

Estudios Basados en la Modelación Hidrológica y Obras de Drenaje Superficial

Nikhol Dayana Sanchez Vidal

Monografía para Optar Título de Ingeniera Civil

Msc. Alba Yajaira Sanchez

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Civil, Ambiental y Química

Programa de Ingeniería Civil

Pamplona, Norte de Santander

Junio, 2023

Agradecimientos

Primeramente, a Dios quien ha sido el dador de mi vida y el donador de todas las herramientas que he necesitado para avanzar en este camino.

A mis padres por ser un ejemplo para mí como persona y profesional, por acompañarme en este camino y ser un apoyo incondicional para mí, por encaminarme e influenciarme. Quienes siempre han creído en mí y en mis habilidades brindándome confianza en lo que puedo lograr siempre que me lo proponga, a blue por ser el ser en quien pongo mi alegría, cariño y amor.

Para mi familia quien siempre estuvieron pendientes de mí, día a día para saber cómo estaba y me daban sus consejos de ayuda cuando sentía que me hacían falta

Amigos quienes estuvieron a lo largo de la formación y fueron un apoyo para estudiar, hablar y conocer mientras afrontábamos lo que era estar en un principio solos sin nuestras familias en busca de ser profesionales y ayudándonos a crecer como personas.

Esfuézate y sé valiente. No temas ni desmayes, que yo soy el Señor tu Dios, y estaré contigo por donde quiera que vayas.>>

Índice

Introducción	6
Capítulo 1. Generalidades: Obras de Drenaje	8
Reseña Histórica de las Obras de Drenaje	8
Clasificación de Obras de Drenaje	9
Obras de Drenaje Superficial	10
Capítulo 2. Estudios Internacionales Basados en la Modelación Hidrológica para Sistemas de Drenaje Vial.....	12
Modelación de Prevención de Riesgo y evaluación de Inundaciones.....	12
Modelos Hidrológicos para Diseño de Drenaje Vial Enfocado en Alcantarillas y Tuberías....	14
Algoritmo para Identificar Áreas de Encharcamiento.....	16
Análisis y Discusión para Estudios de Modelación Hidrológica Internacionales.....	18
Capítulo 3. Estudios Nacionales Basados en la Modelación Hidrológica e hidráulica para Sistemas de Drenaje Vial.....	19
Modelo Hidrológico e Hidráulico a través de software HEC-RAS	19
Modelos Estadísticos para Simular Tendencias Hidrológicas	23
Análisis y Discusión para Modelos Hidrológicos Nacionales	25
Capítulo 4. Estudios de Obras de Drenaje Internacionales.	26
Implementación de Sistemas De Drenaje Sostenible.....	26
Pavimentos Permeables en Hormigón.....	27
Análisis y Discusión para Sistemas de Drenaje Internacionales.....	33
Capítulo 5. Obras de Drenaje Nacionales.....	35
Normatividad vigente de drenaje superficial.	35
Sistemas de Drenaje Superficial en Vías Urbanas	36
Alternativas para Diseño de Drenaje de Vías en Colombia	38
Diseño de Cunetas y Alcantarillados como Sistema de Drenaje para Carreteras	40
Análisis y Discusión de Drenaje Superficial a Nivel Nacional.....	41
Capítulo 6. Análisis Exhaustivo y Debate Global	43
Conclusiones	45

Referencias Bibliográficas.....	47
--	-----------

Tabla de Figuras

Figura 1. Vías más propensas a inundaciones	13
Figura 2. Zona de estudio y estado de alcantarillas.	15
Figura 3. Caudal simulado para comparación de datos	16
Figura 4. Análisis de película de agua en campo vs Análisis de película de agua por algoritmo	17
Figura 5. Altura máxima de agua simulado por HEC-RAS, corte longitudinal	20
Figura 6. Zonas propensas a inundaciones de acuerdo a los periodos evaluados.....	22
Figura 7. Ubicación de estructuras de drenaje vial para estudio	24
Figura 8. Composición de pavimentos permeables	28
Figura 9. Tipos de pavimentos permeables	29
Figura 10. Composición del pavimento permeable	30

Introducción

Desde un punto de vista general, las obras de drenaje desempeñan un papel importante en la sociedad actual, ya que brindan una serie de beneficios conformes a la salud y el bienestar de la humanidad teniendo como un fin de diseño gestionar y controlar el flujo de agua presente en una zona, el cual presenta un impacto en la calidad de vida, así mismo como en la protección de infraestructuras presentes y en el medio ambiente.

Uno de los beneficios más significativos y fundamentales de las obras de drenaje es la prevención de inundaciones, ya que permiten redirigir el exceso de está. lejos de las zonas habitadas, eludiendo el daño a viviendas, edificaciones, lugares comerciales, entre otros. Estas obras pueden ser de gran nivel de complejidad o un simple nivel, desde grandes redes de tuberías y estructuras hasta cunetas a lo largo de estructuras viales.

En la actualidad, los programas de computación cumplen un papel concluyente en el diseño y el análisis de la gestión de obras de drenaje superficial, ya que estas herramientas tecnológicas y modelos matemáticos, dan oportunidad de hacer una observación espacial, permitiendo que las programaciones de estas obras sean eficientes al momento de su aplicación.

Por lo tanto, es notable el valor que toma un buen modelamiento y diseño una obra de drenaje, ya que de esto depende el bien estar de los usuarios que habitan o transitan una zona indicada, proporcionando seguridad y comodidad. De igual manera al generar un buen diseño y análisis en estas obras se verá la eficacia de lo propuesto ayudando a prever problemáticas como la erosión del suelo y la contaminación del agua, asegurando el cumplimiento de los estándares de calidad y seguridad, que proponen las distintas normativas a las que está sometido un diseño de drenaje.

El trabajo propuesto sintetiza los estudios encontrados en base al modelamiento hidrológico y los sistemas de drenaje utilizados a nivel nacional e internacional, dando un enfoque a la importancia que se obtiene de cada estudio encontrado, planteando así un punto de vista con la finalidad de establecer comparación, discusión y análisis en cuanto lo conocido y lo investigado sobre estos sistemas en el cual se exponen elementos y alternativas innovadoras.

Capítulo 1. Generalidades: Obras de Drenaje

De acuerdo con Maldonado (2023), los sistemas de obras de drenaje tienen como objetivo evitar posibles afectaciones por el mal manejo del recurso hídrico ayudando a implementar medidas adecuadas de control y manejo de las escorrentías, minimizando los impactos negativos asociados con escorrentías.

Reseña Histórica de las Obras de Drenaje

En los primeros años de la historia de los sistemas de drenaje, en sus inicios no eran subterráneos, si no en su mayoría superficiales, esto en busca de la canalización del agua existente.

En la historia de la construcción de los sistemas de drenaje como obras civiles es muy antigua, pues alrededor de 3750 AC fue construido en Nippur India, el sistema de drenaje más antiguo del cual se tienen informes.

En la antigua Grecia, concretamente en ciudades de Atenas y corintio se desarrollaron sistemas de drenaje altamente eficientes, El cual se utilizaban canales rectangulares cubiertos de losas planas, conocidos como atarjeas o pozos.

En este entonces un sistema de alcantarillado tendría origen en el siglo XIX debido a la postura sanitaria por la que pasaba Europa y Estados Unidos, implementando este sistema el cual ayudaría a reducir la tasa de mortalidad y el beneficio de obtener aguas residuales para usos agrícolas.

No fue sino hasta 1842 se diseñó el primer sistema moderno de drenaje el cual fue diseñado de acuerdo a la topografía y necesidad prevista en Hamburgo. Debido a las

consideraciones que fueron diseñados estos tuvieron una acogida de forma general hasta inicios de 1900 y que aun, en la actualidad prosiguen vigentes.

Para la época del renacimiento, se recupera la práctica de construir drenajes en forma de canales y zanjas a los lados de la vía con el fin de obtener la desviación y conducción de los cauces producidos por agua lluvia y aguas naturales.

Debido a los problemas causados por pestes por los grandes volúmenes de agua negras presentes en la superficie fue diseñada en París para finales del siglo XIX, la primera red de drenaje subterráneo, propagándose este sistema en otras ciudades de Europa, debido a la gran acogida que tuvo por su eficiencia.

Finalmente, se dio paso a la implementación de abastecimientos de alcantarillado en el siglo XX en Bilbao España, (Gómez, 2010).

Así es como la construcción de estas obras se generalizaron tal como hoy en día son obras necesarias para el bienestar de las comunidades, ya que desde entonces se han prevenido enfermedades infecciosas, el encharcamiento y acumulación de aguas.

Clasificación de Obras de Drenaje

El manejo del agua incluye un aspecto esencial que es el drenaje, el cual desempeña un papel fundamental para controlar el flujo y prevenir inundaciones, teniendo como propósito lograr la gestión eficiente del agua. Para esto se emplean diversas obras de drenaje el cual se pueden clasificar de acuerdo a su función y ubicación definidas de la siguiente manera:

- a) Drenaje Superficial: Se encarga de dirigir el agua de la superficie.

- b) Drenaje subterráneo: Controla el agua subterránea excesiva como saturación, humedad excesiva y erosión.
- c) Drenaje pluvial: Se encarga del manejo de aguas lluvias principalmente en áreas urbanas.

Obras de Drenaje Superficial

Según Dávila & Torres (2010), las estructuras de drenaje superficial tienen la función de regular el flujo de agua que afecta a una estructural vial, ya sea aguas que hayan caído sobre o fuera de la vía, con el fin de generar el escurrimiento superficial ya que investigaciones realizadas han corroborado que, en la mayoría de casos, el exceso de humedad es la principal causa de fallas en la cimentación y el deterioro de la superficie de una carretera.

De acuerdo a estos estudios se han demostrado que cuando la subrasante se encuentra saturada de agua su capacidad de soporte se ve comprometida, haciendo así que la humedad excesiva debilite el suelo viéndose envuelta la estructura de la vía, generando en algunos casos:

- Asentamientos diferenciales
- Deformaciones
- Agrietamientos.

El drenaje superficial implica el manejo de exceso de agua que se acumula en la superficie de una vía, redirigiéndola hacia un sistema de alcantarillado pluvial para así tener una evacuación adecuada. Cuando se lleva a cabo la construcción de una carretera usualmente se suele interrumpir el flujo natural del agua, permitiendo entonces que esta circule en las áreas seleccionadas del proyecto. De esta manera el agua que solía fluir libremente antes de la construcción de la carretera debe ser canalizada para concentrarse en dichas áreas, lo cual da origen a las obras de captación y conducción. Este drenaje debe llevarse a cabo en dirección y

forma que seguiría el agua de manera natural, asegurándose de contar con la protección necesaria para prevenir erosiones o sedimentaciones al pasar el tiempo, (Naranjo y Cando, 2012).

