



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

**PAVIMENTOS PERMEABLES, COMO
ESTRATEGIA PARA EL CONTROL DE
ESCORRENTIAS DE LA CIUDAD DE CURICÓ**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO

DE INGENIERO CONSTRUCTOR

PROFESOR GUÍA: DANIEL MORA MELIA

SEBASTIÁN ALFONSO ESPINOZA SUÁREZ

CURICÓ – CHILE

2022

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



UNIVERSIDAD DE TALCA
DIRECCIÓN
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD DE TALCA
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
CAMPUS CURICO

Curicó, 2022

Agradecimientos

Resumen ejecutivo

Con la expansión territorial que sufren las ciudades, varias de las áreas permeables han sido reemplazadas con superficies impermeables, que solo nos colaboran con el transporte de la escorrentía, además Chile es un país propenso a verse afectado por el cambio climático, debido a; sus bordes costeros, zonas áridas, semiáridas y bosques. Lo cual ocasiona grandes ciclos de lluvia, provocando inundaciones en las zonas urbanas.

Como una solución para el control de las inundaciones, nacen los “Sistemas urbanos de drenaje sostenible” (SUDS). Dichos sistemas ayudan a restaurar el ciclo hidrológico natural del agua, permitiendo controlar la cantidad y la calidad de la escorrentía. Dentro de los SUDS, se encuentran los pavimentos permeables, capaces de captar la escorrentía almacenarla e infiltrarla hacia el suelo.

La presente memoria de titulación busca analizar la eficacia de instalar distintos exponentes de pavimentos permeables en puntos críticos de la ciudad de Curicó. Para dicho estudio se ocuparán dos pavimentos permeables con distintas características (PP_1 Y PP_2), los cuales serán implementados en las calles de los puntos seleccionados y se harán simulaciones utilizando el 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% del área disponible para pavimentos, los cuales serán puestos a prueba con tres ciclos de lluvias de 24 horas distintos.

Al finalizar se encuentran los resultados de escorrentía superficial obtenida, para cada modelo aplicado de pavimentos permeables, en los porcentajes señalados anteriormente, además se muestra de manera gráfica si ocurre o no inundación. Estos resultados buscan motivar a las empresas constructoras a la utilización de pavimentos permeables en nuevas obras, al igual que otros tipos de SUDS.

Índice de Contenidos

Capítulo I: Introducción y Objetivos	9
1.1 Introducción	9
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo General	11
1.2.2 Objetivos Específicos.	11
1.3 Hipótesis.....	11
Capítulo II: Marco Teórico.....	12
2.1 Aguas lluvias	12
2.1.1 Orígenes de evacuación de aguas lluvias	12
2.1.2 Red de evacuación de aguas lluvias	12
2.1.3 Legislación y Normativa	13
2.1.4 Cambio climático en Chile	13
2.1.5 Problemática y soluciones	15
2.2 Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)	15
2.2.1 ¿Qué son los SUDS?	15
2.2.2 Orígenes de los SUDS.	16
2.2.3 Ejemplos de SUDS	17
2.3 Pavimentos permeables	22
2.3.1 Historia pavimentos permeables	22
2.3.2 Características de los pavimentos permeables	23
2.3.3 Clasificación de pavimentos permeables	28
2.3.4 Ventajas pavimentos permeables.....	30
2.3.5 Desventajas pavimentos permeables.....	31
2.4 Software SWMM	32
2.4.1 SWMM.....	33
2.4.2 Utilidades	33

4.4.3 Usos de SWMM	34
4.4.4 Conexión entre SWMM y los SUDS	35
Capítulo III: Marco Metodológico	36
3.1 Puntos de inundación.....	36
3.1.1 Selección de puntos de inundación	36
3.1.2 Puntos a analizar.....	37
3.2 Modelo SWMM	38
3.2.1 Módulo hidrológico	39
3.2.2 Módulo hidráulico	56
3.2.3 Módulo LID.....	57
Capítulo IV: Análisis de Resultados.....	61
4.1 Diseño SWMM	61
4.1.1 Modelo Punto 1	64
4.1.2 Modelo Punto 2	70
4.1.3 Comparación entre pavimentos permeables y cubiertas verdes	73
4.1.4 Caudales de escorrentía	76
Capítulo V: Conclusiones y Propuestas Futuras	78
5.1 Conclusiones	78
5.2 Propuestas futuras	78
Bibliografía	80

Índice de Ilustraciones

Ilustración. 2-1: Disminución de la infiltración al urbanizar.	16
Ilustración. 2-2: Esquema cubiertas verdes	17
Ilustración. 2-3: Esquema de un pozo de infiltración.	18
Ilustración. 2-4: Funcionamiento típico pavimento permeable de hormigón.....	19
Ilustración. 2-5: Cunetas verdes.	20
Ilustración. 2-6: Franjas filtrantes.....	21
Ilustración. 2-7: Estanques de retención	22
Ilustración. 2-8: Capas pavimentos permeables.....	23
Ilustración. 2-9: Césped con refuerzos de plástico.	24
Ilustración. 2-10: Adoquines con ranura.	25
Ilustración. 2-11: Hormigón poroso.	26
Ilustración. 2-12: Asfalto poroso.....	26
Ilustración. 2-13: Infiltración total al terreno.....	29
Ilustración. 2-14: Infiltración parcial al terreno.....	30
Ilustración. 2-15: Infiltración total al dren convencional.....	30
Ilustración 2-16: Diseño por SWMM.....	34
Ilustración 3-17: Punto crítico N°1, imagen satelital.	37
Ilustración 3-18: Punto crítico N°1, en estado inundado y no inundado.....	37
Ilustración 3-19: Punto crítico N °2, imagen satelital.....	38
Ilustración 3-20: Punto crítico N°2, en estado inundado y no inundado.....	38
Ilustración 3-21: Polígonos de Thiessen:.....	40
Ilustración 3-22: Ubicación estaciones pluviométricas.....	41
Ilustración 3-23: Ubicación de estaciones y cuenca a estudiar en el software ArcGIS.	45
Ilustración 3-24: Polígonos de Thiessen formado por las estaciones pluviométricas seleccionadas y el área de estudio.....	45
Ilustración 3-25: Área de influencia de los polígonos dentro de la cuenca de estudio.	46
Ilustración 3-26: Área de influencia de cada estación en la cuenca de interés.	46
Ilustración 3-27: Subcuencas Punto de Estudio N°1.	53
Ilustración 3-28: Subcuencas Punto de Estudio N°2.	53
Ilustración 3-29: LID control editor.	57
Ilustración 3-30: LID control editor. Datos de Superficie.	58
Ilustración 3-31: LID control editor, pavimento.....	58

Ilustración 3-32: LID control editor, almacenamiento.....	59
Ilustración 3-33: LID control editor, drenaje.....	60
Ilustración 4-34: Serie temporal 1.	61
Ilustración 4-35: Serie temporal 2.	61
Ilustración 4-36: Serie temporal 3.	62
Ilustración 4-37: Ingreso de series en SWMM.	63
Ilustración 4-38: Características de pluviómetros.....	64
Ilustración 4-39: Modelo Punto 1 SWMM.....	65
Ilustración 4-40: LID Usage Editor.....	66
Ilustración 4-41: Informe de resultados; infiltración al terreno, escorrentía superficial y almacenamiento.	66

Índice de Tablas.

