

**Monografía: Investigaciones y Avances Internacionales, Continentales y Nacionales de las  
Obras de Drenaje Subterráneo**

Daniel Mosquera Mosquera

Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona

165029: Proyecto de Grado

Msc. Alba Yajaira Sánchez

26 de junio de 2023

**MONOGRAFÍA: INVESTIGACIONES Y AVANCES INTERNACIONALES,  
CONTINENTALES Y NACIONALES DE LAS OBRAS DE DRENAJE SUBTERRÁNEO**

AUTOR

DANIEL MOSQUERA MOSKERA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

TUTORA

MSC. ALBA YAJAIRA SÁNCHEZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL

PAMPLONA

2023

### **Agradecimientos**

Gracias a mis padres por apoyarme durante todo mi proceso formativo, sin ustedes no seria capaz de haber llegado hasta donde esto y estoy eternamente agradecido por su apoyo.

También quiero ofrecer mi agradecimiento a mi tutora Alba Yajaira Sánchez por guiarme con sus comentarios y sus correcciones en el desarrollo de este documento.

Por último, agradezco al programa de Ingeniería Civil y a todos los docentes que han hecho parte de mi formación académica durante el transcurso de la carrera.

## Tabla de Contenido

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                                                                                                   | 7  |
| Capítulo 1: Investigaciones y Avances Internacionales de las Obras de Drenaje Subterráneo .....                                      | 9  |
| Flujo de Agua Subterránea en Túneles y un Sistema Innovador de Recolección de Agua para Drenaje .....                                | 9  |
| Aplicación e Innovación de Geotextiles en Ingeniería Geotécnica .....                                                                | 11 |
| Sistemas Sostenibles de Drenaje de Pavimentos: Humedad de la Subrasante, Métodos de Drenaje Subterráneo y Eficacia del Drenaje ..... | 14 |
| Análisis y Discusión de las Investigaciones y Avances Internacionales .....                                                          | 17 |
| Capítulo 2: Investigaciones y Avances Continentales de las Obras de Drenaje Subterráneo .....                                        | 21 |
| DRAINMOD: Uso, Calibración y Validación del Modelo .....                                                                             | 21 |
| Programa Informático para Examinar la Dinámica del Agua en los Sistemas de Subdrenaje Agrícola.....                                  | 24 |
| Pavimentos Permeables como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).....                                                        | 27 |
| Análisis y Discusión de las Investigaciones y Avances Continentales.....                                                             | 29 |
| Capítulo 3: Investigaciones y Avances Nacionales de las Obras de Drenaje Subterráneo.....                                            | 31 |
| Uso de Geosintéticos en Colombia .....                                                                                               | 31 |
| Uso del programa DRIP 2.0 para el Diseño del Drenajes Subsuperficiales en Pavimentos Flexibles.....                                  | 32 |
| Comparación entre el Geodrén Lamidren L20DB y el Dren Francés .....                                                                  | 35 |
| Análisis y Discusión de las Investigaciones y Avances Nacionales.....                                                                | 39 |
| Capítulo 4: Análisis y Discusión Global de las Investigaciones y Avances de las Obras de Drenaje Subterráneo.....                    | 42 |
| Conclusiones .....                                                                                                                   | 44 |
| Referencias Bibliográficas .....                                                                                                     | 46 |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 <i>Sistema de recolección de agua instalado en el sitio</i> .....                                                   | 11 |
| Figura 2 <i>Función de drenaje de los geotextiles</i> .....                                                                  | 13 |
| Figura 3 <i>Principales componentes hidrológicos de un sistema de gestión del nivel freático y drenaje subterráneo</i> ..... | 22 |
| Figura 4 <i>Pantalla general del programa DRENAS</i> .....                                                                   | 25 |
| Figura 5 <i>Estructura del Pavimento rígido permeable</i> .....                                                              | 28 |
| Figura 6 <i>Interfaz del programa</i> .....                                                                                  | 34 |
| Figura 7 <i>Subdrén francés</i> .....                                                                                        | 36 |
| Figura 8 <i>Lamidren L20DB como subdrenaje en vía</i> .....                                                                  | 37 |

### Índice de Tablas

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 <i>Tiempo de infiltración del agua en el pavimento</i> .....                             | 28 |
| Tabla 2 <i>Comparación hidráulica entre ambos sistemas de subdrenaje.</i> .....                  | 38 |
| Tabla 3 <i>Análisis de costos para el subdrén francés y para el geodrén Lamidren L20DB</i> ..... | 38 |

## **Introducción**

El objetivo principal del drenaje subsuperficial de una carretera es “asegurar la estabilidad de la plataforma vial, así como la integridad del pavimento y los taludes al eliminar el agua presente en el suelo o que se haya infiltrado” (Instituto Nacional de Vías [INVIAS], 2009), teniendo en cuenta que la resistencia del suelo aumenta con la disminución de la presión de poros, el drenaje subterráneo o subdrenaje es una de las mejores técnicas para la estabilización de deslizamientos, ya que reduce las presiones de poros y evita que estas aumenten, (Suarez, 2008).

Dos grupos de elementos conforman el sistema de drenaje subterráneo según su función: los que regulan las aguas subterráneas, y los que regulan la infiltración. Los primeros están destinados a bajar el nivel freático y disminuir el movimiento del agua en las subrasantes y capas del pavimento, mientras que los segundos son contruidos para interceptar y eliminar el agua que ingresa a la corona debido al flujo superficial o la precipitación. Los tipos más comunes y tradicionales de subdrenaje son: los sistemas de pozos, lechos permeables, drenajes horizontales, drenajes transversales y drenajes longitudinales (INVIAS, 2009).

Los SUDS o sistemas urbanos de drenaje sostenible integran la hidrología, la planificación urbana y el paisajismo. El objetivo de los SUDS es dotar a la ciudad de nuevas capas de pavimento permeable y techos que funcionen como desagües filtrantes e imiten el ciclo natural del agua; el agua filtrada se recolecta, controla y maneja bajo la superficie para su posterior reciclaje, infiltración en el suelo o descarga directa a un cauce natural (Secretaría de Ambiente, 2020).

El presente trabajo monográfico muestra investigaciones y avances recientes de las obras de drenaje subterráneo a escala internacional, continental y nacional, con el objetivo de realizar un análisis y buscar similitudes, diferencias, y posibles influencias entre ellos. Para cada escala

se presentan tres artículos de investigación relacionados con las obras de drenaje subsuperficial, abordando temas como los geosintéticos (principalmente geotextiles y geodrenes), los sistemas urbanos de drenaje sostenible, software de simulación hidráulica y software de diseño

La monografía está constituida por cuatro capítulos, donde al final de cada uno se realiza el análisis y discusión correspondiente. En el primer capítulo se abordan las investigaciones y los avances a escala internacional de las obras de drenaje subterráneo, donde prevalece China como país con mayor número de artículos y adelantos sobre el tema, destacando temas como la recolección de agua subterránea en túneles, la innovación de geotextiles (verdes, inteligentes o de alto rendimiento), y el desarrollo de ciudades esponja. En el segundo capítulo se mencionan las investigaciones y los avances a escala continental, incluyendo países como Estados Unidos, México y Perú, destacando temas como el desarrollo y uso de software de simulación hidráulica agrícola, y la implementación de pavimentos permeables como SUDS. En el tercer capítulo se habla sobre las investigaciones y los avances a escala nacional, destacando temas como el uso de geosintéticos en el país, la implementación de software de diseño, y la comparación hidráulica y económica entre un geodrén nodular y un subdrén francés tradicional. Por último, en el cuarto capítulo se analizan y comparan las investigaciones y los avances a escala global, destacando las diferencias y similitudes entre los artículos y los temas tratados a lo largo del trabajo monográfico, generando al final conclusiones sobre el desarrollo de este.

## **Capítulo 1: Investigaciones y Avances Internacionales de las Obras de Drenaje**

### **Subterráneo**

#### **Flujo de Agua Subterránea en Túneles y un Sistema Innovador de Recolección de Agua para Drenaje**

Según Li et al. (2009), la entrada de agua subterránea es un problema antiguo, frecuente y desafiante en los proyectos de túneles. Puede ralentizar el proceso de excavación durante la construcción del túnel e incluso podría crear un riesgo para la estabilidad a largo plazo de este. Hoy en día, se están construyendo túneles de carretera de apertura compleja en regiones montañosas de todo el mundo. Tales formas de apertura únicas provocan flujos de agua subterránea complicados que son distintos de las formas de apertura simples, por esta razón, es un desafío controlar la entrada de agua subterránea y los problemas de fugas en los túneles.

Esta investigación realizada en China en el año 2009 trata sobre el estudio de caso de dos tipos de túneles para examinar el flujo de agua subterránea y la distribución de la presión intersticial alrededor de los túneles utilizando los resultados de un modelado numérico. La invasión de aguas subterráneas y superficiales en los túneles causa serios problemas de inestabilidad en los túneles (Li et al., 2007, 2008), así que, tras una exhaustiva investigación y observaciones de campo, se descubrió que los túneles estudiados experimentaron diferentes tipos de entradas de agua como:

Irrupción de agua subterránea, debido a la cual el frente del túnel puede experimentar un colapso de rocas, aunque no ocurre con frecuencia, este tipo de colapso es un problema importante para la construcción de túneles. Este tipo de incidente ocurrió dos veces en los túneles estudiados, donde el derrumbe de rocas provocó la aparición de un agujero considerable en el techo cerca de la cara del túnel. En el arcén del túnel, se produjeron entradas de agua subterránea

y gotas de agua. Las tuberías de drenaje no drenaron adecuadamente el agua subterránea y la alta presión del agua provocó problemas de filtración a lo largo del acero tipo "I". Entrada de agua subterránea desde el suelo del túnel, por lo que la construcción del piso del túnel se vio afectada por el agua del piso, empeorando el ambiente de trabajo. Drenaje inadecuado, el flujo de agua subterránea aumentó la presión del agua en la parte posterior del revestimiento impermeable (Li et al., 2009).

Para simular con precisión el flujo de agua subterránea en los túneles, se hicieron algunas suposiciones y simplificaciones. La heterogeneidad del macizo rocoso y la complejidad del flujo de agua en las juntas de roca dificultaron la simulación del flujo alrededor de los túneles. Por otro lado, al diseñar un túnel por debajo del nivel freático, se utilizaron métodos empíricos y pautas de impermeabilización para ingeniería subterránea. Dos tipos de túneles fueron estudiados, el túnel de doble arco y el túnel de doble tubo; el túnel de doble arco Bimaxi, situado en Jishou, China y el túnel de doble tubo ampliamente espaciado conocido como túnel Qingshangang, fueron elegidos como casos de modelado numérico para analizar el campo de filtración de agua subterránea en la masa rocosa. Durante el estudio se encontró que las fallas de los acuíferos, los problemas de drenaje, las juntas de rocas y las capas freáticas subterráneas son algunos ejemplos de variables que pueden alterar tanto el estado del flujo como la distribución de la presión intersticial (Li et al., 2009).

