *PLoS medicine*, 15(7), e1002614. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002614>

Parra, O., Almanza, V., Urrutia, R., & Baeza, C. (2013). *Agua, situaciones de emergencia, factibilidad técnica para el abastecimiento de agua potable desde un sistema de lagunas urbanas*. PROYECTO INNOVA CHILE 10CREC-8453. Concepción, Chile.

Russo, A., & Cirella, G. T. (2018). Modern Compact Cities: How Much Greenery Do We Need?. *International journal of environmental research and public health*, 15(10), 2180. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102180>

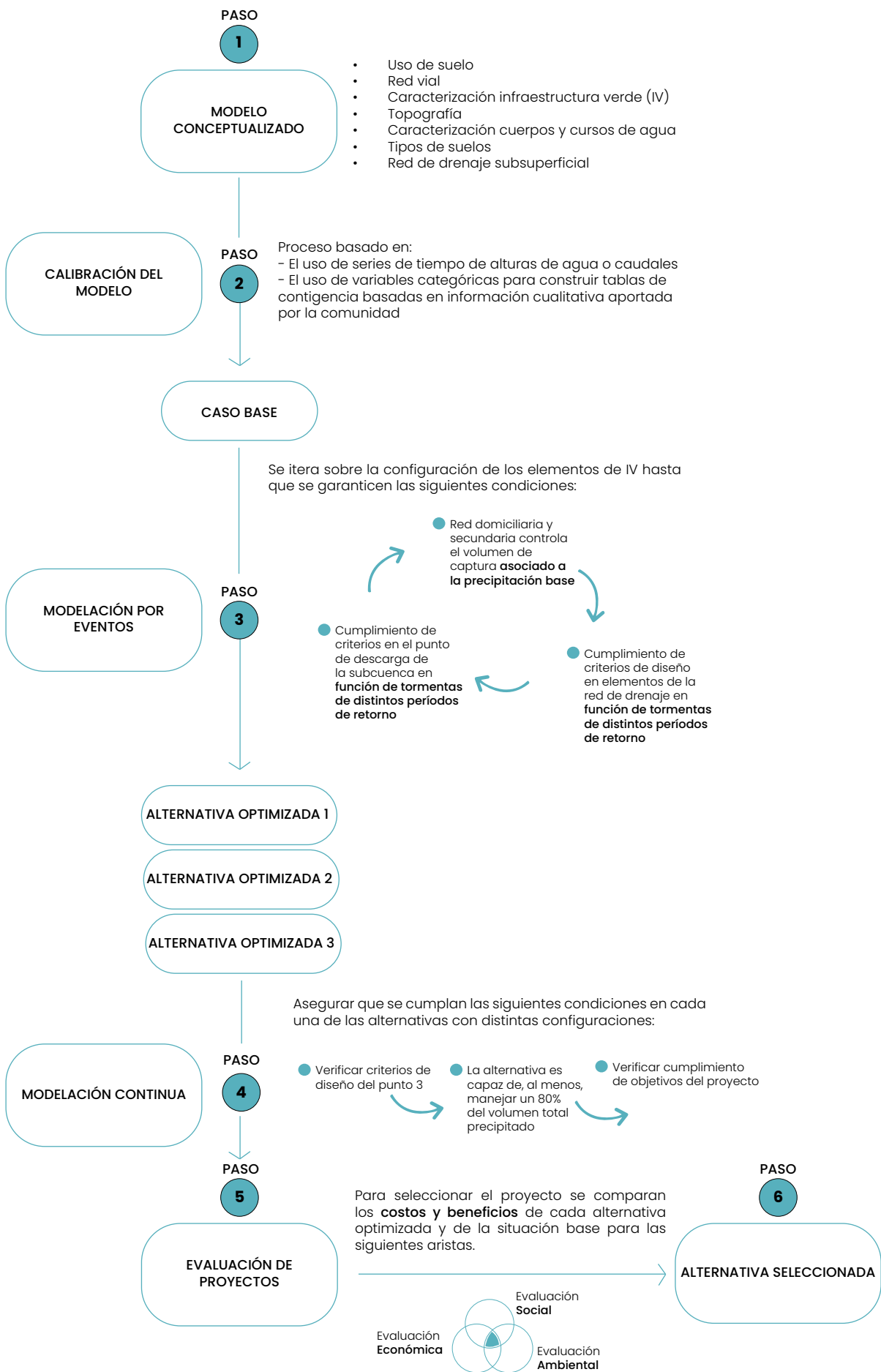
United States Environmental Protection Agency. (s.f.). *National Recommended Water Quality Criteria: Aquatic Life Criteria table*. EPA. Recuperado de <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-aquatic-life-criteria-table>



## ETAPA 3

# Modelación de la situación base

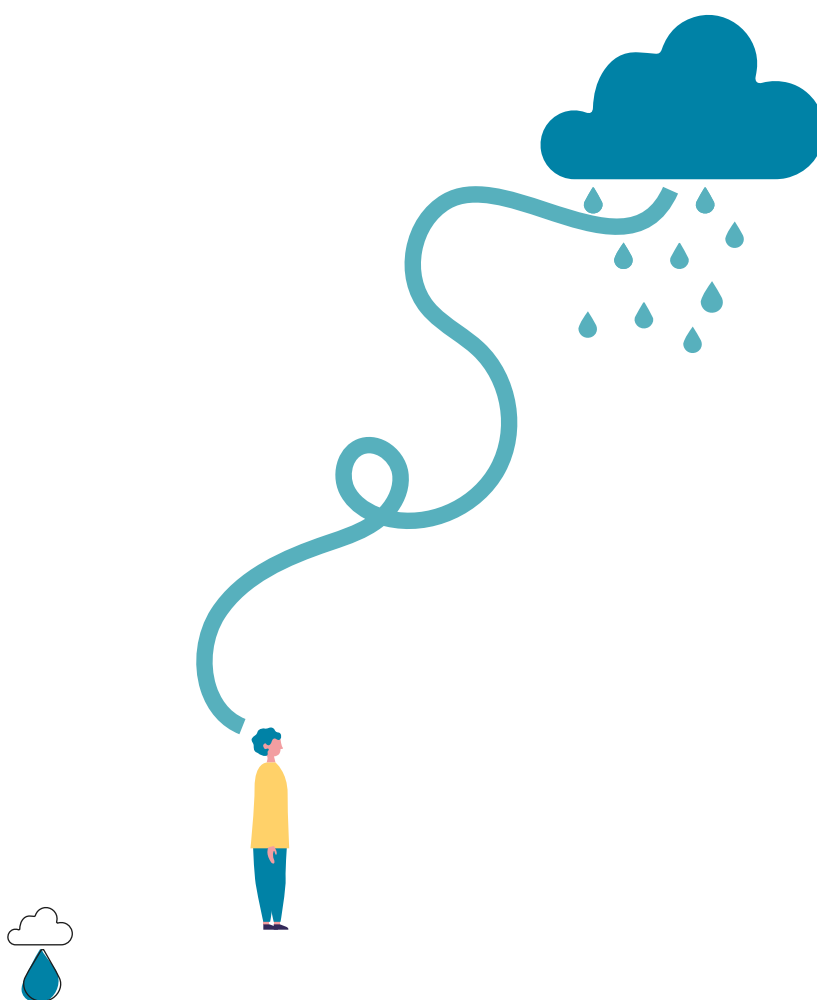




1

# La modelación hidrológica como herramienta para la toma de decisiones, planificación urbana y gestión de aguas lluvias

---



---

Entender y predecir correctamente el ciclo del agua en la ciudad, su impacto en la comunidad y su interacción con los ecosistemas, es clave para la planificación urbana y el diseño de la red de drenaje. Este capítulo describe cinco pasos clave para la conceptualización de un modelo hidrológico, como herramienta de apoyo a este proceso.

Dada la constante evolución de las ciudades, el estudio del comportamiento del agua puede resultar una tarea compleja, más aún en aquellos casos en los que los datos duros (hidrológicos, meteorológicos y ambientales) son escasos. En este sentido, la modelación hidrológica surge como una herramienta no solo útil, sino también necesaria para comprender tanto la situación base de una ciudad, como los escenarios futuros de urbanización o de gestión de aguas lluvias, logrando responder preguntas como:

- *¿Qué tipo de tormentas generan inundaciones y dónde ocurren?*
- *¿Cómo se ven influenciados los acuíferos de una ciudad frente a la urbanización?*
- *¿Qué estrategias de control de aguas lluvias permiten reducir la frecuencia de inundaciones y de qué forma?*
- *¿Cómo influye el cambio de uso de suelo proyectado en ecosistemas aguas abajo de una ciudad?*
- *¿Cuál es el costo y el beneficio asociado a la implementación de diferentes elementos de control de aguas lluvias?*

Responder estas preguntas es un desafío que puede ser abordado a través de un proceso que, a grandes rasgos, consta de 5 pasos:

## **1 Conceptualización del modelo**

Utilizando la información levantada, descrita en la Etapa 2 de este volumen, se debe construir un modelo hidrológico-hidráulico que simule el funcionamiento de la red de drenaje urbano actual. Según las características de la zona de estudio, este modelo podrá ser solo superficial o incluir también la componente de aguas subterráneas (modelo acoplado superficial-subterráneo).

## **2 Calibración del modelo**

El modelo construido debe ser calibrado, modificando sus parámetros hasta lograr simular correctamente la realidad observada en la ciudad.

## **3 Modelación por eventos**

Con el objetivo de evaluar diferentes configuraciones de elementos de IV para la ciudad, se realiza una modelación por eventos y se revisa que cumplan con las diferentes condiciones de diseño impuestas. Esto implica conceptualizar cada una de las alternativas en el modelo hidrológico construido.

## **4 Modelación continua**

Con un grupo de opciones factibles, se procede a evaluar su funcionamiento en un periodo más largo de tiempo, utilizando modelación continua. En este punto, se debe corroborar que los diseños seleccionados cumplan con el objetivo planteado en torno a la gestión de aguas lluvias.

## **5 Evaluación de proyectos**

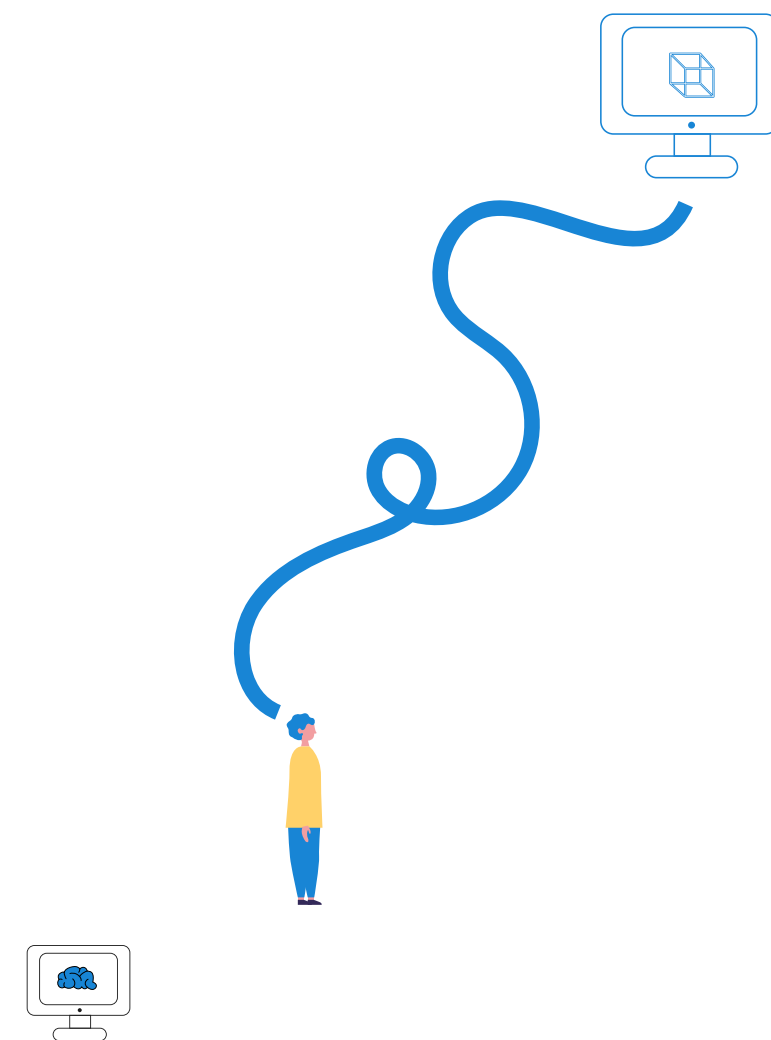
Finalmente, para seleccionar la alternativa óptima, se debe realizar una evaluación de las distintas configuraciones a través de un estudio de costos y beneficios, considerando los ámbitos sociales, ambientales y económicos de cada uno de los escenarios optimizados.

**A continuación, se exponen en detalle la implementación de los pasos 1 y 2.** Los pasos 3, 4 y 5 se desarrollan en la Etapa 4 de este volumen.

## 2

# Conceptualización del modelo

---



En este capítulo se exponen los pasos clave para conceptualizar un modelo hidrológico-hidráulico que sea capaz de simular de forma continua y dinámica los procesos de lluvia-escorrenría en la ciudad y, de ser necesario, su interacción con el agua subterránea.

**El carácter de este capítulo es altamente técnico, por lo que se espera que el lector tenga experiencia en modelación numérica e idealmente en los modelos descritos.**

En este sentido, cabe destacar que el texto no busca reemplazar los manuales de los modelos utilizados, sino más bien guiar la toma de decisiones y ser una hoja de ruta para la construcción de un modelo como herramienta de planificación urbana.

## A

**Modelo superficial SWMM**

Debido a su amplio uso y a su capacidad de simular correctamente los diversos elementos de la red de drenaje urbano, se decide utilizar el modelo SWMM (**Storm Water Management Model**) como modelo superficial de aguas lluvias. A grandes rasgos, SWMM es un modelo de simulación dinámica y distribuida para procesos de lluvia-escorrentía. **Se utiliza para simular la cantidad y calidad de la escorrentía producida por un solo evento o una serie de eventos (simulación continua), principalmente en zonas urbanas** (Rossman, 2015).

SWMM considera diferentes procesos hidrológicos que interfieren en la generación de escorrentía en zonas urbanas. Para este caso, se incluyen: precipitación, evaporación, infiltración del agua precipitada, ruteo de escorrentía y captura o retención de precipitación/escorrentía a través de varios tipos de soluciones DUS. Para esto último, SWMM permite incorporar elementos que denomina 'LID controls' (ver detalle en Etapa 4 de este volumen), que hacen que esta herramienta resulte especialmente atractiva para el diseño de una red de drenaje urbano sostenible.

**Para todo el proceso de construcción, conceptualización y análisis de resultados del modelo SWMM se recomienda fuertemente apoyarse en el manual de usuario y el manual de aplicaciones disponible en la página web de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), disponible en línea.<sup>1</sup>**

Para construir correctamente un modelo SWMM es necesario conocer y caracterizar el territorio en estudio para luego representar la realidad urbana a través de los diversos elementos que provee la herramienta. **A continuación, se propone una metodología en la cual se definen los principales pasos para conceptualizar un modelo de aguas superficiales, utilizando como base la información recopilada en la Etapa 2 de este volumen.**

### Delimitación y caracterización de subcuencas

SWMM utiliza como unidad hidrológica las subcuencas, entendidas como superficies que reciben precipitación y generan escorrentía que fluye hacia algún nodo específico de la red de drenaje o hacia otra subcuenca. El primer paso para conceptualizar un modelo SWMM es delimitar las subcuencas para luego caracterizarlas a través de diferentes parámetros hidráulicos, propios del modelo.

**Para delimitar una subcuenca hay que tener en cuenta al menos tres aspectos relevantes:**

- Toda la escorrentía generada en esa zona debe drenar a un mismo punto.
- Se deben buscar subcuencas relativamente homogéneas en cuanto a su uso de suelo (ver Etapa 2, Capítulo 3).
- Entendiendo que solo se puede conocer la escorrentía simulada a la salida de cada subcuenca, su delimitación debe considerar dónde es necesaria la información de la cantidad de escorrentía generada.

Para entender hacia dónde drena la escorrentía generada, se pueden utilizar las fuentes de información expuestas en la Etapa 2, Capítulo 5, siendo especialmente útil la topografía con apoyo de herramientas SIG.

Una vez delimitadas las subcuencas se procede a caracterizarlas. Los parámetros geomorfológicos de la cuenca, tales como **el área, el ancho y la pendiente** son extraídos de la topografía, la red drenaje y los mapas previamente generados. En el Ejemplo N°1 del Manual de Aplicaciones de SWMM se detalla la metodología de este proceso (Gironás et al., 2009).



Para los otros parámetros que caracterizan las subcuencas, se utilizan los usos de suelo definidos en la Etapa 2, Capítulo 3. La idea es asignar a cada tipo de suelo valores propuestos según distintas referencias, siguiendo ejemplos de zonas tipo y representativas de cada tipo de uso. Los valores propuestos se exponen en la siguiente tabla.

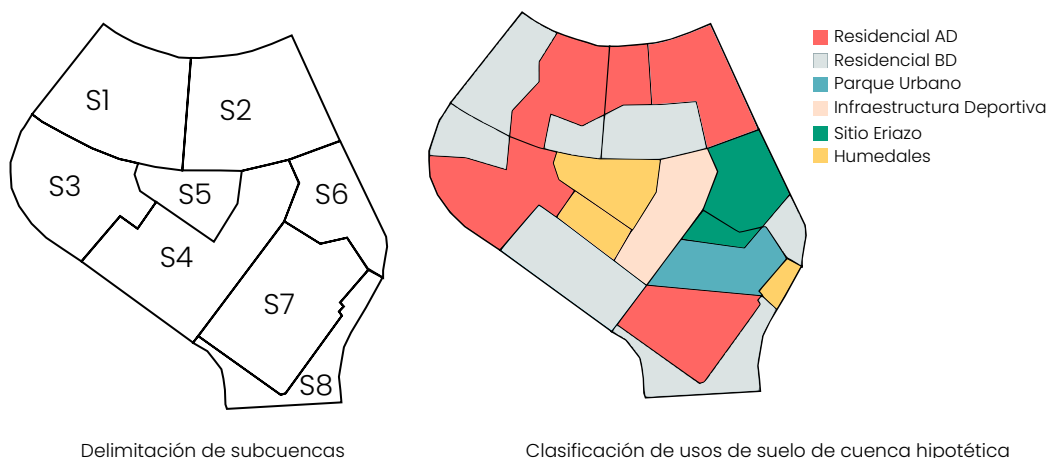
<sup>1</sup> <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

## Valores de los parámetros SWMM propuestos, según uso de suelo

|                            |                                                                 | % Impermeabilidad |                 |                 | Rugosidad Manning impermeable |        | Rugosidad Manning permeable |        | Almacenamiento impermeable (mm) |        | Almacenamiento permeable (mm) |        |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|--------|-----------------------------|--------|---------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| Clasificación Uso de Suelo |                                                                 | Real              | Efectiva mínima | Efectiva máxima | Mínima                        | Máxima | Mínima                      | Máxima | Mínima                          | Máxima | Mínima                        | Máxima |
| Residencial                | Residencial Alta Densidad                                       | 85%               | 80%             | 81%             | 0,011                         | 0,023  | 0,150                       | 0,240  | 1,30                            | 2,50   | 2,50                          | 5,10   |
|                            | Residencial Densidad Media                                      | 70%               | 60%             | 64%             | 0,011                         | 0,022  | 0,233                       | 0,360  | 1,30                            | 2,50   | 4,20                          | 5,90   |
|                            | Residencial Baja Densidad                                       | 48%               | 36%             | 40%             | 0,011                         | 0,022  | 0,232                       | 0,358  | 1,30                            | 2,50   | 4,20                          | 5,90   |
|                            | Residencial no construido                                       | 17%               | 8%              | 11%             | 0,103                         | 0,180  | 0,266                       | 0,426  | 2,80                            | 3,60   | 5,20                          | 5,80   |
|                            | Espacio Abierto                                                 |                   |                 |                 |                               |        |                             |        |                                 |        |                               |        |
| Espacios Abiertos          | Parque Urbano Alta vegetación Buena mantención                  | 17%               | 8%              | 11%             | 0,041                         | 0,071  | 0,255                       | 0,397  | 1,80                            | 2,90   | 4,80                          | 6,00   |
|                            | Parque Urbano Vegetación media                                  |                   |                 |                 |                               |        |                             |        |                                 |        |                               |        |
|                            | Plaza de barrio Baja mantención                                 | 32%               | 20%             | 24%             | 0,048                         | 0,077  | 0,179                       | 0,288  | 1,70                            | 2,80   | 3,50                          | 4,80   |
|                            | Parque Urbano Baja vegetación                                   | 66%               | 56%             | 59%             | 0,026                         | 0,043  | 0,196                       | 0,314  | 1,40                            | 2,70   | 4,10                          | 4,60   |
|                            | Instalación deportiva pasto natural Cementerios Canchas de golf | 30%               | 18%             | 22%             | 0,011                         | 0,023  | 0,150                       | 0,240  | 1,30                            | 2,50   | 2,50                          | 5,10   |
|                            | Sitio eriazo sin mantención                                     | 21%               | 11%             | 14%             | 0,131                         | 0,210  | 0,217                       | 0,354  | 2,90                            | 3,60   | 4,50                          | 4,80   |
|                            | Instalación deportiva Baja permeabilidad                        | 80%               | 73%             | 76%             | 0,011                         | 0,022  | 0,275                       | 0,420  | 1,30                            | 2,50   | 5,10                          | 6,40   |
|                            | Cultivos                                                        | 22%               | 12%             | 15%             | 0,102                         | 0,155  | 0,158                       | 0,259  | 2,30                            | 3,20   | 3,30                          | 4,30   |
| Espacios Naturales         | Riberas Húmedales                                               | 13%               | 6%              | 8%              | 0,182                         | 0,302  | 0,282                       | 0,451  | 3,90                            | 4,30   | 5,70                          | 5,80   |
|                            | Bosques de baja cobertura                                       | 16%               | 7%              | 10%             | 0,142                         | 0,229  | 0,270                       | 0,428  | 3,10                            | 3,80   | 5,40                          | 5,60   |
|                            | Bosques de cobertura densa                                      | 5%                | 1%              | 2%              | 0,240                         | 0,410  | 0,357                       | 0,549  | 5,10                            | 5,10   | 6,90                          | 6,90   |

Elaboración propia en base a McCuen, Johnson & Ragan (1996), American Society of Civil Engineers [ASCE] (1982) y Zhuk et al. (2020).

Habiendo asignado un único valor a cada uso de suelo, se procede a realizar una **ponderación por área según la proporción existente de cada uso de suelo en la subcuenca estudiada**. A continuación, se muestra un esquema del proceso utilizando una cuenca hipotética y simplificada.



Por último, **se le asigna a cada subcuenca los parámetros de infiltración asociados a los tipos de suelo existentes**. Los parámetros utilizados variarán en función del modelo de infiltración adoptado (Green Ampt, Horton o Curva Número). Los valores de los parámetros utilizados deben ser coherentes con la información descrita en la Etapa 2, Capítulo 6. En la siguiente tabla se muestran los parámetros recomendados a utilizar según tipo de suelo.

#### Valores de los parámetros SWMM propuestos, según uso de suelo

| Tipo de suelo                                       | Conductividad Hidráulica, $K$ (mm/h) | Cabeza de Succión, $\Psi$ (mm) | Porosidad (-) |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------|
| Arena ( <i>Sand</i> )                               | 120,4                                | 49,0                           | 0,44          |
| Franco arenoso ( <i>Loamy sand</i> )                | 30,0                                 | 61,0                           | 0,44          |
| Areno arcilloso ( <i>Sandy Loam</i> )               | 10,9                                 | 110,0                          | 0,45          |
| Franco ( <i>Loam</i> )                              | 3,3                                  | 88,9                           | 0,46          |
| Franco limoso ( <i>Silt loam</i> )                  | 6,6                                  | 169,9                          | 0,50          |
| Franco arcilloso arenoso ( <i>Sandy clay loam</i> ) | 1,5                                  | 220,0                          | 0,40          |
| Franco arcilloso ( <i>Clay loam</i> )               | 1,0                                  | 210,1                          | 0,46          |
| Franco limoso arcilloso ( <i>Silty clay loam</i> )  | 1,0                                  | 270,0                          | 0,47          |
| Limoso arcilloso ( <i>Silty clay</i> )              | 0,5                                  | 240,0                          | 0,43          |
| Arcilloso ( <i>Clay</i> )                           | 0,5                                  | 290,1                          | 0,48          |

Elaboración propia en base a Rawls, Brakensiek & Miller (1983).

## Representación de cuerpos de agua o humedales

Para representar todos aquellos cuerpos de agua superficiales que tienen la capacidad de almacenar y de infiltrar, se utilizan los llamados **nodos de almacenamiento en SWMM**. Eventualmente, en el caso de que el modelo superficial se acople a uno subterráneo, el intercambio de flujo (infiltración/exfiltración) en estos elementos toma un rol clave para la simulación.

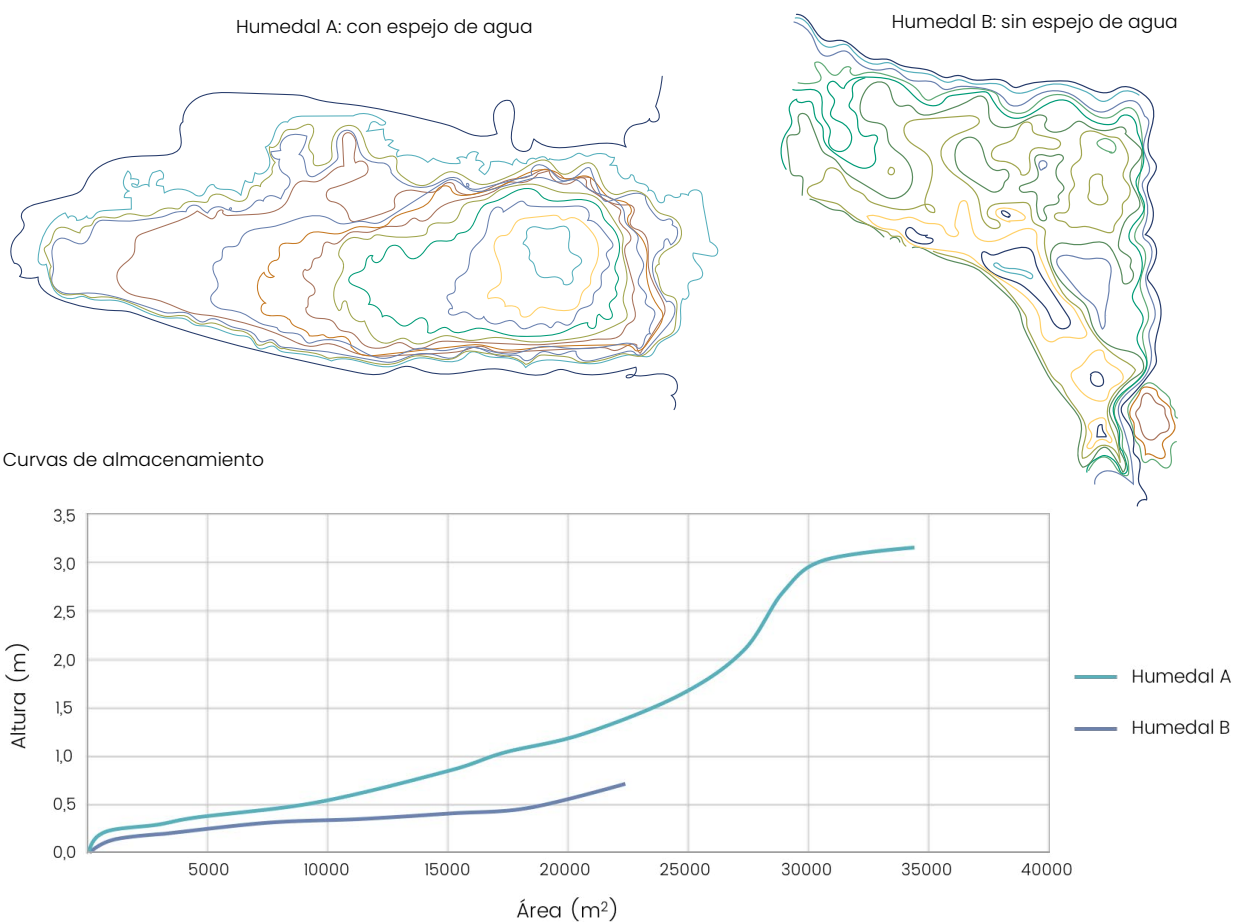
**Hay tres componentes clave que caracterizan a estos nodos:**

- Su **curva de almacenamiento** (área en función de la altura).
- Su **capacidad de infiltración**.
- Las **obras de entrada y salida** que los conectan con el resto de la red de drenaje.



Es importante considerar que la resolución de la información espacial requerida para la construcción de las **curvas de almacenamiento** es bastante más fina que la utilizada en la caracterización de subcuencas, por lo que se recomienda hacer levantamientos batimétricos o fotogramétricos, dependiendo del tipo de humedal.

En la siguiente figura se muestran las curvas de nivel y de almacenamiento de dos humedales, uno que presenta un espejo de agua (Humedal A) y otro que no (Humedal B).







Para caracterizar la **capacidad de infiltración** de estos elementos se utilizan como base los tipos de suelo anteriormente mencionados y sus propiedades hidráulicas presentadas en esta sección. Aun así, es necesario considerar que generalmente en aquellos humedales con espejos de agua constante se genera una capa de sedimentos en el fondo que puede reducir fuertemente su permeabilidad, y por ende, su capacidad de infiltración.



Finalmente, para conectar estas unidades de almacenamiento al resto de la red de drenaje, se utilizan elementos tipo “link”, orificios, vertederos o conductos que representen correctamente sus obras de **entrada y salida**.

## Representación de la red de drenaje superficial y subsuperficial



La forma en que se represente la red de drenaje superficial y subsuperficial, en caso de existir, variará dependiendo fuertemente del caso de estudio. Utilizando los elementos tipo nodo y conducto, se deberá representar y caracterizar toda la red de drenaje levantada y previamente explicada en la Etapa 2, Capítulo 5.

A continuación, se detallan algunas formas comúnmente utilizadas para representar elementos urbanos que aportan a la conducción (e incluso almacenamiento) de aguas lluvias:

### Red vial

Como se mencionó anteriormente, las calles (particularmente las cunetas), cumplen un rol de conducción de aguas lluvias en la ciudad. Tradicionalmente, las aguas son dirigidas a un sumidero y conectadas a la red subsuperficial de colectores. Para representar las calles en el modelo, generalmente se utilizan conductos abiertos con secciones transversales determinadas por el modelador, que siguen la forma de la calle a representar. Al tomar esta decisión hay que considerar que para SWMM, los canales abiertos no reciben precipitación, por lo que no generan escorrentía. Sin embargo, en la realidad, las calles son áreas casi totalmente impermeables que sí aportan al volumen escurrido, por lo tanto, deberán ser incorporadas en alguna de las subcuencas aledañas, o crear nuevas subcuencas para esto.

Las diferentes calles podrán estar conectadas usando nodos. Estos nodos son los únicos elementos que caracterizan la elevación del modelo y, por ende, las pendientes de las calles y otros conductos. Estas elevaciones deberán ser coherentes con el diseño de la red vial y el MDE utilizado. Lo anterior influirá directamente en la dirección de los flujos y el funcionamiento de la red en general. Estos nodos permitirán además conectar la red superficial a la subsuperficial, e incluso al modelo subterráneo en caso de trabajar acoplados.

El Manual de Drenaje Urbano (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2013) establece condiciones de diseño y verificación en función de la altura de agua que existe en las cunetas durante tormentas, por lo que estas deberán ser estudiadas en el proceso de diseño.

### Colectores subsuperficiales

En el caso de existir una red subsuperficial de colectores pluviales que conduzcan el agua fuera de la ciudad, esta debe ser incorporada en el modelo superficial. En el Ejemplo N°7 del Manual de Aplicaciones de SWMM se detalla la metodología para la incorporación de este sistema (Gironás et al., 2009).

### Cursos de agua naturales y artificiales

En caso de existir cursos de agua como esteros, quebradas o canales artificiales que interactúen con las aguas urbanas, deben ser incorporados como canales abiertos con secciones transversales determinadas según el levantamiento topobatemétrico. Para cada cambio importante de sección transversal, se deberá incorporar un nodo junto con un nuevo tramo para representar esta nueva sección. Estos nodos cumplen además un rol relevante en el intercambio de flujos con el modelo subterráneo, en el caso de realizar un acople.

Para caracterizar hidráulicamente las calles es necesario definir su **coeficiente de rugosidad de Manning**. La siguiente tabla detalla los valores recomendados para conductos abiertos.

### Coeficientes de rugosidad de Manning propuestos para canales abiertos (ASCE, 1982)

| Tipos de canal                      | Manning (n)   |
|-------------------------------------|---------------|
| <b>Canal recubierto</b>             |               |
| Asfalto                             | 0,013 - 0,017 |
| Ladrillos                           | 0,012 - 0,018 |
| Concreto                            | 0,011 - 0,020 |
| Escombros                           | 0,020 - 0,035 |
| Vegetal                             | 0,030 - 0,400 |
| <b>Excavados o dragados</b>         |               |
| Tierra, recta y uniforme            | 0,020 - 0,030 |
| Tierra, sinuoso y bastante uniforme | 0,025 - 0,040 |
| Roca                                | 0,030 - 0,045 |
| Sin mantención                      | 0,050 - 0,140 |

### Incorporación de precipitaciones

Tal como se mencionó, SWMM tiene la capacidad de modelar eventos aislados, cuyo objetivo generalmente es modelar grandes tormentas (modelación por eventos), o bien modelar series de tiempo de larga data de precipitación (modelación continua). Lo anterior permite obtener mayor variedad de resultados (explicados más adelante), además de permitir el acople del modelo SWMM con el modelo subterráneo. En el caso de esta guía, se utilizan ambos enfoques, dependiendo del objetivo que se quiere lograr.



**Modelación continua:** se requiere de una serie continua de precipitación de un periodo largo de tiempo (2 años o más) y con una resolución temporal horaria o menor. Esto último ya que la respuesta del modelo superficial, al igual que en la realidad, es bastante rápida. Para obtener estas series a partir de los registros diarios de estaciones meteorológicas disponibles, se pueden seguir las recomendaciones expuestas en la Etapa 2, Capítulo 4. La metodología de relleno, transposición y desagregación de datos se muestra en detalle en el caso de estudio aplicado en Llanquihue y expuesto en el Volumen III de esta guía.



**Modelación por eventos:** se deben construir tormentas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno y duración, de forma de poder estudiar su respuesta en la red de drenaje urbano. Existen distintos criterios de diseño para construir esas tormentas. El Manual de Drenaje Urbano, en su Capítulo 4, presenta distintas metodologías dependiendo del tipo de elemento y la escala de la red. Uno de los insumos principales son las curvas IDF explicadas en el Volumen I, Sección C de esta guía. Este enfoque por eventos se utiliza principalmente en el proceso de iteración y diseño explicado en la Etapa 4, Capítulo 2 de este volumen.

## Incorporación de series de evapotranspiración



En el caso de modelar **series de larga data de forma continua**, la evapotranspiración cobra relevancia en el balance hidrológico de la cuenca. Al existir una brecha importante en el monitoreo de datos para la estimación de la tasa de evapotranspiración, se decide estimar este parámetro a partir de relaciones empíricas. En este caso, se propone utilizar la ecuación Hargreaves (1985) (Hargreaves & Allen, 2003), a partir de la cual se estima la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$  o RET) utilizando solo la temperatura y radiación como variables de entrada. La ecuación de Hargreaves tiene la siguiente forma:

$$ET_0 = 0,0023 R_a (TC + 17,8) TR^{0,5}$$

$R_a$ : Radiación extraterrestre (mm/día).

TC: Temperatura media (°C) a escala diaria.

TR: Diferencia entre la temperatura máxima y mínima registrada (°C) en el día.

Estas tasas se pueden agregar a escala mensual usando un valor constante para cada mes. El parámetro de radiación dependerá de la ubicación de la zona en estudio.

Para transformar la tasa de evapotranspiración de referencia a la real en la zona de estudio, se recomienda seguir la **metodología de WUCOLS** (*"Water Use Classification of Landscapes Plants"*) propuesta por Costello & Jones (2014). A grandes rasgos, la metodología utiliza un coeficiente de paisaje que pondera tres factores relevantes:

- Las especies de plantas existentes
- La densidad de vegetación
- El microclima que puede producirse en zonas urbanas.

La **tasa de evapotranspiración de paisaje ( $ET_L$ )** es:

$$ET_L = K_e \times K_d \times K_m \times ET_0$$

**$K_e$ : Coeficiente de especie**, apunta a cuantificar la demanda hídrica de diferentes especies. Varía entre 0,1 y 0,9 y se divide en cuatro categorías: Muy baja, Baja, Moderada y Alta.

Para clasificar la vegetación existente en el lugar, se utiliza una tabla propuesta por la División de Agricultura y Recursos Naturales de la Universidad de California (Costello & Jones, 2014).

**$K_d$ : Coeficiente de densidad**, busca considerar la diferencia en la densidad (área colectiva de hoja) de vegetación. Varía entre 0,5 y 1,3 y tiene tres categorías: Baja, Promedio y Alta.

**$K_m$ : Coeficiente de microclima**, apunta a considerar los efectos de la temperatura, la velocidad del viento, la intensidad de la luz y humedales que pueden variar en función de los elementos urbanos existentes. Varía entre 0,5 y 1,4 y tiene tres categorías: Baja, Promedio y Alta.

El detalle de esta metodología se explica en la guía WUCOLS. En la siguiente tabla se expone un resumen de las categorías para cada coeficiente y su rango de variación.

| Coeficiente          | Alta    | Moderada | Baja    | Muy baja |
|----------------------|---------|----------|---------|----------|
| Especie ( $K_e$ )    | 0,7–0,9 | 0,4–0,6  | 0,1–0,3 | <0,1     |
| Densidad ( $K_d$ )   | 1,1–1,3 | 1,0      | 0,5–0,9 |          |
| Microclima ( $K_m$ ) | 1,1–1,4 | 1,0      | 0,5–0,9 |          |

Finalmente, se debe tener en cuenta que en una zona urbana existe bastante variabilidad entre especies y superficies, lo cual debe ser considerado cuando se ingresa la tasa en el modelo SWMM, sobre todo considerando la escala del modelo. Una forma de hacerlo es ponderar por área según la tasa de cada superficie. En esta ponderación, se recomienda considerar para las superficies totalmente impermeables, y para los espejos de agua, la tasa de evaporación potencial (PET).

## B Modelo subterráneo MODFLOW

Como se menciona en la Etapa 2, Capítulo 6 de esta guía, hay zonas urbanas donde el nivel freático se encuentra muy cercano a la superficie, por lo que estudiar las interacciones entre la red superficial y las aguas subterráneas cobra importancia. Esta influencia de las aguas subterráneas puede repercutir en el funcionamiento y capacidad de control de ciertas técnicas LID implementadas, como también en el comportamiento de cuerpos de agua naturales.

**Si no se trabaja con un modelo acoplado superficial-subterráneo, se podría estar, por ejemplo, sobreestimando la capacidad de infiltración de ciertos elementos o subestimando las alturas de agua en algunos cuerpos naturales. Para evitar estos problemas, es necesario construir en paralelo al modelo superficial un modelo de aguas subterráneas que considere además el intercambio de flujos entre la capa subterránea y la capa superficial.**

**\*Esta tarea implica mayor conocimiento y experiencia en modelación y programación.**

Para modelar las aguas subterráneas se recomienda utilizar el modelo MODFLOW, creado por la U.S. Geological Survey's (USGS). Este corresponde a un modelo de diferencias finitas, que simula flujos permanentes e impermanentes, donde las capas de acuíferos pueden ser confinados, no confinados o una mezcla de ambos (Harbaugh, 2005). MODFLOW es capaz de incorporar la simulación de diferentes procesos hidrogeológicos a través de los llamados "paquetes". Algunos de los más utilizados son: el paquete de recarga superficial (RCH), el paquete de drenes o exfiltración a la superficie (DRN), y el paquete de evapotranspiración (EVT).

Para construir y correr un modelo MODFLOW estándar existen diversas interfaces gráficas (UI), tales como Visual MODFLOW o Model Muse. Para este caso particular, en el que debe existir intercambio de información en cada paso de tiempo con el modelo superficial, se debe correr el modelo a través de un código *Python*, utilizando la librería *FloPy* (Bakker et al., 2016). Esta librería permite desarrollar, ejecutar y procesar los modelos que forman parte de la familia de códigos MODFLOW. En el script o código se establecen las variables necesarias para definir la grilla, los parámetros hidrogeológicos, las condiciones iniciales, las condiciones de borde y toda otra información requerida por la simulación (Bakker et al., 2016). Para complementar y apoyar la conceptualización de un modelo MODFLOW a través de *FloPy*, se recomienda fuertemente utilizar librerías *Python* para leer y procesar información geoespacial (p. ej. *shapefiles* y rásteres basados en SIG) como *GeoPandas*.



Los paquetes empleados y el nivel de complejidad del modelo MODFLOW conceptualizado dependerá fundamentalmente de la cuenca en estudio y de su información disponible. De forma genérica, la siguiente tabla muestra las variables del modelo, la información necesaria para correrlo y las posibles fuentes de información según el paquete de MODFLOW. Para más detalle, revisar el caso de estudio aplicado en la ciudad de Llanquihue (Volumen III).

### Variables e información necesaria para algunos de los paquetes MODFLOW comúnmente utilizados

| Paquete | Información necesaria                                  | Variable MODFLOW asociada                                                                                     | Observaciones                                                                                                                                                                                                  |
|---------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DIS     | Discretización espacial usando grilla georreferenciada | Número de capas, columnas y filas; con su alto, ancho y alto. Elevación superior e inferior de la grilla.     | Para determinar las elevaciones para cada celda definida se recomienda ensamblar la grilla al MDE de la cuenca.                                                                                                |
| DIS     | Discretización temporal                                | Número de periodos a simular, largo de los periodos, paso de tiempo y su variabilidad en tiempo.              | Como el modelo subterráneo se encuentra acoplado a uno superficial, se recomienda utilizar un paso de tiempo diario.                                                                                           |
| BAS     | Condición inicial                                      | Elevación de la napa freática para cada celda en el primer paso de tiempo simulado.                           | Se sugiere correr solo el modelo subterráneo y utilizar la solución de flujo permanente como condición inicial.                                                                                                |
| BAS     | Condiciones de borde                                   | Altura de agua para aquellas celdas que corresponden a cuerpos de agua cuya altura se impone y no se calcula. | Se utilizan las series de tiempo descritas en la Etapa 2, Capítulo 6.                                                                                                                                          |
| UPW     | Propiedades hidráulicas                                | Conductividad hidráulica, capacidad de almacenamiento y tipo de acuífero para cada celda.                     | Dependerá de la caracterización hidrogeológica y tipos de suelos descritos en la Etapa 2, Capítulo 6. Estos deberán ser coherentes con los parámetros de infiltración establecidos para el modelo superficial. |
| DRN     | Capacidad de drenar                                    | Celdas dren activas y su conductancia asociada.                                                               | En zonas urbanas, se debe considerar que las zonas impermeables no tienen capacidad de drenar. Solo algunas áreas verdes y cuerpos de agua, como humedales, tendrán esta posibilidad.                          |
| RCH     | Recarga por infiltración del modelo superficial        | Tasa de recarga para cada celda.                                                                              | La recarga se aplica en la capa superior del modelo, la magnitud de la tasa de recarga queda dada por el volumen de agua infiltrado por SWMM en el paso de tiempo asociado.                                    |

## C

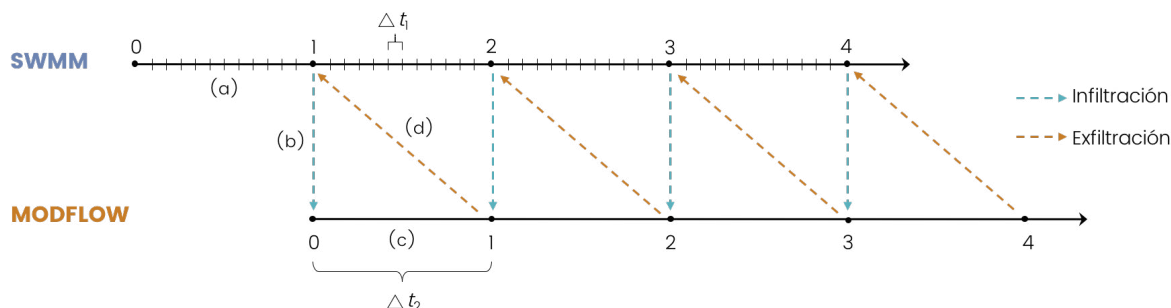
### Integración modelo superficial y subterráneo (acople SWMM-MODFLOW)

Con el objetivo de simular correctamente aquellas ciudades que tienen una fuerte influencia de las aguas subterráneas en la red de drenaje urbano (p. ej. Llanquihue, Concepción, Valdivia) se propone desarrollar un nuevo modelo acoplado SWMM-MODFLOW, que es capaz de correr ambos modelos en paralelo e intercambiar información en cada paso de tiempo. El nuevo modelo acoplado se desarrolla en *Python* usando las librerías *PySWMM* (McDonnell et al., 2020), pudiendo correr el modelo SWMM y utilizar *FloPy* para construir, ejecutar y procesar el modelo MODFLOW; todo esto apoyado de herramientas SIG que permiten georreferenciar ambos modelos.

Modelar el comportamiento hidrológico y las interacciones entre la escorrentía urbana, cuerpos naturales de agua, LID y agua subterránea implica la integración de procesos físicos que poseen escalas temporales y espaciales muy diferentes. Por lo anterior, los modelos que simulan estos procesos también poseen dominios y discretizaciones diferentes. A continuación, se describe la estructura del intercambio temporal de flujos y la integración espacial del modelo superficial SWMM y subterráneo MODFLOW.

## Intercambio temporal de flujos

Acoplar modelos implica la transferencia de datos en ambos sentidos. Si dos modelos están acoplados, los resultados de uno tienen impacto en el otro y viceversa. **La estructura temporal de transferencia de datos entre los modelos SWMM y MODFLOW** se muestra en la siguiente figura.



- (a): Simulación de procesos lluvia-escorrentía usando SWMM y  $\Delta t_1$  como paso de tiempo.
- (b): Infiltración agregada se transfiere a MODFLOW como recarga.
- (c): Simulación de aguas subterráneas usando MODFLOW con un paso de tiempo  $\Delta t_2$ .
- (d): El agua drenada/exfiltrada desde MODFLOW se integra al modelo superficial, SWMM.

La idea general es que el modelo superficial SWMM corre con un paso de tiempo  $\Delta t_1$ , menor al espacio de tiempo  $\Delta t_2$  del modelo MODFLOW. Esto ya que las respuestas superficiales son bastante rápidas, generalmente del orden de 30 segundos a 1 minuto, mientras que la respuesta en la capa subterránea es más lenta, del orden de 1 día o más. Debido a esta diferencia de escalas temporales, la infiltración del modelo SWMM se suma durante todo el paso de tiempo del modelo MODFLOW. Esta infiltración generada por el modelo SWMM se incorpora en el modelo MODFLOW como recarga constante en las celdas superiores del modelo. Después de que MODFLOW corre durante un espacio de tiempo, el agua subterránea se incorpora al modelo superficial SWMM como exfiltración. Esta estructura se repite durante el resto del tiempo simulado.

## Integración espacial de ambos modelos

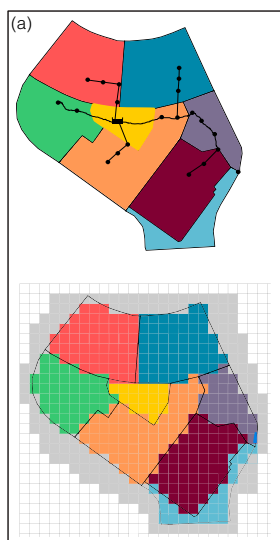
Para permitir el intercambio de flujos explicado en la figura anterior, y debido a las diferencias de la discretización espacial de SWMM (conjunto de subcuencas), y a la grilla estructurada de MODFLOW, es necesario geolocalizar las subcuencas, nodos y unidades de almacenamiento de SWMM en las correspondientes celdas de MODFLOW y viceversa.



Para lograr la transferencia desde el modelo SWMM a MODFLOW, se deben implementar herramientas SIG para georeferenciar espacialmente todos los elementos de SWMM, que por naturaleza no se encuentran geolocalizados. En este caso, todas las subcuencas SWMM y los nodos de almacenamiento deben estar representados usando shapefiles para después poder desagregar los polígonos en las celdas MODFLOW.

Lo anterior se representa en la cuenca hipotética mostrada en la **figura A** de la siguiente página: en la imagen superior se muestran las subcuencas de SWMM representadas a través de polígonos; en la imagen inferior, las celdas MODFLOW asociadas a cada una de estas subcuencas. Notar que la unidad de almacenamiento debe quedar referenciada según el área superficial que abarca. Al hacer esto, se vuelve factible la transferencia de infiltración variable en el espacio, desde el modelo superficial hacia el modelo subterráneo como recarga.

Desagregación espacial de las subcuencas en celdas MODFLOW.



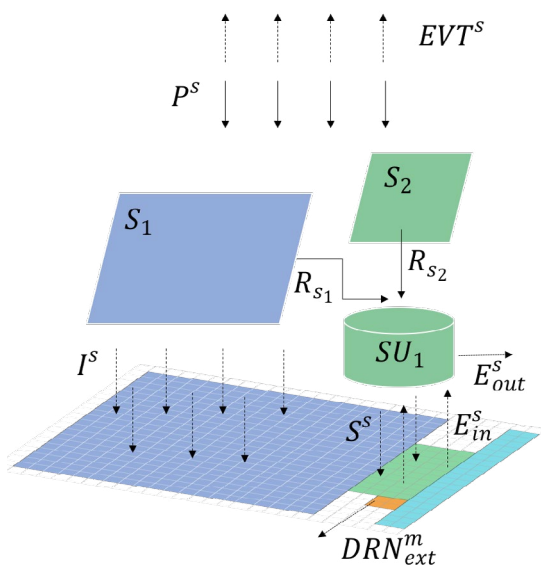
Asociación de celdas MODFLOW a nodos SWMM para incorporar agua exfiltrada.



Para permitir la transferencia de información en el sentido contrario, es decir, desde el modelo MODFLOW al modelo SWMM, es necesario asociar a cada celda que tenga capacidad de drenaje un nodo o unidad de almacenamiento para incorporar el agua exfiltrada. En particular, se deben definir zonas que dirijan sus aguas drenadas a nodos SWMM determinados. Luego, las tasas exfiltradas se incorporan a estos nodos como flujo externo. La **figura B** muestra un ejemplo: en la imagen superior se indican los nodos del modelo SWMM y en la inferior, las celdas que drenan a cada uno de estos nodos en el caso de exfiltrar. Considerando la importante interdependencia que existe en algunos casos entre el sistema subterráneo y la red de drenaje urbana, el criterio del modelador es muy relevante en este paso.

Naturalmente, el proceso de exfiltración se da en las zonas bajas de las ciudades y en aquellas donde la napa freática es somera. De esta forma, el modelo acoplado es capaz de representar zonas como humedales u otros cuerpos de agua que poseen agua constantemente y que, a pesar de tener capacidad de infiltración, mantienen un espejo de agua continuo o durante largos periodos de tiempo.

En la siguiente figura se muestra otra forma de esquematizar la integración espacial de los modelos y su transferencia de flujos.



Este esquema corresponde a un modelo muy simple, en el que solo existe una subcuenca urbana ( $S_1$ ) que drena a un cuerpo de agua, representado por una subcuenca impermeable ( $S_2$ ) y una unidad de almacenamiento ( $SU_1$ ) con una curva de almacenamiento constante\*.

