

Análisis de Factibilidad de Sistema de Pavimentación con Hormigón Entrelazado Permeable en un Contexto de Cambio Climático en Temuco, Chile.

Feasibility Analysis of Permeable Interlocking Concrete Pavement System in a Climate Change Context in Temuco, Chile.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del
artículo:

Recibido
14-11-2023
Aceptado
16-04-2024
Publicado
25-08-2024

Palabras Clave:
Cambio Climático
Sistemas Urbanos
de Drenaje
Sostenible (SUDS)
Gestión de Aguas
Pluviales
Pavimento de
Hormigón
Entrelazado
Permeable (PICP)

Article history:
Received
14-11-2023
Accepted
16-04-2024
Available
25-08-2024

Keywords:
Climate Change,
Sustainable Urban
Drainage Systems
(SUDS),
Stormwater
Management,
Permeable
Interlocking
Concrete
Pavement (PICP)

Resumen

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) buscan implementar alternativas y técnicas factibles en sectores urbanos, para materializar el mejoramiento de la infiltración/permeabilidad en suelos, recarga de acuíferos y drenaje de aguas pluviales, debido al desarrollo de las modernas urbes conformadas por superficies impermeables que provocan una alteración al ciclo hidrológico natural del agua, causando: (i) incremento de temperatura en el suelo, (ii) acumulación del flujo de aguas lluvia en diferentes superficies y (iii) desbordamiento en sistemas de drenaje, generando vulnerabilidad en la calidad de vida tanto para los usuarios así como para ecosistemas, todo esto en un contexto de cambio climático. Se presenta un análisis de factibilidad para implementar la pavimentación de hormigón entrelazado permeable (PICP), mediante uso de software a través de un modelamiento físico - matemático para el diseño de un estacionamiento que actualmente no cuenta con una adecuada pavimentación y drenaje urbano, provocando anegamientos esporádicos debido a fuertes precipitaciones en la ciudad de Temuco, región de La Araucanía, Chile. Los factores estudiados incluyen propiedades estructurales e hidrológicas, junto a la factibilidad de infiltración del sistema según registros históricos de precipitaciones en la zona. Los resultados indican que, al menos en las condiciones particulares de la ciudad de Temuco, el uso de pavimento de hormigón entrelazado permeable demuestra ser una alternativa sustentable y factible de implementar, para ayudar a la adaptación y mitigación frente al cambio climático, reduciendo las zonas de anegamiento/inundación de la ciudad y permitiendo la irrigación de áreas verdes urbanas respectivamente.

Abstract

Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) aim to implement feasible alternatives and techniques in urban areas to improve soil infiltration/permeability, aquifer recharge, and stormwater drainage. This is in response to the development of modern cities characterized by impermeable surfaces that disrupt the natural hydrological cycle of water, leading to: (i) increased soil temperature, (ii) accumulation of stormwater runoff on various surfaces, and (iii) overflow in drainage systems, resulting in vulnerabilities affecting the quality of life for both users and ecosystems, all within the context of climate change. A feasibility analysis is presented for implementing permeable interlocking concrete pavement (PICP) using software through a physical-mathematical modeling approach for designing a parking lot that currently lacks adequate pavement and urban drainage, causing occasional flooding due to heavy rainfall in the city of Temuco, Región de La Araucanía, Chile. The studied factors include structural and hydrological properties, along with the infiltration feasibility of the system based on historical precipitation records in the area. The results indicate that, at least under the specific conditions of the city of Temuco, the use of permeable interlocking concrete pavement proves to be a sustainable and feasible alternative for implementation, aiding in climate change adaptation and mitigation by reducing the flooding/inundation areas in the city and enabling the irrigation of urban green spaces, respectively.

* Corresponding author at: Felipe Garrido, Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería, Rudecindo Ortega 2950, Temuco, Chile. E-mail address: fgarridodelaguada@gmail.com

RIOCI

journal homepage: <https://rioc.ufro.cl/index.php/rioc/index>
Vol. 12, no. 02, pp. 1–9, Agosto 2024

1. Introducción.

1.1. Contexto urbano de la gestión de aguas de lluvia considerando el cambio climático.

Tanto en Chile, como en múltiples países alrededor del mundo, se manifiesta un crecimiento urbano al alza, donde la urbanización de las cuencas naturales provoca una alteración de sus procesos hidrológicos correspondientes (Kováč y Sičáková, 2018). Estas cuencas que se encuentran sujetas a una urbanización constante, presentan inundaciones más rápidas, haciendo que las consecuencias de los anegamientos sean cada vez más severos, presentándose una carencia de sistemas de manejo de aguas lluvias urbanos sostenibles, provocando que los países reclamen nuevas soluciones para adaptarse al cambio climático, el cual provoca eventos hidrometeorológicos extremos que ponen a prueba el desempeño de los sistemas de drenaje urbanos (Camaño y Arumí, 2018).