Conforme a la definición de drenaje superficial, está abarca diferentes acciones relacionadas con el manejo de aguas pluviales, estas se dividen en:

- a) La captación de aguas pluviales; Se da mediante la recolección de las aguas provenientes de la superficie de la carretera.
- b) Evacuación de aguas recolectadas: Una vez las aguas pluviales han sido captadas se da paso a su correcta evacuación.
- c) Restauración de cauces naturales: En casos donde la carretera interrumpe el curso natural de un cauce es necesario tomar medidas para dar paso a proseguir su continuidad, permitiendo que el agua fluya de manera adecuada.

En resumen, el drenaje superficial comprende la recolección de aguas, evacuación y restauración de cauces afectados por la presencia de carreteras, a través de diversos sistemas. Siendo estas acciones de suma importancia para la prevención de inundaciones, un buen manejo de la seguridad vial y la protección de entornos naturales, (Naranjo y Cando, 2012). Teniendo en cuenta a Yepes, (2019) enfatiza que el drenaje adecuado es un aspecto fundamental para garantizar la calidad y el servicio de una carretera.

Capítulo 2. Estudios Internacionales Basados en la Modelación Hidrológica para Sistemas de Drenaje Vial.

Modelación de Prevención de Riesgo y evaluación de Inundaciones.

El cambio climático está desempeñando un papel importante en el aumento de los fenómenos climáticos que se han observado actualmente en las últimas décadas, siendo notorio el aumento significativo que ha tenido la intensidad y la magnitud de las lluvias, causando en su mayoría inundaciones inesperadas debido al rápido desplazamiento que presentan (Liu et al., 2018).

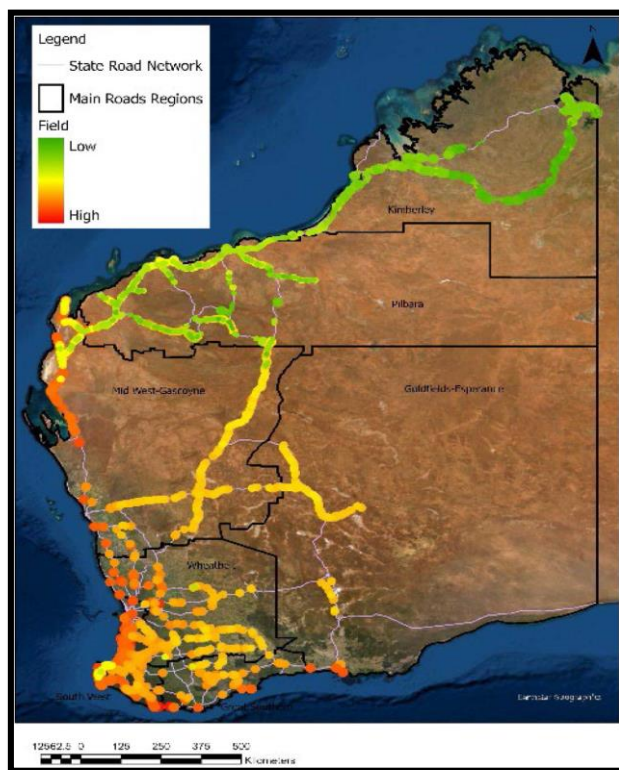
Dadas a estas circunstancias la administración estratégica de las precipitaciones y la implementación de su mantenimiento en algunas áreas suelen ser limitado ya que no se cuenta con los recursos y elementos para la intervención temprana de inundaciones presentes, (Abu-Salih et al., 2023).

Abu-Salih et al., (2023) manifiesta que debido a la carencia de avances tecnológicos en donde se evalúen el riesgo de inundaciones y los modelos de detección de herramientas necesarias para la solución sostenible donde se plantee la vulnerabilidad existente y la evaluación de implementación de soluciones viables ante posibles eventos de inundaciones se plantea el siguiente modelo.

De acuerdo con Abu-Salih et al., (2023) en este estudio se presenta un sistema innovador donde se incorpore un sistema computacional en el que se plantea modelar y predecir las obras viales que presentan riesgo de inundación, con el fin de pronosticar la vulnerabilidad que se presentan en las obras viales en el estado de Austria Occidental ayudando así a examinar posibles daños que se pueden presentar a causa de inundaciones, basándose en el implemento de análisis hidroeinformaticos y técnicas avanzadas de análisis computacional.

Abordando cuatro fases para el desarrollo del sistema: Como primer ítem se tiene la finalidad investigar y recopilar los datos de información sobre la información hidrológica, topográfica y gestión de las precipitaciones para ser procesados en sistemas de información geoespacial. Seguidamente el procesamiento y elección de variables con el fin de establecer la limpieza y unificación de datos para obtener una consistencia validad y una estructuración donde se desprecien los valores atípicos para mayor confiabilidad, la restauración de modelos de aprendizaje automático (ML) y por último la optimización y evaluación del modelamiento de aprendizaje automático. Con el fin de obtener una mayor comprensión del conjunto de datos obtenidos se utilizan estadísticas resumidas y representaciones gráficas para la examinación de los datos obtenidos como se puede observar en la **Figura 1**. (Abu-Salih et al., 2023).

Figura 1. *Vías más propensas a inundaciones*



Nota* El mayor riesgo de inundaciones de las vías se presenta en la zona costera de Australia.
Tomado de Abu-Salih et al., (2023)

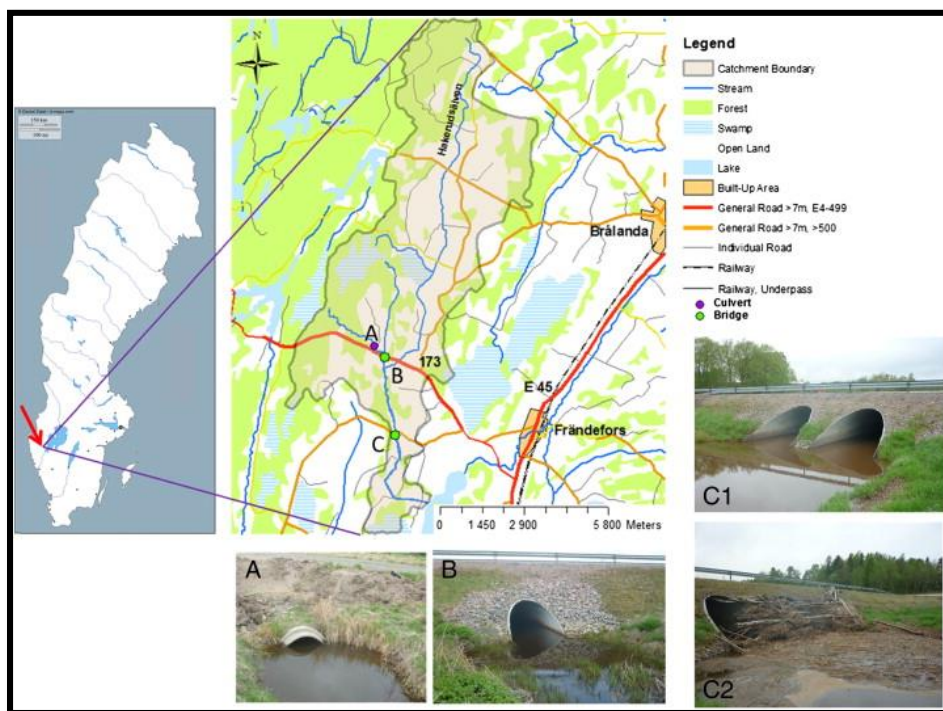
Modelos Hidrológicos para Diseño de Drenaje Vial Enfocado en Alcantarillas y Tuberías.

Teniendo en cuenta a Kalantari et al., (2014) las modificaciones que hoy en día se viven a causa del clima global, se da un aumento para la cantidad de precipitaciones presentadas en diversas áreas, donde se ve la seguridad y la vida de las personas que habitan en amenaza, por las diversas inundaciones que se presentan siendo también esto, un peligro para las estructuras presentes. No obstante, los cambios por de las afectaciones climáticas, el uso la manipulación y de la tierra de un área puede ser también un detonante a la contestación de un sistema hidrológico ya que son factores que complementan a la magnitud de las inundaciones.

Debido a la carencia en este análisis se llevó a cabo el experimento de modelización fundamentado en los procesos que se llevan para indagar los posibles impactos de eventos de precipitaciones en carreteras, teniendo un centro de estudio específicamente en las alcantarillas y los puentes de tuberías, para evaluar la adecuación de los diseños actuales de estas infraestructuras. En este estudio se examina las condiciones climáticas extremas y la deforestación que afectan a un conjunto de estructuras de drenaje ubicadas en la cuenca del río Hakerud en el suroeste de Suecia, por medio del modelamiento hidrológico basado en la física ambiental (MIKE-SHE, MIKE 11), el cual tiene como fin evaluar la capacidad de los sistemas de drenaje existentes, ya que de acuerdo a la suposición base indicaría que estas estructuras presentes no tendrían un tamaño apropiado a causa de los cambios que se producen en la cubierta del suelo y el clima cambiante, generando reacción en la hidrología existente, en busca de presentar una posible estrategia para problemas que se presenten en estos sistemas debido al cambio climático presentado, de manera en busca que este modelo sea aplicable para

alcantarillas y puentes, para este caso fue tomada la ubicación que se muestra a continuación en la **figura 2**, como lugar de estudio. (Kalantari et al., 2014).

Figura 2. Zona de estudio y estado de alcantarillas.

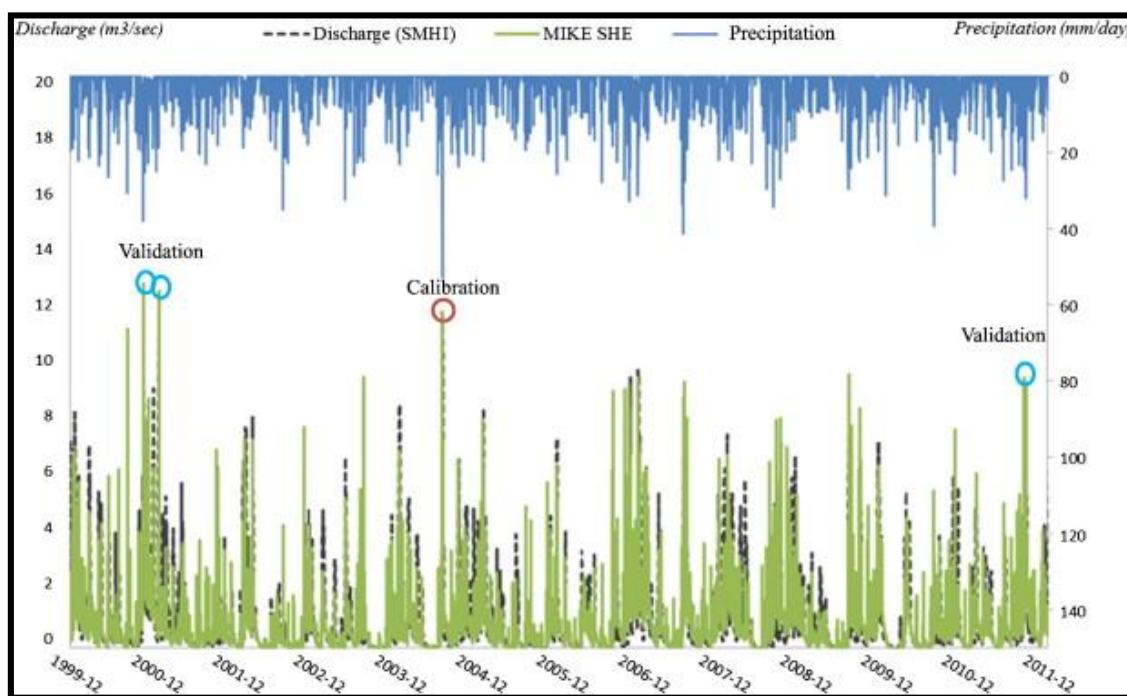


Nota* Se tomó esta área ya que es propensa a inundaciones y daños en la vía. Tomado de Kalantari et al., (2014).