El modelo simplificado considera que tanto la escorrentía producida por la cuenca urbana, como la que se genera localmente en el cuerpo de agua ( $R_{s_1}$ ,  $R_{s_2}$ ) drenan a la unidad de almacenamiento.

La infiltración de la subcuenca ( $I^s$ ) y la del cuerpo de agua ( $S^s$ ) se incorporan como recarga en la grilla de MODFLOW. Por otro lado, el agua exfiltrada en la zona que tiene capacidad de drenar (marcada en verde) se incorpora como flujo externo en la unidad de almacenamiento ( $E_{in}^s$ ).

Adicionalmente, se muestran los flujos de salida del modelo superficial ( $E_{out}^s$ ), del modelo subterráneo ( $DRN_{ext}^m$ ) y la precipitación ( $P^s$ ) y evapotranspiración ( $EVT^s$ ).



\*El cuerpo de agua en el modelo se representa a través de una subcuenca y una unidad de almacenamiento, ya que la unidad de almacenamiento por sí sola no tiene la capacidad de recibir precipitación. Para modelar la subcuenca correspondiente al cuerpo de agua se recomienda utilizar una subcuenca totalmente impermeable, sin capacidad de almacenamiento y de alta pendiente, considerando así el almacenamiento instantáneo de toda la precipitación que cae sobre el espejo de agua.

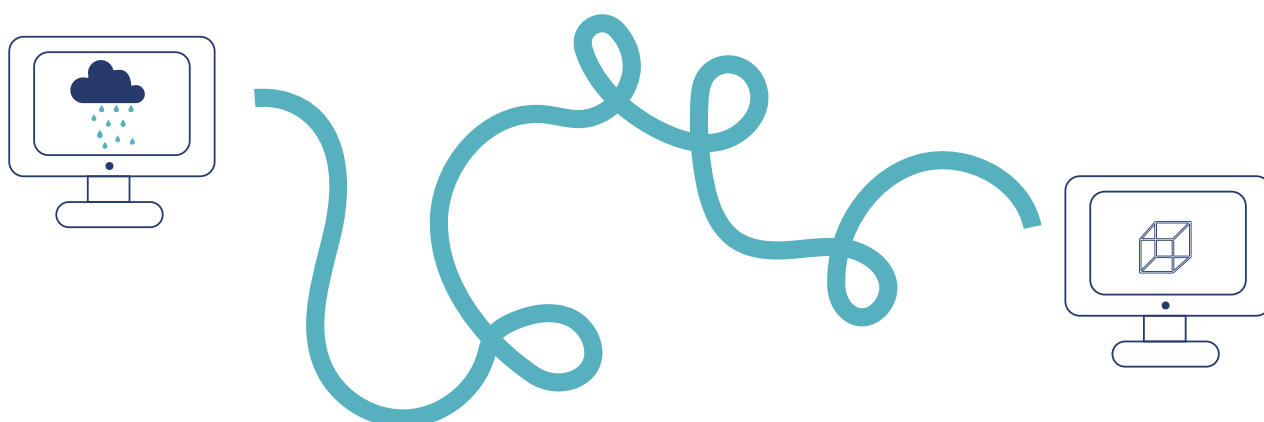
**Disponibilidad del código acople SWMM-MODFLOW:** el código *Python* utilizado para el acople de los modelos SWMM y MODFLOW descrito se encuentra disponible en el repositorio de *GitHub* [tscheuch/ACOPLE-SWMM\\_MODFLOW\\_LLQH](https://github.com/tscheuch/ACOPLE-SWMM_MODFLOW_LLQH).



# 3

## Calibración del modelo

---



Para calibrar los modelos de simulación continua lo ideal es contar con series de tiempo de alturas de agua o caudales que permitan ajustar los parámetros adoptados, ya que muchos de estos parámetros se adoptan inicialmente en base a varios supuestos. Este capítulo presenta recomendaciones para orientar este proceso.

Algunas de las métricas más utilizadas son: el error cuadrático medio, el sesgo, el coeficiente de Nash-Sutcliffe y el coeficiente de correlación de Pearson. Otro enfoque comúnmente utilizado es calibrar el modelo a partir de las curvas de frecuencia y de duración de los datos observados y simulados.



**La realidad es que muchas veces no existen series de tiempo de altura y caudal en el sector urbano que permitan hacer una calibración usando los métodos descritos anteriormente.**

Entonces, para poder calibrar los modelos **se propone utilizar variables categóricas levantadas en terreno, a través del trabajo con vecinos y entrevistas**, que permitan aprovechar su conocimiento de los espacios que habitan (ver Etapa 2, Capítulo 5). Se utilizan preguntas del tipo: *¿qué sector(es) se inunda(n) frecuentemente?*, *¿con qué frecuencia se inunda el sector?* y *¿cuánto se inunda?* Estas preguntas podrían variar según los objetivos del estudio y la información disponible, pero es importante notar que generalmente son los eventos que generan más problemas de inundación los que quedan marcados en la memoria colectiva.

Se propone construir una **tabla de contingencia** para realizar una evaluación concurrente. Para ello, se recomienda definir una variable categórica en función de la información levantada y construir la tabla como se indica a continuación.

**Tabla de contingencia para evaluación de variables categóricas**

|          |    | OBSERVADO |                        |
|----------|----|-----------|------------------------|
|          |    | SI        | NO                     |
| MODELADO | SI | Éxito (E) | Falsa Alarma (FA)      |
|          | NO | Falla (F) | Correcto Negativo (CN) |

En este caso, un modelo perfecto sería uno en el que F y FA son iguales a cero. Bennett et al. (2013) proponen las siguientes **métricas para evaluar la concurrencia del modelo** según la tabla anterior:

#### Precisión (P)

$$P = (E + CN) / (Total)$$

$P = 1$ : Modelo ideal

#### Score de Sesgo (S)

$$S = (E + FA) / (E + F)$$

$S = 1$ : Modelo ideal

$S < 1$ : sesgo hacia la subestimación

$S > 1$ : sesgo hacia la sobreestimación

#### Índice de Éxito Crítico (IEC)

$$IEC = E / (E + F + FA)$$

#### Probabilidad de Detección (PD)

$$PD = E / (E + M)$$

$PD = 1$ : Modelo ideal

A continuación se listan los parámetros recomendados para calibrar los modelos superficial y subterráneo. Estos fueron seleccionados en base a dos criterios: el primero, la sensibilidad de los resultados del modelo frente a cambios en el parámetro; y el segundo, la dificultad para medir el parámetro en terreno y la incertidumbre sobre su verdadero valor.

● **Parámetros a calibrar en el modelo superficial**

- Infiltración en subcuencas y unidades de almacenamiento.
- Rugosidad en subcuencas.
- Curvas de descarga que controlan obras de entrada o salida.

● **Parámetros a calibrar en el modelo subterráneo**

- Conductividad hidráulica.
- Coeficiente de almacenamiento.
- Conductancia para las celdas dren.

# 4

## Análisis de resultados

---



---

Los resultados que se obtienen a partir de los pasos anteriores permiten, por una parte, entender la hidrología del lugar y verificar el correcto funcionamiento del modelo y, por otra, evaluar los efectos de las precipitaciones en la ciudad y apoyar la toma de decisiones.

## A

## Resultados de la caracterización hidrológica

Estos resultados están orientados a caracterizar el comportamiento hidrológico del sector y verificar el funcionamiento del modelo. Se recomienda fuertemente apoyar esta lectura con el Volumen III de esta guía, que aborda el caso aplicado en la ciudad de Llanquihue.

## Análisis de continuidad

Una de las ventajas de acoplar modelos usando la transferencia de flujos es que se puede estudiar la continuidad de ambos modelos por separado, así como la continuidad global del modelo acoplado. De esta forma, se puede corroborar que las entradas, salidas y volumen almacenado son coherentes, y que no se pierde masa de agua en la simulación. Para evaluar la continuidad, se pueden estudiar tres balances de masa: la asociada a SWMM, la asociada a MODFLOW y la asociada al intercambio de flujos entre ambos modelos.

## Continuidad en SWMM

$$P^s + E_{in}^s - E_{out}^s - EVT^s - I^s - S^s - F^s = S_f^s - S_i^s$$

La simbología utilizada sigue las siglas en inglés de cada uno de estos flujos. El superíndice "s" hace referencia al modelo SWMM.

$P^s$  = Volumen total precipitado.

$E_{in}^s$  = Flujo externo total incorporado en unidades de almacenamiento o nodos.

$E_{out}^s$  = Flujo superficial que sale de la cuenca.

$EVT^s$  = Volumen evaporado.

$I^s$  = Infiltración en subcuencas.

$S^s$  = Infiltración en nodos de almacenamientos.

$F^s$  = Pérdida de agua por inundación.

$S_f^s$  = Almacenamientos finales.

$S_i^s$  = Almacenamientos iniciales.

## Continuidad en MODFLOW

$$RCH^m + CH_{in}^m - CH_{out}^m - DRN^m = S_{to}^m - S_{from}^m$$

El superíndice "m" hace referencia al modelo MODFLOW.

En este caso, los flujos quedan en función del paso de tiempo  $\Delta t_2$ .

$RCH^m$  = Flujo recargado.

$CH_{in}^m$  = Flujos que vienen de zonas con altura de agua constantes.

$CH_{out}^m$  = Flujos que van a zonas con altura de agua constantes.

$DRN^m$  = Agua total drenada a la superficie.

$S_{to}^m$  = Suma de flujos que van al almacenamiento.

$S_{from}^m$  = Suma de flujos que vienen del almacenamiento.

## Continuidad en intercambio de flujos de ambos modelos

Finalmente, se puede estudiar la conservación de masa en el intercambio de flujos entre modelos. En primer lugar, la recarga en MODFLOW debe ser igual al agua que se infiltra en SWMM:

$$RCH^m \cdot \Delta t_2 = I^s + S^s$$

Luego, toda el agua que drena desde MODFLOW en el dominio del modelo superficial, debe ser incorporada en SWMM como exfiltración:

$$E_{in}^s = DRN_s^m \cdot \Delta t_2$$

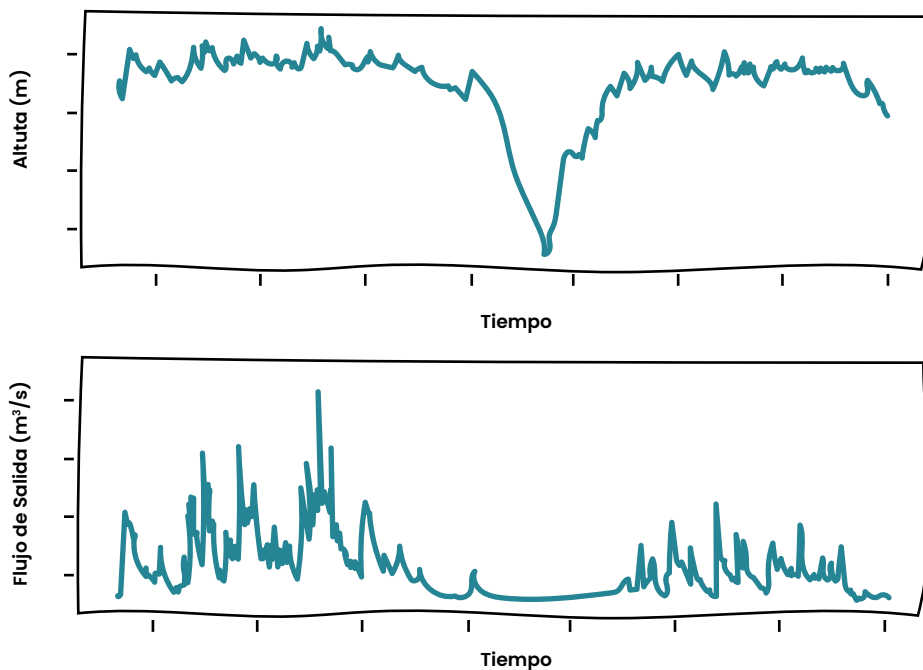
$DRN_s^m$  es el agua drenada por MODFLOW por las celdas que son parte del dominio de SWMM (y por ende, son incorporadas al modelo superficial).

### Serie de tiempo

Para comprender mejor el comportamiento hidrológico del lugar y evaluar el correcto funcionamiento del modelo, se recomienda estudiar la evolución en el tiempo de ciertas variables, especialmente durante tormentas representativas. Si bien la relevancia que tiene cada variable en el comportamiento hidrológico del lugar depende del caso de estudio, a modo general, se recomienda analizar las siguientes:

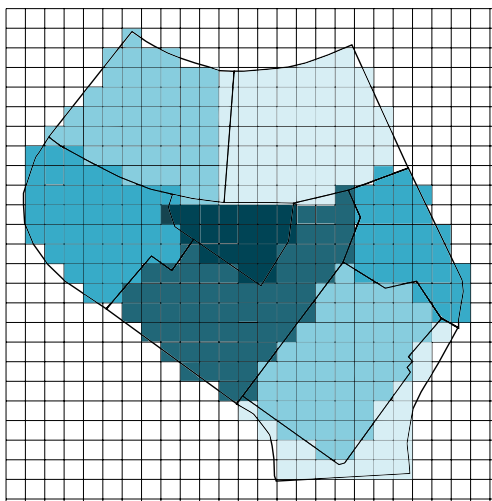
- Alturas de agua en humedales u otros cuerpos de agua representativos.
- Caudales en obras de entrada y salida a estos cuerpos.
- Eje hidráulico de esteros o quebradas importantes.
- Caudales en la salida de la cuenca.
- Escorrentía producida por cada subcuenca.
- Agua infiltrada y drenada en cuerpos de agua.
- Elementos de IV considerados en el modelo y sus diferencias.

Los siguientes gráficos muestran ejemplos de curva de altura de agua y curva de flujo de salida, respectivamente.

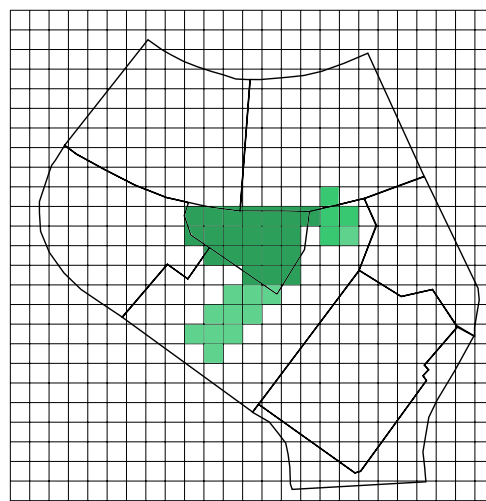


## Mapas con tasa de recarga y exfiltración geoespacializadas

Estudiar de forma espacializada el agua recargada y drenada por el modelo subterráneo permite predecir la formación de espejos de agua en elementos naturales, o incluso puntos de inundación en zonas bajas de la ciudad. Esto entregará una idea general de la interacción entre el modelo superficial y el subterráneo. En la siguiente figura, se presenta una subcuenca hipotética con sus respectivas tasas de infiltración y exfiltración. La escala de colores de más claro a más oscuro representa la magnitud del flujo.



Tasa de infiltración por subcuencas



Tasas de exfiltración para nodos

## Flujos entre zonas en el modelo subterráneo

Para estudiar la distribución de flujos subterráneos, se sugiere utilizar la herramienta de MODFLOW "ZONE BUDGET" y construir tablas resúmenes o matrices que indiquen de dónde y hacia dónde se dirigen estos flujos. Para este tipo de información se recomienda trabajar de forma agregada en el tiempo, preferentemente a escala mensual.

## B Resultados para la toma de decisiones

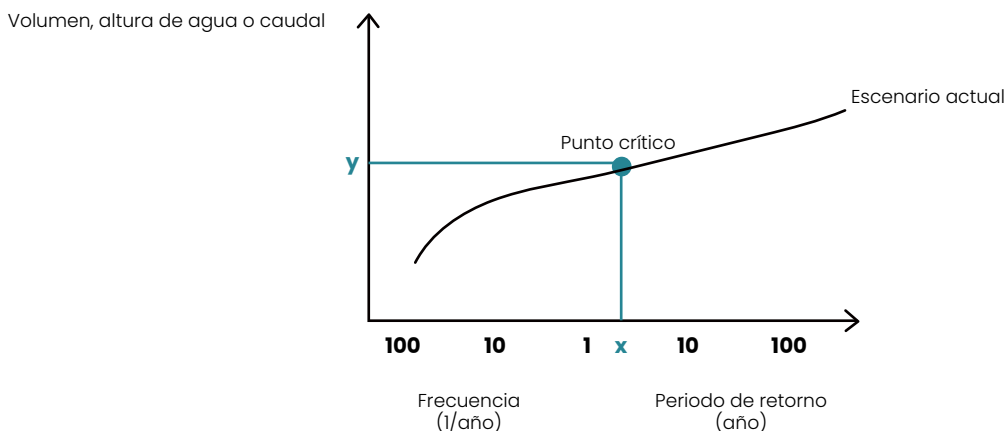
A continuación, se exponen algunos de los resultados que pueden obtenerse a partir del modelo, y que permiten entender mejor la problemática actual y evaluar distintas alternativas de diseño. Estos resultados permiten definir la situación base con la que se compararán luego las soluciones optimizadas, a través de un proceso iterativo explicado en la Etapa 4 de esta guía.

## Curvas de frecuencia de volúmenes, altura de agua o caudales

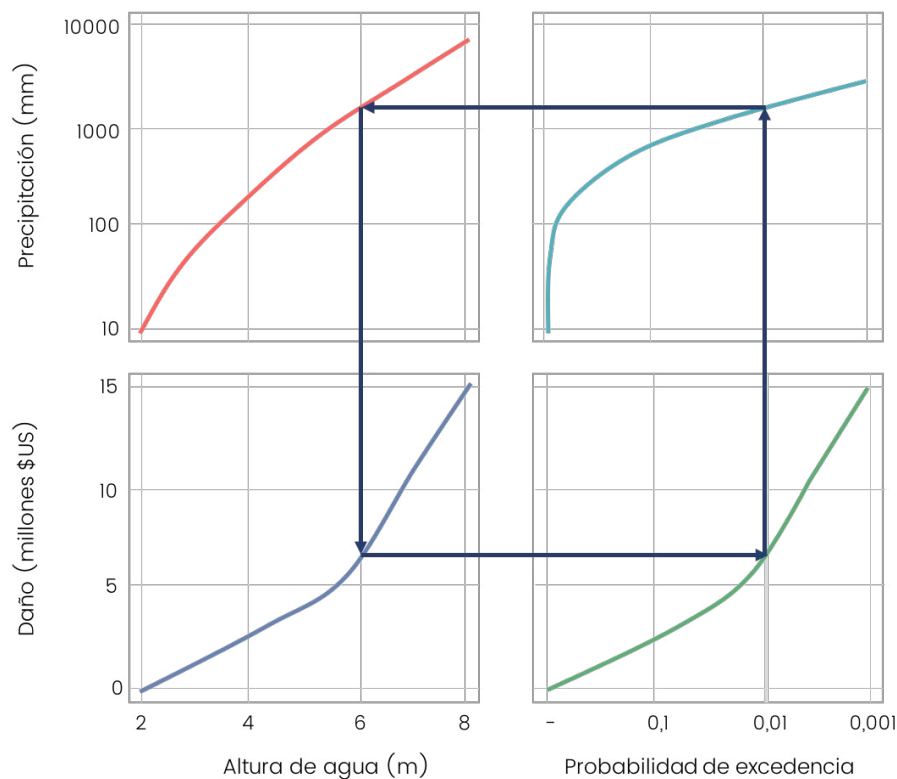
Las curvas de frecuencia permiten conocer, en un punto de interés de la cuenca, el valor esperado de una variable (p. ej. volumen, altura de agua o caudal) en función de su recurrencia. Esta recurrencia se expresa generalmente en términos del periodo de retorno, o su inverso, la probabilidad de excedencia anual. En el caso de la modelación continua de eventos, estas curvas se obtienen generando histogramas a partir de las series de tiempo de las variables estudiadas.

Estos resultados son recursos que apoyan fuertemente la toma de decisiones, particularmente aquellas de diseño que buscan asegurar el cumplimiento de criterios base u objetivos particulares de proyectos. **Se recomienda revisar especialmente los resultados de las curvas de frecuencia de volumen o altura de agua en los puntos críticos de inundación.**

La siguiente gráfica muestra un resultado hipotético para una curva de frecuencia en un punto crítico. **Será de especial interés para la etapa de optimización, estudiar la contribución de cada subcuenca a la altura de agua y/o volumen de aguas lluvias que se genera en cada punto crítico.**



Si además de las curvas de frecuencia de una variable hidráulica, se cuenta con **curvas de fragilidad**, que muestran la relación entre una variable hidráulica (p. ej. altura de agua) y el daño provocado, se puede entonces combinar ambas curvas y estimar una **curva de daño vs. probabilidad**. **Este resultado será útil a la hora de calcular el beneficio social de un proyecto en términos de reducción de costos por menores daños provocados**, lo cual se aborda en la Etapa 4 del presente volumen. El siguiente diagrama conceptual representa cómo los resultados del modelo pueden ser convertidos en estimaciones de daño vs. probabilidad.



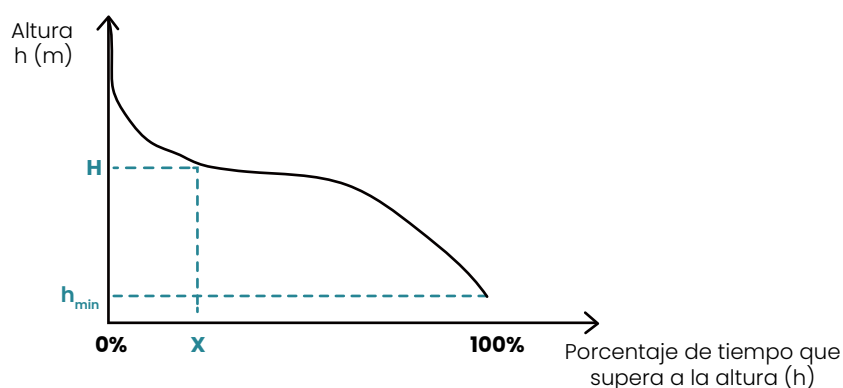


## Curva de duración de altura de agua

Para apoyar la toma de decisiones en torno a la planificación urbana, especialmente cerca de cuerpos de agua de gran valor ecosistémico, se recomienda construir una curva de duración de las alturas de agua de estos cuerpos, utilizando los resultados de la modelación continua realizada. Lo anterior entrega información sobre qué **porcentaje del tiempo la altura de agua supera un valor determinado**. Esta información es valiosa para decidir qué tipo de infraestructura se debe implementar y en qué lugar. También es útil para definir las zonas de restricción y advertencia de distintos cuerpos de agua.

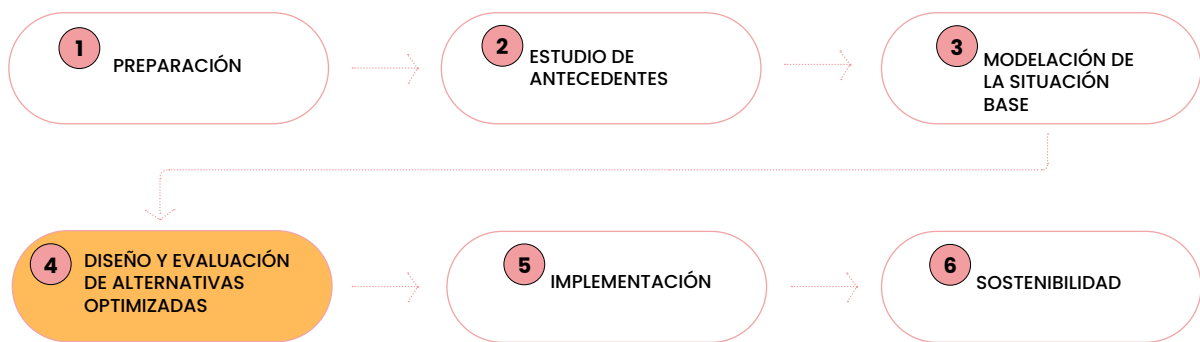
A partir de las curvas de duración se pueden derivar otros resultados relevantes para la evaluación del proyecto y la selección de alternativas de optimización, tales como retrasos en tiempos de viaje u horas al año que una infraestructura pública (calles, pasos peatonales, paraderos, estacionamientos, edificios públicos, escuelas, plazas, parques, etc) permanece inundada o inutilizable.

En la siguiente figura se muestra el tipo de gráfica que se puede obtener a partir de esta información:



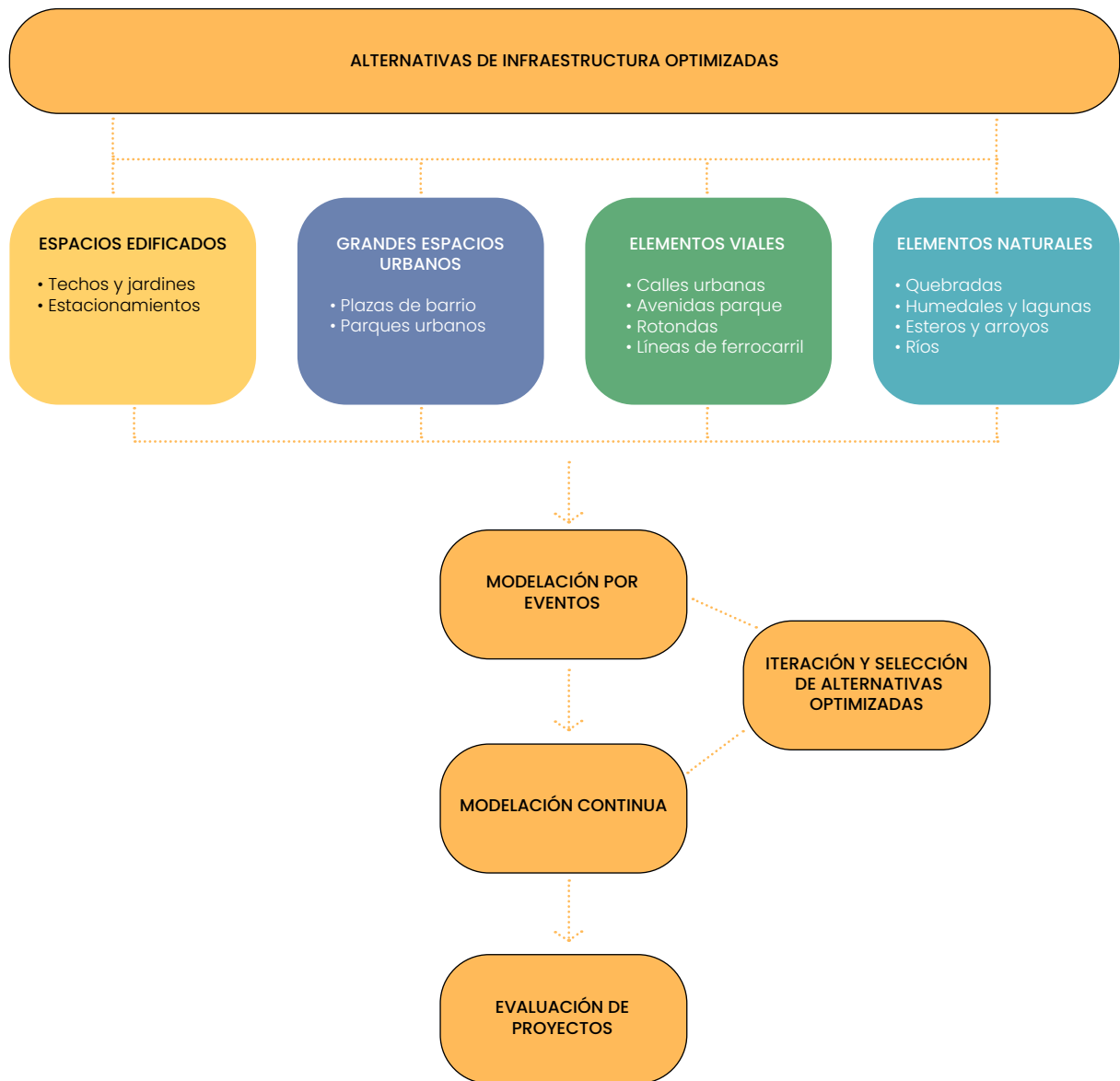
## REFERENCIAS:

- American Society of Civil Engineers. (1982). *Gravity Sanitary Sewer Design and Construction*. ASCE Manual of Practice No. 60. New York, EE. UU.
- Bakker, M., Post, V., Langevin, C. D., Hughes, J. D., White, J. T., Starn, J. J., & Fienen, M. N. (2016). Scripting MODFLOW model development using Python and FloPy. *Groundwater* 54 (5): 733–739. <https://doi.org/10.1111/gwat.12413>
- Bennett, N. D., Croke, B. F., Guariso, G., Guillaume, J. H., Hamilton, S. H., Jakeman, A. J., ... Andreassian, V. (2013). Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, 40, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011>
- Costello, L. R., & Jones, K. S. (2014). WUCOLS IV: *Water use classification of landscape species*. California Center for Urban Horticulture, UC Davis. Recuperado de [https://ucanr.edu/sites/WUCOLS/Download\\_WUCOLS\\_IV\\_List/](https://ucanr.edu/sites/WUCOLS/Download_WUCOLS_IV_List/)
- Gironás, J., Roesner, L. A., Davis, J., & Rossman, L. A. (2009). *Storm water management model applications manual*. Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process* (pp. 6–A16). Reston, VA: US Department of the Interior, US Geological Survey. Recuperado de: [https://wwwbr.cr.usgs.gov/hill\\_tiedeman\\_book/documentation/MODFLOW-MODPATH-ModelViewer/MF2005-tma6a16.pdf](https://wwwbr.cr.usgs.gov/hill_tiedeman_book/documentation/MODFLOW-MODPATH-ModelViewer/MF2005-tma6a16.pdf)
- Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53–63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53))
- McCuen, R. H., Johnson, P. A., & Ragan, R. M. (1996). *Highway hydrology: Hydraulic design series No. 2* (No. FHWA-SA-96-067).
- McDonnell, B. E., Ratliff, K. M., Tryby, M. E., Wu, J. J. X. & Mullaipudi, A. (2020). PySWMM: The Python Interface to Stormwater Management Model (SWMM). *Journal of Open Source Software*, 5(52), 2292, <https://doi.org/10.21105/joss.02292>
- Ministerio de Obras Públicas. (2013). *Manual de Drenaje Urbano: Guía para el diseño, construcción, operación y conservación de obras de drenaje urbano*. Santiago, Chile.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. & Miller, N. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of hydraulic engineering*, 109(1), 62–70.
- Rossman, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. Cincinnati, EE. UU. Recuperado de: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm-version-51-users-manual>
- Zhuk, V., Vovk, L., Matlai, I., Popadiuk, I., Mysak, I., & Fasuliak, V. (2020). Dependency Between the Total and Effective Imperviousness for Residential Quarters of the Lviv City. *Journal of Ecological Engineering*, 21(5), 56–62. <https://doi.org/10.12911/22998993/122191>



## ETAPA 4

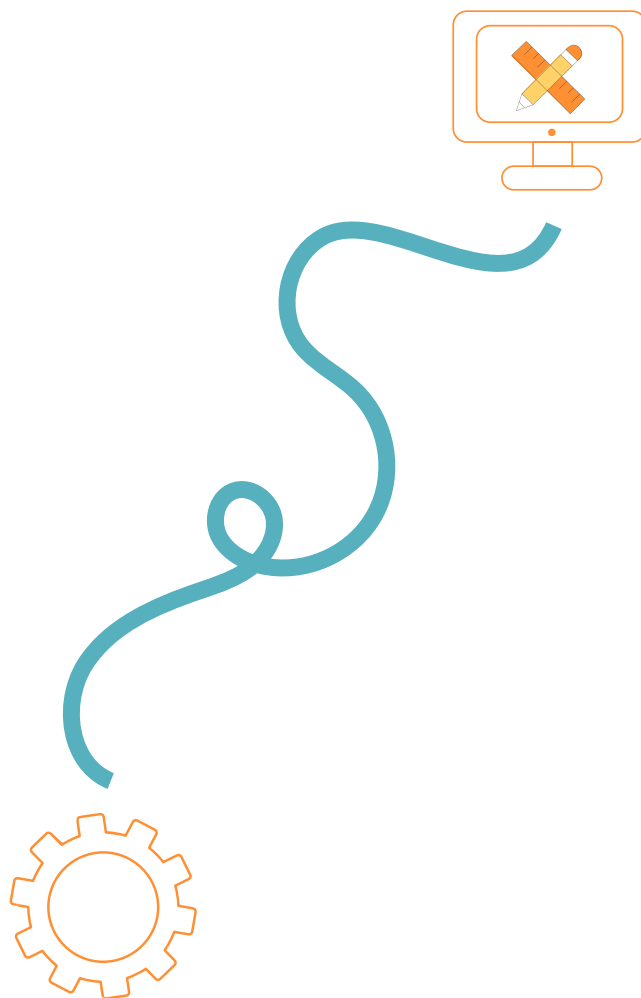
# Diseño y evaluación de alternativas optimizadas





# Enfoque de optimización

---



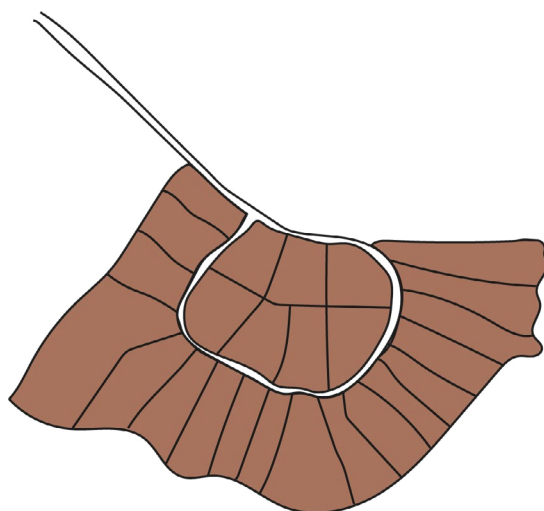
---

Una vez analizados los resultados de la modelación de la situación base, comienza un proceso de diseño para mejorar la capacidad de la red y cumplir con los objetivos fijados. Este proceso puede considerar distintos tipos de soluciones sostenibles de drenaje, que pueden ser preventivas o mitigatorias.

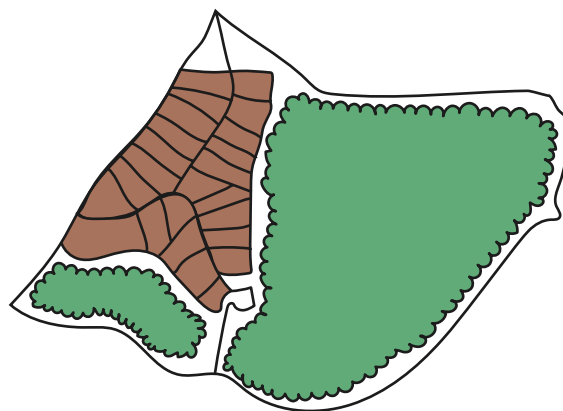
## Medidas preventivas

También llamadas no-estructurales, son todas aquellas que promueven el tratamiento, la infiltración, la evaporación y la evapotranspiración del agua lluvia cerca del sitio donde cae, manteniendo a su vez un paisaje más natural y funcional. Estas pueden ser (Pennsylvania Department of Environmental Protection, 2006):

- **Proteger y conservar zonas naturales funcionales para las aguas lluvias**, como humedales, planicies de inundación y bordes costeros.
- **Proteger y utilizar las redes naturales de drenaje**, como esteros, quebradas y depresiones topográficas.
- **Minimizar el área a intervenir y la mantención a nivel de lote**. Evitar remover la vegetación natural, evitar alterar y compactar el suelo y privilegiar especies nativas de baja mantención.
- **Reducir la cobertura impermeable**. Minimizar ancho y largo de calles y minimizar estacionamientos impermeables.
- **Desconectar, distribuir y descentralizar**. Desconectar canaletas de techos, permitiendo que el agua lluvia caiga directamente en áreas vegetadas para infiltrar, desconectar áreas impermeables como calles y dirigir el agua hacia zanjas con vegetación.
- **Control de sitio**. Utilizar barredoras de calle para aspirar material particulado contaminante y remover basura que pueda tapan la red de drenaje y/o llegar a los cursos naturales de agua.
- **Agrupar y concentrar el área a intervenir en una urbanización**, como se muestra y explica en la siguiente figura:



Urbanización común



Urbanización optimizada: la densidad se mantiene constante, los tamaños de loteo se reducen y **el área sin intervención aumenta**.

## Medidas de mitigación

Una vez que se maximiza la prevención, el caudal peak y el volumen de agua remanente deben ser controlados a través de **obras de mitigación** o soluciones estructurales. Una de las propuestas de esta guía es que **estas obras tomen la forma de los elementos de infraestructura verde ya presentes en el territorio, pero optimizados. Esto considera la adaptación e intervención de los cuerpos verdes y azules para mejorar su capacidad de proveer funciones hidrológicas y de prestar servicios ecosistémicos**. Lo anterior, sin desmedro de la posibilidad de complementar los sistemas sostenibles con soluciones de control tradicional, como la conducción subsuperficial.

El diseño debe considerar:

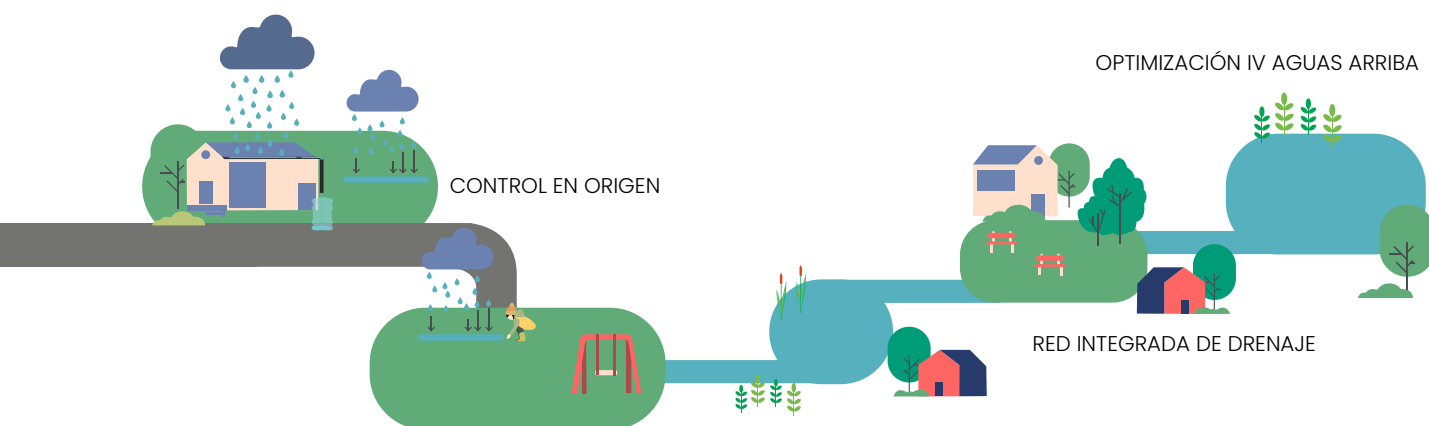
- Los posibles recorridos de una gota de agua sobre la superficie urbana, desde que cae hasta su destino final.
- La proporción de aguas lluvias que son recibidas en las distintas escalas de la red y la capacidad de los espacios para manejar la escorrentía.
- Los objetivos propios del proyecto.

**En los sistemas de drenaje urbano sostenible, uno de los objetivos centrales de diseño es manejar el volumen de captura producido en la red domiciliar y secundaria de aguas lluvias** (revisar Volumen I, Sección C para más detalle sobre el concepto de volumen de captura).

Considerando que solo la **red domiciliar recibe entre un 60% y 80% de las aguas lluvias que precipitan sobre las áreas urbanas** (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2013), controlar la precipitación base en el origen, a esta escala –ya sea infiltrando y/o acumulando las aguas– es clave para reducir el número de eventos anuales de inundación. Un beneficio relevante de este control en origen, especialmente en la macrozona sur, es la reducción de la presión sobre los sistemas de transporte de aguas servidas, sean estos unitarios o no, lo que reduce la frecuencia de descarga de aguas servidas sin tratar a un cuerpo receptor (aliviadero de tormenta).

Cuando se identifican puntos críticos de inundación en el escenario actual, la primera recomendación de optimización es revisar las subcuencas que aportan a la acumulación de aguas lluvias en esos lugares y estudiar el recorrido que ha seguido el agua desde su origen. En el camino, se deberán identificar las oportunidades de optimización de infraestructura verde que se puedan aplicar para el control de estas aguas durante su recorrido, **priorizando desde aguas arriba hacia aguas abajo. Este enfoque sigue la lógica de que las soluciones funcionan mejor cuando forman parte de una red integrada de drenaje, y no como elementos aislados.** En otras palabras, los elementos de infraestructura verde mejorados solo funcionarán óptimamente cuando se adopten soluciones desde aguas arriba.

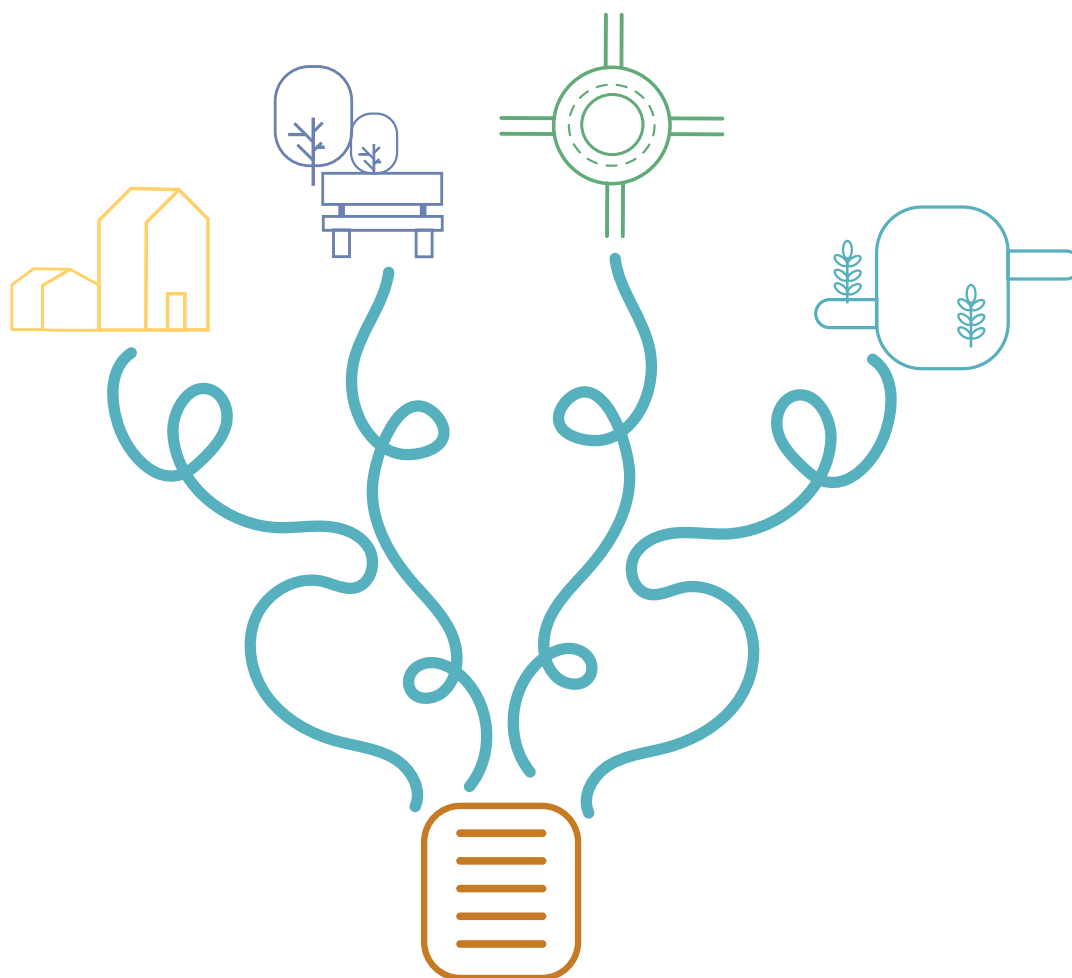
Por otro lado, es importante considerar que los espacios naturales que pertenecen a las zonas bajas de la red de drenaje, particularmente cuerpos y cursos naturales de agua, pueden no necesitar mayor intervención para proveer funciones hidrológicas. En este sentido, se recomienda aplicar medidas de optimización siempre que sea necesario proteger dichos espacios –o proteger a otros aguas abajo– de los impactos negativos de la urbanización.



A continuación, se presentan fichas de orientación para optimizar el uso de infraestructura verde maximizando la provisión de funciones hidrológicas y servicios ecosistémicos. El orden en que son presentadas responde al enfoque propuesto por la guía, esto es, **desde aguas arriba hacia aguas abajo**.

## 2

# Fichas de optimización de la infraestructura verde



La ciudad está llamada a contribuir positivamente al ciclo hidrológico, al tiempo que fortalece otros servicios del ecosistema urbano. Con ese objetivo, este capítulo propone una serie de estrategias de diseño que pueden ser implementadas en algunos de los espacios urbanos típicos de las ciudades del sur de Chile. Para ello, se presenta una descripción del escenario optimizado de drenaje urbano sostenible (DUS), planimetría iconográfica, ventajas/desventajas y requerimientos de mantención. Cabe destacar que estas soluciones deben ser concebidas como un sistema interconectado para obtener su mejor aprovechamiento.



## A

## Metodología de elaboración

Para desarrollar las fichas de optimización de infraestructura verde que se presentan más adelante, el primer paso fue definir aquellas funciones relevantes:

### Funciones hidrológicas

- Infiltración
- Almacenamiento
- Conducción

### Servicios ecosistémicos

- Reducción de riesgo de inundación por precipitaciones
- Depuración de aguas
- Provisión de hábitat de vida silvestre
- Provisión de espacios de recreación

Luego, para cada tipo de infraestructura verde, se propuso una alternativa bajo la cual se optimizan estas funciones hidrológicas y servicios ecosistémicos. Esta optimización se basó en la integración de las **soluciones tipológicas para el drenaje urbano sostenible, conocidas como soluciones DUS o LID (*Low Impact Development*)**, en conjunto con criterios asociados a las áreas de ecología urbana, arquitectura del paisaje y ciencias ambientales (más adelante se puede encontrar un glosario de las soluciones DUS incorporadas en el proceso de optimización de cada tipo de infraestructura verde).

**La construcción de alternativas de optimización de infraestructura verde se basó en** criterios de diseño obtenidos de literatura especializada (p. ej. Flores et al, 1998; Benedict & McMahon, 2012; Landscape Institute, 2009; Luoni et al., 2010). Estos fueron los siguientes:

- **Proteger los cuerpos de agua receptores** de la contaminación difusa que generan las aguas lluvias.
- **Privilegiar suelos permeables** (no impermeabilizados con hormigón u otro material).
- **Propiciar coberturas vegetales complejas** (diversos estratos), usando especies con aptitudes según su uso y condiciones microclimáticas urbanas, idealmente nativas.
- Para los casos en que se deba restaurar un elemento natural de infraestructura verde, **priorizar el uso de vegetación nativa** en su mayor extensión posible.
- En los casos de cursos o cuerpos de agua, **conservar los cauces en su estado más natural posible**, evitando la impermeabilización del lecho y sus bordes.
- **Incorporar equipamiento urbano mínimo** (bancas, luminaria y otros mobiliarios urbanos propios del espacio público) en los casos que corresponda.
- **Mantener los anchos máximos permitidos** para la faja de resguardo de cada tipo de infraestructura verde, según los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT).
- **Favorecer usos de suelo designados como de bajo impacto** según los IPT (áreas verdes por sobre la vialidad u otro uso de alto impacto).

- **Mantener un flujo de aguas lluvias ininterrumpido entre áreas impermeables y permeables,** eliminando obstáculos continuos como soleras u otros.
- Para elementos naturales de infraestructura verde, **acotar las zonas de aproximación y uso público,** priorizando y resguardando los espacios para la vida silvestre.

Finalmente, se analizó la pertinencia y factibilidad de incluir estas soluciones y criterios en cada uno de los tipos de infraestructura verde identificada en las ciudades de la macrozona sur de Chile; en función de sus características espaciales, regulatorias y de uso de suelo. Todo este análisis tomó forma en 13 fichas de escenarios optimizados que se exponen más adelante.

## B

### Evaluación de desempeño funcional de la infraestructura verde

Para comprender la multifuncionalidad de las alternativas de optimización de infraestructura verde adoptadas, se solicitó a un panel de expertos de las áreas de la hidrología e hidráulica urbana, arquitectura del paisaje, ecología urbana y ciencias ambientales, evaluar la capacidad de dichas alternativas para proveer los servicios ecosistémicos y funciones hidrológicas definidas anteriormente. Las alternativas fueron presentadas y descritas a los expertos, quienes evaluaron, en una escala de 0 a 3, la capacidad de cada elemento optimizado de proveer las funciones y servicios de interés. La definición de los puntajes asignados se presenta en la siguiente tabla.

| Puntaje | Definición                                                                                                          |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0       | El elemento de IV, en su escenario optimizado, <b>no es capaz de proveer la función/servicio evaluada</b>           |
| 1       | El elemento de IV, en su escenario optimizado, <b>cumple débilmente</b> con proveer la función/servicio evaluada    |
| 2       | El elemento de IV, en su escenario optimizado, <b>cumple moderadamente</b> con proveer la función/servicio evaluada |
| 3       | El elemento de IV, en su escenario optimizado, <b>cumple fuertemente</b> con proveer la función/servicio evaluada   |

Para lograr una evaluación consistente, se adoptaron algunos **supuestos**:

- Al evaluar el servicio ecosistémico de **provisión de hábitat y conectividad**, se dio prioridad al concepto de hábitat, entendiendo que la conectividad es un servicio inherente a la red y no a los elementos aislados de infraestructura verde.
- La evaluación del servicio ecosistémico de **provisión de espacios de recreación**, consideró la función de recreación activa por sobre otras funciones de carácter estético del paisaje.
- La evaluación del servicio de **reducción de riesgo de inundación**, se basa en la amenaza de precipitaciones extremas. Si bien en la metodología utilizada se tomó en mayor consideración este riesgo climático, un proyecto DUS podría también plantear objetivos asociados a la reducción del riesgo de remoción en masa, u otros.
- Las funciones y servicios de **elementos de menor escala**, como techos, jardines, estacionamientos y calles urbanas, fueron evaluadas asumiendo su implementación en conjunto a lo largo de la cuenca, no como optimizaciones aisladas.
- Para todos los casos, **se asume que los elementos de drenaje ubicados aguas arriba están operando de manera adecuada**, es decir, se evalúa la capacidad de cada elemento de cumplir las funciones que le corresponden según su ubicación en la red, y no de subsanar deficiencias originadas aguas arriba. Esto es especialmente importante si se considera que el mayor volumen de agua precipita sobre la red domiciliar y secundaria.

A partir de las tendencias obtenidas en los resultados de los expertos, de las observaciones y supuestos levantados, de la evaluación y visión del equipo profesional del proyecto, y de referencias técnicas sobre los componentes DUS integrados en las soluciones de infraestructura verde, se asignó un puntaje referencial final a cada servicio y función.

Es importante notar que se observó cierta dispersión en los resultados de la evaluación de los expertos. Esta puede ser atribuida a distintos factores: diversidad de disciplinas, adopción de supuestos y consideraciones no explicitados, falta de detalle sobre los escenarios optimizados, entre otros. A pesar de ello, la información levantada y las tendencias expresadas sirvieron de base para la construcción de la evaluación global que se presenta en cada una de las fichas.

