

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSE MIGUEL CARRERA

ESTUDIO DEL SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE MEDIANTE
HORMIGÓN PERMEABLE

Trabajo de titulación para optar al título
Profesional de Técnico Universitario en
Construcción

Estudiante:

Joffré Alfred Lozano Agurto

Profesor Guía:

Marco Antonio Howes Herrera



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Estudio Del Sistema Urbano De Drenaje Sostenible Mediante Hormigón Permeable

Nombre del candidato(a): Joffré Alfred Lozano Agurto

Carrera / Grado: Técnico Universitario En Construcción

Campus: Viña Del Mar _____ Departamento: Construcción

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Marco Antonio Howes Herrera, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 20/07/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 15/07/2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

DEDICATORIA

A mi madre, por ser mi pilar fundamental y por ser el ejemplo de fortaleza que me guio hasta este momento. Este título es el resultado de los sacrificios y de la fe ciega que siempre tuviste en mí; sin tu apoyo constante, este sueño no sería realidad.

A mi pareja, por su paciencia infinita, por creer en mi capacidad incluso cuando yo dudaba, por celebrar cada pequeño avance. Gracias por ser mi motivación y mi paz en los momentos de estrés.

A mis dos hermanos, por su apoyo incondicional recordándome siempre de dónde vengo y hacia dónde voy. Por estar presentes en cada paso de este camino, brindándome siempre la motivación necesaria para no rendirme.

A mi mascota Patilarga que se quedaba durmiendo bajo mi escritorio por acompañarme en mis horas de estudio.

A todos ellos, por ser mi familia y el soporte emocional que hizo posible la culminación de esta tesis.

RESUMEN

KEYWORDS: Drenaje, sostenibilidad, urbanización.

Chile, país que presenta una variedad de zonas climáticas a consecuencia de su extensión territorial. En cuestión, el clima en la región Metropolitana se caracteriza por ser mediterráneo, de estación seca larga y con un aumento de precipitaciones, que tienden a concentrarse en los meses de invierno fundamentalmente. La magnitud de este fenómeno unido a la pérdida de superficie permeable como consecuencia de la urbanización, generan en la actualidad una problemática importante en la gestión de las aguas pluviales urbanas, produciendo una serie de efectos negativos desde el punto de vista hidrológico, hidráulico y medioambiental sobre el sistema de drenaje convencional y los medios receptores.

Con el objetivo de mitigar estos efectos negativos, surge una medida con orientación novedosa en la gestión de las aguas pluviales, denominándose “Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible” (SUDS). Estos sistemas permiten controlar la cantidad y la calidad de la escorrentía generada, procurando reproducir el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización.

El Hormigón Permeable contribuye de manera significativa a los principios y objetivos de un sistema urbano de drenaje sostenible, debido a sus propiedades para infiltrar el agua, esto facilita la recarga de los acuíferos ya que actúa como un filtro natural al retener partículas y contaminantes, mejorando la calidad del agua antes de alcanzar cuerpos de agua naturales.

También reduce la escorrentía superficial, esto posibilita el desarrollo urbano sostenible tanto en áreas donde el sistema de drenaje existente está sobresaturado como en áreas urbanizadas con condiciones deficientes.

El presente trabajo de titulación se centra en el estudio y aplicación de pavimentos permeables de hormigón, en vías de poco tránsito como patios, entradas de las residencias y estacionamientos.

Este pavimento debe ser capaz de gestionar un determinado evento de precipitación, y al mismo tiempo resistir un cierto nivel de tráfico. Para ello, el estudio se basará en las guías y manuales de diseño existentes en Chile, cuyos métodos propuestos corresponden a modelos internacionales que han sido calibrados en condiciones similares a las que se pueden encontrar en el país.

Además, considerando la escasa aplicación de los pavimentos permeables en el territorio nacional, este trabajo puede servir como antecedente para futuras urbanizaciones que deseen implementar esta técnica de drenaje sostenible.

ABSTRACT

KEYWORDS: Drainage, sustainability, urbanization.

Chile, a country with a wide variety of climatic zones due to its territorial extension, faces significant challenges in urban stormwater management. To mitigate these negative effects, sustainable urban drainage systems (SUDS) have emerged as an innovative approach, among which permeable concrete pavements stand out for their capacity to reduce surface runoff and contribute to groundwater recharge.

This undergraduate thesis focuses on the study and application of permeable concrete pavements as a structural component of a sustainable urban drainage system. The pavement must be capable of managing a given precipitation event while satisfying the structural requirements demanded by its intended use. Considering the limited application of permeable pavements within the national territory, this work integrates the structural and hydrological-hydraulic design criteria into a single dimensioning procedure, illustrated through a worked application example.

GLOSARIO

- SUDS: Sistema Urbano de Drenaje Sostenible.
- CBR: California Bearing Ratio, índice de capacidad de soporte del suelo.
- V_{afl} : Volumen afluente acumulado hacia la sub-base del pavimento permeable.
- V_{inf} : Volumen infiltrado acumulado hacia el terreno natural.
- V_{alm} : Volumen de almacenamiento de diseño requerido en la sub-base.
- C_s : Coeficiente de seguridad frente a la colmatación del medio poroso.
- S_a : Superficie activa, fracción de la superficie total que contribuye a la escorrentía gestionada.
- DGA: Dirección General de Aguas (Chile).
- MOP: Ministerio de Obras Públicas (Chile).
- MINVU: Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Chile).

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....2

OBJETIVO GENERAL.....2

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....2

CAPÍTULO 1 DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES EN LA GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES EN ENTORNOS URBANOS 3

1.1. PLANTEANDO EL PROBLEMA.....4

1.1.1. Impermeabilización del suelo.....5

1.1.2. Insuficientes infraestructuras de drenaje urbano 9

1.2. SOLUCIONES PARA LA GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES 10

1.2.1. Desarrollo Sostenible 11

1.2.2. Marco Regulatorio de las Aguas Lluvias en Chile 13

1.3. DRENAJE URBANO SOSTENIBLE.....14

1.3.1. Ventajas e Inconvenientes 14

1.3.2. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. 16

CAPÍTULO 2 MÉTODOS DE DISEÑO DE HORMIGÓN PERMEABLE EN SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE.....18

2.1. METODOLOGÍA.....19

2.2. DISEÑO ESTRUCTURAL 20

2.3. DISEÑO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO 28

2.3.1. Metodología Chile.....30

2.3.2. Determinación del caudal de salida (Qs) 32

2.3.3. Determinación de la superficie activa (Sa).....33

2.4. ESPECIFICACIONES TECNICAS GENERALES PARA PAVIMENTACION EN HORMIGON POROSO 34

2.4.1. Pavimentos porosos.....35

2.4.2. Comportamiento y diseño de los pavimentos permeables.....39

CAPÍTULO 3 OPTIMIZACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y ALMACENAMIENTO.....40

- 3.4.1. GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES 41
 - 3.1.1. Ciclo Hidrológico 41
- 3.2. EFECTOS DE LA EXPANSIÓN URBANA EN LAS AGUAS PLUVIALES.....42
 - 3.2.1. Desventajas 42
 - 3.2.2. Ventajas.....43
- CAPÍTULO 4 APLICACIÓN PRÁCTICA: DISEÑO ILUSTRATIVO DE UN PAVIMENTO DE HORMIGÓN PERMEABLE 46
 - 4.1. Definición del caso de estudio.....47
 - 4.2. Diseño hidrológico-hidráulico 47
 - 4.3. Diseño estructural 48
 - 4.4. Verificación del tiempo de vaciado y del caudal de salida 48
 - 4.5. Síntesis de resultados 48
- CONCLUSIONES..... 50
- REFERENCIAS 51

INTRODUCCIÓN

A nivel internacional, la gestión de los recursos hídricos se rige por los principios de sostenibilidad, adoptados por la mayoría de los países desarrollados. No obstante, en Chile, el enfoque hacia las aguas pluviales y el drenaje urbano parece más orientado a la gestión de crecidas que a la resolución sostenible o la integración con otros recursos hídricos. La escasa disponibilidad de información sobre los impactos generados por las aguas pluviales urbanas y la falta de conciencia acerca de sus efectos en la cuenca contribuyen a que las soluciones actuales aún no consideren los elementos naturales del drenaje como complemento ni como base para el diseño de soluciones sostenibles. En la actualidad, el concepto de aguas pluviales se percibe más como un desecho que como un recurso.

Los desafíos derivados de las precipitaciones pluviales en entornos urbanos son ampliamente reconocidos, especialmente en situaciones de lluvias intensas que sobrepasan la capacidad del sistema de drenaje existente. Estas situaciones conllevan a inundaciones, contaminación difusa por desbordamientos de aguas residuales y la interrupción de servicios urbanos, resultando anualmente en lamentables pérdidas personales, naturales y económicas.

En base de estos problemas, la sociedad experimenta una sensación de inseguridad y vulnerabilidad, exacerbada por el aumento en la intensidad de las precipitaciones en ciertas regiones.

Por ende, el diseño del sistema de drenaje urbano debe trascender el simple control de inundaciones y abordar también la calidad de las aguas pluviales, así como su potencial servicio a la sociedad.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la aplicabilidad técnica del hormigón permeable como componente estructural de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS), mediante el análisis de las metodologías de diseño hidrológico-hidráulico y estructural vigentes en Chile, con el fin de proponer un procedimiento de dimensionamiento aplicable a vías de bajo tránsito, patios y estacionamientos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Analizar los factores que inciden en la generación de contaminación difusa asociada a la escorrentía urbana, con el propósito de determinar el aporte del hormigón permeable a la mitigación de dicho fenómeno.
- Determinar el espesor de diseño de un pavimento de hormigón permeable mediante la integración de los criterios estructurales (capacidad de soporte) e hidráulicos (capacidad de infiltración y almacenamiento), aplicando la Metodología Chile (DICTUC, 1996).
- Evaluar la contribución del hormigón permeable a la reducción del riesgo de inundación urbana, mediante el cálculo del volumen de almacenamiento y el tiempo de vaciado de un caso de aplicación representativo.

CAPÍTULO 1
DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES EN LA GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES EN
ENTORNOS URBANOS

1.1.PLANTEANDO EL PROBLEMA

El crecimiento continuo y acelerado de las ciudades conlleva una progresiva impermeabilización del suelo, generando alteraciones significativas en el ciclo hidrológico natural del agua. Este fenómeno se traduce en la necesidad constante de desarrollar colectores de mayor tamaño y longitud, así como en la demanda de depuración de aguas pluviales que, en su origen, eran sustancialmente limpias.

se aborda el complejo panorama de efectos y problemas derivados del agua de lluvia en entornos urbanos, considerando las interrelaciones entre economía, medio ambiente y sociedad, aspectos centrales del desarrollo sostenible. La clasificación de estos problemas busca proporcionar una visión holística de las implicaciones asociadas a este fenómeno, reconociendo la interdependencia entre las causas y los efectos.

Efectos Económicos:

- Considerable aumento en los costos de diseño y ejecución de infraestructuras de drenaje urbano, adaptándose a la gestión de volúmenes de agua en constante crecimiento.

Mantenimiento y Reparación:

- Elevados gastos de mantenimiento de las infraestructuras de drenaje y otros servicios urbanos.
- Costos asociados a la reparación de daños materiales ocasionados por inundaciones, con especial atención a las pérdidas humanas.

Compensación por Problemas Persistentes:

- Necesidad de compensación económica ante la persistencia de problemas vinculados al agua de lluvia a lo largo del tiempo.

Efectos sobre el Medio Natural:

Fractura del Ciclo Natural del Agua:

Desaparición de los mecanismos de depuración natural e infiltración al terreno, generando una fractura completa en el ciclo natural del agua en entornos urbanos.

Aumento de Contaminación:

Incremento significativo de la contaminación física, química y térmica en el interior de las ciudades y en los ecosistemas naturales que reciben las aguas pluviales.

Erosión, Huaicos y Pérdida de Biodiversidad:

Aumento de la erosión en los cauces de los ríos, con consecuencias perjudiciales para los ecosistemas de ribera y la biodiversidad en entornos urbanos y naturales afectados.

Efectos Sociales:

Inseguridad Ciudadana:

Inseguridad generalizada entre los ciudadanos ante eventos de fuertes precipitaciones.

Incomodidades y Pérdida Estética:

Insuficiencias en el sistema de drenaje que generan incomodidades en el interior de las ciudades, como charcos y cortes de circulación.

Pérdida de la estética urbana debido a arrastres, erosiones, huaicos y reboses.