En base a los resultados del modelo y las investigaciones del sitio, se desarrolló una contramedida innovadora para mejorar el rendimiento del drenaje y reducir las fugas de agua en los túneles, un sistema compuesto por zanjas de captación de agua, alas autoadhesivas y orificios de drenaje para la captación y drenaje de aguas subterráneas, que se instala utilizando el agua

subterránea para cementar la membrana plástica a la superficie de la roca antes del revestimiento inicial como se observa en la **Figura 1**.

### **Figura 1**

*Sistema de recolección de agua instalado en el sitio*



*Nota.* La zanja de recolección de agua está hecha de una membrana de plástico reforzada con alambres de acero. Tomado de Li et al. (2009).

### **Aplicación e Innovación de Geotextiles en Ingeniería Geotécnica**

Según Wu et al. (2020), “los geosintéticos son elementos fabricados a partir de materiales poliméricos, ya sean sintéticos o naturales, que se emplean en contacto con el suelo, la roca u otros materiales geotécnicos, los principales tipos de materiales geosintéticos son el geotextil, la geomalla, la geocelda, la geored y la geomembrana, entre estos, los geosintéticos más populares son los geotextiles”. Los geotextiles se consideran asequibles, fuertes y fáciles de usar, debido a esto, los geotextiles se están volviendo cada vez más indispensables en la ingeniería geotécnica

actual. La gran parte de los geotextiles están compuestos por polímeros pertenecientes a la familia de las poliolefinas, poliésteres o poliamidas, las cuales generan preocupaciones ambientales relacionadas con la posible contaminación del suelo.

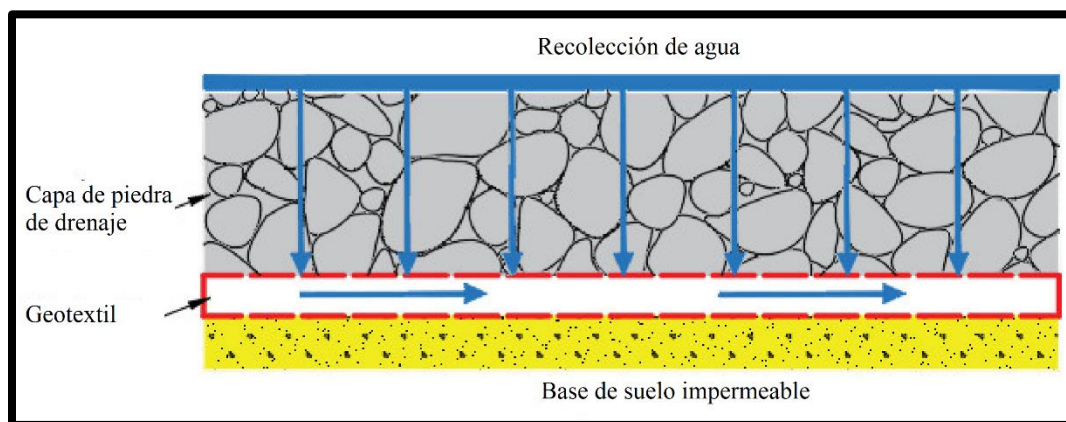
Esta investigación realizada en China en el año 2020 trata sobre la composición y el uso de los geotextiles en ingeniería geotécnica. También menciona los avances más recientes en geotextiles, con un enfoque en geotextiles verdes, geotextiles inteligentes y geotextiles de alto rendimiento, según la literatura que incluye los datos más recientes.

El componente fundamental de los geotextiles hoy en día es principalmente fibra sintética, el material más utilizado en relación con los geotextiles es el polipropileno (PP), seguido del tereftalato de polietileno (PET) y el polietileno (PE) (Prambauer et al., 2019). Los geotextiles se pueden utilizar para múltiples funciones, las mencionadas en la investigación son: separación, filtración, drenaje y refuerzo. La separación hace referencia a la capacidad de los geotextiles para separar dos tipos diferentes de materiales, evitar que esos materiales se mezclen y preservar la integridad estructural y química de varios materiales. Debido a su permeabilidad positiva y permeabilidad al aire, los geotextiles se pueden usar en estructuras de suelo para permitir que el líquido en el suelo pase y se descargue, así como para desempeñar un papel en la conservación del suelo, esto puede prevenir eficazmente la pérdida de partículas de suelo, arena fina y pequeñas piedras en el área aguas arriba, así como el daño del suelo (Cao et al., 2020; Muthukumaran & Ilamparuthi, 2006). Debido a su buena conductividad del agua, los geotextiles se utilizan como canales de drenaje, los geotextiles permiten la recolección y descarga gradual de agua de la estructura del suelo, como se observa en la **Figura 2**. Los geotextiles se colocan en el interior del suelo como materiales de refuerzo para formar un suelo compuesto reforzado, en

comparación con el suelo no reforzado, la resistencia y el rendimiento de deformación de los suelos compuestos reforzados mejoran considerablemente (Wu et al., 2020).

## Figura 2

### *Función de drenaje de los geotextiles*



*Nota.* Traducido y adaptado de Wu et al. (2020).

Además, esta investigación menciona el desarrollo reciente de geotextiles, con énfasis en geotextiles verdes, geotextiles inteligentes y geotextiles de alto rendimiento, revisando la situación actual de estos nuevos geotextiles y su aplicación en ingeniería geotécnica.

Referente a los geotextiles verdes, los polímeros no degradables constituyen la mayoría de los geotextiles, debido a factores ambientales externos como el viento, el agua, la fricción y la radiación ultravioleta, los polímeros sintéticos pueden descomponerse y acumular microplásticos en el medio ambiente (Carneiro et al., 2018), además, los aditivos se pueden filtrar fuera del geotextil como resultado de la desintegración del polímero, contaminando el entorno (Wiewel & Lamoree, 2016). Las características de los geotextiles fabricados con fibras naturales son adecuadas para la mayoría de las aplicaciones, además de ser económicos y biodegradables, como resultado, los geotextiles naturales tienen el potencial de reemplazar a los geotextiles

sintéticos en muchas de sus aplicaciones (Bhattacharyya et al., 2010; Evangeline et al., 2021). Las fibras naturales vienen en tres variedades diferentes: fibras minerales, fibras animales y fibras vegetales; las fibras vegetales se han convertido en la mejor opción para los geotextiles naturales debido a sus fuentes abundantes, la simplicidad en la extracción, el bajo costo y su rendimiento superior. La durabilidad limita la aplicación de geotextiles de fibra natural, sin embargo, la durabilidad del geotextil natural se puede mejorar mediante la adición de fibras sintéticas y de modificaciones químicas (Wu et al., 2020).

Referente a los geotextiles inteligentes (con sensores de fibra óptica), estos se pueden aplicar al refuerzo de la estructura, garantizando que la ubicación de fallas y daños se puedan encontrar en la etapa inicial, lo que conduce a una prevención y mantenimiento por adelantado; teniendo en cuenta que las propiedades del sensor afectan la capacidad de monitoreo del geotextil inteligente (Habel & Krebber, 2011). Referente a los geotextiles de alto rendimiento, un área clave del desarrollo de geotextiles son los materiales de alto rendimiento como el vidrio o la fibra de basalto para crear un geotextil con excelentes propiedades. Actualmente, los principales métodos utilizados para abordar las fallas de desempeño del geotextil son modificarlo y agregar aditivos, además, mediante la incorporación de nanofibras en geotextiles, será posible crear tejidos con cualidades excepcionales y distintivas en el futuro (Wu et al., 2020).

### **Sistemas Sostenibles de Drenaje de Pavimentos: Humedad de la Subrasante, Métodos de Drenaje Subterráneo y Eficacia del Drenaje**

Según Chu et al. (2023), el contenido de humedad en la subrasante puede cambiar como resultado de la lluvia, la acción capilar, la evaporación, la evapotranspiración, las inundaciones y los cambios en el nivel freático, cuando está saturada, el agua creará una presión intersticial

positiva, lo que disminuirá el estrés efectivo y, por lo tanto, reducirá la carga transportada por las partículas del suelo. El aumento del contenido de humedad, incluso cuando no está saturado, disminuye las propiedades mecánicas, como resultado, la capacidad de carga estructural disminuirá y el agua acelerará el deterioro de los cimientos de las estructuras del pavimento bajo cargas de tránsito repetidas, poniendo en peligro la estabilidad y confiabilidad del transporte. En las estructuras de pavimento, el drenaje se utiliza con frecuencia para evitar que el agua entre en el pavimento o para bajar el nivel freático para regular el contenido de humedad de las diferentes capas de la carretera, el diseño para el drenaje del pavimento se puede facilitar si se tiene un conocimiento profundo de las técnicas de drenaje y su eficacia.

Esta investigación realizada en el Reino Unido en el año 2023 explica las condiciones de humedad en las estructuras del pavimento, incluida una descripción general estructural, la fuente del agua, el daño inducido por el agua y la variación de la humedad en la subrasante; presenta las técnicas comunes de drenaje subterráneo; y demuestra la eficacia del drenaje, incluida la eficacia hidráulica y mecánica, así como los factores que influyen en esta. Esta investigación busca ampliar nuestra comprensión de la eficiencia del drenaje del pavimento y servir como guía para los sistemas de drenaje del subsuelo del pavimento sostenibles.

Hay dos tipos de pavimentos: pavimentos flexibles y pavimentos rígidos, la principal diferencia mecánica entre pavimentos rígidos y flexibles es cómo se transfiere la carga a la subrasante (Lebeau & Konrad, 2009). La capa superficial, la base del pavimento, la subbase y la base del pavimento (subrasante) son las capas más comunes de un pavimento; varios procesos, incluida la infiltración superficial, la infiltración a través de la berma, la infiltración a través de grietas y juntas, la acción capilar y el aumento del nivel freático, pueden provocar que el agua migre hacia la sección de pavimento estructural (Ridgeway, 1982). El agua subterránea en los

cimientos del pavimento tiene un impacto directo en el desempeño estructural de las estructuras y la eficacia con la que pueden realizar sus funciones; los factores predominantes que afectan la variación de humedad en la estructura del subsuelo del pavimento son la lluvia y el drenaje, al tomar en cuenta estos dos factores, la investigación de campo previa, las simulaciones por computadora y las pruebas de laboratorio, se puede determinar el rango de variación de la humedad (Chu et al., 2023).

Una capa de drenaje permeable, un sistema de suministro de agua, una capa de filtro y un sistema de recolección de agua son los componentes típicos de un drenaje subterráneo, en donde principalmente se usan dos criterios para calcular la permeabilidad requerida de una capa de drenaje: un tiempo para un porcentaje específico de drenaje, y un criterio de flujo de entrada y salida (Ridgeway, 1982). La investigación presenta cuatro ejemplos de técnicas de drenaje subterráneo (capas de base permeables como drenaje, drenaje transversal, drenaje longitudinal y drenajes subterráneos). Debajo de las capas de pavimento, la capa de drenaje puede ser una capa base o una capa de drenaje separada, el agua debe ser removida en ambas situaciones, ya sea a través de desagües longitudinales o directamente a la superficie exterior del terraplén, las capas de drenaje geosintéticas (georedes que actúan como capas drenables y geotextiles que actúan como capas de separación) se pueden usar para crear una configuración similar. Los drenajes transversales se colocan paralelos a la línea central de la calzada, dado que el deterioro de las juntas puede causar que el agua se filtre en la estructura del subsuelo, los drenajes transversales son cruciales en las áreas de transición, como las juntas debajo de los pavimentos de concreto. Para evitar que el agua penetre en los cimientos de los pavimentos, se utilizan con frecuencia técnicas de drenaje longitudinal como zanjas o depresiones. Por último, en una zanja con componentes de drenaje envueltos en geosintéticos, se pueden colocar drenajes subterráneos, los

cuales por lo general se construyen justo debajo de la posición que se va a drenar (Chu et al., 2023).