Kalantari et al., (2014), plantea la estimación de este modelo hidrológico ser sistematizado a través de los programas MIKE SHE y para la modelación hidráulica MIKE 11 debido a la capacidad que presenta para simular el ciclo hidrológico. Seguidamente se procedió a determinar el tamaño de la tormenta y la intensidad de precipitaciones para periodos de retorno de 2, 5, 10 y 50 años, para establecer características de las precipitaciones correspondientes a cada periodo tomándose un evento de entre los años 1961 a 2012 con el fin de sacar los hidrogramas para los eventos propuestos. Para la verificación se llevó a cabo una validación del

modelo calibrado tal como se muestra en la **figura 3**, utilizado con el fin de simular tres eventos de lluvia- escorrentía siendo comparados con los datos observados durante estos eventos para evaluar su acierto.

Figura 3. Caudal simulado para comparación de datos



Tomado de Kalantari et al., (2014).

Estableciendo el grado de confiabilidad del modelo hidrológico es apropiado para simular los efectos de la deforestación y el nivel del agua en diversas estructuras viales de la cuenca Hakerud ante posibles escenarios de inundaciones futuras (Kalantari et al., 2014).

Algoritmo para Identificar Áreas de Encharcamiento

Teniendo en cuenta a Lei et al., (2011) manifiesta lo peligroso que es conducir en carreteras mojadas a altas velocidades, ya que se puede presentar el fenómeno de “aquaplaning” conocido

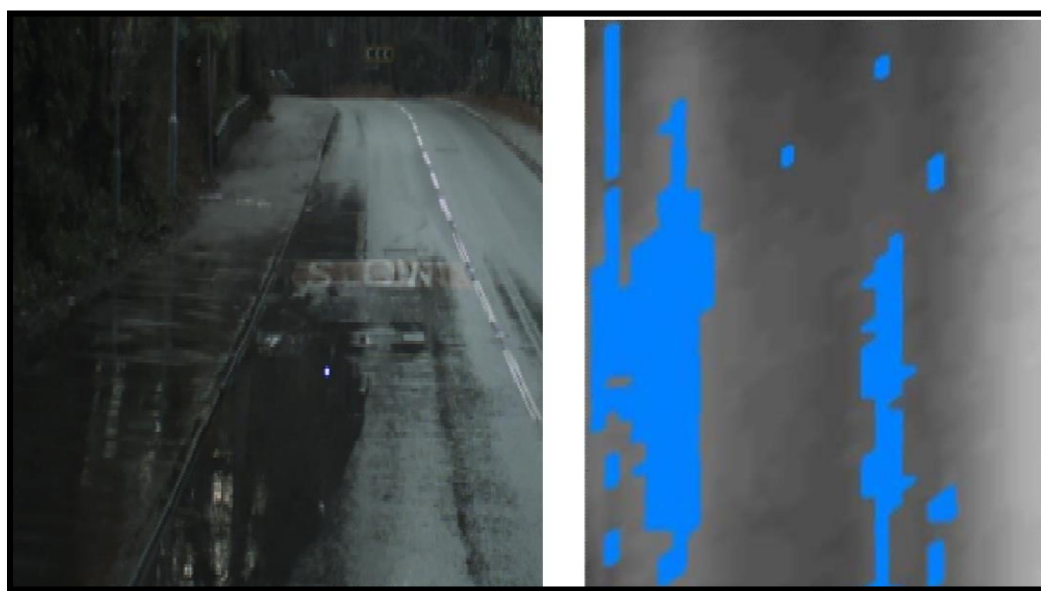
como hidroplaneo debido a que la presencia del agua en la superficie hace que el neumático pierda el contacto con está.

Como lo indica Nazir et al., (2016) Cuando se presentan películas de agua en las superficies se pueden generar salpicaduras y roció que obstaculizan la visibilidad para los conductores.

Luo & Li, (2019), difiere en cuanto al estudio del hidroplaneo argumentando que este depende de la intensidad de precipitaciones que se presente, la permeabilidad del pavimento, el recorrido del flujo y la profundidad que obtiene este.

No obstante, Kane, (2021) propone un algoritmo donde se permita identificar las zonas propensas a la acumulación de agua lluvia en las vías, el cual para lograr se utiliza la combinación de datos obtenidos a través de un perfilómetro laser y sistemas LiDAR el cual permiten la recopilación de información detallada sobre el perfil de la carretera, identificando las áreas mayormente afectadas.

Figura 4. *Análisis de película de agua en campo vs Análisis de película de agua por algoritmo*



Tomado de Kane, (2021)

De acuerdo a la **figura 4** se proporciona una representación visual precisa de cómo se forman los encharcamientos que refleja la realidad logrando este resultado a través de tecnologías de mapeo y análisis avanzados (Kane, 2021).

Análisis y Discusión para Estudios de Modelación Hidrológica Internacionales.

En base a lo anteriormente realizado e investigado he podido observar la gran importancia que realmente toma el papel del cambio climático al momento de tener en cuenta un estudio de la hidrología de un determinado lugar, ya que, en su mayoría realmente desconocía la función y desempeño que este factor juega al pasar del tiempo para el dimensionamiento y modelado de los sistemas de drenaje, ya que a medida que mayor sea la afectación que tenga el clima en el tiempo, llegara un punto en donde realmente los periodos de retornos serán considerados a cambiar para el diseño que se tenga establecidos para las estructuras, teniendo en cuenta que la situación climática cada vez de acuerdo a lo mostrado están en una situación cada vez más preocupantes.

De igual manera el periodo de retorno que se tienen establecidos en Suecia de acuerdo a que estos diseñan con periodos de retorno hasta de 50 años (Kalantari et al., 2014), ya que hasta ahora en lo visto el mayor periodo de retorno que conocía para estructuras viales que tengan como función el drenaje de éstas era un periodo de 20 años.

Por último, la variedad de modelos existentes para la determinación de eventos hidrológicos, por lo que en todos los artículos anteriormente mencionados tenían una simulación diferente para cada evento expuesto en búsqueda de algo en común, en este caso predecir los casos de inundaciones a lo largo de una obra vial.

Capítulo 3. Estudios Nacionales Basados en la Modelación Hidrológica e hidráulica para Sistemas de Drenaje Vial.

Modelo Hidrológico e Hidráulico a través de software HEC-RAS

A lo largo del tiempo, los box culvert han experimentado un notable proceso evolutivo en cuanto su funcionalidad y aplicaciones, ya que anteriormente eran considerados como una estructura sencilla para funcionar como alcantarilla, has el punto de llegar a hacer una solución multifuncional de acuerdo a la problemática o necesidad que se presente Aquiate et al., 2021).

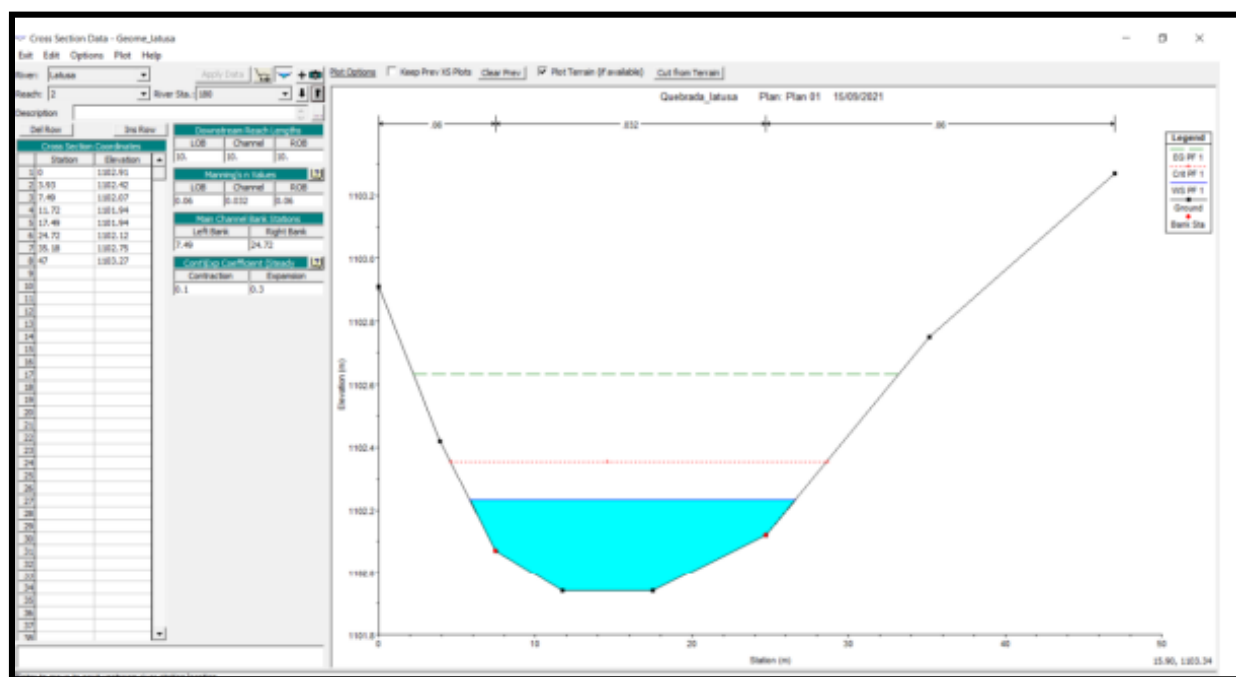
Aquiate et al., (2021), indica que este estudio se presenta como una solución a la problemática existente en la ciudad de Ibagué, dando a que se presentan dificultades para la comunidad en temporadas de lluvia intensa, ya que la precipitación llega a invalidar el paso de peatones e incluso de vehículos. No obstante, es de importancia resaltar los problemas de estabilidad que se presentan en la estructura estudiada y la capacidad de drenaje que presenta, siendo esta una capacidad limitada, influyendo estas precipitaciones presentadas al desbordamiento de la quebrada la tusa, provocando erosión en los taludes y socavación en los sistemas de drenajes ubicados en la zona de estudio.