Desvalorización del Agua de Lluvia:

Pérdida de valor del agua de lluvia, desaprovechando su potencial para usos no potables.

En síntesis, estos efectos se categorizan en inundaciones como el principal problema económico, contaminación difusa asociada al medio ambiente y falta de servicio que encapsula los aspectos sociales.

1.1.1. Impermeabilización del suelo

La permeabilidad puede definirse como la capacidad de un medio para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. De este modo una capa de material permeable es aquella que deja pasar a través de todo su espesor una cantidad apreciable de agua, siendo impermeable si la cantidad es nula o despreciable.

La impermeabilización del suelo, debida al continuo crecimiento urbano, es una de las principales causas del aumento de los problemas asociados a la gestión de aguas pluviales

en las ciudades. Influyendo de manera decisiva en la generación de inundaciones en los puntos bajos, así como en el vertido deslocalizado de los contaminantes acumulados al medio natural, fenómeno conocido como contaminación difusa.

En los últimos 200 años la mayor parte de la población del mundo se ha concentrado en las ciudades, abandonando el esquema de desarrollo rural e incrementando enormemente el desarrollo urbano, y por tanto el porcentaje de impermeabilización del suelo.

La diferencia entre el modelo rural y el urbano, en lo que a impermeabilización de la superficie se refiere, puede observarse en la siguiente figura (1-1).



Fuente: Memoriachilena.cl y Google Maps.

Figura 1-1. Suelo rural y urbano en la Región Metropolitana de Santiago 1810 y 2019.

Los principales materiales responsables de la impermeabilización del suelo en entornos urbanos abarcan las cubiertas de edificios tales como tejas cerámicas, telas asfálticas, etc. Así también las capas superficiales de vías y pavimentos peatonales como baldosas, adoquines, hormigón, piedra ornamental, entre otros.

Además, muchas áreas verdes urbanas, aunque vegetadas en la superficie, presentan un sustrato predominantemente compuesto por escombros compactados, lo cual resulta completamente impermeable, anulando la posibilidad de infiltración natural del agua al suelo subyacente.

La impermeabilización de las superficies urbanas se realiza principalmente por motivos de protección contra la erosión, mantenimiento de la limpieza y facilitación del drenaje. En este contexto, la impermeabilización del suelo constituye la base del sistema de drenaje urbano convencional. En superficies impermeables, el tiempo de concentración se reduce y la evacuación del agua es más rápida, aspecto positivo en principio. Sin embargo, es crucial contar con un sistema de sumideros y una red de alcantarillado eficientes para gestionar el volumen precipitado. Cuando estos elementos no funcionan adecuadamente, el agua recorre las superficies impermeables, convirtiendo algunas calles en canales temporales que transportan un caudal elevado, provocando daños considerables.

En situaciones de disfunción de sumideros o sistemas de alcantarillado, el agua se acumula en los puntos bajos, generando inundaciones y aumentando el riesgo de daños significativos.

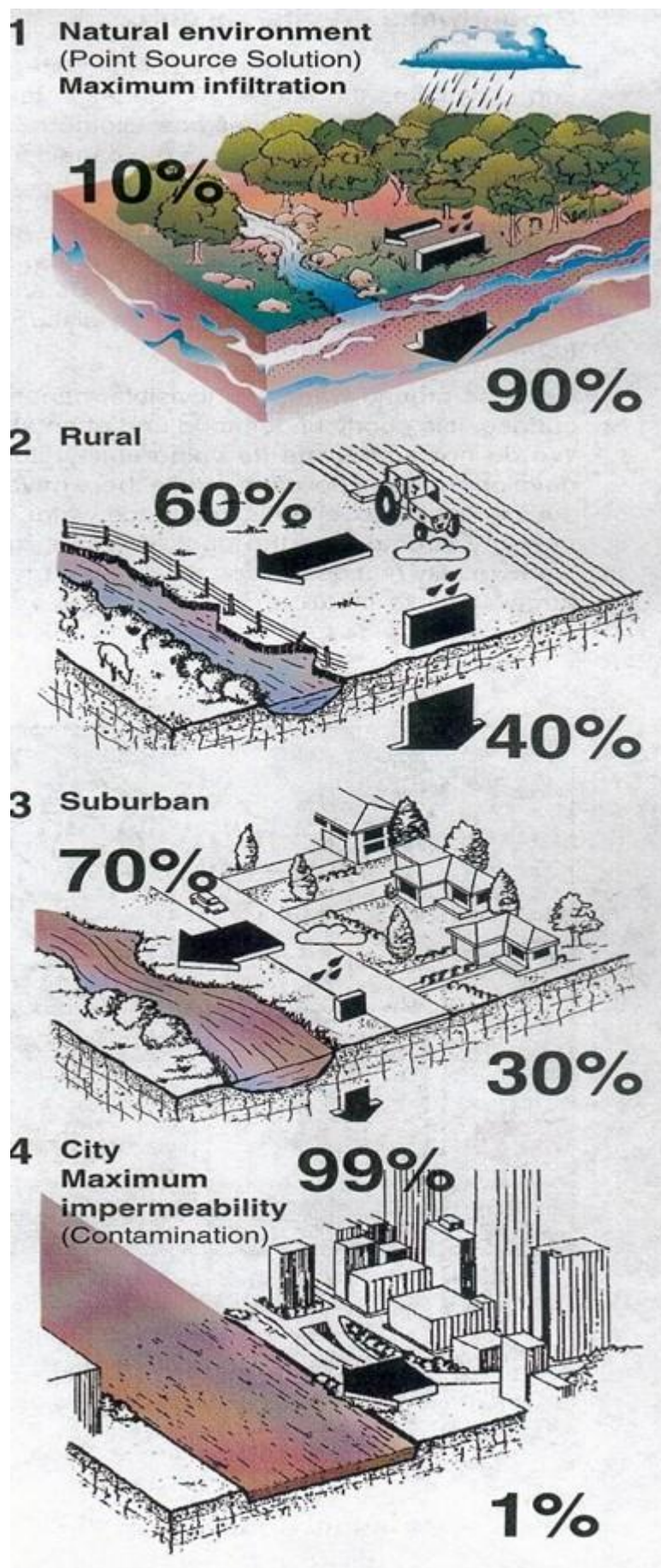


Fuente: (pauta.cl/actualidad/2023/08/23/jefe-defensa-sistema-frontal-cambio-mentalidad.html)
(chile.as.com/actualidad/lluvia-y-sistema-frontal-hoy-en-chile-23-de-agosto-suspension-de-clases-clima-actualizado-y-como-avanza-el-temporal-n/)

Figura 1-2. Sistema frontal que ha azotado la zona centro-sur del país

En síntesis, el proceso de impermeabilización asociado al crecimiento urbano induce modificaciones significativas en el ciclo hidrológico del terreno, llegando a prácticamente eliminar la capacidad de infiltración natural y la recarga de los acuíferos (Figura 1-3). La transformación resultante, conocida como ciclo urbano del agua, implica la pérdida de procesos naturales cruciales que garantizan la disponibilidad de agua potable.

La impermeabilización de las superficies anula por completo la posibilidad de recarga natural de los acuíferos mediante el agua de lluvia. En lugar de alimentar gradualmente estas reservas subterráneas, el agua de lluvia es conducida de manera directa y rápida hacia las estaciones de tratamiento, alejándola efectivamente de las zonas urbanas. Este fenómeno representa una alteración significativa en la dinámica natural del ciclo del agua, con consecuencias directas en la disponibilidad de recursos hídricos y resalta la necesidad de estrategias de gestión más sostenibles y conscientes del entorno en el desarrollo urbano.



Fuente: atlantisaurorambiental.cl

Figura 1-3. Gráfico de infiltración de aguas pluviales en el terreno.

1.1.2. Insuficientes infraestructuras de drenaje urbano

Los sistemas de drenaje urbano convencional tienen como objetivo primordial evacuar rápidamente el agua de lluvia fuera de la ciudad. Para lograrlo, los cauces urbanos han sido canalizados y el sistema de alcantarillado ha sido concebido para recibir la máxima cantidad de agua posible. A lo largo del tiempo, las soluciones adoptadas han privilegiado en gran medida focalizándose en grandes conductos que desembocan en depuradoras diseñadas para tratar volúmenes considerables de agua contaminada. Estas estrategias han estado principalmente guiadas por criterios hidráulicos y económicos, relegando la consideración de aspectos sociales y ecológicos, como la conservación del agua o la gestión de la contaminación difusa, a un segundo plano.

Como resultado de estas prácticas, los ríos que atraviesan zonas urbanas han experimentado una pérdida significativa de su riqueza natural y de su capacidad para hacer frente a las crecidas. Este fenómeno ha generado un aumento en la velocidad del flujo de agua, provocando problemas severos de erosión en los entornos naturales situados aguas abajo, en las áreas periféricas de las ciudades.

Paralelamente, los sistemas de alcantarillado, tanto unitarios como separativos, se han mostrado incapaces de gestionar la notable cantidad de agua adicional proveniente de las zonas de desarrollo urbano reciente, dando lugar a la necesidad de expansiones costosas y frecuentes. La incapacidad para llevar a cabo estas ampliaciones ha llevado a la proliferación de situaciones que ilustran la insuficiencia de las infraestructuras de drenaje urbano.



Fuente: cigiden.cl

Figura: 1-4. Problemas de desbordamiento de alcantarillas-Ubicación Región Metropolitana.

En relación con la calidad, se ha observado un notable aumento en la construcción de estaciones depuradoras de aguas residuales en los últimos años.

Sin embargo, durante los periodos de lluvias, estas instalaciones enfrentan desafíos al gestionar el volumen total resultante de la combinación de aguas negras y aguas grises (pluviales o de escorrentía).

La incapacidad temporal para manejar esta carga total conduce a vertidos directos a los medios naturales mediante aliviaderos.

Estos vertidos incontrolados, combinados con los vertidos deslocalizados a los medios naturales que pueden ocurrir en diversas áreas de la ciudad, dan lugar a lo que se conoce como contaminación difusa.

Este fenómeno representa una problemática crítica que será abordada en la presente investigación, considerando enfoques técnicos para mitigar la contaminación difusa y mejorar la capacidad de las infraestructuras existentes para hacer frente a las fluctuaciones en el volumen de agua durante eventos de lluvia.

1.2.SOLUCIONES PARA LA GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES

Las estrategias para gestionar las aguas pluviales en entornos urbanos están intrínsecamente ligadas al concepto de desarrollo sostenible. Enfoque que ha impulsado una inversión sustancial en innovación, promoviendo las energías renovables y prácticas de conservación de recursos.

Además, la calidad del aire se deteriora cada vez más, provocando serios problemas de salud y alteraciones climáticas. Asimismo, la disponibilidad de agua dulce no logra satisfacer las crecientes demandas, lo que hace necesario recurrir a la desalinización del agua de mar para cubrir las necesidades. Cada acción tiene su consecuencia, y es evidente que el medio ambiente ha respondido a la actividad humana con un agotamiento de recursos y un cambio en las condiciones ambientales, lo cual puede tener consecuencias dramáticas para la humanidad. Por todo ello, es crucial tomar medidas y apostar por el desarrollo sostenible en todos los ámbitos de la actividad humana.

1.2.1. Desarrollo Sostenible

Antes de profundizar en el concepto de desarrollo sostenible, es importante examinar cómo ha evolucionado la relación entre el ser humano y el medio ambiente desde diversas perspectivas.

Tabla 1-1. Relación entre el ser humano y el Medio Ambiente

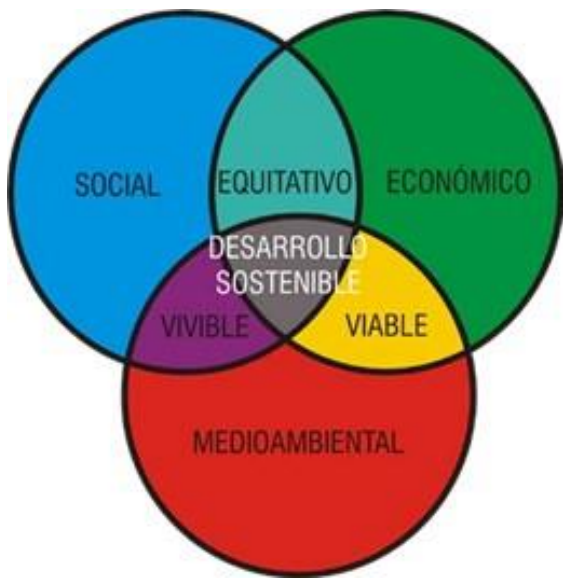
Humano	Sociedad y Medio Ambiente
El ser humano se enfrenta a la naturaleza para poder sobrevivir	Surgen corrientes minoritarias de
Con el desarrollo de la industria, el ser humano emplea los recursos naturales partiendo de la hipótesis de que son ilimitados	Aparecen los grupos ecologistas defendiendo la premisa de que los recursos naturales son ilimitados y debe minimizarse su explotación
Como solución de compromiso aparece el concepto de desarrollo sostenible	

Fuente: Elaboración propia

El concepto de desarrollo sostenible, también conocido como desarrollo sustentable o perdurable, se originó en 1987 con el documento "Nuestro Futuro Común", conocido como el Informe Brundtland. Este informe fue el resultado de los trabajos de la Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, creada en 1983. Según el documento, "el desarrollo sostenible es un desarrollo que satisface las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades".