## C

## Fichas de infraestructura verde optimizada

A continuación, se presentan las alternativas optimizadas de cada uno de los 13 elementos de infraestructura verde que se identifican en la macrozona como de interés para las redes de drenaje sostenible (ver detalle en Volumen I, sección C). **Estas alternativas representan situaciones ideales basadas en principios y configuraciones de soluciones DUS que buscan maximizar la provisión de servicios ecosistémicos y funciones hidrológicas.**

Los esquemas presentados en cada ficha no buscan representar el detalle técnico de las soluciones. Entendiendo que la implementación final es sitio-específica, **lo que se propone aquí es una aproximación general a la distribución de los componentes de optimización** concebibles en estos espacios.

Cada ficha presenta la siguiente información:

- Descripción de la alternativa optimizada.
- Ventajas y desventajas de la alternativa.
- Principales casos de aplicación y su escala en la red de drenaje (red domiciliaria, secundaria, primaria y natural).
- Requerimientos de mantenimiento de las soluciones DUS que integra la alternativa.
- Valoración multifuncional relativa a funciones hidrológicas y servicios ecosistémicos.
- Imágenes de referencia de la condición actual de estos espacios en el territorio.
- Figuras ilustrativas en planta y corte de la alternativa optimizada.
- Datos de interés.

Al leer la valoración multifuncional de cada ficha, se debe tener en cuenta que su objetivo no es la comparación de los elementos entre sí, pues estos responden a distintas escalas. La evaluación toma en cuenta que el funcionamiento optimizado de los elementos aguas abajo depende del manejo de las aguas lluvias aguas arriba, y que el sistema está conectado superficial y subterráneamente, **por lo que las fichas no pueden ser entendidas de forma aislada.** En la siguiente figura se muestra un ejemplo de cómo interactúa la infraestructura verde en una ciudad, y cómo en su conjunto representan un beneficio para la red hidrológica.



Ejemplo: Ciudad de Temuco



Componente:

## TECHOS Y JARDINES

### Escenario de diseño optimizado

Las aguas lluvias ingresan al espacio privado como precipitación directa sobre las superficies y también desde recintos adyacentes. Cuando las aguas caen sobre la zona impermeable del techo, escurren hacia sistemas de recolección de aguas lluvias, como estanques, y también hacia áreas permeables diseñadas para su infiltración, particularmente franjas de infiltración y jardines de lluvia.

La zona del techo de menor pendiente está diseñada con un techo verde que recibe aguas lluvias directas. Parte de esas aguas se infiltran y/o se interceptan por la vegetación que lo cubre para luego ser, en parte, evapotranspirada. Las áreas impermeables del espacio privado, como pasos peatonales y terrazas, están construidas con pavimento permeable. Los jardines contienen vegetación que tendrá diversidad y complejidad de especies y estratos en correspondencia con su escala y área de intervención. Los sustratos son también variados y se diseñan para dar cumplimiento óptimo a la función de infiltración.

### Escala de drenaje



Red domiciliaria

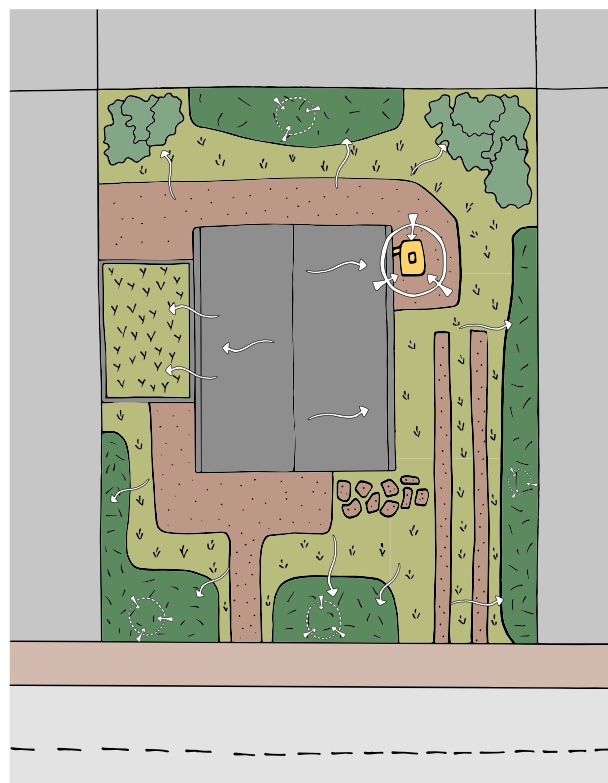
### Ventajas y desventajas

Entre las ventajas del elemento optimizado destaca su capacidad de reducir un porcentaje importante de la escorrentía generada en las ciudades por ser el componente principal de la red domiciliaria, red que recibe hasta un 80% de las precipitaciones del área urbana. Asimismo, permite un ahorro en el consumo de agua gracias a la capacidad de almacenar las aguas lluvias para su reutilización.

Entre las desventajas destacan los elevados costos de construcción de techos verdes y pavimentos permeables y los altos requerimientos de mantenimiento de los jardines de lluvia y franjas filtrantes para cumplir sus rendimientos funcionales.

### Requerimientos de mantención

- Los **techos verdes** pueden requerir riego esporádico.
- Ciertas secciones de vegetación de las **franjas filtrantes** deben ser removidas periódicamente para evitar la colmatación producto de los sedimentos.
- Dependiendo del nivel de uso, los **pavimentos permeables** pueden requerir de un barrido anual para eliminar sedimentos acumulados.
- Se debe cuidar la colmatación de los suelos de **jardines de lluvia** y considerar además una mantención de poda periódica de la vegetación, retirando ramas y hojas caídas.



### Simbología:



Franja filtrante



Jardín de lluvia



Techo verde



Pavimento permeable



Sistema de recolección de aguas lluvias



Vegetación nativa arbórea / arbustiva



Senda peatonal



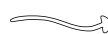
Pavimento impermeable



Área impermeable



Techo impermeable



Conducción superficial



Almacenamiento temporal e infiltración



Almacenamiento temporal



## Casos de aplicación

Estos espacios incluyen áreas con alto potencial para el manejo de las aguas lluvias a nivel de escala domiciliaria, entre ellas, los jardines internos y techos de edificaciones como viviendas, universidades, colegios, recintos comerciales, hospitales y otros que pueden ser de carácter público o privado.

Es posible incorporar un sistema que recolecte las aguas lluvias que excedan la capacidad de los jardines de lluvia para su reutilización en riego o usos afines. Esto, además de ser una medida de ahorro del consumo de agua potable, es un aporte extra para evitar el escurrimiento y sobrecarga del sistema aguas abajo. El rendimiento multifuncional de este elemento tomó en consideración su aplicación a gran escala



## Rendimiento multifuncional



### Funciones hidrológicas

|                |       |
|----------------|-------|
| Infiltración   | ● ● ● |
| Almacenamiento | ● ● ○ |
| Conducción     | ● ○ ○ |



### Servicios ecosistémicos

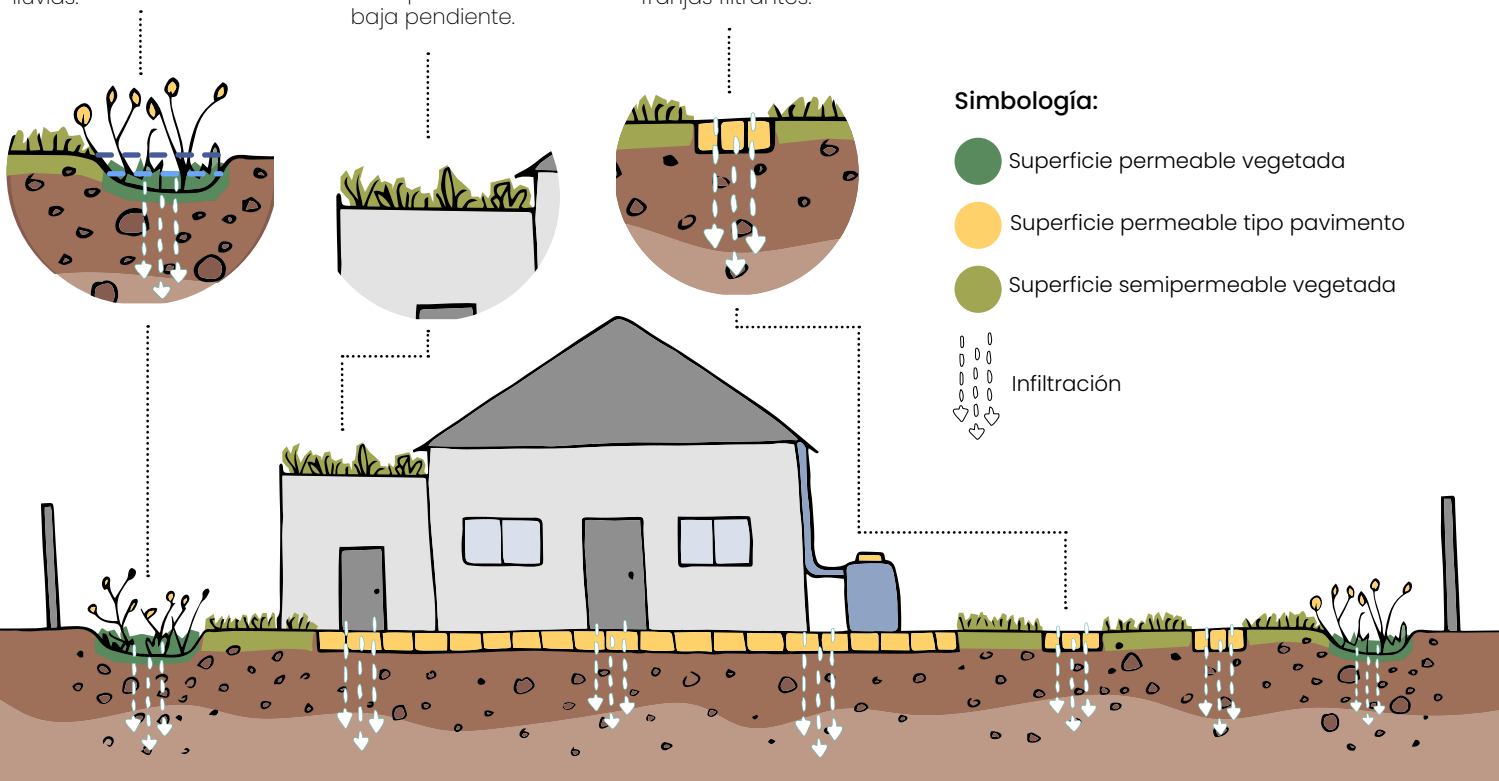
|                                               |         |
|-----------------------------------------------|---------|
| Reducción de riesgo de inundación             | ● ● ● ● |
| Depuración de aguas                           | ● ● ○   |
| Provisión de hábitat y conectividad ecológica | ● ○ ○   |
| Provisión de espacios de recreación           | ● ○ ○   |

Los **jardines de lluvia** en el perímetro del domicilio permiten el almacenamiento temporal y la posterior infiltración de las aguas lluvias.

El **techo verde** debe ser instalado en superficies con baja pendiente.

Los **pavimentos permeables** se encuentran al mismo nivel que las franjas filtrantes.

## TECHOS Y JARDINES





Componente:

## ESTACIONAMIENTOS

### Escenario de diseño optimizado

Los espacios individuales para el estacionamiento de vehículos se encuentran contruidos con material permeable. Las pendientes son diseñadas para que las aguas lluvias que no son capaces de infiltrar por estos elementos sean conducidas hacia jardines de lluvia y/o franjas filtrantes. Los excedentes en tormentas mayores son conducidos subsuperficialmente hacia el sistema aguas abajo o superficialmente hacia elementos permeables adyacentes.

Las transiciones de áreas impermeables a áreas permeables ocurren al mismo nivel (sin soleras u otros obstáculos para el flujo). Los jardines contienen vegetación nativa que tendrá diversidad y complejidad de especies y estratos en correspondencia con su escala y área de intervención. Además, su selección responderá a los microclimas de los elementos. Los sustratos son también variados y se diseñan para dar cumplimiento óptimo a la función de infiltración.

### Escala de drenaje



Red domiciliaria

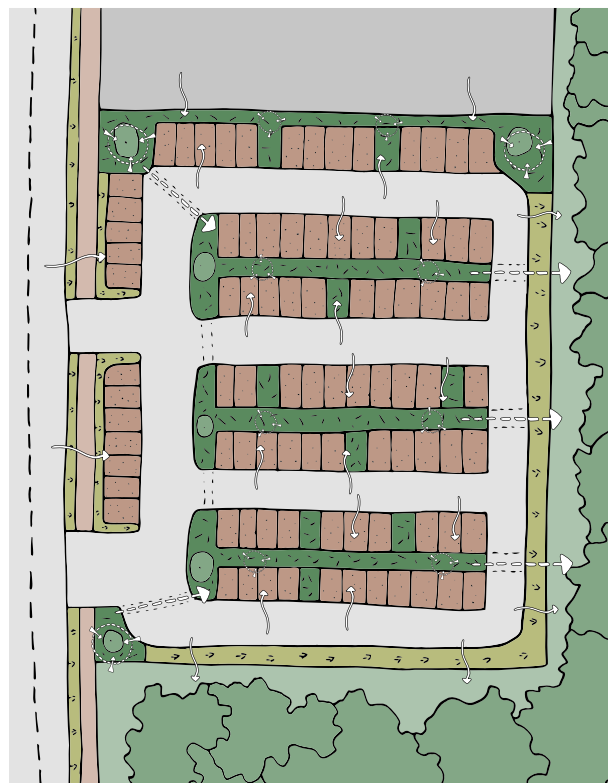
### Ventajas y desventajas

Entre las ventajas, se encuentra el mejoramiento estético de áreas usualmente poco atractivas, la reducción de las temperaturas a nivel de microclima, y el aprovechamiento de grandes espacios normalmente subutilizados para el tratamiento de aguas lluvias.

Algunas desventajas son los costos en mantenimiento esporádico de los jardines de lluvia, pavimentos permeables y franjas filtrantes, claves para mantener la eficiencia de los sistemas.

### Requerimientos de mantención

- Ciertas secciones de vegetación de las **franjas filtrantes** deben ser removidas periódicamente para evitar la colmatación producto de los sedimentos.
- Dependiendo del nivel de uso, los **pavimentos permeables** pueden requerir de un barrido anual para eliminar sedimentos acumulados.
- Se debe cuidar la colmatación de los suelos de **jardines de lluvia** y considerar además una mantención de poda periódica de la vegetación, retirando ramas y hojas caídas.



### Simbología:



Franja filtrante



Jardín de lluvia



Pavimento permeable



Área con vegetación nativa



Vegetación nativa arbórea / arbustiva



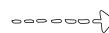
Senda peatonal



Pavimento impermeable



Área impermeable



Conducción subsuperficial



Conducción superficial



Almacenamiento temporal e infiltración

## Casos de aplicación

Áreas públicas y privadas destinadas al estacionamiento de vehículos de distinto tipo. Localizados en zonas adyacentes a centros comerciales, recintos hospitalarios, escuelas y universidades, recintos turísticos, edificios institucionales u otros similares. El caso optimizado aplica a grandes espacios de estacionamientos de tipo loteo y no a aquellos típicamente localizados en los bordes de calzada.



Más allá de que el caso presentado refiera a estacionamientos agrupados, los principios básicos de la optimización pueden ser extrapolados a otros estacionamientos de borde de calzada, entre ellos, el uso de pavimentos permeables con pendiente que redirige las aguas lluvias hacia jardines de lluvia con mayor capacidad de infiltración.

## Rendimiento multifuncional



### Funciones hidrológicas

|                |       |
|----------------|-------|
| Infiltración   | ● ● ● |
| Almacenamiento | ● ○ ○ |
| Conducción     | ● ○ ○ |



### Servicios ecosistémicos

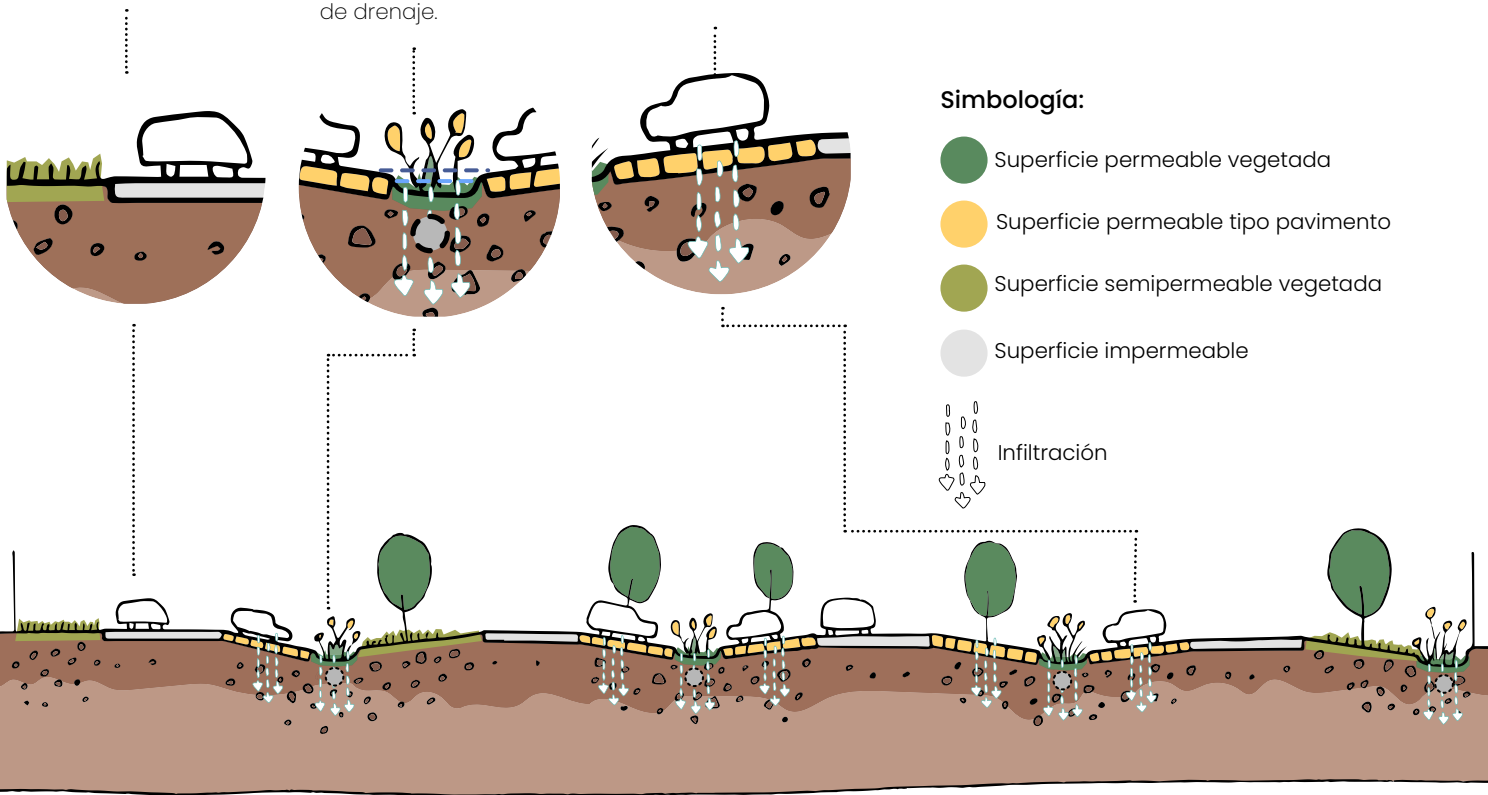
|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| Reducción de riesgo de inundación             | ● ● ○ |
| Depuración de aguas                           | ● ● ○ |
| Provisión de hábitat y conectividad ecológica | ● ○ ○ |
| Provisión de espacios de recreación           | ● ○ ○ |

Las **franjas filtrantes** se encuentran al mismo nivel que los pavimentos impermeables. Pueden mantener elementos de protección discontinuos.

Los **jardines de lluvia** pueden trabajar en conjunto con el sistema subsuperficial de drenaje.

Los **pavimentos permeables** de tipo celular permiten la infiltración en los espacios individuales de estacionamiento.

## ESTACIONAMIENTOS







Componente:

## PLAZAS DE BARRIO

### Escenario de diseño optimizado

Las plazas de barrio reciben la escorrentía generada en los espacios impermeables aledaños que no pudieron ser controlados a nivel de escala domiciliaria. Las transiciones de áreas impermeables a áreas permeables ocurren al mismo nivel (sin soleras u otros obstáculos para el flujo).

La plaza se encuentra en su totalidad levemente deprimida para actuar como elemento de almacenamiento en tormentas mayores. Mantiene además una depresión central en la que se construye un estanque de detención, incluyendo su canal de flujos bajos. Se espera que el área completa de la plaza pueda ser usada como espacio de esparcimiento en periodos secos.

Las áreas de juegos y senderos peatonales son construidos con pavimento permeable. La plaza mantiene franjas filtrantes y jardines de lluvia en la zona periférica para facilitar la infiltración. La vegetación será nativa y tendrá diversidad y complejidad de especies y estratos en correspondencia con su escala y área de intervención. Así también, la selección de vegetación debe tomar en consideración el microclima.

### Escala de drenaje



Red secundaria

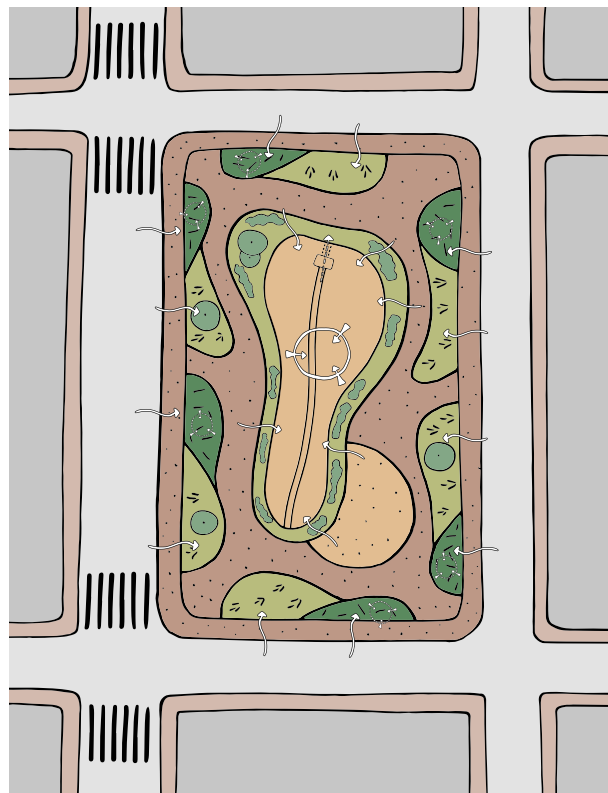
### Ventajas y desventajas

Entre las ventajas, se encuentra el mejoramiento estético de áreas usualmente poco atractivas, la reducción de las temperaturas a nivel de microclima, y el aprovechamiento de grandes espacios normalmente subutilizados para el tratamiento de aguas lluvias.

Algunas desventajas son los costos en mantenimiento esporádico de los jardines de lluvia, pavimentos permeables y franjas filtrantes, claves para mantener la eficiencia de los sistemas.

### Requerimientos de mantención

- Se debe realizar mantención periódica del canal de flujos del **estanque de detención y de su obra de salida**, espacios que suelen colmatarse con sedimentos y elementos de basura. Asimismo, dado que el uso recreacional es frecuente, las mantenciones de limpieza deberán serlo también.
- Ciertas secciones de vegetación de las **franjas filtrantes** deben ser removidas periódicamente para evitar la colmatación producto de los sedimentos y los **pavimentos permeables** deben ser barridos anualmente.
- Se deben retirar las ramas y hojas caídas de los **jardines de lluvia** para mejorar la eficiencia y considerar poda frecuente.



### Simbología:



Franja filtrante



Jardín de lluvia



Pavimento permeable



Estanque de detención



Pavimento permeable (zona equipamiento)



Vegetación nativa arbórea / arbustiva



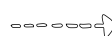
Senda peatonal



Pavimento impermeable



Área impermeable



Conducción subsuperficial



Conducción superficial



Almacenamiento temporal e infiltración



Almacenamiento temporal

## Casos de aplicación

Espacios de recreación comunitaria localizados en centros urbanos caracterizados por mantener, en mayor o menor medida, áreas verdes con vegetación de distintos tipos e infraestructura de esparcimiento (banacas, mesas, caminos peatonales, juegos infantiles, equipamiento deportivo, entre otros). Su escala es menor que la de parques o bosques urbanos.



Los servicios ecosistémicos que aportan y las funciones hidrológicas que se quieren potenciar pueden variar si la plaza de barrio se encuentra cerca de otros elementos como bordes costeros o cerros.



## Rendimiento multifuncional



### Funciones hidrológicas

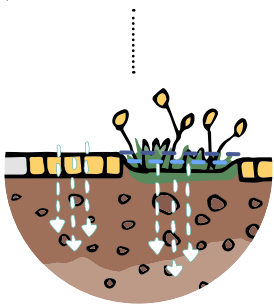
|                |       |
|----------------|-------|
| Infiltración   | ● ● ● |
| Almacenamiento | ● ● ○ |
| Conducción     | ● ○ ○ |



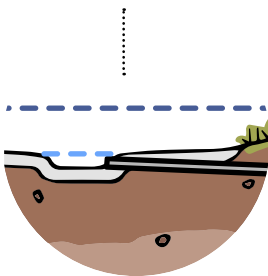
### Servicios ecosistémicos

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| Reducción de riesgo de inundación             | ● ● ● |
| Depuración de aguas                           | ● ● ○ |
| Provisión de hábitat y conectividad ecológica | ● ● ○ |
| Provisión de espacios de recreación           | ● ● ● |

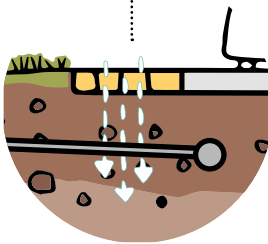
Los **jardines de lluvia** perimetrales reciben las aguas lluvias provenientes de la calle para posteriormente infiltrarlas.



El **estanque de detención** almacena temporalmente las aguas lluvias y las libera gradualmente aguas abajo. Mantiene un canal de flujos bajos.



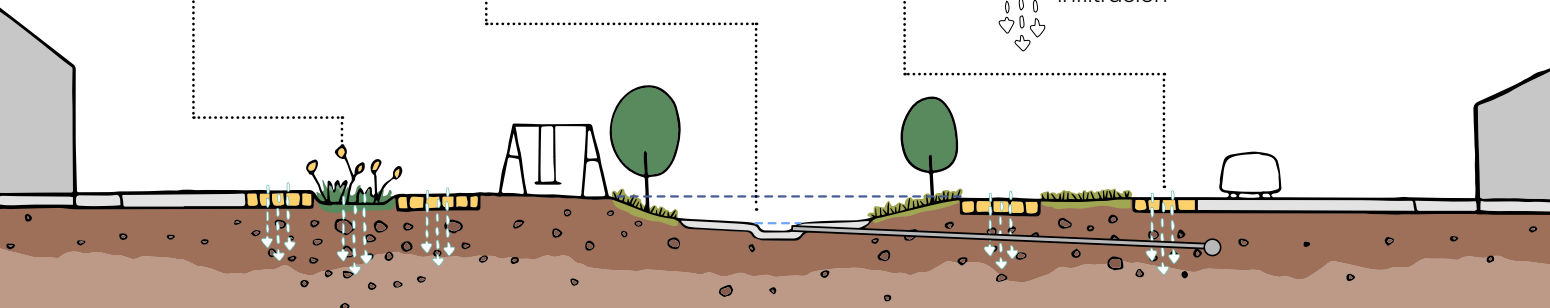
Los **pavimentos permeables** permiten desconectar las áreas impermeables o semipermeables. Las **aguas lluvias** retenidas en el estanque de detención son liberadas progresivamente a la red de drenaje subsuperficial.



## PLAZAS DE BARRIO

### Simbología:

- Superficie permeable vegetada
- Superficie permeable tipo pavimento
- Superficie semipermeable vegetada
- Superficie impermeable





**Componente:**

**PARQUES URBANOS**

**Escenario de diseño optimizado**

Cuando existe un cuerpo de agua receptor adyacente al parque urbano, como un río, estero, laguna, quebrada, u otro (caso A), el parque urbano mantiene un humedal de depuración que acumula tanto las aguas lluvias provenientes del escurrimiento generado en áreas urbanas de alta impermeabilidad aguas arriba, como las que precipitan sobre el elemento. Este humedal mantiene vegetación fitorremediadora y accesos disponibles para la maquinaria de mantenimiento asociada a la acumulación de sedimentos y contaminantes. Luego, libera las aguas al cuerpo receptor. En este mismo caso, el humedal posee franjas filtrantes perimetrales que aportan en la tarea de depuración de las aguas.

En el caso en que no exista un cuerpo receptor adyacente (caso B), se considera incorporar un estanque de detención en lugar de un humedal de depuración. La principal función de este estanque es acumular las aguas para luego liberarlas paulatinamente a través de conductos subsuperficiales, y en ese proceso, apoyar la sedimentación de contaminantes. Mantiene una forma escalonada, diseño que permite la inundación (almacenamiento temporal de aguas lluvias) frente a ciertos eventos de precipitación, y el uso como espacio de recreación en periodos secos. Además, un canal de flujos bajos para las tormentas más frecuentes. Asimismo, el parque urbano tiene un estanque de infiltración que permite la recarga de acuíferos y apoya la labor de infiltración de otros elementos localizados en el diseño. Idealmente, este estanque de infiltración se localiza en zonas de bajo tránsito de personas para reducir la compactación de sus suelos.

En ambos casos, las áreas de juegos, senderos y otros espacios de infraestructura que requieren de bases sólidas utilizan pavimentos permeables que facilitan la infiltración del agua. Se diseñan también jardines de lluvia y franjas filtrantes en distintos puntos del parque. Estos se encuentran cubiertos de vegetación nativa, que tendrá diversidad y complejidad de especies y estratos en correspondencia con su escala y área de intervención. Las transiciones de áreas impermeables a áreas permeables ocurren al mismo nivel (sin soleras u otros obstáculos para el flujo) y el parque completo se encuentra levemente deprimido en relación a la urbanización colindante.

**Escala de drenaje**



Red domiciliaria

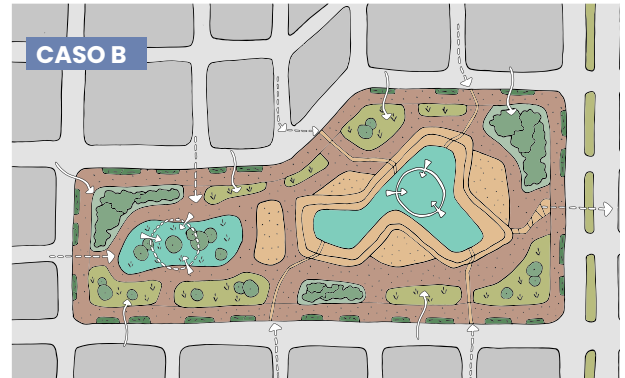
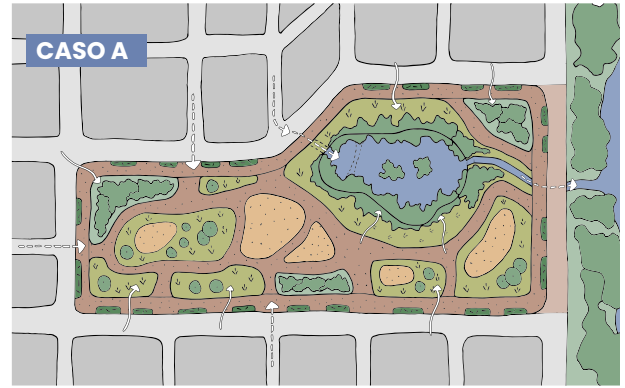


Red secundaria

**Ventajas y desventajas**

Los parques urbanos mantienen la ventaja de ser espacios que, por su escala, poseen un gran potencial para el manejo de las aguas lluvias dentro de la ciudad.

Algunas de sus desventajas son la posibilidad de colmatación tanto del estanque de infiltración como de franjas filtrantes y pavimentos permeables, problema que puede ser manejado con una buena mantención. Asimismo, los humedales depuradores deben ser correctamente diseñados y conservados para evitar la potencial afloración excesiva de algas y la atracción de mosquitos.



**Simbología:**



Franja filtrante



Jardín de lluvia



Estanque de detención



Pavimento permeable



Lámina de agua temporal (estanque de detención)



Pavimento permeable (zona equipamiento)



Estanque de infiltración



Humedal de depuración



Cuerpo o curso de agua



Vegetación nativa arbórea / arbustiva



Senda peatonal



Pavimento impermeable



Área impermeable



Conducción subsuperficial



Conducción superficial



Almacenamiento temporal e infiltración



Almacenamiento temporal

## Requerimientos de mantención

- El **estanque de infiltración** propuesto en el caso B, debe ser ubicado en zonas de bajo tránsito peatonal para evitar la rápida compactación de los suelos. Aquí se recomienda incorporar vegetación de borde para dificultar el ingreso.
- Se recomienda una inspección y limpieza dos veces al año del **estanque de detención**.
- Remoción esporádica de sedimentos y de vegetación en las obras de salida de los **humedales de depuración**.
- Ciertas secciones de vegetación de las **franjas filtrantes** deben ser removidas periódicamente para evitar la colmatación producto de los sedimentos y los **pavimentos permeables** deben ser barridos anualmente.
- Se deben retirar las ramas y hojas caídas de los **jardines de lluvia** para mejorar la eficiencia y considerar poda frecuente.

## Casos de aplicación

Espacios urbanos de vasta vegetación (tanto nativa como exótica), que suelen ser utilizados con fines recreativos, culturales y como áreas de protección de la biodiversidad. Comúnmente se observa en ellos algún grado de infraestructura (senderos, bancas, plataformas u otros). Poseen topografías irregulares y generalmente se localizan en las periferias de los centros urbanos, aunque en ocasiones pueden ser observados en el centro de la trama urbana.

El humedal de depuración requiere de la oxigenación de sus aguas para mantener una calidad aceptable y un funcionamiento de depuración óptimo. No en todos los casos esa condición existirá y, por tanto, se deben diseñar las obras de entrada y de salida teniendo esto en consideración. En caso de no poder asegurar este criterio se recomienda optar por otras soluciones.

## Rendimiento multifuncional



### Funciones hidrológicas

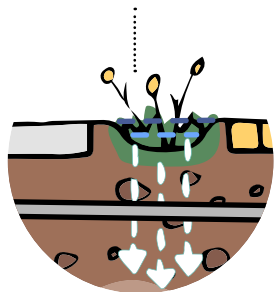
|                |       |
|----------------|-------|
| Infiltración   | ● ● ● |
| Almacenamiento | ● ● ● |
| Conducción     | ● ● ● |



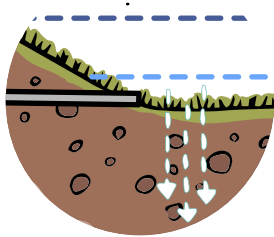
### Servicios ecosistémicos

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| Reducción de riesgo de inundación             | ● ● ● |
| Depuración de aguas                           | ● ● ● |
| Provisión de hábitat y conectividad ecológica | ● ● ● |
| Provisión de espacios de recreación           | ● ● ● |

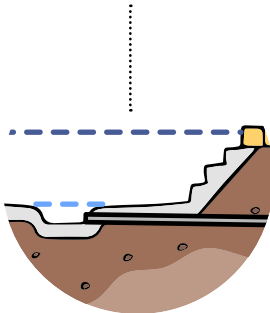
Los **jardines de lluvia** perimetrales reciben las aguas lluvias provenientes de la calle.



El **estanque de infiltración** busca infiltrar las aguas pero provee también de un volumen de almacenamiento temporal.



El **estanque de detención** almacena temporalmente las aguas lluvias y las libera gradualmente aguas abajo. Mantiene un canal de flujos bajos.



## PARQUES URBANOS

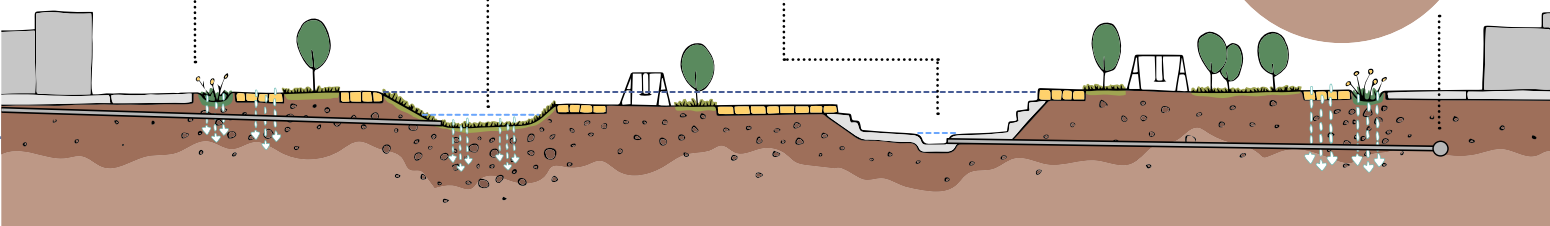
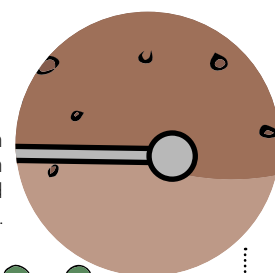
### Simbología:

- Superficie permeable vegetada
- Superficie permeable tipo pavimento
- Superficie semipermeable vegetada
- Superficie impermeable



Infiltración

Las **aguas lluvias retenidas** en el estanque de detención son liberadas progresivamente a la red de drenaje subsuperficial.





Componente:

## CALLES URBANAS

### Escenario de diseño optimizado

Los pasajes mantienen, hacia el lado más bajo del bombeo de la calzada de una vía, zanjas de infiltración que reciben, entre otras aguas, aquellas que precipitan directamente sobre el pavimento. Esta zanja se encuentra protegida con elementos discontinuos para evitar el ingreso de vehículos. Por la misma acera, la escorrentía que fluye en sentido contrario, es decir, desde espacios urbanizados hacia zanjas de infiltración, pasan sobre franjas filtrantes o jardines de lluvia.

En la acera contraria del pasaje, se construyen franjas filtrantes y se diseñan estacionamientos de borde de calzada con pavimento permeable. Estos elementos recibirán, principalmente, las aguas lluvias desde la escala domiciliaria aguas arriba.

En calles de doble vía, se incorporan zanjas de infiltración a cada uno de los lados de la calzada, además de jardines de lluvia intermitentes, que son protegidos por elementos discontinuos frente al ingreso de vehículos. Las aceras, se construyen de pavimento permeable.

Las transiciones de áreas impermeables a áreas permeables, en este diseño optimizado, ocurren al mismo nivel (sin soleras continuas u otros obstáculos para el flujo). Además, se selecciona vegetación nativa con un nivel de diversidad y complejidad de especies y estratos en correspondencia con su escala y área de intervención.

### Escala de drenaje



Red primaria



Red secundaria

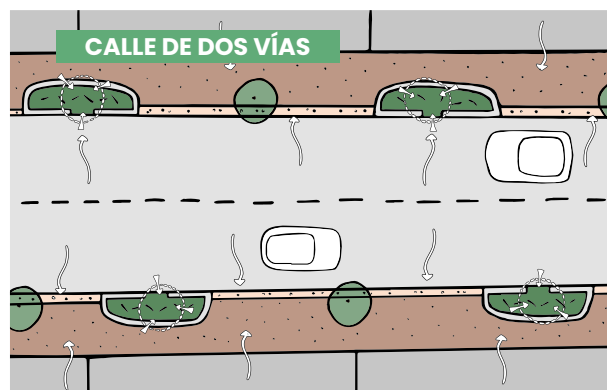
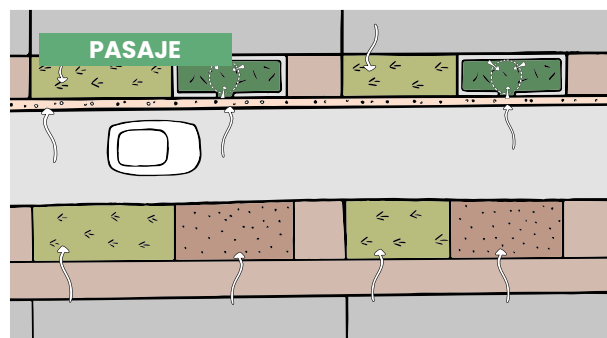
### Ventajas y desventajas

Dentro de sus ventajas destaca la reivindicación a través de estas medidas, de la calle como un espacio público multifuncional de calidad. Además, son espacios que permiten conectar los distintos elementos de la ciudad logrando un sistema conectado superficialmente.

Entre sus desventajas destaca que, al ser uno de los elementos que recibe la mayor parte de la contaminación de la ciudad, algunos componentes requerirán de importante mantención para evitar su colmatación y falla, entre ellos: pavimentos permeables, jardines de lluvia, franjas filtrantes y zanjas de infiltración.

### Requerimientos de mantención

- Ciertas secciones de vegetación de las **franjas filtrantes** deben ser removidas periódicamente para evitar la colmatación producto de los sedimentos y los **pavimentos permeables** deben ser barridos anualmente.
- Se deben retirar las ramas y hojas caídas de los **jardines de lluvia** para mejorar la eficiencia y considerar poda frecuente.
- Las **zanjas de infiltración** requieren de una revisión de su estado funcional y posible remoción de sedimentos cada 2 años. Cada 5 a 10 años realizar reemplazo total o parcial, o reparación de todos los elementos que compongan la zanja.



### Simbología:



Franja filtrante



Jardín de lluvia



Pavimento permeable



Zanja de infiltración



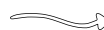
Senda peatonal



Pavimento impermeable



Área impermeable



Conducción superficial



Almacenamiento temporal e infiltración



## Casos de aplicación

Corresponden a los ejes viales públicos y privados incluyendo sus calzadas de hasta dos vías, aceras, ciclovías (comúnmente construidas de materiales impermeables), caminos peatonales y todos aquellos otros elementos presentes hasta la línea oficial de edificación. Refiere especialmente a calles de una y dos vías que, según la clasificación dispuesta en el Manual de Carreteras (MOP, 2016), corresponden a vías de tipo colector, local y/o de desarrollo.



Una alternativa para reducir el número de colectores subsuperficiales que suelen incorporarse en calles urbanas, es considerar, según la factibilidad de la calle, la incorporación de zanjas con vegetación. Por otro lado, cuando exista una red subsuperficial o se diseñe una por considerarse necesaria, las soluciones DUS de la situación optimizada deberán interactuar adecuadamente con ella

## Rendimiento multifuncional



### Funciones hidrológicas

|                |       |
|----------------|-------|
| Infiltración   | ● ● ● |
| Almacenamiento | ● ○ ○ |
| Conducción     | ● ● ○ |



### Servicios ecosistémicos

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| Reducción de riesgo de inundación             | ● ● ● |
| Depuración de aguas                           | ● ● ○ |
| Provisión de hábitat y conectividad ecológica | ● ○ ○ |
| Provisión de espacios de recreación           | ● ○ ○ |

## CALLES URBANAS

### Simbología:



Superficie permeable vegetada



Superficie semipermeable vegetada



Superficie permeable tipo pavimento

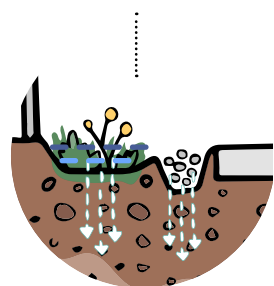


Superficie impermeable

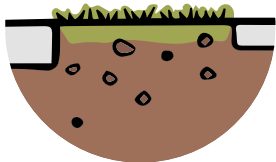


Infiltración

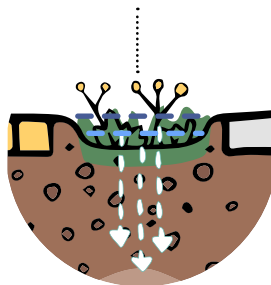
Los **jardines de lluvia** recolectan las aguas lluvias gracias a la pendiente del bombeo de la calzada.



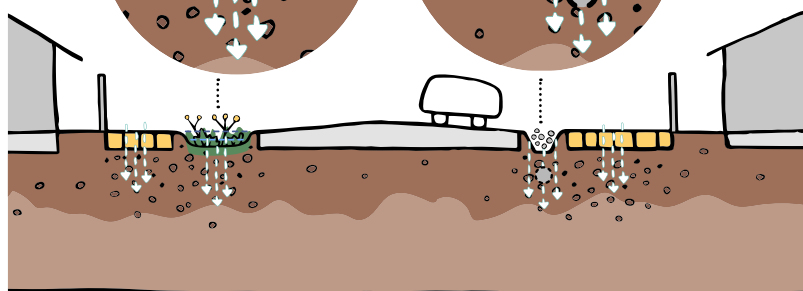
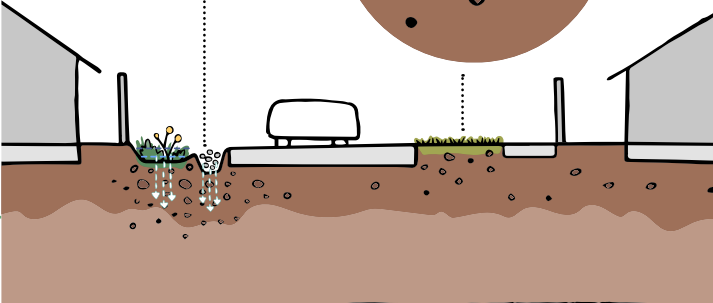
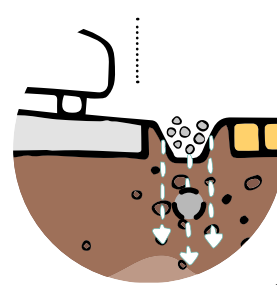
Las **franjas filtrantes** se encuentran al mismo nivel que los pavimentos impermeables. Pueden mantener elementos de protección discontinuos.



Los **jardines de lluvia** recolectan y almacenan temporalmente las aguas lluvias para su posterior infiltración.



Las **zanjas de infiltración** pueden trabajar en conjunto con el sistema subsuperficial de drenaje.





Componente:

## AVENIDAS PARQUE

### Escenario de diseño optimizado

Las avenidas parque mantienen un bandejón central levemente deprimido que contiene franjas filtrantes, jardines de lluvia, vegetación y una ciclovia. A uno de los costados de las calzadas se incorporan jardines de lluvia y estacionamientos. Al otro, una zanja de vegetación que aprovecha la linealidad del elemento para la conducción de aguas lluvias a baja velocidad. Se recomienda la incorporación de gradas de control enrocadas en las zanjas cuando se requiera disminuir las velocidades de flujo sobre estos elementos. Los jardines de lluvia contienen vegetación que tendrá diversidad y complejidad de especies y estratos en correspondencia con su escala y área de intervención. Además, su selección responderá a los microclimas del elemento.

Los sustratos se diseñan de forma de facilitar la infiltración y las transiciones de áreas impermeables a áreas permeables, en este diseño optimizado, ocurren al mismo nivel (sin soleras continuas u otros obstáculos para el flujo).

### Escala de drenaje



Red primaria

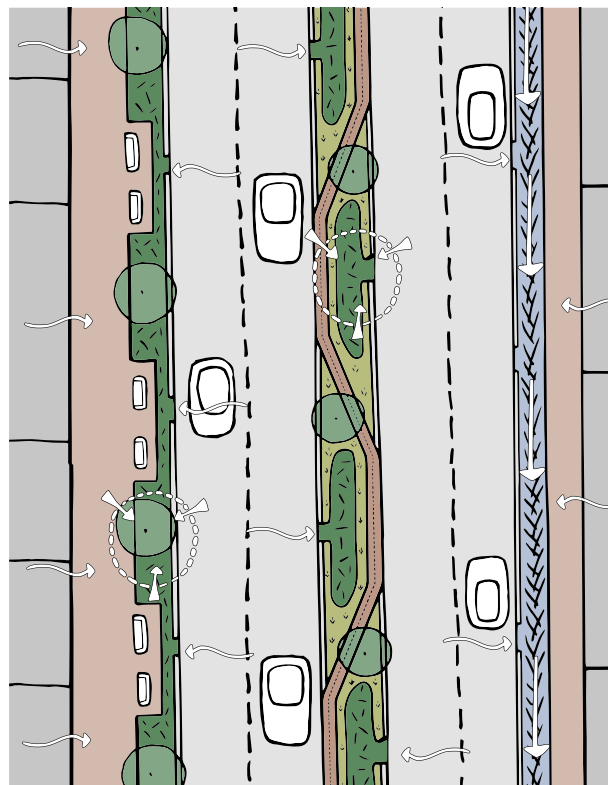
### Ventajas y desventajas

Su condición lineal continua provee de ventajas para la conducción a baja velocidad de las aguas y la conectividad del hábitat. Además, en ocasiones los bandejones son sustancialmente amplios entregando grandes espacios para la recreación a relativo bajo costo.

Entre sus desventajas destaca que, al ser uno de los elementos que recibe gran parte de la contaminación de la ciudad, algunos de sus componentes requerirán de importante mantenimiento para evitar su colmatación y falla, entre ellos: pavimentos permeables, jardines de lluvia y franjas filtrantes. Además, de no ser diseñadas con cuidado, las zanjas con vegetación pueden convertirse en focos de disposición de basura.

### Requerimientos de mantenimiento

- Ciertas secciones de vegetación de las **franjas filtrantes** deben ser removidas periódicamente para evitar la colmatación producto de los sedimentos y los **pavimentos permeables** deben ser barridos anualmente.
- Se deben retirar las ramas y hojas caídas de los **jardines de lluvia** para mejorar la eficiencia y considerar poda frecuente.
- Idealmente, en las **zanjas con vegetación**, la vegetación se debe mantener entre 5 a 15 cm de largo. Sin embargo, en zonas apropiadas, puede no ser un problema que se mantengan largos mayores.
- Se deben retirar ramas u objetos que obstaculicen el flujo en **zanjas con vegetación**. Además, se deben remover ocasionalmente los sedimentos.



### Simbología:



Franja filtrante



Jardín de lluvia



Zanja con vegetación



Ciclovia con pavimento permeable



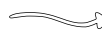
Senda peatonal



Pavimento impermeable



Área impermeable



Conducción superficial



Almacenamiento temporal e infiltración

## Casos de aplicación

Corresponden a ejes viales públicos y privados incluyendo sus calzadas, aceras, ciclovías (comúnmente construidas de materiales impermeables), caminos peatonales y todos aquellos otros elementos presentes hasta la línea oficial de edificación. Se diferencian de calles y pasajes por poseer bandejones centrales, mayor espacio de áreas verdes y por ser elementos de carácter más continuo.



En aquellos casos en que el bandejón central sea lo suficientemente ancho, y aprovechando la linealidad de este elemento, sería posible incorporar una zanja con vegetación en él. Según el dimensionamiento de la zanja, se podría prescindir de incorporar un conducto subsuperficial de manejo de las aguas lluvias. Además, se recomienda que el bandejón central se encuentre en leve depresión con respecto al nivel de la calle.