Luego, el artículo nos habla sobre la efectividad del drenaje, haciendo mención a la eficacia hidráulica, la eficacia mecánica y los factores que influyen en el rendimiento del drenaje, como por ejemplo los tipos estructurales de pavimento, las precipitaciones, el diseño geométrico y las propiedades hidráulicas de los materiales. Para finalizar, se generó una discusión sobre métodos de drenaje innovadores, en el que se propuso una capa drenante de polímero compuesto, cuyo diseño está basado en una capa de polímero ultradelgada que no reacciona con el agua (espuma de poliuretano de dos componentes) ubicada entre dos capas de geocompuesto permeable, se prevé que este método proporcione de manera efectiva una barrera hidráulica, un refuerzo mecánico y un aislamiento térmico para la estructura del pavimento; sin embargo, todavía faltan estudios sobre cómo el drenaje podría afectar el rendimiento de los cimientos. Los autores del artículo buscan que este estudio sirva como guía para la creación, el avance y el mantenimiento de sistemas sostenibles de drenaje subterráneo de pavimentos a futuro (Chu et al., 2023).

### **Análisis y Discusión de las Investigaciones y Avances Internacionales**

Al realizar la consulta sobre investigaciones y avances internacionales de las obras de drenaje subterráneo, lo primero que llama la atención es la cantidad de artículos y avances que se presentan en China comparado al resto de países europeos y asiáticos; y no solamente la cantidad, si no la calidad de estos avances. Por ejemplo, el artículo relacionado a flujo de agua subterránea en túneles, escrito por Li et al. (2009) y su sistema innovador propuesto de recolección de agua en túneles sigue siendo a día de hoy un avance interesante y único para las

obras de subdrenaje, ya que la mayoría de artículos de otros países internacionales se centran en estas obras aplicadas a carreteras o a cultivos, dejando a los túneles con sistemas de subdrenaje iguales a los típicos usados en carreteras.

Los avances internacionales más relevantes encontrados fueron sobre los geosintéticos, principalmente los geotextiles y sobre los sistemas de drenaje sostenible, en los que nuevamente, China genera en primera y mayor manera. Aunque en los últimos 30 años los avances más relevantes referentes a obras de subdrenaje se han centrado en el desarrollo de nuevos y mejores geosintéticos (geotextiles, geomallas, geoceldas, geodrenes y geomembranas), en la actualidad, las investigaciones giran en torno a un drenaje y subdrenaje sostenible y al uso de geotextiles verdes, con el objetivo de reducir el impacto medio ambiental de las obras urbanas y viales, siendo China el origen del término “ciudad esponja”. Este enfoque de planificación urbana se centra en el control de inundaciones y la mitigación de los efectos del desarrollo urbano en la hidrología y los ecosistemas, su objetivo es aumentar la infiltración, retención, almacenamiento, tratamiento y drenaje del agua, al tiempo que mejora la habitabilidad en las zonas urbanas.

Al comparar las últimas investigaciones, mientras que en el artículo escrito por Chu et al. (2023) en el Reino Unido se proporcionan pautas y referencia para facilitar el diseño, desarrollo y mantenimiento de sistemas sostenibles de drenaje subterráneo de pavimentos para un futuro; ya algunos años antes en China, Wu et al. (2020) investigaron el desarrollo no solo de geotextiles inteligentes y de alto rendimiento para su uso en drenajes y refuerzos, sino también de geotextiles verdes con fibra vegetal como opción económica y biodegradable.

Otra investigación que se ha desarrollado en China en los últimos años son los efectos de las sustancias de obstrucción y de la precipitación química sobre la permeabilidad de los geotextiles en sistemas de drenaje subterráneo (Guo et al., 2021). Se menciona que en los

sistemas de drenaje, los geotextiles son un sustituto útil de los filtros granulares convencionales, especialmente en lugares donde los materiales granulares son escasos (Tiwari & Goel, 2017); debido a que puede disminuir la permeabilidad de las envolturas de drenaje, la obstrucción es un problema importante cuando se utilizan envolturas de geotextil como filtros en los sistemas de drenaje subterráneo (Guo et al., 2020; Palmeira & Trejos Galvis, 2017); la obstrucción ocurre dentro del marco estructural de la envoltura del geotextil y puede resultar de la invasión de partículas del suelo, así como de la precipitación química y/u orgánica, por lo tanto, la obstrucción puede ser un proceso físico, químico, bioquímico o biológico (Yu & Rowe, 2012); dependiendo del clima y las características del suelo, las sales como el yeso, los depósitos de ocre, el lodo de azufre, el sulfuro de hierro y la cal pueden precipitar y causar obstrucciones químicas o bioquímicas (Kim et al., 2020), siendo la obstrucción por formación de ocre de hierro la más investigada (Correia et al., 2017).

En Europa, se han desarrollado en los últimos años investigaciones interesantes sobre los SUDS o sistemas de drenaje urbano sostenible, por ejemplo, en Islandia se han estudiado las implicaciones para los SUDS que tiene la capacidad de infiltración en áreas urbanas sujetas a frecuentes nevadas y ciclos de hielo-deshielo (Zaqout et al., 2022); se menciona que la capacidad de los SUDS para filtrar y tratar la escorrentía superficial depende en gran medida de su capacidad de infiltración (García-Serrana et al., 2017; Rujner et al., 2018) y que la posible aparición de heladas que limitan la infiltración son una preocupación importante con la amplia adopción de SUDS en climas fríos (Paus et al., 2016; Zaqout & Andradóttir, 2021), haciendo que las superficies normalmente permeables ya no lo sean; sin embargo, también hay indicios de que los sistemas de biorretención pueden continuar funcionando de manera efectiva en condiciones de temperaturas bajo cero (Khan et al., 2012), los informes contradictorios sobre la infiltración

invernal y la formación de escarcha se deben a una compleja interacción entre el suelo, la cubierta vegetal y las condiciones climáticas. En España, se ha estudiado cómo los sistemas de drenaje urbano sostenible afectan la eliminación de microplásticos de la escorrentía urbana (García-Haba et al., 2023); se menciona que los SUDS son “enfoques diseñados y basados en la naturaleza utilizados para gestionar las aguas pluviales en entornos urbanos, con el objetivo de mejorar la calidad del agua y protegerla de la contaminación difusa, al incorporar dispositivos de gestión de escorrentía en el paisaje urbano, los SUDS buscan imitar y restaurar los procesos hidrológicos que existían antes del desarrollo urbano, tales como la filtración, la infiltración y la evapotranspiración” (Andrés-Doménech et al., 2021); de acuerdo con la literatura y los estudios analizados, se cree firmemente que los SUDS son una solución efectiva para el manejo de microplásticos, demostrando que sistemas basados en sedimentación, como humedales o estanques, y los sistemas basados en filtración, como celdas de biorretención o jardines, retienen de manera efectiva una cantidad significativa de microplásticos.

## **Capítulo 2: Investigaciones y Avances Continentales de las Obras de Drenaje Subterráneo**

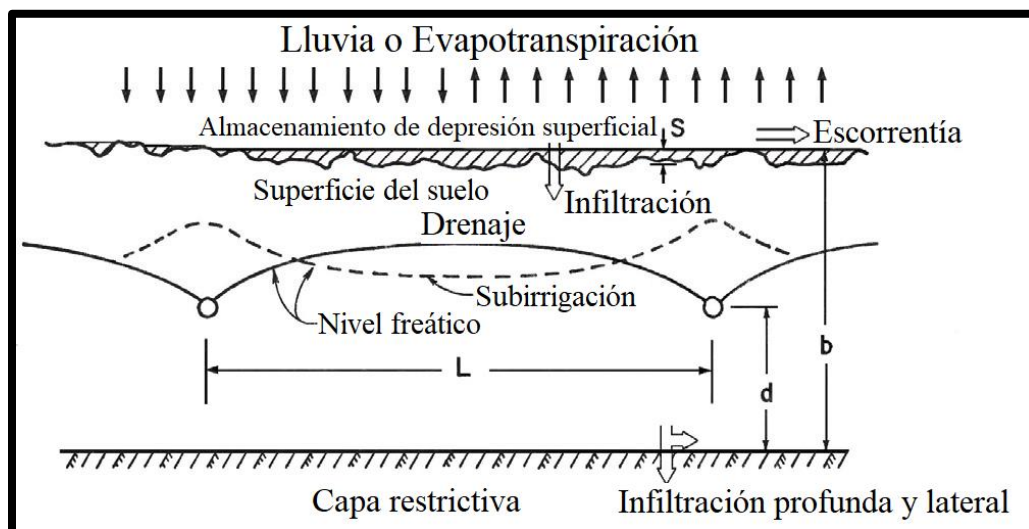
### **DRAINMOD: Uso, Calibración y Validación del Modelo**

Según Skaggs et al. (2012), DRAINMOD se creó inicialmente como un modelo de simulación basado en procesos y a escala de campo para ofrecer una forma de cuantificar continuamente el rendimiento del drenaje y de los sistemas de gestión del agua asociados. El modelo describe la hidrología de suelos de nivel freático poco profundo, con drenaje deficiente o drenaje artificial. Se basa en balances hídricos básicos en el perfil del suelo, en la superficie del suelo y, en algunos casos, en los laterales, tuberías principales y sumideros del sistema de drenaje y subdrenaje. El Dr. Wayne Skaggs creó el modelo de simulación por computadora DRAINMOD en 1980 en la Universidad Estatal de Carolina del Norte.

Esta investigación realizada en Estados Unidos en el año 2012 trata sobre el uso, la calibración y la validación de un modelo en DRAINMOD; el modelo y los algoritmos que se utilizan para cuantificar los diversos componentes hidrológicos se describen en el artículo. En la **Figura 3** se pueden observar los principales componentes hidrológicos de un sistema de gestión del nivel freático y drenaje subterráneo. Las entradas del modelo para las características de los cultivos, los parámetros del sitio, los datos meteorológicos y las propiedades del suelo se presentan y analizan en relación con su función en la calibración. Esta investigación nos permite ver que además de los avances en las obras de drenaje subterráneo enfocadas en carreteras o túneles, también se han desarrollado avances en el drenaje y subdrenaje de cultivos y de suelos en general.

**Figura 3**

*Principales componentes hidrológicos de un sistema de gestión del nivel freático y drenaje subterráneo*



*Nota.* Traducido y adaptado de Skaggs et al. (2012).