De acuerdo con los datos del Censo 2017, Chile es uno de los países más urbanizados de Latinoamérica, con un 87,8% de población urbana, donde esta sigue creciendo en comparación con censos anteriores, ya que en 1992 llegó a 83.5% y en 2002 fue 86.6%. Según lo anterior, se destaca la progresiva disminución de la población rural tanto en términos porcentuales como absolutos (Instituto Nacional de Estadísticas, 2018), entregando estos antecedentes una señal de los cambios de uso de suelos y la asociada modificación de las condiciones de infiltración y escorrentía de las aguas de lluvia.

El presente proyecto de investigación es desarrollado con el objetivo de brindar una solución de infraestructura de pavimento para la adaptación y mitigación del cambio climático, considerando la actual falta de sistemas de infraestructura sostenibles de drenaje urbano para gestionar las escorrentías provocadas por eventos de precipitaciones extremas. La superación de la capacidad de gestión de las aguas de lluvia en las ciudades debido a su crecimiento e impermeabilización de suelos, provocan anegamientos urbanos afectando directamente a los usuarios dentro de áreas residenciales, comerciales e industriales (Sambito et al., 2021). Además, actualmente se carece en las ciudades de un aprovechamiento del drenaje de las aguas de lluvia para diferentes usos, como es, por ejemplo, irrigar las áreas verdes de la ciudad, y así permitir que estos ecosistemas puedan incrementar la captura de CO₂ y brindar beneficios paisajísticos que mejoren la calidad de vida humana gracias al proceso de la fotosíntesis (Martins Vaz et al., 2021) (Sambito et al., 2021).

1.2. Infraestructura urbana de la gestión de aguas lluvia: Pavimentación de hormigón entrelazado permeable.

El pavimento de hormigón entrelazado permeable (PICP) consiste en unidades de hormigón impermeables fabricadas (adoquines) que forman huecos y juntas permeables, cuando se ensamblan en un patrón de colocación (Ghisi et al., 2020). Las aberturas comprenden normalmente entre el 5% y el 15% de la superficie del adoquín que mantiene una alta permeabilidad con áridos de pequeño tamaño. Según Castro (2011), la sección transversal de la estructura PICP se detalla en la Figura 1.

Las aberturas permiten que las aguas pluviales entren en una capa de lecho de piedra permeable y una base/subbase que soportan los adoquines al tiempo que proporcionan almacenamiento y tratamiento de la escorrentía. El PICP sustituye al pavimento impermeable tradicional en la mayoría de las aplicaciones para peatones y vehículos, excepto en las carreteras de gran volumen/alta velocidad. Este se ha utilizado con éxito en pasos de peatones, aceras, entradas de vehículos, aparcamientos y carreteras de poco tráfico. (Eisenberg et al., 2015)

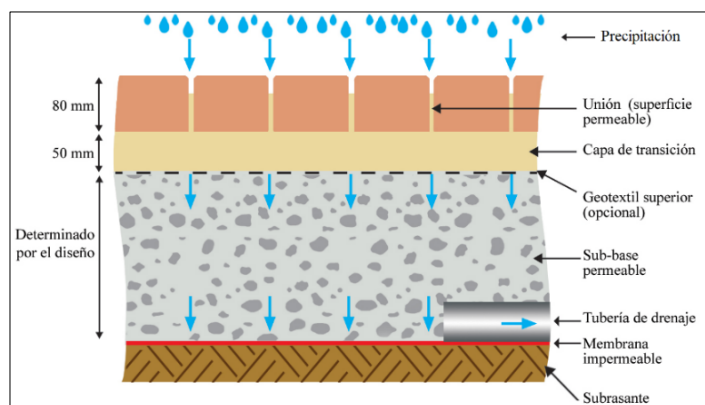


Figura 1. Sección Transversal Estructura PICP.

1.3. Objetivos.

Según lo anterior, se busca responder a diferentes objetivos específicos a lo largo del avance del proyecto de investigación, siendo estos relevantes para el desarrollo y formulación de este, presentados a continuación:

1. Identificar el comportamiento estructural de las capas de diseño que conforman un sistema de pavimentación de hormigón entrelazado permeable.
2. Demostrar el desempeño de un sistema de pavimentación de hormigón entrelazado permeable a través de un modelamiento físico-matemático abordando el desarrollo constructivo que conlleva su implementación.
3. Evaluar la factibilidad de uso del hormigón entrelazado permeable en la ciudad de Temuco, región de La Araucanía, considerando los registros históricos de precipitación bajo un escenario de cambio climático.

4. Proponer una solución para el almacenamiento de aguas lluvias mediante el uso de sistemas de pavimentación de drenaje urbano, para mejorar la sostenibilidad considerando un contexto de cambio climático.
5. Por este motivo, se desarrolló un modelamiento físico-matemático, para verificar la factibilidad estructural e hidrológica de la pavimentación de hormigón entrelazado permeable, siendo un tipo de Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS), enfatizando que, actualmente en el país existe un gran déficit en avances de gestión de aguas de lluvias que provocan anegamientos dentro de las zonas urbanas debido a la impermeabilización de suelos presentada en las últimas décadas.