## Rendimiento multifuncional



### Funciones hidrológicas

|                |       |
|----------------|-------|
| Infiltración   | ● ● ● |
| Almacenamiento | ● ● ○ |
| Conducción     | ● ● ○ |



### Servicios ecosistémicos

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| Reducción de riesgo de inundación             | ● ● ● |
| Depuración de aguas                           | ● ● ○ |
| Provisión de hábitat y conectividad ecológica | ● ● ○ |
| Provisión de espacios de recreación           | ● ● ○ |

## AVENIDAS PARQUE

### Simbología:

|                                       |                                     |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| ● Superficie permeable vegetada       | ● Superficie semipermeable vegetada |
| ● Superficie permeable tipo pavimento | ● Superficie impermeable            |



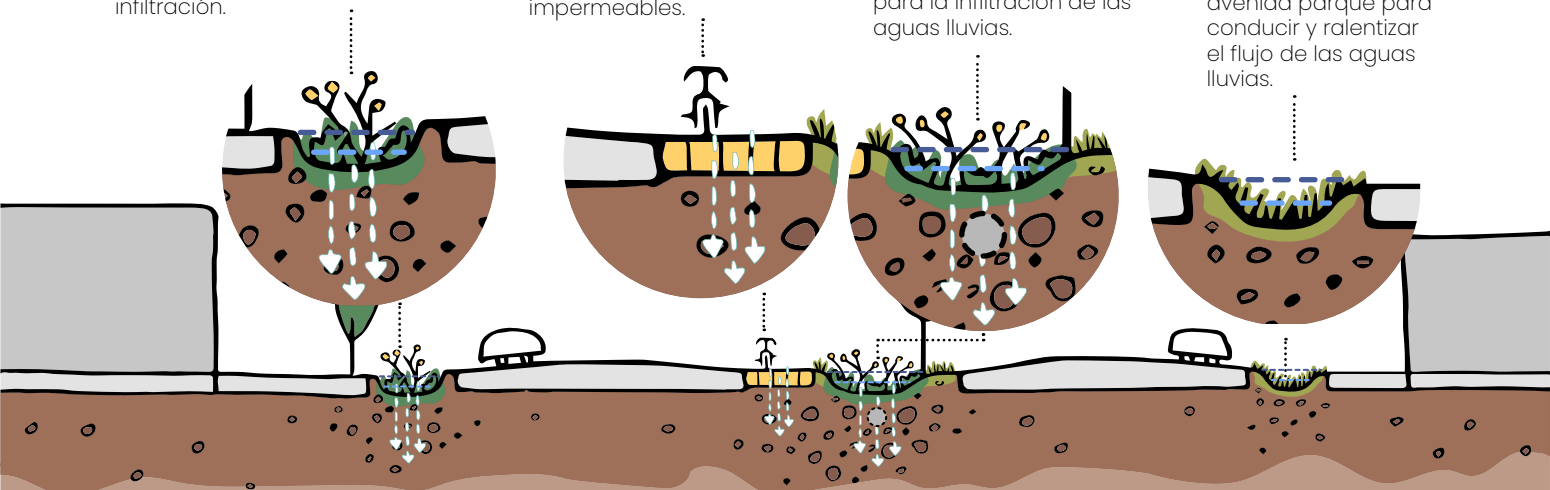
Infiltración

Los **jardines de lluvia** recolectan y almacenan temporalmente las aguas lluvias gracias a la pendiente del bombeo de una calzada, para su posterior infiltración.

Las **ciclovías** son una buena oportunidad para implementar pavimentos permeables. Así, se propicia la desconexión de las áreas impermeables.

Los **jardines de lluvia** pueden trabajar en conjunto con el sistema subsuperficial de drenaje para la infiltración de las aguas lluvias.

La **zanja con vegetación** aprovecha la linealidad de la avenida parque para conducir y ralentizar el flujo de las aguas lluvias.







## Componente:

### ROTONDAS

#### Escenario de diseño optimizado

Las aguas lluvias que ingresan a las rotondas provienen de los escurrimientos de espacios edificados adyacentes, desde calles y por precipitación directa sobre los elementos. La topografía de la isla central circular de la rotonda es levemente deprimida, de la misma forma que la isla triangular interior. Mantiene franjas filtrantes y jardines de lluvia cuya vegetación tendrá diversidad y complejidad de especies y estratos en correspondencia con su escala y área de intervención, más no árboles que puedan dificultar la visibilidad de los vehículos que la recorren. El perímetro externo tiene también jardines de lluvia.

Las calzadas de los anillos de las rotondas suelen ser diseñadas con pendientes transversales que provocan que el escurrimiento ocurra hacia la zona exterior. Sin embargo, el Manual de Carreteras especifica que para estos elementos, a diferencia de otros tipos de curva, bajo ciertas condiciones es posible el diseño de contraperalte. En este entendido, se recomienda siempre que sea posible: (1) la instalación de sistemas subsuperficiales que conduzcan las aguas lluvias desde los bordes exteriores de la calzada hacia la isla central para su almacenamiento temporal e infiltración, incluyendo sistemas de seguridad de rebase que conecten la obra a la red subsuperficial secundaria o primaria según sea el caso, y (2) el diseño con contraperalte de la calzada para facilitar el ingreso a la isla central.

Las transiciones de áreas impermeables (calles y aceras) a áreas permeables ocurren al mismo nivel (sin soleras u otros obstáculos para el flujo).

#### Escala de drenaje



Red primaria



Red secundaria

#### Ventajas y desventajas

Dentro de las ventajas destaca la posibilidad de aprovechar espacios que normalmente están subutilizados o subvalorados dentro en la ciudad. Su optimización, con respecto a la situación actual de diseño no supone un costo adicional importante. Además, se provee a la urbanización de espacios de almacenamiento frente a tormentas frecuentes, aunque también de tormentas mayores, dependiendo de sus dimensiones.

Entre sus desventajas destacan los requerimientos de mantención necesarios para aprovechar la funcionalidad de franjas filtrantes, jardines de lluvia y pavimentos permeables.

#### Requerimientos de mantención

- Ciertas secciones de vegetación de las **franjas filtrantes** deben ser removidas periódicamente para evitar la colmatación producto de los sedimentos y los **pavimentos permeables** deben ser barridos anualmente.
- Se deben retirar las ramas y hojas caídas de los **jardines de lluvia** para mejorar la eficiencia. Considerar poda frecuente.



#### Simbología:



Franja filtrante



Jardín de lluvia



Pavimento permeable



Senda peatonal



Pavimento impermeable



Área impermeable



Conducción subsuperficial con sistema de seguridad de rebase



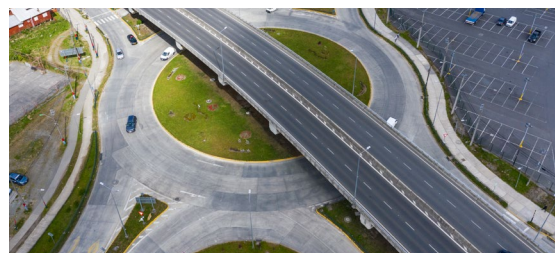
Conducción superficial perimetral



Almacenamiento temporal e infiltración

## Casos de aplicación

Elementos de intersección de la trama vial de distintos tamaños en que los flujos vehiculares acceden desde distintas ramas y maniobran al interior de un anillo vial que las conecta. Estos elementos pueden ser encontrados en calles y ser de carácter público, pero también en zonas privadas como condominios.



Los principios de optimización aquí presentados son también aplicables a otros espacios residuales de la ciudad, como codos de calles y sitios eriazos.

## Rendimiento multifuncional



### Funciones hidrológicas

Infiltración ●●●

Almacenamiento ●●○

Conducción ○○○



### Servicios ecosistémicos

Reducción de riesgo de inundación ●●○

Depuración de aguas ●●○

Provisión de hábitat y conectividad ecológica ●○○

Provisión de espacios de recreación ○○○

En las **rotondas** que posean una pendiente del bombeo que dirige las aguas lluvias hacia el exterior de las calzadas, se requiere de un sistema que permita que las aguas ingresen a las islas centrales y que los excesos se conecten a la red aguas abajo.

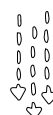
Los **jardines de lluvia** reciben las aguas lluvias provenientes de una tubería subsuperficial, o del nivel de suelo según cada caso.

Los **pavimentos permeables** permiten el cruce de peatones y la infiltración de aguas.

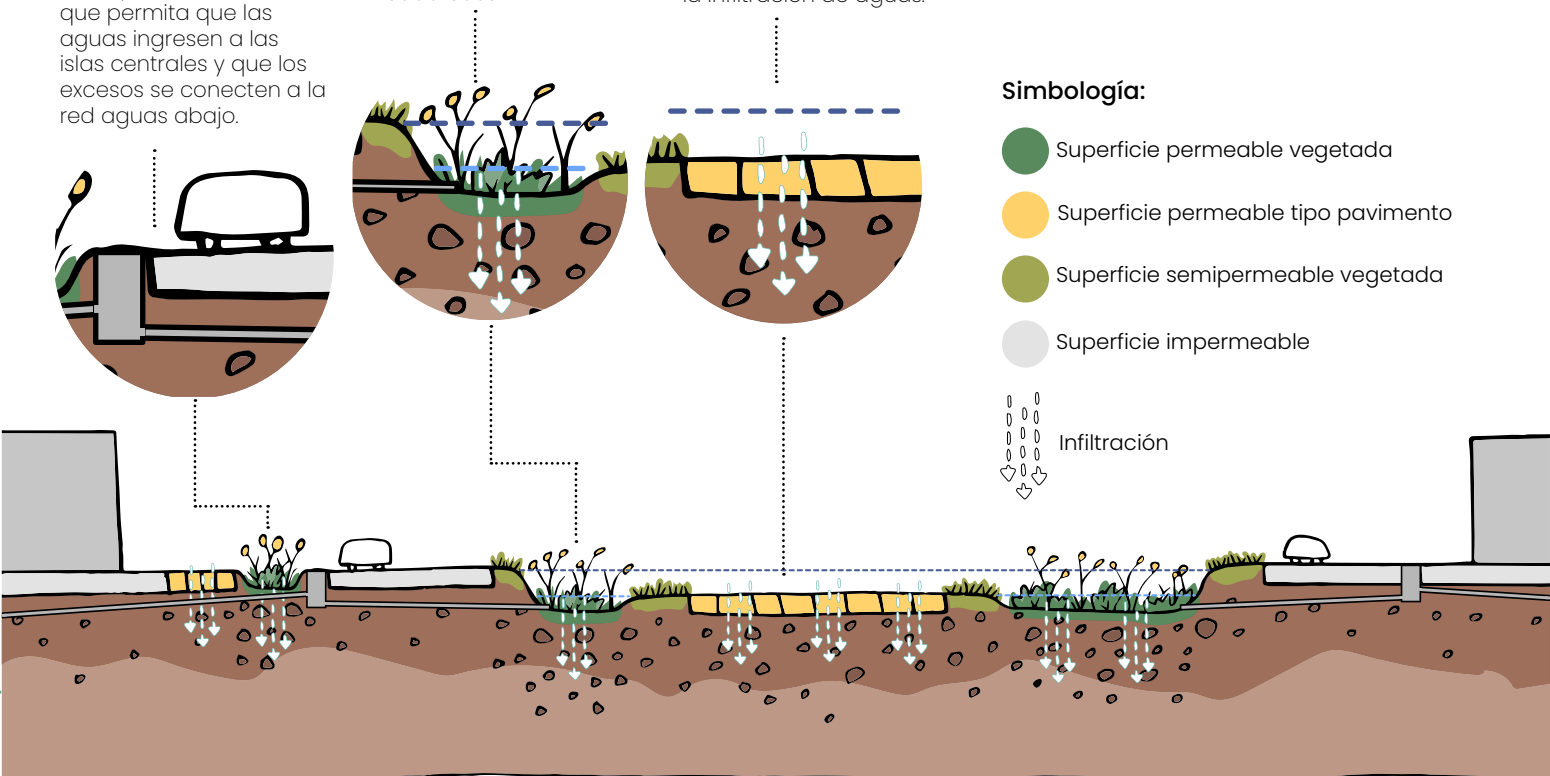
## ROTONDAS

### Simbología:

- Superficie permeable vegetada
- Superficie permeable tipo pavimento
- Superficie semipermeable vegetada
- Superficie impermeable



Infiltración





Componente:

## LÍNEAS DE FERROCARRIL

### Escenario de diseño optimizado

El agua ingresa a las líneas de ferrocarril como precipitación directa, como escorrentía de elementos viales impermeables adyacentes y/o como escorrentía de áreas urbanas aguas arriba. Se aprovecha la característica de linealidad del elemento para la conducción a baja velocidad de aguas lluvias aguas abajo de la red de drenaje. Se recomienda la incorporación de gradas de control enrocadas en las zanjas cuando se requiera disminuir las velocidades de flujo sobre estos elementos. Las aguas lluvias ingresan al elemento a través de franjas filtrantes. Luego ingresan, por cada costado del carril del ferrocarril, a zanjas con vegetación para su conducción paralela al elemento.

Los carriles del tren mantienen un terraplén que los localiza en una cota superior al resto de los componentes del elemento. Las transiciones de áreas impermeables (calles y aceras) a áreas permeables ocurren al mismo nivel (sin soleras u otros obstáculos para el flujo). A diferencia de otros elementos, la sección no se encuentra deprimida con respecto a los niveles de terrenos adyacentes para proteger el funcionamiento de los sistemas ferroviarios. Así mismo, no es posible revegetar con especies de gran altura en las franjas adyacentes por normativa propia de estos elementos.

### Escala de drenaje



Red primaria

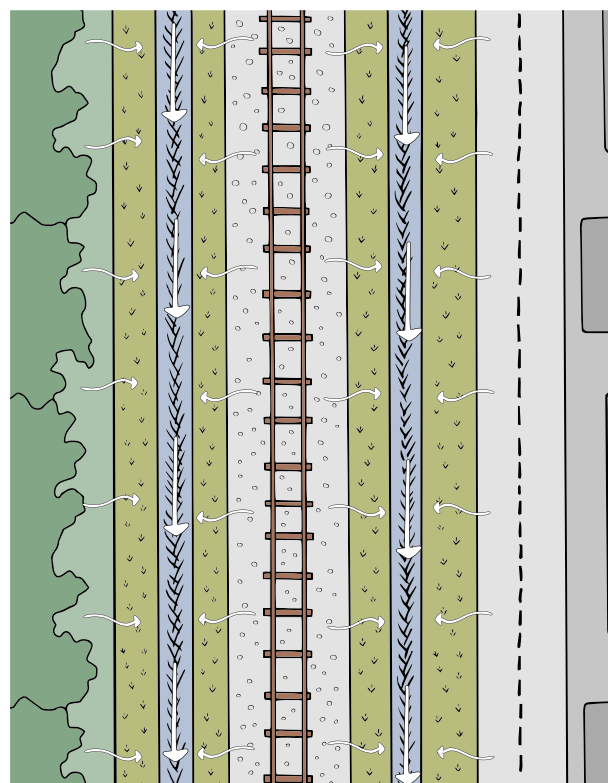
### Ventajas y desventajas

Entre las ventajas destaca la posibilidad de aprovechar la linealidad y continuidad del elemento para conducir las aguas a bajo costo y con elementos de sencilla implementación.

Como desventaja destaca que, de no ser diseñadas con cuidado, las zanjas con vegetación pueden convertirse en focos de disposición de basura. Además, los elementos deben ser mantenidos periódicamente para mantener sus funcionalidades.

### Requerimientos de mantención

- Ciertas secciones de vegetación de las **franjas filtrantes** deben ser removidas periódicamente para evitar la colmatación producto de los sedimentos.
- Idealmente, en las **zanjas con vegetación**, la vegetación se debe mantener entre 5 a 15 cm de largo. Sin embargo, en zonas apropiadas, puede no ser un problema que se mantengan largos mayores.
- Se deben retirar ramas u objetos que obstaculicen el flujo en **zanjas con vegetación**. Además, se deben remover ocasionalmente los sedimentos.



### Simbología:



Franja filtrante



Zanja con vegetación



Terraplén vía férrea



Vegetación nativa arbórea / arbustiva



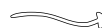
Área con vegetación nativa



Pavimento impermeable



Área impermeable



Conducción superficial

## Casos de aplicación

Elementos de vialidad lineal en uso sobre los cuales transitan trenes y ferrocarriles, que tienden a cruzar los centros urbanos.



Cuando las líneas se encuentran en desuso, es posible optimizar el elemento incorporando áreas de recreación y senderos peatonales. Sin embargo, se debe tomar en consideración que estos espacios son de carácter privado y que no es sencillo obtener permisos para su intervención.

## Rendimiento multifuncional



### Funciones hidrológicas

Infiltración ● ○ ○

Almacenamiento ○ ○ ○

Conducción ● ● ●



### Servicios ecosistémicos

Reducción de riesgo de inundación ● ● ○

Depuración de aguas ● ● ○

Provisión de hábitat y conectividad ecológica ● ○ ○

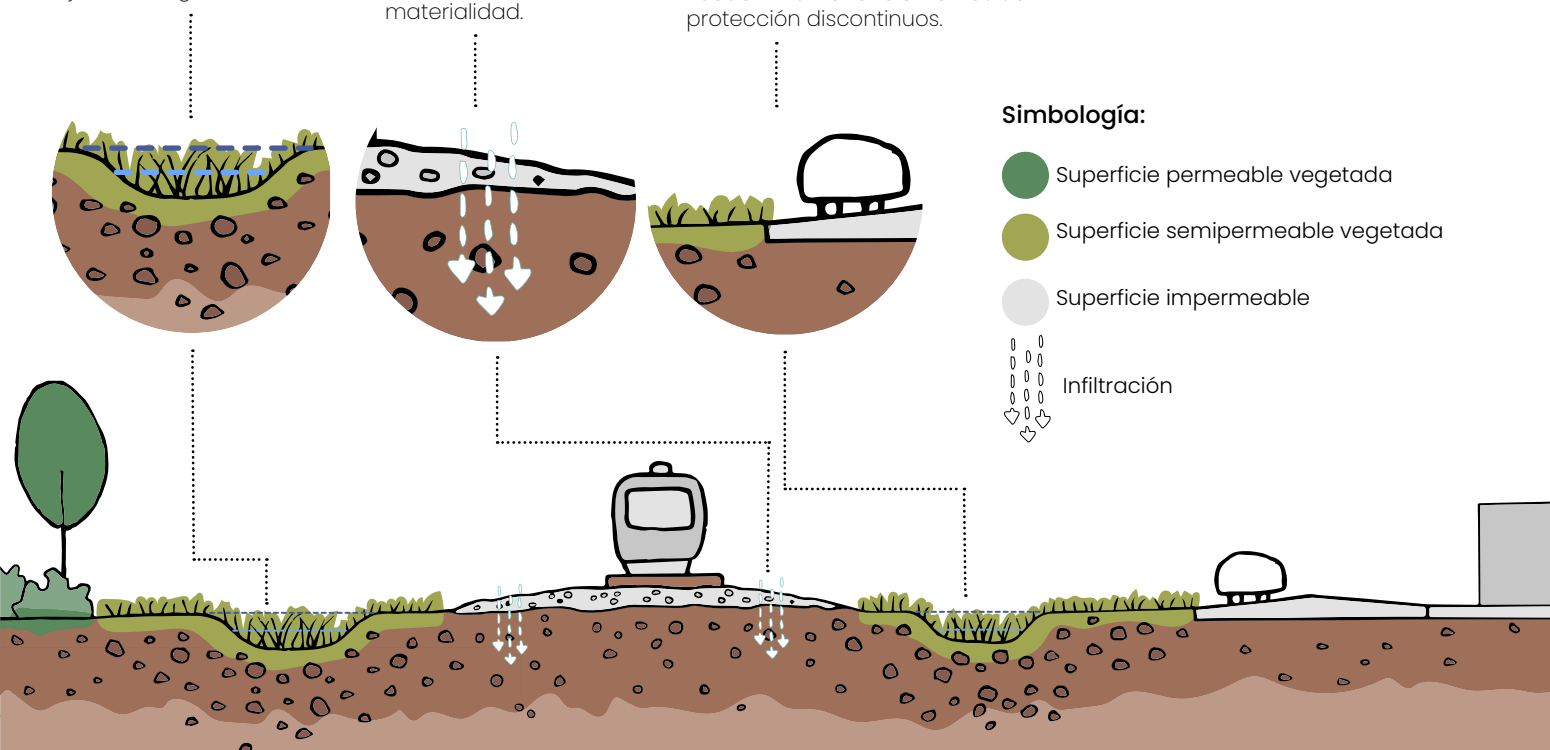
Provisión de espacios de recreación ● ○ ○

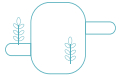
Las **zanjas con vegetación** aprovechan la linealidad de la vía férrea para conducir y ralentizar el flujo de las aguas lluvias.

El **terraplén** ya existente en las líneas férreas puede permitir la infiltración de las aguas lluvias, según su materialidad.

Las **franjas filtrantes** se encuentran al mismo nivel que pavimentos impermeables. Pueden mantener elementos de protección discontinuos.

## LÍNEAS DE FERROCARRIL





**Componente:**

## HUMEDALES Y LAGUNAS

### Escenario de diseño optimizado

La escorrentía que proviene de zonas altamente urbanizadas, ingresa superficialmente al humedal pasando, en primer lugar, por franjas filtrantes de baja pendiente y zanjas de infiltración que rodean perimetralmente el cuerpo. Estas últimas, poseen pendientes que buscan transportar las aguas hacia sedimentadores de dos etapas. En la primera, depuran las aguas por sedimentación de material particulado, y en la segunda, las depuran cuando el agua fluye laminarmente a través de bandas de vegetación depuradora (fitorremediación). A estas trampas sedimentarias ingresan también aguas lluvias desde colectores subsuperficiales directamente desde las áreas impermeables y mantienen zonas de ingreso de maquinaria para su mantención.

Luego de transitar por las trampas sedimentarias, las aguas lluvias ingresan al cuerpo de agua del humedal. Por su parte, la escorrentía que proviene de zonas con menor grado de impermeabilidad, ingresa superficialmente al humedal pasando sobre franjas filtrantes, zanjas de infiltración y vegetación nativa por gradientes (distintas especies y estratos de acuerdo a la distancia al espejo de agua).

La situación optimizada considera la revegetación en casos de deterioro, siempre con especies nativas tan diversas y complejas en estratos como la escala y área de intervención lo permitan. Su selección debe tomar en consideración el microclima.

Las transiciones de áreas impermeables (comúnmente calles) a áreas permeables ocurren al mismo nivel (sin soleras u otros obstáculos para el flujo).

Perimetralmente, se mantienen senderos y plataformas elevadas como infraestructura de bajo impacto para el uso público. La descarga del humedal se produce superficialmente hacia otros cuerpos de agua aledaños, con obras de salida especialmente diseñadas en caso de requerirse, o en su defecto, subterráneamente hacia ellos.

### Escala de drenaje



Red primaria

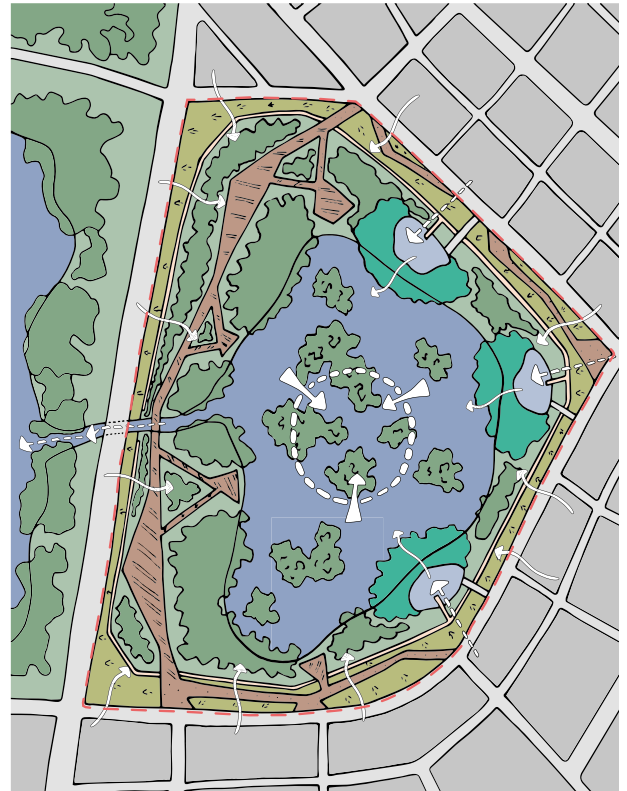


Red natural

### Ventajas y desventajas

Teniendo en consideración que se buscará intervenir estos elementos naturales solo cuando muestran señales de deterioro, la principal ventaja de la solución es la recuperación de cuerpos naturales y su protección. Además de aportar con espacios de recreación de calidad a la ciudad y poner en valor ecosistemas de gran importancia.

Las desventajas guardan relación con la necesidad de revisión y mantención de franjas filtrantes, pavimentos permeables, zanjas de infiltración y trampas sedimentarias, ya que de eso depende a mediano y largo plazo su funcionalidad.



### Simbología:



Franja filtrante



Zanja de infiltración



Pavimento permeable



Trampas sedimentarias



Vegetación fitorremediadora



Humedal o laguna



Senda peatonal elevada



Cuerpo o curso de agua



Vegetación nativa arbórea / arbustiva



Área con vegetación nativa



Pavimento impermeable



Área impermeable



Conducción subsuperficial



Conducción superficial



Almacenamiento temporal e infiltración



Línea de restricción



## Requerimientos de mantención

- Ciertas secciones de vegetación de las **franjas filtrantes** deben ser removidas periódicamente para evitar la colmatación producto de los sedimentos y los **pavimentos permeables** deben ser barridos anualmente.
- Las **zanjas de infiltración** requieren de una revisión de su estado funcional y posible remoción de sedimentos cada 2 años. Cada 5 a 10 años realizar reemplazo total o parcial, o reparación de todos los elementos que compongan la zanja.
- Para el correcto funcionamiento de las **trampas sedimentarias**, es necesario poseer un acceso directo a ellas, por donde pueda ingresar maquinaria a retirar los sedimentos o exceso de vegetación que se vayan acumulando de forma ocasional.

## Casos de aplicación

Espacios urbanos de vasta vegetación (tanto nativa como exótica), que suelen ser utilizados con fines recreativos, culturales y como áreas de protección de la biodiversidad. Comúnmente se observa en ellos algún grado de infraestructura (senderos, bancas, plataformas u otros). Poseen topografías irregulares y generalmente se localizan en las periferias de los centros urbanos, aunque en ocasiones pueden ser observados en el centro de la trama urbana.

El humedal de depuración requiere de la oxigenación de sus aguas para mantener una calidad aceptable y un funcionamiento de depuración óptimo. No en todos los casos esa condición existirá y, por tanto, se deben diseñar las obras de entrada y de salida teniendo esto en consideración. En caso de no poder asegurar este criterio se recomienda optar por otras soluciones.

## Rendimiento multifuncional



### Funciones hidrológicas

Infiltración ●●○

Almacenamiento ●●●

Conducción ●●○



### Servicios ecosistémicos

Reducción de riesgo de inundación ●●●

Depuración de aguas ●●●

Provisión de hábitat y conectividad ecológica ●●●

Provisión de espacios de recreación ●●●



## Simbología:



Superficie permeable vegetada



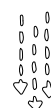
Superficie semipermeable vegetada



Superficie permeable tipo pavimento



Superficie impermeable



Infiltración

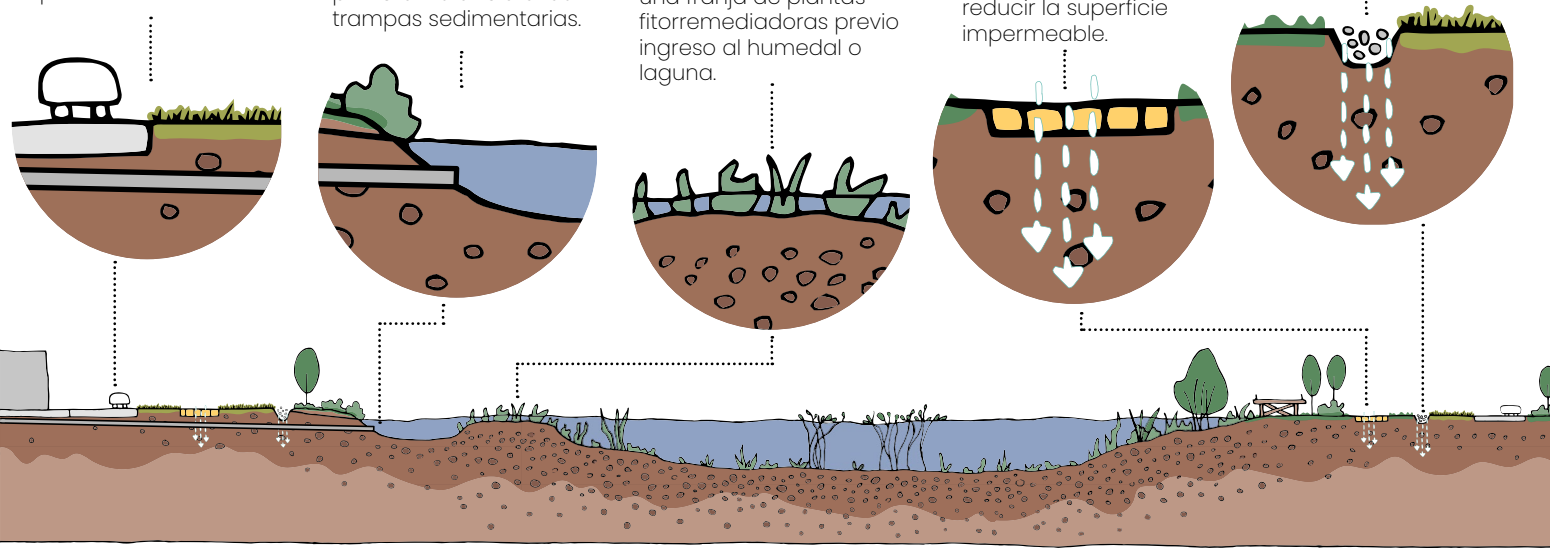
Las **franjas filtrantes** se encuentran al mismo nivel que los pavimentos impermeables. Pueden mantener elementos de protección discontinuos.

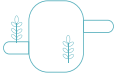
Las **aguas lluvias** provenientes del sistema subsuperficial de drenaje ingresan en primera instancia a las trampas sedimentarias.

Las **aguas lluvias** que ingresaron a las trampas sedimentarias, por efecto del rebase pasan por una franja de plantas fitorremediadoras previo ingreso al humedal o laguna.

Las **sendas peatonales** están construidas con pavimentos permeables para reducir la superficie impermeable.

La **escorrentía** de aguas lluvias primero ingresa por las franjas filtrantes, luego pasa por las zanjas de infiltración y finalmente entra al humedal o laguna.





**Componente:**

## ESTEROS Y ARROYOS

### Escenario de diseño optimizado

Cuando la escorrentía de aguas lluvias ingresa a esteros y arroyos de forma superficial desde las ciudades, transita en sentido desde aguas arriba hacia aguas abajo, por una ciclovía de pavimento permeable, franjas filtrantes de bajas pendientes, zanjas de infiltración que permiten la sedimentación de algunos contaminantes y vegetación nativa exuberante. Dado que la optimización de estos elementos se recomienda en situaciones de deterioro o necesidad de protección, dicha vegetación nativa puede requerir de procesos de revegetación de mediano y largo plazo. Cuando las aguas ingresan de forma subsuperficial, se recomienda implementar enrocados en las zonas de ingreso de las aguas a la ribera.

Desde zonas con menor porcentaje de impermeabilidad, como predios agrícolas o parcelas, la escorrentía transita por franjas filtrantes y vegetación previo a su ingreso al cuerpo de agua. La vegetación tendrá diversidad y complejidad de especies y estratos en correspondencia con su escala y área de intervención.

Las riberas del estero toman formas relativamente escalonadas siempre cubiertas de vegetación por gradientes (distintas especies y estratos de acuerdo a la distancia desde el caudal principal). Las transiciones de áreas impermeables a áreas permeables ocurren al mismo nivel (sin soleras u otros obstáculos para el flujo).

En la zona alta de la ribera adyacente al área de mayor impermeabilidad, se mantienen senderos y plataformas elevadas como infraestructura para el uso público. Estas intervenciones son de bajo impacto y se recomienda aplicarlos en tramos específicos según necesidad, entendiendo que los esteros y arroyos son por sobre todo espacios de vida silvestre.

### Escala de drenaje



Red primaria

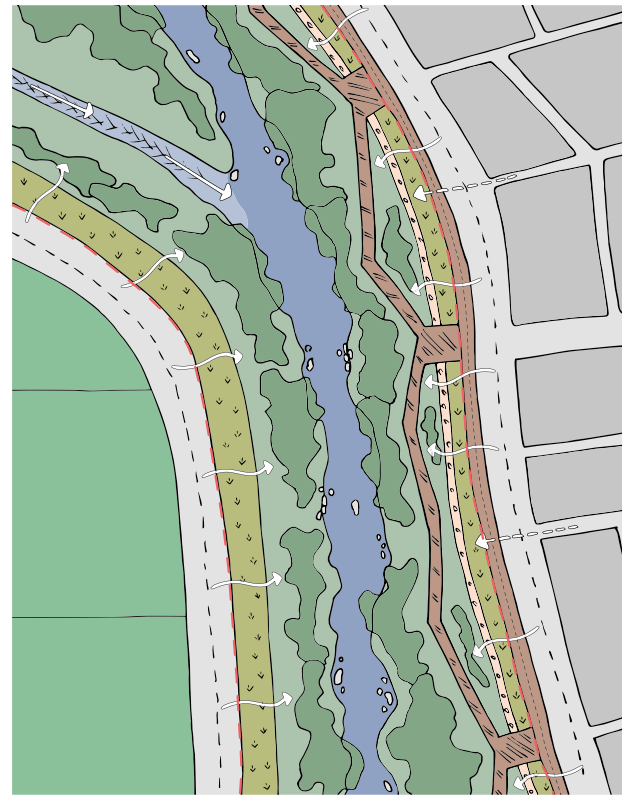


Red natural

### Ventajas y desventajas

Teniendo en consideración que se buscará intervenir estos elementos naturales solo cuando muestren señales de deterioro y/o deban ser protegidos, la principal ventaja de la solución es la recuperación de cursos naturales, el aporte en términos de la provisión de espacios de recreación de calidad y la puesta en valor de ecosistemas de gran importancia.

Dentro de las desventajas destaca la necesidad de mantener periódicamente las franjas filtrantes, zanjas de infiltración y zanjas con vegetación para asegurar su correcta funcionalidad. En algunos casos, además, estos espacios suelen ser focos de basura que deben ser controlados para mantener la multifuncionalidad del elemento.



### Simbología:



Franja filtrante



Zanja de infiltración



Zanja con vegetación



Senda peatonal elevada



Ciclovía con pavimento permeable



Cuerpo o curso de agua



Área con vegetación nativa



Vegetación nativa arbórea / arbustiva



Zona de plantaciones agrícolas



Pavimento impermeable



Área impermeable

Conducción subsuperficial

Conducción superficial

Línea de restricción



## Requerimientos de mantención

- Ciertas secciones de vegetación de las **franjas filtrantes** deben ser removidas periódicamente para evitar la colmatación producto de los sedimentos.
- Las **zanjas de infiltración** requieren de una revisión de su estado funcional y posible remoción de sedimentos cada 2 años. Cada 5 a 10 años realizar reemplazo total o parcial, o reparación de todos los elementos que compongan la zanja.
- Idealmente, en las **zanjas con vegetación**, la vegetación se debe mantener entre 5 a 15 cm de largo. Sin embargo, en zonas apropiadas, puede no ser un problema que se mantengan largos mayores.
- Se deben retirar ramas u objetos que obstaculicen el flujo en **zanjas con vegetación**. Además, se deben remover ocasionalmente los sedimentos.

## Casos de aplicación

Comúnmente identificados como ríos de menores dimensiones, los esteros y arroyos comprenden los cursos de agua que fluyen sobre cauces y las riberas que los contienen, cubiertas de vegetación. Se identifican por poseer caudales menores que los ríos y desembocar en otros cuerpos de agua como lagos, lagunas, ríos u otros esteros y arroyos. Dependiendo de su tamaño, el caudal podría desaparecer en los periodos secos del año.

Los esteros y arroyos son elementos lineales de gran longitud en que las necesidades varían de acuerdo al tramo en que se estudien. Se recomienda orientar las intervenciones a las necesidades propias de las secciones a intervenir, por ejemplo, el control de la erosión, la revegetación de las riberas, control de los nutrientes, estancamiento de aguas, entre otros. Se recomienda revisar el trabajo de Tomer et al. (2013) en que se explora esta temática.

## Rendimiento multifuncional



### Funciones hidrológicas

Infiltración ● ○ ○

Almacenamiento ● ○ ○

Conducción ● ● ●



### Servicios ecosistémicos

Reducción de riesgo de inundación ● ● ●

Depuración de aguas ● ● ○

Provisión de hábitat y conectividad ecológica ● ● ●

Provisión de espacios de recreación ● ● ●

## Simbología:



Superficie permeable vegetada



Superficie permeable tipo pavimento



Superficie semipermeable vegetada



Superficie impermeable



Infiltración

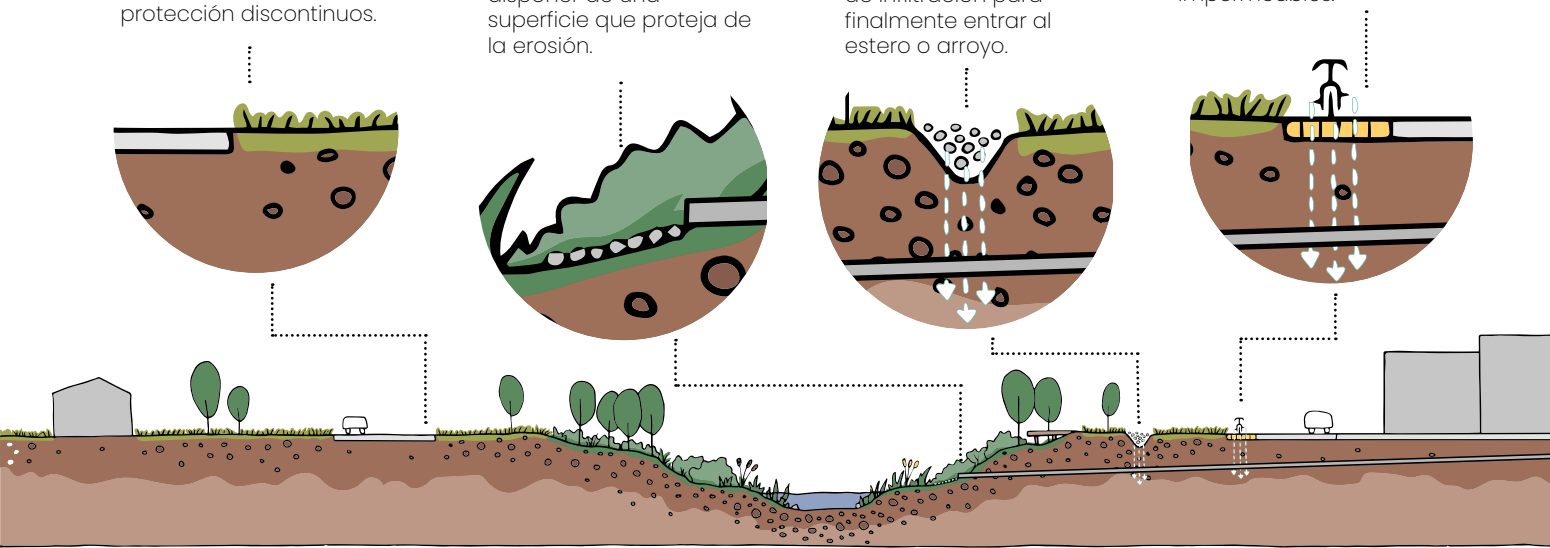
## ESTEROS Y ARROYOS

Las **franjas filtrantes** se encuentran al mismo nivel que los pavimentos impermeables. Pueden mantener elementos de protección discontinuos.

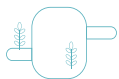
En donde existan **descargas directas** de la red de drenaje de aguas lluvias, se recomienda disponer de una superficie que proteja de la erosión.

La **escorrentía** de aguas lluvia primero ingresa por las franjas filtrantes, luego por las zanjas de infiltración para finalmente entrar al estero o arroyo.

Las **ciclovías** son una buena oportunidad para implementar pavimentos permeables. Así, se propicia la desconexión de las áreas impermeables.







Componente:

## RÍOS

### Escenario de diseño optimizado

Cuando la escorrentía de aguas lluvias ingresa de forma superficial desde las ciudades, transita por vegetación que tendrá diversidad y complejidad de especies y estratos en correspondencia con su escala y área de intervención. Dado que la optimización de estos elementos se recomienda en situaciones de deterioro o necesidad de protección, dicha vegetación nativa puede requerir de procesos de revegetación de mediano y largo plazo. Cuando las aguas ingresan de forma subsuperficial, se recomienda implementar enrocados en las zonas de ingreso de las aguas a la ribera.

Las riberas del río mantienen sus formas naturales, siempre cubiertas de vegetación por gradientes (distintas especies y estratos de acuerdo a la distancia desde el caudal principal). Las transiciones de áreas impermeables a áreas permeables ocurren al mismo nivel (sin soleras u otros obstáculos para el flujo).

En la zona alta de una de las riberas se mantienen senderos y plataformas elevadas de madera como infraestructura para el uso público. Estas intervenciones son de bajo impacto y se recomienda aplicarlos en tramos específicos según necesidad, entendiendo que los ríos son por sobre todo espacios de vida silvestre. Entre los espacios conectados por senderos se mantienen franjas filtrantes protegidas para evitar la circulación y compactación de los suelos.

### Escala de drenaje



Red primaria



Red natural

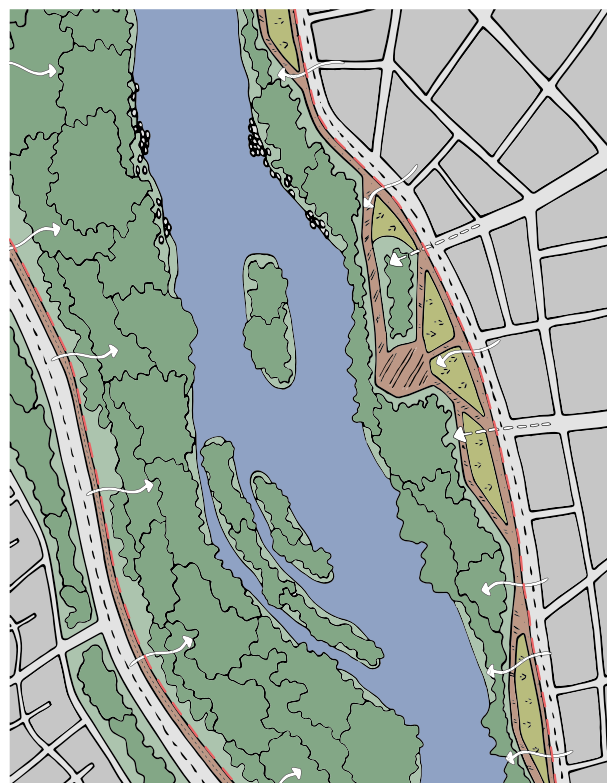
### Ventajas y desventajas

Teniendo en consideración que se buscará intervenir estos elementos naturales solo cuando muestren señales de deterioro y/o deban ser protegidos, la principal ventaja de la solución es la recuperación de cursos naturales, el aporte en términos de la provisión de espacios de recreación de calidad y la puesta en valor de ecosistemas de gran importancia. Otra ventaja de este elemento es que, incluso previo a su optimización, provee de importantes funciones hidrológicas a la red de drenaje.

Entre sus desventajas destaca que el proceso de revegetación del elemento, cuando se encuentra en condiciones importantes de deterioro, puede ser extenso.

### Requerimientos de mantenimiento

- Ciertas secciones de vegetación de las **franjas filtrantes** deben ser removidas periódicamente para evitar la colmatación producto de los sedimentos.



### Simbología:



Franja filtrante



Pavimento permeable



Senda peatonal elevada



Ciclo vía con pavimento permeable



Cuerpo o curso de agua



Área con vegetación nativa



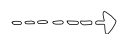
Vegetación nativa arbórea / arbustiva



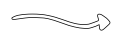
Pavimento impermeable



Área impermeable



Conducción subsuperficial



Conducción superficial



Línea de restricción

## Casos de aplicación

Área comprendida por los cursos de agua que fluyen sobre cauces y las riberas que los contienen, cubiertas de vegetación. Desde su nacimiento hasta su desembocadura en otros ríos, lagos o el mar, los ríos se alimentan de aguas provenientes de precipitaciones directas y escorrentía superficial, aportes subterráneos y/o derretimiento de nieve y hielo. La optimización está orientada a las áreas en que el río transita por dentro de la ciudad o adyacente a ella y no necesariamente en espacios de desembocadura.

Los ríos son elementos lineales de gran longitud en que las necesidades varían de acuerdo al tramo en que se estudien. Se recomienda orientar las intervenciones a las necesidades propias de las secciones a intervenir, por ejemplo, el control de la erosión, la revegetación de las riberas, control de los nutrientes, estancamiento de aguas, entre otros. Se recomienda revisar el trabajo de Tomer et al. (2013) en que se explora esta temática.

Por otro lado, es interesante considerar que los ríos pueden tener capacidad depuradora por sí mismos y esta se asocia, principalmente, a los meandros y humedales laterales que poseen.



## Rendimiento multifuncional



### Funciones hidrológicas

|                |       |
|----------------|-------|
| Infiltración   | ● ○ ○ |
| Almacenamiento | ○ ○ ○ |
| Conducción     | ● ● ● |



### Servicios ecosistémicos

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| Reducción de riesgo de inundación             | ● ● ● |
| Depuración de aguas                           | ● ● ○ |
| Provisión de hábitat y conectividad ecológica | ● ● ● |
| Provisión de espacios de recreación           | ● ● ● |

Las **ciclovías** son una buena oportunidad para implementar pavimentos permeables. Así, se propicia la desconexión de las áreas impermeables.

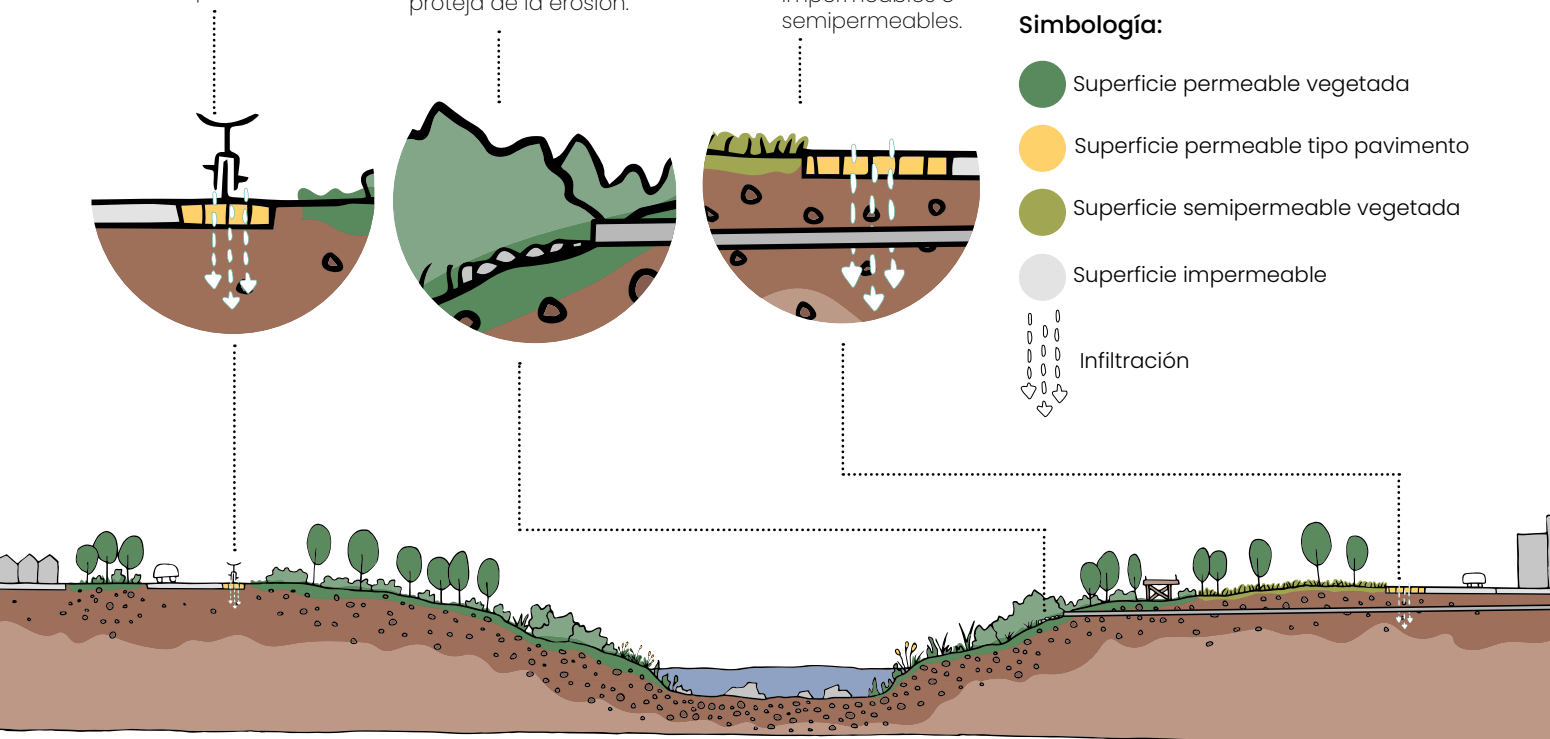
En donde existan **descargas directas** de la red de drenaje de aguas lluvias, se recomienda disponer de una superficie que proteja de la erosión.

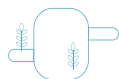
Los **pavimentos permeables** permiten desconectar las áreas impermeables o semipermeables.

RÍOS

### Simbología:

- Superficie permeable vegetada
  - Superficie permeable tipo pavimento
  - Superficie semipermeable vegetada
  - Superficie impermeable
- ↓ ↓ ↓ ↓ ↓  
Infiltración





## Componente: QUEBRADAS

### Escenario de diseño optimizado

La escorrentía de aguas lluvias ingresa a quebradas de forma superficial, transitando, en sentido desde aguas arriba hacia aguas abajo, por franjas filtrantes de bajas pendientes, disipadores de energía naturales como troncos y rocas diseñados para disminuir la velocidad de escurrimiento y prevenir la erosión de suelos (especialmente durante el proceso de revegetación) y vegetación nativa en altas pendientes. Cuando el agua proviene de predios agrícolas y parcelas cuyas aguas lluvias mantienen altos niveles de nutrientes se propone considerar en la selección de vegetación especies con especial capacidad fitorremediadora.

En el lecho de agua de la quebrada se recomienda considerar, si estudios así lo sugieren, la incorporación de elementos de disipación de energía para reducir la velocidad del flujo. En la zona alta de la ribera adyacente a la zona urbana, se mantienen senderos elevados de madera como infraestructura para el uso público, además de plataformas que bajan por las pendientes hasta zonas cercanas al lecho de agua. La vegetación tendrá diversidad y complejidad de especies y estratos en correspondencia con su escala y área de intervención.