Por medio de DRAINMOD se predicen las variables hidrológicas (infiltración, drenaje subterráneo, escorrentía superficial, evapotranspiración, filtración vertical y lateral, profundidad del nivel freático y espacio poroso drenado o sin agua en el perfil del suelo), y también se pueden predecir resultados adicionales, como rendimientos anticipados de cultivos, la profundidad del agua de riego aplicada y variables que indican el estado hidrológico de un humedal. El usuario puede optar por ver los resultados resumidos en forma diaria, mensual, anual o clasificada (Skaggs et al., 2012).

A continuación, el artículo nos da una breve descripción de las técnicas para calcular los balances hídricos y cuantificar los componentes hidrológicos: el modelo se basa en un balance hídrico para una sección de suelo por unidad de superficie que se extiende desde la capa impermeable hasta la superficie y está situada en medio de dos drenajes paralelos. La

precipitación por hora, las temperaturas del aire diarias más altas y más bajas y, si corresponde, los valores diarios de evapotranspiración potencial constituyen las entradas para los datos meteorológicos. La profundidad típica de las depresiones de almacenamiento que deben llenarse antes de que pueda comenzar la escorrentía determina la intensidad del drenaje superficial. Para una variedad de condiciones del agua del suelo y del nivel freático, las tasas de drenaje del subsuelo se calculan utilizando una combinación de métodos relacionados con la elevación del nivel freático y la tasa de drenaje. El modelo puede simular el riego subterráneo y el drenaje controlado por separado o en combinación con el drenaje tradicional. Se asume que el agua del suelo se distribuye en dos zonas: una zona húmeda que se extiende desde el nivel freático hasta la zona de raíces (y posiblemente a través de la zona de raíces hasta la superficie) y una zona seca. El modelo determina la cantidad de hielo en el perfil en condiciones de congelación y modifica las propiedades del suelo, las tasas de infiltración y las tasas de drenaje en consecuencia (Skaggs et al., 2012).

El hecho de que DRAINMOD sea un modelo basado en procesos con entradas independientes y medibles es una de sus principales ventajas, la base física de las entradas permite elegir valores dentro de un rango razonable en el proceso de calibración, incluso cuando no se pueden medir los parámetros del sitio y las propiedades del suelo. La principal desventaja es que, para describir varios procesos hidrológicos, puede ser necesario usar una mayor cantidad de entradas que en modelos más abstractos que agrupan los procesos para simplificarlos (Skaggs et al., 2012).

## **Programa Informático para Examinar la Dinámica del Agua en los Sistemas de Subdrenaje Agrícola**

Según Zavala et al. (2014), "los sistemas de subdrenaje agrícola posibilitan la pronta eliminación del exceso de agua en la zona de las raíces, ocasionado por niveles freáticos bajos, precipitaciones intensas, riego excesivo y aportes de agua subterránea proveniente de áreas más elevadas; asimismo, estos sistemas contribuyen a la recuperación de suelos perjudicados por la salinidad al permitir el drenaje de las sales presentes en el perfil del suelo". El diseño de estos sistemas puede ser realizado utilizando un modelo que simule las diferentes causas que provocan cambios en las variables hidráulicas fundamentales, es por esto que es necesario utilizar una herramienta informática para analizar el drenaje agrícola con el fin de describir los cambios en el nivel freático y el caudal de drenaje teniendo en cuenta las propiedades que tiene el suelo, las características y ubicación de los drenajes, y la infiltración de acuíferos

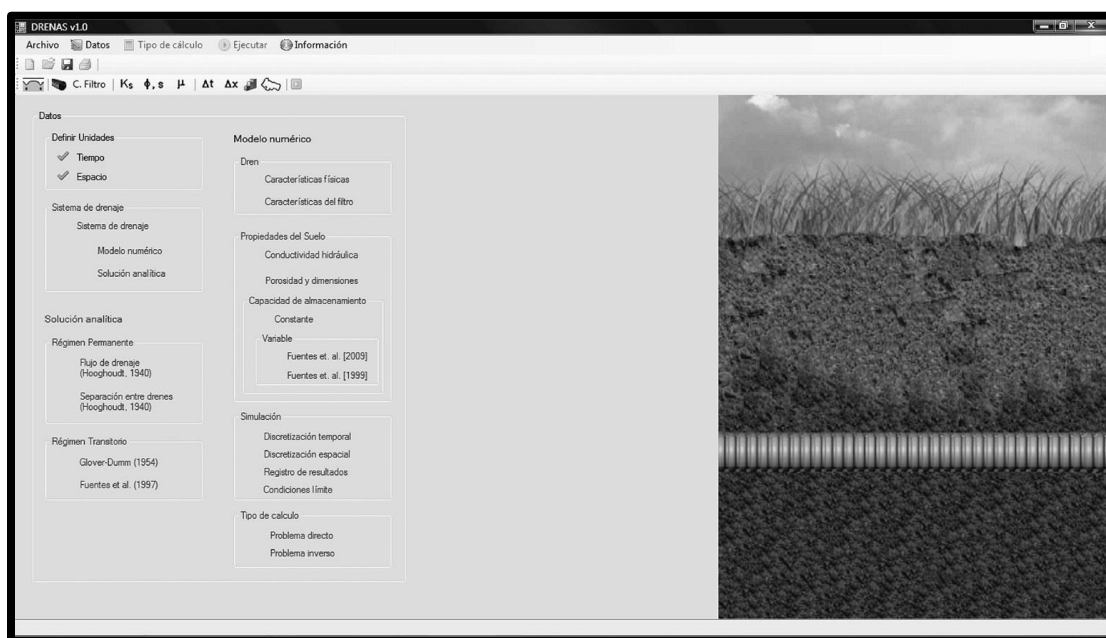
Esta investigación realizada en México en el año 2014 trata sobre la creación y el desarrollo de un programa informático llamado DRENAS (drenaje agrícola subterráneo), que simula el comportamiento hidráulico de los sistemas de drenaje subterráneo. Uno de los programas gratuitos más conocidos para el drenaje agrícola subterráneo es DRAINMOD, creado por Skaggs en 1980 y mencionado anteriormente en la monografía, en este programa se tiene en cuenta varias ecuaciones, por ejemplo, la ecuación de conservación de masa para realizar balances hídricos en el perfil del suelo y describir el caudal de drenaje. Sin embargo, de acuerdo a Zavala et al. (2014), "estas ecuaciones están formuladas para un flujo permanente y condiciones de drenaje de frontera simplificadas, lo que significa que no capturan de manera precisa las variaciones temporales en la carga hidráulica y el volumen de agua extraída del suelo".

La iteración inicial del programa, que se ejecuta en computadoras basadas en Windows, se creó para realizar el modelado unidimensional de los sistemas de drenaje implementados en suelos homogéneos e isotrópicos. “La codificación de la solución numérica y su interfaz gráfica de usuario se realizó utilizando el lenguaje de programación Visual Basic en un módulo que contiene soluciones analíticas para drenaje agrícola, esto se hizo para proporcionar a los usuarios posibilidades adicionales de análisis y diseño” (Zavala et al., 2014).

Las dos partes principales del programa son: la ventana de inicio, y la pantalla general con los módulos de cálculo numérico y analítico como se observa en la **Figura 4**. Los apartados de introducción de los parámetros de simulación y del sistema de drenaje del suelo se activan al elegir la opción "Modelo Numérico"; el primer apartado, “Sistema de Drenaje”, debe llenarse a partir de las características físicas del sistema (Zavala et al., 2014).

#### Figura 4

##### *Pantalla general del programa DRENAS*



*Nota.* Tomado de Zavala et al. (2014).

DRENAS incluye una base de datos con parámetros hidráulicos y físicos del suelo, que muestra detalles sobre las características de los drenajes agrícolas, tiene un apartado para definir la tasa de recarga vertical y permite al usuario elegir la variable a mostrar, ya sea nivel freático, caudal drenado, carga hidráulica, o profundidad drenada; la elección de la condición de inicio y el tipo de condición límite para aplicar a los drenajes son otras posibilidades del programa (Zavala et al., 2014).

Las variables de diseño de un sistema de subdrenaje (flujo de drenaje y separación entre drenajes), pueden ser calculadas por los usuarios utilizando el módulo de soluciones analíticas. Además, permite exportar los resultados de la simulación para su procesamiento en otro software; concluyendo que, el software DRENAS realiza un seguimiento preciso y constante de la evolución del nivel freático y del caudal de drenaje en acuíferos poco profundos no confinados para condiciones de suelo homogéneas e isotrópicas con recarga vertical conocida (Zavala et al., 2014).

En el año 2020, se creó la segunda iteración del programa informático DRENAS en Visual Basic 2017 para mejorar su interfaz gráfica de usuario, su capacidad para realizar cálculos y su capacidad para manejar datos sin depender de otras aplicaciones. El programa DRENAS actualizado (versión 2.0) se puede utilizar para diseñar un sistema de drenaje, describir la operación hidráulica de drenajes subterráneos y resolver problemas causados por eventos de drenaje utilizando la caracterización hidrodinámica del suelo (Zavala et al., 2020).

## **Pavimentos Permeables como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)**

Según Guerra Chayña & Guerra Ramos (2020), en los últimos años, ha habido problemas de drenaje provocados por las fuertes lluvias, incluida la falta de evaporación del agua, la contaminación, la interrupción del ciclo hidrológico, el aumento del flujo de escorrentía, y el aumento de las inundaciones. Todos estos problemas son el resultado del crecimiento de las áreas pavimentadas, que se correlaciona con el crecimiento de la población. Como respuesta a esta necesidad, se están desarrollando sistemas de drenaje sostenibles con el objetivo de restaurar el ciclo natural del agua y minimizar los efectos adversos ocasionados por la construcción de las obras. Por lo tanto, se propone el pavimento permeable como un diseño de drenaje sostenible que puede abordar el problema; este pavimento permite que el agua pase a través de su estructura y la almacene temporalmente en la subbase para su posterior eliminación o infiltración en el suelo.

Esta investigación realizada en Perú en el año 2020 trata sobre los pavimentos rígidos permeables y los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS); ya que por lo general los criterios para el diseño y construcción de las superficies de rodadura suelen centrarse en la accesibilidad, la resistencia y la eficiencia económica, y no se tiene en cuenta externalidades como el daño ambiental. Los autores de la investigación buscan presentar avances en el diseño y en el uso de pavimentos rígidos permeables como sistemas de subdrenaje que permitan la recolección, el transporte, la retención y la infiltración sostenible del agua.

Con el fin de analizar el desempeño de un pavimento permeable rígido en términos de mejorar la calidad del drenaje, se diseñaron cuatro tramos viales de estudio como infraestructura urbana de bajo tráfico en Juliaca, Perú. Durante el proceso metodológico se definieron los tramos, se recopilaban los datos pertinentes, se crearon los diseños necesarios, se verificó la

validez a través de pruebas y se determinó el grado de confiabilidad que estos nos podían ofrecer (Guerra Chayña & Guerra Ramos, 2020).