Tabla 2-1 Bandas granulométricas para subbases de pavimento asfaltico.	27
Tabla 2-2: Bandas granulométricas para bases de pavimento asfaltico	27
Tabla 2-3:Bandas granulométricas para bases y subbase de pavimento de hormigón	28
Tabla 2-4: Aplicaciones pavimentos permeables.	31
Tabla 3-5: Registro de colectores críticos	36
Tabla 3-6:Registro de precipitaciones máximas en 24 hrs, estación de Chimbarongo.....	42
Tabla 3-7:Registro de precipitaciones máximas en 24 hrs, estación de Lolol.....	42
Tabla 3-8:Registro de precipitaciones máximas en 24 hrs, estación de Curicó	43
Tabla 3-9:Registro de precipitaciones máximas en 24 hrs, estación de Curepto	43
Tabla 3-10:Registro de precipitaciones máximas en 24 hrs, estación de Longaví	44
Tabla 3-11: Ubicación de estaciones para ArcGis.	44
Tabla 3-12:Resumen de resultados del software ArcGIS.	47
Tabla 3-13: Precipitaciones Ponderadas máximas en 24 hrs para la ciudad de Curicó	47
Tabla 3-14:Maximas precipitaciones prolongadas en 24 hrs por año.	48
Tabla 3-15: Tabla de frecuencia acumulada, teorica y observada de las precipitaciones.	49
Tabla 3-16: Intensidades y duración respecto a un periodo de retorno	50
Tabla 3-17: Series de precipitaciones	51
Tabla 3-18: Subcuencas punto 1.....	54
Tabla 3-19: Subcuencas punto 2.....	55
Tabla 3-20: Datos de nudos red de evacuación punto 1.....	56
Tabla 3-21: Datos conductos de red de evacuación punto 1.	56
Tabla 3-22: Puntos de vertido punto 1.....	57
Tabla 4-23: Resumen simulaciones a diferentes % PP_1, Serie_1	67
Tabla 4-24: Tabla de colores para demostrar con rojo las situaciones donde ocurre inundación en el punto 1 con los diferentes % de PP_1 para todas las series y la escorrentia (mm) generada.	69
Tabla 4-25: Tabla de colores para demostrar con rojo las situaciones donde ocurre inundación en el punto 1 con los diferentes % de PP_2 para todas las series y la escorrentia (mm) generada.	69
Tabla 4-26: Tabla de colores para demostrar con rojo las situaciones donde ocurre inundación en el punto 2 con los diferentes % de PP_1 para todas las series y la escorrentia (mm) generada.	73
Tabla 4-27: Tabla de colores para demostrar con rojo las situaciones donde ocurre inundación en el punto 2 con los diferentes % de PP_2 para todas las series y la escorrentia (mm) generada.	73
Tabla 4-28: Resumen simulaciones a diferentes % CV_04, Serie_1	74

Tabla 4-29: Tabla de colores para demostrar con rojo las situaciones donde ocurre inundación en el punto 1 con los diferentes % de CV_04 para todas las series y la esorrentia (mm) generada.76

Capítulo I: Introducción y Objetivos

1.1 Introducción

En noviembre de 1997, en Chile se publica la ley 19.525 la cual “Regula sistemas de drenaje y evacuación de aguas lluvias”. Esta ley, crea la conciencia de la problemática que se puede generar si no se tienen las medidas necesarias para la evacuación de dichas aguas. Por lo anterior, en un gran número de comunas en Chile se construyeron sistemas de drenaje y evacuación de aguas lluvias.

Con el pasar de los años la población ha ido aumentando, por lo cual las aguas que antes eran absorbidas por terrenos rurales, dotados de una gran capacidad de absorción, han sido transformados en terrenos habitados, remplazando los suelos naturales y permeables, en suelos artificiales con una escasa o nula absorción de agua. Es aquí donde vuelve a nacer la problemática de las aguas lluvias, los sistemas de evacuación en 20 años pasan a ser sobre exigidos, debido a un aumento poblacional mayor del proyectado. A esto se le añade el fenómeno del cambio climático, que genera una mayor cantidad de aguas lluvias que las esperadas inicialmente.

Hoy en día, existe una gran posibilidad que los sistemas de drenaje y evacuación de aguas lluvias no sean suficientes, y, más aún, que en 10 años más estos sistemas sean una problemática en lugar de una solución.

Para abordar esta problemática de una manera real y específica esta memoria se centrará en la ciudad de Curicó, Chile. Un paseo por el centro y la periferia de dicha ciudad es suficiente para darnos cuenta de que las construcciones siguen un orden común, es decir, tanto las calles, edificios, viviendas, aceras y demás, están adaptadas solo para el transporte de aguas lluvias hacia los colectores, los cuales, se ven sobrepasados en temporada de lluvias, creando inundaciones en sectores céntricos y periféricos de la ciudad.

En la actualidad, el concepto de sostenibilidad está muy presente en el mundo de la construcción y aquí es donde estará la fuente de investigación de esta memoria, la incorporación de Sistemas de Urbanos de Drenajes Sostenibles (SUDS).

Ya mencionábamos antes que las construcciones de la ciudad de Curicó, solo ayudan al transporte de las aguas lluvias, pero, ¿qué pasaría si dejara de ser así?, ¿si en vez de cubiertas de materiales impermeables fueran cubiertas verdes, las cuales ayudaran a la captación de aguas lluvias?, ¿y si se pudiera lograr que las calzadas de hormigón común, pasen a ser de hormigón permeable para que disminuyan las calles inundadas?, es esta última incógnita, la cual inspira esta memoria.

Los pavimentos permeables, son uno de los SUDS más complejos, debido a que realiza los procesos de captación, almacenamiento y filtración de la escorrentía. Es bien sabido que gran parte del área urbana es ocupado por calles, estacionamientos, aceras, ciclovías, etc. En todos estos elementos podemos incluir este SUDS.

Este sistema fue impulsado desde la década de 1970 por diferentes países, los cuales han aportado grandes criterios de construcción y evaluación. En Chile los pavimentos permeables son mayormente utilizados en construcciones sometidas a pocas cargas, como lo son las ciclovías y los estacionamientos. Aunque la implementación en aceras devolvería una parte de los terrenos permeables remplazados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudiar la reducción de escorrentía superficial, debido a la implementación de pavimentos permeables en la ciudad de Curicó.

1.2.2 Objetivos Específicos.

- Extraer y estudiar puntos críticos de la ciudad de Curicó, expuestos en la Memoria de Carlos López (2017), para la implementación de los SUDS.
- Corroborar factores por los cuales se producen inundaciones en estos puntos críticos.
- Actualizar catastro de lluvias pasadas de la ciudad de Curicó.
- Elaborar mediante el software SWMM un análisis computacional hidrológico de la situación actual de los puntos críticos seleccionados.
- Elaborar mediante el software SWMM un análisis computacional hidrológico con la inclusión de pavimentos permeables en los puntos críticos seleccionados.

1.3 Hipótesis

- La utilización de pavimentos permeables evitará la creación de inundaciones en puntos críticos de la ciudad de Curicó.
- Los diámetros de los drenes convencionales podrían disminuir hasta en un 10% con la implementación de pavimentos permeables, en futuras construcciones.

Capítulo II: Marco Teórico

2.1 Aguas lluvias

2.1.1 Orígenes de evacuación de aguas lluvias

Las aguas lluvias o pluviales: son aquellas aguas que se generan por medio de una lluvia o precipitación y escurren por la superficie del terreno. En la antigüedad, con el comienzo de la urbanización de las civilizaciones más avanzadas de la época, comenzaron también las problemáticas que esta traía. Con el cambio de los suelos naturales a suelos poco permeables, las aguas lluvias comenzaron a estancarse, contaminarse con residuos y desperdicios, lo que ocasionó que esta generara malos olores. La primera civilización en darle una solución a esta problemática fue la civilización india entre los años 4.000 a 3.000 a.C., las cuales crearon un sistema de evacuación de aguas residuales, aunque, también, se han encontrado sistemas de evacuación que datan del mismo periodo en Irak.

Si bien estos avances fueron muy importantes, no solo eran utilizados para las aguas lluvias, sino que también transportaban aguas residuales domésticas. Con el pasar de los años, se comenzaron a ver sistemas de captación de aguas lluvias, y el país que construyó la primera red de evacuación de aguas lluvias fue Alemania, la que fue construida en Hamburgo en el año 1843 d.C.