### Escala de drenaje



Red primaria



Red natural

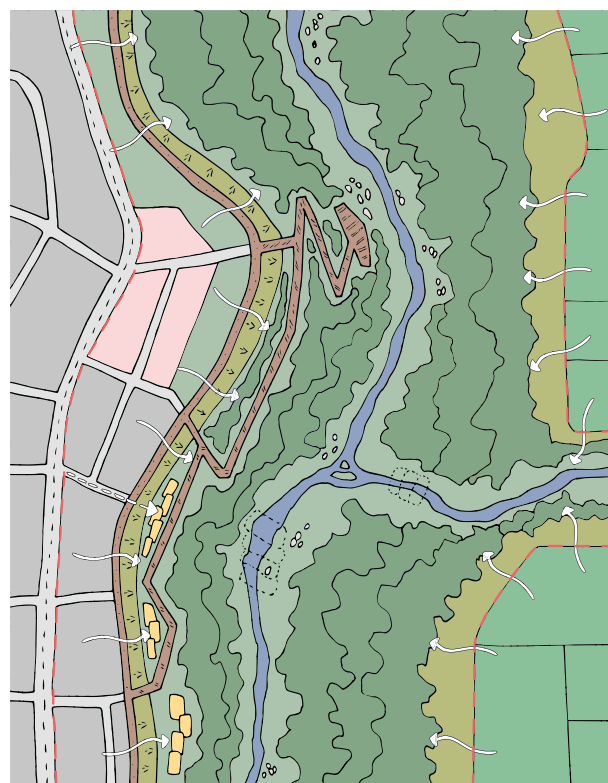
### Ventajas y desventajas

Teniendo en consideración que se buscará intervenir estos elementos naturales solo cuando muestren señales de deterioro y/o deban ser protegidos, la principal ventaja de la solución es la recuperación de cursos naturales, el aporte en términos de la provisión de espacios de recreación de calidad y la puesta en valor de ecosistemas de gran importancia. Otra ventaja de este elemento es que, incluso previo a su optimización, provee de importantes funciones hidrológicas a la red de drenaje.

Entre sus desventajas destaca que el proceso de revegetación del elemento, cuando se encuentra en condiciones importantes de deterioro, puede ser extenso.

### Requerimientos de mantenimiento

- Ciertas secciones de vegetación de las **franjas filtrantes** deben ser removidas periódicamente para evitar la colmatación producto de los sedimentos.
- Dependiendo del tipo de **disipador de energía** puede ser necesaria la mantención, de baja frecuencia, de la estructura.



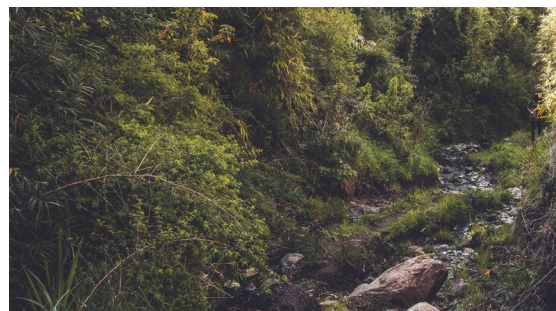
### Simbología:

-  Franja filtrante
-  Pavimento permeable
-  Senda peatonal elevada
-  Disipadores de energía
-  Disipadores de energía
-  Franja de vegetación depuradora
-  Zona de estacionamientos
-  Cuerpo o curso de agua
-  Área con vegetación nativa
-  Vegetación nativa arbórea / arbustiva
-  Zona de plantaciones agrícolas
-  Pavimento impermeable
-  Área impermeable
-  Conducción subsuperficial
-  Conducción superficial
-  Línea de restricción

## Casos de aplicación

Las quebradas son ejes de drenaje en los que el agua fluye de manera encajonada entre montañas o lomas, dando origen a cortes en forma de V. Comprende el lecho de escurrimiento esporádico o permanente, y las riberas que lo contienen y se caracterizan por altas pendientes. Dependiendo de condiciones particulares, el caudal puede desaparecer en épocas estivales, o transportar grandes caudales en eventos de precipitaciones extremas. Su descarga suele producirse hacia lagos, lagunas, ríos o esteros. Esta optimización se recomienda en quebradas de carácter urbano y solo cuando las condiciones de deterioro del elemento y/o la necesidad de protección lo requieran.

Es importante considerar que siempre va a ser preferible, a largo plazo, utilizar vegetación nativa para prevenir la erosión de laderas. Los componentes de detención presentados en esta solución, como los dissipadores de energía, aportan en el proceso de restauración de laderas a corto y mediano plazo, protegiendo el proceso de revegetación.



## Rendimiento multifuncional



### Funciones hidrológicas

|                |       |
|----------------|-------|
| Infiltración   | ● ○ ○ |
| Almacenamiento | ● ○ ○ |
| Conducción     | ● ● ● |



### Servicios ecosistémicos

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| Reducción de riesgo de inundación             | ● ● ● |
| Depuración de aguas                           | ● ● ○ |
| Provisión de hábitat y conectividad ecológica | ● ● ● |
| Provisión de espacios de recreación           | ● ● ● |

## QUEBRADAS

### Simbología:



Superficie permeable vegetada



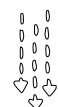
Superficie semipermeable vegetada



Superficie permeable tipo pavimento

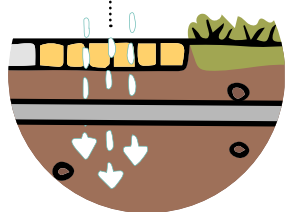


Superficie impermeable

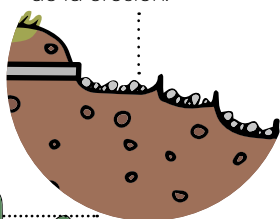


Infiltración

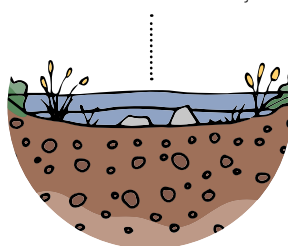
Los **pavimentos permeables** permiten desconectar las áreas impermeables o semipermeables.



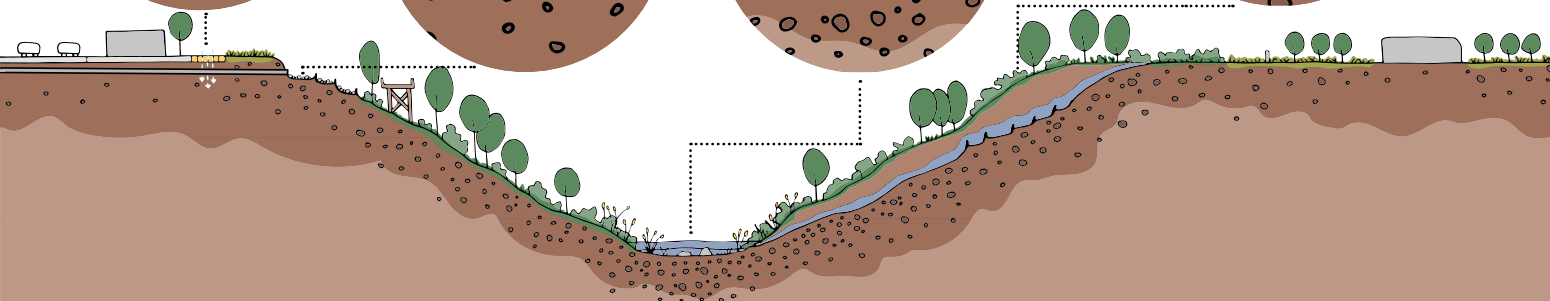
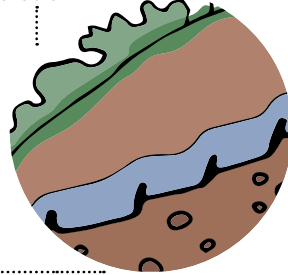
Las **aguas lluvias** que ingresan por descarga directa de la red subsuperficial de drenaje, acceden a dissipadores de energía que protegen de la erosión.



De ser pertinente, en el lecho de la quebrada se pueden incorporar **caídas** que eviten la erosión gracias a la disminución de la velocidad del flujo.



De existir **cursos de aportantes** a la quebrada con pendientes muy altas, es recomendable incluir caídas que eviten la erosión.







**Componente:**

## BORDES DE LAGO

### Escenario de diseño optimizado

Este escenario optimizado presenta la sección de borde de lago en que se transita desde zonas altamente urbanas hacia espacios periurbanos. Considerar el diseño de la zona baja de la imagen como la optimización para bordes en contextos urbanos de alta densidad. En zonas de menor ancho de borde o más urbanas, la escorrentía ingresa desde zonas impermeables de forma superficial, pasando en sentido aguas abajo, por franjas de infiltración longitudinal de bajas pendientes, zanjas de infiltración que permiten la sedimentación de algunos contaminantes y vegetación que tiene diversidad y complejidad de especies y estratos en correspondencia con su escala y área de intervención. De existir mayores áreas de borde (contextos periurbanos) se diseña o adapta un humedal de depuración. Este puede, por ejemplo, construirse en áreas de depresión o planicie de esteros naturales previo a su ingreso al cuerpo receptor.

El humedal de depuración puede recibir aguas de cursos naturales, escorrentía de predios agrícolas o parcelas y/o aguas lluvias de áreas con alta impermeabilidad (centros urbanos), canalizada a través de elementos como las propias zanjas de infiltración o canales de vegetación menores. Además, posee vegetación depurante. Las transiciones de áreas impermeables a áreas permeables ocurren al mismo nivel (sin soleras u otros obstáculos para el flujo). Cuando las aguas ingresan de forma subsuperficial, se recomienda (1) incorporar sedimentadores por gravedad en los conductos en zonas y alturas en las que puedan ser mantenidos (p. ej. bajo la acera) e (2) implementar enrocados en las zonas de ingreso de las aguas al borde del lago.

En el borde se mantienen senderos elevados como infraestructura para el uso público, además de plataformas que bajan por las pendientes hasta zonas cercanas al espejo de agua permanente.

### Escala de drenaje



Red primaria



Red natural

### Ventajas y desventajas

Teniendo en consideración que se buscará intervenir estos elementos naturales solo cuando muestren señales de deterioro, la principal ventaja de la solución es la protección del borde del lago, el aporte en términos de la provisión de espacios de recreación de calidad y la puesta en valor de ecosistemas de gran importancia. Otra ventaja de este elemento es que, incluso previo a su optimización, provee de importantes funciones hidrológicas a la red de drenaje.

Dentro de las desventajas destaca que, de no mantenerse periódicamente las franjas filtrantes y zanjas de infiltración, pueden perder su eficiencia. Por otra parte, dependiendo de la carga de nutrientes que ingresan al humedal, puede ser necesaria la implementación de trampas sedimentarias (y la mantención respectiva). Se debe también tener en consideración que una alta presencia de aves puede aumentar la contaminación por materia fecal.



### Simbología:



Franja filtrante



Pavimento permeable



Senda peatonal elevada



Zanja de infiltración



Humedal de depuración



Zona de playa



Zona de estacionamientos



Cuerpo o curso de agua



Área con vegetación nativa



Vegetación nativa arbórea / arbustiva



Pavimento impermeable



Área impermeable



Conducción subsuperficial



Conducción superficial



Línea de restricción

## Requerimientos de mantención

- Ciertas secciones de vegetación de las **franjas filtrantes** deben ser removidas periódicamente para evitar la colmatación producto de los sedimentos.
- Las **zanjas de infiltración** requieren de una revisión de su estado funcional y posible remoción de sedimentos cada 2 años. Cada 5 a 10 años realizar reemplazo total o parcial, o reparación de todos los elementos que compongan la zanja.
- Remoción esporádica de sedimentos y de vegetación en las obras de salida de los **humedales de depuración**.

## Casos de aplicación

Corresponde al borde urbano de grandes extensiones de agua dulce con espejo permanente que se alimentan, generalmente, del agua proveniente de esteros, ríos y/o quebradas que desembocan en ellos, así como también de precipitaciones y en algunos casos de filtración de aguas subterráneas.

El humedal de depuración debe localizarse fuera de la línea de restricción para evitar que frente a tormentas mayores se inunde y la contaminación acumulada en sus sedimentos sea descargada al lago.

Se recomienda promover la consolidación de un borde de vegetación nativa previo paso a las zonas de playa, asegurando la conectividad de hábitat a lo largo del borde del lago.

## Rendimiento multifuncional



### Funciones hidrológicas

|                |       |
|----------------|-------|
| Infiltración   | ● ○ ○ |
| Almacenamiento | ● ○ ○ |
| Conducción     | ● ● ● |



### Servicios ecosistémicos

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| Reducción de riesgo de inundación             | ● ● ● |
| Depuración de aguas                           | ● ● ○ |
| Provisión de hábitat y conectividad ecológica | ● ● ● |
| Provisión de espacios de recreación           | ● ● ● |

## BORDES DE LAGO

### Simbología:



Superficie permeable vegetada



Superficie semipermeable vegetada



Superficie permeable tipo pavimento



Superficie impermeable

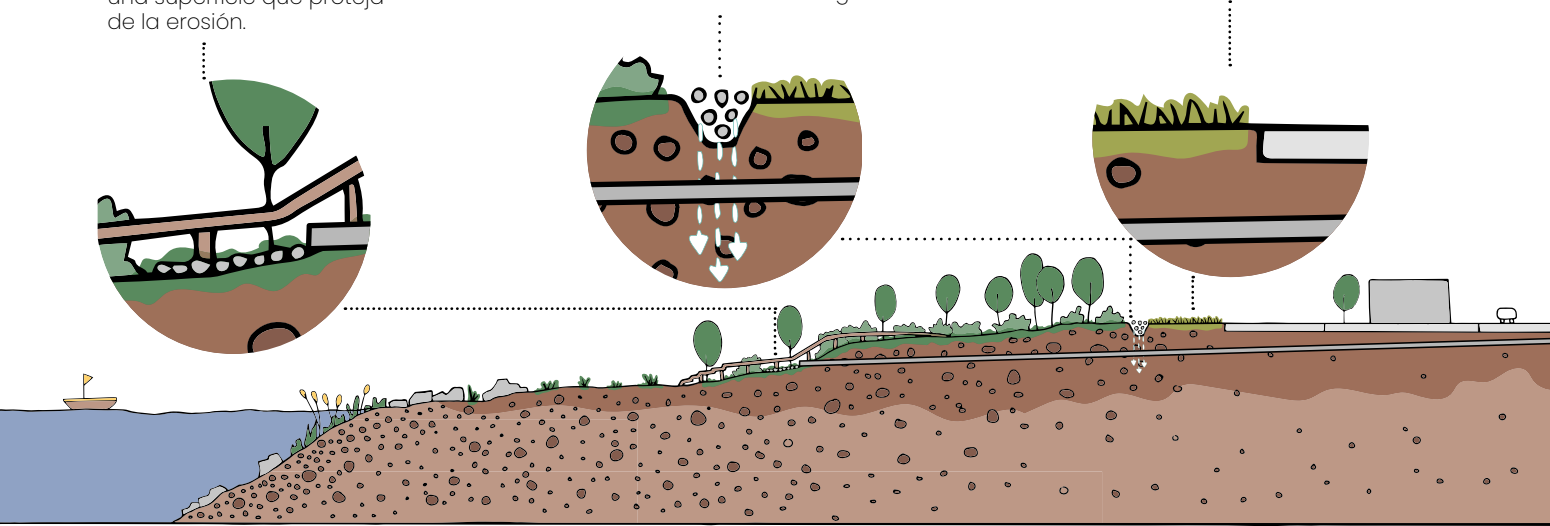


Infiltración

En donde existan **descargas directas** de la red de drenaje, se recomienda disponer de una superficie que proteja de la erosión.

La **escorrentía** de aguas lluvias primero ingresa por las franjas filtrantes, luego pasa por las zanjas de infiltración y finalmente entra al lago.

Las **franjas filtrantes** se encuentran al mismo nivel que los pavimentos impermeables. Pueden mantener elementos de protección discontinuos.



## D

## Glosario de soluciones DUS utilizadas en las fichas de optimización

Los casos optimizados fueron diseñados, en su dimensión hidrológica, integrando una serie de soluciones, conocidas por el nombre de “soluciones DUS” (Drenaje Urbano Sostenible) o “soluciones LID” (*Low Impact Development*). Estas soluciones son ampliamente estudiadas en la literatura, y es posible encontrar guías de diseño tanto nacionales como internacionales que entregan en detalle información para su dimensionamiento, construcción y mantenimiento.

A continuación, se presenta un glosario que describe, en términos muy generales, cada una de las soluciones que fueron integradas en las fichas de infraestructura verde. En cada caso se introduce, además, un rango de costos referenciales de diseño y construcción, cuyo objetivo es facilitar la comparación entre soluciones. Este valor toma un carácter global que, en la práctica, variará en función de factores como: dimensiones del elemento, condiciones iniciales, complejidad del diseño, volumen de aguas lluvias que debe manejar, entre otros.

## ● Sistemas de recolección de aguas lluvias

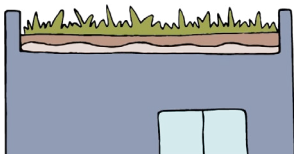
\$-\$\$\$



Corresponden a estructuras para la recolección, tratamiento (opcional) y reuso de AALL desde techos u otras áreas impermeables domiciliarias o industriales que permiten reducir la escorrentía aguas abajo en la red de drenaje. Algunos de los usos domiciliarios más comunes de las AALL son el riego, el lavado de vehículos y la carga de algunos componentes de la red de aguas grises (lavadora, inodoro, entre otros). En el último caso, adaptaciones a las conexiones domiciliarias pueden ser necesarias. Según su tamaño y uso pueden ser reconocidos como: **barriles** (200-350 litros), elementos de simple instalación que suelen utilizarse en domicilios pequeños; **cisternas** (hasta 70.000 litros), implementados en industrias, centros comerciales, estacionamientos y otros espacios similares; y **piletas** (50-100 litros/m<sup>2</sup>), cuyo objetivo no es solo ser un elemento de recolección y reutilización, sino que también ser un elemento ornamental.

## ● Techos verdes

\$\$-\$\$\$



Áreas de vegetación instaladas sobre los techos de distintas edificaciones cuyo principal objetivo es capturar y retener aguas lluvias a través de la infiltración y evapotranspiración. Estos elementos requieren del diseño de un sistema en capas con especial atención a la impermeabilidad y el efecto de las raíces. Los techos verdes disminuyen el área impermeable de las subcuencas. Pueden ser divididos en 2 categorías: (1) cubiertas intensivas, que poseen sustratos profundos (> 20 cm) y que permiten albergar una amplia gama de especies, y (2) cubiertas extensivas que se caracterizan por poseer sustratos poco profundos (< 20 cm) y utilizar especies de menor envergadura.

## ● Franja filtrante

\$-\$\$



Áreas uniformes, levemente inclinadas, cubiertas de vegetación densa que se caracterizan por recibir un flujo de agua que escurre de forma laminar sobre la superficie. Las franjas filtrantes permiten desconectar las áreas impermeables de la red evitando que las precipitaciones de tormentas menores, pero más frecuentes, generen grandes escorrentías aguas abajo. Las franjas filtrantes no se diseñan para controlar el volumen de captura pero permiten reducirlo. Entre sus ventajas destaca que, a moderadas velocidades de flujo, pueden ayudar a reducir los niveles de contaminantes en las aguas removiendo sedimentos, material orgánico y metales pesados. La efectividad del proceso de infiltración y filtración está sumamente ligada al diseño de la franja, el sustrato escogido y la vegetación que se utilice.

### ● Jardín de lluvia

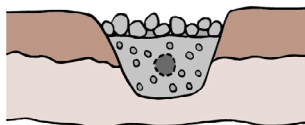
\$\$-\$\$\$



También conocidos como jardines de bioretención, los jardines de lluvia son **pequeñas obras de retención, infiltración y filtración que ayudan a retardar el flujo a través de espacios vegetacionales confinados, muchas veces deprimidos**, ubicados en casas, predios, centros comerciales y veredas de condominios, entre otros. Los diseños, sobre todo de las capas de suelo bajo las cubiertas vegetacionales, pueden ser simples o complejos dependiendo del grado de depuración o infiltración que se busque y de las condiciones propias del suelo. Así por ejemplo, ciertos diseños incorporan la recolección del agua filtrada mediante desagües subterráneos (tubos perforados) para su uso posterior o en caso de que las condiciones de infiltración no sean adecuadas. Otros, buscan infiltrar directamente las AALL a los suelos adyacentes promoviendo procesos como la recarga de acuíferos. Algunos diseños incluso incorporan el uso de geotextiles para evitar el lavado de los medios filtrantes.

### ● Zanja de infiltración

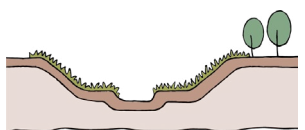
\$\$-\$\$\$



Áreas longitudinales rellenas de material granular grueso, generalmente tipo grava o ripio, contenido por geotextiles, que en su conjunto proporciona un volumen de almacenamiento temporal, infiltración y depuración. Las zanjas de infiltración reciben el agua de forma lateral y, en caso de no hacerlo, obras de dispersión como drenes superficiales son necesarios. Con todo esto, la solución puede ser diseñada para controlar el volumen de captura reduciendo la escorrentía total y los caudales máximos aguas abajo. Una de sus ventajas es que, a un bajo costo y uso de espacio, permiten filtrar partículas finas de contaminantes, sin embargo, los sistemas pueden colapsar rápidamente si son solo considerados con fines de depuración. Así, se espera que aguas arriba de la obra existan componentes que actúen de filtros, como franjas filtrantes.

### ● Estanque de detención

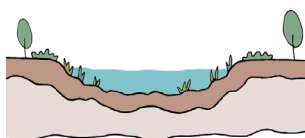
\$\$\$ - \$\$\$\$



Superficies de almacenamiento temporal de agua que se vacían por completo entre eventos de precipitación, controlando a través de obras de salida, el flujo de agua de descarga para disminuir los caudales máximos y reducir la carga sobre los elementos de drenaje aguas abajo. Suelen mantener un canal de flujos base, que conduce controladamente las aguas lluvias de eventos frecuentes. Bien diseñadas, permiten mejorar la calidad de las aguas del sistema mediante procesos de sedimentación.

### ● Humedal de depuración

\$\$\$\$- \$\$\$\$\$

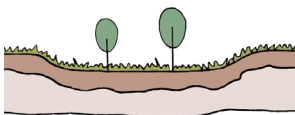


Superficies con capacidad de almacenamiento y tratamiento de aguas lluvias que mantienen un cuerpo de agua permanente (total o parcialmente reemplazado en tormentas) y que proveen de un volumen de amortiguación para crecidas mayores. Pueden soportar el crecimiento de vegetación tanto en orillas e islas como en el fondo y superficie del cuerpo de agua. Poseen un sistema de control del flujo de descarga para diferentes niveles de agua y en ocasiones, requieren de un flujo de entrada de agua entre eventos de precipitación para lograr la recirculación del volumen de agua permanente o para recuperar el agua que se pierde por evaporación e infiltración. Muy similar a la laguna de retención (otro concepto que suele ser utilizado indiscriminadamente para referirse a estos elementos) se diferencia de este por su énfasis en la función depuradora, para lo cual contempla ciertos elementos de diseño según los objetivos de calidad de agua (p. ej. sedimentador, zona de retención de materia orgánica, vegetación remediadora).



### ● Estanque de infiltración

\$\$ - \$\$\$



Áreas de depresión natural o artificial de poca profundidad con suelo permeable cubierto de vegetación que permite el almacenamiento temporal de las aguas lluvias y su posterior infiltración. Los sustratos son particularmente diseñados para facilitar la infiltración de las aguas lluvias y entre sus ventajas destacan el ser elementos de sencillo diseño que reducen los volúmenes de escorrentía, disminuyen los caudales máximos, soportan la recarga de acuíferos y depuran las aguas que acceden a las napas subterráneas. Su principal desventaja es que, sin el debido diseño y mantención, fallan rápidamente pues se colmatan de sedimentos y retienen agua por periodos extensos.

### ● Pavimentos permeables y celulares

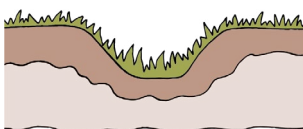
\$\$ - \$\$\$



Pavimentos que permiten la infiltración de aguas lluvias hacia capas granulares inferiores mientras posibilitan el tránsito de peatones, bicicletas e incluso vehículos. Con su uso, se reduce el área impermeable de las ciudades disminuyendo el volumen de escorrentía y los caudales máximos. Otras de sus ventajas incluyen: remover, en menores cantidades, elementos contaminantes a través de las capas de arena y grava ubicadas bajo las carpetas de rodado; reemplazar, reponer y efectuar reparaciones locales de la carpeta con facilidad; y proporcionar variabilidad estética al integrar nuevos tonos en zonas urbanas. Se distinguen dos tipos: (1) **pavimentos permeables**, carpetas continuas de asfalto o concreto poroso que se caracterizan por poseer una menor cantidad de material de fracción fina que el pavimento tradicional y (2) **pavimentos celulares**, cuyas carpetas están conformadas por bloques perforados, bloques ensamblados con separaciones o bloques porosos.

### ● Zanjas con vegetación

\$\$ - \$\$\$



Pequeños canales poco profundos y de baja pendiente que contienen vegetación densa tanto en su base como en sus taludes diseñados para transportar a bajas velocidades y alturas la escorrentía superficial proveniente desde áreas aportantes laterales, facilitando la sedimentación y evitando la erosión de los suelos. A lo largo de la zanja es posible diseñar obras favoreciendo la retención de contaminantes. Las zanjas con vegetación pueden actuar como corredores biológicos, facilitan el aumento en la biodiversidad de especies y su diseño es flexible para satisfacer requerimientos paisajísticos. Entre las desventajas principales destaca el uso de grandes superficies que además, sin la mantención adecuada, tienden a convertirse en focos de disposición de basura.

### ● Trampas sedimentarias o sedimentadores

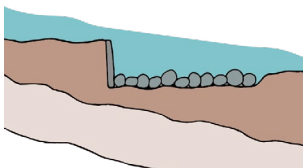
\$ - \$\$



Obras destinadas a remover por gravedad las partículas finas que el flujo de agua transporta en suspensión o como arrastre de fondo. Deben colocarse antes de que el agua ingrese a una obra en la cual la sedimentación de partículas finas pueda generar problemas, como los cuerpos naturales de agua. Pueden ser construidas como excavación del terreno natural, recubiertas de vegetación, hormigón u otros materiales. Pueden tomar diversas configuraciones, cada una con formas y tiempos de descarga distintos, por tanto también eficiencias de remoción variadas. Estos elementos requieren de mantención periódica (y los accesos para la maquinaria correspondiente). La falta de mantención es la primera causa de fracaso.

### ● Disipadores de energía

\$ - \$\$

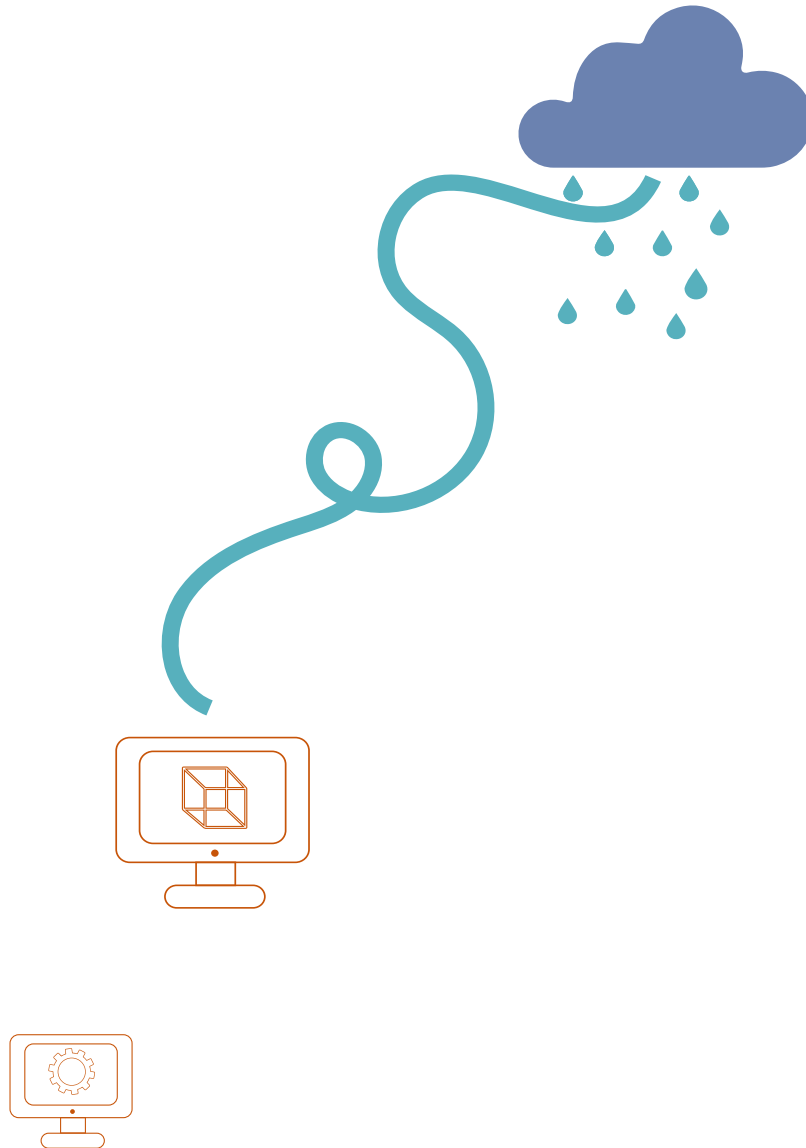


Elementos que permiten controlar las velocidades de flujo y favorecer el empozamiento para retardar la escorrentía. Comúnmente utilizados en elementos de altas pendientes, pueden estar constituidos por diferentes materiales, entre ellos, roca y madera.

### 3

## Modelación de alternativas optimizadas e iteración

---



Simular la implementación de diferentes alternativas de gestión de aguas lluvias (AALL) en el modelo permite, en primer lugar, iterar sobre la configuración propuesta hasta verificar el cumplimiento de las condiciones de diseño. Por otro lado, con un set de alternativas optimizadas es posible compararlas con la situación actual para seleccionar aquella que retorne mayores beneficios para la ciudad. El cómo conceptualizar estas alternativas en el modelo es un desafío que se aborda en el siguiente capítulo.

## Conceptualización de soluciones optimizadas en el modelo

La interfaz de modelación SWMM permite la conceptualización directa de algunas soluciones de drenaje urbano sostenible (DUS) incorporadas en los casos optimizados de infraestructura verde (IV), representadas como 'LID controls', entre ellas las celdas de bioretención, jardines de lluvia, techos verdes, zanjas de infiltración, pavimentos permeables, barriles de lluvia, desconexiones de techo y zanjas con vegetación. **Se utilizará el término LID para referir a los componentes "LID controls" que pueden ser utilizados en el ámbito de la modelación SWMM.**

Dependiendo del tipo de solución, es posible modificar los parámetros de hasta 4 capas de estos elementos. Estas capas son: **superficie, suelo, almacenamiento y drenaje subsuperficial**. Esta aplicación es muy útil cuando se trabaja sobre una modelación únicamente superficial, sin embargo, **cuando se considera un acople al sistema subterráneo, algunos elementos LID –particularmente aquellos que interactúan fuertemente con los subsuelos– pueden no integrarse bien en el modelo acoplado**. En estos casos, se recomienda representar los elementos de infraestructura verde usando otros componentes de SWMM, como unidades de almacenamiento o modificaciones directas sobre parámetros en las subcuencas aportantes.

Se debe tener en consideración que es probable que los elementos de IV de menor escala (espacios edificados, estacionamientos, plazas de barrio, rotondas, entre otros) hayan sido conceptualizados, en el caso base, dentro de subcuencas mayores y no como elementos aislados. Por tanto, representar las optimizaciones en el modelo será complejo si estas no responden a una escala territorial amplia, idealmente barrios o subcuencas. Se recomienda iterar considerando la implementación a esa escala.

A continuación, se presenta el detalle de las opciones de modelación para cada elemento de IV.

### Mecanismos de conceptualización de los elementos de infraestructura verde en el modelo

#### Techos y jardines

Dado que los techos verdes y sistemas de recolección de AALL son elementos que no interactúan fuertemente con los sistemas subterráneos, es posible utilizar los complementos LID de SWMM que se asocian a esos elementos: "*green barrel*" y "*green roof*". Si la modelación fuera puramente superficial (sin sistema acoplado), entonces también los jardines de lluvia podrían ser modelados a través del uso del complemento LID "*rain garden*".

Mecanismos alternativos para modelar la situación optimizada cuando la interacción subterránea no puede despreciarse son:

- Modificar el método de ruteo para considerar que las aguas que escurren por las áreas impermeables del subcuenca fluyen luego hacia las áreas permeables (lo que no implica necesariamente que todas ellas infiltran pues, los suelos tienen cierta capacidad limitada de infiltración y la modelación ocurre de forma continua).
- Modificar los parámetros de infiltración de los suelos y los porcentajes de área permeable de la subcuenca.
- Incorporar una unidad de almacenamiento con capacidad de infiltración a la salida de la subcuenca que represente el almacenamiento otorgado por elementos como jardines de lluvia o pavimentos permeables y, al mismo, tiempo permita la interacción de estos con el modelo de aguas subterráneas.

## Estacionamientos

Dado que los estacionamientos tipo lotes son elementos de pequeña proporción dentro de las subcuencas con que se conceptualiza el modelo superficial de drenaje, existen distintas opciones para considerar su optimización:

- Individualizar el elemento de IV como una pequeña subcuenca dentro del modelo. Sobre esta subcuenca se puede: (a) modificar el método de ruteo, (b) cambiar parámetros de infiltración de los suelos, (c) modificar el porcentaje de área permeable y/o (d) añadir una unidad de almacenamiento modelada con parámetros que permitan simular la capacidad de infiltración y almacenamiento del elemento. Notar que esta última alternativa no impide que las aguas interactúen con la red subterránea porque, es posible asociar una capacidad de infiltración a la base del estanque. Se recomienda revisar el ejemplo 3 del Manual de Aplicaciones de SWMM para más detalle sobre la metodología de implementación de unidades de almacenamiento al modelo.
- Considerar la optimización conjunta de todos los estacionamientos de una subcuenca y añadir una unidad de almacenamiento conceptualizada con parámetros que permitan simular la capacidad de infiltración y almacenamiento de la suma de los estacionamientos optimizados.
- Si no se trabaja con un sistema acoplado de modelación, los jardines de lluvia y pavimentos permeables, que son los principales componentes de la solución optimizada, pueden ser modelados directamente como complementos LID.

## Plazas de barrio

Se proponen los mismos mecanismos de conceptualización que aquellos descritos para estacionamientos. Sin embargo, a diferencia de ese elemento, la optimización del diseño de las plazas de barrio propone que la base completa se construya sobre un terreno levemente deprimido que actúe como espacio de almacenamiento para controlar tormentas de mayores magnitudes. Esto debe ser considerado al momento de definir las dimensiones de la unidad de almacenamiento.

Se recomienda revisar el ejemplo 3 del Manual de Aplicaciones de SWMM para más detalle sobre la metodología de implementación de unidades de almacenamiento al modelo.

## Parques urbanos

A diferencia de plazas de barrio y estacionamientos, los parques urbanos son elementos de mayor dimensión y por ende, mayor proporción dentro de la subcuenca. Así mismo, es poco probable que exista más de un parque urbano por subcuenca y por tanto, la mejor opción para conceptualizar el caso optimizado es, en primer lugar, individualizar el elemento como una subcuenca única.

Luego, existen distintas opciones para tomar en consideración los principales componentes del elemento optimizado (humedal de depuración o estanque de detención, pavimentos permeables, estanques de infiltración), entre ellas: (a) cambiar parámetros de infiltración de los suelos, (b) modificar el porcentaje de área permeable, (c) añadir una unidad de almacenamiento modelada con parámetros que permitan simular la capacidad de infiltración y almacenamiento del elemento y sus componentes como obras de entrada y salida. Adicionalmente se podrán considerar obras de conducción.

## Calles urbanas

Las calles urbanas suelen ser conceptualizadas como conductos en el modelo, sin embargo, es posible adicionar además una subcuenca que permita tomar en consideración el comportamiento de la escorrentía sobre estos elementos de forma aislada.

Un mecanismo para incorporar los principios de la optimización de este elemento en el modelo es modificar ciertos parámetros de la subcuenca asociada al área aportante de calles que actúan como conductos, entre ellos: (a) modificar el método de ruteo de la subcuenca para que se considere que el escurrimiento generado en las áreas impermeables fluye hacia las áreas permeables de la subcuenca, en este caso, las zanjas de infiltración, jardines de lluvia y/o franjas filtrantes, (b) cambiar el parámetro de almacenamiento en depresión del área permeable o D-store, que refiere a la capacidad de almacenamiento de aguas lluvias asociada a la rugosidad del suelo, agua luego que puede perderse por evapotranspiración, (c) asociar unidades de almacenamiento a la subcuenca, y/o (d) modificar los porcentajes de área permeable e impermeable.

Si el elemento también está representado como un elemento de conducción se recomienda incorporar conexiones a la red subsuperficial con nodos que tengan cierta capacidad de almacenamiento, esto se puede hacer con el parámetro *"Ponding Area"*.

Cuando la modelación no está acoplada al sistema subterráneo, es posible agregar complementos LID directamente en la subcuenca que representa el área aportante de calles, entre ellos: *rain garden* y *infiltration trench*.

## Avenidas parque

Se proponen los mismos mecanismos de conceptualización que aquellos descritos para las calles urbanas. Adicionalmente, la avenida parque en su diseño optimizado, incorpora zanjas con vegetación que permiten la conducción de aguas lluvias a bajas velocidades. Este escenario puede ser conceptualizado a través de la modificación del coeficiente de Manning asignado al conducto que representa la avenida.

## Rotondas

Se proponen los mismos mecanismos de conceptualización que aquellos descritos para estacionamientos.

## Líneas de ferrocarril

La selección del mejor mecanismo para incorporar los beneficios hidrológicos asociados a la optimización de este elemento en el modelo, dependerá de la conceptualización que se escogió en el caso base. En otras palabras, dependerá de si fue preferido considerarlo como un conducto (a) o como una subcuenca (b). Así mismo, dependerá de si la modelación considera un sistema acoplado con la red subterránea (c).

- Caso (a): El mecanismo involucra modificar el coeficiente de rugosidad de Manning y, posiblemente, la sección transversal del elemento.
- Caso (b): Entre las opciones para evaluar se encuentran el modificar diversos parámetros como el coeficiente de rugosidad de Manning para el flujo superficial, el porcentaje de impermeabilidad y/o el almacenamiento en depresión del área permeable o D-store.
- Caso (c): Incorporar como complemento LID las zanjas con vegetación (*vegetative swale*).

## Humedales y lagunas

Dependiendo del nivel de intervención, se podría considerar la modificación de la curva de almacenamiento asociado a la unidad de almacenamiento que representa al humedal o la laguna. Aquí se debe hacer notar que, dado que el enfoque de diseño propone que los cuerpos naturales de aguas no sean intervenidos a menos que sea necesario por su propia protección, es poco probable que grandes cambios en términos del funcionamiento hidrológico sean observados en la alternativa optimizada en comparación con la base.

Sin embargo, otros componentes del elemento pueden verse modificados por alguna resolución de diseño. Entre ellas, las obras de salida y los nodos afluentes al elemento.

Si se incorporan trampas sedimentarias al humedal, estas pueden ser conceptualizadas como unidades de almacenamiento en serie que representan el retraso en la entrada de la escurrentía.

## Esteros y arroyos

Los escenarios optimizados de estero y arroyos no modifican significativamente la provisión de funciones hidrológicas en comparación con el caso base. Solo en casos de gran deterioro del elemento puede ser necesario el tratamiento del cauce de base y, en dicho caso, consideraciones deben ser tomadas con respecto al coeficiente de rugosidad de Manning que se asigna al conducto en la modelación.

## Ríos

Los escenarios optimizados de ríos no modifican significativamente sus funciones hidrológicas en comparación con el caso base. Aún más, dependiendo del caso de estudio, es posible que no sean conceptualizados como elementos tipo conducto dentro del modelo, sino que como cuerpos receptores que solo le entregan condiciones iniciales al sistema. Con todo lo anterior, uno de los componentes que sí puede ser necesario modificar son los nodos de ingreso de las aguas lluvias debido a cambios de la red aguas arriba.

## Quebradas

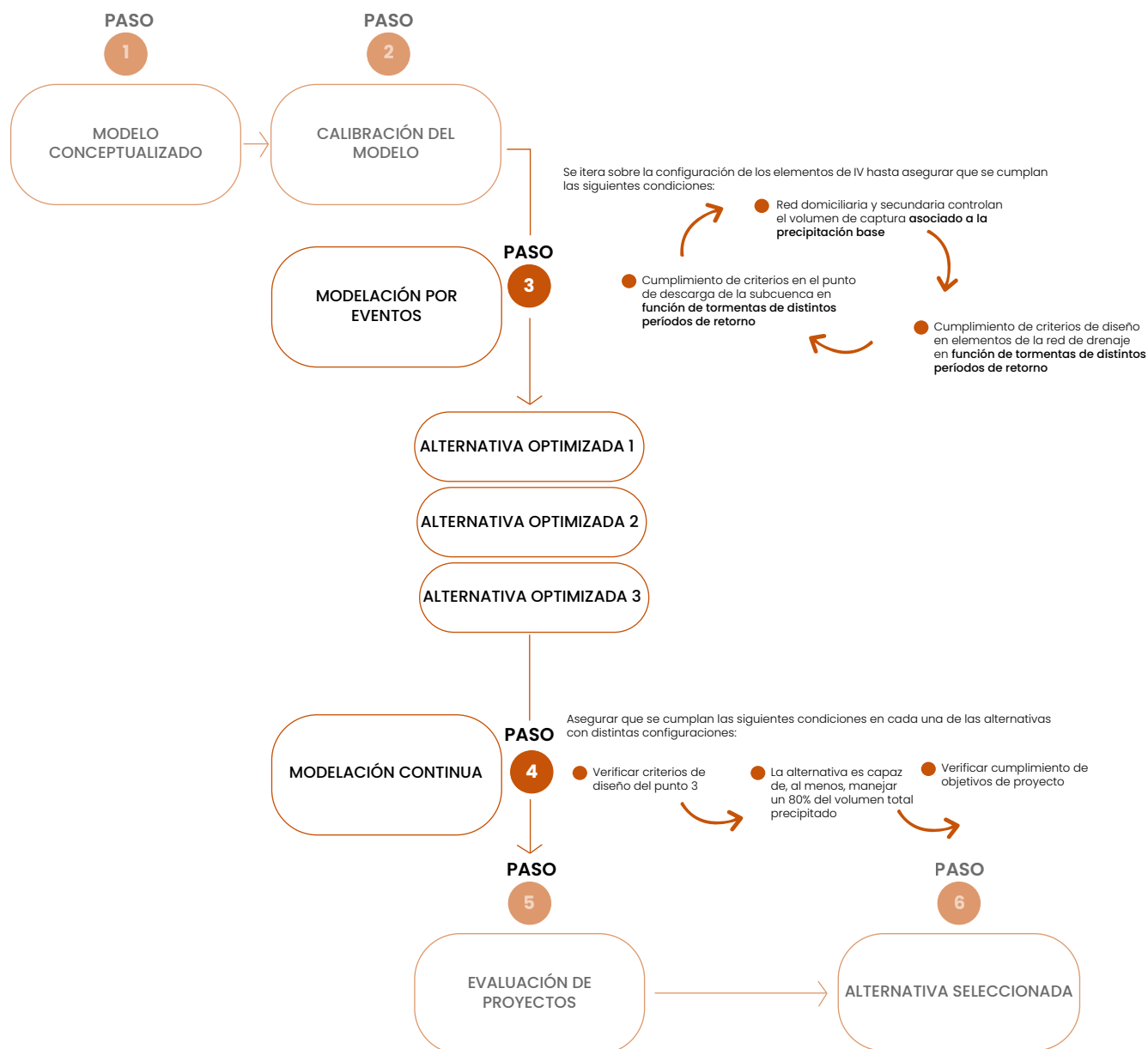
Los escenarios optimizados de quebradas no modifican significativamente sus funciones hidrológicas en comparación con el caso base. En los casos en que se considera apropiada la intervención de este elemento, los principales cambios tendrían relación con: (a) la velocidad de escurrimiento del agua por las riberas (revegetación e incorporación de sistemas de detención) y/o (b) la velocidad de agua por la quebrada (implementación de disipadores de energía). En ambos casos la variable que debiera ser modificada es el coeficiente de rugosidad de Manning, ya sea del elemento tipo conducto, si el cauce de agua fue conceptualizado como tal, o sobre el escurrimiento superficial de la subcuenca, en caso de que se haya, efectivamente, asociado una subcuenca como representación del área de las riberas de la quebrada.

## Bordes de lago

El escenario optimizado del borde de lago no modifica significativamente las funciones hidrológicas del elemento en comparación con el caso base. Los beneficios en este caso dicen mayor relación con la protección del cuerpo de agua y la conducción balanceada. Además, en ocasiones, no se asocia a ningún objeto particular dentro de la modelación al elemento, siendo más bien relevante en la definición de las condiciones de borde, de la misma forma que el río.

## Iteración y selección de alternativas optimizadas

Diseñar el sistema final de drenaje sostenible optimizado requiere de un proceso iterativo que asegure que los distintos criterios de diseño y objetivos del proyecto se cumplan. A grandes rasgos, el proceso puede ser entendido en los pasos 3 y 4 que se muestran gráficamente en la siguiente figura y que fueron introducidos en la Etapa 3.



### Paso 3 Modelación por eventos

Este paso pretende, a través de un enfoque de diseño por eventos, seleccionar alternativas con distintas configuraciones de elementos de IV que aseguren que la red domiciliaria y secundaria sea capaz de controlar el volumen de captura asociado a la precipitación base de la ciudad; pero que además asegure que en tormentas de distintos periodos de retorno, se cumplan los criterios básicos de diseño establecidos en el Manual de Drenaje Urbano para los elementos de la red de drenaje y las descargas aguas abajo de la ciudad.



Para construir estas alternativas optimizadas, se propone **iterar sobre la configuración y localización de las soluciones de IV** presentadas en el capítulo anterior. En este punto es importante notar que la infraestructura verde busca mayoritariamente controlar las tormentas frecuentes en la ciudad, por lo tanto se espera que trabajen conjuntamente con elementos convencionales de la red de drenaje, especialmente durante las tormentas mayores. En caso de que la urbanización en estudio no cuente con una red superficial o subsuperficial diseñada, se recomienda fuertemente complementar la IV con este tipo de elementos para disminuir el riesgo de inundación durante eventos extraordinarios.

El manejo del **volumen de captura** acerca el drenaje urbano a la situación natural y provee espacios para el control in situ de la calidad de la escorrentía, previo a su descarga a los cuerpos receptores.

**Un primer criterio a aplicar consiste en someter la alternativa optimizada a una precipitación base de diseño**, buscando que los resultados demuestren que la red domiciliar es capaz de controlar por infiltración, almacenamiento y/o evaporación, al menos los aportes de la precipitación directa sobre su superficie. También se debe comprobar que la red secundaria sea capaz de controlar la precipitación sobre toda la cuenca aportante a su punto de descarga. En caso contrario, se debe replantear la alternativa optimizada variando los elementos de IV considerados, las escalas de intervención, la localización de los elementos optimizados y otras características que aporten a la reducción de escorrentía, hasta llegar a una solución óptima.

**Un segundo criterio apunta al análisis de los caudales aguas abajo de la urbanización y su comparación con la cuenca en estado natural.** Aquí, los estándares mínimos de control de la escorrentía dependen del tipo de desarrollo que será intervenido, diferenciando si se trata de nuevas urbanizaciones o urbanizaciones ya consolidadas. En el primer caso, el flujo máximo generado durante tormentas menores (2-10 años de periodo de retorno), con la urbanización, debe ser siempre menor al flujo máximo del terreno en condiciones naturales, asegurando además que no existan fallas de diseño para tormentas mayores. En el caso de intervenciones sobre una urbanización ya consolidada, se buscará que el flujo máximo durante tormentas menores no sea mayor al flujo máximo generado en la urbanización previo a la intervención, asegurando también que no existan fallas de diseño para tormentas mayores.

Otros criterios de diseño relevantes son aquellos asociados a los **escurrimientos sobre vías públicas**. La siguiente tabla presenta algunos, diferenciando según el tipo de calle asociada a la clasificación que propone el Manual de Carreteras.

### Criterios de diseño para el escurrimiento en vías públicas (MOP, 2013)

| Tipo de calle            | Condiciones máximas para tormentas menores (T= 2 años)                                                                        | Condiciones máximas para tormentas mayores (T= 100 años)                                                                                                                                          |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Todos los tipos de calle | La altura de agua no puede sobrepasar el nivel de la solera y el ancho de inundación en la cuneta no debe superar 1,2 metros. | La inundación no puede alcanzar la línea de edificación en altura ni en extensión. La profundidad máxima de agua en todo el perfil es de 15 cm. La velocidad del agua no puede superar los 2 m/s. |
| Pasajes                  | Dejar libre al menos 1 metro a cada lado junto a la línea de edificación.                                                     |                                                                                                                                                                                                   |
| Locales y de servicio    | Dejar libre al menos una pista (3 metros) en cada sentido.                                                                    | El nivel del agua no sobrepasa la solera, y en todo caso su altura es menor a 15 cm.                                                                                                              |
| Colectoras y troncales   | Dejar libre, al menos, una pista de cada sentido si la calle es de doble dirección y una pista si es de sentido único.        | Debe quedar una pista libre de agua.                                                                                                                                                              |

Existen además criterios asociados a la velocidad máxima y mínima del escurrimiento sobre la superficie de ciertos elementos, particularmente, de elementos de conducción superficial como calles o canales (incluidas zanjas con vegetación). La velocidad mínima del flujo aconsejable es de 0,25 m/s para evitar estancamientos, y la velocidad máxima permisible dependerá de si el elemento está revestido o no, y del tipo de revestimiento. Para más detalles se recomienda revisar las secciones 3.703 y 3.704 del Manual de Carreteras.

**La modelación por eventos requiere de especial cuidado para seleccionar condiciones iniciales** (alturas en cuerpos de agua, flujo en canales, condición de humedad del suelo, entre otras), ya que el espacio de tiempo a modelar es corto y los resultados, por lo tanto, muy dependientes de esa condición. Lo anterior toma mayor relevancia cuando existe influencia del sistema subterráneo y se utiliza un modelo acoplado superficial-subterráneo, ya que en estos casos también hay que especificar alturas para la napa freática en cada celda del modelo subterráneo.

En un modelo continuo en cambio, las variables tienen tiempo para evolucionar e independizarse de la condición inicial (lo que se puede lograr también a través de un período de “warm-up” del modelo). Las condiciones iniciales para una modelación por eventos pueden ser difíciles de definir cuando el monitoreo en la cuenca es limitado. Debido a esto, al modelar por eventos, se sugiere considerar como condición inicial de las distintas variables aquella observada en algún instante de la temporada húmeda, o durante una tormenta mayor en el modelo continuo. Otra opción es modelar de forma continua e incorporar de forma sintética el evento que se busca estudiar en la serie continua de precipitación observada.

#### Paso 4 Modelación continua

En este paso se busca modelar de forma continua las distintas alternativas optimizadas, seleccionadas en el paso anterior. Acá se debe asegurar que en un período más prolongado de tiempo y eventos:

- Los criterios de diseño siguen cumpliéndose.
- El nivel de inundaciones que cada alternativa produce es el deseable según los objetivos del proyecto.
- En promedio, existe control de un 80% del volumen total precipitado sobre el área de estudio.

Las alternativas optimizadas escogidas a priori según los criterios de selección anteriores pueden ser estudiadas con más en detalle a través de los distintos resultados obtenidos de la modelación continua, como por ejemplo, las curvas de frecuencia y curvas de duración (revisar Etapa 3 para más detalle). Estos resultados permitirán, además, comparar las distintas alternativas escogidas en base a una evaluación costo-beneficio, descrita en el siguiente capítulo.

La necesidad de reevaluar el cumplimiento de las condiciones de diseño en una modelación continua se relaciona con dos aspectos:

- La modelación continua permite desprenderse de los supuestos tomados para las condiciones iniciales, dado que representa el efecto de un conjunto de tormentas reales en un período extenso de lluvias y no de solo una tormenta hipotética.
- En una modelación por eventos no es útil acoplar el modelo con uno de aguas subterráneas, ya que la respuesta de este último es mucho más lenta. En los casos en que la interacción superficial-subterránea es importante, la modelación por eventos puede sobrevalorar la capacidad de infiltración del sistema y, por ello, es importante asegurar el cumplimiento de los criterios.