La calidad del drenaje juega un papel importante para el diseño del pavimento, por lo que se comparó el tiempo que tarda el agua en ser evacuada del diseño propuesto con el de un diseño convencional, obteniendo los datos mostrados en la **Tabla 1** (calidad excelente según la AASHTO). El pavimento permeable cuenta con una losa drenante de hormigón, una subbase de material granular, una capa anticontaminante que permite el paso vertical del agua y le da estabilidad, y un subdrenaje de tubería perforada; el diseño de la estructura de pavimento rígido permeable y del sistema de drenaje subterráneo se muestran en la **Figura 5**.

**Tabla 1**

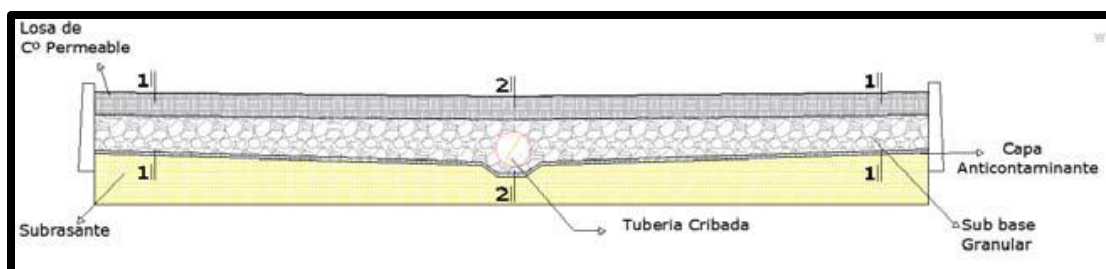
*Tiempo de infiltración del agua en el pavimento*

| Tipo de Pavimento               | Tiempo (Horas) |
|---------------------------------|----------------|
| Pavimento rígido (convencional) | 15,685         |
| Pavimento rígido permeable      | 1,363          |

Nota. Adaptado de Guerra Chayña & Guerra Ramos (2020).

**Figura 5**

*Estructura del Pavimento rígido permeable*



Nota. Tomado de Guerra Chayña & Guerra Ramos (2020).

Los resultados de Guerra Chayña & Guerra Ramos (2020) indican que “con los datos obtenidos, el pavimento rígido permeable funciona como un sistema de drenaje sostenible, ya que está previsto que elimine el agua superficial acumulada a través de una tubería perforada y una subbase filtrante, lo que permite una adecuada gestión del agua y maximiza la capacidad de almacenamiento y recarga”.

### **Análisis y Discusión de las Investigaciones y Avances Continentales**

Al realizar la consulta sobre investigaciones y avances continentales de las obras de drenaje subterráneo, lo que llama la atención es el diferente enfoque que se da en países como Estados Unidos y México, en donde la mayor cantidad de avances y artículos tratan sobre el drenaje y subdrenaje de cultivos y del suelo enfocado en la ingeniería agrícola. Como ejemplo, se presentaron dos investigaciones relacionadas con un software de simulación, DRAINMOD desarrollada por Skaggs et al. (2012) en Estados Unidos y DRENAS desarrollada por Zavala et al. (2014) en México; ambos programas buscan simular el funcionamiento hidráulico de los sistemas de drenaje subterráneo, prediciendo variables hidrológicas como la infiltración, la escorrentía, la evapotranspiración, la filtración y el nivel freático. Sin embargo, según Zavala et al. (2014), “dado que las ecuaciones de DRAINMOD están diseñadas para un régimen de flujo constante y condiciones de drenaje límite simplificadas, no pueden capturar con precisión las fluctuaciones temporales de la cabeza hidráulica y la cantidad de agua extraída del suelo”. Por esta razón desarrollaron el programa “DRENAS”, buscando abarcar estas variaciones de carga y volumen. Además de los avances en subdrenajes para ingeniería agrícola, los avances continentales más relevantes encontrados en otros países como Perú y Colombia son sobre los SUDS, ya que por lo general los criterios para el diseño urbano y la construcción de carreteras

suelen centrarse en la accesibilidad, la resistencia y la eficiencia económica, y no se tiene en cuenta el daño ambiental, generando problemas de drenaje provocados por las fuertes lluvias, incluyendo la falta de evaporación del agua, la contaminación, la interrupción del ciclo hidrológico, el aumento del flujo de escorrentía, y el aumento de las inundaciones.

Aunque los SUDS se han ido implementando en años recientes en Norteamérica, Europa y Asia, muchos países latinoamericanos todavía no tienen definida la infraestructura y la inversión económica para implementar estos sistemas en sus ciudades; es por esto que investigaciones y avances como el de Guerra Chayña & Guerra Ramos (2020) sobre pavimentos permeables buscan dar un paso en la implementación de estos como SUDS en América Latina.

Al igual que lo mencionado en el análisis internacional, las últimas investigaciones giran en torno a un drenaje y subdrenaje sostenible con el objetivo de reducir el impacto medio ambiental de las obras urbanas y viales. Las obras de subdrenaje actuales ya no solo buscan captar y evacuar el agua de infiltración, del nivel freático o de la escorrentía; si no también reducir su contaminación, su tiempo de concentración, su caudal de escorrentía, recuperar su ciclo natural y reducir las inundaciones urbanas.

Otra investigación que se ha desarrollado en Estados Unidos en los últimos años es el comportamiento del pavimento permeable sobre un suelo arcilloso en términos de desempeño hidrológico y de calidad del agua; se menciona que, cuando se instala sobre suelos con altas tasas de infiltración, el pavimento permeable es una herramienta eficaz para mejorar la hidrología de las aguas pluviales y la calidad del agua, pero su eficacia sobre suelos menos permeables no está clara, por esta razón se examinó el comportamiento de un pavimento permeable sobre suelos arcillosos de baja conductividad, encontrando que puede mejorar significativamente la calidad del agua y la hidrología a largo plazo (Braswell et al., 2018).

### **Capítulo 3: Investigaciones y Avances Nacionales de las Obras de Drenaje Subterráneo**

#### **Uso de Geosintéticos en Colombia**

Según Mejía Flores & Caro Spinel (2005), el desempeño de los geosintéticos permite brindar soluciones de ingeniería efectivas en varias escalas, su uso generalizado ha sido posible gracias a sus ventajas sobre otras técnicas para mejorar las condiciones in situ. Debido al avance tecnológico y al estricto control de calidad, son capaces de realizar mejor ciertas funciones específicas (separación, estabilización, recubrimiento para asfalto, drenaje y refuerzo), además, son más económicos de utilizar, ya sea por requerir una menor inversión inicial o por alargar la vida útil de la estructura.

Esta investigación realizada en Bogotá - Colombia, en el año 2005 trata sobre el uso de varios tipos de geosintéticos en los proyectos y obras referentes a pavimentación en Colombia, destacando cuatro tipos principales de geosintéticos: los geotextiles, las geomallas, los geobloques y los geodrenes. También, los autores realizan una comparación de la aplicación, el diseño y las condiciones de mercado de los geosintéticos en Colombia dentro del contexto mundial, así como sugerencias para mejorar su uso, investigación y difusión en Colombia.

Colombia utiliza los geotextiles, las geomallas y los geocompuestos como geodrenes de la misma manera que lo hace el resto del mundo, sin embargo, debido a dificultades que son principalmente de carácter económico, los geobloques aún no han logrado su inclusión generalizada en el mercado colombiano. El uso de geosintéticos colombianos no se ve obstaculizado significativamente por la tecnología, el hecho de que las empresas nacionales se encarguen de fabricar los materiales que demanda el mercado en grandes cantidades demuestra que se tiene la capacidad para enfrentar el desafío de utilizar geosintéticos en el diseño de pavimentos (Mejía Flores & Caro Spinel, 2005).

Mejía Flores & Caro Spinel (2005) sugieren algunas acciones que establecen líneas de investigación y fomentan la difusión de la tecnología geosintética en Colombia con el fin de mejorar las condiciones que rigen el uso de estas herramientas en la ingeniería de pavimentos, estas acciones incluyen: considerar una variedad de factores al diseñar con geotextiles, incluido el medio ambiente, el ahorro de costos, los gastos de tiempo y los gastos de investigación; evitar que la gestión comercial interfiera con la comprensión real del ingeniero de las características inherentes de los geosintéticos; y evaluar continuamente las obras reforzadas con geosintéticos con el fin de reconocer su comportamiento, sus beneficios y sus desventajas en el contexto colombiano.

### **Uso del programa DRIP 2.0 para el Diseño del Drenajes Subsuperficiales en Pavimentos Flexibles.**

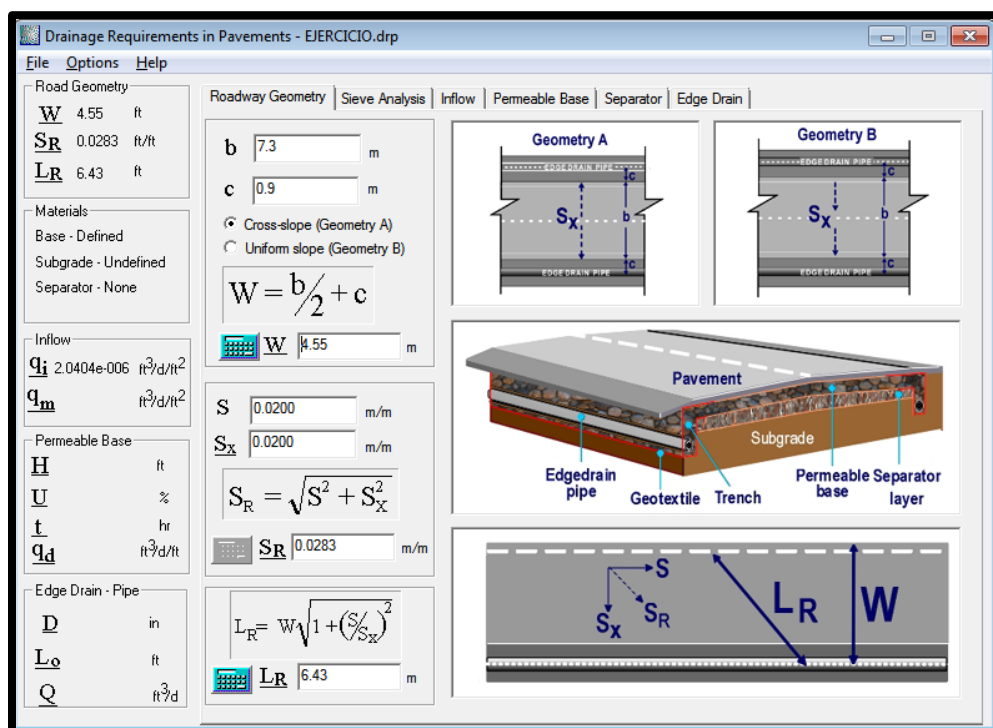
Según Campos Marín (2015), el diseño de sistemas de drenaje y subdrenaje en Colombia aún tiene un largo camino por recorrer y a la luz de este atraso, se requiere un nuevo enfoque para mejorar los criterios de diseño de la estructura del pavimento. La presencia de humedad tiene el potencial de impactar negativamente en los módulos de las mezclas, razón por la cual las estructuras no funcionan según lo previsto, debido a que las capas integradas no protegen a las capas más expuestas de la humedad.