2.1.2 Red de evacuación de aguas lluvias

Las redes de evacuación de aguas lluvias son el conjunto de conductos, uniones y estructuras adicionales de operación y mantenimiento, que permiten la captación de las aguas pluviales alojadas en superficies impermeables como calles, patios y otras, con la finalidad de trasladarlas hasta corrientes naturales aptas para su descarga.

Algunos términos para considerar en una red de evacuación de aguas lluvias son:

Área de captación

Se define como el área en la cual se deposita el escurrimiento de las aguas lluvias, antes de ser evacuadas. En la mayoría de los casos estas corresponden a las cubiertas de las infraestructuras. Su característica principal es que la mayoría son impermeables.

Aguas de escorrentía

Son aguas de lluvia o nieve derretida que fluyen por superficies impermeables como calles, aceras o techos y luego es derivada hacia las redes de evacuación.

Estructura de captación

Corresponde al elemento de las redes de evacuación encargado de la recepción de las aguas de escorrentía. Lo más común son los sumideros como estructura de captación.

Sistema de retiro de contaminantes y filtración

Está definido como un elemento capaz de remover las impurezas o elementos extraños arrastrados por la corriente de las aguas lluvias, las cuales pueden afectar el traslado de las aguas hacia su punto de descarga.

Sistema de conducción

Son todos aquellos elementos que permiten trasladar las aguas lluvias de un punto de captación hacia un punto de descarga natural o artificial.

2.1.3 Legislación y Normativa

En Chile las leyes y normativas que rigen los sistemas de evacuación de aguas lluvias son las siguientes:

- Ley General de Urbanismo y Construcciones del año 1975.
- Ley N° 19.525 del año 1997, que regula los Sistemas de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias, el Plan Maestro de Aguas Lluvias de la ciudad.
- Ordenanza General de Urbanismo y Construcción D.S. N°47 (V y U) del año 1992.
- Manual de Vialidad Urbana D.S. N° 12 (V y U.) del año 1984.
- Guía de Diseño de Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos del MINVU, aprobada por D.S. N° 3, (V y U) del año 1997.
- “Guía de Diseño y Especificaciones de Elementos Urbanos de Infraestructura de Aguas Lluvias” desarrollado por el Departamento de Obras Urbanas del Ministerio de Vivienda y Urbanismo en conjunto con el SERVIU Metropolitano en el año 2005.

2.1.4 Cambio climático en Chile

Uno de los mayores desafíos del mundo es el evidente cambio climático, ocasionado directa o indirectamente por la actividad humana, la cual está alterando la atmosfera mundial, además sumamos la variabilidad de clima que existe en periodos de tiempos comparados.

Este cambio climático está denominado como “Calentamiento Global” y es causado por el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI). Debido a esto, el planeta puede sufrir aumento del nivel del mar, retroceso de glaciares e intensificación de fenómenos meteorológicos, como sequías extremas o inundaciones.

Chile según el art. 4.8 de la Convención Marco de Naciones sobre el Cambio Climático (CMNUCC), se considera un país propenso a verse afectado por el calentamiento global, debido a que es un país con bordes costeros, áreas áridas, semiáridas y bosques, además es susceptible a catástrofes naturales, propenso a sequías y ecosistemas montañosos, a lo que se le agrega la dependencia que tienen sus principales actividades socioeconómicas al clima, principalmente de la disponibilidad hídrica.

Actualmente, Chile se encuentra suscrito a acuerdos internacionales, mediante los que se presiona al país a apoyar la disminución de GEI a nivel mundial, así que el país se compromete a disminuir, a través de distintas estrategias, sus emisiones de gases a nivel nacional.

El rol de la vegetación en el cambio climático

Dentro de los principales captadores de carbono son los recursos vegetales, capaces de absorber dióxido de carbono y mantenerlo como parte de su estructura física, además los recursos vegetales mantienen el régimen hídrico a través de la interceptación de las precipitaciones y regulando la escorrentía. Otra característica es que conservan y protegen los suelos principalmente de la erosión.

Como afecta el cambio climático en las aguas lluvias

En el año 2017 Aguas Andinas se vio obligado a realizar un corte de emergencia en el suministro a 30 comunas de la Región Metropolitana por los aluviones ocurridos en San José del Maipo, debido a que ocasionó gran nivel de turbiedad en las aguas. estas precipitaciones cálidas e inesperadas son una señal del cambio climático, y terminan siendo una problemática más que un beneficio.

Según el profesor del Departamento de Geografía de la Universidad de Chile, Pablo Sarricolea, las sequías a nivel nacional podrían ser aún más prolongadas, esto efecto de la gran contaminación atmosférica que generaron los grandes incendios en 2017. Don Roberto Rondanelli, también del Departamento de Geografía de la Universidad de Chile, dice: "Desde hace 50 años, aproximadamente, Chile viene experimentando una disminución de las precipitaciones en la zona central a un ritmo de 5% por década. Si en el futuro no hay cambios en relación con el calentamiento global, podríamos esperar una baja del 30% para fin de siglo”(Tres Consecuencias Del Cambio Climático Que Ya Se Sienten En Chile - La Tercera, 2018).

2.1.5 Problemática y soluciones

Problemáticas

Hoy en día, las zonas urbanas de las ciudades chilenas operan con redes de evacuación de aguas lluvias muy antiguas, las cuales no han sido diseñadas para la expansión urbana que se vive en las últimas décadas. También un punto a considerar es la modificación que sufre el suelo debido a la urbanización, esto genera que los suelos naturales, que estaban dotados de una gran capacidad de drenaje y percolación, han sido sustituidos por terrenos poco permeables. Estos cambios generan efectos muy negativos para la zona urbana, entre alguno de los problemas que se presentan podemos nombrar; las inundaciones de calles e intersecciones, daños a la propiedad pública y privada, cierre de pasos bajo nivel, gran congestión vehicular, desbordes de cauces naturales y suspensión de servicios básicos.

Soluciones

Podemos nombrar una gran cantidad de soluciones a la problemática de las aguas lluvias, pero varias soluciones abarcan grandes costos de ejecución. Dentro de las posibilidades están las modificaciones de las redes existentes, lo que generaría, además de los costos, una gran problemática de cierre de calles y congestión vehicular.

Hoy en día una de las grandes estrategias para combatir las aguas lluvias son los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, los cuales están siendo muy utilizados a nivel mundial, debido a que aportan vegetación a la ciudad, además de conducir y reducir las aguas de escorrentías, y las ayudan a reducir contaminantes e impurezas.

2.2 Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)

2.2.1 ¿Qué son los SUDS?

Los SUDS son técnicas de gestión de aguas lluvias y planeamiento urbano que buscan devolver los procesos hidrológicos que se generaban antes del desarrollo urbano (infiltración, filtración, almacenamiento, evaporación, entre otros), para lo que se integran estratégicamente elementos de control de escorrentía en el paisajismo urbano.

Los SUDS ayudan de gran manera a la reducción de escorrentía que va hacia los colectores, ya que son altamente compatibles con los sistemas comunes de control de aguas lluvias urbanas tradicionales. Además, permiten aumentar el número de áreas verdes a las zonas urbanas, reduciendo las impurezas en las aguas lluvias.