#### CONSEJO

Se debe tener en consideración la escala de modelación en la definición de las condiciones de diseño. Los criterios expuestos en esta sección siguen una lógica de modelación a escala de ciudad. Sin embargo, a escalas menores, las condiciones que se buscarán satisfacer serán más específicas y se relacionarán directamente con el diseño de componentes particulares.

El Manual de Drenaje Urbano (MOP, 2013), en su capítulo 5 titulado “Técnicas de Diseño de Redes”, presenta los períodos de retorno de las tormentas de diseño a las que deben responder algunas soluciones DUS comunes, en términos de operación y seguridad.

# 4

## Evaluación de proyectos DUS

---



---

La evaluación integral de un proyecto de drenaje urbano sostenible (DUS) tiene varias dimensiones, entre las que destacan la económica, la social y la medioambiental. A esto se debe sumar el interés ciudadano e incluso político, que pueden ayudar a beneficiar una alternativa por sobre otra.

Para apoyar la toma de decisiones en proyectos de inversión pública, una de las herramientas más comúnmente utilizadas es la **evaluación social de proyectos**. Esta herramienta busca cuantificar los beneficios sociales, ambientales y económicos de un proyecto y compararlos con los costos de inversión y mantención a través de un análisis costo-beneficio o costo-efectividad. Así, es posible determinar **en qué medida un proyecto de inversión tendrá un efecto sobre la sociedad en términos económicos, ambientales y de bienestar**.

El resultado de esta evaluación se plantea finalmente en términos de Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno Social (TIRS); sin embargo, es importante mencionar que esta es solo una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, y que la selección final de una alternativa no siempre será la que entregue el mayor VAN o TIRS; sino que hay muchos otros aspectos a considerar, entre ellos, la opinión de la ciudadanía. El presente capítulo se centra principalmente en la evaluación social de proyectos como herramienta. En la Etapa 5 se detallan otros aspectos relevantes a considerar al momento de desarrollar e implementar un plan de drenaje sostenible.

El Ministerio de Desarrollo Social y Familia ha elaborado guías con lineamientos generales sobre cómo evaluar proyectos aplicando la metodología de evaluación social, además de guías específicas para el caso de proyectos de aguas lluvias, las cuales son especialmente útiles para evaluar proyectos de inversión pública. Entre ellas, destacan: “Metodología General de Preparación y Evaluación de Proyectos” (Ministerio de Desarrollo Social y Familia [MIDESO], 2013) y “Metodología de Formulación y Evaluación de Proyectos de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias” (MIDESO, 2017), ambas disponibles en su sitio web.

Basado en estas metodologías, a continuación se desglosan los costos y beneficios de proyectos de infraestructura verde (IV) para el DUS.

## A

## Beneficios

**A través del uso y la optimización de IV, los proyectos de DUS debieran generar más beneficios que un proyecto de drenaje de aguas lluvias convencional.** Esto, ya que en la evaluación social de beneficios se incluyen más dimensiones. De acuerdo a MIDESO (2013), los beneficios que puede generar un proyecto cualquiera se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- **Aumento del consumo de un bien o servicio:** este beneficio se presenta cuando el proyecto aumenta la oferta disponible y por lo tanto provoca una disminución en el costo para el consumidor, provocando un aumento en la cantidad consumida.
- **Ahorro de costos:** se produce cuando el proyecto permite una disminución en los costos (ya sea de operación, de mantención, costo usuario, entre otros) con respecto a la situación sin proyecto.
- **Revalorización de bienes:** se produce cuando el proyecto permite aumentar el valor patrimonial de algún bien, ya sea por intervención directa o por los efectos provocados en el entorno inmediato.
- **Reducción de riesgos:** cuando el proyecto aumenta los niveles de seguridad de un determinado servicio.
- **Mejoras en el medio ambiente:** intervenciones que permiten recuperar espacios y recursos naturales.
- **Seguridad nacional:** cuando el proyecto está enfocado a resguardar la soberanía, los límites territoriales, etc.

Respectivamente, un **proyecto de drenaje de aguas lluvias convencional** y un **proyecto de DUS basado en IV**, aportan a:

| Beneficios                    | Proyecto de drenaje convencional | Proyecto DUS basado en IV |
|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Consumo de un bien o servicio |                                  | ●                         |
| Ahorro de costos              | ●                                | ●                         |
| Revalorización de bienes      |                                  | ●                         |
| Reducción de riesgos          | ●                                | ●                         |
| Mejoras en el medio ambiente  |                                  | ●                         |
| Seguridad nacional            |                                  |                           |

## ¿Cómo un proyecto de drenaje sostenible basado en infraestructura verde aporta en estas categorías?

### Consumo de un bien o servicio:

- Aumento en la oferta de espacios recreativos.

### Ahorro de costos (MIDESO, 2017)

- Menor daño en propiedades residenciales.
- Menor daño en propiedades comerciales e industriales.
- Menor daño en establecimientos públicos.
- Menor daño en vehículos.
- Menor deterioro de la infraestructura vial.
- Disminución de los costos generalizados de viaje (CGV).
- Menores gastos de emergencia y limpieza de vías y sumideros.
- Menor ausentismo laboral.
- Menor ausentismo escolar.
- Liberación de recursos públicos en salud.
- Liberación de recursos públicos en ONEMI.

### Revalorización de bienes

- Recuperación de terrenos baldíos anegadizos.
- Impacto positivo en el entorno y aumento en el valor del suelo.
- Aumento en el valor turístico de la zona.

### Reducción de Riesgos

- Reducción del riesgo de inundación
- Reducción del riesgo de contaminación y salud.
- Reducción de riesgo producto del cambio climático.

### Mejoras en el medio ambiente

- Recuperación de espacios y recursos naturales.
- Mejora en la calidad de aguas lluvias.
- Menor frecuencia de descarga de aguas servidas en cuerpos de agua naturales\*.

\* Este último punto es especialmente relevante en la macrozona sur, en donde, ya sea en sistemas unitarios o separados, las precipitaciones que ingresan a la red de aguas servidas colapsan el sistema y obligan muchas veces a las empresas sanitarias a utilizar el aliviadero de tormenta, saltándose los sistemas de tratamiento y vertiendo aguas servidas no tratadas directamente a los ríos o lagos.

## Cuantificación de beneficios

Para cuantificar los beneficios que tienen relación con daños evitados y reducción de riesgo, existen dos alternativas: un **análisis probabilístico por evento**; y un **análisis basado en modelación continua**.

El **enfoque probabilístico por evento** consiste en asignar una probabilidad de ocurrencia a distintos tipos de tormentas caracterizadas por su intensidad y duración (lo cual se puede obtener de una curva IDF), y estimar las consecuencias de cada tormenta en términos de daños y costos, según las variables expuestas anteriormente. Para ello, se emplea un modelo numérico hidráulico tipo HEC-RAS o SWMM que permite estimar las profundidades de inundación de cada evento, para luego traducirlas a daños o costos.

Esto se hace tanto para la situación actual, como para la situación con proyecto u optimizada. El resultado son dos curvas de probabilidad vs. costo esperado, las cuales permiten comparar ambas situaciones (con y sin proyecto), y estimar así el beneficio económico y social del proyecto. Esta metodología se detalla en profundidad en la guía del MIDESO (2017).

La segunda alternativa, basada en **simulación continua**, consiste en modelar series de tiempo de precipitación de larga duración a escala horaria y determinar de esta manera los costos al final de un periodo de tiempo determinado. Esto también se desarrolla para la situación actual y para la situación con proyecto u optimizada, para luego comparar ambas y estimar así los beneficios de implementar el proyecto. Los avances en términos computacionales y de disponibilidad de datos hacen que este enfoque esté pasando a ser la norma en evaluación de proyectos de drenaje urbano, ya que presenta varios **beneficios**:

- **Permite evaluar de mejor manera variables que se relacionan con el tiempo**, como el retraso en tiempos de viaje o las horas al año que una infraestructura pública permanece inundada o inutilizable (calles, pasos peatonales, paraderos, estacionamientos, edificios públicos, escuelas, plazas o parques).
- **Es más realista en términos de distribución de precipitaciones**, ya que se modelan eventos reales observados.
- **Considera los tiempos entre eventos** (p. ej. permite saber qué pasa cuando ocurren dos eventos seguidos).
- **Permite evaluar parámetros de calidad de agua**, los cuales dependen mucho del tiempo entre eventos.
- **Permite acoplar el modelo superficial con un modelo de aguas subterráneas**, como se mostró en la Etapa 3.

Para la evaluación de beneficios, es útil considerar las **curvas de frecuencia y curvas de duración** provenientes del modelo continuo y ver cómo estas se mueven al considerar distintas alternativas de diseño, en comparación a la situación base (ver Etapa 3). **En términos generales, toda alternativa que permita reducir la frecuencia de inundaciones y los tiempos de anegamiento estará generando un beneficio.** La única excepción son los parques inundables, cuyo tiempo de no uso por estar inundados debiera estar asociado a un mayor beneficio en otro punto de la red.

Para cuantificar el **beneficio por daño evitado**, es necesario conocer las **curvas de altura de agua vs. daño**, también conocidas como “curvas de fragilidad”. La estimación de estas curvas escapa del alcance de esta guía, pero generalmente se construyen a partir de evidencia empírica, la cual puede provenir de información de autoridades locales en base a eventos pasados, o bien de estudios y referencias internacionales. Entre estas referencias destaca la desarrollada por la Federal Emergency Management Agency (s.f.) para su modelo Hazus, que incluye tablas de estimación de costos por daños directos e indirectos, para infraestructura pública y privada.

Cuantificar el **beneficio medioambiental** o el beneficio de los servicios ecosistémicos es una de las tareas más complejas, pero a la vez más importantes en la evaluación de proyectos. Esto ya que si bien la ciudadanía puede describir los ecosistemas como “invaluables” o que “no tienen precio”, esta descripción no logra permear finalmente hacia el proceso de evaluación y toma de decisiones para frenar la degradación de ecosistemas en pos de otros beneficios.

Por esta razón, **es muy relevante cuantificar el beneficio de los servicios ecosistémicos en términos monetarios**, para que logre entrar en la ecuación de la evaluación social de proyectos y no quede como un beneficio ambiguo, que finalmente no es considerado. Para lograr esto, es necesario aplicar una metodología de evaluación como la Valorización de Servicios Ecosistémicos (VSE) –en inglés, *Ecosystem Services Valuation*–. Los detalles sobre la aplicación de esta metodología trascienden los objetivos de esta guía, pero diversos autores como Liu et al., (2010) explica sus usos, su evolución hacia un enfoque más interdisciplinario y cómo aplicarla. A continuación, se presentan algunos de los métodos utilizados para valorizar los servicios ecosistémicos (adaptado de Farber, Constanza & Wilson, 2002):

#### Enfoques de preferencia revelada

- **Métodos de mercado:** las valoraciones se obtienen directamente de lo que las personas están dispuestas a pagar por el servicio o bien (p. ej. la extracción de madera).
- **Costo de viaje:** las valoraciones de las comodidades basadas en el sitio están implícitas en los costos en que las personas incurren para disfrutarlas (p. ej. lagos recreativos más limpios).
- **Métodos hedónicos:** el valor de un servicio está implícito en lo que las personas estarán dispuestas a pagar por el servicio mediante compras en mercados relacionados, como el mercado de la vivienda (p. ej. servicios de espacio abierto).
- **Enfoques de producción:** los valores de los servicios se asignan a partir de sus impactos en los resultados económicos (p. ej. mayor extracción de camarón en una mayor superficie de humedales).

### Enfoques de preferencia de estado

- **Valoración contingente:** Se pregunta directamente a las personas sobre su disposición a pagar o aceptar una compensación por algún cambio en el servicio ecológico (p. ej. disposición a pagar por un aire más limpio).
- **Análisis conjunto:** Se pide a las personas que elijan o clasifiquen diferentes escenarios de servicios o condiciones ecológicas que difieren en la combinación de esas condiciones (p. ej. elegir entre escenarios de humedales con diferentes niveles de protección contra inundaciones y rendimiento pesquero).

### Enfoques basados en costos

- **Costo de reemplazo:** la pérdida de un servicio del sistema natural se evalúa en términos de lo que costaría reemplazarlo (p. ej. valores de tratamiento terciario de humedales si el costo de reemplazo es menor que el valor que la sociedad asigna a ese tratamiento).
- **Costo evitado:** un servicio se valora sobre la base de los costos evitados o en la medida en que permite evitar costos en prevención y mitigación (p. ej. el agua limpia reduce los costosos incidentes de problemas gastrointestinales).

### Enfoque de transferencia de beneficios

Cuando se tienen escasos o nulos datos, se puede adaptar la información o los datos de las VSE existentes, a los nuevos contextos (por ejemplo, los beneficios de observación de vida silvestre en un parque se estiman a partir de la valorización de la observación de vida silvestre en otro parque similar).

Para complementar el análisis, se pueden emplear métodos de evaluación no monetarios, como los descritos por la United States Environmental Protection Agency (2009).

La siguiente tabla adaptada de Barbier et al. (2009), resume algunos de estos métodos de valorización de servicios ecosistémicos:

| Método de valorización       | Tipos de valores considerados* | Tipos comunes de aplicación                                                                                                                                        | Servicios ecosistémicos valorizados                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Costo de viaje</b>        | Uso directo                    | Recreación                                                                                                                                                         | Mantenimiento de especies benéficas, ecosistemas productivos y biodiversidad                                                                                                                                                                                   |
| <b>Costo evitado</b>         | Uso directo                    | Impactos ambientales en salud humana                                                                                                                               | Control de contaminación y depuración                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Precio hedónico</b>       | Uso directo e indirecto        | Impactos ambientales en propiedad residencial y morbilidad y mortalidad humana                                                                                     | Protección de tormentas; control de inundaciones; mantenimiento de la calidad del aire                                                                                                                                                                         |
| <b>Producción</b>            | Uso indirecto                  | Pesca comercial y recreacional; sistemas de agricultura; control de especies invasivas; protección de cuencas; costos de daños evitados                            | Mantenimiento de especies benéficas; mantenimiento de tierra arable y productividad agrícola; prevención de daños de erosión y sedimentación; recarga de aguas subterráneas; drenaje e irrigación natural; protección de tormentas; mitigación de inundaciones |
| <b>Costo de reemplazo</b>    | Uso indirecto                  | Costos de daño evitado; suministro de agua dulce                                                                                                                   | Drenaje e irrigación natural; protección de tormentas; mitigación de inundaciones                                                                                                                                                                              |
| <b>Preferencia declarada</b> | Uso y no uso                   | Recreación; impactos ambientales en salud humana y propiedad residencial; costos de daños evitados; valores existentes y legados de la conservación de ecosistemas | Todos los de arriba                                                                                                                                                                                                                                            |

**\*Tipos de valores considerados:**

- **Valores de uso:** por lo general implican alguna “interacción” humana con el medio ambiente.
- **Valores de no-uso:** representan a aquellos individuos que valoran la sola “existencia” de un hábitat o ecosistema natural, o que desean dejarlo como “legado” a las generaciones futuras.
- **Valores de uso directo:** se refieren tanto a usos consuntivos, como no consuntivos, que implican alguna forma de interacción física directa con bienes y servicios ambientales, como realizar actividades recreativas, recolectar recursos, beber agua limpia, respirar aire no contaminado, etc.
- **Valores de uso indirecto:** se refieren a aquellos servicios ecosistémicos cuyos valores solo pueden medirse indirectamente, ya que derivan de la protección de actividades que tienen valores directamente mensurables.

**B****Costos**

Los costos asociados a proyectos de drenaje urbano pueden separarse en **costos de inversión** y **costos de operación y mantención**. Además, se debe calcular el valor residual del proyecto al final de su vida útil, el cual se considera como un beneficio.

- **Costos de inversión:** aquellos relacionados con la infraestructura y equipamiento de los sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvias, como por ejemplo, movimientos de tierra, instalación de colectores y tuberías, rotura y reposición de pavimentos, entre otros. También se incluyen los costos de asesorías técnicas, obras civiles, acondicionamiento de terrenos, entre otros.
- **Costos de operación y mantención:** se registran a lo largo de la vida útil del proyecto y son los que permiten el funcionamiento y la mantención del sistema. Por ejemplo, el retiro y disposición de sedimentos, recursos humanos del encargado de operar el sistema, etc.

Un proyecto de drenaje urbano sostenible basado en infraestructura verde no debiera implicar mayores costos que un proyecto de drenaje urbano convencional, tanto en términos de inversión como en términos de mantención y operación.

Si bien es cierto que la menor experiencia en Chile con este tipo de proyectos puede generar mayor incertidumbre respecto a los costos y, por lo tanto, mayores costos en la evaluación, esta incertidumbre estará compensada finalmente por los mayores beneficios que este tipo de proyecto presenta.

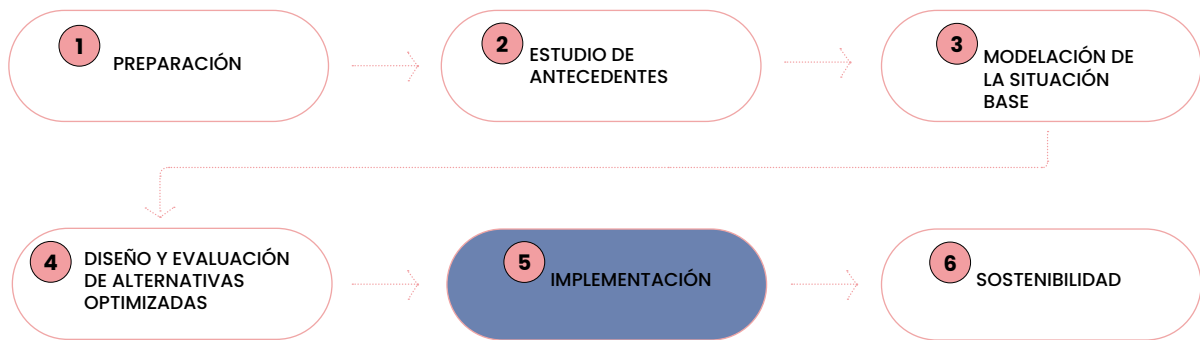
En términos de inversión, muchos de los componentes DUS –como pavimentos permeables, jardines de lluvia y zanjas de infiltración– han sido implementados en Chile, y es posible acceder a sus estructuras de costos mediante la búsqueda de licitaciones públicas pasadas en el portal ‘Mercado Público’, de ChileCompra. Respecto a la mantención, el estudio llamado “Costos de mantención de las áreas verdes urbanas en Chile” (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2014) hace un análisis por macrozona y puede ser una fuente útil para estimar los costos de mantención.

En la Etapa 6 del presente volumen se aborda la necesidad de adoptar modelos económicos sostenibles para la operación y mantención, además de discutir a quién le corresponden estos costos en la actualidad y cómo podrían abordarse las brechas existentes bajo la mirada del DUS basado en infraestructura verde.



## REFERENCIAS:

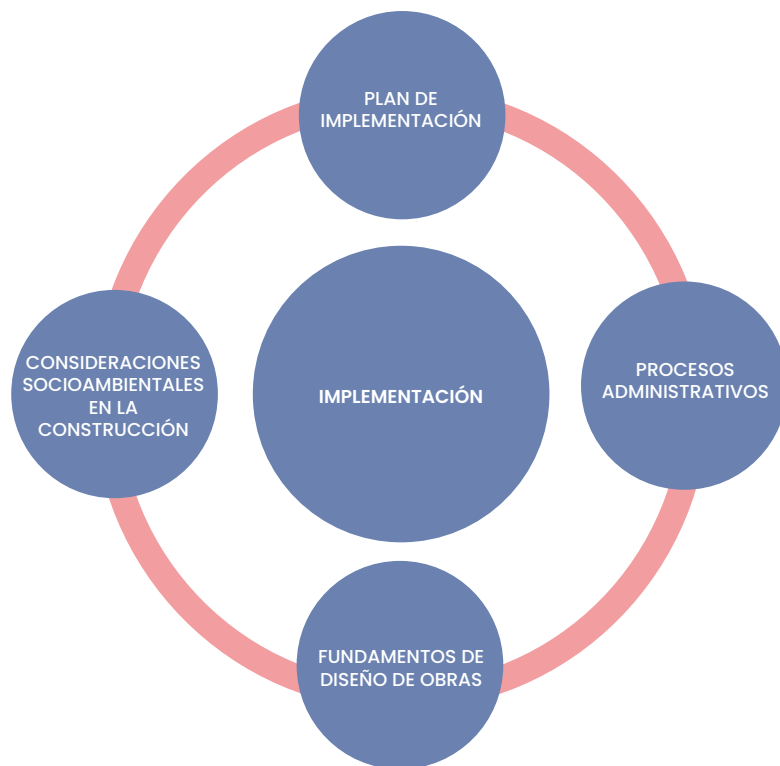
- Barbier, E. B., Baumgärtner, S., Chopra, K., Costello, C., Duraiappah, A., Hassan, R., ... Perrings, C. (2009). The valuation of ecosystem services. *Biodiversity, ecosystem functioning, and human wellbeing. An ecological and economic perspective*. Oxford University Press, New York, USA, 248-262.
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2012). *Green infrastructure: linking landscapes and communities*. Island press.
- Farber, S. C., Costanza, R., & Wilson, M. A. (2002). Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. *Ecological economics*, 41(3), 375-392.
- Federal Emergency Management Agency. (s.f.). Hazus Multi-hazard Loss Estimation Methodology. *Flood Model Technical Manual*. Washington, EE. UU. Recuperado de: <https://www.fema.gov/flood-maps/tools-resources/flood-map-products/hazus/user-technical-manuals>
- Flores, A., Pickett, S. T., Zipperer, W. C., Pouyat, R. V., & Pirani, R. (1998). Adopting a modern ecological view of the metropolitan landscape: the case of a greenspace system for the New York City region. *Landscape and urban planning*, 39(4), 295-308.
- Landscape Institute. (2009). *Green infrastructure: connected and multifunctional landscapes*. Londres: The Landscape Institute Policy Committee. Recuperado de <https://landscapewpstorage01.blob.core.windows.net/www-landscapeinstitute-org/2016/03/GreenInfrastructurepositionstatement13May09.pdf>
- Liu, S., Costanza, R., Farber, S. & Troy, A. (2010). Valuing ecosystem services. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185(1), 54-78.
- Luoni, S., Amos, C. A., Breshears, K., Huber, J., Jacobs, C., Reyenga, S. M., ... Lewis, S. (2010). Low Impact Development: a design manual for urban areas. *University of Arkansas Community Design Center. Fayetteville, AR, USA*.
- Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2013). Metodología de General de Preparación y Evaluación de Proyectos. *División de Evaluación Social de Inversiones*.
- Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2017). *Metodología Formulación y Evaluación de Proyectos de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias*.
- Ministerio de Obras Públicas [MOP]. (2013). *Manual de Drenaje Urbano: Guía para el diseño, construcción, operación y conservación de obras de drenaje urbano*. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas. (2016). *Manual de Carreteras: Instrucciones y Criterios de Diseño*. Dirección de Vialidad, Santiago, Chile. Recuperado de <https://portal.ondac.com/601/w3-article-59868.html>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2014). *Costos de mantención de las áreas verdes urbanas en Chile*.
- Pennsylvania Department of Environmental Protection. (2006). *Pennsylvania Stormwater Best Management Practices Manual*. Pennsylvania, EE. UU.
- Tomer, M. D., Porter, S. A., James, D. E., Boomer, K. M. B., Kostel, J. A., & McLellan, E. (2013). Combining precision conservation technologies into a flexible framework to facilitate agricultural watershed planning. *Journal of Soil and Water Conservation*, 68(5), 113A-120A. <https://doi.org/10.2489/jswc.68.5.113A>
- United States Environmental Protection Agency. (2009). Valuing the Protection of Ecological Systems and Services. *EPA Science Advisory Board Washington DC*.



## ETAPA 5

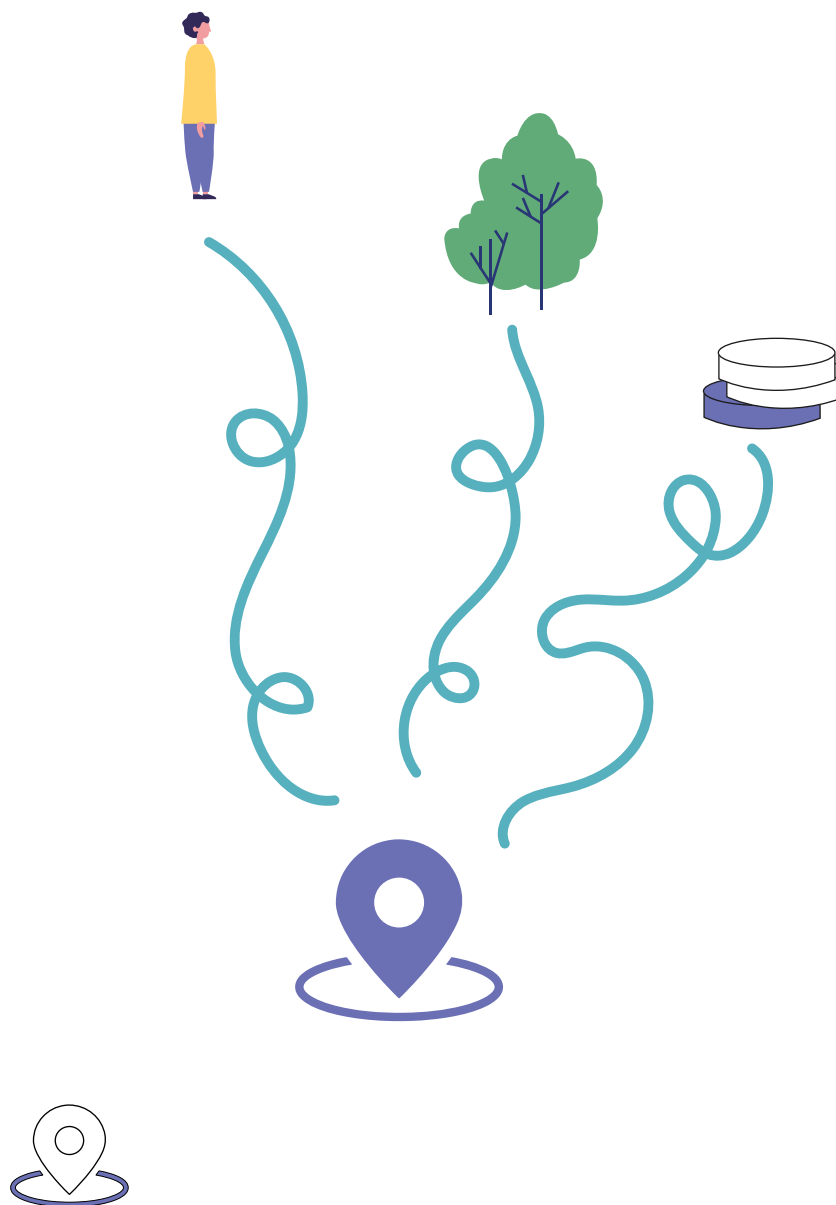
# Diseño e implementación de obras

---



# 1

# Plan de implementación



El plan de implementación de drenaje urbano sostenible tiene como objetivo definir, ordenar y adoptar las acciones necesarias para implementar adecuadamente las soluciones de drenaje definidas, desde una mirada estratégica, social y ambiental. El plan va a estar fuertemente vinculado al contexto local, la escala y los objetivos que se quieran lograr, por lo que no existe una única estrategia a adoptar. Debido a esto, el siguiente capítulo busca ser una guía para la elaboración de dicho plan, orientado al usuario sobre los aspectos relevantes a considerar y la visión que debe tener al momento de la elaboración.

## Visión estratégica del plan

El plan de implementación hace uso de toda la información recopilada hasta ahora en el Volumen II y busca priorizar las acciones a tomar para la correcta ejecución del plan de drenaje sostenible. En concreto, el plan busca maximizar el beneficio de la ciudad, la sociedad y el medio ambiente tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- **Hidrológicos**
- **Hidráulicos**
- **Medioambientales**
- **Calidad del agua**
- **Socioeconómicos**
- **Urbanísticos**
- **Procesos de participación ciudadana**
- **Normativos y legales**

Todos estos aspectos actúan de manera interconectada a través de sistemas complejos, van cambiando en el tiempo y requieren una visión global de largo plazo. Por otra parte, la implementación del plan debe ser estratégica, e ir más allá de la evaluación de proyectos individuales. En este sentido, un buen marco estratégico para desarrollar el plan de drenaje es el que sigue la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE), que se basa en los siguientes principios (Partidário, 2012):

- **Visión** de objetivos a largo plazo (p. ej. ver lo que se desea alcanzar en el futuro).
- **Flexibilidad** para trabajar en sistemas complejos (p. ej. entender los sistemas, los vínculos entre ellos y aceptar la incertidumbre inherente).
- **Capacidad de adaptación** a contextos y circunstancias cambiantes (p. ej. modificar la ruta cuando sea necesario).
- **Focalización** en aquello que es realmente importante en un contexto macro (p. ej. tiempo, espacio y puntos de vista).
- **Estrategia** para alcanzar los objetivos deseados (p. ej. aprovechar las oportunidades emergentes).

Este enfoque de pensamiento estratégico se basa en tres objetivos concretos:

- Fomentar la integración ambiental y sostenible (incluyendo aspectos biofísicos, sociales, institucionales y económicos), estableciendo condiciones habilitantes para futuras propuestas de desarrollo.
- Agregar valor a la toma de decisiones, discutiendo oportunidades y riesgos de las distintas opciones de desarrollo, y transformando problemas en oportunidades.
- Cambiar la mentalidad y crear una cultura estratégica en torno a la toma de decisiones, promoviendo la cooperación institucional y el diálogo entre actores, evitando conflictos.

Estos principios y objetivos son fácilmente adaptables al contexto del drenaje urbano sostenible, por lo que se recomienda abordar el plan de implementación desde esta mirada. Para más información sobre EAE, el Ministerio del Medio Ambiente cuenta con una “Guía de Orientación Para el Uso de la EAE en Chile” (2015), así como otras guías relacionadas en su sitio web.



El desarrollo del plan de Implementación es una instancia que **requiere de participación ciudadana** para garantizar el éxito del proyecto. Para ello se recomienda asumir un nivel de participación del tipo **habilitación comunitaria** (ver Etapa 1 para más detalle). La priorización de las soluciones debe tomar en consideración la realidad territorial desde la voz de los propios beneficiarios. Por otro lado, esta es una instancia crucial para levantar información y deliberar conjuntamente sobre las medidas de prevención y mitigación de las perturbaciones propias del proceso de construcción, y para reevaluar el rol de la ciudadanía en esta etapa y las venideras.

## Priorización de soluciones

El proceso de implementación del plan de DUS requiere seguir una secuencia lógica basada tanto en la visión estratégica descrita anteriormente, como en criterios más técnicos propios del drenaje urbano sostenible. La priorización de soluciones, por lo tanto, debe ir en esta misma línea, combinando ambos aspectos y adaptándose según el contexto, la escala y los objetivos que se quieran lograr. A continuación, se describen algunos criterios técnicos que deben ser considerados en la implementación del plan.

### Hidráulica urbana

Desde el punto de vista de la hidráulica urbana, la priorización debe estar enfocada primero en implementar las medidas preventivas o no estructurales, y luego las medidas mitigatorias o estructurales (ver Etapa 4). En otras palabras, uno de los objetivos esenciales del plan de implementación debe ser maximizar la “prevención” de escurrimiento de aguas lluvias a través de medidas no estructurales.

Una vez que se maximiza la prevención, el caudal peak y el volumen de agua remanente deben ser controlados a través de obras de mitigación, las cuales deben ser implementadas idealmente en el siguiente orden:

- 1 Primero, a través de **sistemas naturales o verdes** (p. ej. franjas filtrantes, jardines de lluvia, zanjas con vegetación);
- 2 Luego, el exceso, a través de **sistemas estructurales** de drenaje sostenible (p. ej. zanjas de infiltración, pavimentos permeables, estanques de detención, estanques de infiltración, humedales de depuración artificial).

A nivel de cuenca, lo ideal es partir controlando las aguas lluvias en el origen e ir avanzando con las medidas desde aguas arriba hacia aguas abajo.

### Urbanizaciones

Tradicionalmente, el drenaje urbano es un aspecto que se deja para las etapas finales del diseño de una urbanización, una vez que toda la infraestructura ya fue acomodada. Sin embargo, **el drenaje urbano debiese ser parte de las primeras etapas de un proceso de planificación urbana**, lo que hace mucho más fácil y flexible su implementación. Las nuevas urbanizaciones, por su parte, deben seguir las recomendaciones no estructurales y luego las estructurales planteadas en el punto anterior.

## Medioambiente y calidad del agua

En términos de medioambiente y calidad del agua, uno de los criterios a aplicar para la implementación de medidas y soluciones puede ser el dar prioridad a las cuencas urbanas que alimentan a los cuerpos receptores más contaminados. Esta priorización se puede hacer en base al índice de calidad del agua propuesto en la Etapa 2 del presente volumen. Otro criterio puede ser el priorizar la adaptación y conservación de la infraestructura verde que se encuentre en el peor estado ecológico.

## Ámbito social

Desde el punto de vista social, se pueden aplicar distintos criterios para la priorización de medidas. Uno de ellos es dar prioridad a los barrios y viviendas más vulnerables, lo cual se puede apoyar con la caracterización socioeconómica de la ciudad realizada en la Etapa 2. En este mismo sentido, se pueden priorizar sectores con baja cantidad y acceso a áreas verdes. Otro criterio puede ser a través de la evaluación social, identificando y priorizando a los sectores y soluciones que generan el mayor beneficio social.

## Oportunidades emergentes

Una vez que se tienen priorizadas las soluciones y medidas a aplicar en un plan de drenaje urbano, es posible que surjan oportunidades que hagan cambiar el orden o incluso pensar en desarrollar soluciones no contempladas en el plan original. Estas oportunidades pueden surgir desde una iniciativa ciudadana, un proceso de participación ciudadana, un plan de inversión público o privado, o proyecto político. En tales casos, y de ser una solución que cumpla con todos los criterios establecidos (normativos, ambientales, sociales, etc.), puede ser una buena opción aprovechar estas oportunidades, flexibilizando y adaptando el plan original en beneficio del objetivo general.

## 2

# Procesos administrativos

---



En este capítulo, **se presentan los trámites e hitos principales que todo proyecto de drenaje urbano sostenible debe contemplar para su implementación.** Estas definiciones están dadas por la normativa existente y aquí se aporta una mirada sintética e integral. En la Ley 19.525 se explicitan los diferentes procesos y actores con tuición sobre las redes primaria y secundaria de drenaje en Chile, estableciendo una relación jerárquica según la cual priman las definiciones del Ministerio de Obras Públicas (MOP) en los Planes Maestro de Aguas Lluvias por sobre aquellas que puedan tomar otros organismos respecto a las redes de drenaje que les compete. Dicha Ley establece una ordenación bastante general y la manera en que se articulan las diferentes escalas de drenaje urbano es poco clara.



Como se revisó en la Sección B del Volumen I de esta guía, la tuición de cada tramo de la red de drenaje es responsabilidad de distintos actores. Su identificación y la de los trámites de proyectos de aguas lluvias que deben realizar (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2013) se muestran en la tabla a continuación. Es importante recordar que cuando un centro urbano no posee plan maestro de aguas lluvias, las redes secundaria y primaria no estarán definidas. Por tanto, la responsabilidad sobre dichos tramos no es, por normativa, responsabilidad del MOP o MINVU. Por otro lado, en ocasiones, la diferenciación entre la red natural y primaria puede ser compleja porque dentro de los planes maestros se considera la utilización de cuerpos naturales para el drenaje. Aquí, se debe recordar que la red natural comprende aquellos cursos y cuerpos de agua a los que los planes maestros de aguas lluvias – de existir – planifican descargar los caudales de salida.

**Tuición de la red de drenaje según su escala y trámites para proyectos de aguas lluvias según actor.**  
(En gris los actores secundarios de tuición).

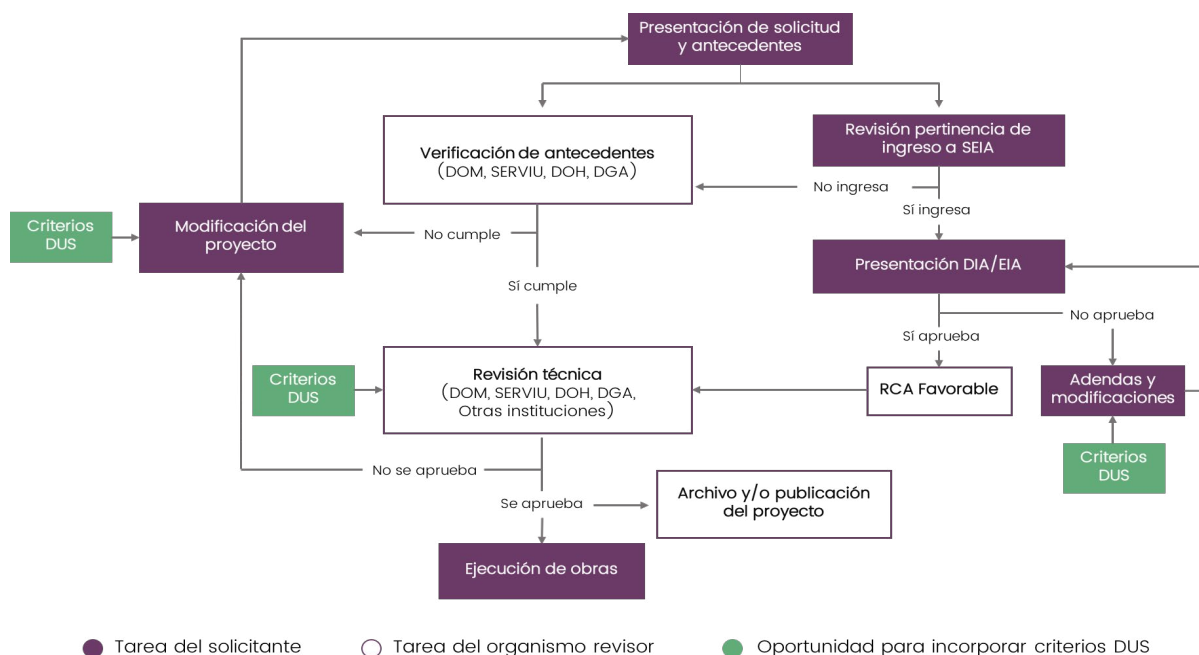
| Escala de Drenaje | Tuición de la Red                                                          | Trámites (MOP, 2013)                                                                                                             |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Red domiciliaria  | Dirección de Obras Municipales (DOM)                                       | Permisos de edificación de obras menores y permisos y anteproyectos de edificación de obras mayores                              |
|                   | Titular del proyecto                                                       | Solicitud de permisos de edificación                                                                                             |
| Red secundaria    | Ministerio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU)                                | Permisos para proyectos de aguas lluvias en subdivisión, loteo y urbanización y trámites para proyectos realizados por el SERVIU |
|                   | Dirección General de Aguas (DGA)                                           | En proyectos específicos <sup>1</sup>                                                                                            |
|                   | Dirección de Obras Municipales                                             | Permisos municipales para subdivisión, loteo y urbanización                                                                      |
|                   | Titular del proyecto                                                       | Solicitud de permisos de edificación                                                                                             |
| Red primaria      | Ministerio de Obras Públicas (MOP)                                         | Trámites para proyectos realizados por MOP                                                                                       |
|                   | Dirección de Obras Hidráulicas (DOH)                                       | Trámites para proyectos realizados por DOH                                                                                       |
|                   | Dirección General de Aguas (DGA)                                           | En proyectos específicos <sup>1</sup>                                                                                            |
|                   | Gobierno Regional, concesionarios de obra pública y titulares del proyecto |                                                                                                                                  |
| Red natural       | Dirección General de Aguas (DGA)                                           | En proyectos específicos <sup>1</sup>                                                                                            |

## Flujo de proceso administrativo de un proyecto de drenaje urbano

En la tramitación de los proyectos de drenaje siempre se podrá identificar un ente **solicitante**, persona u organización que asume la responsabilidad de implementar un proyecto, y un **organismo revisor**, entidad encargada de analizar documentos y comprobar antecedentes para dar respuesta al solicitante. Este organismo puede ser el SERVIU, DOM, DOH, DGA, u otro, dependiendo de la etapa de tramitación y tramo de la red del proyecto.

<sup>1</sup> Solo cuando el proyecto considera modificaciones sobre cauces naturales (Art. 41 del Código de Aguas), o bien cuando considera alguna de las siguientes obras: (1) embalse con capacidad sobre 50 mil m<sup>3</sup> o muros de contención sobre 5 m de alto; (2) acueductos que conduzcan más de 2 m<sup>3</sup>/s; (3) otros acueductos con capacidad de 0,5 m<sup>3</sup>/s cuya distancia al extremo más cercano del límite urbano sea inferior a 1 km y cuya cota de fondo sea superior a 10 m sobre dicho límite; (4) sifones y canoas que crucen cauces naturales (Art. 294 Código de Aguas).

De acuerdo a situaciones particulares de emplazamiento y tramo de la red a intervenir, cada proyecto deberá seguir un proceso de tramitación particular para su implementación. A continuación, se presenta un diagrama de flujo general de las etapas que contempla, diagrama que es específico para la tramitación de proyectos de drenaje y que no busca representar el flujo de trámites de otros tipos de proyectos. Para tener una visión más detallada se recomienda revisar el Capítulo 3 del Manual de Drenaje Urbano (MOP, 2013).



El procedimiento se inicia cuando el solicitante presenta el expediente de antecedentes del proyecto ante el organismo revisor (DOM, SERVIU, DOH o DGA, según la escala de red). Cuando los antecedentes no cumplen los requisitos se debe (a) modificar el proyecto o (b) responder observaciones respecto a los antecedentes entregados, según la razón asociada al no cumplimiento.

Junto con presentar los antecedentes, el solicitante debe evaluar la pertinencia del ingreso del proyecto al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) de acuerdo con la Ley 19.300 (revisar sección de consideraciones ambientales y sociales de esta etapa para más detalle sobre los proyectos de drenaje que debieran ingresar al SEIA). De ser necesario, se requerirá de la elaboración de un estudio de impacto ambiental (EIA) o de una declaración de impacto ambiental (DIA). Es importante notar que un proyecto no podrá ser aprobado técnicamente sin presentar una resolución de calificación ambiental (RCA) favorable -en caso de haber sido necesario su ingreso al SEIA.

Luego de la notificación del organismo revisor sobre el cumplimiento favorable de la etapa de verificación de antecedentes, el proyecto pasa a la revisión técnica de contenidos. Este es el momento en que el organismo revisor emite observaciones, pudiendo exigir nuevos antecedentes, consultas e intervenciones de otras instituciones, así como también la aplicación de cierto tipo de soluciones. El solicitante tiene la obligación de resolver todas las observaciones que emita el organismo revisor. Este proceso de emisión y resolución de observaciones puede repetirse más de una vez, hasta que todas hayan sido resueltas. Cuando esto haya ocurrido, el solicitante podrá ejecutar las obras de drenaje proyectadas, y el organismo revisor (DOM, SERVIU, DOH o DGA) se encargará del archivo del proyecto.

## Archivo de documentación

El archivo y posibilidad de acceso a los proyectos de gestión de aguas lluvias es fundamental para conocer o consultar el estado del sistema de drenaje y, con esa información clara, proyectar nuevas obras o modificar las existentes. Sin embargo, en la actualidad la información se encuentra fragmentada entre distintas instituciones y en muchas ocasiones, ni siquiera se encuentra archivada.

Actualmente, la Dirección de Obras de cada comuna debiera tener registro de las obras que ha aprobado, las que normalmente refieren a la red domiciliaria de drenaje. El SERVIU, en tanto, debiera mantener registro de las nuevas urbanizaciones, incluyendo los proyectos de pavimentación y aguas lluvias, sean estos de su autoría o no. La DOH solo mantiene archivos de sus propios proyectos asociados a la red primaria. Por último, la DGA tiene registro de proyectos propios, pero también de proyectos ingresados por privados.

Esta fragmentación es, en sí misma, una dificultad para proyectar sistemas integrados de drenaje urbano basados en la infraestructura verde de las ciudades. A razón de ello, el Manual de Drenaje Urbano (MOP, 2013) sugiere la creación de un archivo centralizado de las obras de drenaje que permita un acceso oportuno, transparente y eficiente de la información. Asimismo, propone que cada proyecto, una vez sea aprobado, se integre a un sistema de información geográfica de aguas lluvias, profundizando en sugerir que los planes maestros debieran mantener ese sistema actualizado con la información suficiente que permita hacer mantenimiento y evaluación de las obras.

### Oportunidades para el drenaje urbano sostenible

Como se muestra en el diagrama de flujo presentado en esta sección, el proceso de tramitación de los proyectos de drenaje presenta distintas oportunidades para incorporar soluciones de drenaje sostenible. En primera instancia, solicitantes pueden, por iniciativa propia, **incorporar los lineamientos DUS en el diseño inicial de sus proyectos** y justificarlos debidamente ante la autoridad competente. Asimismo, pueden incorporar los en las modificaciones requeridas para dar cumplimiento al proceso de revisión técnica o de verificación de antecedentes.

Por otra parte, los **organismos públicos revisores tienen la posibilidad de fomentar el uso de infraestructura verde en el proceso de revisión técnica de contenidos del proyecto**. A modo de ejemplo, las entidades podrían exigir criterios de diseño y aprobación específicos que fueren a los solicitantes a manejar la escorrentía generada en el área de intervención de sus proyectos de forma distinta, entre ellos, el control del volumen de captura o la generación de caudales máximos que no sobrepasen aquellos de las condiciones naturales.

Se espera que esta guía contribuya a que dichas instituciones hagan propios los conceptos y principios de drenaje urbano sostenible, y comiencen a implementarlos y exigirlos en todos los proyectos bajo su tuición. Esto constituye una oportunidad clara, concreta e inequívoca de transformar las lógicas del manejo de aguas lluvias en nuestras ciudades.

## 3

## Fundamentos de diseño de obras de infraestructura verde

---



Diseñar obras de infraestructura verde capaces de controlar correctamente las aguas lluvias (AALL) y entregar diversos servicios ecosistémicos es un desafío multidisciplinario y de varias aristas. Aquí se presentan algunos principios básicos que permiten potenciar las funciones hidrológicas de estos elementos, tomando en cuenta aspectos de diseño, constructivos, ambientales, entre otros.

El enfoque del control y gestión de AALL usando un sistema de drenaje urbano sostenible (DUS) busca maximizar los beneficios y minimizar los impactos negativos de la escorrentía producida en zonas urbanas. Para esto se deben seguir algunos principios básicos que permitan potenciar las funciones hidrológicas de la infraestructura verde, y por ende, los servicios ecosistémicos percibidos. A continuación se listan los principios básicos para el diseño de una red de drenaje sostenible:

- Las AALL deben reconocerse como un **recurso valioso** en la ciudad.
- Se debe priorizar el **control en la fuente** de las AALL, esto reduce las posibilidades de contaminación de estas, permite su aprovechamiento como recurso y minimiza los problemas aguas abajo.
- Se debe tener por objetivo demorar y almacenar la escorrentía **imitando y conservando las características naturales de la red hidrológica**.
- Se debe permitir la infiltración de la escorrentía producida al suelo.
- Se debe promover la evapotranspiración.

Adicionalmente, se debe entender que el enfoque del diseño no debe estar pensado como elementos de gestión individuales, sino como un **sistema interconectado y colaborativo de componentes que controlan las AALL a través de la infiltración, el almacenamiento y la conducción** desde el punto donde caen hasta el punto de salida de la subcuenca.

A continuación, se presentan algunos aspectos técnicos del diseño de los componentes de la red DUS que permiten el correcto desarrollo de las funciones hidrológicas esperadas. Posteriormente, se explican algunos criterios que se deben considerar al momento de seleccionar la vegetación para potenciar la provisión de hábitat y conectividad ecológica.

## Aspectos técnicos para diferentes componentes de la red DUS

En esta etapa se muestran aspectos técnicos generales que se deben tener en cuenta al momento de diseñar los elementos que forman parte de la red DUS. Estos son presentados según la función principal del componente: almacenamiento, infiltración, depuración y conducción. **Para el detalle de diseño y dimensionamiento de las obras se recomienda revisar otras fuentes**, especialmente los manuales:

- "The SuDS Manual" : Parte D. (Woods Ballard et al., 2015)
- "Manual de Drenaje Urbano: Guía para el diseño, construcción, operación y conservación de obras de drenaje urbano": Capítulos 6, 7 y 8. (MOP, 2013)
- "Urban Storm Drainage Criteria Manual": Volumen 2. (Urban Drainage and Flood Control District, 2016)
- "Georgia Stormwater Management Manual 2016": Volumen 2. (AECOM et al., 2016)
- "Growing Green Guide: A Guide to Green Roofs, Walls and Facades in Melbourne and Victoria, Australia". (Department of Environment and Primary Industries, 2014)

### Obras de almacenamiento

Estas obras comprenden dos sub-tipo que se describen a continuación: sistemas de recolección y reutilización, y obras de retención y detención.

#### Sistemas de recolección y reutilización

Son aquellos que buscan recolectar las AALL para un uso específico (p. ej. usos externos, riego, descarga de inodoros y lavado de ropa, entre otros). Si se desea evitar el uso de un sistema de bombeo, los estanques se deben ubicar a cierta elevación, de forma que el suministro opera a través de la gravedad. Por lo anterior, se debe chequear la capacidad estructural de la construcción.

En cuanto al dimensionamiento, estos deben estar diseñados para capturar el volumen de captura (VC) de la macrozona, considerando como área impermeable la correspondiente a los techos (para más detalles ver Volumen I, Sección C).

Además hay que considerar que:

- La estructura de almacenamiento debe ser capaz de **resistir la presión** que se generará en el interior.
- Todos los orificios de ingreso deben tener una malla fina que impida el ingreso de insectos y material particulado.
- El agua almacenada **no debe ser utilizada directamente como agua potable**, sin antes recibir un tratamiento especial para ello.
- El sistema debe contar con una salida para evitar rebalses.

Es importante notar que para un verdadero efecto de disminución del volumen escurrido, estas obras se deben implementar a escala de barrio y no individualmente.

### Obras de retención y detención

Se consideran como obras de retención y detención a aquellas que almacenan las aguas de forma permanente o temporal, respectivamente, y que tienen nula o muy poca capacidad de infiltración. Algunos aspectos de las obras que almacenan, pero que además tienen la capacidad de infiltrar, fueron discutidas en la sección anterior. Esta sección se concentra principalmente en obras tipo laguna de retención (también denominados en esta guía como humedales de depuración por su doble funcionalidad) y estanques de detención. Para la implementación de estas obras, es importante tener en consideración lo siguiente:

- Para su construcción se requiere de un espacio entre un 0,5% a un 2% del total del área aportante. Esta puede proveerse en uno o más estanques.
- Aunque el suelo tenga capacidad de infiltración, esas propiedades se verán alteradas a largo plazo.
- En el caso de zonas con niveles de agua subterránea muy altos, se recomienda la implementación de una laguna de retención, por sobre un estanque de detención, dado que puede tener su fondo bajo estos niveles, permitiendo manejar zonas permanentes con agua.
- Es preferible instalarlas en pequeñas depresiones, o en el inicio de quebradas o elementos menores del sistema de drenaje natural.
- Debe proveerse de un vertedero de seguridad para caudales grandes con una revancha o borde libre.
- Para dimensionar los volúmenes del estanque y los elementos de entrada, vaciamiento, descarga y vertido hacia aguas abajo, es necesario conocer las propiedades de las crecidas que llegan al estanque.
- Tanto las obras de salida como las zonas de almacenamiento se diseñan de forma diferenciada en función del periodo de retorno asociado a los caudales de entrada. Revisar en detalle los manuales ya mencionados al inicio de la sección.