Posteriormente, este concepto se integró en el tercer principio de la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo (Cumbre de la Tierra de 1992): "El derecho al desarrollo debe ejercerse de forma tal que responda equitativamente a las necesidades de desarrollo y ambientales de las generaciones presentes y futuras". Por lo tanto, el desarrollo sostenible implica adoptar soluciones de compromiso que combinen el avance económico de la sociedad actual con la conservación medioambiental, teniendo en cuenta el futuro al mejorar las condiciones presentes. Esto implica enfocar las inversiones actuales en salud, calidad de vida y medio ambiente, con el objetivo de asegurar beneficios a largo plazo en todos los ámbitos.

La siguiente figura ilustra claramente la esencia del desarrollo sostenible, el cual debe ser equitativo (sociedad y economía), viable (economía y medio ambiente) y vivible (medio ambiente y sociedad).



Fuente: www.zonalibre.org

Figura 1-5. El Triángulo Del Desarrollo Sostenible

El desarrollo sostenible aplicado a la construcción da lugar a la construcción sostenible. Este tipo de construcción es aquella en la que se cumplen los principios económicos, ecológicos y sociales por igual, diseñando y ejecutando las obras sin dar mayor importancia a ninguno de los tres factores. La construcción sostenible se puede dividir en tantas ramas como tipos de obras a ejecutar: edificios, carreteras, puertos, etc. Por ejemplo, la edificación sostenible ofrece a la sociedad edificios que hacen frente a los problemas medioambientales actuales, partiendo de un correcto diseño y construcción. De este modo es posible disminuir las demandas energéticas de iluminación y climatización (correcta orientación y diseño bioclimático) o de agua (sistemas separativos con utilización de las aguas pluviales en los inodoros). Con los mismos principios, el drenaje sostenible aborda la gestión del agua de lluvia en las zonas urbanizadas.

1.2.2. Marco Regulatorio de las Aguas Lluvias en Chile

La gestion de las aguas lluvias urbanas en Chile se encuentra regulada principalmente por la Ley N.o 19.525 (1997), que regula los sistemas de evacuacion y drenaje de aguas lluvias y establece que el Estado debe velar por la existencia de sistemas que permitan su facil escurrimiento y disposicion, evitando danos a personas, viviendas e infraestructura urbana. Esta ley distingue dos niveles de responsabilidad institucional: la red primaria, cuya planificacion, estudio y construccion corresponde al Ministerio de Obras Publicas (MOP) a traves de la Direccion de Obras Hidraulicas (DOH), y la red secundaria, a cargo del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) y de los Servicios de Vivienda y Urbanizacion (SERVIU) respectivos.

Complementariamente, elCodigo de Aguas otorga a la Direccion General de Aguas (DGA) las atribuciones para normar, controlar y fiscalizar el aprovechamiento de los recursos hidricos, asi como la construccion de obras de drenaje y el control de cauces y riberas. En el ambito reglamentario, el Decreto Supremo N.o 50 de 2015 establece las condiciones tecnicas exigibles en el diseno, calculo, construccion y mantencion de las obras de evacuacion y drenaje de aguas lluvias, en conformidad con el articulo 295 del Codigo de Aguas.

A nivel municipal, las Direcciones de Obras Municipales (DOM) fiscalizan el cumplimiento de las disposiciones de la Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC) y su Ordenanza General (OGUC) en los proyectos de urbanizacion. Cabe senalar que la Ley N.o 19.525 no exige explicitamente el uso de sistemas de drenaje urbano sostenible ni de superficies permeables; sin embargo, no existe impedimento normativo para su implementacion, y su incorporacion resulta consistente con el objetivo general de la ley de facilitar el escurrimiento y minimizar el dano asociado a las aguas lluvias, motivo por el cual constituye una alternativa tecnica pertinente para complementar las redes primaria y secundaria en las condiciones estudiadas en este trabajo.

1.3.DRENAJE URBANO SOSTENIBLE

Dentro del movimiento global del desarrollo sostenible, se incluyen una serie de soluciones innovadoras para mejorar el drenaje urbano y evitar problemas en los sistemas de saneamiento existentes. Estas soluciones se enmarcan en varias corrientes de pensamiento, como el Desarrollo de Bajo Impacto y el Diseño Urbano Sensible al Agua. Se conocen por diversos nombres, entre ellos:

- Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).
- Buenas Prácticas Ambientales (BPAs) para el agua de lluvia.
- Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TEDUS).
- Mejores Prácticas de Control (MPC) de la escorrentía superficial.
- Técnicas alternativas de drenaje.

El drenaje urbano sostenible ayuda a resolver problemas asociados al manejo del agua de lluvia en las ciudades y puede aplicarse en carreteras, puertos, aeropuertos, y otras áreas urbanizadas que requieren sistemas de drenaje de aguas pluviales. La necesidad de aplicar principios de desarrollo sostenible al diseño del drenaje urbano se debe principalmente al aumento de superficies impermeables y a los problemas derivados de la escorrentía superficial. Por lo tanto, los sistemas de drenaje urbano actuales necesitan incorporar técnicas nuevas, resultado de la investigación y la innovación, que ayuden a resolver los problemas existentes.

El drenaje sostenible busca tratar el agua de lluvia de la forma más natural posible y maximizar su uso, evitando que se convierta en agua residual, con el objetivo de complementar y mejorar el rendimiento de los sistemas de drenaje convencionales. El desarrollo sostenible aplicado al drenaje urbano se materializa en un conjunto de medidas e instalaciones destinadas a minimizar los problemas asociados al ciclo del agua en las ciudades. Esto incluye la laminación y el control de la cantidad de agua, la mejora de su calidad mediante procesos naturales, y el servicio al ciudadano mediante la integración del agua en el paisaje urbano y la recuperación de hábitats naturales dentro de las ciudades.

1.3.1. Ventajas e Inconvenientes

Las principales ventajas del drenaje urbano sostenible incluyen:

- Protección y mejora de la calidad del agua y la biodiversidad: Ayuda a filtrar contaminantes y proporciona hábitats para diversas especies.
- Mantenimiento y restauración del flujo natural del agua: Reduce el impacto negativo del desarrollo urbano en los sistemas hídricos naturales.
- Protección de propiedades e individuos: Minimiza el riesgo de inundaciones urbanas.
- Protección contra vertidos accidentales y pérdidas económicas y ambientales: Previene daños asociados a derrames y contaminaciones.
- Permitir el desarrollo urbano en áreas con alcantarillado colapsado**: Facilita la expansión urbana sin la necesidad de ampliar los sistemas de alcantarillado convencionales.
- Enriquecimiento visual y ambiental de la ciudad: Mejora el paisaje urbano y crea espacios verdes agradables.
- Permitir la recarga de los acuíferos: Facilita la infiltración del agua de lluvia en el suelo, recargando las reservas subterráneas.
- Simplificación de la construcción del drenaje: Permite diseños más simples con superficies planas, sin la necesidad de alcantarillas ni sistemas de bombeo.

Sin embargo, el drenaje urbano sostenible presenta algunos inconvenientes que deben ser abordados:

- Desconocimiento por parte de los diseñadores: Limita la implementación desde el inicio debido a la falta de experiencia y conocimiento.
- Desconfianza frente al drenaje convencional: Puede haber resistencia a adoptar métodos nuevos y diferentes a los convencionales.
- Inexperiencia en el sector de la construcción: Dificulta la correcta ejecución de estos sistemas debido a la falta de experiencia práctica.
- Necesidad de un mantenimiento específico: Requiere prácticas de mantenimiento diferentes y más específicas que los sistemas tradicionales.
- Malas experiencias previas: Problemas iniciales y errores pueden generar desconfianza y rechazo hacia estos sistemas innovadores.

Abordar estos inconvenientes implica fomentar la capacitación y formación de diseñadores y constructores, generar confianza mediante la demostración de casos de éxito y establecer rutinas de mantenimiento adecuadas.

1.3.2. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.

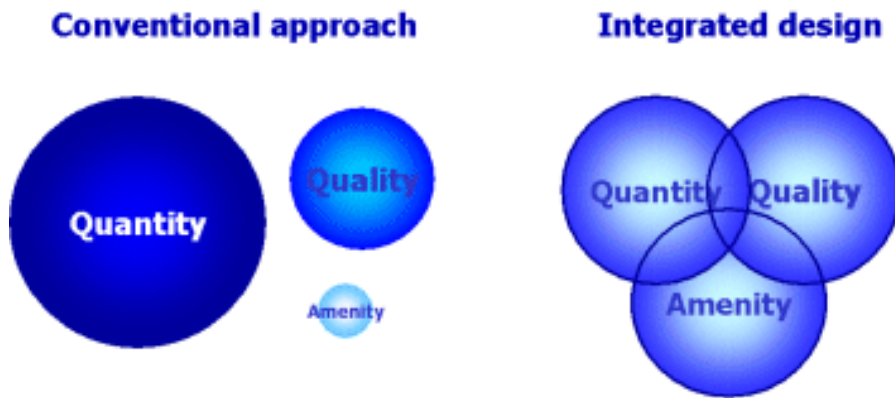
Los sistemas de drenaje urbano pueden ser desarrollados en línea con el desarrollo sostenible, equilibrando los distintos aspectos que influyen en su diseño. Los métodos de drenaje de aguas superficiales que consideran aspectos de cantidad, calidad y servicio son llamados Sistema Urbano De Drenaje Sostenible (SUDS). Estos sistemas son más eficientes que los métodos tradicionales porque:

- Gestionan los volúmenes de escorrentía superficial reduciendo el impacto de la urbanización en la generación de inundaciones.
- Protegen y mejoran la calidad del agua.
- Aportan valores estéticos y medioambientales que enriquecen a la comunidad.
- Proporcionan hábitats naturales dentro de las ciudades.
- Fomentan la recuperación de las aguas subterráneas.

En este ámbito, los SUDS aportan los siguientes valores al drenaje:

- Gestionando la escorrentía superficial desde su origen, desde que la lluvia cae.
- Evitando la generación de contaminantes potenciales ahora y en futuro.
- Protegiendo los recursos hídricos de la contaminación difusa (vertidos accidentales y otras fuentes no localizadas)
- Posibilitando el desarrollo urbano sostenible tanto en áreas donde el sistema de saneamiento existente está sobresaturado como en áreas urbanizadas con condiciones deficientes.
- Sumando a la idea de evitar inundaciones el objetivo de hacerlo manteniendo la calidad del agua y ofreciendo un paisaje urbano agradable y natural.

Como resumen de los anteriores puntos, se puede analizar el siguiente gráfico de la Figura 1-6.



Fuente: Formpave.co.uk

Figura 1-6. A la izquierda, visión convencional del drenaje, y a la derecha, visión integral del drenaje.

Los Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible actúan en conjunto formando una cadena de tratamiento completa. La cadena de gestión está compuesta de las siguientes etapas:

- a) Sistemas de control en origen (transporte o descarga)
- b) Sistemas de control local (transporte o descarga)
- c) Sistemas de control regional (descarga)

CAPÍTULO 2
MÉTODOS DE DISEÑO DE HORMIGÓN PERMEABLE EN SISTEMAS
URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE

2.1. METODOLOGÍA

Como ya se ha mencionó en la introducción de este documento, en Chile comienza a verse la necesidad de implementar manuales y recomendaciones sobre el diseño de los pavimentos permeables.

A diferencia de los pavimentos convencionales en donde el diseño depende únicamente de la resistencia a la carga aplicada o propiedades mecánicas, a los pavimentos permeables se les agregan factores hidráulicos tales como permeabilidad y relación de vacíos.