2.2.2 Orígenes de los SUDS.

Como es sabido el ciclo natural del agua antes de la urbanización comienza con la caída de las aguas lluvias, las cuales eran captadas por las plantas antes de caer al suelo. El agua que llegaba al suelo era absorbida hasta llegar a su punto de saturación. Los puntos de acumulación superficial podían formar lagos naturales o artificiales, o bien, podían infiltrarse en el terreno y alimentar los acuíferos. Las escorrentías superficiales o sub-superficiales, terminaban su camino cuando se adherían a cauces naturales que se dirigían al mar oxigenándose en el camino. En cualquiera de los puntos donde se encontraba el agua, por la acción del sol, se evaporaba devolviendo la humedad a la atmosfera con lo que se daba por terminado el proceso natural del agua. Por el contrario, en las zonas urbanas las aguas lluvias que eran captadas y absorbidas por plantas, hoy en día, solo son recibidas por superficies impermeables, como lo son los techos y las calles con lo que se disminuye considerablemente los rangos de infiltración y almacenamiento superficial de las aguas lluvias, ocasionando que casi su totalidad sea escorrentía superficial, lo cual genera grandes caudales punta. Esta gran cantidad de agua va hacia sumideros o receptáculos, luego estas aguas son saneadas artificialmente y dirigidas hacia un cauce artificial o natural. La falta de permeabilidad en las zonas urbanas. permite que se generen grandes escorrentías superficiales en poco tiempo, generando inundaciones y causando daños a infraestructuras tanto públicas como privadas.

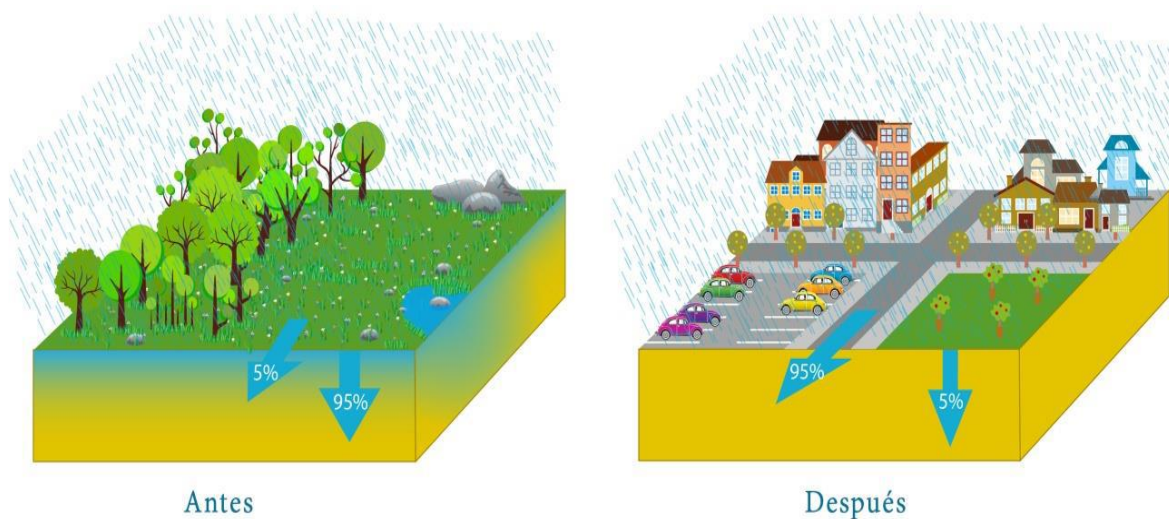


Ilustración. 2-1: Disminución de la infiltración al urbanizar.

Fuente: www.hidrologiasostenible.com

Existen algunas instituciones en los países más avanzados del mundo, que han descubierto métodos alternativos para afrontar las problemáticas que generan las aguas lluvias con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible y una mejora del medio ambiente. Debido a estas exigencias es que emergen con fuerza los SUDS, los cuales ayudan a aumentar la permeabilidad de las zonas urbanas, reduciendo considerablemente las escorrentías, maximizando las áreas verdes presentes en las zonas urbanas y causando impactos mínimos en el desarrollo urbano.

2.2.3 Ejemplos de SUDS

Cubiertas Verdes

También llamadas techos verdes o cubiertas vegetadas. Son sistemas multicapa con cubierta vegetal que recubren los techos y terrazas. Estas cumplen la función de captar y retener las aguas lluvias, reduciendo el volumen de las aguas de escorrentía. También ayudan con la filtración de contaminantes, reducen el estrés en los lugares de trabajo, combaten el efecto “isla de calor” que generan las ciudades, y sirven como un aislante térmico en las edificaciones. Las cubiertas verdes contienen un gran valor ecológico, debido a la cantidad de vegetación que añaden a la ciudad, con lo que se aumenta la producción de oxígeno.

La construcción de cubiertas verdes ha ido creciendo a nivel mundial, aunque el costo de mantención es considerable, además del mejoramiento de la infraestructura, si esta no es apta para su instalación. Consecuentemente, hay que tener especial cuidado al momento de elegir la tipología y diseño.



Ilustración. 2-2: Esquema cubiertas verdes

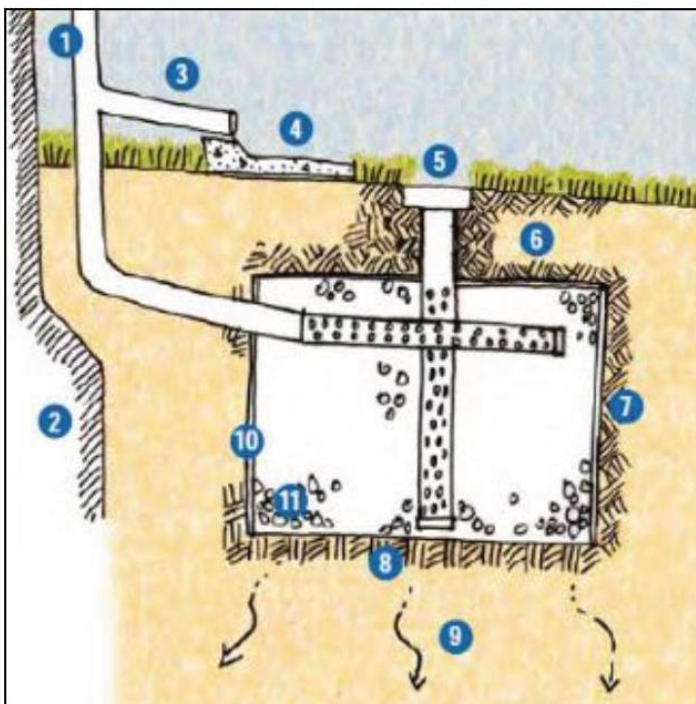
Fuente: <https://davidhuerta.typepad.com>

Pozos de infiltración

Son pozos de poca profundidad, que normalmente van desde uno a tres metros. Estos van rellenos de material granular, que permiten que drene el agua, encargándose de recibir la escorrentía de superficies impermeables. Este sistema, está diseñado para absorber toda la escorrentía de una determinada tormenta de diseño, e infiltrarla hacia el subsuelo.

Los pozos de infiltración evacuan las aguas hacia el subsuelo, que debe cumplir ciertos requisitos. Así el subsuelo debe ser permeable y capaz de mantener su estabilidad en su punto de saturación, para evitar comprometer la estabilidad de edificaciones cercanas.

Este sistema contiene una estructura muy sencilla, de fácil construcción y bajos costos de mantenimiento. Mediante la infiltración, ayudan a la recarga de acuíferos, reducen considerablemente la escorrentía superficial, eliminan las impurezas de las aguas lluvias, ocupan un espacio reducido y solo se necesita que el subsuelo cumpla con los requerimientos básicos (estabilidad y permeabilidad)



1. Bajante del tejado
2. Cimientos del edificio
3. Aliviadero
4. Bloque disipador de energía
5. Abertura de inspección visual
6. Cobertura de resguardo
7. Lateral del pozo
8. Solera del pozo
9. Terreno
10. Lámina geotextil
11. Áridos gruesos

Ilustración. 2-3: Esquema de un pozo de infiltración.

Fuente: Stormwater Design Guidelines. (2010)

Pavimentos permeables

Estos pavimentos además de ser aptos para el tránsito peatonal y vehicular, permiten la infiltración del agua, de manera vertical, dejando que esta se infiltre en el terreno cargando acuíferos o bien siendo retenida en capas sub-superficiales.

Los pavimentos permeables ayudan también a la eliminación de residuos e impurezas que pueden contener las aguas, además de reducir considerablemente las aguas de escorrentías, por lo cual, también se aumentará la seguridad de las calles, debido a la disminución de charcos en las calles, que limitan la adherencia de los neumáticos.