De acuerdo a las condiciones presentadas se procede a hacer un estudio con el fin de incorporar y evaluar las condiciones hidrológicas e hidráulicas de la zona, teniendo en cuenta la información de los parámetros morfométricos que presenta la quebrada la Tusa para así caracterizar la adecuadamente la presente y tener un diseño óptimo para la estructura. Se procedió a establecer un modelo de elevación digital, el cual fue descargada la información de la base de datos Earthdata de la NASA (Aquiate et al., 2021).

Seguidamente se descargo la cartografía para ser analizada mediante el software Arcgis y se procedio a modelar para determinar los parametros morfologicos que presenta la quebrada una

vez establecidos estos parametros, se hizo el estudio hidrológico, donde para el calculo del caudal maximo fue utilizado el software HEC-HMS teniendo en cuenta que para el analisis adecuado s requirio ingresar los parametros morfologicos entre estos el area de la cuenca, la pendiente, el numero de curvas generalas cartograficamente y el periodo de retorno, para este caso fueron 25 años (Aquiarte et al., 2021).

Figura 5. *Altura máxima de agua simulado por HEC-RAS, corte longitudinal*



Tomado de Aquiarte et al., (2021)

Establecidos los parámetros hidrológicos, se hicieron los análisis hidráulicos de la respectiva obra con el fin de obtener los perfiles longitudinales que presenta el cauce se utilizó GeoRas en ArcGis, para procesar la información altimétrica obtenida a partir de fotografías con una alta resolución y un modelo de elevación topográfico y así proceder con el análisis hidráulico (Aquiarte et al., 2021).

Aquiate et al., (2021), menciona que para el diseño del drenaje vial fue tomado la profundidad determinada por HEC-RAS tal como se muestra en la **figura 5**, ajustando entonces por medio del software HY8 las dimensiones del ancho de la estructura. E igualmente resalta que en este estudio que lo anteriormente diseñado y analizado fue tenido en cuenta bajo los parámetros más desfavorables que presentaba de precipitaciones.

Desde la posición de Jaraba et al., (2021), lleva la investigación al cabo del levantamiento por medio de la batimetría para obtener las medidas de altitud de la superficie de la cuenca a lo largo del trayecto que contempla el río de la Magdalena, teniendo como finalidad establecer parámetros físicos que componía la cuenca.

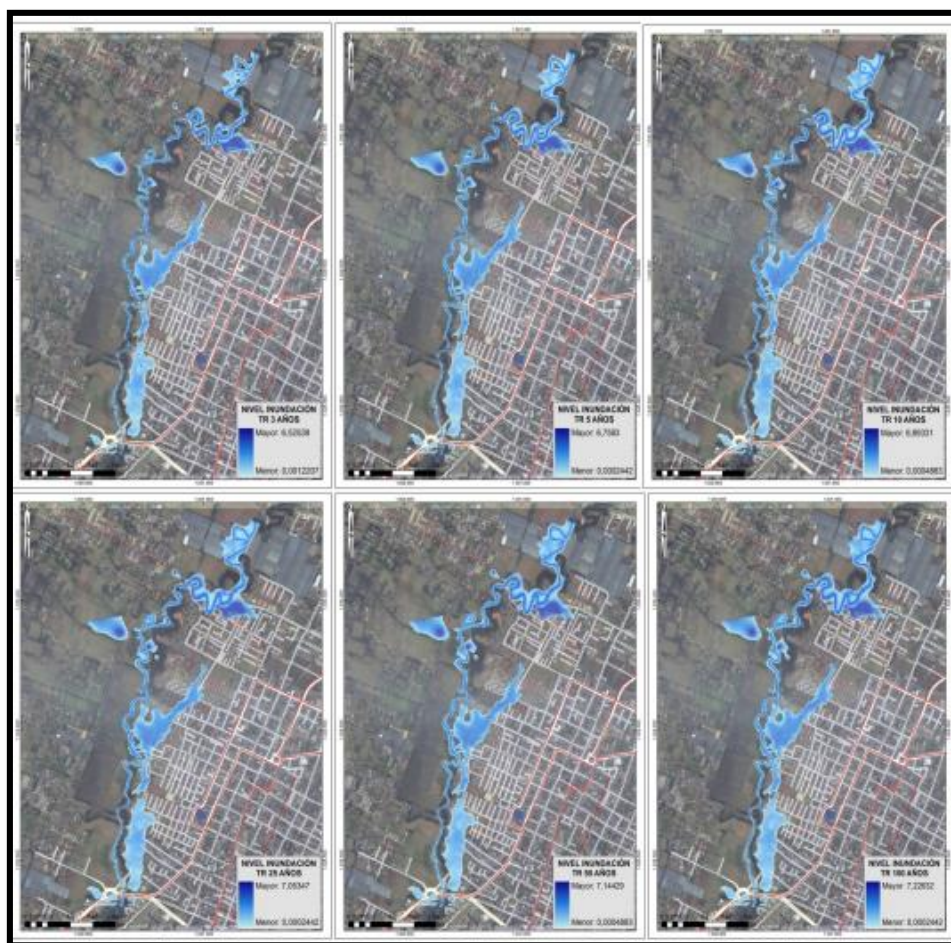
En el marco de esta investigación, se utilizó el software HEC-RAS con el fin de establecer un análisis hidrodinámico del río y estudiar detalladamente el comportamiento del agua del objeto de estudio. Para esto se realizaron las simulaciones considerando los periodos de retorno para 5, 10, 20, 50 y 100 años buscando definir simulaciones con base en los tiempos promedios en el que transcurre un evento de inundación. Al utilizar estos periodos se evaluaría el comportamiento del río en situaciones propuestas, adquiriendo una visión supuesta a el comportamiento del río en escenarios hidrológicos a lo largo del tiempo, permitiendo minimizar los riesgos asociados para un análisis correcto en cuanto a las zonas cercanas expuestas a inundaciones (Jaraba et al., 2021).

De este modo Jaraba et al., (2021) sintetiza que el brazo de Mompox es considerado la causa directa de las inundaciones presentes en la zona, el cual posiblemente estas sean provocadas por agentes externos el cual pueden venir de las interconexiones de los cuerpos de agua existentes de la cual está compuesta la depresión Momposina.

Como lo expresa Peña et al., (2016) dadas las inundaciones que se experimentaron en Colombia en los años 2010-2011 debido al fenómeno de la niña en el río de Bogotá, causaron graves daños a las propiedades y tuvieron un impacto sumamente negativo en cuanto el estado socioeconómico de centros urbanos y áreas rurales del país.

De esta manera, Peña et al., (2016) hizo la realización de los estudios hidráulicos destinados a la estimación de la máxima altura del nivel del agua y la velocidad que presentaba el flujo durante los eventos que se producían durante la crecida máxima mediante HEC-RAS

Figura 6. Zonas propensas a inundaciones de acuerdo a los periodos evaluados



Nota* Fue evaluada la inundación a periodos e retorno 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100. Tomado de Peña et al., (2016)

Por lo que se pudo observar en la **figura 6** luego de esta modelación, las zonas de amenaza de inundaciones expuestas a inundaciones a diferentes periodos de retorno, la identificación de zonas expuestas a una amenaza alta con una recurrencia de 25 años el cual pueden ser habitadas, y zonas de amenaza extremas el cual abarcan crecientes que ocurren anualmente con periodos de retornos hasta 10 años, señalándose que no pueden ser zonas habitadas de manera permanente (Peña et al., 2016).

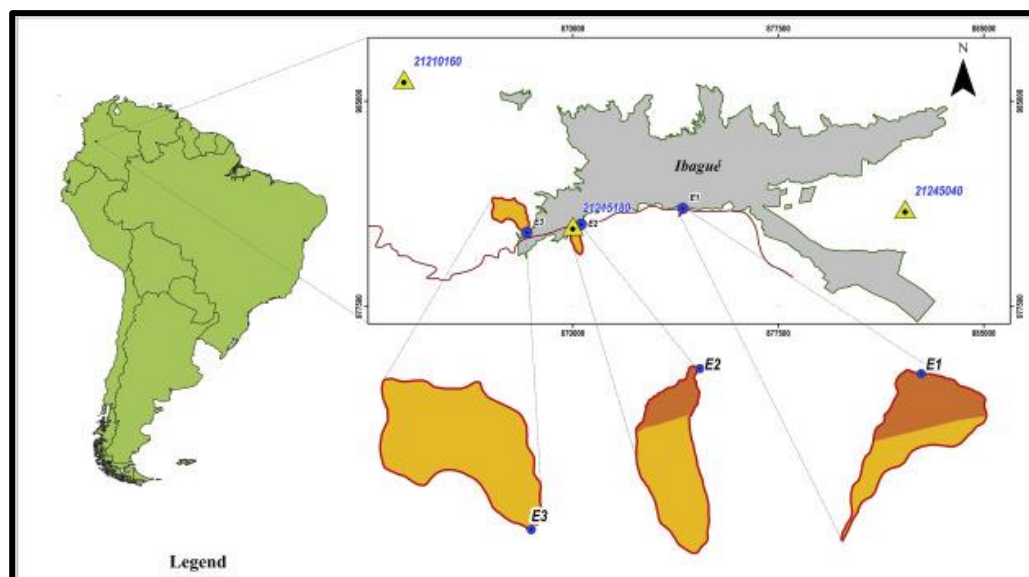
Modelos Estadísticos para Simular Tendencias Hidrológicas

Durante las últimas décadas se ha generado un extenso debate dentro de la comunidad científica dedicada al estudio de la hidrología en relación al análisis de la frecuencia de las crecidas que se presentan con un enfoque no estacionario, sin tener en cuenta los patrones climáticos y las transformaciones a los que son sometidos los sistemas hidrológicos climático (Jimenez et al., 2022)

Jimenez et al., (2022) da a conocer el propósito de esta investigación es analizar como el uso de los suelos que se presentan en contaste cambio y el cambio climático generado en el área de Ibagué- Cajamarca ubicado en Colombia afectan las estructuras existentes en dicha obra vial. Del mismo modo se comparan y evalúan los resultados obtenidos del análisis de caudales máximos en un enfoque no estacionario, considerando el cambio climático.

Tal como Jimenez et al., (2022) enfatiza la evaluación e identificación de tres estructuras destinadas al drenaje que presenta la vía, designadas por un renombre de E1, E2 Y E3, para realizar el análisis detallado de la capacidad de drenaje de estas estructuras.