Para el diseño de los pavimentos porosos y permeables se encuentran las siguientes condiciones:

- **Transporte del agua:**

La escorrentía deberá fluir a través de los pavimentos permeables y salir de ellos de una manera segura y no erosiva. La escorrentía de las zonas adyacentes debe ser desviada a un sistema de conducción.

Las superficies del pavimento deben tener una permeabilidad de 203.2 mm/h (8 pg/h) o más para conducir el agua a la sub-base rápidamente. La pendiente del pavimento permeable deberá ser de al menos 1% pero no mayor a 5%.

La parte inferior de la sub-base será el nivel para mejorar la distribución y reducir la formación de estancamientos. Una red de tuberías perforadas puede ser utilizada para distribuir uniformemente la escorrentía en la parte inferior de la cama. Tubos perforados también se pueden utilizar para conectar las estructuras situadas dentro de la sección de pavimento permeable.

- **Paisajismo:**

Los árboles y arbustos no deben estar situados junto al asfalto y concreto, ya que puede haber daños causados por la penetración de raíces y la obstrucción de las hojas en el pavimento poroso.

Por otro lado, es necesario llegar a un balance entre el diseño estructural y el hidráulico para de esta manera obtener un sistema óptimo que presente buen comportamiento en ambos aspectos: los dos diseños arrojarán diferentes espesores y el que sea mayor será escogido como el espesor de diseño.

El diseño de cualquier pavimento permeable se basa en la premisa de que debe ser capaz de gestionar un determinado evento de precipitación, al mismo tiempo que debe aportar una función estructural. En base a esto, el diseño óptimo de un pavimento permeable debe realizarse atendiendo a dos criterios: hidrológicos e hidráulicos, y estructurales.

- Criterios estructurales: Se encargan de que el sistema ofrezca una resistencia estructural suficiente para soportar ciertas cargas de tráfico de vehículos.
- Criterios hidrológicos e hidráulicos: Definen la capacidad de gestionar las aguas de escorrentía urbana de manera eficiente, reteniendo un evento de lluvia deseado, y evacuarlo controladamente hacia el terreno subyacente o al sistema de drenaje en un tiempo entre 24 y 48 horas.

2.2. DISEÑO ESTRUCTURAL

El diseño estructural de un pavimento permeable se centra básicamente en la definición del espesor mínimo de la estructura. En este caso, los criterios de diseño deben ser aquellos que proporcionen la capacidad portante adecuada a la categoría de tráfico que deba soportar el pavimento, sin que esta sufra deformaciones importantes.

Aunque el procedimiento de diseño depende de la superficie permeable empleada, siempre se contemplan los siguientes pasos:

1. Establecer la categoría de tráfico.
2. Comprobar la calidad de la explanada para asegurar la capacidad portante de la estructura. En caso de ser necesario, mejorar la capacidad portante.
3. Seleccionar el tipo de sub-base y su espesor.
4. Seleccionar el tipo y espesor de la superficie permeable.

En cuanto a la superficie permeable, su espesor viene determinado de acuerdo con la resistencia que debe soportar durante su uso, y a la tipología de la superficie. Respecto a la base y a la sub-base, la primera consiste generalmente en una capa de grava de 13 mm

de diámetro, y suele tener un espesor de entre 25 mm y 50 mm. La segunda está formada normalmente por grava de un diámetro comprendido entre 20 mm y 75 mm, y el espesor mínimo que establecen la mayoría de los manuales y normativas para asegurar la funcionalidad del firme desde el punto de vista estructural, es de 15 centímetros. Es posible reemplazar o combinar el material granular de la sub-base mediante estructuras de plástico,

como los depósitos modulares o los conductos planos con resistencias de hasta 500 ton/m².

En el caso de que sea necesario mejorar las características estructurales del pavimento permeable, es posible reforzarlo con geo sintéticos o estabilizarlo con cemento o ligantes

La gran mayoría de normativas y manuales de diseño recomiendan varios espesores en función de la calidad de la topografía y de la categoría del tráfico que debe soportar el pavimento permeable, basados en diferentes experiencias con este tipo de pavimentos.

En Estados Unidos, EPA (1980) establece unos espesores mínimos totales (superficie y sub-base) para un pavimento permeable realizado en concreto o en asfalto, en función de tres categorías de tráfico e índices CBR (Tabla 2-2), las siguientes tablas muestran un espesor de pavimento con respecto al tipo de suelo e índices de CBR (Tabla 2-1):

La Tabla 2-1 hace referencia a las características del suelo de la zona que se desea estudiar, para con estas tener un valor aproximado del índice de CBR y poder encontrar un espesor mínimo de pavimento poroso con la Tabla 2-2:

Tabla 2-1: Categorías de la resistencia del suelo (Adaptado de: EPA, 1980)

	Descripción del suelo	Resistencia - CBR
Excelente	Contiene un alto porcentaje uniforme de materiales granulares. Las clases unificadas del suelo (USC): GW, GM, GC, GP; algunos SM, SP y SC. Grupos de Suelos AASHTO: A-1, A-2 y algunos de los A-3	15 o más
Bueno	Contiene algunos materiales granulares mezclados con limo y / o arcilla. Las clases unificadas del suelo (USC): SM, SP, SC: algunos ML, CL, CH. Grupos de Suelos AASHTO: A-2, A-3, algunos A-4, y unos pocos A-6 o A-7	10-14
Razonable	Arenas arcillosas, limos arenosos, o arcillas limosas, pueden tener cierta plasticidad. USC: ML, CL, algunos MH, CH. AASHTO: Que van desde la A-4 a A-7 (bajos índices de grupo)	6-9
Pobre	Arcillas plásticas, limos finos, arcillas limosas finas o micaceas. USC: MH, CH, OL, OH. AASHTO: desde A-4 a A- 7 (los índices más altos de grupo)	5 o menos

Tabla 2-2: Mínimos espesores de un pavimento permeable para varias condiciones de tráfico.

Nota: los espesores dados en la tabla están en milímetros (Adaptado de: EPA, 1980)

Categoría de tráfico	Descripción	EAL1	CBR		
			≥ 15	10 - 14	6 - 9
1	Tráfico ligero	≥ 5	127	178	229
2	Tráfico ligero-medio (máx. 1000 vpd2)	6 - 20	152	203	279
3	Tráfico medio (máx. 3000 vpd)	21 - 75	178	229	305
1 EAL (equivalent axial load) Equivalencia de cargas por eje: la AASHTO-93 establece que se deben transformar los diferentes ejes que circulan por una ruta a un eje simple doble de 80 kN (18 Kips) de peso, considerado como eje patrón, referido al carril de diseño. 2 Vehículos por día.					

En Chile, MINVU (1996) propone los siguientes espesores mínimos para pavimentos porosos en asfalto o concreto de acuerdo con la experiencia del Servicio de Vivienda y Urbanismo (Tabla 2-3):

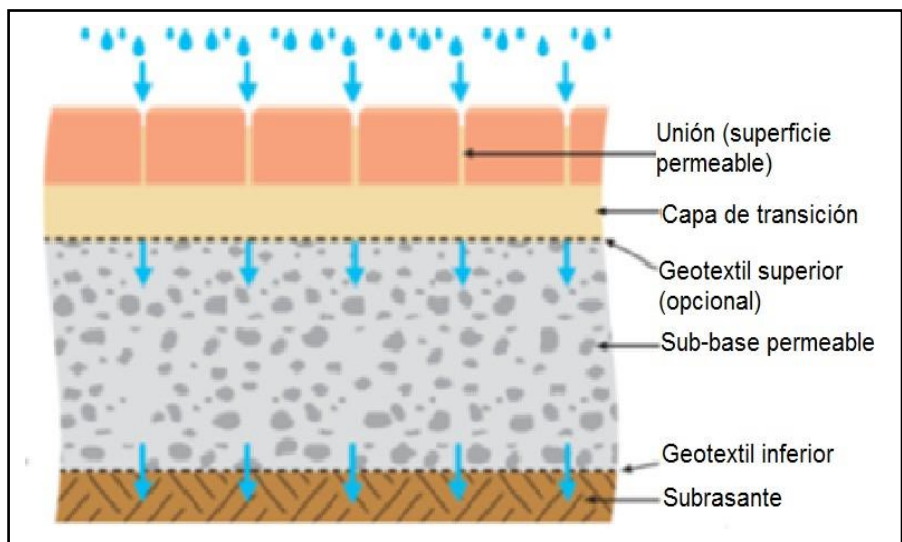
Tabla 2-3: Espesores mínimos de las capas de un pavimento permeable (adaptado de: MINVU, 1996)

Capa	Espesor mínimo (cm)
Superficie: Acera/Andén	4
Superficie: Calles de bajo tráfico	5
Base	15
Sub-base granular	15

Por otro lado, Interpave (2008) recomienda en el caso de pavimentos de adoquines, un espesor de superficie fijo de 130 mm, y un espesor de sub-base variable, en función del índice CBR, según el destino de las aguas filtradas y considerando seis categorías de tráfico.

En los casos de infiltración completa y parcial al terreno subyacente, y un $CBR \geq 5$ en el terreno, el espesor de la sub-base recomendado está comprendido entre 250 mm y 450 mm, mientras que los sistemas sin infiltración al terreno subyacente y con un $CBR \geq 5$, el espesor varía entre 400 mm y 600 mm.

Por otro lado, para los pavimentos permeables en adoquín, se utilizan las siguientes configuraciones basándose en la categoría de cargas donde se piensa ubicar el pavimento (Tabla 2-4).



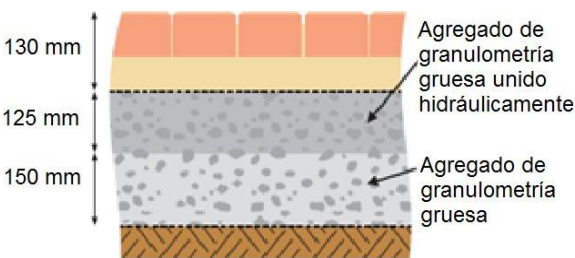
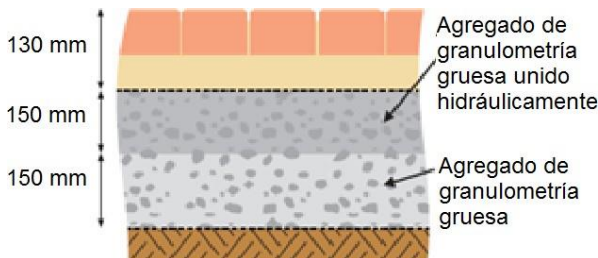
Fuente: Adaptado de Interpave, 2008.

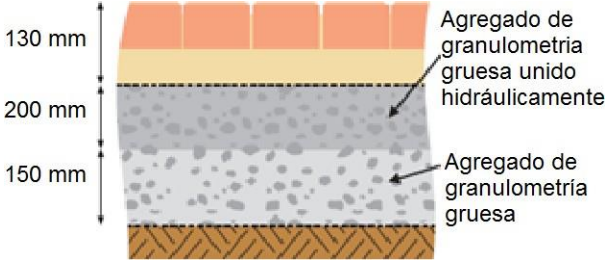
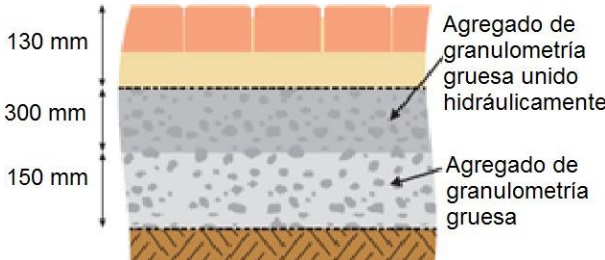
Figura 2-1. Convenciones de la estructura de pavimento poroso.

Para entender mejor la Tabla 2-4, deben tenerse en cuenta las convenciones mostradas en la figura 2-1. Por otro lado, cuando se hace referencia al agregado unido hidráulicamente, quiere decir que son materiales que se fijan y endurecen con la adición de agua.

Tabla 2-4: Diseño de pavimentos permeables de acuerdo con las categorías de carga.
msa: millones de ejes estándar (Adaptado de: Interpave, 2008).