Los programas de diseño de drenaje subsuperficial son poco conocidos, y lamentablemente hay poca información disponible debido a la falta de reseñas en la red. Este programa se menciona y se referencia en el manual de drenaje del INVIAS (2009, p. 398), pero “no se ha creado un enfoque práctico para verificar los hallazgos reales y mejorar los conceptos y diseños” (Campos Marín, 2015). Colombia experimenta una importante variación estacional de

las precipitaciones, por lo cual, la implementación de estos programas es muy beneficioso debido a las variaciones en la humedad de la estructura.

Esta investigación realizada en Bogotá - Colombia en el año 2015 trata sobre la implementación del software DRIP 2.0 (Drainage Requirements in Pavements) en el diseño de subdrenajes dado el estado actual de los pavimentos asfálticos en Colombia. Primero, desarrollaron la metodología para la aplicación del software analizando sus funciones más destacables; segundo, realizaron un ejercicio aplicativo para explicar la interfaz y funcionamiento del software; y, por último, compararon los resultados obtenidos del valor requerido de un espesor de base permeable mediante el software y mediante el nomograma presente en el Manual del INVIAS.

El programa DRIP 2.0 permite un análisis más detallado de las siguientes tareas: realizar diseños de capas separadoras y geotextiles; diseñar bordes de drenaje y aletas de drenaje con geocompuestos; calcular la profundidad del flujo y el tiempo de drenaje; y realizar diseños de drenaje para pavimentos flexibles y rígidos. En la **Figura 6** se puede observar la interfaz del programa durante la introducción de datos geométricos de la vía. Durante el análisis y explicación del software, se compararon los valores del espesor mínimo requerido de base permeable calculados mediante el nomograma del manual del INVIAS (2009, p. 375) y mediante el software, conociendo los valores de factores como la tasa de infiltración, la longitud y la pendiente resultante de la trayectoria de flujo, y el coeficiente de permeabilidad. Los resultados indicaron que el espesor mínimo determinado por el software fue de 14 cm a diferencia del nomograma del manual, que fue de unos 20 cm, demostrando que el método utilizado por el manual proporciona resultados conservadores, aumentando potencialmente los costos en un diseño con muchos kilómetros (Campos Marín, 2015).

**Figura 6***Interfaz del programa*

*Nota.* Esta interfaz se visualiza durante la introducción de datos de entrada geométricos de la vía.

Tomado de Campos Marín (2015).

De acuerdo al desarrollo de la investigación, Campos Marín (2015) indica que “el método del nomograma del manual INVIAS produjo aproximaciones para valores con poca precipitación, pero tuvo un gran porcentaje de error cuando la cantidad de precipitación aumentó; en cambio, el software DRIP 2.0 ofrece más detalles esquemáticos y tiene una alta sensibilidad a los valores de precipitación”.

### **Comparación entre el Geodrén Lamidren L20DB y el Dren Francés**

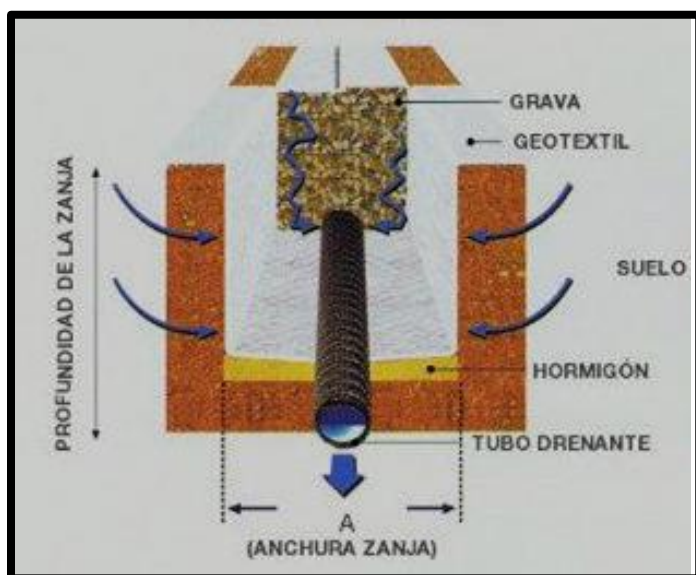
Según Navarro Castillo (2019), “debido a su geografía y patrones de lluvia, se considera que Colombia tiene algunos de los recursos hídricos más ricos del mundo, este hecho implica que los caminos están frecuentemente sometidos a la acción del agua de lluvia. Así mismo, una parte importante de la red vial del país se encuentra en zonas montañosas, donde las aguas subterráneas frecuentemente comprometen la estabilidad de los taludes y reducen la capacidad de los suelos para soportar los pavimentos”. La precipitación que entra directamente al suelo o cae sobre las fuentes de agua es la principal fuente de agua subterránea, como consecuencia, existen sistemas de drenaje subsuperficial que contribuyen a la captación, manejo y evacuación de aguas subterráneas sobre obras civiles específicas, particularmente vías.

Esta investigación realizada en Medellín - Colombia en el año 2019 trata sobre la comparación y evaluación del rendimiento hidráulico, mecánico y de la rentabilidad económica entre el dren francés y el geodrén Lamidren L20DB. Primero, se identificaron los factores que podrían afectar el diseño del subdrenaje, como lo son la geometría del dominio de flujo, las propiedades de los materiales, y los datos climatológicos. Segundo, se eligió un área de estudio, en este caso el municipio de Puerto Triunfo – Antioquia, con el objetivo de utilizar valores de precipitación y variables ambientales reales. Tercero, el método utilizado para la evaluación de la capacidad hidráulica consistió en diseñar los dos sistemas de drenaje subsuperficial para el mismo caudal de agua infiltrada en base a los parámetros de diseño indicados en el manual de drenaje vial del INVIAS (2009), con el fin de calcular la capacidad de evacuación para las condiciones climáticas presentes en la zona. Por último, se realizó un análisis de costos de construcción por metro lineal para cada sistema de subdrenaje en base a los parámetros obtenidos.

Aunque existen muchos tipos diferentes de subdrenaje, el drenaje tipo francés (**Figura 7**), que consiste en una zanja excavada, un tubo ranurado para la recolección y transporte de agua y un relleno de agregado filtrante, es uno de los tipos de drenaje tradicionales más utilizados actualmente en Colombia. Sin embargo, después de un cierto período de funcionamiento, el filtro comienza a obstruirse debido a la acumulación de tierra con granulometría fina, lo cual puede afectar la funcionalidad del drenaje y obligar a su reemplazo (Navarro Castillo, 2019).

**Figura 7**

*Subdrén francés*



*Nota.* Tomado de Navarro Castillo (2019).

“Con el fin de buscar soluciones tecnológicas que mejoren los sistemas de subdrenaje convencionales, ha surgido la utilización de geosintéticos como una alternativa eficiente, duradera y económica. Estos materiales encuentran aplicación en diversos campos de la construcción civil, destacándose su uso en obras hidráulicas para carreteras” (Navarro Castillo, 2019). El geodrén Lamidren L20DB (**Figura 8**) se destaca entre los geosintéticos gracias a su

extenso uso en obras viales, obras hidráulicas y túneles; este geodrén es un geocompuesto para subdrenaje fabricado en Colombia a partir de una membrana nodular de polietileno de alta densidad (PEAD) envuelta con geotextil, en el que la membrana actúa como medio drenante y el geotextil como filtro.

### **Figura 8**

*Lamidren L20DB como subdrenaje en vía*



*Nota.* Tomado de LAMIDREN (2018).

Ambos sistemas de subdrenaje pudieron eliminar el agua de manera efectiva en respuesta a un flujo infiltrado, sin embargo, como se observa en la **Tabla 2** el geodrén L20DB destaca en la comparación de capacidad hidráulica obteniendo una capacidad de evacuación de agua tres veces mayor que el sistema de drenaje francés.

**Tabla 2**

*Comparación hidráulica entre ambos sistemas de subdrenaje.*

| Sistema de subdrenaje                                   |                 |                        |
|---------------------------------------------------------|-----------------|------------------------|
|                                                         | Subdrén francés | Geodrén Lamidren L20DB |
| <b>Capacidad de drenaje (<math>cm^3 / s / m</math>)</b> | <b>767</b>      | <b>2310</b>            |

*Nota.* Adaptado de Navarro Castillo (2019).

El geodrén Lamidren L20DB demostró ser un 41% menos costoso que el sistema convencional de dren francés según el análisis de precios unitarios que se muestra en la **Tabla 3**. Según Navarro Castillo (2019), “esto se debe a que la gran capacidad del geodrén para transportar el agua que se infiltra permite la construcción de sistemas de drenaje subsuperficial menos conservadores, lo cual reduce los costos de materiales de relleno y excavación, al mismo tiempo que asegura el correcto funcionamiento del subdrenaje, además, el geodrén ofrece la posibilidad de tiempos de ejecución más cortos al permitir la creación de zanjas de drenaje más pequeñas”.

**Tabla 3**

*Análisis de costos para el subdrén francés y para el geodrén Lamidren L20DB*

|                                                       | Material                           | Unidad | Cantidad | Costo unitario | Total           |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------|--------|----------|----------------|-----------------|
| <b>Subdrenaje francés (análisis por metro lineal)</b> | <b>Geotextil FIBERTEX F20G</b>     | m2     | 2,70     | \$2.230        | \$6.020         |
|                                                       | <b>Tubería de drenaje de 100mm</b> | ml     | 1,05     | \$23.000       | \$24.150        |
|                                                       | <b>Material drenante</b>           | m3     | 0,32     | \$65.890       | \$21.085        |
|                                                       | <b>Excavación y retiro</b>         | m3     | 0,32     | \$18.000       | \$5.760         |
|                                                       | <b>Mano de obra</b>                | ml     | 1        | \$9.000        | \$9.000         |
|                                                       | <b>Total</b>                       |        |          |                | <b>\$66.015</b> |

|                                                            | Material                           | Unidad | Cantidad | Costo unitario | Total           |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------|----------|----------------|-----------------|
| <b>Geodrén Lamidren L20 DB (análisis por metro lineal)</b> | <b>Geodrén vial L20 DB x 1.30m</b> | ml     | 1,05     | \$15.200       | \$15.960        |
|                                                            | <b>Material drenante</b>           | m3     | 0,20     | \$65.890       | \$13.178        |
|                                                            | <b>Excavación y retiro</b>         | m3     | 0,20     | \$18.000       | \$3.600         |
|                                                            | <b>Mano de obra</b>                | ml     | 1        | \$9.000        | \$6.000         |
|                                                            | <b>Total</b>                       |        |          |                | <b>\$38.738</b> |

*Nota.* Adaptado de Navarro Castillo (2019).

De acuerdo a los resultados del análisis comparativo, Navarro Castillo (2019) indica que “debido a la excelente capacidad de drenaje del geodrén Lamidren L20DB, es posible reducir el tiempo de ejecución y los costos por metro lineal, lo que representa un importante ahorro económico para proyectos viales de varios kilómetros de longitud”, además, especifica que los hallazgos y conclusiones del estudio solo son aplicables a la región de estudio.