### Obras de infiltración

Existen muchos elementos DUS cuya principal función es el control de escorrentía a través de la infiltración: franja filtrante, jardín de lluvia, zanja de infiltración, estanque de infiltración y pavimentos permeables. Algunas de las consideraciones generales para el diseño e implementación de estos elementos se listan a continuación:

- Se debe tener en cuenta un pre-tratamiento aguas arriba para remover sedimentos y finos para evitar la colmatación y falla a largo plazo (ver Obras de depuración).
- Para evitar la saturación por aporte de aguas subterráneas se debe adoptar como mínimo una distancia de 1 a 1,2 m entre la base del elemento y la altura máxima de la napa subterránea. Se debe cumplir la misma distancia en el caso de existencia de roca impermeable.
- Se deben incorporar obras de salida para evitar rebalses.
- El fondo de cualquier elemento de infiltración debe ser plano (a excepción de las zanjas de infiltración), esto provee un apozamiento y recarga uniforme.
- Existe un riesgo de contaminación de la napa, para lo cual es muy importante conocer las características de las aguas que se van a infiltrar.
- Se deberá determinar el tipo de suelo soportante que va a recibir las aguas de manera de evitar riesgos de contaminación de la napa o de deslizamientos de terreno bajo el estanque. Se deben evitar construir elementos de infiltración sobre suelos con una tasa de infiltración menor a 8 mm/hora.
- Se recomienda que el área impermeable que drena hacia la obra de infiltración no supere el doble de la superficie disponible.
- Para dimensionar una obra de infiltración, esta debe controlar el VC, aquel generado por la precipitación base sobre el área aportante impermeable a la obra.
- El escurrimiento sobre los elementos debe ser distribuido uniformemente sobre la superficie, de forma de lograr un flujo laminar y evitar la sobreacumulación de aguas en sectores puntuales. Se pueden utilizar solerillas, bermas, zanjas, soleras discontinuas u otro tipo de repartidor de flujo para lograr que esto ocurra.
- Se debe evitar el uso de fertilizantes y herbicidas para minimizar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

## Obras de depuración

Es muy relevante incorporar obras de filtración y depuración aguas arriba de gran parte de los elementos de IV estudiados a lo largo de la guía. Estos cumplen el rol de eliminar elementos tóxicos (metales y metaloides, hidrocarburos u otros) para la flora y fauna existente, y también de eliminar sedimentos finos que podrían colmatar los elementos diseñados para infiltrar. Algunos aspectos generales que se deben considerar son:

- Su funcionamiento es mejor cuando se incorporan varios elementos en línea. Además, estos deben ser complementados con otros elementos DUS que permitan pasar de forma segura a los elementos mayores.
- Para un pretratamiento, una buena alternativa es el uso de geotextiles.
- La tasa a la que percola el agua es un compromiso entre la remoción de contaminantes y la restricción del flujo que debe pasar para evitar inundaciones.
- Hay que tener en cuenta que mientras mayor sea la porosidad del material utilizado para el filtro, mayor capacidad de almacenamiento tendrá. Por otro lado, si el material es muy fino y por ende, su porosidad es baja, se reducirá su capacidad de infiltrar.
- Se deben diseñar adecuadamente elementos de transporte que redirijan el agua filtrada a los elementos aguas abajo de la red de drenaje.

La depuración también puede ocurrir por decantación del material particulado en el agua cuando se detiene por un cierto periodo de tiempo en obras de almacenamiento, como ocurren en las trampas sedimentarias. En esos casos, es necesario diseñar en función del tiempo de residencia que requiere el agua para lograr la sedimentación por gravedad.

## Obras de conducción

Las obras de conducción superficial existen a lo largo de toda la red de drenaje. **En la red domiciliaria**, las AALL se conducen por desagües –desde techos, patios y pavimentos; **en la red secundaria**, por zanjas, canaletas y cunetas; y **en la red primaria**, por canales y grandes colectores. Los desarrollos urbanos tradicionales facilitan el escurrimiento a través de estos elementos para sacar el agua de la ciudad rápidamente. Esta práctica concentra los caudales, acelerando la velocidad de respuesta de la cuenca. Contrario a esto, **bajo un enfoque DUS, se buscarán flujos más lentos y poco profundos, favoreciendo la sedimentación, evitando la erosión y, en algunos casos, permitiendo la infiltración**. Una alternativa para esto son las zanjas con vegetación. Para su implementación hay que tener en cuenta lo siguiente:

- Si se diseña una zanja con el objetivo de transportar el agua que tradicionalmente escurre por las cunetas, se deberá utilizar una **solera discontinua** conectando las áreas impermeables de la red vial a la zanja.
- La pendiente longitudinal del canal debe ser menor a 1% (generalmente están entre 0,2% y 0,5%). Pueden incorporarse gradas, escalones o pequeños muros transversales para reducir la pendiente longitudinal.
- Se prefiere una sección triangular o trapezoidal amplia. Las pendientes laterales de los **taludes deben ser lo más bajas posibles**, se recomienda 3:1 (H:V) y preferiblemente 5:1 (H:V) o más tendidas para facilitar la mantención (p. ej. corte de césped).
- Hay que tener un cuidado especial en utilizar **pastos vigorosos**, que sean capaces de soportar inundaciones frecuentes y mantener una vegetación densa, puesto que muchas tormentas pueden ocurrir en los inicios de la primavera, cuando el césped aún está creciendo y es más propenso a la erosión.
- Se recomienda el uso de **pastos densos**, puesto que ello facilita la sedimentación, la infiltración y la recuperación de nutrientes, a la vez que limita la erosión y ayuda a mantener la velocidad de escurrimiento baja.

Es importante notar que para urbanizaciones más desarrolladas, y especialmente en tormentas mayores, los elementos de IV no son capaces de controlar y transportar la totalidad de la esorrentía producida. **En este sentido, se deberán diseñar adecuadamente obras de conexión entre la red DUS y la red subsuperficial (sistemas mixtos)**. Aquí cumplen un rol importante las obras de salida y los vertederos de seguridad; se recomienda revisar en detalle los manuales propuestos al inicio de esta sección para su correcta implementación.

## Conservación e integración exitosa de la biodiversidad

Junto con los diez principios generales para la intervención de IV descritos en la Etapa 4 de este volumen, es importante considerar los siguientes lineamientos para el manejo y selección de la vegetación con el fin de favorecer la generación de hábitats y la conectividad ecológica:

- Revegetar zonas que se encuentren deterioradas.
- Maximizar el uso de especies nativas diversas, apropiadas para el régimen hidrológico y el microclima del lugar.
- Especies exóticas pueden ser consideradas en casos específicos, pero nunca de carácter invasor.
- Elegir especies que en su conjunto maximicen la cobertura, floración y frutos durante todo el año para proveer comida y refugio a microorganismos, invertebrados y aves.
- Permitir la colonización natural de plantas y animales (sucesión ecológica).
- Proveer de variedad de alturas de pastos y otras plantas.
- Incluir árboles y arbustos para entregar sombra y aumentar el hábitat de anfibios e invertebrados.
- Considerar plantar vegetación resiliente al daño por pisoteos y otros factores de estrés que pudieran considerarse relevantes según las características específicas de cada lugar.



- Utilizado sustratos que permitan tanto el cumplimiento de las funciones hidrológicas (principalmente infiltración) como el desarrollo de la vegetación. Materiales apropiados deberán tener:
  - Permeabilidad razonable.
  - Capacidad de retener agua y aire.
  - Resistencia al calor y heladas.
  - Favorecer el enraizamiento.
  - Tener un correcto contenido de nutrientes.

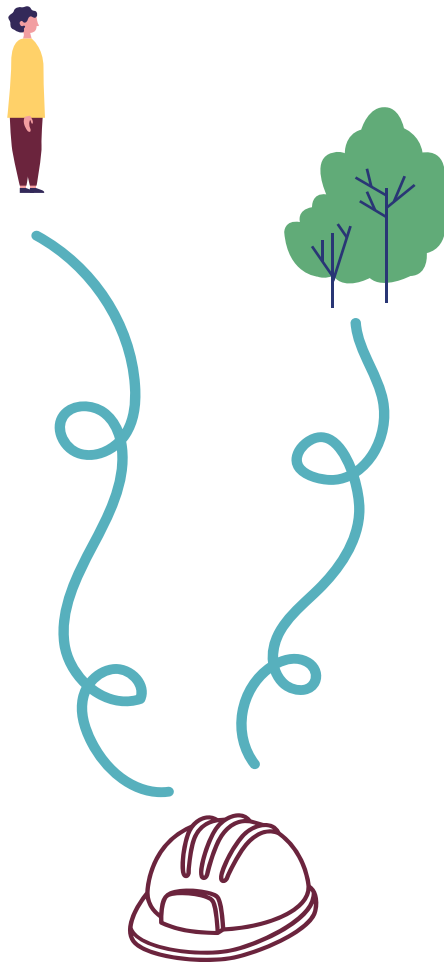
Por su parte, en los **cuerpos de agua** es importante tener en cuenta lo siguiente:

- Se debe priorizar la conservación de cuerpos de agua existentes, como lagunas y humedales, e incorporarlos en el diseño del paisaje. Además, se recomienda implementar otros elementos de IV optimizados aguas arriba del cuerpo natural para reducir la presión sobre estos.
- Se debe controlar correctamente el riesgo de toxicidad y presencia de patógenos que puedan perjudicar la flora y fauna silvestre del lugar.
- Maximizar aguas poco profundas y zonas inundables. Estas son más resilientes a contaminantes, tienen un alto valor ecológico y permiten minimizar el riesgo para las personas (especialmente niños).
- Donde sea posible, diseñar elementos que no queden expuestos a todos los eventos de escorrentía o que sean alimentados por agua lo más limpia posible.
- Crear cuerpos de agua interconectados por canales vegetados y someros, esto entregará mayor conectividad ecológica.

# 4

## Consideraciones socioambientales en la construcción de obras

---



---

Previo al inicio de las obras, y durante su ejecución, es importante considerar y gestionar adecuadamente los posibles impactos que estas puedan causar sobre las comunidades y los ecosistemas. La participación ciudadana jugará un rol clave a lo largo de todo este proceso.

## Sobre la gestión ambiental

Una vez que se selecciona una alternativa optimizada, se priorizan sus componentes y se diseñan las soluciones, es posible dar inicio al proceso de construcción de obras. Sin embargo, antes de comenzar, es importante que tanto desarrolladores públicos como privados tengan presentes consideraciones de carácter ambiental y social. En general, **cualquier intervención sobre el territorio es susceptible de generar impacto ambiental y social** y las medidas de prevención o mitigación que se adoptan para reducir dichos impactos durante el proceso de construcción y operación suelen ser estipuladas en las etapas previas de estudio y diseño.

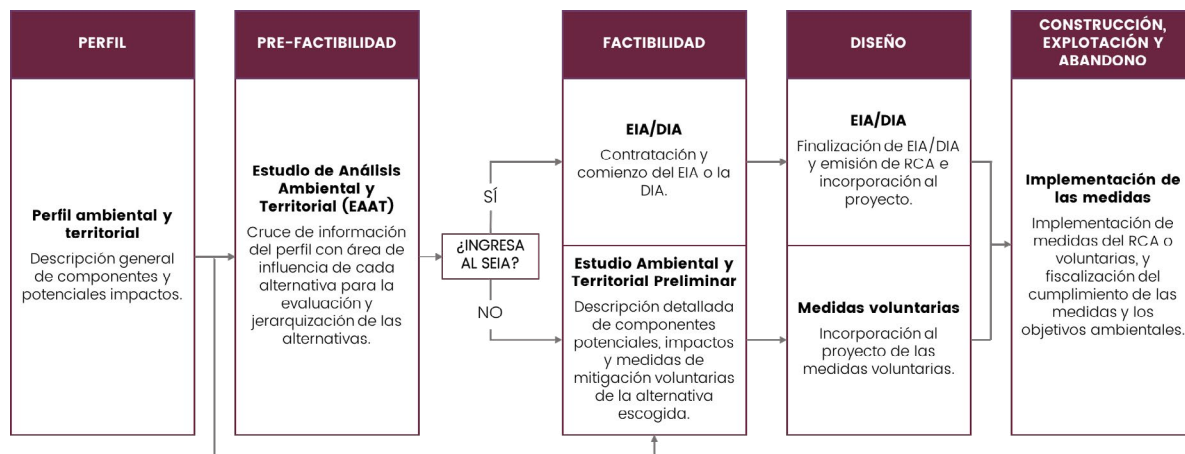
Cada organización que juega un rol en la planificación, diseño, construcción y/o conservación de sistemas de drenaje urbano sostenible (DUS) sigue sus propias bases de gestión ambiental, territorial y de participación comunitaria, en muchos casos guiadas por aspectos normativos. Sin embargo, existen consideraciones legales de común interés para actores públicos y privados. Una de las más relevantes **es la posibilidad de que el proyecto deba ingresar al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)**. La siguiente tabla presenta los tipos de proyectos asociados a los sistemas DUS que son susceptibles de ingresar al SEIA según el artículo N°10 de la Ley 19.300. Notar que en los incisos (p) y (s) se hace mención a la ejecución de obras sobre los humedales urbanos que son declarados como tales de acuerdo a la Ley 21.202 y su reglamento.

**Tipos de proyectos susceptibles de ingresar al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, según artículo 10 de la Ley 19.300, que se relacionan con los sistemas DUS.**

| Inciso | Tipo de proyecto                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a)     | <i>"Acueductos, embalses o tranques y sifones que deban someterse a la autorización establecida en el artículo 294 del Código de Aguas, presas, drenaje, desecación, <b>dragado, defensa o alteración, significativos, de cuerpos o cursos naturales de aguas</b>".</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| o)     | <i>"<b>Proyectos de saneamiento ambiental</b>, tales como sistemas de alcantarillado y agua potable, plantas de tratamiento de aguas o de residuos sólidos de origen domiciliario, rellenos sanitarios, emisarios submarinos, sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos o sólidos". Además, según el artículo N°3 del reglamento del SEIA, <b>se entenderá por proyecto de saneamiento ambiental "al conjunto de obras, servicios, técnicas, dispositivos o piezas que correspondan a sistemas de alcantarillado o evacuación de aguas lluvias, cuando se interconecten con redes de alcantarillado de aguas servidas que atiendan a una población igual o mayor a diez mil (10.000) habitantes"</b>.</i> |
| p)     | <i>"Ejecución de obras, programas o actividades en parques nacionales, reservas nacionales, monumentos naturales, reservas de zonas vírgenes, <b>santuarios de la naturaleza</b>, parques marinos, reservas marinas, <b>humedales urbanos o en cualesquiera otras áreas colocadas bajo protección oficial, en los casos en que la legislación, respectiva lo permita</b>".</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| s)     | <i>"Ejecución de obras o actividades que puedan significar una alteración física o química a los componentes bióticos, a sus interacciones o a los flujos ecosistémicos de humedales que se encuentran total o parcialmente dentro del límite urbano, y que impliquen su relleno, drenaje, secado, extracción de caudales o de áridos, la alteración de la barra terminal, de la vegetación azonal hídrica y ripariana, la extracción de la cubierta vegetal de turberas o el deterioro, menoscabo, transformación o invasión de la flora y la fauna contenida dentro del humedal, indistintamente de su superficie."</i>                                                                                                               |

Independientemente de que sea necesario que un proyecto pase por este sistema, es clave que se tomen medidas **para minimizar los impactos ambientales y territoriales de las principales tareas del proceso de construcción y operación**. El Ministerio de Obras Públicas, por ejemplo, ha desarrollado las Bases de Gestión Ambiental, Territorial y de Participación Ciudadana para Contratos de Obras Públicas (MOP, 2015), que pretende estandarizar exigencias a contratistas sobre los tres pilares mencionados. Según estas, durante la etapa de construcción, el Contratista es quien debe asumir la responsabilidad de protección del medio ambiente y de seguimiento de los acuerdos y compromisos adoptados en el Plan de Gestión Ambiental, Territorial y Participativa que debe ser elaborado por el mismo contratista de acuerdo a los principios dispuestos en el **Manual de Gestión Ambiental, Territorial y Participación Ciudadana para Proyectos de Infraestructura** (MOP, 2001). El Plan debe incluir un programa de seguimiento y monitoreo ambiental, planes específicos de manejo exigidos por cada dirección del ministerio al que compete el proyecto, planes de participación ciudadana, para lo cual el organismo también cuenta con la Guía para la Gestión de Participación Ciudadana (MOP, 2017), e informes periódicos de resultados de su implementación. Además, debe tomar en consideración todos los acuerdos que provienen del proceso de participación comunitaria, de la resolución de calificación ambiental (RCA) -en caso de existir-, de los términos de referencia del contrato, y de otras medidas voluntarias que pudieran haber sido comprometidas o se consideren necesarias.

Los proyectos de tipo “*sistemas de recolección y evacuación de aguas lluvias*” y “*proyectos de drenaje*” competen, según el manual antes señalado, a la DOH. La siguiente tabla resume los contenidos e instancias de gestión ambiental, territorial y de participación ciudadana que deben ser consideradas en cada etapa del ciclo de vida de un proyecto de estas características. Notar que cuando el proyecto no debe ingresar al SEIA se recomienda el diseño de medidas voluntarias a implementar en la etapa de construcción, operación y abandono.



Resumen de los contenidos de la Gestión Ambiental, Territorial y de Participación Ciudadana en cada etapa del Ciclo de Vida de proyectos competentes a la DOH. (MOP, 2001)

A diferencia del MOP, el MINVU no posee bases o reglamentos que guíen directamente los estudios ambientales y territoriales del proceso de diseño y construcción de proyectos públicos del organismo. Sí es posible encontrar el “Manual de Contenidos y Procedimientos para la Aplicación de la Evaluación Ambiental Estratégica en los Instrumentos de Planificación Territorial” (Ministerio de Vivienda y Urbanismo [MINVU], s.f.), la guía para la evaluación del impacto ambiental del diseño, construcción y operación de viviendas como parte del manual de “Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas” (MINVU, 2016) y el manual de “Selección de Buenas Prácticas de Participación Ciudadana” (MINVU, 2018).

## Sobre la construcción de obras

En el proceso de construcción de obras, ya sea por licitación pública o de proyectos privados de urbanización, hay distintas actividades que pueden generar impacto ambiental, entre ellas:

- 1 Instalación de faenas:** No solo en su emplazamiento, sino también en su operación y abandono.
- 2 Plantas de producción de materiales:** Especialmente los problemas de ruidos, residuos, gases, humo y partículas en suspensión y sedimentables.
- 3 Transporte durante faenas y movimiento de maquinaria:** Se buscará particularmente evitar los derrames y el vertido de material.
- 4 Manejo de residuos líquidos y sólidos, tanto de carácter doméstico como de construcción.**

En cada una de esas tareas se deben tener presentes los siguientes principios ambientales como objetivos del proceso (MOP, 2013; Woods Ballard et al., 2015):

- 1 Proteger la flora y fauna:** La empresa constructora deberá evitar toda acción que implique un deterioro o daño del hábitat en donde se emplazan las labores. Las áreas de particular sensibilidad deben ser identificadas y sostenidas en permanente vigilancia. La información sobre las restricciones en obra debe estar disponible para todo el personal y, si se detectan durante el proceso de construcción nuevas áreas bajo restricción o ecosistemas que requieren de protección, deben tomarse medidas correctivas.
- 2 Resguardar los cursos y cuerpos de agua:** No se debe permitir, bajo ninguna circunstancia, el vertido directo de sustancias contaminantes (p. ej. grasas, combustibles, asfaltos u otros) sobre los cursos y cuerpos de agua o sobre zonas aledañas a ellos. Así tampoco el lavado de maquinaria y equipos que pueda generar escurrimiento sobre los espacios naturales de agua.
- 3 Controlar la erosión:** Cualquier actividad que perturba el suelo y la vegetación de un área tiene el potencial de erosionar los suelos. La erosión puede ocurrir producto del viento o del agua, y en ambos casos la vegetación cumple un rol fundamental. Algunos de los factores que influyen la erosión son la velocidad y volumen de escorrentía, la velocidad del viento, los tipos de suelo y la cobertura vegetal. Así, entre las actividades para controlar la erosión que debieran ser consideradas durante la construcción destacan: (1) mantener un enfoque de desarrollo de actividades que eficazmente reduzca la erosión acelerada del suelo; (2) cubrir permanente o temporalmente áreas que han sido perturbadas, para evitar que la escorrentía fluya directamente sobre suelos expuestos; (3) diseñar y construir obras que permitan limitar las velocidades de flujo del agua sobre los suelos a velocidades que no generan erosión, o desviarlas temporalmente; y (4) estabilizar las tierras que han sido perturbadas, utilizando vegetación permanente tan rápido como sea posible.
- 4 Controlar los sedimentos:** Los sedimentos son una de las fuentes de contaminantes más importantes en la construcción y pueden ser generados por la excavación de suelos –tanto por dejar suelo expuesto, como por la posible afloración de aguas subterráneas con altas concentraciones de sedimentos que deben ser descargadas a otros cuerpos–, por la utilización de pilas de acumulación de material granular, el lavado de maquinarias y el tránsito vehicular sobre caminos de tierra. Entre las técnicas de control de sedimentos durante la construcción destacan la instalación de: (1) cercas de geotextil tejidas, elementos que filtran la escorrentía y que suelen ser localizados en la base de los contornos de un área de interés; (2) barreras de fardos, elementos temporales recomendados para la base de pendientes importantes; y (3) estanques de sedimentación, elementos utilizados para atrapar los sedimentos y facilitar su remoción, especialmente cuando las técnicas anteriores no son suficientes. Esto último puede requerir de un diseño de base para evitar contaminación de los subsuelos.
- 5 Controlar los contaminantes:** Además de los sedimentos, existen otros contaminantes que deben ser cuidadosamente manejados durante el proceso de construcción para reducir los riesgos asociados al derrame y la filtración, entre ellos, los aceites e hidrocarburos. Algunas simples medidas de control para evitar que ingresen a cuerpos de agua superficial o a la napa subterránea son: (1) mantención apropiada de maquinaria y monitoreo constante en busca de filtraciones; (2) cuidado en las tareas de reabastecimiento de combustible; (3) diseño de áreas específicas de reabastecimiento de combustibles; (4) seguridad para evitar el vandalismo sobre tanques de almacenamiento; (5) instalación de barreras en cursos de agua, entre otros.

## Sobre las consideraciones sociales



El proceso de participación ciudadana y las consideraciones sociales son dependientes de la etapa del ciclo de vida del proyecto. Durante la etapa de diseño de obras e implementación **es esencial que existan canales de comunicación efectivos y permanentes entre la ciudadanía y el resto de los actores claves, particularmente los contratistas**. Estos canales tendrán una primera función de prever la ocurrencia de perturbaciones o molestias, y permitirán buscar soluciones o acciones de mitigación rápidamente. Así también, permitirán canalizar las denuncias de problemas que no pudieron ser previstos para darles solución. **En esta etapa se debe siempre mantener a la comunidad informada respecto a la ejecución de las obras y posibles contingencias**. Se recomienda que la ciudadanía participe en la definición de los canales de comunicación.

**Es de vital importancia que la planificación de obras esté orientada a disminuir al máximo las consecuencias negativas de dichas actividades y que las medidas de mitigación y contingencias sean validadas por la comunidad.** Entre las actividades del proceso de ejecución de obras que generan impactos de carácter social destacan los que se listan a continuación. En los casos que corresponde, se identifica uno o más mecanismos para prevenir los posibles impactos negativos de las actividades descritas.

- **Cortes de caminos:** Situación que puede perjudicar el acceso a domicilios y zonas de interés, y que puede aumentar los tiempos de traslado.

**Recomendación:** Acordar con la comunidad las zonas y momentos de corte de tránsito, dar mantención a las calles que sufran carga excesiva producto del corte, y estudiar la necesidad de aumentar el recorrido del transporte público. Además, siempre que el corte implique el cierre de un tramo de ciclovía, se recomienda fomentar la utilización de calles para el recorrido exclusivo de vehículos no motorizados.

- **Desplazamiento de camiones y maquinaria:** Situación que afecta a la comunidad por los ruidos molestos, el aumento de tráfico y las cargas inusuales sobre los pavimentos que, en el largo plazo, pueden disminuir la vida útil de los caminos.

**Recomendación:** Acordar con la comunidad horarios de tránsito exclusivo de maquinaria y camiones y dar mantención al pavimento de las calles utilizadas por ellos.

- **Ocupación de espacios de uso público:** Espacios antes disponibles para la recreación y el esparcimiento se ven ocupados por la instalación de faenas, las franjas de seguridad o el área misma de intervención.

**Recomendación:** Utilizar de forma eficiente el espacio, reduciendo al máximo posible la ocupación de áreas verdes. Cuando la obra deba estar en proceso de construcción por un periodo largo de tiempo, considerar contribuir al mejoramiento de áreas verdes y espacios de recreación alternativos.

- **Actividades de construcción:** No solo el desplazamiento de maquinaria puede generar ruidos molestos, también el proceso de la obra misma.

**Recomendación:** Acordar un horario de trabajo con posibilidad de generar ruidos acorde a los requerimientos de la comunidad y utilizar equipos con tecnologías que cumplan con las normativas de generación de ruido vigente.

- **Generación de residuos:** Si no son debidamente gestionados, la acumulación de los residuos puede generar problemas como olores indeseados y aparición de plagas.

**Recomendación:** Mantener un plan de manejo de residuos líquidos y sólidos apropiado.

- **Intervención de elementos identitarios:** En las áreas de intervención de la construcción pueden existir elementos de importancia cultural y espiritual, como animitas, árboles patrimoniales y figuras sagradas; es esencial que esos espacios sean respetados no solo en el diseño de los proyectos, sino que también durante el proceso de construcción. Se debe tener en consideración que incluso el espacio completo puede ser uno de gran valor cultural.

**Recomendación:** Identificar y garantizar la no-intervención de elementos identitarios; acordar la celebración de instancias de culto que toman lugar antes y durante el periodo de trabajo; mantener contacto con las comunidades indígenas locales dando respuesta oportuna a sus solicitudes.

- **Desvío temporal de cauces:** Es posible que la construcción de ciertas obras requieran del desvío temporal de parte o la totalidad del caudal que transportan ciertos cauces naturales. Esto puede tener consecuencias sobre la disponibilidad de agua para el riego u otros usos.

**Recomendación:** Acordar soluciones con las comunidades impactadas y llegar a acuerdos en conjunto con actores claves. Promover el uso eficiente del recurso y proteger el cauce de la contaminación excesiva por sedimentos.

- **Trabajos peligrosos:** Ciertas actividades desarrolladas en las obras, como el izado de material o la excavación profunda, conllevan riesgos de accidentes, no solo para el personal de trabajo, sino también para las comunidades aledañas, particularmente niños.

**Recomendación:** Utilizar señalizaciones adecuadas y mantener barreras temporales de contención en buen estado.

## REFERENCIAS:

AECOM, Atlanta Regional Commission, Center for Watershed Protection, Center Forward, Georgia Environmental Protection Division & Mandel Design. (2016). *Georgia Stormwater Management Manual: Volume 2, Technical Handbook*. Atlanta Regional Council. Atlanta, EE. UU.

Department of Environment and Primary Industries. (2014) Growing Green Guide: A Guide to Green Roofs, Walls and Facades in Melbourne and Victoria, Australia. *State of Victoria, Department of Environment and Primary Industries*.

Partidário, M. R. (2012). Strategic environmental assessment better practice guide: methodological guidance for strategic thinking in SEA. *Agência Portuguesa do Ambiente e Redes Energéticas Nacionais, Lisboa*.

Ministerio de Obras Públicas. (2001). *Manual de Gestión Ambiental, Territorial y Participación Ciudadana para Proyectos de Infraestructura*. Santiago, Chile.

Ministerio de Obras Públicas. (2013). *Manual de Drenaje Urbano: Guía para el diseño, construcción, operación y conservación de obras de drenaje urbano*. Santiago, Chile.

Ministerio de Obras Públicas. (2015). *Bases de Gestión Ambiental, Territorial y de Participación Ciudadana para Contratos de Obras Públicas*. Santiago: Dirección General de Obras Públicas.

Ministerio de Obras Públicas. (2017). *Guía para la Gestión de Participación Ciudadana*. Santiago: Dirección General de Obras Públicas.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2016). *Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas: Tomo V, Impacto Ambiental*. Santiago: División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional.

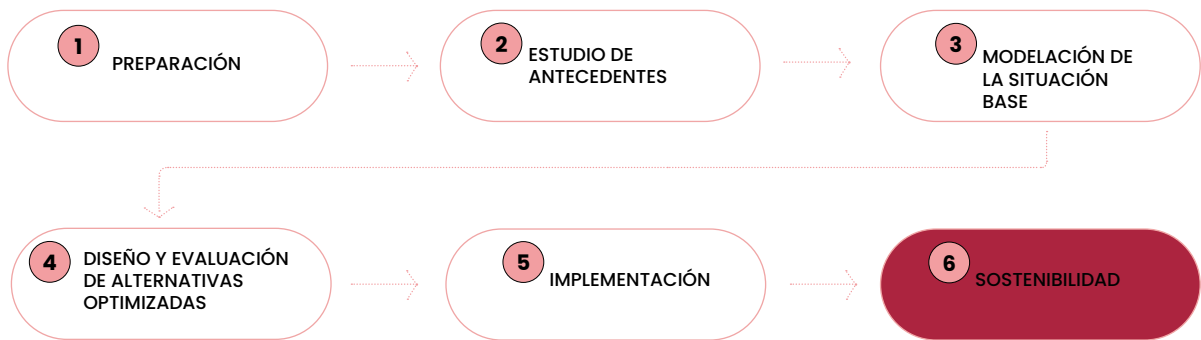
Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2018). *Selección de Buenas Prácticas de Participación Ciudadana: Sector vivienda y urbanismo*. Santiago: Oficina de Participación Ciudadana.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (s.f.). *Manual de Contenidos y Procedimientos para la Aplicación de la Evaluación Ambiental Estratégica en los Instrumentos de Planificación Territorial*. Santiago, Chile.

Urban Drainage and Flood Control District. (2016). *Urban Storm Drainage Criteria Manual: Volume 2 Structures, Storage, and Recreation*. Denver, EE. UU.

Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). The SUDS manual. *North Carolina State University CIRIA, Griffin Court: London, UK, 968*.

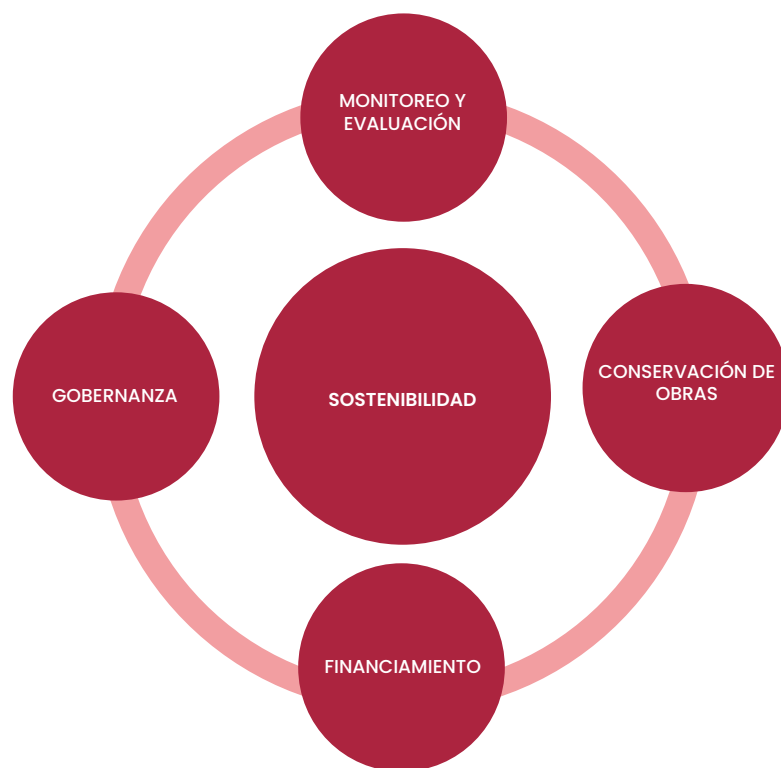




## ETAPA 6

# Sostenibilidad de los sistemas de drenaje urbano sostenible

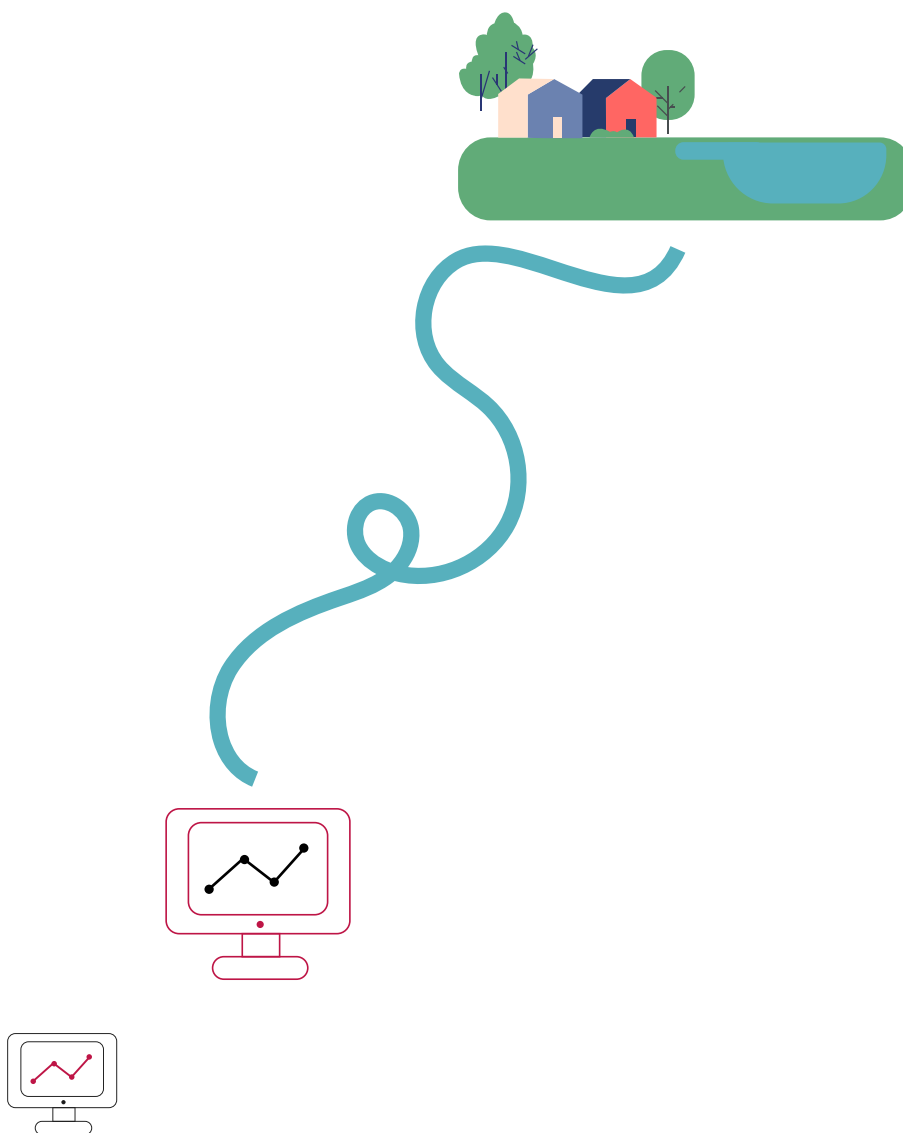
---



## 1

# Monitoreo y evaluación

---



**El monitoreo de los elementos de infraestructura verde (IV) y componentes asociados es fundamental para la implementación y manejo de aguas lluvias (AALL) bajo un enfoque de drenaje urbano sostenible (DUS),** permitiendo evaluar la eficiencia del funcionamiento del diseño e implementación, y resguardando los objetivos ambientales, de salud pública y seguridad para el cual fueron diseñados (Toronto and Region Conservation Authority [TRCA] & Credit Valley Conservation [CVC], 2010; Geberemariam, 2017). De esta forma, el monitoreo se identifica como un mecanismo de retroalimentación que puede mejorar la efectividad de futuros proyectos, mediante la generación de datos que puedan ser incorporados en modelación y seguimiento. Además, el plan de monitoreo posibilita la identificación de problemas de manera temprana, derivados de áreas inestables o erosionadas, de aportes excesivos de sedimentos, del uso indebido de la infraestructura, o cualquier otra situación que pudiera redundar en un colapso acelerado del sistema de drenaje.

En términos generales, existen tres tipos de monitoreos de IV y sistemas DUS (TRCA & CVC, 2010):

- **Monitoreo de cumplimiento:** Diseñado para evaluar si una instalación o medida de gestión funciona acorde a lo diseñado, para cumplir con los mínimos requisitos aceptables según la autoridad (p. ej. requisitos a nivel de municipio para el manejo de instalaciones de AALL). Se recomienda poner énfasis en mediciones que contrasten afluentes y efluentes, siendo relevante en este último, la medición de caudal y parámetros de calidad de agua. El periodo de monitoreo de nuevas instalaciones puede ser de 2 a 5 años después de construidas, tiempo suficiente para que las instalaciones sean expuestas a diferentes condiciones ambientales y que puedan funcionar de manera estable. Los componentes que son monitoreados en este período son: caudales, calidad de agua, erosión y estabilidad de la pendiente; cobertura vegetal y supervivencia de plantas; estado de estructuras de ingreso y salida; acumulación de sedimentos u otros problemas de mantención. Cuando una construcción es nueva, este monitoreo es responsabilidad de la constructora; cuando las obras pasan a ser públicas, son los municipios los responsables.
- **Monitoreo de desempeño:** Diseñado para evaluar la efectividad de la medida de gestión o rendimiento de la instalación, mediante el contraste de una serie de indicadores de desempeño que permiten la comparación con otras instalaciones, así como otros contextos tecnológicos o de desarrollo. Este monitoreo se desarrolla cuando existe poca información sobre la eficiencia de una solución DUS bajo ciertas condiciones ambientales, o cuando se trata de nuevas tecnologías. Se diferencia del monitoreo de cumplimiento en los parámetros a considerar y en la rigurosidad con que estos se evalúan, que en este caso va más allá de lo que exige la regulación. A nivel internacional, existen organismos específicos para realizar este tipo de monitoreos, generalmente relacionados con el desarrollo de nuevas tecnologías, construcción y evaluaciones de componentes DUS (p. ej. techos verdes, pavimentos permeables, cámaras de infiltración, entre otros).
- **Monitoreo de efectos ambientales:** Diseñado para evaluar el estado de salud ambiental a nivel de cuenca, subcuenca o de una localidad o comunidad en particular. Este tipo de monitoreos permite evaluar el efecto acumulativo de las diversas medidas de gestión implementadas para reducir o mitigar los impactos ambientales que pueden afectar las escalas espaciales antes descritas. Los programas de monitoreo integrado de cuencas, por ejemplo, son recomendables para abordar objetivos como la protección y mejoramiento de calidad de agua, así como la diversidad biológica y productividad de las cuencas. Para este tipo de monitoreos integrados, se recomienda un enfoque multidisciplinario (p. ej. meteorología, hidrología, calidad de agua y biología acuática), que permita generar indicadores específicos de cada una de estas disciplinas y así evaluar los efectos acumulativos de cambios y medidas de mitigación dentro de una cuenca a lo largo del tiempo.

Ciertas variables que pueden ser consideradas según parámetros cuantitativos y/o cualitativos, permiten monitorear y evaluar el funcionamiento de los elementos de IV en un proyecto o sistema DUS (extraído de Geberemariam, 2017):

| Parámetros cuantitativos                                  | Parámetros cualitativos       |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Precipitación, temperatura, humedad relativa.             | Vistas en terreno/inspección. |
| Dirección y velocidad del viento.                         | Fotografías y documentación.  |
| Evapotranspiración.                                       | Registro en bitácoras.        |
| Carga de contaminantes y calidad del agua.                | Inspección visual y estética. |
| Reducción de volumen, máximos de caudal y almacenamiento. | Funcionamiento estacional.    |
| Humedad del suelo y tasa infiltración.                    | Conflictos.                   |
| Ingreso/salida, almacenamiento y caudal by-pass de AALL.  |                               |

## ¿Cómo diseñar un programa de monitoreo y evaluación?

Para diseñar un programa de monitoreo de elementos de IV (post-construcción), se recomienda seguir 3 pasos (Geberemariam, 2017):



Además, se sugiere establecer preguntas adicionales que permitan definir con mayor precisión estos 3 pasos:

- ¿Quién debe financiar el monitoreo?
- ¿Cómo será recopilada la información?
- ¿Qué método debe ser implementado o adaptado?
- ¿Quién llevará a cabo el monitoreo?
- ¿Qué procesos deben considerarse para definir los puntos de muestreo?
- ¿Cuál es la periodicidad del muestreo?
- ¿Es necesario incorporar datos adicionales para aportar al proceso de monitoreo y evaluación?
- ¿Cuándo deben finalizar y ser revisados los procesos de monitoreo y evaluación?

## Criterios e indicadores para el monitoreo

Uno de los aspectos importantes del desarrollo de un plan de monitoreo y evaluación, es la **definición de líneas bases, criterios e indicadores**. Para ello, se hace necesario tener un conocimiento acabado del estado inicial de una cuenca, o de las áreas que son propensas a inundación, antes de establecer un plan de este tipo. En términos generales, se recomienda establecer previamente las funciones hidrológicas y ecosistémicas de cada elemento de IV, lo que permite evaluar su operatividad.

Algunas fallas o problemas recurrentes que pueden ser incluidos como criterios e indicadores de funcionamiento de elementos de IV son los siguientes:

- Problemas estructurales.
- Encharcamientos excesivos.
- Vegetación indeseada.
- Erosión.
- Inestabilidad del terreno cercano.
- Obstrucción de las obras de entrada o salida.
- Deterioro de las tuberías o de los pozos de observación.
- Cambios de calidad de agua de cuerpos receptores (p. ej. cambio de coloración y malos olores, crecimiento excesivo de vegetación acuática).
- Nuevas fuentes de contaminantes.
- Índices de infiltración a través de testeos del suelo.
- Monitoreo de los niveles de agua en los pozos de observación.
- Compactación de suelos.
- Acumulación de sedimentos.

## Sistema de alerta temprana de inundaciones

En términos generales, un sistema de alerta temprana (SAT) es un instrumento que provee de información oportuna y eficaz para la toma de acciones orientadas a evitar o reducir el riesgo y preparar una respuesta efectiva. **Para el caso de las inundaciones, un SAT permite fijar criterios de activación de diferentes fases de alertas progresivas, en función de la intensidad y cantidad de precipitación.** Para ello, se realizan seguimientos de pronósticos meteorológicos a largo y mediano plazo, provenientes de diferentes servicios meteorológicos, lo que permite anticiparse a los episodios de lluvia intensos que se pudieran producir.

Se recomienda fijar los criterios previamente con los agentes, que junto con el gestor de sistema de drenaje, pueden intervenir en caso de lluvias intensas e inundaciones (p. ej. ONEMI, servicios municipales, policía y bomberos, protección civil, etc.). A continuación, se describen las fuentes y tipos de información que se pueden incluir en un SAT a partir de agentes asociados al drenaje urbano:

- **ONEMI:** Dispone de un sistema de alerta meteorológica para prevenir riesgos de inundaciones a nivel regional. Además, esta organización decreta tres tipos de alertas según el Plan Nacional de Protección Civil (ONEMI, 2012):
  - Alerta temprana preventiva: monitoreo y condiciones de riesgo.
  - Alerta amarilla: ante incremento de amenazas en términos de extensión y complejidad.
  - Alerta roja: ante un evento que amenaza la vida, salud y medio ambiente en forma inminente (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2013).
- **DGA:** Provee información sobre el comportamiento de caudales naturales en tiempo real; así como de mantención y limpieza de zonas de descarga y eventuales inundaciones por desborde de cauces en zonas urbanas.
- **DOF (Departamento de Obras Fluviales de la DOH):** Provee de información sobre el estado y operación de obras públicas en cauces; además, realiza operaciones de mantenimiento y reposición de carácter urgente.
- **SERVIU:** Provee información sobre el estado de las redes secundarias (p. ej. necesidades de descargas o conexiones entre redes), así como del estado y daño de pavimentos, calles y bienes de uso público.
- **Municipalidades:** En su rol de satisfacer las necesidades de la comunidad local, tienen la responsabilidad de monitorear proactivamente las redes de drenaje -con énfasis en la red primaria- y notificar de manera oportuna a los servicios responsables de su mantención (cuando no son ellos mismos). Asimismo, son los encargados de estimar los costos e impactos socioeconómicos después de una emergencia.

### ¿Con qué frecuencia se debe realizar un monitoreo o inspección?

Si bien la frecuencia de monitoreo o inspección de un proyecto o sistema DUS dependerá de su localización, el tipo de obra y las condiciones de operación, se recomienda monitorear al menos dos veces al año. Para el caso de lugares con alta actividad y afluencia de público (p. ej. estacionamientos), se sugiere una inspección de cuatro veces al año. Ante eventos de precipitación intensas, en las cuales una obra o solución puede estar comprometida, la inspección del sistema debe realizarse a la brevedad posible.

El Manual de Drenaje Urbano (MOP, 2013), distingue tres tipos de gestiones que permiten definir la periodicidad o frecuencia del monitoreo o inspección con base a episodios de precipitación:

| Gestión ordinaria (tiempo seco)                                                                                                                                                                          | Gestión por episodio                                                                                                                                                 | Gestión post-episodio                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Se recomienda el seguimiento diario del estado de los elementos del sistema de alerta temprana de inundaciones (p. ej. análisis de datos y detección de anomalías con base a información pluviométrica). | Se recomienda llevar un control permanente de la pluviometría mientras dura el episodio de lluvia.                                                                   | Dependiendo de la intensidad del episodio (p. ej. significativo), se recomienda realizar un análisis de detección de posibles mejoras, tanto en la red como en las herramientas de explotación. |
| Mantenimiento de incidencias detectadas.                                                                                                                                                                 | Definir/establecer fases de alertas progresivas en función de la intensidad y cantidad de precipitación.                                                             |                                                                                                                                                                                                 |
| Mantenimiento de sensores y actuadores.                                                                                                                                                                  | Es recomendable definir los criterios de activación de fases junto con el gestor de drenaje en caso de lluvias e inundaciones (p. ej. ONEMI, servicios municipales). |                                                                                                                                                                                                 |

## ¿Quiénes son responsables del monitoreo?

La definición de responsables en un plan de monitoreo es una consideración importante y dependerá del tipo de red de drenaje:

- La red domiciliaria deberá ser monitoreada por parte del propietario.
- La inspección rutinaria de la red secundaria debiese estar a cargo de las municipalidades.
- En el caso de las obras de la red primaria, el MOP debiese prestar los servicios de inspección, poniendo a disposición procedimientos, personal y/o equipos especiales.

Se recomienda, además, la inspección de un profesional capacitado y certificado, que permita verificar el funcionamiento de las obras y el cumplimiento de las respectivas mantenciones; reduciendo con ello la carga de actividades en entes públicos (MOP, 2013).

## El rol de la ciudadanía para el monitoreo y evaluación de elementos de IV



En complemento a lo anterior, iniciativas internacionales de DUS han incorporado a las comunidades locales para monitorear elementos de IV, siendo consideradas como componentes fundamentales para la sostenibilidad de este tipo de aproximaciones, así como para descentralizar su aplicación en áreas más grandes. La integración del manejo de AALL en la vida cotidiana de las personas, ayuda a crear una mayor conciencia ciudadana para que los sistemas socio ecológicos sean más sostenibles (Lieberherr & Green, 2018). Para que esto ocurra, es fundamental que existan espacios de participación ciudadana en la toma de decisiones a nivel municipal.

A nivel nacional, se destacan **experiencias en territorios de la macrozona sur** en las que se ha incentivado la participación ciudadana en el monitoreo de cuerpos receptores, sobre todo mediante ejercicios de educación ambiental.

Algunos ejemplos:

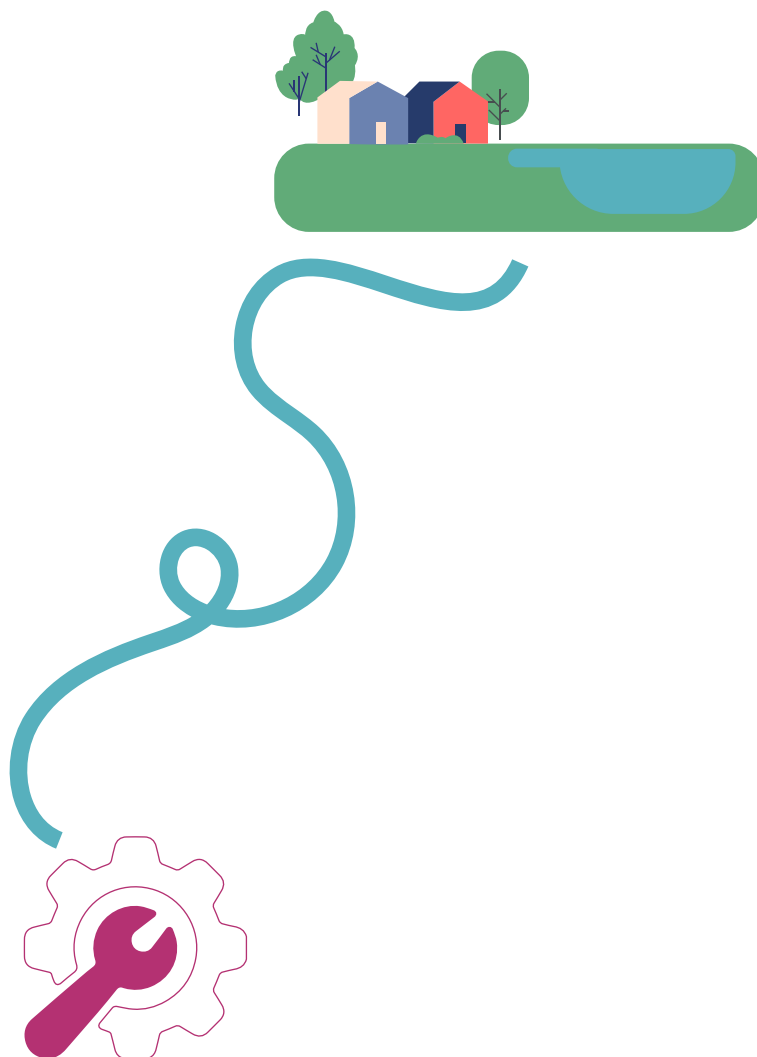
- Lagunas urbanas de Concepción (Parra et al., 2015).
- Red Ciudadana por los Humedales de Valdivia.
- Humedales urbanos de Llanquihue (Fundación Legado Chile).

La presencia de los **Comités Ambientales Comunales** (CAC) pueden jugar un rol importante en la apertura de espacios de participación ciudadana, así como en la organización de acciones de monitoreo de elementos de IV considerados en sistemas DUS.