CATEGORÍA DE CARGA 1	
Parqueadero doméstico: No se permiten vehículos pesados (de transporte de mercancías) Cero ejes estándar Patio Caminos privados Elemento decorativo Parque cerrado Aceras sin invasión de vehículos	
CATEGORÍA DE CARGA 2	
Carros: Emergencias (Solo vehículos pesados) 100 ejes estándar Bahías y pasillos de aparcamiento Plataformas de carga de una estación del ferrocarril Exposición externa de carros Estadio deportivo - Ruta peatonal Aceras ocasionalmente invadida por vehículos Calles privadas /cruces	

CATEGORÍA DE CARGA 3	
Peatonal: Un vehículo pesado por semana 0.015 msa³ Calles peatonales en ciudades y pueblos Accesos infantiles Zona de aparcamiento para un desarrollo residencial Jardines - Áreas externas Cementerios - Crematorios Parqueadero de hoteles Parqueaderos de aeropuertos sin paradas o recogida de buses Centro Deportivo	
CATEGORÍA DE CARGA 4	
Tiendas: Diez vehículos pesados por semana 0.15 msa Vía de acceso de entrega en desarrollos comerciales Calles de acceso a escuelas y colegios Vía de entregas a oficinas Entregas a desarrollos residenciales pequeños Vías de entrega a jardines o huertos Patio de estación de bomberos Parqueadero de aeropuertos con buses hacia el terminal Ruta de acceso a estadios deportivos	

CATEGORÍA DE CARGA 5	
Comercial: 100 vehículos pesados por semana 1.5 msa Locales comerciales Vía pública de tráfico ligero Desarrollo ligero de industrias Mixtos al por menor / Desarrollos industriales Plaza de la ciudad Aceras con invasión regular de vehículos Carreteras públicas de aeropuertos	
CATEGORÍA DE CARGA 6	
Tráfico Pesado: 1000 vehículos pesados por semana 15 msa Calles principales Centros de distribución Estación de buses (buses cada 5 minutos) Autopistas Paradas de camiones Parada de buses Glorietas Carriles de buses	
3 msa (millones de ejes estándar): debe recordarse que el tránsito del proyecto se presenta en millones de ejes estándar de 8.2 toneladas métricas por eje sencillo (80 kN) de acuerdo con las unidades utilizadas a nivel internacional (Corro & Prado, 1999).	

Fuente: Elaboración propia.

2.3. DISEÑO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

El diseño hidrológico e hidráulico de pavimentos permeables debe tener en cuenta cuatro aspectos:

- Estimar las características de percolación de la capa de pavimento.
- Determinar el volumen de almacenamiento (proporcionado por los poros de la sub-base) para alcanzar tasas de rendimiento adecuadas.
- Estimar la necesidad y en su caso cuantificar la capacidad del drenaje longitudinal adicional.
- Gestionar la respuesta del pavimento ante eventos extremos de precipitación.

Posteriormente se definen y desarrollan los parámetros anteriormente mostrados, destacando el volumen de almacenamiento y la capacidad del drenaje longitudinal, ya que son los aspectos para el desarrollo básico del cálculo y diseño de los pavimentos permeables.

a) Estimar las características de percolación de la capa de pavimento:

La capacidad de percolación de la capa del pavimento debe ser significativamente mayor que la máxima intensidad de la lluvia de cálculo. Regularmente no suele ser un factor limitante en el diseño, pues suele ser al menos un orden de magnitud superior a las máximas intensidades de lluvia esperadas.

Por ejemplo, valores típicos de percolación a través de la capa de un pavimento de concreto poroso, pueden encontrarse entre 0,5 y 5 cm/s (Aguado, Josa, & Pindado, 1995). Hay que tener en cuenta que la capacidad de percolación no se mantendrá constante en el tiempo, sino que disminuirá progresivamente hasta que se estabilice. Este fenómeno es debido a la colmatación, por lo que deberá tenerse en cuenta un factor de seguridad sobre la capacidad de percolación. A la hora de definir el factor de seguridad, no existe un criterio unificado sobre qué valor emplear, y en qué condiciones, pues este debería determinarse en función del clima y la topografía de la zona de aplicación, y del mantenimiento de la infraestructura.

Actualmente pueden encontrarse en la literatura algunos factores de seguridad recomendados por diferentes autores, como Woods-Ballard et al., 2007, quienes recomiendan un factor de seguridad de 10. Por su parte, Rodríguez Hernández, 2008, cita que el factor de seguridad debe ser como mínimo del orden de 10, pudiendo considerarse órdenes mayores como 100 o incluso 1.000 al disminuir el tiempo que debe haber entre un proceso de mantenimiento y otro. En Chile, MINVU (1996) emplea un factor de seguridad en función de las propiedades del agua y las condiciones de mantenimiento, y recomienda calcularlo según el procedimiento de la Figura 2-2.

b) Volumen de almacenamiento:

La capacidad de almacenamiento en el pavimento depende directamente de las características del régimen de precipitación, de la capacidad de infiltración al terreno subyacente, de la capacidad del drenaje complementario (si existe) y del área drenada al propio pavimento. Además, está directamente relacionada con el espesor de cada una de las capas del pavimento y sus respectivos índices de poros.

Existen varios métodos y criterios que sirven para determinar el volumen de almacenamiento y dimensionar la estructura. En Estados Unidos, la mayoría de las normativas emplean el denominado “Criterio Unificado de Diseño”, basado en el volumen que es necesario gestionar para cumplir unos determinados objetivos o niveles relacionados con la cantidad y calidad del agua. Los objetivos o niveles que establece el estado de Georgia (A.R.C, 2001), son:

- Protección frente a avenidas extremas.
- Protección de llanuras.
- Protección de cauces.
- Calidad del agua.

Otro criterio de diseño es el que propone el U.S.EPA (2008), el cual tiene en cuenta la recarga de acuíferos y la reducción de escorrentía:

- Protección de avenidas.
- Protección de llanuras (pequeñas tormentas).
- Protección frente a avenidas extremas (grandes tormentas).
- Protección de cauces
- Calidad del agua.
- Recarga de acuíferos y/o reducción de escorrentía.

2.3.1. Metodología Chile

La metodología Chile fue desarrollada inicialmente por la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas -DICTUC- (1996). La aplicación de la presente metodología inicia con la selección de una lluvia de diseño. Una vez obtenida esta, el volumen de almacenamiento se estima como la máxima diferencia entre el volumen acumulado de aguas lluvias que reciben la sub-base y el volumen acumulado infiltrado.

Se recomienda determinar el volumen a infiltrar acumulado para una lluvia de período de retorno de T años como el generado por las intensidades medias, de acuerdo con la curva IDF correspondiente. Es decir, el volumen acumulado de agua lluvia, V_{afl} , en metros cúbicos, para un tiempo d, en horas, se calcula como:

$$V_{afl}(d) = 1.25(0.001C \cdot I_d \cdot Ad) = 0.00125C \cdot A \cdot P^T_d$$

Ecuación 1

Donde:

- C: coeficiente de escorrentía superficial correspondiente al área total aportante
- A: área total aportante (metros cuadrados)
- I_d : intensidad de la lluvia de período de retorno T y duración d (mm/h)
- d: tiempo acumulado de lluvia (horas)
- P^T_d : precipitación acumulada en el tiempo d para la lluvia de periodo de retorno de T años

Se recomienda multiplicar por un factor de seguridad de 1.25 el volumen acumulado para considerar la porción de lluvia que cae antes y después de la porción más intensa de la tormenta, no incluida en las curvas IDF.

Para calcular el volumen de almacenamiento, V_{alm} del pavimento poroso rígido se estima el volumen acumulado que puede ser drenado, utilizando la tasa de infiltración estimada en función del tiempo. Se puede determinar gráficamente como la máxima diferencia entre el volumen afluente acumulado de agua lluvia o volumen de recarga $V_{afl}(d)$ y el volumen acumulado infiltrado $V_{inf}(d)$, ambos en función del tiempo. Este último, en metros cúbicos, está dado por:

$$V_{inf}(d) = 0.001(f \cdot C_s \cdot A_{pav} \cdot d)$$

Ecuación 2

Donde:

f: capacidad de infiltración del suelo, que corresponde al suelo que subyace al pavimento (mm/h)

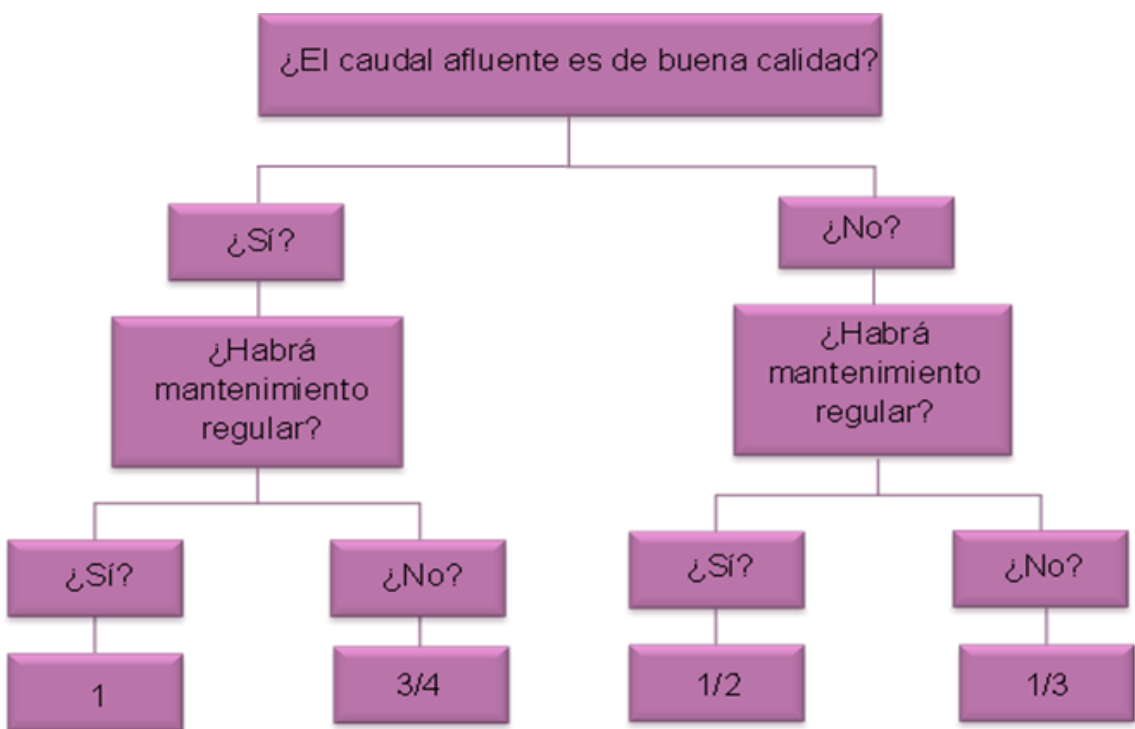
A_{pav} : área del pavimento poroso (m²)

d: tiempo acumulado de lluvia (h)

C_s : coeficiente de seguridad que afecta la capacidad de infiltración dependiendo de las propiedades del agua y las condiciones de mantenimiento que toma en cuenta los efectos de la colmatación en el

tiempo que experimenta el suelo.

Se recomienda calcular el coeficiente C_s según el siguiente procedimiento:



Fuente: Dirección de investigaciones científicas y tecnológicas -DICTUC-, 1996

Figura 2-2 Metodología para el cálculo del C_s de acuerdo con el mantenimiento y a la calidad del afluente.

El volumen de almacenamiento necesario se calcula como:

$$V_{alm} = \max (V_{afl}(d) - V_{inf}(d)) \quad \text{Ecuación 3}$$

Si la tasa de infiltración del terreno es siempre mayor que la intensidad de la lluvia, incluso que la de menor duración, entonces no se requiere un volumen de acumulación en la sub-base, sino que bastará con la superficie de contacto con la sub-rasante para la infiltración.

El espesor necesario de la sub-base es:

$$e = \frac{V_{alm}}{(\eta \cdot A_{pav})} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde η es la porosidad del material de la sub-base.

Se recomienda que el tiempo máximo de vaciado del volumen almacenado en la sub-base sea inferior a 48 horas. Este tiempo máximo (en horas) se puede estimar como:

$$t_m = \frac{\eta \cdot e}{C_s f} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- e: espesor definitivo asignado a la sub-base (mm)
- f: tasa de infiltración del suelo o de la sub-rasante (mm/h)
- C_s: coeficiente de seguridad adoptado
- η: porosidad del relleno de la sub-base

2.3.2. Determinación del caudal de salida (Q_s)

Si hay infiltración en el lugar, el caudal de salida es igual al producto de la superficie de contacto entre la calzada y la capacidad de absorción del suelo q_{as}. Un posible bloqueo puede ser tomado en cuenta mediante la introducción de un coeficiente de seguridad.