2. Metodología.

2.1. Tipo y diseño de la investigación.

La investigación es de tipo descriptiva, explicativa y no experimental, con enfoque cuantitativo. De acuerdo con la información obtenida, se realizaron análisis para predecir el comportamiento que tendrá el sistema de pavimentación permeable en la zona donde se desea implementar, y a su vez se realizó la evaluación del impacto que conlleva su utilización en los sectores de estudio junto al efecto que generará en la ciudadanía.

En esta investigación, no se realizaron actividades de prueba en laboratorio con el propósito de conocer resultados de comportamiento de propiedades drenantes de especímenes del pavimento en cuestión, sino que solamente se realizó el modelamiento y simulación mediante uso de software especializado. Se obtuvieron valores de propiedades del suelo estandarizados, y parámetros climáticos representativos basados en registros estadísticos históricos.

2.2. Recursos de la investigación.

Se maneja el uso de software de diseño de pavimentos de hormigón entrelazado permeable (PICP) denominado "Permeable Design Pro". Al igual se utilizaron bases de datos digitales, como lo es la información de precipitaciones proporcionada por la estación Pueblo Nuevo perteneciente a la Dirección General de Aguas. De la misma manera, se realizó una revisión de literatura relacionada al sistema de pavimentación de hormigón entrelazado permeable en base a revistas y artículos científicos (ScienceDirect; Scielo; MDPI Sustainability; MDPI Water) e investigaciones de proyecto de tesis de pregrado en distintas universidades tanto nacionales como internacionales.

En tanto a la investigación que refiere del marco normativo, este es correspondida en base a asociaciones, sociedades e instituciones de ingeniería especializadas en el área establecida. Se indagó específicamente dentro de la Guía para Diseño de

Estructuras de Pavimento, según la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), información técnica sobre el diseño y serviciabilidad de estructuras de pavimento. Del mismo modo, se realizó el análisis del escrito "Pavimentos Permeables: Guía para el Diseño, Construcción y Mantenimiento de Pavimentos Permeables de Bloques de Hormigón", correspondiente a la Asociación de Pavimentos y Bordillos Prefabricados de Hormigón (Interpave). Por último, se tienen presente las normas y metodologías implementadas tanto por la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM), como del Instituto del Pavimento de Hormigón Entrelazado (ICPI).

2.3. Uso de software: Permeable Design Pro.

Cuando se diseña un pavimento permeable se requiere tener en consideración dos aspectos relevantes, uno de ellos se refiere al comportamiento estructural, es decir, la resistencia del pavimento, y el otro al comportamiento hidráulico-hidrológico, es decir, la capacidad de almacenar las precipitaciones previstas.

El programa utiliza los criterios de diseño del Instituto de Pavimentos de Hormigón Entrelazado (ICPI), que reflejan las prácticas más avanzadas basadas en la experiencia de Norteamérica y en el extranjero. Los procedimientos estándar de diseño hidrológico y estructural se integran en un procedimiento completo para estimar la capacidad del pavimento necesaria para soportar la carga de tráfico, así como para almacenar e infiltrar la escorrentía de aguas superficiales. El software permite ejecutar un análisis de sensibilidad de las variables claves para encontrar el diseño óptimo hacia el desarrollo de un proyecto en un sitio determinado. (ICPI, 2022 - a)

2.4. Zona de estudio.

La zona de estudio que comprende el diseño del proyecto de investigación se encuentra ubicado en el estacionamiento denominado "Av. Pablo Neruda 1100 Parking", con una dimensión de 5643 m^2 , dentro el sector Parque Estadio Germán Becker, ciudad de Temuco, región de La Araucanía, Chile, específicamente a un costado del Estadio Municipal Germán Becker, con coordenadas latitud $38^{\circ}44'28.7''$ S y longitud $72^{\circ}37'13.5''$ W, y una elevación aproximada de 110 m.s.n.m.

2.5. Población de estudio y selección de muestra.

La población de estudio comprende la infraestructura vial del sector Parque Estadio Germán Becker, específicamente ubicada en la calle Avenida Pablo Neruda dentro de la ciudad de Temuco. Siendo más específicos, la selección de muestra se encuentra definida dentro de la zona que abarca el estacionamiento en el sector antes mencionado. Según los registros de Garrido y Painenao (2023) en la Figura 2, se observa el espacio público municipal, apreciando el deteriorado estado de la superficie de

pavimento por la acumulación de aguas lluvias debido a intensos eventos de precipitaciones en el sector, provocando

anegamientos y dificultades para el adecuado tránsito de peatones y vehículos.



Figura 2. Condiciones Actuales del Estacionamiento Parque Estadio Germán Becker, ciudad de Temuco.

2.6. Análisis hidráulico-hidroológico para pavimento de hormigón entrelazado permeable.

2.6.1. Balance de agua.

La cantidad de agua en un sistema de pavimento se describe

$$Vol. \text{ Agua (Tiempo)} = Nivel \text{ Inicial Agua} + \int_0^{Tiempo} Entrada (Tiempo) - Salida (Tiempo) \quad (1)$$

“Donde el *Volumen de Agua* se encuentra representado en m^3 y el *Tiempo* se encuentra representado en h ”.