## 2

# Actividades de mantenimiento

---



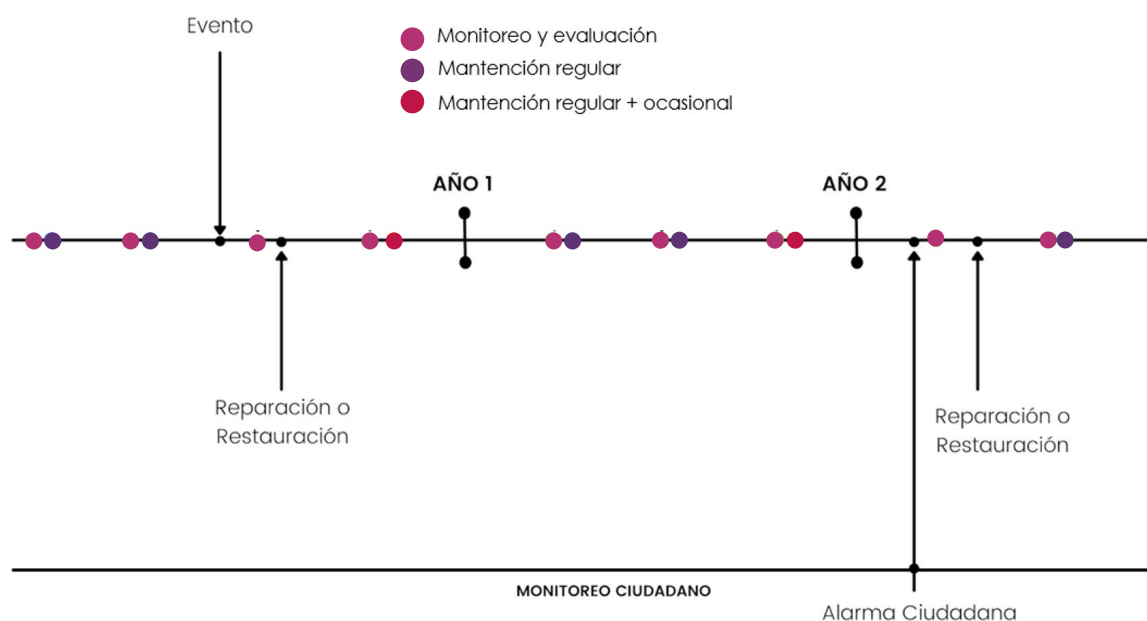
---

Para que las soluciones o componentes de drenaje urbano sostenible (DUS) implementados en los diferentes elementos de infraestructura verde (IV) presentados en esta guía cumplan con los desempeños esperados, es de vital importancia realizar periódicamente una inspección y mantenimiento. Esto asegurará su funcionamiento a largo plazo, ayudará a reducir los costos de reparación (que suelen ser más elevados que los de mantenimiento), y ayudará a evitar con antelación problemas de mayor envergadura.



Según The SuDS Manual (Woods Ballard et al., 2015), dentro de las mantenencias periódicas existen actividades que deben ser realizadas de manera regular, otras que son necesarias solo de forma ocasional, y actividades necesarias para la reparación de algún componente DUS en particular. Por ejemplo, si para cierto componente se recomienda una mantención con una frecuencia de 3 veces al año, las actividades regulares deben realizarse en estas 3 instancias, mientras que las ocasionales en al menos una de ellas, dependiendo de lo observado en las inspecciones anteriores. Por su parte, las actividades de reparación o rehabilitación serán necesarias solo en aquellos casos en que el componente en cuestión presente deficiencias considerables, como daños en su estructura y/o funcionamiento.

A modo de resumen, el siguiente diagrama conceptual propone las etapas y acciones a seguir para la inspección, mantenimiento y reparación en un proyecto o sistema DUS, en función del tiempo y ante eventos significativos de precipitación. Además del monitoreo o inspección que realizan las partes involucradas, se incluye la acción de la ciudadanía para mejorar y prevenir la degradación de los elementos de IV involucrados en el DUS.



## Actividades de mantenimiento según frecuencia (Woods Ballard et al, 2015)

### Actividades a realizarse de forma regular:

**Inspección:** Observación frecuente del componente DUS en condiciones de operación, a través de la cual:

- Se verifica que funcione de forma segura y satisfactoria.
- Se logra detectar actividades adicionales que sean necesarias, como por ejemplo, reparaciones mayores.
- Se comprueba que las actividades de mantenimiento son adecuadas, proponiendo modificaciones en caso contrario.

En general, se recomienda que las inspecciones sean más frecuentes durante los primeros años de funcionamiento de los componentes DUS.

**Remoción de basura y escombros:** Contempla el retiro de cualquier elemento que interfiera con el correcto funcionamiento del componente DUS, como por ejemplo, basura, troncos, maderas, piedras, neumáticos, etc. Esta actividad es de suma importancia para evitar la obstrucción de las obras de entrada y salida de aguas lluvias. También guarda estrecha relación con el aspecto estético y la reducción del riesgo de contaminación de las aguas lluvias.

**Corte de pasto:** Las frecuencias de corte de pasto deben tener relación con el desempeño esperado para cada componente DUS en particular.

En general, mientras más largo es el pasto, mejor es su desempeño de depuración y reducción de velocidad de las aguas lluvias. Sin embargo, es importante tener también en consideración el aspecto estético. En algunos casos será recomendable mantener el pasto corto para evitar posibles bloqueos visuales en las vías de tránsito y posibles obstrucciones en las obras de salida y entrada de aguas lluvias.

**Control de malezas y plantas invasivas:** Se considera como maleza a todas aquellas plantas no deseadas en un lugar en particular, entre las que se incluyen especies invasivas que se propagan rápidamente (usualmente no nativas), y plantas que afectan negativamente el funcionamiento, el aspecto estético o la biodiversidad del componente DUS. En algunos casos, será necesario el retiro a mano de malezas, sin embargo, en zonas de césped puede ser efectivo el corte de éste.

**Manejo de arbustos:** Durante el primer y segundo año de crecimiento de los arbustos, será necesaria la remoción de malezas en sus bases, para asegurar que los arbustos reciban agua suficiente.

Además se aconseja disponer de un acolchado (*mulch*) donde sea necesario, para mantener húmedo el suelo (no debe usarse mulch de corteza, ya que flota y puede obstruir las obras de salida).

La poda es recomendable, ya que genera arbustos más densos y con mayores crecimientos laterales.

**Manejo de vegetación acuática y de ribera:** Durante el periodo inicial de crecimiento de estas especies (de 1 a 3 años), puede ser necesario el cuidado más frecuente para asegurar su establecimiento y evitar la presencia de especies no deseadas.

Una vez ya establecidas, será necesaria la remoción de la vegetación muerta para reducir la acumulación de desechos orgánicos.

Al momento de realizar estas mantenciones, es importante no interferir con las aves que anidan entre la vegetación en época de reproducción, o con otras especies que habiten allí.

**Aspirado de superficies permeables:** Estas superficies deben limpiarse a través del aspirado de limos u otros sedimentos, para mantener su capacidad de infiltración. Para ello es necesario utilizar aspiradoras mecánicas especializadas para estos fines, en seco o húmedo, según el tipo de superficie a limpiar (pavimento poroso/celular o superficies vegetadas).

**Actividades a realizarse de forma ocasional:**

**Retiro de sedimentos:** Actividad relevante para mantener el funcionamiento a largo plazo del componente DUS. Hace referencia a la remoción de cantidades importantes de sedimentos en elementos cuya principal función es la acumulación de aguas, a diferencia del aspirado de superficies permeables que se aplica principalmente sobre elementos de infiltración.

La frecuencia de esta actividad dependerá de varios factores, entre ellos, el diseño del sistema de drenaje aguas arriba, la cantidad y calidad del agua proveniente desde aguas arriba, el volumen diseñado para el almacenamiento de sedimentos, entre otros.

Esta actividad debe ser llevada a cabo con las medidas de cuidado necesarias para no dañar el componente DUS y minimizar el impacto en los sistemas ecológicos. La manera de retirar los sedimentos va a depender, entre otras cosas, del tamaño de la obra, siendo posible en las pequeñas el retiro manual; mientras que en los casos donde el volumen de sedimentos es mayor o se encuentra sumergido, será necesaria la utilización de un equipo mecánico de extracción.

**Reposición de vegetación:** Durante el primer año de instalación del componente DUS, puede ser necesaria la reposición de plantas, sobretodo luego de eventos de lluvias moderadas a intensas. Es importante remover la vegetación muerta y reponerla para mantener el número de plantas por m<sup>2</sup> indicado en el diseño de la obra original.

También se debe reponer la vegetación en aquellas áreas donde los desempeños en filtración o infiltración son inferiores a los esperados.

**Actividades de reparación o rehabilitación:**

**Reparación de estructura:** Este tipo de reparaciones suele ser necesaria en un periodo de 10 a 25 años, dependiendo del diseño del componente DUS y de las condiciones de las aguas que ingresan a él.

Algunos de los elementos que se suelen reparar o rehabilitar son filtros obstruidos, gravas o geotextiles.

Para llevar a cabo estas actividades es necesario que los elementos cuenten con accesos adecuados para maquinarias y que se tomen las medidas necesarias para evitar la interrupción del funcionamiento normal del sistema de drenaje. Para ello se recomienda intervenir puntualmente, reparando solo aquellos elementos que sean necesarios.

Estas actividades también pueden ser necesarias cuando se ha visto afectado el correcto funcionamiento del componente DUS. Sin embargo, las actividades de mantención frecuente y ocasionales suelen ser suficientes para evitar el mal funcionamiento.

**Reacondicionamiento de la infiltración superficial:** Este tipo de reparaciones deben efectuarse cuando se está en presencia de superficies que han perdido su capacidad de infiltración, lo cual se puede detectar ante la existencia de encharcamientos por largos periodos de tiempo.

En estos casos, algunas de las medidas que se pueden adoptar son:

- Remoción de la capa de vegetación que se encuentra densamente entremezclada.
- Realizar pequeñas perforaciones en el suelo que permitan la entrada de aire, agua y nutrientes (se recomienda incluir arena en estas perforaciones).
- Utilización de aire inyectado por presión en las capas del subsuelo (útil en casos de compactación del suelo).

## Actividades de mantenimiento según función principal de la obra DUS

A continuación, se presentan las actividades de mantenimiento agrupadas según la función hidrológica principal del componente DUS, en base a lo sugerido en el Manual de Drenaje Urbano (MOP, 2013).

### ● Mantenimiento de obras de infiltración

- Limpieza de sumideros
- Limpieza de los elementos de alimentación
- Limpieza de la cubierta superficial
- Limpieza de pavimentos permeables

### ● Mantenimiento de obras de almacenamiento

- Limpieza de cámaras de entrada
- Limpieza de cámaras de salida y descarga
- Limpieza del canal de flujos bajos
- Limpieza del fondo del estanque
- Limpieza de los bordes, taludes y muros del estanque
- Limpieza de la zona con agua de lagunas
- Limpieza de la faja de servicio de la obra de almacenamiento

### ● Mantenimiento de obras de conducción

- Limpieza del canal y retiro de excedentes a botaderos autorizados
- Roce, despeje y limpieza de la faja de canal
- Limpieza de obras hidráulicas con maquinaria y retiro de excedentes a botaderos autorizados
- Limpieza de descargas de colectores y retiro de excedentes a botaderos autorizados

A modo de resumen, se presenta la siguiente tabla con información sobre las actividades de mantenimiento para **cada componente DUS utilizado en la optimización de los elementos de IV** presentados en esta guía. En ella se indica qué actividades serán, probablemente, siempre requeridas, independiente de las circunstancias en las que funcione el componente DUS; y aquellas actividades en las que será necesario evaluar cada situación particular (en ese sentido, la actividad de inspección es de gran importancia, ya que es en esta instancia en la que se debe llevar a cabo esta toma de decisiones).

● Siempre es requerida

● Evaluar si es requerida

|                                                    |                                                    | Infiltración  |                                               |                    |                           |                        |                                             |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------------------------|
|                                                    |                                                    | Techos verdes | Jardines de bioretención (jardines de lluvia) | Franjas filtrantes | Estanques de infiltración | Zanjas de infiltración | Pavimentos permeables (porosos y celulares) |
| <b>Actividades a realizarse de forma regular</b>   | Inspección                                         | ●             | ●                                             | ●                  | ●                         | ●                      | ●                                           |
|                                                    | Remoción de basura y escombros                     | ●             | ●                                             | ●                  | ●                         | ●                      | ●                                           |
|                                                    | Corte de pasto                                     | ●             |                                               | ●                  | ●                         |                        | ●                                           |
|                                                    | Control de malezas y plantas invasivas             | ●             | ●                                             | ●                  | ●                         | ●                      | ●                                           |
|                                                    | Manejo de arbustos                                 | ●             | ●                                             |                    | ●                         |                        |                                             |
|                                                    | Manejo de vegetación acuática y de ribera          |               | ●                                             |                    |                           |                        |                                             |
|                                                    | Aspirado de superficies permeables                 |               |                                               | ●                  | ●                         |                        | ●                                           |
| <b>Actividades a realizarse de forma ocasional</b> | Retiro de sedimentos                               |               |                                               | ●                  | ●                         | ●                      |                                             |
|                                                    | Reposición de vegetación                           | ●             | ●                                             | ●                  | ●                         |                        | ●                                           |
| <b>Actividades de reparación o rehabilitación</b>  | Reparación de estructura                           | ●             | ●                                             | ●                  | ●                         | ●                      | ●                                           |
|                                                    | Reacondicionamiento de la infiltración superficial | ●             | ●                                             | ●                  | ●                         | ●                      | ●                                           |

|                                                    |                                                    | Almacenamiento                          |                        |                                              | Conducción            |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|
|                                                    |                                                    | Sistemas de recolección de aguas lluvia | Estanques de detención | Humedal de depuración o Lagunas de retención | Zanjas con vegetación |
| <b>Actividades a realizarse de forma regular</b>   | Inspección                                         | ●                                       | ●                      | ●                                            | ●                     |
|                                                    | Remoción de basura y escombros                     | ●                                       | ●                      | ●                                            | ●                     |
|                                                    | Corte de pasto                                     |                                         | ●                      | ●                                            | ●                     |
|                                                    | Control de malezas y plantas invasivas             |                                         | ●                      | ●                                            | ●                     |
|                                                    | Manejo de arbustos                                 |                                         |                        | ●                                            | ●                     |
|                                                    | Manejo de vegetación acuática y de ribera          |                                         |                        | ●                                            |                       |
|                                                    | Aspirado de superficies permeables                 |                                         | ●                      |                                              | ●                     |
| <b>Actividades a realizarse de forma ocasional</b> | Retiro de sedimentos                               | ●                                       | ●                      | ●                                            | ●                     |
|                                                    | Reposición de vegetación                           |                                         |                        | ●                                            | ●                     |
| <b>Actividades de reparación o rehabilitación</b>  | Reparación de estructura                           | ●                                       | ●                      | ●                                            | ●                     |
|                                                    | Reacondicionamiento de la infiltración superficial |                                         |                        |                                              | ●                     |

Elaborada en base a The SuDS Manual (Woods Ballard et al., 2015) y el Manual de Drenaje Urbano (MOP, 2013).

Para hacer más organizados los procesos de mantenimiento de los componentes DUS que conforman cada elemento de IV expuestos en esta guía, se presenta una tabla resumen con **frecuencias sugeridas de mantenimiento**. En algunos casos se consideran rangos, ya que ciertos elementos de IV incluyen componentes DUS con frecuencias altas de mantenimiento y otros con frecuencias bajas, simultáneamente. Además, es importante recalcar que la frecuencia de mantenimiento va a estar determinada, finalmente, por las condiciones particulares en que se localicen cada uno de estos componentes.

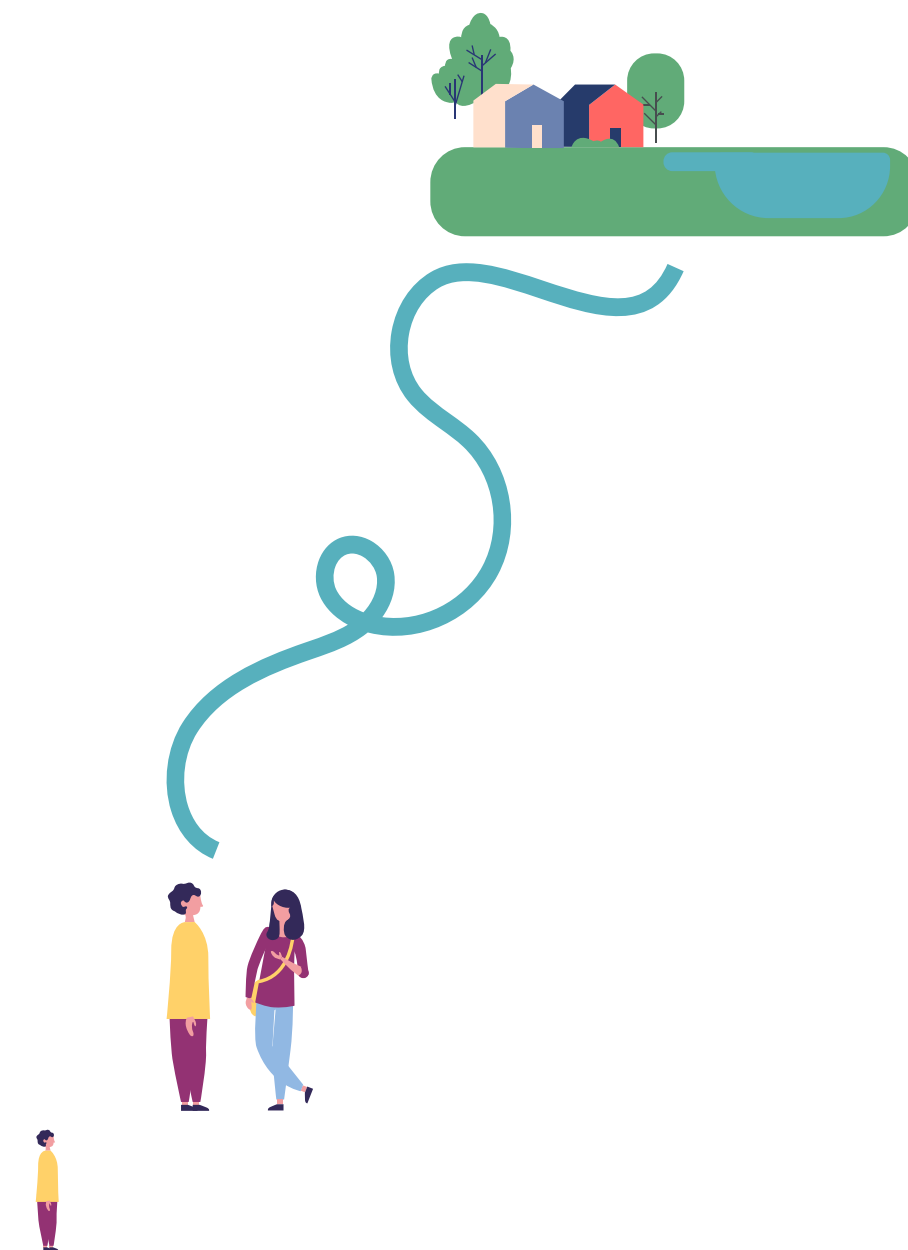
| Elemento de infraestructura verde                                   | Frecuencia de mantenimiento (n° de veces al año) | Observaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Techos y jardines<br>Estacionamientos<br>Calles urbanas<br>Rotondas | 2                                                | La mayoría de los componentes DUS de este elemento de IV requieren de esta frecuencia*. La frecuencia está principalmente dictada por la presencia de jardines de lluvia (jardines de bioretención).                                                                                                                             |
| Avenidas parque                                                     | 2                                                | La mayoría de los componentes DUS de este elemento de IV requieren de esta frecuencia*. La frecuencia está principalmente dictada por la presencia de jardines de lluvia (jardines de bioretención) y zanjas con vegetación.                                                                                                     |
| Plazas de barrio<br>Parques                                         | 2 - 4                                            | Se recomienda optar por una mayor frecuencia de mantenimiento para la revisión de las obras de almacenamiento, como los estanques de detención.                                                                                                                                                                                  |
| Líneas de ferrocarril                                               | 1 - 2                                            | Se recomienda mayor frecuencia de mantenimiento cuando la línea de ferrocarril está expuesta al ingreso de personas, ya que de lo contrario puede esperarse menos acumulación de desechos en las zanjas con vegetación (que normalmente requieren una frecuencia de 2 mantenciones al año).                                      |
| Humedales y lagunas                                                 | 2 - 4                                            | Se recomienda una mayor frecuencia dependiendo de la exposición del elemento y de su estado ecológico.                                                                                                                                                                                                                           |
| Esteros<br>Ríos<br>Quebradas                                        | 1 - 2                                            | Una frecuencia más alta guarda relación con medidas de resguardo del elemento (evitar erosión, controlar fuentes de contaminación, revisión de la vegetación de borde, etc). Sin embargo, con una mantención regular de una vez al año, la eficiencia de las funciones hidrológicas podría cumplir con los desempeños esperados. |
| Bordes de lago                                                      | 1 - 4                                            | La frecuencia dependerá de la existencia de obras superficiales de almacenamiento (como lagunas de retención o humedales de depuración) y de sus condiciones de funcionamiento.                                                                                                                                                  |
| Obras de conducción subsuperficial: Colectores                      | 1                                                | Según indicaciones del Manual de Drenaje Urbano (MOP, 2013).                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Sumideros                                                           | 2                                                | Según indicaciones del Manual de Drenaje Urbano (MOP, 2013).                                                                                                                                                                                                                                                                     |

\*Según MOP (2013).

## 3

## Prácticas para la prevención

---



Para reducir los requerimientos de mantención, aumentar la vida útil de las obras y mantener sistemas sostenibles de desarrollo, **es necesario que la implementación de la infraestructura verde optimizada esté siempre acompañada de prácticas de prevención que disminuyan la presión sobre los sistemas de drenaje.** Estas medidas deben ser promovidas no solo por las instituciones públicas de carácter regional y comunal, sino que también por la administración privada y la ciudadanía, dado que sus actividades afectan también al desempeño de la red.



○ **Reducción del uso de herbicidas y pesticidas en jardines y áreas verdes:** Las aguas lluvias que escurren sobre áreas verdes que han sido rociadas con químicos quedan contaminadas. Aguas abajo, se intentará remover estos contaminantes con los elementos de infraestructura verde que han sido diseñados en la red. Sin embargo, su capacidad de remoción de contaminantes es limitada y pueden verse sobrepasados. Así, la mantención será requerida con mayor frecuencia cuando las cargas de contaminantes sean mayores, lo que implica costos monetarios importantes y daños ambientales. En tormentas mayores, los sistemas no serán capaces de filtrar y tratar todas las aguas, por lo que los contaminantes ingresarán directamente a los cuerpos y cursos mayores, acumulándose y afectando la vida de los organismos que los residen.

○ **Regularización de descargas domiciliarias sobre cursos y cuerpos naturales de agua:** En la macrozona sur, se ha verificado que existen descargas directas de aguas grises y aguas servidas sobre los cuerpos y cursos de agua de la ciudad. Así también, es usual la mala práctica de conectar las descargas de aguas lluvias del techo y el patio directamente sobre la red de alcantarillado de aguas servidas, lo que aumenta la presión del sistema y trae como consecuencia el incremento de uso de los aliviaderos de las plantas de tratamiento hacia cuerpos receptores. Ambas situaciones afectan la vida de los organismos que habitan los cursos y cuerpos de agua. Una buena práctica de gestión es asegurar que las conexiones de aguas grises y servidas de la red domiciliaria descarguen a una red de alcantarillado diseñada para ello y que en ningún caso se conecte el flujo domiciliario de aguas lluvias a ese sistema. Al mismo tiempo, se debe promover la eliminación de los sistemas unitarios de transporte de aguas servidas y aguas lluvias en la macrozona sur y fortalecer las labores de educación que se detallan más adelante.

○ **Manejo adecuado de residuos:** De no ser manejados adecuadamente, los residuos podrían terminar en los sistemas de drenaje a través de la escorrentía de aguas lluvias. Estos residuos pueden generar problemas de obstrucción en las obras de entrada o salida, acumularse en los fondos de los cuerpos de agua o disminuir la eficiencia de elementos que buscan la infiltración.

○ **Tenencia responsable de mascotas:** Una práctica que debe ser fomentada es la recolección de heces de mascotas para evitar que la escorrentía de aguas lluvias se vea contaminada por los microorganismos patógenos que contienen. Además, los perros y gatos pueden convertirse en factores de amenaza para la provisión de hábitat y protección de la biodiversidad dado que, en ocasiones, destruyen la vegetación de áreas verdes de interés para el manejo de las aguas lluvias, y cazan animales y aves nativas.

○ **Uso de flora nativa:** Es importante priorizar el uso de flora nativa y evitar el uso de flora exótica de carácter invasivo, tanto en los elementos de infraestructura verde involucrados directamente en los sistemas DUS, como en otros componentes del paisaje de la ciudad, incluidos los hogares. Esta práctica permite reducir los requerimientos de mantención y favorecer la funcionalidad ecológica.

○ **Educación y sensibilización:** Generalmente, la población desconoce los principios del funcionamiento de los sistemas de drenaje y, por lo tanto, es muy importante implementar planes de educación y sensibilización para poner en valor, tanto su importancia, como la de las medidas que se pueden tomar para cuidarlos. Entre estas medidas, destaca el control de contaminantes en tareas simples como el lavado de autos, la limpieza de los sedimentos de estacionamientos, la reducción de uso de fertilizantes, el control de los residuos domiciliarios y la habilitación de sistemas de manejo de las aguas lluvias a nivel domiciliario. La sensibilización puede considerar la difusión de contenidos relevantes a través de redes sociales y otros canales de alto alcance, la implementación de señalética en elementos relevantes de infraestructura verde, y el uso de estrategias de urbanismo táctico, que destacan por su bajo costo y alto nivel de impacto.

○ **Definición de usos de suelo que reconocen los riesgos de inundación:** Se debe evitar que sean edificadas zonas de riesgo de inundaciones y, por lo tanto, los instrumentos de planificación territorial deben estar actualizados para definir claramente zonas de restricción y advertencia.



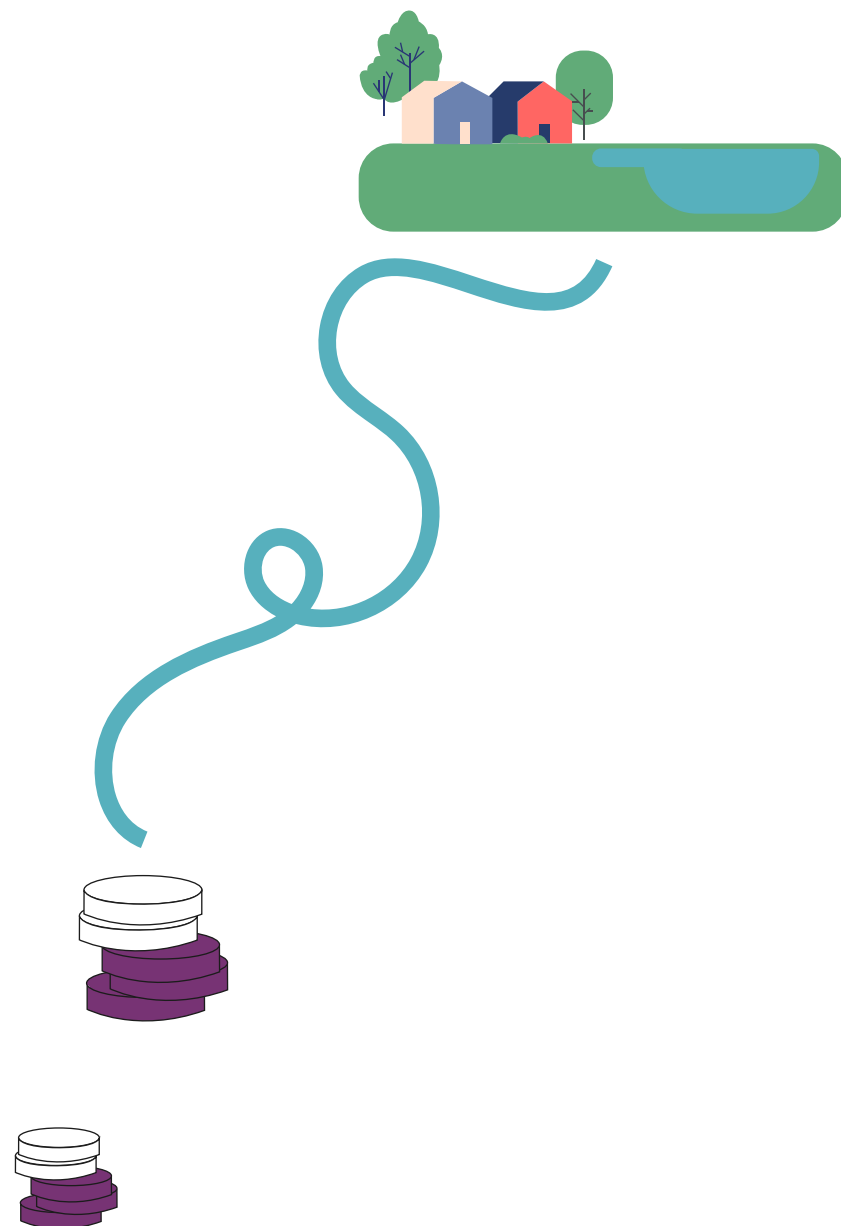


Ejemplos de acciones de urbanismo táctico orientadas a la sensibilización.

# 4

## Financiamiento

---



---

Contar con financiamiento para la etapa de monitoreo, evaluación y conservación de obras es clave a la hora de implementar soluciones de drenaje urbano sostenible (DUS), pues la eficiencia de los sistemas es altamente dependiente de su estado. Lamentablemente, la falta de recursos asignados a esta etapa suele ser una de las brechas más importantes para la adopción del enfoque DUS. En este capítulo, se presentan los principales desafíos de financiamiento en la etapa de conservación, se exponen modelos de financiamiento utilizados internacionalmente y se proponen alternativas y soluciones.

## Desafíos

### ● Altos costos de mantención de la infraestructura verde

Los costos de mantención asociados a la infraestructura verde (IV) son elevados en comparación con aquellos asociados a la infraestructura gris. De acuerdo a Reyes-Päcke et al. (2014), la mano de obra representa entre el 60 y el 75% de la estructura de costos de mantención de áreas verdes; otras partidas relevantes son el riego (aunque menos relevante en la macrozona sur respecto al norte y centro del país), el vandalismo, y costos que se desprenden del desconocimiento técnico de quienes diseñan y mantienen estos espacios.

### ● Deficiencias de integración para el financiamiento público

El financiamiento para la mantención de los sistemas convencionales opera, en general, con una mirada sectorial y un bajísimo nivel de integración entre las carteras involucradas. Bajo esta lógica, la conversión hacia sistemas DUS basados en IV conlleva el riesgo de que buena parte de ellos sea asumida únicamente como 'área verde', trasladando la responsabilidad de su mantención hacia las unidades de Aseo y Ornato de los respectivos municipios. De esta forma, podrían convertirse en una carga inabordable para gobiernos locales cuyos recursos son ya limitados.

### ● Altos costos de mantención de la infraestructura verde

En línea con lo anterior, cabe mencionar que existen bajas asignaciones presupuestarias permanentes para la mantención de sistemas de drenaje en general, y menos aún para la mantención de áreas verdes. En la práctica, estas últimas dependen mayoritariamente de los municipios en los que se emplazan, cuyas realidades financieras son tremendamente desiguales (Reyes-Päcke et al., 2014).

### ● Mecanismos limitados para recursos alternativos

Existe, en general, poca promoción para captar recursos alternativos que permitan complementar el financiamiento estatal, a pesar de los múltiples y variados referentes que existen en este sentido a nivel internacional (ver casos a continuación).

#### CASO 1: Modelo de impuesto y crédito en las ciudades de Kitchener y Waterloo, Canadá.

Las ciudades de Kitchener y Waterloo en Canadá adoptaron un modelo de impuesto y crédito para financiar la gestión de aguas lluvias. La porción del modelo que hace alusión al impuesto se establece según el tipo de edificación y su contribución en área impermeable a la ciudad. Por ejemplo, una zona industrial de gran tamaño paga un impuesto considerablemente mayor que una vivienda. Por otra parte, la sección del crédito refiere a que los diversos actores dentro de la ciudad pueden optar a reducir el impuesto al manejo de aguas lluvias (hasta un 45%) mediante la habilitación de obras de infraestructura verde a escala domiciliaria.

Kitchener y Waterloo adoptaron este método, primero con el impuesto, en 2011, para luego implementar la porción del crédito en 2012 y 2013, respectivamente. Actualmente, este tipo de financiamiento y mantención para la gestión de las aguas lluvias, conocido en inglés como *"Stormwater Utility Fees and Credits"*, se está replicando en varios lugares del mundo.



### CASO 2: *Learning Forest, Singapur*

En 2006, la Agencia Nacional del Agua de Singapur creó el programa ABC, '*Active, Beautiful, Clean Waters Programme*' ('Programa de Aguas Activas, Bellas y Limpias'), iniciativa que busca mejorar la calidad del agua y la vida por medio del uso completo del potencial de los cuerpos de agua del país. En el marco de este programa, el Learning Forest (Bosque del Aprendizaje) del Jardín Botánico de Singapur fue el primer proyecto certificado con la categoría 'Gold' ('Oro') por su enfoque sustentable en el diseño y manejo de infraestructura verde.

Con una extensión de 10 hectáreas, el bosque presenta 3 humedales, 2 estanques de sedimentación, franjas de infiltración, entre otros elementos. Estos elementos tratan un 55% del agua del lugar, mejorando su calidad y aportando a la retención de las aguas lluvias. Además, busca educar a la ciudadanía a través de recorridos interactivos.

El financiamiento y mantención del Learning Forest se realiza a través de donaciones privadas a *Garden City Fund*, organización sin fines de lucro que busca optimizar los espacios verdes en Singapur, favorecer la biodiversidad urbana, involucrar a la comunidad y mejorar las competencias de la industria paisajística del país. La organización logra sus objetivos a través de la colaboración con otros actores y provee una plataforma para que la ciudadanía se involucre en la conservación, investigación e iniciativas educativas.

### CASO 3: Parque Urbano El Bosque, Valdivia, Chile.

El Parque Urbano El Bosque (PUEB) es parte de los remanentes de ecosistemas nativos del sur de Chile, como lo son bosques y humedales, los cuales se han ido degradando con la expansión de la urbanización. Hasta comienzos de 2020, el Parque fue financiado mayoritariamente por una empresa constructora, dueña del terreno, la cual entregó por medio de un convenio la gestión y administración del PUEB al Comité Ecológico Lemu Lahuen (CELL).

CELL es una organización ciudadana que se propuso proteger la flora y fauna nativa de la zona. Actualmente, el parque se financia a través del cobro de entrada a las instalaciones, arriendo de espacios, como el 'Aula Viva', y donaciones de privados y socios. La administración busca que a partir de la educación y recreación, se entreguen valores ambientales y sociales para la protección, conservación y preservación de la flora y fauna nativa del PUEB.

La conservación de este reducto de naturaleza urbana aporta al DUS de Valdivia, disminuyendo la contaminación de las aguas por medio de la acción depuradora de los humedales, y reteniendo el volumen de escorrentía de las aguas lluvias generadas por áreas impermeables de la ciudad.

## ¿Cómo se pueden abordar los desafíos de financiamiento para la conservación de obras?

Los desafíos descritos pueden ser abordados desde múltiples aristas: trabajando en el diseño de las soluciones, explorando líneas nuevas de financiamiento, integrando carteras, aprovechando políticas y planes públicos ya existentes, e incluso innovando e ideando sobre posibles nuevos sistemas de gestión de los elementos de IV o sobre cambios normativos. A continuación se presentan propuestas acordes a los desafíos descritos.

### ● **Desafío: Altos costos de mantención de la infraestructura verde**

Este desafío se debe abordar **desde la etapa de diseño de las soluciones**. Es allí donde, teniendo en consideración las condiciones locales, se debe realizar una selección de vegetación, materiales y sistemas de riego adecuados (si se requieren), para reducir los costos de mantención a largo plazo.

Por otro lado, **se sugiere involucrar a la comunidad en el proceso** de mantención y monitoreo para contribuir a disminuir el vandalismo sobre el área y a la protección de los elementos DUS y la vida que los habita.

### ● **Desafío: Deficiencias de integración para el financiamiento público**

La propuesta de esta guía llama a considerar a los elementos de infraestructura verde como espacios para el drenaje urbano y, por lo tanto, como parte de la red de manejo de las aguas lluvias. Tanto el MOP como MINVU, organismos responsables de la red primaria y secundaria cuando existe plan maestro de aguas lluvias, cuentan con partidas presupuestarias de mantenimiento de las obras de drenaje, comúnmente aplicadas a la conservación de sistemas subterráneos. Así, es necesario que dichos organismos tomen responsabilidad sobre las tareas de mantenimiento de los elementos de IV que vayan a ser considerados como parte de la red primaria o secundaria.

Por otro lado, los cuerpos verdes y azules de las ciudades cumplen múltiples funciones, entre ellas la provisión de hábitat, provisión de espacios de recreación y protección de la salud mental de los habitantes. En ocasiones son además territorios de valor patrimonial y cultural importante. **Así, mantener en buen estado estos espacios debe ser de interés y responsabilidad de un amplio grupo de organismos públicos y unidades municipales, no solo de la unidad de Aseo y Ornato.** Se sugiere establecer mesas de trabajo con los distintos organismos y promover el desarrollo de proyectos en conjunto, prorratando los costos de mantención de acuerdo a los beneficios y posibilidades de las carteras propias.

### ● **Desafío: Falta de recursos estatales permanentes**

Las fuentes de financiamiento permanente para la mantención de los sistemas de drenaje sostenible son limitadas. Entre aquellas que pueden ser exploradas destacan la cartera de financiamiento de los **planes de inversiones en infraestructura de movilidad y espacio público** de los municipios, que surge desde la puesta en marcha de la Ley de Aporte al Espacio Público (Ley 29.958). **Estos planes deben contener proyectos que permitan mejorar las condiciones de conectividad, accesibilidad, operación, movilidad, calidad de los espacios** públicos, cohesión social y/o sustentabilidad urbana de la comuna, y perfectamente podrían integrar sistemas DUS multifuncionales.

Otras herramientas que podrían ser utilizadas por las municipalidades y servicios públicos para incorporar los recursos privados en el financiamiento de la mantención, son las concesiones y el financiamiento compartido (Ley 19.865). Las multas cursadas por infracciones a la norma ambiental no están destinadas a la mantención de áreas verdes, pero podrían estarlo. Asimismo, se podría explorar la posibilidad de que la ley de donaciones (Ley 19.247) tome en cuenta donaciones privadas con fines ambientales para la exención tributaria en algún grado.

Existen otras fuentes de financiamiento estatales no permanentes o garantizados, a las que los proyectos municipales pueden concursar para financiar las tareas de mantención (p. ej. línea de Conservación de Parques Urbanos, MINVU). Sin embargo, resulta oportuna la creación de fondos más flexibles y continuos en el tiempo, orientados a la mantención de la vegetación y de los componentes de la infraestructura verde que incluyan ítems de riego, poda, seguridad, reposición de mobiliario, apropiación social, y otros de carácter multifuncional.

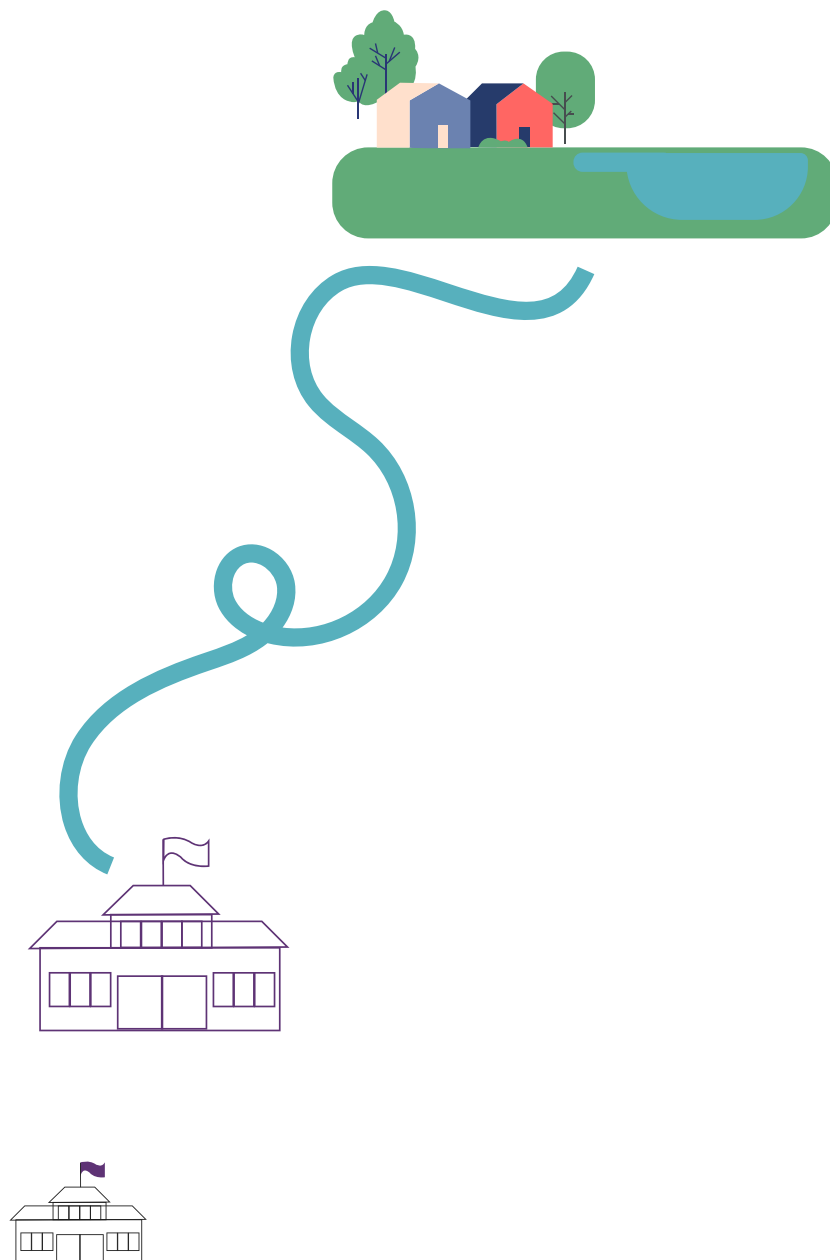
### ● **Desafío: Mecanismos limitados para recursos alternativos**

Existen modelos de financiamiento alternativos que pueden ser explorados para aumentar la gama de formatos y fuentes de financiamiento. Entre ellos:

- Usar un sistema tarifario aplicado a privados, proporcional al volumen de escorrentía generado, para incentivar el uso y mantención de sistemas DUS. Generar incentivos financieros (subsidios o reducción de tarifas) a quienes reducen la escorrentía. Este mecanismo internaliza el costo ambiental en cada individuo, y los beneficios sirven a un bien común.
- Generar un mercado en base a compensaciones, en el cual un privado que no pueda hacerse cargo de la calidad de su agua lluvia (p. ej. por ser muy costoso) pueda financiar la mantención de proyectos DUS en otro lugar.
- Convenios de gestión público-privada.

# 5

## Gobernanza



La naturaleza descentralizada de la infraestructura verde (IV) pone dificultades a los sistemas de gobernanza en Chile, y el proceso de sostenibilidad de los proyectos de drenaje urbano sostenible (DUS) requiere de coordinación y planificación de responsabilidades de carácter intersectorial, pero también público-privada y de articulación con la sociedad civil.

Como se ha visto en capítulos anteriores, una de las brechas más importantes del modelo de gobernanza actual es la fragmentación de responsabilidades. Cada tramo de la red (domiciliaria, secundaria, primaria y natural) es dependiente de un actor distinto y, **para lograr la integración que se requiere para un sistema de mantención exitoso, se recomienda trabajar en los siguientes aspectos** (adaptado de Centro de Políticas Públicas UC, 2018):

- **Promover la coordinación entre organismos del Estado con injerencia en el drenaje urbano:** Una propuesta es estudiar la co-gestión en la mantención. Los municipios no cuentan siempre con los recursos y las capacidades técnicas suficientes para hacerse responsables de estos espacios. Entonces, organismos como el SERVIU o el MOP, a través de algunas de sus direcciones, pueden encargarse de la mantención estructural. Las municipalidades, en tanto, pueden encargarse de la vinculación con los usuarios, la gestión de los sistemas comunitarios de monitoreo, y la promoción de prácticas de prevención.
- **Promover la articulación entre el Estado y actores del mundo privado y la sociedad civil:** Una opción es avanzar hacia un modelo de co-gobernanza, garantizando el involucramiento de actores no gubernamentales en el proceso de monitoreo, evaluación y mantención de los elementos de infraestructura verde optimizados. Se recomienda promover instancias de participación esporádicas (actividades de mejoramiento, revegetación u otras) y también permanentes, como el trabajo con agrupaciones de conservación o delegados vecinales de plazas, parques, humedales u otros elementos; asociaciones público-privadas de administración; mecanismos virtuales de consulta y seguimiento; monitoreos ciudadanos; entre otros.

## INVESTIGACIÓN

### ***“Green Infrastructure through Citizen Stormwater Management: Policy Instruments, Participation and Engagement”***

Lieberherr y Green (2018) desarrollaron un **esquema de clasificación para evaluar el grado en el que las diversas políticas, planes y programas relacionados a los sistemas de drenaje promueven la gestión ciudadana de aguas lluvias de los espacios públicos y privados** en Estados Unidos, es decir, el grado en que se promueve un modelo de gobernanza con alta participación de la comunidad. La metodología se basa, en primer lugar, en diferenciar los instrumentos en 3 tipos:

- **Garrotes:** Instrumentos regulatorios que incluyen mecanismos de control como estándares, licencias, permisos y sanciones. Este tipo de instrumento generalmente involucra una alta intervención gubernamental, dado que utiliza directrices estrictas y requisitos normativos vinculantes para los grupos objetivo.

- **Zanahorias:** Instrumentos financieros que pueden incentivar o desincentivar funciones, que a su vez pretenden que grupos objetivo cambien conductas. Algunos ejemplos identificados en el estudio son la provisión directa de elementos de control de nivel domiciliario (p. ej. barriles de almacenamiento de aguas lluvias), reembolsos y sistemas de subsidios o créditos sobre impuestos por escorrentía de aguas lluvias, como incentivo para la disminución del área impermeable. Tienen un grado moderado de intervención del sector público, ya que no son legalmente vinculantes, es decir, los grupos objetivo son libres de reaccionar al instrumento; si deciden participar, se establecen acuerdos contractuales con derechos y obligaciones similares a los instrumentos regulatorios.

- **Sermones:** Instrumentos blandos que promueven que grupos objetivos cambien sus conductas. Este tipo de instrumento incluye la divulgación, intercambio de conocimientos y consultas, y mantienen un bajo grado de intervención gubernamental ya que el foco está en la transferencia entre actores sin mandato normativo.

Para evaluar el nivel de participación ciudadana y de compromisos que puede impulsar cada tipo de instrumento, las autoras presentan la siguiente matriz de puntajes.

|                                   | <i>Garrote</i><br>(Instrumentos regulatorios)                                                                                                                                                                                                 | <i>Zanahoria</i><br>(Incentivos o desincentivos financieros)                                                                              | <i>Sermón</i><br>(Instrumentos blandos)                                                                                                       |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Intervención gubernamental</b> | <b>3: Alta</b><br>Programas definidos por gobiernos.                                                                                                                                                                                          | <b>2: Moderada</b><br>Mecanismos voluntarios que una vez aceptados se vuelven vinculantes.                                                | <b>1: Baja</b><br>La intervención es voluntaria.                                                                                              |
| <b>Participación</b>              | <b>1-2: Baja a moderada</b><br>La naturaleza jerárquica del tipo de instrumento deja poco espacio para la participación horizontal, pero la ciudadanía puede influenciar la política, programa o plan a través de acciones como las demandas. | <b>1-2: Baja a moderada</b><br>El foco está puesto en el incentivo por sobre la participación.                                            | <b>2-3: Moderada a alta</b><br>Las decisiones son co-adaptadas, lo que promueve el intercambio de conocimiento entre organismos y ciudadanía. |
| <b>Compromiso</b>                 | <b>3: Alto</b><br>Si el instrumento puede forzar cambios de conducta a través de requerimientos legales.<br><br><b>1: Bajo</b><br>Si el instrumento no fuerza cambios de conducta.                                                            | <b>2-3: Moderado a alto</b><br>Puede incentivar el cumplimiento de compromisos, pero los desincentivos pueden disuadirlos o complicarlos. | <b>2-3: Moderado a alto</b><br>Promueve el cambio voluntario de comportamiento.                                                               |

A partir de este esquema de clasificación, se estudia la data de 10 años de desarrollo de proyectos de infraestructura verde en el Condado de Onondaga, Nueva York, y se evalúan los resultados de cada iniciativa utilizando como indicador el volumen de escorrentía que son capaces de capturar.

**Se concluye del estudio que los instrumentos del tipo zanahoria y sermón juegan un rol muy importante en el control del volumen de escorrentía, dado que tienen el potencial de intervenir los espacios privados.**

Además, se deja en evidencia que **la participación ciudadana puede ocurrir aún cuando no existan normativas vinculantes sobre el manejo de las aguas lluvias en la red domiciliaria** (como ocurre en Chile). En estos casos, el potencial para una gestión ciudadana de las aguas lluvias es alto. Por otro lado, se concluye que los instrumentos blandos tienden a desempeñar funciones de soporte para los otros tipos de medidas.



## REFERENCIAS:

- Centro de Políticas Públicas UC. (2018). *Desafíos y propuestas para la administración de parques y plazas en Chile: Resumen Ejecutivo*. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile
- Geberemariam, T. K. (2017). Post construction green infrastructure performance monitoring parameters and their functional components. *Environments*, 4(1), 2. <https://doi.org/10.3390/environments4010002>
- Lieberherr, E., & Green, O. O. (2018). Green infrastructure through citizen stormwater management: Policy instruments, participation and engagement. *Sustainability*, 10(6), 2099. <https://doi.org/10.3390/su10062099>
- Ministerio de Obras Públicas. (2013). *Manual de Drenaje Urbano: Guía para el diseño, construcción, operación y conservación de obras de drenaje urbano*. Santiago, Chile.
- Parra, O., Baeza, C., Almanza, V., Urrutia, R., Figueroa, R., Fernández, X., ... Castillo, L. (2015). *Los Lagos Urbanos del Gran Concepción (Comunas de Concepción y San Pedro de la Paz): Guía Escenarios de Aprendizaje*. PROYECTO FONIS SA 13|2021. Concepción, Chile. Recuperado de <http://www.eula.cl/fonis/wp-content/uploads/2016/03/Guia-de-aprendizaje-LAGOS-URBANOS-final.pdf>
- Reyes-Päcke, S., De la Barrera, F., Dobbs, C., Spotorno, A., & Pavez, C. (2014). *Costos de mantención de las áreas verdes urbanas en Chile*. Centro de Políticas Públicas UC y Ministerio de Vivienda y Urbanismo. 53p.
- Toronto and Region Conservation Authority & Credit Valley Conservation. (2010). *Low Impact Development Stormwater Management: Planning and Design Guide*. Toronto, Canadá. Recuperado de <https://cvc.ca/low-impact-development/low-impact-development-support/stormwater-management-lid-guidance-documents/low-impact-development-stormwater-20management-planning-and-design-guide/>
- Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). *The SUDS manual*. North Carolina State University CIRIA, Griffin Court. London, UK, 968.

Los sistemas de drenaje urbano sostenible basados en infraestructura verde son una solución eficiente para gestionar las aguas lluvias, disminuyendo los riesgos de inundación, erosión y contaminación; y contribuyendo simultáneamente al cuidado y recuperación de espacios de naturaleza urbana, tanto para el disfrute de las personas como para la conservación de la biodiversidad.

Esta guía busca acercar el concepto de drenaje urbano sostenible y ofrecer herramientas para orientar su diseño e implementación, resignificando el agua y sus espacios en la ciudad para aportar al desarrollo de entornos urbanos sostenibles y resilientes, con una mirada territorial que considera las características particulares de la macrozona sur de Chile.