A pesar de la efectividad que han demostrado estos sistemas, no dejan de presentar ciertas limitantes o solicitudes. Por ejemplo, es fundamental que las subcapas sean permeables y mantengan su estabilidad en estado de saturación. Es desaconsejable usar estos sistemas en zonas de bajas temperaturas, debido a que el agua que puede alojarse dentro de su estructura puede congelarse con bajas temperaturas, lo que ocasionaría la expansión de esta y un agrietamiento en dicho pavimento.

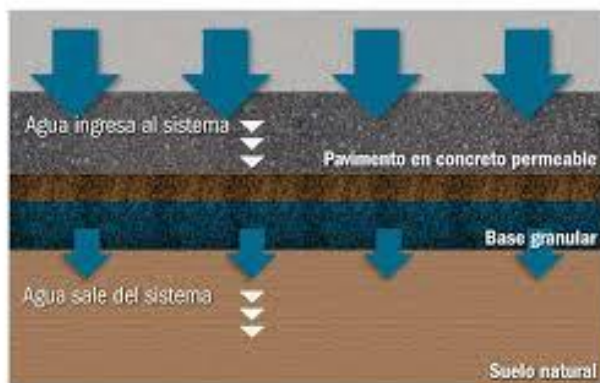


Ilustración. 2-4: Funcionamiento típico pavimento permeable de hormigón.

Fuente: S. Arango (2015)

Cunetas verdes

Estos sistemas están diseñados para almacenar y trasportar la escorrentía superficialmente, captada de las zonas impermeables contiguas. Son estructuras lineales vegetales, de forma trapezoidal, de base ancha y talud tendido. Generan baja velocidad de la escorrentía, para permitir la sedimentación de partículas en suspensión, para la eliminación de contaminantes e impurezas.

Estas cunetas deben estar densamente vegetadas, para reducir de mejor manera el volumen de la escorrentía, pudiendo permitir que esta se infiltre hacia las subcapas del terreno. Otra ventaja es que ayudan a mejorar el paisajismo en las zonas urbanas y mejoran la calidad del aire.



Ilustración. 2-5: Cunetas verdes.

Fuente: SUDS for Roads (2009)

Franjas filtrantes

Son sistemas con superficies cubiertas de vegetación, con pendientes mínimas, lo cual origina un flujo lento de la escorrentía superficial. Gracias a la cobertura vegetal, crean el efecto de filtro, eliminando materias e impurezas de las aguas. Debido a la poca velocidad que lleva la escorrentía, facilita la infiltración hacia las subcapas del terreno.

Estos sistemas son de gran amplitud, por ende, no son indicados para zonas altamente urbanizadas, o en áreas con una gran pendiente. Lo habitual es que se encuentren en las medianas y/o margenes de las carreteras, donde dispongan de gran espacio. Las franjas filtrantes pueden ser utilizadas como un sistema aislado o puede estar conectado con otros SUDS.

Estos sistemas son muy efectivos en la eliminación de sólidos en suspensión, tienen una construcción fácil, ayudan a la evaporación del agua, la infiltración, se adaptan bien con grandes superficies impermeables, ayudan con el paisajismo y tienen un gran valor ecológico.



Ilustración. 2-6: Franjas filtrantes.

Fuente: S. Perales, I. Doménech (2008)

Estanques de retención

Estos sistemas son lagunas artificiales con lámina permanente de agua, con una profundidad que varía entre uno y dos metros, conteniendo vegetación acuática. Su diseño busca que sean capaces de retener la escorrentía por periodos de dos a tres semanas, con lo que se logra la sedimentación y la absorción de nutrientes por partes de la vegetación.

Los estanques de retención están diseñados para que tengan una masa de agua permanente, por lo cual su fondo es impermeable y solo pierden el agua por evaporación. Siempre cuentan con un volumen de almacenamiento de reserva para la laminación de los caudales punta.

Dentro de las características de esos sistemas, tenemos: efectividad en la eliminación de metales pesados y sólidos de suspensión, reducción en forma considerable la escorrentía, requieren bastante espacio para su instalación, por esto mismo general una gran masa de agua estancada, la que puede ocasionar malos olores e insectos.



Ilustración. 2-7: Estanques de retención

Fuente: www.sudsostenible.com

2.3 Pavimentos permeables

2.3.1 Historia pavimentos permeables

Los pavimentos permeables o firmes permeables, estos se pueden considerar como uno de los subconjuntos más completos dentro de los SUDS. Los firmes permeables pueden considerarse como una cadena de drenaje sostenible completa por sí mismos, pues proporcionan infiltración, captación, transporte y almacenamiento al permitir controlar en origen la escorrentía superficial, laminando los flujos de aguas pluviales y ofreciendo, además, un servicio a la sociedad como pavimentos estéticos, cómodos y seguros (Rodríguez Hernández, 2008).

Los primeros estudios realizados como pavimentos permeables fueron por la década de 1970. Estados Unidos fue el pionero en el desarrollo de estudios y elaboración de guías de diseño alusivas a firmes permeables, realizando en el año 1972 probablemente la primera investigación referida a estos (porous, pervious or permeable pavements)(Barahona, 2014).

Posteriormente en la década de 1980 fue cuando comenzaron con los estudios de calidad del agua, debido a que las aguas de escorrentía que llegan a los pavimentos permeables están altamente contaminadas por a los residuos que dejan los automóviles y las materias o residuos de las aguas adyacentes que llegan a la calzada derivada de cubiertas o jardines.

Hoy en día es en Europa donde se concentra la mayor publicación de documentos o manuales respecto a los pavimentos permeables. En Reino Unido durante las décadas de 1980 y 1990 se

extendió el empleo de estos pavimentos para la reducción de la escorrentía superficial urbana y la mejora de su calidad (Barahona, 2014).

En Francia también se hicieron grandes investigaciones sobre pavimentos permeables o también llamados estructuras de embalse. Burdeos se puede determinar como el inicio de los pavimentos permeables de Francia, es aquí donde se comienza a aplicar el uso de una subbase granular con la capacidad de transportar la escorrentía de manera interna. Todas las investigaciones realizadas entre los años 1980 y 1990 se encuentran en la publicación de Legret, (2001).

En Alemania también comienza el uso de los pavimentos permeables por la década de 1970, Hoy en día, el control de la contaminación del agua es el principal aspecto estudiado, y su construcción se encuentra regulada (Rodríguez Hernández, 2008).

Finalmente, en España comienza a atisbarse, aunque tímidamente, un crecimiento de las publicaciones, investigaciones, manuales y recomendaciones. En 2008, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) publicó como complemento para la guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano publicada en 2007, las monografías “Gestión de las aguas pluviales” (García Haba, 2011a).

2.3.2 Características de los pavimentos permeables

Como ya se ha mencionado anteriormente, los pavimentos permeables, pertenecen a la categoría de SUDS, por tanto, sus principales características son la reducción de escorrentía, infiltración de esta a terreno natural o drenes laterales, almacenamiento, saneamiento, entre otros.

Según Woods-Ballard et al., (2007), desde el punto de vista cualitativo, los procesos físicos, químicos y biológicos, generados por las capas de los pavimentos permeables (Ilustración. 2-8), son: filtración, absorción, biodegradación, sedimentación.

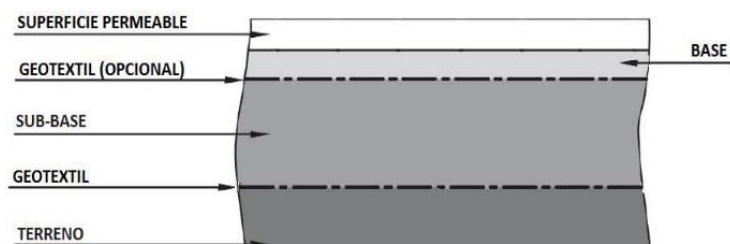


Ilustración. 2-8: Capas pavimentos permeables.