### **Análisis y Discusión de las Investigaciones y Avances Nacionales**

Al realizar la consulta sobre investigaciones y avances nacionales de las obras de drenaje subterráneo, lo que llama la atención es como inclusive en años recientes se sigue referenciando y dando la razón a investigaciones y artículos escritos hace más de 15 años, haciendo mención a que el diseño de sistemas de drenaje y subdrenaje en Colombia aún tiene un largo camino por recorrer y de cómo se requiere un nuevo enfoque para mejorar los criterios de diseño de la estructura del pavimento, por ejemplo, Campos Marín (2015) mencionaba en su artículo que “los programas de diseño de subdrenaje son ampliamente desconocidos y tienen una adopción limitada, y lamentablemente hay poca información disponible en la red”, es por esto que su investigación se centró en mostrar y demostrar las capacidades del software DRIP 2.0, un

programa que en el Manual del INVIAS (2009) solamente fue mencionado, sin desarrollar ninguna metodología que permita validar sus resultados y demostrar la mejora que puede aportar en los diseños.

Las nuevas investigaciones y artículos relacionados a geotextiles, a geodrenes o a obras de subdrenaje, deben seguir los parámetros de diseño expuestos en el Manual del INVIAS (2009); este manual "autoriza el uso de nuevos geodrenes en base a los requisitos de drenaje del proyecto, considerando que deben cumplir con las propiedades hidráulicas, mecánicas y de filtración requeridas". Ya sean nuevos geodrenes nodulares de LAMIDREN, nuevos geosintéticos de PAVCO (2023) como "TecDren" y "Geodrén HF" (High Flow), o software de diseño de subdrenajes como DRIP 2.0; todos estos avances siguen parámetros, información y tablas de una manual escrito hace 14 años. Por esta razón, en las investigaciones y avances nacionales mencionados se referencian y se comparan los resultados obtenidos, con los de los nomogramas presentes en el manual o con los de un dren colector longitudinal explicado en el manual (subdrén francés), demostrando (en las regiones de estudio) resultados mucho mejores en términos de construcción, de capacidad, de eficiencia y de costos.

Al igual que lo mencionado en el análisis continental, además de avances en los geocompuestos como geodrenes planares, viales, nodulares o High Flow; las últimas investigaciones giran en torno a un drenaje y subdrenaje sostenible con el objetivo de reducir el impacto medio ambiental de las obras urbanas y viales. Según la secretaría de ambiente (2020), "la tendencia global del urbanismo son las ciudades esponja, las ciudades esponja se caracterizan por el cambio del suelo a una superficie cuya tecnología le permite absorber la escorrentía y utilizarla a favor de las ciudades y no en su contra"; también se hace mención de la implementación de pilotos a escala real basados en nuevas normas y guías técnicas de diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en Bogotá.

Referente a los SUDS en Colombia, autores como Ariza et al. (2019) han estudiado el “desarrollo de una metodología multiescala que permite el análisis de los aspectos ambientales, sociales y económicos de la implementación de SUDS en áreas urbanas consolidadas”, de acuerdo con múltiples objetivos como gestión de escorrentía, mejoras en la calidad del agua y generación de servicios. Se menciona que, en Colombia, la expansión urbana se ha concentrado en cuatro ciudades: Bogotá, Cali, Medellín y Barranquilla (Aldana-Domínguez et al., 2018), surgiendo graves problemas ambientales, sociales y económicos como resultado de la rápida urbanización, que con frecuencia se produce a expensas de la pérdida de ecosistemas, así que, si las ciudades no adoptan prácticas de urbanización sostenible, se espera que estos problemas empeoren. Los sistemas de drenaje urbano sostenible presentan una oportunidad para mejorar la gestión de aguas pluviales al proporcionar una variedad de opciones para el control de la escorrentía, así como ventajas relacionadas con los aspectos sociales, ambientales y económicos (Ossa-Moreno et al., 2017; Poustie et al., 2015). Los SUDS utilizan técnicas como la infiltración y la detención para reducir los volúmenes de escorrentía y sus picos, para que se asemejen al ciclo hidrológico natural (De Macedo et al., 2019; Lucke & Nichols, 2015), como resultado, los SUDS tienen el potencial de mejorar la calidad del agua, promover la conectividad de los ecosistemas, disminuir la vulnerabilidad a las inundaciones y mejorar el paisaje, todo lo cual podría ayudar en la transformación de áreas urbanizadas en ciudades esponja (Zevenbergen et al., 2018). Los resultados de la investigación incluyen la determinación de subcuencas estratégicas de drenaje urbano tomando en cuenta los futuros planes de desarrollo urbano de Bogotá, y la identificación de subcuencas prioritarias de drenaje urbano donde la implementación de SUDS podría generar mayores beneficios, para espacios públicos y privados (Ariza et al., 2019).

## **Capítulo 4: Análisis y Discusión Global de las Investigaciones y Avances de las Obras de Drenaje Subterráneo**

Al finalizar la consulta y análisis de las investigaciones y avances internacionales, continentales y nacionales de las obras de drenaje subterráneo, se pudieron observar diversas diferencias y similitudes entre los avances de los países mencionados en el presente trabajo monográfico, incluyendo países como: China, Reino Unido, Estados Unidos, México, Perú y Colombia. Lo primero que se pudo observar fue lo adelantado que están los países asiáticos (principalmente China) en cuanto a investigación y desarrollo de geosintéticos inteligentes y verdes y de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), estos avances no solo son aplicables a los sistemas de drenaje superficial en ciudades y carreteras, sino también a los sistemas de subdrenaje. Aunque en Norte América y Europa también se han ido implementando nuevos avances y tecnologías referentes a los geosintéticos y a los SUDS, la mayoría de artículos de investigación referentes a las obras de drenaje subterráneo son de países como China o India.

Muchos países latinoamericanos todavía no tienen definida la infraestructura y la inversión económica para implementar los SUDS en sus ciudades, es por esto que investigaciones y avances como los presentados en Perú y Colombia sobre pavimentos permeables, uso de software, uso de geodrenes, ciudades esponja y pilotos a escala real buscan dar un paso en la implementación de SUDS en América Latina.

Al examinar las investigaciones y los artículos continentales, principalmente de Estados Unidos y México, se encontró que además de información relacionada con avances de las obras de drenaje subterráneo aplicadas a carreteras, en estos países se han desarrollado avances en los sistemas de drenaje agrícola subterráneo enfocados en programas de simulación como DRAINMOD y DRENAS. En relación a las obras de subdrenaje en túneles, en la mayoría de

casos se utilizan los mismos sistemas de subdrén y geotextiles que se usan en las carreteras, es por esta razón que llama la atención el artículo relacionado a flujo de agua subterránea en túneles y su sistema innovador propuesto de recolección de agua en túneles, el cual sigue siendo a día de hoy un avance interesante y único para las obras de subdrenaje; no obstante, al ser un sistema presentado e implementado con estudios de caso de túneles en China, aplicarlo en otros países necesitaría de un estudio y análisis propio en la zona local.

En Colombia el diseño de sistemas de drenaje y subdrenaje aún tiene un largo camino por recorrer, por esta razón se han buscado nuevos enfoques para mejorar los criterios de diseño de la estructura del pavimento y del drenaje subsuperficial, incluyendo el uso de programas como DRIP 2.0 o el uso de geodrenes nodulares de marcas como LAMIDREN o PAVCO. Sin embargo, en mi opinión estos nuevos enfoques están siendo limitados debido a la antigüedad del Manual de Drenaje para Carreteras del INVIAS, escrito en el año 2009, el cual menciona los posibles avances en software de diseño hidráulico y en uso de geodrenes, pero no profundiza ni desarrolla alguna metodología que permita validar resultados y demostrar las mejoras que puedan aportar en los diseños; aun así, en base a los requisitos de drenaje del proyecto, el manual aprueba el uso de nuevos geodrenes, teniendo en cuenta que deben cumplir con las propiedades hidráulicas, mecánicas, y de filtración requeridas.

## Conclusiones

En términos de investigaciones y avances internacionales, la cantidad y calidad de los artículos y estudios realizados en Asia, especialmente en China, fue bastante mayor comparado al resto de países consultados; incluyendo avances en subdrenaje de túneles, en geosintéticos, en geotextiles inteligentes, en geotextiles verdes, en los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) y en el desarrollo de ciudades esponja, concepto el cual tuvo origen en China y múltiples países buscan replicar e implementar.

Además de la información relacionada con los avances de las obras de drenaje subsuperficial aplicados a carreteras, en países como Estados Unidos y México se han desarrollado avances en los sistemas de drenaje agrícola subterráneo enfocados en programas de simulación como DRAINMOD y DRENAS; también, cabe destacar que el software DRIP 2.0 (Drainage Requirements in Pavements) mencionado en el manual del INVIAS (2009) y profundizado por Campos Marín (2015) para el diseño de subdrenajes en pavimentos flexibles fue desarrollado en Estados Unidos por la FHWA (Federal Highway Administration)

En Colombia, las investigaciones y los avances en los últimos años han estado enfocados en el desarrollo y en el análisis del rendimiento de los geodrenes para sistemas de subdrenaje en carreteras, ofrecidos por marcas como LAMIDREN o PAVCO; ya que la mayoría de sistemas de drenaje subsuperficial en el país siguen diseños y parámetros tradicionales expuestos en el manual del INVIAS. Adicionalmente, la Secretaría Distrital de Ambiente muestra interés en la implementación de conceptos relacionados a las ciudades esponja y a los SUDS en la ciudad de Bogotá, por lo que se espera que en los próximos años haya un mayor desarrollo en torno a un drenaje y subdrenaje sostenible en las obras urbanas y viales.

Como conclusión personal, este trabajo monográfico me ayudó a expandir mis conocimientos en diversos temas relacionados a las obras de drenaje subterráneo, incluyendo los pavimentos permeables, los geosintéticos, los geodrenes, los sistemas urbanos de drenaje sostenible, y los softwares de simulación hidráulica y de diseño. Al iniciar la recopilación de artículos e información no estaba muy familiarizado con esta temática y estaba mas familiarizado con las obras de drenaje superficial, sin embargo, al terminar con la escritura y redacción de este documento puedo decir con certeza que mi conocimiento y entendimiento sobre los temas expuestos se ha visto mejorado en gran medida gracias a los aportes de toda la bibliografía consultada, no solo a nivel nacional, si no también internacional.

Gracias al desarrollo de esta monografía de grado pude entender mejor las funciones y los diferentes tipos de drenaje subterráneo en carreteras; pude ver la aplicación de sistemas de subdrenaje y software en la parte agrícola; pude conocer sobre el uso de geosintéticos en Colombia comparado con el resto del mundo; pude descubrir los beneficios de la instalación de geodrenes en la infraestructura vial; y por último, pude aprender sobre los sistemas urbanos de drenaje sostenible y las ciudades esponja, siendo este tema el mas interesante y relevante en la actualidad, ya que combina varias temáticas como el urbanismo, el drenaje superficial, el drenaje subterráneo, y el uso de la naturaleza.