Figura 7. Ubicación de estructuras de drenaje vial para estudio



Tomado de Jimenez et al., (2022)

De acuerdo Jimenez et al., (2022) una vez identificada la zona tal como se observa en la **figura 7**, se procedió a utilizar un modelo de elevación digital y técnicas de sistemas de información geográfica para delimitar las áreas de captación que contribuyen las estructuras de drenaje. Seguidamente se asignaron las principales características físicas de las estructuras y la modelación hidrológica por medio Storm Water Management Model (SWMM) para establecer los caudales máximos y la estimación de frecuencia para las crecidas de flujos no estacionarios. No obstante, se realizó la simulación de los cambios del uso del suelo siendo analizado mediante la regresión lineal presentada entre el uso que tiene el suelo en el área por periodos y por último la simulación de cambio climático en un lapso dividido de 3 periodos desde el 2011 hasta 2100.

De esta manera Jimenez et al., (2022). Señala que los hallazgos del estudio logran proporcionar una contribución importante para la hidrología ya que aborda la selección entre los

modelos estacionarios y no estacionario, siendo una implementación efectiva para la práctica hidrológica.

Análisis y Discusión para Modelos Hidrológicos Nacionales

Una vez terminada la investigación para los modelos hidrológicos nacionales, me llamo la atención en que en su totalidad estos modelos son desarrollados por el software HEC RAS y los softwares que hacen parte en su mayoría por la recomendación que da el manual de INVIAS capítulo 1, donde se sintetiza la idea de los modelos de computo que ayudan a el diseño hidrológico para obras viales. Siendo notorio que a comparación de los artículos encontrados a nivel internacional el cual se dedican más al desarrollo de análisis de datos por medio de regresiones lineales y eventos supuestos en su mayoría un poco complejos para ser analizados y con un nivel de sistemas bastantes desarrollados.

En cuanto la información dedicada a la hidrología de vías fue recuperada de estudios fuera de las bibliotecas digitales ya que en estas no se presentaban tantos estudios enfocados a este tema. Por último, pero no menos importante el modelo desarrollado por Colombia en el cual se planteó el análisis no estacionario debido a que generalmente las simulaciones hechas aquí para periodos de tiempos en su generalidad se basan para eventos en donde no es tenido en cuenta las condiciones cambiantes del clima influyendo esto en una gran magnitud en la composición cambiante de los suelos a lo largo de los años debido a las situaciones climáticas y con esto la hidrología presente en la zona estudiada, dando una idea a que posiblemente a esta situación presentada del cambio de la composición de los suelos puede darse zonas en donde se presenten eventos de inundación que anteriormente no se contemplaban.

Capítulo 4. Estudios de Obras de Drenaje Internacionales.

Implementación de Sistemas De Drenaje Sostenible

La magnitud de las inundaciones ocurridas en el Reino Unido en el año 2007 dejó una profunda huella en la sociedad. Un total de 55.000 propiedades se vieron afectadas, y los costos estimados de los daños llegan a superar los €4.000 millones. Esta crisis desencadenó una exhaustiva evaluación a nivel nacional en busca de la gestión de aguas e inundaciones, aplicable a Inglaterra y Gales. Conforme a esto se determinó que aproximadamente dos tercios de las propiedades inundadas fueron directamente debido al desbordamiento del sistema de alcantarillado causado por las aguas pluviales provenientes de superficies impermeables, por lo que estas inundaciones de origen superficial resultaron en una carga excesiva para la infraestructura de drenaje existente, lo cual a su vez tuvo un impacto devastador en las propiedades afectadas (Ellis & Lundy, 2016).

Ellis & Lundy, (2016) menciona que, con el objetivo de promover el desarrollo sostenible, las autoridades de carreteras buscan con esto planificar obras de mitigación de inundaciones mediante la implementación de sistemas de drenajes sostenibles (SUDS), siendo importante mencionar que estas normas se presentan como una orientación técnica que busca minimizar los impactos asociados con las inundaciones y promover un enfoque respetuoso con el medio ambiente.

De acuerdo a lo analizado por Ellis & Lundy, (2016), en el marco de la responsabilidad estratégica de los organismos reguladores fueron desarrollados mapas de inundaciones causadas por las aguas superficiales con el fin de identificar las áreas más vulnerables y expuestas a estos eventos con esto, buscar soluciones óptimas para ayudar a reducir las causas y los impactos

eventos venideros. Estableciendo así en las solicitudes de planificación estándares mínimos de funcionamiento para los sistemas SUDS implementados considerando además la viabilidad económica de mantener estos sistemas. Siendo así una alternativa por la cual se considera para la inclusión de una evaluación más amplia de los beneficios y costos de reducir el flujo de aguas pluviales en los sistemas de alcantarillado combinados mediante una mayor adopción de los SUDS (Ellis & Lundy, 2016).

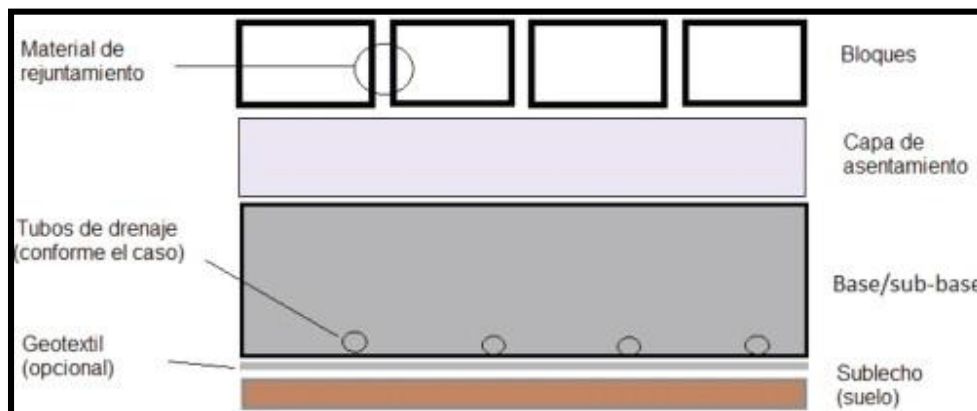
Pavimentos Permeables en Hormigón

Jorge Luis et al., (2015) expone una idea de que los entornos urbanos y la transformación del suelo se destaca la particularidad que se convierten en áreas impermeables, generando con esto el incremento del flujo de agua que se presenta en las superficies durante los episodios de precipitaciones intensas, el deterioro del porcentaje de calidad que tiene el agua en las zonas urbanas y además la reducción de agua en los acuíferos subterráneos.

De acuerdo con Sequera et. al, (2015) manifiesta que los pavimentos permeables tienen como función ofrecer recolección de aguas pluviales, permitiendo su debida evacuación, evitando el encharcamiento debido a la gran eficiencia de su drenaje.

Teniendo en cuenta la problemática presentada surgieron ideales se plantean opciones teniendo como finalidad de emplear dispositivos que ayuden a regular el drenaje superficial de manera eficiente, dada la circunstancia presentadas se plantea un enfoque científico y ambientalmente consciente con la hidrología urbana más reciente, en busca de tomar medidas tanto como estructurales y de manejo de drenaje para las obras viales, en donde se busca mantener las condiciones de escurrimientos planteadas y una fuente de generación de agua por ejemplo la estructura expuesta en la **figura 8**.

Figura 8. Composición de pavimentos permeables



Tomado de Jorge Luis et al., (2015).

Es por esto que se propone implementar elementos de regulación del agua, en este caso la ejecución de los pavimentos permeables, presentándose como una solución eficaz para reducir el caudal del agua al tiempo de fomentar la infiltración y la evaporación de la misma. Considerando que, las eficacias de los elementos dependen de la cantidad del tráfico al que se ve expuesto y al mantenimiento que se les da a estos, es decir, la limpieza o el reemplazo del material utilizado, con objetivo de prevenir obstrucciones causadas por sedimentos finos que disminuyen la capacidad que proporcionan estos pavimentos para la infiltración del agua existente. En la variedad de las opciones disponibles se exponen cinco tipos de pavimentos permeables, estos son, pavimento de asfalto poroso, pavimento de concreto poroso, pavimentos compuestos por bloques de huecos de concreto el cual poseen la característica de estar rellenos de arena o vegetación favoreciendo la infiltración y la retención de agua en el suelo, seguidamente los pavimentos formados por bloques de concreto el cual presentan juntas entre los bloques y finalmente el pavimento conocido como grilla construidos con una forma particular de celdas tal como se muestra en la **figura 9** (Jorge Luis et al., 2015).

Figura 9. *Tipos de pavimentos permeables*



Tomado de Jorge Luis et al., (2015).

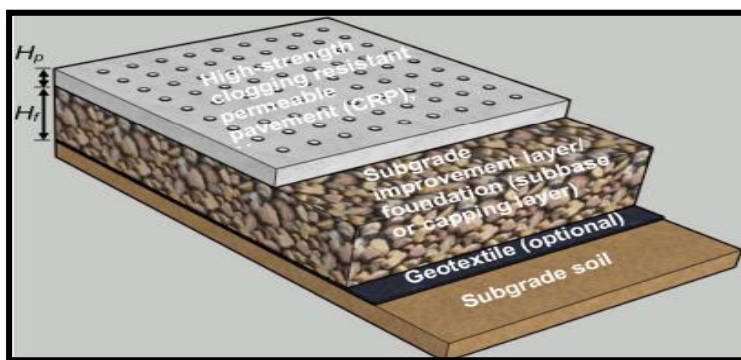
Con el propósito de investigar y analizar los flujos de infiltración y escurrimiento superficial, Kia et al., (2021) llevo a cabo la construcción experimental de una parcela con dimensiones reducidas para estudiar y medir los flujos hidrológicos. Al analizar el comportamiento de las curvas de variación temporal de los distintos flujos hidrológicos se puede destacar el hecho que a medida que aumenta la intensidad de la lluvia se obtendrá un incremento para el escurrimiento superficial presentando, igualmente una mayor efectividad para el escurrimiento cuando se presentan mayores pendientes en la vía.

A juicio de Kia et al., (2021) manifiesta que la expansión urbana y el aumento de las infraestructuras impermeables han incrementado la vulnerabilidad de las ciudades ante las inundaciones. Estos eventos climáticos adversos tienen consecuencias negativas tanto a nivel local como nacional, representando un desafío para muchos países. Ante esta situación, los gobiernos, las autoridades locales, los arquitectos y los urbanistas están activamente comprometidos en buscar formas de mitigar los efectos de las inundaciones. Las proyecciones indican que el costo anual de los daños por inundaciones aumentará significativamente en las próximas décadas, alcanzando cifras alarmantes. En los países en vías de desarrollo, especialmente aquellos afectados por vientos, las inundaciones urbanas representan un grave

problema que puede tener consecuencias devastadoras para la población. La falta de planificación adecuada y recursos para la recuperación y restauración después de las inundaciones agrava aún más el impacto en las comunidades afectadas. Mejorar la gestión y el control de las inundaciones seguirá siendo un desafío importante para la sociedad en un futuro cercano.