Fuente: Woods-Ballard et al., (2007)

Superficie permeable

Según (Fresno et al., 2005), se entiende por superficie permeable al pavimento artificial que permite el paso del agua a su través. La superficie permeable se considera el primer filtro de la estructura, es la primera capa en permitir la infiltración de las aguas, reteniendo gran parte de los hidrocarburos y/o metales pesados, derivados del tránsito de vehículos. Sin contar las materias que pueden ser arrastradas por las escorrentías adyacentes, provenientes de cubiertas, jardines, aceras, etc.

Si tomamos la clasificación de García Haba, (2011b), acerca de los tipos de superficies permeables, tenemos:

Césped: una de las grandes ventajas, es la estética que agrega, dando un punto más ecológico. Para lograr una mayor permeabilidad se ocupa unos refuerzos plásticos como se observa en la Ilustración. 2-9. El césped también es considerado como una de las superficies que entran en duda respecto a su permeabilidad, debido a la presencia de limos y arcillas en su raíz, que dificultan la infiltración del agua.

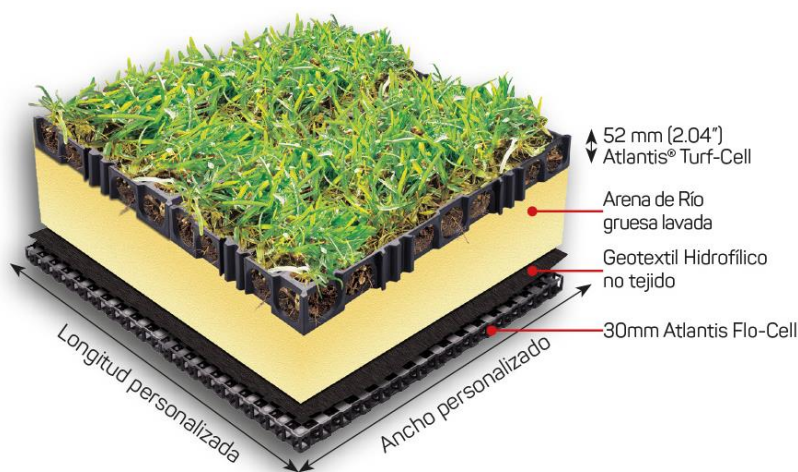


Ilustración. 2-9: Césped con refuerzos de plástico.

Fuente: <https://atlantisaurorambiental.cl/>

Adoquines con ranuras: esta superficie consta de adoquines confeccionados con hormigón impermeable, por lo cual la infiltración se produce a través de las ranuras que se forman entre los

bloques. Su proceso de fabricación es bastante costoso y cuidadoso, por lo cual hoy en día está en desuso. Además, la falta de un correcto diseño de la sección completa del firme provoca normalmente la rotura del refuerzo empleado dando la sensación de falta de capacidad portante (Rodríguez Hernández, 2008).



Ilustración. 2-10: Adoquines con ranura.

Fuente: Ministerio de Vivienda y Urbanismo, (2016)

Asfalto poroso y hormigón poroso: se obtienen eliminando de las mezclas algunas fracciones de finos. De este modo se constituyen materiales con un alto porcentaje de huecos, y en consecuencia, con una elevada permeabilidad (García Haba, 2011b).

El hormigón poroso está constituido con hormigón hidráulico y áridos, alcanza una resistencia entre 15 y 20 MPa y una permeabilidad de 0,5 a 5 cm/s. El porcentaje de huecos mínimo para que un hormigón sea poroso es el 15% y existe una cuota superior del 25% para evitar problemas de estabilidad. Aunque ambos tienen un peso específico entre 1700 y 2000 kg/m³, el hormigón poroso, a diferencia del hormigón ligero con arcilla expandida, es el único con huecos accesibles interconectados que permiten el paso del agua (González Fernández & Rodríguez Hernández, 2016)

En el caso del asfalto poroso, actúa como conglomerante un ligante bituminoso y su espesor va desde los 4 a los 6 cm. Las mezclas porosas presentan más de un 20% de huecos en mezcla, funcionan por rozamiento interno, pero también es muy importante la cohesión proporcionada por el mástico (González Fernández & Rodríguez Hernández, 2016).



Ilustración. 2-11: Hormigón poroso.

Fuente:(Rodríguez Hernández, 2008)



Ilustración. 2-12: Asfalto poroso.

Fuente: Rodríguez Hernández, (2008)

Base

Es la segunda capa de los pavimentos permeables, es una cama de áridos, los cuales cuentan con una tipología y granulometría fija, en esta es donde se asienta la capa de rodado. Es la segunda etapa de filtración, por lo cual ayuda favorablemente la calidad de la escorrentía.

Subbase

Esta es la tercera capa de los pavimentos permeables, al igual que en la base, esta es una cama de áridos encargada del almacenamiento de la escorrentía, para después ser infiltrada al terreno natural o hacia los laterales del pavimento, dependiendo del caso. También ayuda a mejorar la calidad de la escorrentía gracias a que colabora en el proceso de filtración.

En Chile no existe un manual normado de pavimentos permeables, por lo cual, tanto la base y la subbase se diseñan según el Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de pavimentación (MINVU, 2018), el cual indica las siguientes granulometrías.

- Granulometría para pavimentos asfálticos

Tabla 2-1 Bandas granulométricas para subbases de pavimento asfáltico.

TAMIZ (mm)	% que pasa en peso	
	Banda 1	Banda 2
50	100	100
40		70-85
25	55-100	55-85
20		45-75
10	30-75	35-65
5	20-65	25-55
2	10-50	15-45
0.5	5-30	5-25
0,08	0-10	0-10

Fuente: MINVU, (2018)

Tabla 2-2: Bandas granulométricas para bases de pavimento asfáltico

Tamiz (mm)	% que pasa en peso			
	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
40	100	100	100	100
25	55-85	100	70-100	80-100
20	45-75	75-100	60-90	
10	35-65	50-80	40-75	50-80
5	25-55	35-60	30-60	35-65
2	15-45	20-40	15-45	25-60
0.5	5-25	8-22	10-30	10-30
0,08	0-5	0-10	0-15	5-15

Fuente: MINVU, (2018)

- Bandas granulométricas para pavimento de hormigón

Tabla 2-3: Bandas granulométricas para bases y subbase de pavimento de hormigón

TAMIZ (mm)	% que pasa en peso	
	Banda 1	Banda 2
50	100	
25		100
20	70-90	70-100
10	30-65	50-80
5	25-55	35-65
2	15-40	25-50
0.5	8-20	10-30
0.08	2-8	0-15

Fuente: MINVU, (2018)

Geotextil

Las funciones principales de un geotextil son de filtro y separación, por lo que deben tener una abertura de poro y una permeabilidad adecuadas, sin embargo, aquellos colocados sobre la sub-base, proporcionan además refuerzo estructural al sistema frente a las tensiones horizontales producidas por el tráfico de vehículos. Dadas las características de este geosintético, es el principal responsable de la depuración del agua, reteniendo y biodegradando contaminantes como hidrocarburos y aceites (García Haba, 2011b).

2.3.3 Clasificación de pavimentos permeables

Hoy en día existen muchos criterios con los cuales se pueden clasificar los pavimentos permeables, sin embargo, solo mencionaremos los dos más utilizados; según el tipo de pavimento y según el destino de la escorrentía.

Según tipo de pavimento

Rodríguez Hernández, (2008) distingue dos tipos de pavimentos:

Pavimentos porosos: Los cuales filtran el agua por toda su superficie y pueden estar fabricados por hormigón poroso, asfalto poroso o gravas.

Pavimentos permeables: Los cuales están fabricados por materiales impermeables, donde la filtración se produce por las ranuras generadas entre cada elemento. Un gran ejemplo es el uso de adoquines con ranuras.