### Referencias Bibliográficas

- Aldana-Domínguez, J., Montes, C., & González, J. (2018). Understanding the Past to Envision a Sustainable Future: A Social–Ecological History of the Barranquilla Metropolitan Area (Colombia). *Sustainability*, 10(7), 2247. <https://doi.org/10.3390/su10072247>
- Andrés-Doménech, I., Anta, J., Perales-Momparker, S., & Rodríguez-Hernandez, J. (2021). Sustainable Urban Drainage Systems in Spain: A Diagnosis. *Sustainability*, 13(5), 2791. <https://doi.org/10.3390/su13052791>
- Ariza, S. L. J., Martínez, J. A., Muñoz, A. F., Quijano, J. P., Rodríguez, J. P., Camacho, L. A., & Díaz-Granados, M. (2019). A Multicriteria Planning Framework to Locate and Select Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Consolidated Urban Areas. *Sustainability*, 11(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/su11082312>
- Bhattacharyya, R., Smets, T., Fullen, M. A., Poesen, J., & Booth, C. A. (2010). Effectiveness of geotextiles in reducing runoff and soil loss: A synthesis. *CATENA*, 81(3), 184–195. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.03.003>
- Braswell, A. S., Winston, R. J., & Hunt, W. F. (2018). Hydrologic and water quality performance of permeable pavement with internal water storage over a clay soil in Durham, North Carolina. *Journal of Environmental Management*, 224, 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.040>
- Campos Marín, O. R. (2015). *Consideraciones para la implementación del software DRIP 2.0 para el diseño del subdrenaje en estructuras de pavimento flexible*. <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/7597>

- Cao, L., Zhang, D., Fang, Q., & Yu, L. (2020). Movements of ground and existing structures induced by slurry pressure-balance tunnel boring machine (SPB TBM) tunnelling in clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97, 103278.  
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103278>
- Carneiro, J. R., Almeida, P. J., & Lopes, M. D. L. (2018). Laboratory Evaluation of Interactions in the Degradation of a Polypropylene Geotextile in Marine Environments. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2018/9182658>
- Chu, X., Campos-Guereta, I., Dawson, A., & Thom, N. (2023). Sustainable pavement drainage systems: Subgrade moisture, subsurface drainage methods and drainage effectiveness. *Construction and Building Materials*, 364, 129950.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129950>
- Correia, L. G. C. S., Ehrlich, M., & Mendonca, M. B. (2017). The effect of submersion in the ochre formation in geotextile filters. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(1), 1–7.  
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.08.001>
- De Macedo, M. B., Do Lago, C. A. F., & Mendiando, E. M. (2019). Stormwater volume reduction and water quality improvement by bioretention: Potentials and challenges for water security in a subtropical catchment. *Science of The Total Environment*, 647, 923–931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.002>
- Evangeline, S. Y., Sayida, M. K., & Girish, M. S. (2021). Long-Term Performance of Rural Roads Reinforced with Coir Geotextile – A Field Study. *Journal of Natural Fibers*, 18(10), 1419–1436. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1691117>

- García-Haba, E., Hernández-Crespo, C., Martín, M., & Andrés-Doménech, I. (2023). The role of different sustainable urban drainage systems in removing microplastics from urban runoff: A review. *Journal of Cleaner Production*, 411, 137197.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137197>
- García-Serrana, M., Gulliver, J. S., & Nieber, J. L. (2017). Non-uniform overland flow-infiltration model for roadside swales. *Journal of Hydrology*, 552, 586–599.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.014>
- Guerra Chayña, P. R., & Guerra Ramos, C. E. (2020). Diseño de un pavimento rígido permeable como sistema urbano de drenaje sostenible. *Fides et Ratio - Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 20(20), 121–140.  
<https://fidesetratio.ulasalle.edu.bo/index.php/fidesetratio/article/view/72>
- Guo, C., Wu, J., Zhu, Y., Lin, Z., He, S., Qian, Y., Yang, H., Li, H., & Mao, W. (2020). Influence of clogging substances on pore characteristics and permeability of geotextile envelopes of subsurface drainage pipes in arid areas. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(5), 735–746. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.05.006>
- Guo, C., Yang, H., Lin, Z., Wu, J., Li, H., Wu, Z., & Mao, W. (2021). Effects of chemical precipitation on the permeability of geotextile envelopes for subsurface drainage systems in arid areas. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(4), 941–951.  
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.01.004>
- Habel, W. R., & Krebber, K. (2011). Fiber-optic sensor applications in civil and geotechnical engineering. *Photonic Sensors*, 1(3), 268–280. <https://doi.org/10.1007/s13320-011-0011-x>

Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*. Documentos Técnicos.

<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras>

Khan, U. T., Valeo, C., Chu, A., & Van Duin, B. (2012). Bioretention cell efficacy in cold climates: Part 1 — hydrologic performance. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(11), 1210–1221. <https://doi.org/10.1139/l2012-110>

Kim, K.-H., Park, N.-H., Kim, H.-J., & Shin, J.-H. (2020). Modelling of hydraulic deterioration of geotextile filter in tunnel drainage system. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(2), 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.11.008>

LAMIDREN. (2018). *GEODREN LAMIDREN L20DB*. <https://www.lamidren.com/copia-de-l20>

Lebeau, M., & Konrad, J. M. (2009). Pavement subsurface drainage: importance of appropriate subbase materials. *Canadian geotechnical journal*, 46(8), 987-1000. <http://dx.doi.org/10.1139/T09-021>

Li, D., Li, X., Zhang, W., Gong, F., & Huang, B. (2007). Stability analysis of surrounding rock of multi-arch tunnel based on coupled fluid-solid theorem. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26 (5), 1056–1064. <https://doi.org/10.3390/app12010149>

Li, D., Li, X., Zhang, W., & Wang, Q. (2008). Influence of underground water seepage flow on surrounding rock deformation of multi-arch tunnel. *Journal of Central South University of Technology (English Edition)*, 15 (1), 69–74. <https://doi.org/10.1007/s11771-008-0015-x>

- Li, D., Li, X., Li, C. C., Huang, B., Gong, F., & Zhang, W. (2009). Case studies of groundwater flow into tunnels and an innovative water-gathering system for water drainage. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(3), 260–268.  
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.08.006>
- Lucke, T., & Nichols, P. W. B. (2015). The pollution removal and stormwater reduction performance of street-side bioretention basins after ten years in operation. *Science of The Total Environment*, 536, 784–792. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.142>
- Mejía Flores, L. E., & Caro Spinel, S. (2005). *Factores que determinan el uso de geosintéticos en proyectos de pavimentación en Colombia*.  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/22585>
- Muthukumaran, A., & Ilamparuthi, K. (2006). Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(4), 210–219.  
<https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2006.03.002>
- Navarro Castillo, L. E. (2019). *Análisis comparativo de la capacidad hidráulica entre el Dren Francés y el Geodren Lamidren L20DB como sistemas de subdrenaje en la infraestructura vial*. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/15186>
- Ossa-Moreno, J., Smith, K. M., & Mijic, A. (2017). Economic analysis of wider benefits to facilitate SuDS uptake in London, UK. *Sustainable Cities and Society*, 28, 411–419.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.10.002>
- Palmeira, E. M., & Trejos Galvis, H. L. (2017). Opening sizes and filtration behaviour of nonwoven geotextiles under confined and partial clogging conditions. *Geosynthetics International*, 24(2), 125–138. <https://doi.org/10.1680/jgein.16.00021>

- Paus, K. H., Muthanna, T. M., & Braskerud, B. C. (2016). The hydrological performance of bioretention cells in regions with cold climates: Seasonal variation and implications for design. *Hydrology Research*, 47(2), 291–304. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.084>
- PAVCO. (2023). *Geosintéticos*. <https://pavcowavingeosinteticos.com/geosinteticos/>
- Poustie, M. S., Deletic, A., Brown, R. R., Wong, T., De Haan, F. J., & Skinner, R. (2015). Sustainable urban water futures in developing countries: The centralised, decentralised or hybrid dilemma. *Urban Water Journal*, 12(7), 543–558. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916725>
- Prambauer, M., Wendeler, C., Weitzenböck, J., & Burgstaller, C. (2019). Biodegradable geotextiles – An overview of existing and potential materials. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(1), 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.09.006>
- Ridgeway, H. H. (1982). Pavement subsurface drainage systems. *NCHRP synthesis of highway practice*, (96).
- Rujner, H., Leonhardt, G., Marsalek, J., Perttu, A.-M., & Viklander, M. (2018). The effects of initial soil moisture conditions on swale flow hydrographs. *Hydrological Processes*, 32(5), 644–654. <https://doi.org/10.1002/hyp.11446>
- Secretaría de Ambiente. (2020). *SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)*. Presentación Sistemas urbanos de drenaje. <https://www.ambientebogota.gov.co/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible>
- Skaggs, R. W., Youssef, M. A., & Chescheir, G. M. (2012). DRAINMOD: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1509-1522. <https://doi.org/10.13031/2013.42259>

- Suarez, J. (2008). Obras de drenaje y subdrenaje. *Deslizamientos: Técnicas de Remediación*, 2, 47-106.
- Tiwari, P., & Goel, A. (2017). An overview of impact of subsurface drainage project studies on salinity management in developing countries. *Applied Water Science*, 7(2), 569–580.  
<https://doi.org/10.1007/s13201-015-0329-4>
- Wiewel, B. V., & Lamoree, M. (2016). Geotextile composition, application and ecotoxicology—A review. *Journal of Hazardous Materials*, 317, 640–655.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.060>
- Wu, H., Yao, C., Li, C., Miao, M., Zhong, Y., Lu, Y., & Liu, T. (2020). Review of Application and Innovation of Geotextiles in Geotechnical Engineering. *Materials*, 13(7), 1774.  
<https://doi.org/10.3390/ma13071774>
- Yu, Y., & Rowe, R. (2012). Modelling leachate-induced clogging of porous media. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(8): 877-890. <https://doi.org/10.1139/t2012-052>
- Zaqout, T., & Andradóttir, H. Ó. (2021). Hydrologic performance of grass swales in cold maritime climates: Impacts of frost, rain-on-snow and snow cover on flow and volume reduction. *Journal of Hydrology*, 597, 126159.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126159>
- Zaqout, T., Andradóttir, H. Ó., & Arnalds, Ó. (2022). Infiltration capacity in urban areas undergoing frequent snow and freeze–thaw cycles: Implications on sustainable urban drainage systems. *Journal of Hydrology*, 607, 127495.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127495>

Zavala, M., Saucedo, H., & Fuentes, C. (2014). Programa de cómputo para analizar la dinámica del agua en sistemas de drenaje agrícola subterráneo. *Agrociencia*, 48(1), 71–85.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30245661005>

Zavala, M., Saucedo, H., & Fuentes, C. (2020). Simulation model for subsurface agricultural drainage. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 11(2), 262–290. Scopus.

<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-07>

Zevenbergen, C., Fu, D., & Pathirana, A. (Eds.). (2018). *Sponge Cities: Emerging Approaches, Challenges and Opportunities*. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

<https://doi.org/10.3390/books978-3-03897-273-0>