2.6.2. Flujo de entrada de agua.

El agua que ingresa al pavimento proviene de las precipitaciones o zonas de aportación, debido a ello este puede descender sobre la superficie del sistema de pavimentación y las áreas contribuyentes presentadas. Posteriormente, el agua que cae sobre el pavimento se puede infiltrar al interior en el material granular de la estructura o escurrirse por la superficie del pavimento (Hein et al., 2010). En caso de presentar una escorrentía dentro del sistema, se puede estimar la misma en base a la Ecuación 2.

$$Q = \frac{\left(P - 0.2 * \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \right)^2}{\left(P - 0.8 * \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \right)} \quad (2)$$

“Donde Q es el Escurrimiento directo representado en mm , P es la Precipitación representada en mm y CN es el número de curva”.

La infiltración del agua se calcula en una serie de pasos temporales regulares, donde la precipitación se convierte en volumen de entrada de agua durante cada intervalo. Debido a la

como un balance hídrico (Hein et al., 2010). Se gestiona el volumen de este en el sistema de pavimentación según la Ecuación 1.

distancia adicional que el agua tiene que recorrer desde las zonas de captación hasta el pavimento, se prevé un desfase temporal adicional que afectará a la distribución de la afluencia de agua (ICPI, 2022 - a). El retardo previsto se calcula según Ecuación 3.

$$T_t = \frac{0.007 * (n * L)^{0.8}}{P^{0.5} * S^{0.4}} \quad (3)$$

“Donde T_t es el Tiempo de viaje representado en horas, n es el número de rugosidad de Manning, L es la longitud del recorrido representado en m , P es la precipitación en 24 horas representado en mm , y S es la pendiente representada en $\%$ ”.

2.6.3. Sistema drenaje aguas pluviales.

La velocidad de drenaje hacia los sistemas de aguas de lluvia está limitada por la velocidad a la que el agua puede desplazarse hacia el sistema de drenaje y la cantidad de agua que puede viajar en la tubería (ICPI, 2022 - a). Para determinar el caudal a través de la base/subbase hacia la tubería de drenaje se utilizó la Ecuación 4.

$$Q_{granular} = k_{Base/Subbase} * \left(\frac{h^2}{b} \right) * L \quad (4)$$

“Donde $Q_{granular}$ es el caudal a través de la base/subbase hacia tubería de drenaje representado en $m^3/día$, $k_{Base/Subbase}$ es la

conductividad hidráulica del material de la base/subbase representado en $m/día$, h es la altura del nivel de agua por encima del drenaje representado en m , b es la distancia horizontal más larga que recorre el agua para llegar a un sistema de drenaje representada en m , y L es la longitud de la tubería a lo largo del proyecto representado en m .

Conforme a las afirmaciones del ICPI (2022 - a), si el material de la base tiene la capacidad de drenar rápidamente, es posible que por las tuberías de drenaje intente pasar más agua de la que permite la gravedad. Este podría ser el factor limitante si las tuberías están mal diseñadas en algunos de los materiales porosos. La Ecuación 5 de Manning se utiliza para estimar la cantidad de flujo de agua en una tubería.

$$Q_{Tubería} = \frac{1}{n} * \pi * r * \left(\frac{r}{2}\right)^{\frac{2}{3}} * s^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

“Donde $Q_{Tubería}$ es el caudal máximo de agua a través de cualquier tubería representado en $m^3/día$, n es el coeficiente de rugosidad de Manning, r es el radio de la tubería representada en m y s es la pendiente de la tubería representada en $\%$ ”.

A continuación, según CMAA (2010) en la Figura 3, se describe la estructura de la sección transversal de los tres tipos de sistema de pavimentación permeable, en función de los flujos de agua que ingresan y evacúan del sistema.