Según destino de escorrentía

Según Woods-Ballard et al., (2007), los pavimentos permeables se pueden clasificar también según hacia donde dirigen la escorrentía.

Infiltración total al terreno subyacente: esto ocurre cuando el terreno tiene un nivel de infiltración alto, por lo cual la totalidad de la escorrentía es infiltrada en el terreno (Ilustración. 2-13).

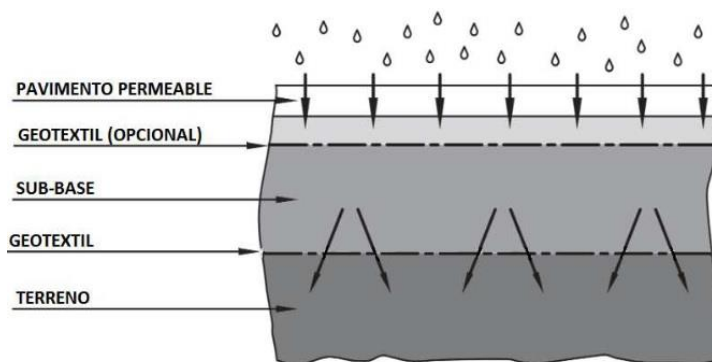


Ilustración. 2-13: Infiltración total al terreno.

Fuente: García Haba, (2011a)

Infiltración parcial al terreno: esto ocurre cuando la capacidad de infiltración del terreno no es la adecuada para la escorrentía generada, por lo cual, se incorporan drenes longitudinales en una de las capas inferiores, los cuales derivan parte de la escorrentía hacia el dren de evacuación convencional.

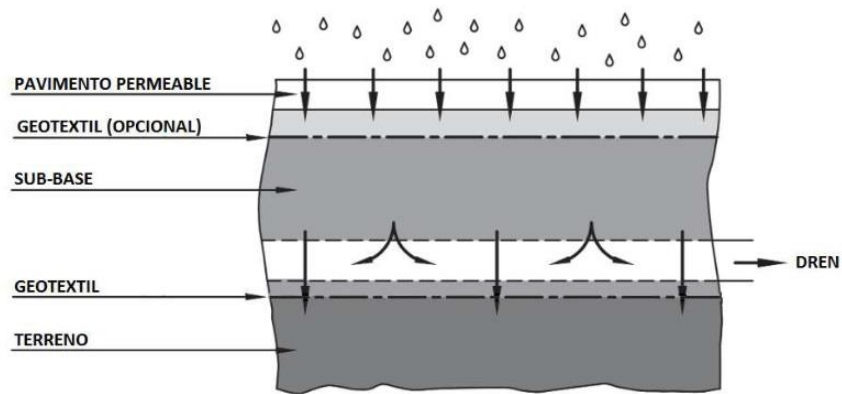


Ilustración. 2-14: Infiltración parcial al terreno.

Fuente: García Haba,(2011a)

Infiltración total al dren convencional: este es el caso cuando el terreno tiene un punto de infiltración muy bajo, o que la napa freática se encuentra a menos de un metro de profundidad, por lo cual se debe instalar drenes longitudinales para transportar la escorrentía hacia el dren convencional y además se debe instalar un geotextil impermeable entre la subbase y el terreno.

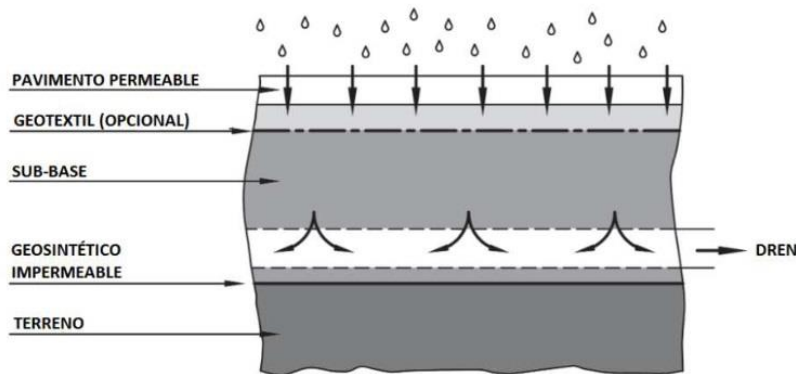


Ilustración. 2-15: Infiltración total al dren convencional.

Fuente: García Haba, (2011a)

2.3.4 Ventajas pavimentos permeables

Rodríguez et al.,(2006), establece las siguientes ventajas de los pavimentos permeables.

- Aumentan el porcentaje de superficie permeable en las ciudades minimizando así el riesgo de inundaciones.
- Reducen la contaminación difusa evitando problemas en las depuradoras y en los hábitats receptores.
- Permiten la recarga de acuíferos o la reutilización del agua almacenada en su interior para cisternas o riego de jardines.
- Ofrecen un acabado estético de calidad y además evitan la formación de charcos aumentando la comodidad y la seguridad de las calles en tiempo de lluvia.

2.3.5 Desventajas pavimentos permeables

Dentro de las desventajas más notorias de los pavimentos permeables podemos mencionar:

- Un costo elevado de instalación.
- No apto para ser instalado en cercanías de industrias con residuos tóxicos, debido a que permite la infiltración hacia la napa freática.
- No es recomendable su huso en calles con gran pendiente.
- Poca resistencia a esfuerzos tangenciales, por lo cual su utilización no es recomendada para áreas con gran flujo de vehículos.
- No es recomendado para ciudades muy frías, debido a que con los ciclos de hielo y deshielo del agua que se encuentra en el interior del pavimento puede generar grandes fisuras.

2.3.6 Aplicaciones para pavimentos permeables.

La aplicación de estos SUDS es muy variada y así lo deja ver Barahona, (2014) (Tabla 2.1).

Tabla 2-4: Aplicaciones pavimentos permeables.

Nivel de solicitud	Grupo de aplicación	Tipo de aplicación
Bajo	Espacios Públicos	Veredas
		Plazas
		Ciclovías
	Residenciales	Entrada de vehículos
		Senderos
		Espacios Recreacionales
		Pavimentos Interiores en condominio
		Estacionamientos Esporádicos

Medio	Proyectos comerciales	Estacionamientos masivos
		Paraderos de taxi
		Terminales de buses
		Estaciones de servicio
		Centros comerciales
		Veredas en parques
	Caminos y calles	Cruces Peatonales
		Calles y pasajes
		Intersecciones
		Plazas de peajes
Alto	Áreas industriales	Patios de carga en puertos
		Aeropuertos
		Patios de carga en puertos secos
		Zonas Militares
		Patios de contenedores
		Rellenos sanitarios

Fuente: Barahona, (2014)

2.4 Software SWMM

Las primeras computadoras digitales aparecieron por el año 1940, por lo cual, la elaboración de software era un gran desafío, no se tenían plazos, ni costos asociados a la creación de estos. Sin contar además que, si salían a la venta nuevas máquinas, debían empezar desde cero para crear una versión compatible con dichos equipos.

Entre las décadas de 1960 y 1980 se vivió la llamada crisis del software, donde se impulsó a los ingenieros de software, encargados de identificar y corregir los procesos del desarrollo, mediante metodologías y principios, e implementando la mantención de dicho software.

Un golpe duro para los softwares, fue entre los años 1985 y 1987, debido a que la máquina de radioterapia Therac-25 causara 6 accidentes en dicho periodo, todos ocasionados por una sobredosis masiva de radiación, lo cual causó 3 muertes.

Ya en la década de 1980, mantener y pagar el costo del software fue siendo una cifra bastante significativa, pudiendo duplicar el valor de desarrollar dicho software. Posteriormente este aumento cada vez fue mayor, ya en 1990 en costo de propiedad y mantención de software aumento un 30%, con respecto a la década anterior.