El caudal de salida Q_s se calcula como:

$$Q_s = C_s \cdot f \cdot A_{pav} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- C_s : Coeficiente de seguridad (puede ser tomado como 0.1)
- f : Capacidad de absorción por unidad de superficie de infiltración en $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$
- A_{pav} : La superficie de infiltración en la vía en m^2

Es importante resaltar que cuando se habla de un flujo constante, se entiende que esto es sólo una aproximación.

2.3.3. Determinación de la superficie activa (S_a)

En el cálculo de la superficie activa S_a se tiene en cuenta las superficies involucradas en la escorrentía y que son drenadas por la estructura de pavimento, así como la estructura de almacenamiento que se está diseñando.

La superficie activa S_a se calcula como:

$$S_a = C \cdot A \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- C : Coeficiente de aporte
- A : Área total de la cuenca de drenaje (m^2)

Según Azzout et al. (1994) una de las dificultades de utilizar los métodos simplificados radica en la determinación del coeficiente de aporte C . Este es el coeficiente que se utiliza para tomar en cuenta únicamente la fracción de la lluvia que llega efectivamente a la salida de la cuenca considerada. Cuando en la alimentación de las cuencas hidrográficas la retención es altamente urbanizada, se puede asumir C como el coeficiente de impermeabilización (proporción de superficies impermeables que contribuyen a la escorrentía en toda la superficie de la cuenca). Pero cuando la cuenca es heterogénea y contiene áreas naturales, su estimación se dificulta: C en este caso difiere en gran medida del coeficiente de impermeabilización. La relación C es variable en función del tipo de suelo, del estado de humedad del suelo al comienzo de la lluvia. La literatura ofrece

valores típicos promedio de estos coeficientes basados en los tipos de suelo (densidad tipo de espacio de vivienda, tipo de cubierta vegetal, etc.). El coeficiente ponderado se puede calcular de la siguiente forma:

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \cdot A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Donde A_i es el área de un tipo de superficie y C_i su coeficiente respectivo (0.15 para hormigón permeable).

2.4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA PAVIMENTACION EN HORMIGON POROSO

Tabla 2-5: Cartilla pavimentos permeables hormigón (24/01/2006)

Tipo de vía	Capa	Característica	CBR subrasante				
			<4	4-7	8-12	13-20	>20
PASAJE 50.000 EE	Losa	Rmf= 2,8 [MPa]	200	190	190	180	170
	Base	CBR >= 60%	300	150	150	150	150
LOCAL 200.000 EE	Losa	Rmf = 2,8 [MPa]	220	220	210	210	200
	Base	CBR >= 60%	300	150	150	150	150

Las siguientes Especificaciones Técnicas Generales forman parte del capítulo II.B, como Anexo B, del Manual de Pavimentación y Aguas Lluvias.

Las obras deberán ejecutarse de acuerdo con las presentes especificaciones y a los planos correspondientes, además en cuanto no se opongan a éstas, deberá cumplirse con las Normas I.N.N.

2.4.1. Pavimentos porosos

- **CONDICIONES AMBIENTALES**

No se permite la ejecución de pavimento durante lluvia, ni con temperaturas ambientales inferiores a 5° C ni superior a 30° C, en el hormigón.

- **PREPARACION DE LA BASE ESTABILIZADA**

Previo a la colocación del hormigón, la base estabilizada se humedecerá superficialmente con agua, evitando la formación de charcos.

- **DIMENSIONES**

El pavimento tendrá una carpeta de rodado conformada por una losa de hormigón del espesor y ancho indicados en la memoria y en los planos. Tendrá juntas transversales a una separación máxima de 3,5 m.

- **MOLDES**

El hormigón al momento de colocación deberá quedar restringido lateralmente, ya sea por soleras, por la pared lateral de un pavimento existente o moldes metálicos previamente cubiertos con desmoldante. Serán de una pieza, con un espesor mínimo de 6 mm., altura igual al espesor de la losa de hormigón, una longitud determinada por la I.T.O. y de sección transversal que muestre en su parte central una saliente en forma trapezoidal.

Longitudinalmente los moldes deberán ser rectos, sin curvaturas, deflexiones ni abolladuras u otros defectos, sin embargo, para curvas con radios menores a 30 m. podrán usarse moldes flexibles horizontalmente o moldes curvos del radio adecuado. Adicionalmente el contratista mantendrá en obra la cantidad de moldes adecuada de acuerdo con el avance de ésta y deberá asegurar entre moldes la linealidad general, perfecto afianzamiento entre moldes y base y, entre moldes, así como la estanqueidad y limpieza sucesiva de estos luego de cada uso.

En el caso de que alguna de las caras de la calzada vaya a quedar restringida, al momento de vaciar el hormigón, por soleras, éstas se pintarán con desmoldante en la zona en contacto con la calzada, a fin de evitar la adherencia entre ambos y posterior agrietamiento transversal de las soleras por efecto de las retracciones experimentadas por la calzada.

- HORMIGON

El hormigón por colocar será dosificado y mezclado en planta premezcladora, y su transporte deberá realizarse en camiones mezcladores convenientemente equipados para conservar las características de la mezcla hasta el lugar de su colocación, por lo que se recomienda que el giro del tambor se fije en el mínimo de revoluciones posibles.

Dosificación:

La mezcla se preparará usando los materiales indicados en el punto 3.5, y deberá cumplir con 3 aspectos básicos:

- La dosis de cemento mínima será de 340 Kg.cem/m³ y la máxima de 370 Kg.cem/m³ de hormigón elaborado
- La razón agua cemento deberá estar comprendida entre 0,35 y 0,38
- La granulometría de los áridos a utilizar deberá ser tal que permita un porcentaje de vacíos en la mezcla deberá estar comprendido entre 15 y 25%

Colocación:

El hormigón se depositará sobre la base en su ubicación definitiva, evitando la segregación y se esparcirá uniformemente de preferencia con cercha vibradora fijada en su mínima frecuencia, apoyada sobre listones de ¾" situados sobre los moldajes que deberán ser de dimensiones adecuadas para dar el espesor de diseño, con lo que se genera un sobre espesor de mezcla para luego dar paso a la compactación.

Compactación:

Inmediatamente después de extendida la mezcla y removidos los listones situados por sobre los moldajes, se debe utilizar un rodillo pesado de fierro que proporcione una presión cercana a los 0,7 kg/cm², de ancho igual o superior al ancho de la losa para compactar la mezcla a la altura de los moldajes.

Terminación:

No se deberán realizar labores de terminación superficial, ya que esto va en desmedro de la característica permeable del pavimento, no obstante, se deberán corregir manualmente los defectos superficiales que se pudieren presentar, lo que se debe realizar sólo cuando la mezcla se encuentra en estado fresco.

Curado:

El curado del hormigón se efectuará inmediatamente a continuación de la etapa anterior, el que consistirá en la cobertura total la superficie y sus costados con polietileno de alta densidad (de color claro, nunca negro), el que deberá permanecer por al menos 7 días en los cuales se deberá cuidar que éste no sufra daños para evitar toda posibilidad de un incorrecto proceso de curado.

- JUNTAS

El corte de las juntas deberá realizarse inmediatamente a continuación del proceso de compactación, y el espaciamiento entre ellas deberá ser como máximo de 3,5 m, y la profundidad de corte será de $\frac{1}{4}$ del espesor de la losa. Se usará disco de corte de espesor tal que el corte tenga un ancho de no más de 2mm.

Se deberá evaluar la aplicabilidad de los medios tradicionales de corte, discos diamantados girado a grandes revoluciones, ya que, dependiendo de las características de la mezcla, este proceso le puede producir daños, tal como el desprendimiento de los áridos, en cuyo caso se recomienda adaptar una hoja filosa a u rodillo liviano de pequeñas dimensiones.

En pavimentos de hormigón poroso NO se requieren juntas de dilatación.

- RESISTENCIAS

La resistencia media a 28 días medida a flexotracción será la del proyecto, considerando un mínimo de 28 Kg/cm², que para efectos del diseño de la dosificación respectiva ha de considerarse la resistencia característica con un 20 % de fracción defectuosa y un coeficiente de variación mínimo de 10 % para hormigones preparados en plantas que cumplan la NCh 170 Of. 85.

- CONTROLES

Dicha exigencia deberá cumplirse mediante certificados otorgados por laboratorios autorizados.

La superficie terminada del nuevo pavimento deberá estar conforme con los perfiles y secciones transversales existentes, adicionalmente, no deberá acusar en todo su desarrollo,

puntos altos o bajos que excedan 4 mm. cuando se coloque sobre ella, una regla de 3 m. paralela y transversal al eje del camino.

Deberán ejecutarse en forma obligatoria la extracción de testigos para determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla y el peso unitario, la determinación de espesor de pavimento y la evaluación de la resistencia.

Además, se deberán confeccionar probetas prismáticas de 15x13x55 cm, para la evaluación de la resistencia a la flexotracción, las cuales será llenadas en obra y compactadas en 2 capas, con 15 golpes cada una.

a) Cantidades.

Extracción y ensayo de testigos, elaboración y ensayo de probetas: cada 1.000 m² de calzada o menos.

Una obra deberá contar como mínimo con dos extracciones y ensayo de testigos, 2 elaboraciones y ensayo de probetas, salvo que la obra tenga una superficie de pavimento inferior a 100 m², en cuyo caso, se efectuará una extracción de testigos y su ensayo de probeta.

b) Determinación del porcentaje de vacíos de la mezcla colocada en terreno.

Se realizará por medio de la evaluación de los testigos extraídos, determinando los pesos del testigo en condición saturada superficialmente seca, el peso sumergido y el volumen, con lo que, aplicando la expresión siguiente, se obtiene el porcentaje de vacíos:

$$\% \text{Vacíos} = \left(1 - \frac{m_{ss} - m_{sum}}{V} \right)$$

Con

M_{ss} = masa del testigo en condición saturada superficialmente seca.

M_{sum} = masa del testigo sumergido en agua (a 4°C) en condición saturada superficialmente seca.

2.4.2. Comportamiento y diseño de los pavimentos permeables

Comportamiento Mecánico y Estructural:

El comportamiento mecánico del hormigón poroso difiere significativamente del hormigón convencional debido a su estructura de poros abiertos. La ausencia de finos en la mezcla reduce la superficie de contacto entre los agregados, lo que implica que la transferencia de cargas depende exclusivamente de los puntos de unión de la pasta de cemento.

- Resistencia a la Compresión: Generalmente oscila entre 3.5 MPa y 28 MPa, dependiendo de la porosidad. Se establece una relación inversamente proporcional: a mayor contenido de vacíos para optimizar la permeabilidad, menor es la capacidad de soporte estructural.
- Módulo de Elasticidad: Debido a su naturaleza discontinua, presenta un módulo elástico inferior, lo que lo hace más susceptible a deformaciones bajo cargas cíclicas pesadas, limitando su uso a zonas de tráfico ligero o moderado.

Comportamiento Hidráulico:

La principal función del sistema es su capacidad de gestión hídrica. El comportamiento hidráulico se rige por la Ley de Darcy para flujo laminar, aunque en eventos de lluvia extrema el régimen puede volverse turbulento dentro de la matriz de poros.

- Permeabilidad (Conductividad Hidráulica): Los valores típicos de diseño varían entre 2 mm/s y 12 mm/s. Una tasa de infiltración optimizada debe ser capaz de procesar no solo la precipitación directa, sino también la escorrentía aportada por áreas adyacentes no permeables.
- Capacidad de Almacenamiento: El sistema funciona como un reservorio temporal. El diseño debe garantizar que el aire atrapado en los poros sea evacuado eficientemente para permitir el ingreso del agua, evitando el fenómeno de "bloqueo por aire".

CAPÍTULO 3
OPTIMIZACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE
SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y ALMACENAMIENTO

3.4.1. GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES

3.1.1. Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es el proceso que describe la ubicación y el movimiento o transferencia de agua en el planeta, entre sus diferentes estados (sólido, líquido y gaseoso). El agua de los océanos, de los ríos, de los lagos, de la zona superficial de los suelos y de la transpiración de las plantas se evapora por acción de la radiación solar. El vapor de agua se eleva y cuando se condensa da origen a las nubes que, bajo ciertas condiciones de presión y temperatura, precipita sobre la superficie del suelo.