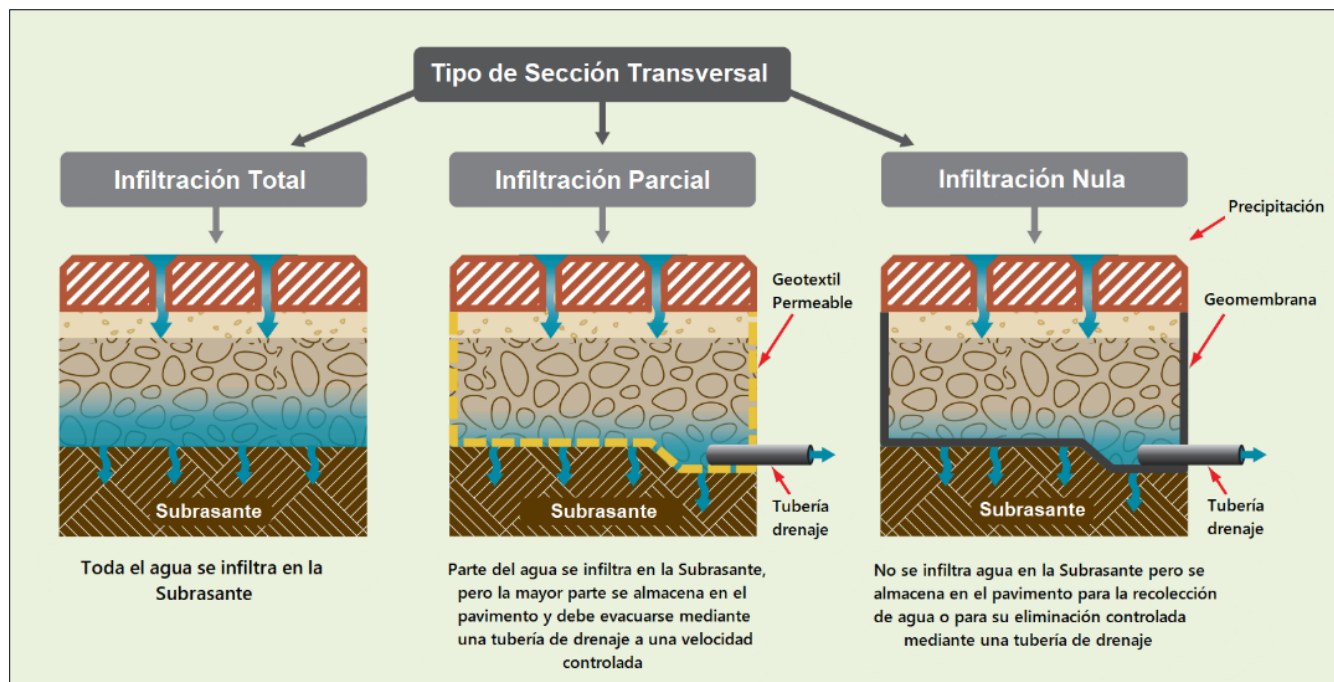


Figura 3. Flujos de Agua según Tipo de Sección Transversal PICP.

3. Análisis de resultados.

Conforme a la respuesta del primer objetivo específico (i), los parámetros estructurales de las capas de diseño contemplados como los espesores, porosidad, relación de vacíos, permeabilidad y resistencia en caso de la subrasante, señalados en la Tabla 1, representan especificaciones, resultados y factores influyentes con el propósito de comprender el comportamiento de las capas de pavimentación de hormigón entrelazado permeable. Según el diseño determinado, la profundidad máxima de agua permitida en el material de la base/subbase es del 85% del espesor. Mientras que, se realiza el supuesto de que no existe presencia de agua en el material de la subbase.

Tabla 1. Información Diseño de Capas Pavimento de Hormigón Entrelazado Permeable.

Capas Estructurales	Especificaciones	Resultados
Capa de Pavimentación (Adoquines hormigón + Agregado ASTM No. 89)	Espesor	130 mm
Material Base (Agregado ASTM No. 57)	Espesor	100 mm
	Porosidad	0.319
	Relación de Vacíos	0.47
	Permeabilidad	0.011 m/s
Material Subbase (Agregado ASTM No. 4)	Espesor	180 mm
	Porosidad	0.348
	Relación de Vacíos	0.53
	Permeabilidad	0.145 m/s
Material Subrasante (GP – Gravas Mal Graduadas)	Resistencia	201.4 MPa
	Subrasante	
	Porosidad	0.275
	Relación de Vacíos	0.38
	Permeabilidad	0 m/s

A continuación, según ICPI (2022 - b) se muestra el esquema representativo (Figura 4) de un sistema de pavimentación permeable, que especifica la estructura completa de un pavimento de hormigón entrelazado permeable sin infiltración hacia la capa subrasante, en relación a la información obtenida en la Tabla 1.

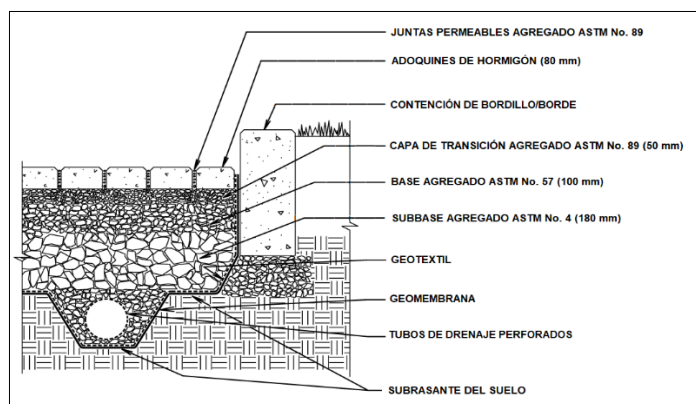


Figura 4. Sección Transversal de Diseño Estructural PICP.

En la Tabla 2, se presentan los resultados de balance de agua para un sistema con tuberías de drenaje con coeficiente de rugosidad lisa, con la finalidad de demostrar el desempeño del sistema de pavimentación de hormigón entrelazado permeable a través de un modelamiento físico-matemático abordando el desarrollo constructivo que conlleva su implementación.