Los pavimentos permeables convencionales, hechos de materiales altamente porosos, permiten un rápido drenaje de las aguas superficiales como se puede observar en la **figura 10**, evitando que se acumulen en superficies impermeables. Sin embargo, estos pavimentos son propensos a la obstrucción, lo que afecta negativamente su rendimiento y vida útil. La obstrucción ocurre cuando partículas y residuos se acumulan y obstruyen los poros del pavimento, reduciendo su capacidad de drenaje. El desafío radica en la compleja estructura de poros de los pavimentos permeables convencionales, que presenta secciones transversales y conexiones variables. Esta estructura propensa a la obstrucción requiere un mantenimiento regular, como la limpieza mediante aspiración o lavado a presión, para asegurar su funcionamiento eficiente (Kia et al., 2017; Kia et al., 2018).

Figura 10. *Composición del pavimento permeable*



Tomado de Kia et al., (2021).

Kia et al., 2021 declara que recientemente, se ha logrado un avance significativo en el desarrollo de un tipo de pavimento permeable innovador y altamente efectivo en términos de resistencia, permeabilidad y capacidad para evitar la obstrucción. Este nuevo pavimento permeable se conoce como pavimento permeable resistente a la colmatación (CRP). Su característica distintiva radica en la creación de una estructura de poros uniforme con una mínima tortuosidad. Tanto las pruebas de laboratorio como los modelos matemáticos han evidenciado un rendimiento superior de estos materiales en comparación con el hormigón permeable convencional. Una de las ventajas más destacadas del CRP es su capacidad para resistir la obstrucción incluso después de estar expuesto repetidamente a flujos de agua que contienen partículas de arena y arcilla. Su resistencia es al menos el doble y su permeabilidad es diez veces mayor en comparación con los sistemas convencionales que tienen la misma porosidad. Esto indica que el CRP tiene un potencial significativo para superar al pavimento permeable convencional en términos de infiltración de precipitaciones y escorrentía superficial.

El pavimento permeable resistente a la colmatación (CRP) ha introducido una característica innovadora al permitir la inclusión de refuerzos de acero en su estructura porosa. Esto representa un hito significativo, ya que es la primera vez que se pueden utilizar refuerzos de acero en pavimentos permeables. Este avance no solo mejora la resistencia a la flexión del pavimento, sino que también proporciona un control térmico eficiente de las grietas. El CRP tiene un amplio espectro de aplicaciones, siendo especialmente adecuado para su uso en carreteras de alto tráfico, donde se requiere una mayor resistencia a las inundaciones urbanas. Este sistema ha demostrado ser más fácil de construir a escala in situ en comparación con los sistemas convencionales. La utilización de un material cementoso autocompactante elimina la necesidad de contar con contratistas especializados para su colocación, evitando así la sobre

compactación o el cierre de los poros superficiales. Sin embargo, para llevar esta innovación a la práctica de manera efectiva, es fundamental contar con una metodología de diseño sólida. Es necesario desarrollar un enfoque de diseño confiable que permita la implementación exitosa del CRP en diferentes proyectos y asegure su óptimo funcionamiento en condiciones reales (Kia et al., 2021).

La metodología propuesta combina las directrices de diseño estructural e hidrológico para desarrollar un enfoque integrado de los pavimentos permeables. El método determina el espesor de la cimentación y de la losa del pavimento, para satisfacer un conjunto particular de requisitos de carga y drenaje (Kia et al., 2021).

El proceso se compone de las siguientes etapas principales:

- a) Calcular el espesor de la cimentación para cumplir con los requisitos de diseño estructural, considerando el módulo de la superficie de la subrogante y la clase de cimentación.
- b) Determinar el espesor de la cimentación necesario para el almacenamiento de aguas pluviales, teniendo en cuenta el evento de precipitación de diseño y el volumen de escorrentía.
- c) Establecer el espesor de la losa de pavimento basándose en la carga de tráfico de diseño, la rigidez de la cimentación y la resistencia a la compresión del hormigón.

La resistencia a la compresión del pavimento permeable estará determinada por la porosidad requerida para permitir la infiltración adecuada de la escorrentía pluvial (Kia et al., 2021).

De esta forma Kia et al., (2021) indica que los pavimentos permeables de hormigón son una solución sostenible para el drenaje urbano y la mitigación de inundaciones. Sin embargo, su baja resistencia y su susceptibilidad a la obstrucción por sedimentos han limitado su aplicación en

ciertas áreas. Para superar estos desafíos, se ha desarrollado un pavimento permeable resistente a la obstrucción (PCP) de alta resistencia. Este PCP puede ofrecer una solución más efectiva y duradera. En este estudio, se ha creado una guía de diseño para el PCP que integra aspectos estructurales e hidrológicos, lo cual es un enfoque novedoso.

Mediante la aplicación de esta guía en una serie de estudios de casos, se ha comparado el rendimiento del PCP con los pavimentos permeables de hormigón convencionales en diversas condiciones de carga de tráfico. Este enfoque integrado proporciona información valiosa para la selección y diseño de pavimentos permeables más eficientes y confiables (Kia et al., 2021).

Análisis y Discusión para Sistemas de Drenaje Internacionales

Actualmente, a nivel internacional se contemplan una variedad de obras viales, siendo estas de acuerdo al sentido común, una ayuda en lo económico ya que no se requiere estructuras en la misma magnitud normalmente vista, ya que de acuerdo lo planteado en su mayoría se espera que el sistema de drenaje empiece a filtrar el agua presentada en una zona desde la ayuda de los pavimentos o sistemas urbanos sostenibles.

En donde es claro que a nivel internacional siempre están en una busca constante de más soluciones además de las que están establecidas tradicionalmente y adaptándose a todo cambio presentado, teniendo en cuenta con esto todos los factores que componen los eventos de inundaciones, ayudando igualmente a la composición paisajística, a la sostenibilidad de estos sistemas y al medio ambiente.

Respaldando lo anteriormente mencionado de acuerdo lo investigado por García., et al (2022) en lo que se refiere a pavimentos permeables el cual declara que, los sistemas de pavimento

permeable son unas de las técnicas más valoradas en el ámbito del drenaje urbano sostenible para la gestión adecuadas de las aguas pluviales de manera eficaz.

Igualmente, el punto de vista de Yang, (2020) el cual manifiesta que los sistemas sostenibles urbanos radican con los eventos de inundación y ayuda a mejorar los recursos hídricos existentes, apoyando esto la idea sintetizada anteriormente expuesta.

Capítulo 5. Obras de Drenaje Nacionales

Normatividad vigente de drenaje superficial.

En Colombia según el Manual de Drenaje Para Carreteras se puede definir el drenaje superficial como los tipos de obra de construcción civil que se puedan realizar para evacuar el flujo de agua de escorrentías superficiales según el diseño que se requiera de acuerdo a los cálculos previos al diseño. Las estructuras hidráulicas de drenaje vial operan mediante un flujo de superficie libre o canal abierto, que está influenciado por la presión atmosférica. Dependiendo de cómo varíe la profundidad y la velocidad del flujo a lo largo del canal y con el tiempo, se pueden observar diferentes tipos de flujos, como uniformes, no uniformes o variados, el cual resultan clasificaciones útiles para las aplicaciones prácticas en el diseño y el funcionamiento de dichas estructuras hidráulicas de drenaje vial, (INVIAS, 2009).

Cada tipo de flujo posee una variedad de ecuaciones con el fin de determinar las distintas propiedades y características propias de cada flujo que posibilitan la realización del diseño apropiado a los diferentes tipos de obras en drenajes superficiales.

Dentro del Manual de drenaje para carreteras en Colombia se tienen estructuras para el drenaje superficial tales como las cunetas, zanjas de coronación o contracunetas y zanjas en pie o bases de terraplenes, alcantarillas, puentes y obras complementarias las cuales pueden ser canales, estructuras de caídas, bateas, entre otras. Todas estas estructuras se definen según el INVIAS, (2009) de la siguiente manera:

Cunetas: La cuneta son elementos de drenaje que tienen la función de recolectar las aguas superficiales que se generan en la plataforma de la vía y en los taludes excavados, con el fin de dirigirlos de manera longitudinal para garantizar su correcta disposición.

Zanjas de coronación o contra cunetas y zanjas en pie o bases de terraplenes: Son excavaciones que se ubican en la parte superior del talud de corte o cerca de la base del terraplén, con el

propósito de interceptar el flujo de agua de escorrentía, evitando que las aguas pluviales pasen a través del talud. Por otro lado, las zanjas presentadas en la base de los terraplenes, se encargan de captar el escurrimiento de agua que se dirige hacia los terraplenes, protegiéndolos contra la erosión.

Alcantarillas: Es un conducto de longitud limitada que se utiliza para permitir el paso del agua de un lado al otro, debajo de la vía. Estas estructuras pueden presentar diversas formas geométricas.

Puentes: Son estructuras seguras que garantizan el flujo del cauce natural de ríos, quebradas y se diseñan de acuerdo a los diferentes parámetros hidráulicos, localización, componentes del suelo y topografía del terreno existente.

Obras complementarias:

Diseño de canales: Considera aspectos tales como la forma o la sección transversal, las pendientes o los taludes horizontales, la pendiente longitudinal del canal, las permeabilidades permisibles, los coeficientes de rigurosidad

Diseño de estructuras de caída escalonadas, rápidas lisas y escalonadas combinadas: En Colombia se tienen en cuenta las características topográficas existentes del país la cual requieren estructuras de caída escalonada con flujo rasante.

Bateas, vados o badenes: Son comúnmente implementadas en carreteras de tercer orden, construidas de concreto y tienen la capacidad de permitir el flujo vehicular a la vez que facilitan el paso de pequeñas corrientes de agua, como quebradas o arroyos.

Sistemas de Drenaje Superficial en Vías Urbanas

El sistema de drenaje superficial urbano se propone como una respuesta para gestionar el escurrimiento de las aguas pluviales en áreas urbanas y pobladas, centrándose principalmente en los procesos que ayudan al escurrimiento superficial. Este enfoque se basa en la premisa de que las redes de tuberías de drenaje tienen una capacidad hidráulica adecuada para manejar el flujo de agua generado durante los eventos de lluvia. (Cárdenas, 2017).