En el ciclo hidrológico natural una fracción de la precipitación caída se almacena en la superficie, mientras el resto es interceptado por la vegetación. El agua almacenada se infiltra en el suelo, saturándolo para posteriormente producir escorrentía superficial. Por otra parte, en el ciclo hidrológico urbano no existe una cubierta vegetal de intercepción y el suelo es prácticamente impermeable, por ende, se produce menos infiltración. El agua pluvial purifica el aire, limpia tejados y pavimentos, arrastrando una carga contaminante importante de sólidos en suspensión, materia orgánica, metales pesados e hidrocarburos, para alcanzar en un corto periodo de tiempo los sistemas de colectores.

En una zona natural sin urbanizar, se estima que un 95% del agua que se gestiona se infiltra en el suelo y sólo un 5% produce escorrentía. En un entorno de baja urbanización, como pueden ser zonas rurales y residenciales fuera de los núcleos de las ciudades, el valor de infiltración disminuye hasta un 30%, con lo que se genera una escorrentía del 70%. Por último, en una zona urbana de gran densidad, prácticamente la cantidad de infiltración es despreciable, generando un 95% de escorrentía superficial que será necesario drenar y gestionar para lograr un entorno óptimo de habitabilidad.

3.2.EFECTOS DE LA EXPANSIÓN URBANA EN LAS AGUAS PLUVIALES

3.2.1. Desventajas

Señalan que el crecimiento urbano y los problemas generados por el agua de lluvia en las ciudades han perjudicado de modo significativo las condiciones naturales y el ciclo hidrológico de las mismas. Lo anterior puede ser motivados por tres factores fundamentales: problemas de calidad, problemas de cantidad y problemas de servicio.

1.1.Problemas de cantidad:

El aumento de las superficies impermeables, la variación de los cauces naturales y los cambios en la topografía del terreno ayudan a disminuir la capacidad infiltrante del suelo y los niveles de agua en las napas subterráneas, así como a aumentar los caudales máximos y la cantidad de agua descargada a los sistemas naturales de drenaje. Todo esto produce aumentos en la frecuencia y la fuerza de las inundaciones en aquellos puntos más bajos de la ciudad, lo que puede ocasionar serios daños en la infraestructura urbana. Problema que en algunos países desarrollados ocurre a pequeña escala, y un tipo de fenómeno muy frecuente en las grandes urbanizaciones

2.1.Problemas de calidad:

Las actividades urbanas originan una gran variedad de contaminantes y son la principal causa de la contaminación en la escorrentía urbana producida en tiempo de lluvia. Existen una serie de contaminantes provenientes de diferentes superficies urbanas (techos, patios, calles, veredas, jardines, estacionamientos y otros). Las escorrentías provenientes de calles y techos colaboran con un 50% al 80% del total de los contaminantes presentes en las aguas residuales domésticas. Estudios señalan que el impacto en el medio receptor producto de las escorrentías urbanas se traduce en problemas derivados de:

- El descenso de la concentración de oxígeno disuelto (puede provocar la mortandad de peces y la reducción de la oxidación natural de elementos tóxicos).
- El incremento de las concentraciones de nutrientes (con el consiguiente riesgo de eutrofización).
- La contaminación por agentes patógenos (puede derivar en problemas de salud pública, por ejemplo, en aguas de baño).
- La acumulación de elementos tóxicos (que puede tener consecuencias en la cadena trófica, etc.).

3.1.Problemas de servicio:

La disminución de áreas verdes y espacios abiertos en pro de nuevas zonas urbanas, alteran de forma importante el ciclo natural del agua. Lo anterior, influye negativamente en la calidad del espacio urbano y en el servicio ofrecido por la ciudad a la sociedad, afectando incluso a la estética en el entorno. Por ende, este tipo de problemas posee un marcado carácter social.

Las acumulaciones superficiales de agua en aceras y calles causan problemas de comodidad y seguridad para el tráfico, tanto de peatones como de vehículos, pudiendo producirse resbalones, una disminución del coeficiente de resistencia al deslizamiento, salpicaduras, pérdidas de visibilidad, pérdida de la capacidad natural del terreno para suavizar la temperatura ambiente, etc. Pero el mayor problema de servicio asociado al agua de lluvia en las ciudades es la rápida pérdida de valor que sufre esta escorrentía sin haber sido aprovechada en algún uso no potable. El agua de lluvia, a pesar de ofrecer una calidad adecuada para multitud de usos, se utiliza únicamente como medio de dilución de aguas residuales, incrementando el volumen de agua a depurar y por tanto las dimensiones de las instalaciones.

3.2.2. Ventajas

- Por su función permeable en los pavimentos, no interrumpe el Ciclo Hidráulico del Agua en las ciudades, permitiendo inyectar agua pluvial a los mantos acuíferos.
- Control de la contaminación de las aguas pluviales, impidiendo que ésta se vaya por el drenaje y se mezcle con aguas negras.
- Filtra los agentes contaminadores que pueden contaminar las aguas subterráneas y dañar ecosistemas.

- Eliminación o reducción de las dimensiones de las alcantarillas de aguas pluviales.
- Control del escurrimiento de aguas pluviales.
- Por utilizar un sistema de bases con material pétreo no existen deformaciones o baches.
- Por ser un material poroso es autodrenante y autoventilado.
- Por ser una estructura con el 15% al 35% de vacíos, no genera islas de calor como el asfalto y el concreto hidráulico.
- Creación de un impulso adicional de elevación a los aviones durante el despegue por el efecto de enfriamiento.
- Evita encharcamientos y ayuda a evitar saturación en los drenajes en época de lluvias.
- Disminuye las distancias de frenado de los vehículos, especialmente en condiciones de lluvia, evita el acuaplaneo.
- Mayores facilidades para estacionamientos al eliminar la necesidad de áreas de contención de agua.
- Por no retener agua en su superficie existe baja probabilidad de deslumbramiento por reflexión de la luz sobre película de agua superficial, particularmente por la noche cuando están mojadas.
- Reducción del ruido de interacción entre la llanta y el pavimento.
- Disminuye los gradientes térmicos y de humedad (reflexión mínima de la luz).
- Posibilidad de que el aire y el agua alcancen las raíces de los árboles, aún con el pavimento dentro del canal para riego de los árboles.
- Aumenta la calidad de servicios para usuarios vehicular y peatonal, durante la lluvia, disminuyendo los riesgos de accidentes.
- Por ser un material granular, sin arena, las cargas transmitidas al pavimento se descomponen y distribuyen en forma heterogénea debido a la existencia de puntos de contacto aleatorios. Por ello la carga que llega al terreno es repartida en un área mucho mayor a la que resulta en el caso de los pavimentos con bases tradicionales.
- No es más caro que otros pavimentos de concreto y compite con el asfalto.
- Es compatible con otros materiales usados para pavimentos con el fin de que se logren superficies permeables al combinarlo con estos pisos.
- No requiere de mano de obra especializada, ni de maquinaria sofisticada para su instalación.
- Se puede hacer en varios colores y con distintos tipos de piedra.
- Su base y sistema constructivo es más barato que los tradicionales por lo que el costo final no es más caro que otros pavimentos.
- Se puede fabricar directamente en obra mediante el uso de trompos o revolvedoras para concreto o se contrata la mezcla en plantas de premezclados de concreto.

- Por no utilizar acero de refuerzo ni arena, su peso volumétrico es un 20% a 25% más ligero que el concreto convencional.
- El índice de fisuras en el concreto permeable es 25% menor, debido a la baja retracción por el índice de vacíos contenidos en comparación a un concreto convencional.
- No lo afectan agentes externos como: hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos aromáticos, solventes clorados, metil isobutil cetona, acetato de etilo, isoforona, alcoholes, aceites vegetales, aceites minerales. Es resistente a los rayos UV, a la salinidad y a los álcalis.
- Su resistencia a la flexión es mejor que la del concreto hidráulico, por ello los espesores de los pisos permeables pueden ser mucho menores, con la consiguiente reducción en los costos.

CAPÍTULO 4
APLICACIÓN PRÁCTICA: DISEÑO ILUSTRATIVO DE UN PAVIMENTO DE
HORMIGÓN PERMEABLE

4.1. Definición del caso de estudio

Con el objeto de validar la metodología descrita en el Capítulo 2, se desarrolla a continuación el dimensionamiento de un pavimento de hormigón aplicado a un estacionamiento de uso residencial, categoría 1 según la clasificación de Interpave (2008). Se adoptan los siguientes parámetros de diseño:

- Área total aportante, $A = 500 \text{ m}^2$.
- Coeficiente de escorrentía del hormigón permeable, $C = 0,15$.
- Intensidad de la lluvia de diseño para un período de retorno $T = 10$ años y duración $d = 1 \text{ h}$, $I_d = 25 \text{ mm/h}$ (valor ilustrativo; debe sustituirse por la curva IDF de la estación pluviométrica de la comuna del proyecto).
- Capacidad de infiltración del suelo subyacente, $f = 10 \text{ mm/h}$ (suelo tipo limo-arenoso; valor ilustrativo, debe verificarse mediante ensayo de infiltración in situ).
- Coeficiente de seguridad por colmatación, $C_s = 10$ (valor mínimo recomendado por Woods-Ballard et al., 2007).
- Porosidad de la sub-base granular, $\eta = 0,35$.

4.2. Diseño hidrológico-hidráulico

Aplicando la Ecuación 1 sobre el volumen afluente acumulado:

$$Vafl(d) = 1,25 \times 0,001 \times C \times I_d \times A \times d$$

$$Vafl(1 \text{ h}) = 1,25 \times 0,001 \times 0,15 \times 25 \times 500 \times 1 = 2,34 \text{ m}^3$$

El volumen infiltrado acumulado se obtiene de la Ecuación 2, considerando que el coeficiente de seguridad C_s reduce la capacidad efectiva de infiltración por efecto de la colmatación progresiva del medio poroso:

$$Vinf(d) = 0,001 \times (f / C_s) \times Apav \times d$$

$$Vinf(1 \text{ h}) = 0,001 \times (10 / 10) \times 500 \times 1 = 0,50 \text{ m}^3$$

El volumen de almacenamiento requerido corresponde a la máxima diferencia entre ambos volúmenes (Ecuación 3):

$$Valm = \text{máx} [Vafl(d) - Vinf(d)] = 2,34 - 0,50 = 1,84 \text{ m}^3$$

El espesor hidráulico necesario de la sub-base, obtenido mediante la Ecuación 4, resulta:

$$e = Valm / (\eta \times Apav) = 1,84 / (0,35 \times 500) \approx 0,011 \text{ m} \approx 11 \text{ mm}$$

4.3. Diseño estructural

De acuerdo con la Tabla 2-3 (MINVU, 1996), el espesor mínimo estructural de la sub-base granular para calles de bajo tránsito es de 150 mm, independientemente del resultado hidráulico. Este valor gobierna sobre el espesor hidráulico calculado en la sección 4.2, en concordancia con el criterio de diseño establecido en el apartado 2.1 del presente trabajo, según el cual el espesor final corresponde al mayor valor entre el resultado estructural y el hidráulico.

4.4. Verificación del tiempo de vaciado y del caudal de salida

Con el espesor de diseño adoptado ($e = 150\text{ mm}$), el tiempo máximo de vaciado del volumen almacenado se estima mediante la Ecuación 5:

$$tm = (\eta \times e) / (Cs \times f) = (0,35 \times 150) / (10 \times 10) \approx 0,53\text{ h}$$

El resultado obtenido (0,53 h) cumple ampliamente con el límite de 48 horas recomendado para evitar condiciones de saturación prolongada y proliferación de vectores. Por su parte, el caudal de salida se determina mediante la Ecuación 6, adoptando $Cs = 0,1$ como coeficiente de seguridad frente a obstrucciones puntuales:

$$Qs = Cs \times f \times Apav = 0,1 \times (2,78 \times 10^{-6}\text{ m/s}) \times 500\text{ m}^2 \approx 1,39 \times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{s}$$

Finalmente, la superficie activa del sistema, calculada mediante la Ecuación 7, resulta $Sa = C \times A = 0,15 \times 500 = 75\text{ m}^2$, valor que representa la fracción de la superficie total que efectivamente contribuye a la esorrentía gestionada por el pavimento permeable.