Respondiendo al segundo objetivo específico (ii), para los periodos de retorno estudiados, el sistema fue capaz de no producir saturación, cumpliendo con los resultados de balances de agua frente a las intensidades de precipitaciones, según el análisis entregado por el programa. Lo anterior se corrobora según la Figura 5, proyectando en la gráfica que este diseño es efectivo para soportar un periodo de retorno de hasta 100 años.

Tabla 2. Resultados Balance Agua.

Periodo Retorno (años)	Entrada (m ³)		Salida (m ³)				
	Agua Inicial Pavimento	Flujo Superficial	Almacenamiento Pavimento	Infiltración Subrasante	Drenaje Tubería	Escorrentía Superficial	Estancamiento Superficial
2	0.0	252.1	146.2	0.0	105.8	0.0	0.0
5	0.0	340.1	149.9	0.0	190.2	0.0	0.0
10	0.0	404.1	152.4	0.0	251.8	0.0	0.0
25	0.0	432.1	153.4	0.0	278.7	0.0	0.0
50	0.0	545.3	160.6	0.0	384.7	0.0	0.0
100	0.0	673.0	237.8	0.0	435.2	0.0	0.0

Se observa en la Tabla 2, la respuesta que tiene el sistema en relación a la entrada y salida de los flujos de agua, respecto al tiempo representado en horas según los periodos de retorno de tormenta. De acuerdo con estos datos, se realiza una representación visual que describe el comportamiento de los datos adjuntos en la Figura 5.

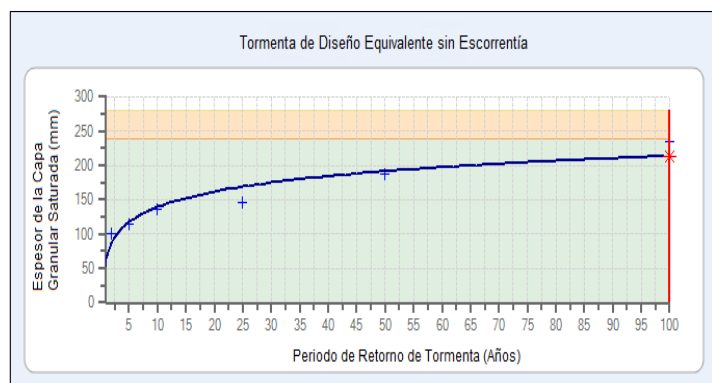


Figura 5. Tormenta de Diseño Equivalente.

Los datos registrados representan los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años introducidos en el programa. Si estos puntos se encuentran dentro del 85% de profundidad máxima permitida de agua en la capa granular (área verde), se traduce a una óptima capacidad de almacenamiento durante los periodos de tormenta. Se ve claramente que estos valores, forman una línea de tendencia que representa el comportamiento de saturación para el espesor de la capa granular del sistema.

Tabla 3. Resultados Evaluación Hidrológica.

Periodo Retorno Lluvia (años)	Precipitación Intensidad 24 horas (mm)	Satisface Capacidad Infiltración Adoquín	Satisface Capacidad Infiltración Granular	Cumple Objetivo Almacenamiento	Satisface Capacidad Almacenamiento
2	53	Sí	Sí	Sí	Sí
5	72	Sí	Sí	Sí	Sí
10	85	Sí	Sí	Sí	Sí
25	91	Sí	Sí	Sí	Sí
50	114	Sí	Sí	Sí	Sí
100	140	Sí	Sí	Sí	Sí

Con el propósito de conducir, almacenar y reutilizar estas aguas en sistema de depósitos de aguas subterráneas, se diseñó un procedimiento basado en la infiltración nula hacia la capa de la subrasante. Para lograr lo anterior, se implementaron tres tuberías de drenaje de 100 mm de diámetro, con distancia hasta la parte inferior de la base de 75 mm, y un coeficiente de rugosidad liso, satisfaciendo la capacidad de salida del agua acumulada dentro del sistema, sin generar escorrentías superficiales.

Con una capa de pavimento y transición de 130 mm, una base de 100 mm y una subbase de 180 mm, el modelo de pavimentación es capaz de soportar una tormenta de diseño de 100 años, según condiciones antes mencionadas, como se muestra en la Tabla 3.

Según este periodo de retorno, para el flujo superficial de

Por lo tanto, dependiendo del porcentaje de la capacidad máxima de almacenamiento que uno proponga para el diseño, este se verá directamente influenciado por los eventos de precipitaciones según lugar de emplazamiento del proyecto. Frente a lo anterior, si se excede el porcentaje propuesto, se verá comprometida la capacidad de almacenamiento frente a eventos de aguas de lluvia en la zona.

Según resultados anteriores, en la Tabla 3, se presenta información con carácter de verificación, para conocer si el proyecto satisface las condiciones propuestas según el diseño planteado, con la finalidad de presentar resultados que evalúen la factibilidad de uso del pavimento de hormigón entrelazado permeable en la ciudad de Temuco, considerando registros históricos de precipitaciones.