De acuerdo a Cuadros & Vargas. (2022) se realiza una guía metodológica para el diseño de drenajes superficial en vías urbanas siguiendo los siguientes pasos: Se presenta una serie de acciones previas al diseño, entre las que se destaca la planificación mediante la descripción del proyecto, definición de objetivos de diseño, la revisión de información de entrada y el desarrollo del concepto preliminar, esto con el fin de proceder a la iniciación del diseño detallado posteriormente se presentan los principales elementos del proceso a seguir para la realización del diseño del sistema de drenaje pluvial en el área de estudio. Los elementos se pueden resumir en la recopilación de datos, el desarrollo del concepto preliminar, el perfeccionamiento del concepto y el diseño con su respectiva documentación final.

Del mismo modo según Cuadros & Vargas. (2022) se debe tener en cuenta el diseño geométrico el cual tiene en cuenta los diferentes componentes de recolección de aguas de escorrentías tales como sumideros, pozos, colectores y tuberías laterales las cuales tienen como función la recolección de dichas escorrentías superficiales y drenarlas a canales subterráneos y obras de drenaje subterráneos. Estas deben de cumplir ciertos requisitos de diseño donde intervienen diferentes ecuaciones hidráulicas que se componen de variables hidrológicas, topográficas, ambientales entre otras. Así mismo se deben contar con los parámetros geométricos de la vía y parámetros hidráulicos.

Finalmente, Cárdenas, (2017) se destacan las conclusiones realizadas para el análisis del drenaje superficial de vías urbanas la cual sintetiza el siguiente aporte:

“El estudio del drenaje urbano debe abordarse desde dos enfoques principales, En primer lugar, se debe enfocar en la reducción del caudal del agua que circula en la superficie, lo cual implica aumentar la cantidad de agua captada y dirigida correctamente, cabe resaltar que esto contribuye a mitigar el riesgo de inundaciones y problemas asociados. En segundo lugar, es

necesario considerar la reducción de los niveles de peligrosidad en las vías, el cual implica implementar medidas que minimicen los riesgos y las consecuencias asociadas a eventos climáticos intensos, como la disminución de la acumulación de agua en la superficie de la carretera. Es fundamental tener en cuenta que no es posible lograr captar la totalidad del agua en una vía, por lo tanto, si se desconoce esta situación, existe el riesgo de sobre dimensionar las estructuras presentes del alcantarillado, lo que podría resultar en costos más altos tanto en la construcción como en la instalación y el mantenimiento de estas estructuras. Por ello es importante que el análisis bidimensional del flujo permita generar el mayor provecho a la infraestructura existente.

Alternativas para Diseño de Drenaje de Vías en Colombia

Las alternativas para el drenaje de vías en Colombia pueden ser de tipo superficial o subsuperficial considerando dentro de estas las obras de drenaje subterráneas en donde todas cumplen funciones específicas tales como evacuar el agua de escorrentías de las vías principales. En los siguientes casos de estudio se presentan las alternativas superficiales para una obra de drenaje en el municipio de Duitama, Boyacá. De igual manera se analiza el diseño hidráulico realizado sobre el cauce de la quebrada Malachi en Girardot y finalmente se analiza del mismo modo una propuesta de diseño de un drenaje vial para el tramo de carretera terciaria en el municipio de la Mesa, Cundinamarca (Tibaduiza, 2022).

Estos tres estudios ejecutados en Colombia evidencian alternativas de diseño de drenaje superficial aplicados en diferentes casos y se compone de diferentes variables topográficas, hidráulicas, hidrológicas que son propias de cada localidad y municipio.

Para Tibaduiza, (2022) las obras de drenaje superficiales se definen de la siguiente manera:

“Las obras de drenaje superficial engloba diversas estructuras diseñadas con el propósito de captar y dirigir aguas de lluvia hacia canales naturales, sistemas de alcantarillado o hacia la zona freática del suelo. Estas obras desempeñan un papel fundamental al actuar directamente sobre la vía y controlar la erosión, lo cual es esencial para garantizar la estabilidad de la misma.”

Según el estudio realizado Tibaduiza, (2022) considera pertinente el uso de drenajes superficiales al considerar las cunetas para instalar en una vía, se tiene en cuenta que estas obras disminuyen las dimensiones de la vía. Mediante este estudio se consideran las desventajas de la realización de obras de drenaje superficiales teniendo en cuenta los diferentes parámetros y variables en cuanto al cálculo para el diseño del mismo modo afecta en gran parte las condiciones generales del terreno, la población y el espacio de ejecución del proyecto por lo cual hace inviable la realización de este tipo de obras.

El siguiente estudio planteado por Sandoval & Sierra, (2016), de igual manera busca alternativas para la quebrada MALACHÍ, planteando la necesidad de estabilizar y garantizar que el flujo de la quebrada no cause socavación ni provoque daños. Además, se requiere que la estructura de drenaje tenga la capacidad suficiente para evacuar el caudal que presenta la quebrada.

De acuerdo al estudio de drenaje superficial se tienen dos alternativas contempladas en el manual de drenaje para carreteras de Colombia tales son las obras complementarias como bateas, vados o badenes y como segunda alternativa los alcantarillados. Tras realizar una inspección de la alcantarilla, se determinó que está, presenta un nivel significativo de deterioro. El cual su funcionamiento actual resulta insuficiente, por lo tanto, surge la necesidad de ser reemplazada. Por lo tanto, se recomienda reemplazar la alcantarilla actual por una alcantarilla cuadrada (Box Culvert) conforme a los diseños propuestos que garanticen la eficiencia en el flujo de aguas

superficiales y que proporcionen a su vez el mayor desempeño posible (Sandoval & Sierra, 2016).

Por último, se tiene según Romero et al., (2017) plantea una propuesta para el diseño de un sistema de drenaje vial para la carretera terciaria San Joaquín alto del tigre en el municipio de la Mesa, Cundinamarca quien busca el diseño óptimo para mejorar el sistema de drenaje actual. Para este estudio se tiene en cuenta la descripción de la topografía y estado de la vía en el tramo de carretera San Joaquín por ende concluyen el estudio de la siguiente manera:

“Tras el análisis de los datos y considerando los parámetros para su diseño, se procedió a presentar una propuesta de diseño de drenaje con una sección triangulas, con el objetivo de facilitar la construcción en función de la topografía del área de estudio. Además, se propuso el diseño de una cámara de captación ubicada en la quebrada el Tigre, con la función de recolectar el drenaje generado por las cunetas.” (Romero et al., 2017)

Diseño de Cunetas y Alcantarillados como Sistema de Drenaje para Carreteras

Según la metodología aplicada por Tequia et al., (2022) Para garantizar un correcto funcionamiento de las carreteras rurales en el Municipio de Ataco, Tolima, es necesario diseñar y construir adecuadamente las estructuras de drenaje, como las cunetas y alcantarillados, se deben tomar en cuenta los siguientes componentes descritos en el propio artículo:

- a) Para realizar el análisis de estudios hidráulicos adecuados, es necesario caracterizar el área de estudio en términos meteorológicos e hidrológicos.
- b) Estudiar las variables hidrológicas necesarias para estimar los caudales de diseño mediante el análisis de la información recolectada, considerando elementos como la topografía y el tipo de suelo.

- c) Establecer los criterios técnicos para determinar el dimensionamiento de las obras de drenaje.
- d) Evaluar la capacidad hidráulica de las estructuras de drenaje tanto principales como secundarias, se realiza utilizando los caudales máximos del estudio hidrológico.
- e) Establecer la distancia máxima permitida entre las estructuras de drenaje transversales para asegurar el adecuado transporte de aguas de precipitación, para prevenir problemas en la vía como hidroplaneo.

De igual manera se destaca según Tequia et al., (2022) indica la importancia de reconocer la información climatológica, hidrológica y topográfica, así como el análisis de las estructuras de drenaje, ya que son elementos fundamentales para realizar cálculos precisos en la modelación hidráulica, con la finalidad de simular los datos cada vez más exactos.

Análisis y Discusión de Drenaje Superficial a Nivel Nacional

Teniendo en cuenta los diferentes aportes de los estudios realizados en diferentes municipios a nivel nacional creo que la realización de obras de drenaje deben garantizar el flujo adecuado de acuerdo a los diseños establecidos considerando este como el componente principal para establecer un diseño previo que se requiera para evacuar las escorrentías superficiales proveniente de la lluvia, además se evidencia las ventajas y desventajas que están puedan presentar tales son las grandes dimensiones que no se pueden usar en todas las carreteras principalmente en las vías terciarias y que suelen ser más resistentes ante deterioros o socavaciones.

Las obras de drenaje superficiales en Colombia deben realizarse siguiendo los diferentes parámetros de diseño establecidos por el Manual de obra de drenaje de Colombia del 2009 así

mismo regido por las diferentes normas de INVIAE que posibilitan la realización óptima de los drenajes superficiales. Entre los drenajes superficiales más destacados se encuentran las cunetas y las alcantarillas desde las simples hasta las múltiples y se debe tener en cuenta de igual manera el diseño en donde influyen variables dependientes a las estructuras de drenajes tales como la climatología, la hidrología, la topografía y el análisis dentro de las diferentes estructuras que se puedan contemplar para el diseño óptimo.

Capítulo 6. Análisis Exhaustivo y Debate Global

Al culminar la investigación total del desarrollo de la monografía el cual tiene como fin plasmar las alternativas para modelos hidrológicos y diseño de obras de drenaje a nivel nacional e internacional teniendo como objetivo expandir los conocimientos convencionales que se tienen sobre estos temas, que en su mayoría son conocimientos de uso nacional ya que son los que hoy en día como estudiante de ingeniería he podido ver a través del lapso de tiempo de estudio.

Es aquí donde hago síntesis y una comparación de acuerdo a lo investigado, en este caso para los modelos hidrológicos a nivel nacional e internacional, donde se observó la medida en los avances que se dan por fuera de Colombia para la predicción de eventos de inundaciones, siendo esto de acuerdo lo investigado generado de una manera más compleja ya que estos estudios interfieren varios modelos de desarrollo y regresiones estadísticas, es importante resaltar que en su mayoría para los modelos hidrológicos enfocados en la inundación de vías fueron innumerables las fuentes encontradas en las bibliotecas dando a conocer la dimensión de estudio que hay en otras partes en cuanto a este tema se refiere, por su parte para Colombia los estudios realizados en donde se sintetice el modelo a un enfoque de las inundaciones de las vías fueron pocas y en menor número que lo anteriormente expuesto.

De acuerdo a las obras de drenaje existentes se plasmaron, las alternativas optadas a nivel internacional, en el cual resalto que en su mayoría de esta búsqueda fueron estudios referidos a sistemas urbanos sostenibles y pavimentos permeables, haciendo una idea de que lo convencionalmente visto en Colombia el cual son estructuras hidráulicas de drenaje como las alcantarillas, canales, cunetas que en su mayoría se componen de pavimentos poco permeables pasa como una opción a segundo plano a nivel de estudio para estos países siendo una prioridad

empezar el drenaje presentado en las superficies desde los pavimentos existentes en la zona y la implementación de SUDS.