4.5. Síntesis de resultados

Parámetro	Valor obtenido
Volumen afluente acumulado, $Vafl\text{ (d = 1 h)}$	2,34 m^3
Volumen infiltrado acumulado, $Vinf\text{ (d = 1 h)}$	0,50 m^3
Volumen de almacenamiento requerido, $Valm$	1,84 m^3
Espesor hidráulico requerido de sub-base	$\approx 11\text{ mm}$
Espesor estructural mínimo (MINVU, 1996)	150 mm
Espesor de diseño adoptado, e	150 mm (gobierna el criterio estructural)
Tiempo de vaciado, tm	$\approx 0,53\text{ h}$ (cumple $tm < 48\text{ h}$)
Caudal de salida, Qs	$1,39 \times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{s}$
Superficie activa, Sa	75 m^2

El caso desarrollado evidencia que, para las condiciones supuestas, el criterio estructural gobierna el espesor de diseño por sobre el criterio hidráulico, resultado consistente con lo señalado en la literatura para suelos de capacidad de infiltración moderada a alta.

Asimismo, el tiempo de vaciado obtenido garantiza la disponibilidad del sistema para eventos de precipitación sucesivos, validando la aplicabilidad de la Metodología Chile para el dimensionamiento de pavimentos permeables en proyectos de baja carga vehicular.

CONCLUSIONES

A partir del desarrollo teórico expuesto en los Capítulos 1 a 3 y de la aplicación práctica presentada en el Capítulo 4, se establecen las siguientes conclusiones:

Eficacia hidráulica: la aplicación de la Metodología Chile al caso de estudio permitió determinar un volumen de almacenamiento de $1,84 \text{ m}^3$ para un área aportante de 500 m^2 , resultado que confirma la capacidad del hormigón permeable para laminar la escorrentía superficial generada por eventos de precipitación de período de retorno $T = 10$ años, reduciendo el riesgo de inundación en los puntos bajos del área servida.

Criterio gobernante del diseño: se verificó que, para las condiciones de suelo e intensidad de lluvia supuestas, el espesor estructural mínimo (150 mm) resulta mayor que el espesor hidráulicamente requerido (11 mm), por lo que el diseño final queda gobernado por el criterio estructural. Este resultado es coherente con el procedimiento de diseño descrito en el apartado 2.1 y evidencia la necesidad de evaluar siempre ambos criterios de forma conjunta.

Viabilidad estructural: el hormigón permeable, pese a presentar una resistencia a la compresión inferior a la del hormigón convencional (entre 3,5 y 28 MPa según su porosidad), resulta técnicamente viable para tráfico ligero, estacionamientos y zonas peatonales, siempre que el espesor de diseño se determine mediante el procedimiento conjunto estructural-hidráulico aplicado en el Capítulo 4.

Cumplimiento normativo: el tiempo de vaciado obtenido (0,53 h) cumple holgadamente el límite máximo de 48 horas exigido para evitar condiciones de saturación prolongada, lo que confirma la compatibilidad del diseño propuesto con los criterios de mantenimiento y funcionalidad hidráulica de largo plazo.

Sostenibilidad y beneficios asociados: más allá de la gestión cuantitativa del agua, la estructura porosa del pavimento contribuye a la mitigación del efecto de isla de calor urbana y a la recarga de acuíferos, beneficios que refuerzan su pertinencia como componente de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible en el contexto normativo chileno descrito en el apartado 1.2.4.

Limitaciones y trabajo futuro: los resultados presentados corresponden a un caso ilustrativo con parámetros supuestos; se recomienda que estudios posteriores incorporen curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) oficiales de la Dirección Meteorológica de Chile o la DGA, ensayos de infiltración in situ y un programa de mantenimiento preventivo que controle la colmatación de poros, principal factor de degradación de la capacidad hidráulica del sistema en el tiempo.

REFERENCIAS

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (España). Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico. Madrid, BOE, 2016.

MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO (MINVU) y DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS (DICTUC), Pontificia Universidad Católica de Chile. Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos. Guía de diseño. Santiago, MINVU, 1996. 670 p.

MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica). Guías de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Madrid, Secretaría General Técnica, Centro de Publicaciones, 2019.

ANDRÉS-DOMÉNECH, I., HERNÁNDEZ-CRESPO, C., MARTÍN, M. y ANDRÉS-VALERI, V.C. Characterization of wash-off from urban impervious surfaces and SuDS design criteria for source control under semi-arid conditions. Science of The Total Environment. 612:1320-1328, 2018.

ANDRÉS-DOMÉNECH, I., ANTA, J., PERALES-MOMPARLER, S. y RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, J. Sustainable urban drainage systems in Spain: a diagnosis. Sustainability (Switzerland). 13(5):1-22, 2021.

ANDRÉS-VALERI, V.C., CASTRO-FRESNO, D., SAÑUDO-FONTANEDA, L.A. y RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, J. Comparative analysis of the outflow water quality of two sustainable linear drainage systems. Water Science and Technology. 70(8):1341-1347, 2014.

ARAQUE, K., PALACIOS, P., MORA, D. y CHEN-AUSTIN, M. Biomimicry-based strategies for urban heat island mitigation: a numerical case study under tropical climate. Biomimetics. 6(3):48, 2021.

ATLANTA REGIONAL COMMISSION (A.R.C.). Georgia stormwater management manual. Volumen 2: technical handbook. Atlanta, A.R.C., 2001.

AYUNTAMIENTO DE MADRID. Guía básica de diseño de sistemas de gestión sostenible de aguas pluviales en zonas verdes y otros espacios libres. Madrid, Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad, 2018.

AZZOUT, Y., BARRAUD, S., CRES, F.N. y ALFAKIH, E. Techniques alternatives en assainissement pluvial: choix, conception, réalisation et entretien. París, Lavoisier Tec & Doc, 1994.

BEECHAM, S., PEZZANITI, D. y KANDASAMY, J. Stormwater treatment using permeable pavements. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management. 165(3):161-170, 2015.

BOLETÍN OFICIAL DE CANARIAS. Decreto 52/2015, de 16 de abril, por el que se dispone la suspensión de la vigencia del Plan Hidrológico Insular de El Hierro. Canarias, 2015.

BOLETÍN OFICIAL DE LA REGIÓN DE MURCIA. Ley 13/2015, de 30 de marzo, de Ordenación Territorial y Urbanística de la Región de Murcia. Murcia, 2015.

BOLETÍN OFICIAL DE LA REGIÓN DE MURCIA. Decreto-Ley N.º 2/2019, de 26 de diciembre, de Protección Integral del Mar Menor. Murcia, 2019.

BROWN, R.A. y BORST, M. Nutrient infiltrate concentrations from three permeable pavement types. Journal of Environmental Management. 164:74-85, 2015.

CANAL DE ISABEL II. Normas para redes de saneamiento. Versión 3. Madrid, Canal de Isabel II, 2020.

CASTILLO-RODRÍGUEZ, J.T. Quantifying the impact on stormwater management of an innovative ceramic permeable pavement solution. Water Resources Management. 35(4):1251-1271, 2021.

CASTRO-FRESNO, D., RODRÍGUEZ-BAYÓN, J., RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, J. y BALLESTER-MUÑOZ, F. Sustainable drainage systems (SUDS). Interciencia. 30:255-260, 2005.

CITY OF ROCKVILLE. Permeable pavement design guide. Rockville, Maryland, City of Rockville, 2018.

DE LA FUENTE-GARCÍA, L. Guía básica para el diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible en la ciudad de València. Valencia, Cicle Integral de l'Aigua, Ajuntament de València, 2021.

DIARI OFICIAL DE LA COMUNITAT VALENCIANA. Ley 5/2014, de 25 de julio, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje de la Comunitat Valenciana. Valencia, 2014.

DIARI OFICIAL DE LA COMUNITAT VALENCIANA. Decreto 201/2015, de 29 de octubre, del Consell, por el que se aprueba el Plan de Acción Territorial sobre prevención del riesgo de inundación en la Comunitat Valenciana. Valencia, 2015.

DRAKE, J., BRADFORD, A. y MARSALEK, J. Review of environmental performance of permeable pavement systems: state of the knowledge. Water Quality Research Journal of Canada. 48(3), 2013.

ELIZONDO-MARTÍNEZ, E.J., ANDRÉS-VALERI, V.C., RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, J. y CASTRO-FRESNO, D. Proposal of a new porous concrete dosage methodology for pavements. Materials. 12(19):3100, 2019.

EPA (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). Porous pavement. Cincinnati, EPA, 1980.

FERNÁNDEZ-GONZALVO, M., HERNÁNDEZ-CRESPO, C., MARTÍN, M. y ANDRÉS-DOMÉNECH, I. Comparison of permeable pavements effluent under Atlantic and Mediterranean rainfall regimes: a mid-term laboratory experience. Building and Environment. 206:108332, 2021.

GARCÍA-HABA, E. [et al.]. Permeable pavements as stormwater storage systems for water reuse in a Mediterranean city and evaluation of their treatment capacity. En: International Conference on Urban Drainage (15^a, 2021, Melbourne, Australia). IAHR/IWA, 2021.

GARCÍA-HABA, E., HERNÁNDEZ-CRESPO, C., MARTÍN, M. y ANDRÉS-DOMÉNECH, I. Addition of drinking water treatment sludge into permeable pavements for phosphorus control in infiltrated runoff water. En: IAHR Young Professionals Congress (2ª, 2021, en línea). IAHR-YPN, 2021, pp.37-38.

GIMÉNEZ-MARANGES, M., BREUSTE, J. y HOF, A. Sustainable Drainage Systems for transitioning to sustainable urban flood management in the European Union: a review. *Journal of Cleaner Production*. 255:120191, 2020.

GOYA, A. [et al.]. Permeable pavement clogging laboratory experiments using rainfall simulators. En: IAHR World Congress (39º, 2022). IAHR, 2022, pp.1590-1596.

GRUPO SPRILUR. Guía para el desarrollo sostenible de los proyectos de urbanización. <http://www.guiaurbanizacionsprilur.com/pdf/Guia_completa_v2.pdf>.

GUPTA, A. Estudio para la mejora de mezclas asfálticas porosas con una selección multicriterio de aditivos y un nuevo betún modificado con polímeros. Tesis (Doctorado en Ingeniería). Santander, Universidad de Cantabria, 2022.

GUPTA, A., CASTRO-FRESNO, D., LASTRA-GONZÁLEZ, P. y RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, J. Selection of fibers to improve porous asphalt mixtures using multi-criteria analysis. *Construction and Building Materials*. 266:121198, 2021.

GUPTA, A. Multi-criteria selection of additives in porous asphalt mixtures using mechanical, hydraulic, economic, and environmental indicators. *Sustainability*. 13(4):2146, 2021.

HERNÁNDEZ-CRESPO, C., FERNÁNDEZ-GONZALVO, M., MARTÍN, M. y ANDRÉS-DOMÉNECH, I. Influence of rainfall intensity and pollution build-up levels on water quality and quantity response of permeable pavements. *Science of The Total Environment*. 684:303-313, 2019.

INTERPAVE. Permeable pavements: guide to the design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements. Leicester, Reino Unido, Interpave, 2008.

JATO-ESPINO, D., CHARLESWORTH, S.M., BAYÓN, J.R. y WARWICK, F. Rainfall-runoff simulations to assess the potential of SuDS for mitigating flooding in highly

urbanized catchments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 13(1):149, 2016.

KAPPOU, S. [et al.]. Review cool pavements: state of the art and new technologies. *Sustainability (Switzerland)*. 14(9), 2022.

MOLIST, J., NÚÑEZ, L. y LACOMA, C. Aprofitament d'aigua de pluja a Catalunya. Dimensionament de dipòsits d'emmagatzematge. Barcelona, Agència Catalana de l'Aigua, 2011.

NAVES, J. [et al.]. Study of clogging of a porous concrete pavement system using a rainfall simulator. En: *International Conference on Urban Drainage (15^a, 2021, Melbourne, Australia)*. IAHR/IWA, 2021.

ORAL, H.V. [et al.]. A review of nature-based solutions for urban water management in European circular cities: a critical assessment based on case studies and literature. *Blue-Green Systems*. 2(1):112-136, 2020.

PERALES-MOMPARLER, S., CALCERRADA-ROMERO, E., BADENES-CATALÁN, C. y BELTRÁN-PITARCH, I. Guía básica de diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible para el término municipal de Castelló de la Plana. Castellón, Ayuntamiento de Castelló de la Plana, 2019.

RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, J. Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firme para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero. Tesis (Doctorado en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos). Santander, Universidad de Cantabria, 2008.

WOODS-BALLARD, B., KELLAGHER, R., MARTIN, P., JEFFERIES, C., BRAY, R. y SHAFFER, P. *The SUDS manual (C697)*. Londres, CIRIA, 2007.