En respuesta al tercer objetivo (iii), el sistema modelado en el programa satisface los criterios de evaluación hidrológica, en relación a la capacidad de infiltración y almacenamiento establecidos. De acuerdo a lo anterior, se confirma la factibilidad de un diseño adecuado para las condiciones hidrológicas establecidas en la ciudad de Temuco, Chile.

entrada, el volumen acumulado fue de 673 m^3 . En el caso del drenaje de salida, el almacenamiento de agua acumulada en el pavimento es de 237.8 m^3 , por lo que las tuberías estarían drenando 435.2 m^3 totales durante el periodo de duración de la tormenta, como se observa en la Tabla 2.

En consecuencia, nunca se superó la capacidad total de almacenamiento del pavimento permeable, ratificando los resultados conforme al balance hídrico de gestión de volumen presentado en la Ecuación 1.

Se demuestra con los resultados obtenidos del modelamiento estudiado, que la aplicación de pavimentación permeable es una solución de infraestructura de gestión de aguas de lluvia sostenible para afrontar el cambio climático, ya que sustenta acciones de adaptación y mitigación, permitiendo la reducción tanto del impacto negativo por desastres naturales (Antunes et al., 2020).

En relación al cuarto objetivo (iv), se sugiere brindar nuevos enfoques sustentables que relacionen un planteamiento conforme a la gestión y almacenamiento de aguas procedentes de estas técnicas, en busca de incentivar acciones frente a problemáticas climáticas y urbanísticas.

Dentro de este marco, la escasez de áreas verdes en las ciudades, provoca el aumento en la probabilidad de generación de islas de calor, causados por el uso masivo de pavimentación convencional, afectando directamente al cambio climático urbano debido a la impermeabilización de los suelos (Yang et al., 2022). Frente a lo anterior, un sistema de pavimentación de hormigón entrelazado permeable, con capacidad de recolección y almacenamiento de aguas lluvia, podría ser utilizado con el propósito de irrigación de áreas verdes, permitiendo la formación de ecosistemas que contribuyan en la producción de fotosíntesis, provocando acciones de mitigación frente al cambio climático y, por consiguiente, contribuir en la disminución del aumento de la generación de los gases de efecto invernadero, además de ser parte de una solución de ingeniería que impide la formación de anegamientos y problemas de drenaje (Park et al., 2020). Lo descrito anteriormente se denota en el balance para un Diseño Urbano Sensible al Agua según Fumero (2020) presentado en la Figura 6.

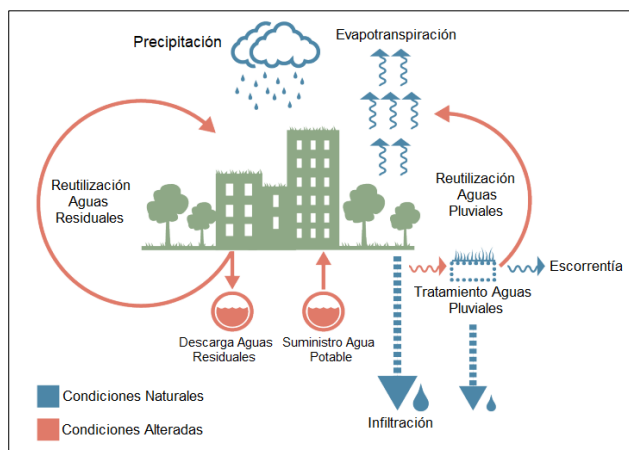


Figura 6. Balance Hídrico Diseño Urbano Sensible al Agua (WSUD).

4. Conclusiones.

Los pavimentos permeables tienen un gran potencial en la mejora de la calidad del agua procedente de la escorrentía superficial, contribuyendo así en la reducción de inundaciones urbanas y en la atenuación de la concentración de contaminantes. Su filosofía se basa en considerar las aguas de lluvia como un recurso y no como un desecho o problema.

Según el planteamiento de la problemática designada con principal relevancia frente a múltiples episodios causados por el cambio climático, en correspondencia a las precipitaciones ocasionadas en la zona de estudio, se determinó un diseño constructivo de acuerdo con los procesos de modelamiento derivados del software Permeable Design Pro, realizando análisis de factibilidad en vista de los resultados obtenidos.

Con los resultados expuestos en la presente investigación, conforme con los criterios en términos del diseño estructural, las principales variables se encuentran determinadas por el espesor y la composición de las capas granulares, para garantizar un correcto funcionamiento y desempeño bajo cargas de tráfico. En relación a los diseños hidrológicos e hidráulicos, se debe estimar un análisis de factibilidad, junto a un previo diseño y dimensionamiento tanto para elementos principales como de detalle, gestionando eventos extremos de precipitación.

Tras llevar a cabo el análisis de resultados en la investigación de diseño, desarrollados en la ciudad de Temuco, se demuestra claramente que el nuevo sistema de pavimentación considerado como infraestructura multifuncional, puede satisfacer criterios estructurales, medioambientales y sociales.