Por ultimo avalo la importancia que tiene el contenido de la anterior temática expuesta el cual inicia desde una idea para conocer y sintetizar lo que está por fuera del medio conocido, plasmando y ayudando al conocimiento a todo lo que se refiere el tema de sistemas de drenaje superficiales.

Conclusiones

De acuerdo a lo desarrollado anteriormente, planteado se pudo establecer las siguientes conclusiones teniendo en cuenta lo investigado y recapitulado en el desarrollo de la monografía:

El estudio hidrológico de una zona es sumamente importante, ya que mediante a estos se puede determinar un diseño adecuado dependiendo la necesidad de drenaje que necesita la zona e igualmente se le da la viabilidad o la inviabilidad que presenta para ser habitada, permitiendo analizar y predecir la respuesta hidrológica frente ante diferentes eventos.

A medida del paso del tiempo se han empleado diversos sistemas de drenaje en la busca constante de soluciones óptimas para la presencia de agua en las obras viales, buscando alternativas en donde se tiene en cuenta los recursos amigables con el medio ambiente, costos y eficiencia de los sistemas. Siendo así importante implementar los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible ya que estos presentan un bajo costo, poco mantenimiento y una efectividad significativa conforme al drenaje de aguas.

De acuerdo al estudio basado a nivel Nacional e Internacional es claro, que el drenaje de una vía depende de la pendiente y bombeo que presentan estas, siendo elementos esenciales para el drenaje eficiente de las vías ayudando a prevenir las inundaciones, garantizar la seguridad vial y proteger las infraestructuras en las áreas donde se presenta estos eventos en gran magnitud.

El hidroplaneo es uno de los mayores problemas presentados en las estructuras viales, es de gran importancia tener en cuenta la simulación una vez la carretera diseñada, ya que este fenómeno presenta un riesgo bastante considerable y aumenta su probabilidad en cuanto a la mal conducción de un vehículo y la manipulación irresponsable de éste, es por esto que en su mayoría se recomienda el buen estado de los elementos existentes de los vehículos, además del

manejo consciente en las zonas viales con presencia de cierta humedad, ya que seguramente en una vía así tenga una buena simulación y una buena construcción para los drenajes, mientras ocurran eventos de precipitación las vías permanecerán húmedas por cierto lapso de tiempo y una mala manipulación del vehículo o el mal estado de los neumáticos de esté, puede ayudar a complementar a la presencia de accidentes en la vía a causa del hidropneumático.

Los sistemas de drenaje propuesto por la normatividad INVIAE para Colombia aún siguen siendo los tradicionales que a comparación a las alternativas internacionales resultan ser estructuras económicamente costosas, siendo estos sistemas poco implementados a nivel nacional y solo para ciudades mayormente desarrolladas como Bogotá.

Finalmente, resalto la metodología desarrollada para opción a grado y la investigación que se llevó a cabo para la presente monografía, permitiendo está expandir, investigar, conocer y argumentar un tema conocido, visto desde diferentes perspectivas tanto Nacionales e Internacionales reconociendo los estudios y el enfoque que se le da en el mundo al tema de drenajes superficiales, respaldando y complementando lo conocido sobre el tema a lo largo del tiempo de estudio como estudiante de ingeniería civil, siendo esto un aporte bastante significativo para lo que ya se entendía, e incitando a seguir indagando sobre lo desconocido con el fin de aprender cada vez más.

Referencias Bibliográficas

- Abu-Salih, B., Wongthongtham, P., Coutinho, K., Qaddoura, R., Alshaweesh, O., & Wedyan, M. (2023). *The development of a road network flood risk detection model using optimised ensemble learning. Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 122, 106081. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106081>
- Kalantari, Z., Briel, A., Lyon, S. W., Olofsson, B., & Folkesson, L. (2014). On the utilization of hydrological modelling for road drainage design under climate and land use change. *Science of The Total Environment*, 475, 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.114>
- Aquite Salazar, D. F., Pachón Moreno, C., & Pinillos Castiblanco, G. A. (2021). *Diseño y calculo estructural e hidrológico de un Box culvert para intervenir un tramo de la quebrada la tusa en el barrio Ecoparaiso en la ciudad de Ibagué.* <https://repository.ucc.edu.co/items/0f31156a-7f0b-4b33-8881-249d83840fc4>
- Cabello Sequera Sandra, Campuzano Vera Luisana, Espinoza Correa Jesús, Sánchez Mendieta Carlos (2015). *Concreto Poroso: Constitución, variables influyente y protocolos para su caracterización. Journal of the Institution of Engineers*, 25(2), 64- 69. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/5084>
- Cuadros Lopez, K. P., & Vargas Mateus, I. G. (2022). *Obtenido de Guía metodológica para el diseño de sistemas de drenaje superficial en vías urbanas de bajo tráfico y aplicación a un caso de estudio.* <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/2122>

- Dávila Arregui, C. G., & Torres Pérez, I. D. (2010). *Implementación de un sistema de optimización de procesos constructivos para obras de drenaje vial* (Bachelor's thesis, QUITO/PUCE/2010). <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/3600>
- Ellis, J. B., & Lundy, L. (2016). *Implementing sustainable drainage systems for urban surface water management within the regulatory framework in England and Wales*. *Journal of Environmental Management*, 183, 630-636. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.022>
- García-Haba, E., Rodríguez-Hernández, J., Andrés-Doménech, I., Hernández-Crespo, C., Anta, J., & Martín, M. (2022). *Diseño de pavimentos permeables en España: situación actual y necesidades futuras*. *Ingeniería del agua*, 26(4), 279-296.
https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/32188/IA_264_18290.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Gomez, A. (2010). *Manual de Cálculo, Diseño e Instalación de Tubos de Concreto Armado*. ATHA. http://www.andece.org/wp-content/uploads/2019/06/manual_calculo_atha.pdf
- Invías, *Manual de drenaje para carreteras*. (2009.). Bogotá D.C.: Ministerio de Transportes, Instituto Nacional de Vías. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentostecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras>
- Jaraba, D. C. M., Padilla, R. A. C., Peñaranda, C. E. J., Martínez, E. E. R., & Navarro, F. D. L. (2021). *Amenaza y vulnerabilidad por inundación del brazo de Mompóx (río Magdalena)*, corregimiento de Cantera, Bolívar, Colombia. *Prospectiva*, 19(2), 13.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7997620>

- Jiménez-U, M., Peña, L. E., & López, J. (2022). *Non-stationary analysis for road drainage design under land-use and climate change scenarios*. *Helixon*, 8(2), 08942. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08942>
- Jorge Luis, Z.-T., Brito Jeferson, S., & Miriam, D. F.-C. (2015). *Escurrimiento en pavimentos de bloques de suelo-cemento: Un abordaje experimental*. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(1), 35-47. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(15\)72105-0](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(15)72105-0)
- Kalantari, Z., Briel, A., Lyon, S. W., Olofsson, B., & Folkeson, L. (2014). *On the utilization of hydrological modelling for road drainage design under climate and land use change*. *Science of The Total Environment*, 475, 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.114>
- Kane, M. (2021). *Road safety: First step of an algorithm to identify the potential water ponding on routes*. *Measurement*, 174, 108980. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.108980>
- Kia, A., Delens, J. M., Wong, H. S., & Cheeseman, C. R. (2021). *Structural and hydrological design of permeable concrete pavements*. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00564. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00564>
- Kia, A., Wong, H. S., & Cheeseman, C. R. (2017). *Clogging in permeable concrete: A review*. *Journal of Environmental Management*, 193, 221-233. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>

- Kia, A., Wong, H. S., & Cheeseman, C. R. (2018). Defining clogging potential for permeable concrete. *Journal of Environmental Management*, 220, 44-53.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.016>
- Lei, Y., Hu, X., Wang, H., You, Z., Zhou, Y. y Yang, X. (2017). *Efectos de la velocidad de los vehículos sobre la presión hidrodinámica de la superficie del pavimento: medición con un dispositivo diseñado*. *Medida*, 98, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.11.029>
- Liu, J., Zhang, Y., Yang, Y., Gu, X. y Xiao, M. (2018). Investigar las relaciones entre las inundaciones australianas y los índices climáticos a gran escala y el posible mecanismo. *Revista de Investigación Geofísica: Atmósferas*.
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2017JD028197>
- Luo, W., & Li, L. (2019). *Development of a new analytical water film depth (WFD) prediction model for asphalt pavement drainage evaluation*. *Construction and Building Materials*, 218, 530-542. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.142>
- Maldonado Pariguana, F. M. (2023). *Caudal y diseño del sistema de drenaje superficial para la protección de un depósito de desmonte de mina en el departamento de La Libertad*, 2022.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/111699>
- Miranda Naranjo, S. M., & Pachar Cando, J. F. (2012). *Diseño del drenaje superficial de calles, en el proyecto vial sector 3, de la parroquia pascuales, ubicado entre el km 18 y km 22 de la vía perimetral (Av. 56 NO), utilizando el software “storm water management model (SWMM)” de la environmental protection agency (EPA) (Bachelor's thesis)*.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/24648>

- Nazir, R., Ghareh, S., Mosallanezhad, M. y Moayedi, H. (2016). *La influencia de la intensidad de la lluvia en la pérdida de masa del suelo de taludes confinados celulares*. *Medida*, 81 , 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.11.007>
- Peña-Guzmán, C., Alvarino, N., Mora, C., & Mesa, D. (2016). *Determinación de Áreas de Inundación en el municipio de Chia-Colombia mediante Hec-Ras en la cuenca baja del Río Frío*. *European Scientific Journal*, 12(5). <https://core.ac.uk/download/pdf/236413294.pdf>
- Romero Vanegas, A. J., Gómez Pachón, L. F., & Ronchaquira Sabogal, Y. Y. (2017). *Propuesta de diseño de un sistema de drenaje vial para el tramo de carretera terciaria San Joaquín-Alto del Tigre en el municipio de La Mesa, Cundinamarca*. <https://repository.ugc.edu.co/handle/11396/5551>
- Tequia, W. E. A. T. A., Arana, H. J. R., & Cárdenas, D. O. E. (2022). *Guía práctica para el diseño de cunetas y alcantarillas como sistema de drenaje para carreteras de tercer orden, municipio de ataco departamento de tolima*. *Ingenio Magno*, 13(1), 19-43. <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/2572>
- Tibaduiza Garcia, O. J. (2022). *Estudio de alternativas para el diseño de un sistema de drenaje de la vía ubicada en la carrera 11 B entre las calles 7 y 8 Barrio Cundinamarca de Duitama Boyacá*. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/6720>
- Yang, X. (2020). *Sistema de drenaje urbano sostenible (SUDS)*. https://www.lareferencia.info/vufind/Record/ES_5fb159785eff5edee214fd543680c144
- Yepes, V. (2019). *Drenaje*. *El blog de Víctor Yepes*. <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/drenaje/>