Considerando la actual vulnerabilidad urbana del país frente al cambio climático, es imperioso que las soluciones de Ingeniería Civil deban ir alineadas con la sustentabilidad, con el objetivo de contribuir en la implementación y diseño de políticas para la ejecución en el cumplimiento de metas globales de adaptación climática, efectuando medidas de planificación, con el fin de aumentar la resiliencia a los efectos adversos del cambio climático.

Los resultados correspondientes buscan promover el uso de pavimentación de hormigón entrelazado permeable (PICP), como medida de gestión a nivel país en el área de la construcción para la ejecución de futuros proyectos que involucren la elaboración y desarrollo de obras viales, enfatizando en la relevancia de implementar soluciones de infraestructura basadas en la naturaleza y la ingeniería, fomentando el uso de estas soluciones de manera masiva en la zona central y el sur de Chile, en espacios urbanos tales como estacionamientos, pasajes o calles de bajo volumen de tráfico, con la finalidad de afrontar las problemáticas climáticas y urbanísticas actualmente registradas en Chile.

5. Referencias.

- Antunes, L. N., Sydney, C., Ghisi, E., Phoenix, V. R., Thives, L. P., White, C., & Garcia, E. S. H. (2020). Reduction of Environmental Impacts Due to Using Permeable Pavements to Harvest Stormwater. *Water*, 12(10), 2840.

- MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w12102840>
- Camaño, J., Arumí, J. L. (2018). Desafíos y Evolución del Drenaje Urbano en Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua*, pp. 132-152. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
 - Castro, E. M. L. (2011). Pavimentos Permeables como alternativa de drenaje urbano (Trabajo de Grado, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia). Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/71418921.pdf>
 - CMAA. (2010). *Permeable Interlocking Concrete Pavements – Design and Construction Guide*. Edition PE01. Concrete Masonry Association of Australia. Artarmon, NSW 1570 Australia.
 - Eisenberg, B., Collins, K., Smith, D. (2015). *Permeable Pavements*. Environmental and Water Resources Institute of The American Society of Civil Engineers (ASCE). Reston, Virginia, United States of America.
 - Fumero, A. (2020). *Water Sensitive Urban Design (WSUD) as a climate adaptation strategy* (Master Thesis; Territorial, Urban, Environmental and Landscape Planning. Politecnico Di Torino, Collegio di Pianificazione e Progettazione. Turin, Italia).
 - Garrido, F., Painena, D. (2023). Análisis de Factibilidad de Sistema de Pavimentación con Hormigón Entrelazado Permeable como Sistema Urbano de Drenaje Sostenible considerando las precipitaciones en un contexto de cambio climático en estacionamiento localizado en la ciudad de Temuco, región de La Araucanía, Chile (Tesis de pregrado, Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería, Departamento de Obras Civiles y Geología. Temuco, Chile).
 - Ghisi, E., Belotto, T., & Thives, L. (2020). The Use of Permeable Interlocking Concrete Pavement to Filter Stormwater for Non-Potable Uses in Buildings. *Water*, 12(7), 2045. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w12072045>
 - Hein, D., Swan, D.J., Schaus, L. (2010). *Structural and Hydrological Design of Permeable Pavements*. Pavements Session of the 2010 Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Halifax, Nova Scotia, Canada.
 - ICPI. (2022 - a). *Permeable Design Pro (V 2.0/ V3.0)*. Compatible with PC machines only running any edition of Windows 7 or Windows 8 or Windows 10. Washington D.C, Estados Unidos: ICPI. Disponible en: <http://www.permeabledesignpro.com/>
 - ICPI. (2022 - b). *Permeable Interlocking Concrete Pavements*. Permeable Pavement with No Exfiltration to Soil Subgrade. Washington D.C, Estados Unidos. Disponible en: <https://icpi.org/permeable-interlocking-concrete-pavement-drawings>
 - Instituto Nacional de Estadísticas. (2018). *Síntesis de Resultados: Censo 2017*. Chile.
 - Kováč, M., & Sičáková, A. (2018). Pervious Concrete as an Environmental Solution for Pavements: Focus on Key Properties. *Environments*, 5(1), 11. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/environments5010011>
 - Martins Vaz, I. C., Ghisi, E., & Thives, L. P. (2021). Stormwater Harvested from Permeable Pavements as a Means to Save Potable Water in Buildings. *Water*, 13(14), 1896. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w13141896>
 - Park, J., Park, J., Cheon, J., Lee, J., & Shin, H. (2020). Analysis of Infiltrating Water Characteristics of Permeable Pavements in a Parking Lot at Full Scale. *Water*, 12(8), 2081. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w12082081>
 - Sambito, M., Severino, A., Freni, G., & Neduzha, L. (2021). A Systematic Review of the Hydrological, Environmental and Durability Performance of Permeable Pavement Systems. *Sustainability*, 13(8), 4509. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/su13084509>
 - Yang, Q., Gao, Z., & Beecham, S. (2022). A Sustainable Approach to Cleaning Porous and Permeable Pavements. *Sustainability*, 14(21), 14583. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/su142114583>