Si bien en año 1995 se habían creado muchos softwares capaces de realizar distintas tareas, funcionaban bien, pero aun así no eran considerados exitosos. Después de una fuerte y creciente demanda surge la necesidad de crear soluciones de software a bajo costo, lo que conlleva al uso de metodologías más simples y rápidas que desarrollan software funcional.

2.4.1 SWMM

Es un modelo de gestión de aguas pluviales, puede ser utilizado para la planificación, el análisis y el diseño de la escorrentía de aguas lluvias, las alcantarillas combinadas y sanitarias y otros sistemas de drenaje. Es una herramienta bastante útil, ya que ayuda a la creación de soluciones para el control de escorrentía mediante hibridas verdes. Una de sus funciones también abarca la evaluación del control de la escorrentía mediante tuberías y desagües. Sin contar el análisis de sistemas combinados.

SWMM es un software gratuito, creado por la EPA con la colaboración de CMD, Inc, la cual es una firma mundial de consultoría, ingeniería, construcción y operaciones. Es un programa basado en Windows.

2.4.2 Utilidades

SWMM es un programa que nos permite simular eventos de la escorrentía únicos o a largo plazo, asumiendo criterios como cantidad y calidad de este. Este software esta creado principalmente para zonas urbanas, aunque son variadas las aplicaciones para zonas no urbanas.

SWMM cuenta con variados formatos para la entrega de información, agregando gráficos, mapas de área de drenaje, tablas de series de tiempo, análisis estadísticos de frecuencia y diagramas de perfil. También es muy variado los datos que podemos agregar a nuestra zona de estudio, pudiendo realizar simulaciones hidrológicas, hidráulicas y de calidad del agua.

Modelado Hidráulico

En SWMM se puede dirigir la escorrentía y, gracias a la capacidad del modelo hidráulico, también se pueden controlar las entradas externas a través de la red del sistema de tuberías canales, etc.

Estimación de la carga de contaminantes

SWMM también puede analizar la calidad de la escorrentía, verificando la pureza de esta, debido a los contaminantes que conllevan las aguas lluvias.

Herramienta complementaria para proyecciones climáticas

Con SWMM existen herramientas con las cuales podemos proyectar lluvias futuras, gracias a la herramienta SWMM-CAT, la cual, mediante la ubicación del área de estudio, recopila datos del Programa Mundial de Investigación Climática. Esta herramienta se está actualizando mensualmente para las variables que podrían generar cambios climáticos.

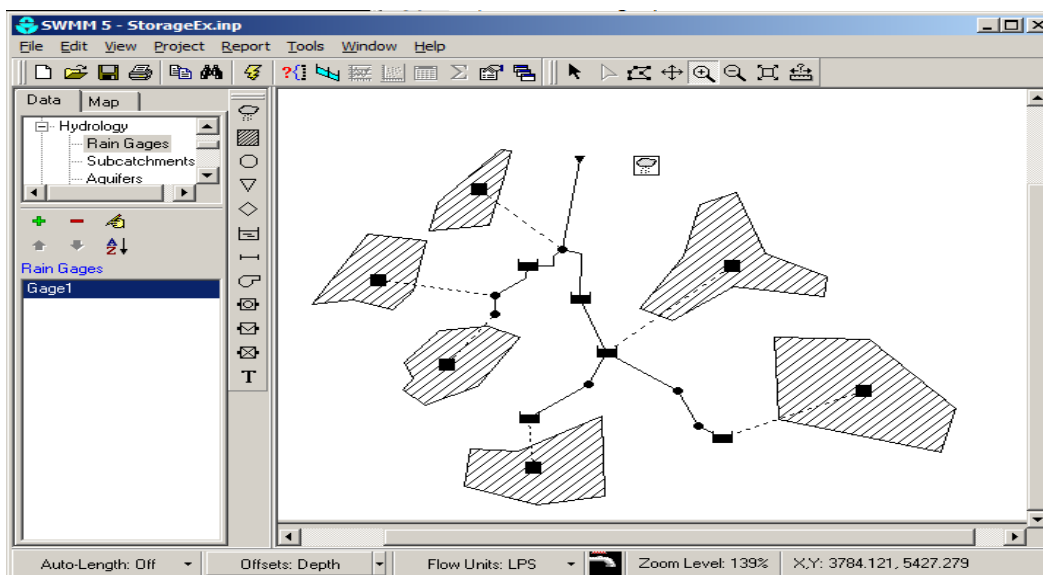


Ilustración 2-16: Diseño por SWMM.

Fuente: <https://pythonhosted.org>

4.4.3 Usos de SWMM

- Diseño y dimensionamiento de componentes de sistemas de drenaje para control de inundaciones.
- Dimensionar las instalaciones de detención y sus accesorios para el control de inundaciones y la protección de la calidad del agua.
- Mapeo de llanuras de inundación de sistemas de canales naturales: *SWMM 5 es un modelo aprobado por FEMA para estudios del Programa Nacional de Seguro contra Inundaciones.*

- Diseño de estrategias de control para minimizar los desbordamientos combinados de alcantarillado.
- Evaluar el impacto del flujo de entrada y la infiltración en los desbordamientos de alcantarillado sanitario.
- Generar cargas de contaminantes de fuentes no puntuales para la asignación de carga de residuos.
- Controlar la escorrentía del sitio utilizando prácticas de infraestructura verde como controles de baja LID.
- Evaluar la efectividad de las mejores prácticas de gestión y el desarrollo de bajo impacto para reducir las cargas de contaminantes en climas húmedos.

4.4.4 Conexión entre SWMM y los SUDS.

Con SWMM podemos introducir algunos SUDS para analizar, aunque estos sistemas conllevan grandes beneficios en el ámbito de la purificación de la escorrentía, SWMM solo modela la variación de la masa de esta.

SUDS para modelar

- Jardines de lluvia
- Células de biorretención
- Canales verdes
- Zanjas de infiltración
- Cubiertas verdes
- Desconexión de la azotea
- Barriles de lluvia
- Pavimentos permeables

Capítulo III: Marco Metodológico.

3.1 Puntos de inundación

3.1.1 Selección de puntos de inundación

La selección de los puntos de inundación de la ciudad de Curicó serán los analizados en la memoria de Carlos López (2017). Estos puntos han sido analizados nuevamente y no se han encontrado cambios en el sistema de evacuación de aguas lluvias.

Estos puntos cumplen con los requisitos de inundación, es decir, que la escorrentía superficial se almacena en zonas que comúnmente se encuentran secas. Dichos puntos de inundación igual se encuentran archivados por la Dirección de Protección Civil, como puntos frecuentes de colapso en los drenes de aguas lluvias, aunque este no se refiere a las intersecciones inundadas, sino a los colectores.

Tabla 3-5: Registro de colectores críticos

Región del Maule – Provincia de Curicó			
Punto crítico	Sector	Amenazas	Nivel de riesgo
01	Rincón de Sarmiento	Desbordamiento de curso de agua	Muy Alto
02	Tutuquén Bajo - Rural	Desbordamiento de curso de agua	Alto
03	Los Guindos - Rural	Desbordamiento de curso de agua	Medio
04	Potrero Grande - Rural	Interrupción de caminos	Alto
05	Población los Aromos - Urbano	Anegamiento	Medio
06	Sector Periférico - Curicó	Vientos	Alto
07	Los Niches - Rural	Desbordamiento de curso de agua	Muy Alto
08	Sarmiento – Urbano y Rural	Desbordamiento de curso de agua	Muy Alto
09	Paso bajo nivel Freire	Anegamiento	Alto
10	Sector Cordillerano	Desbordamiento de curso de agua	Alto

Fuente: López (2017)

3.1.2 Puntos a analizar

Debido al acotado tiempo para la realización de estudios, solo se analizarán dos puntos, con la finalidad de experimentar todas las posibles combinaciones. Esto con el objetivo de realizar un estudio lo más completo posible de las variaciones que puede sufrir la escorrentía superficial al cambiar ciertos atributos de los pavimentos permeables.

Punto crítico N°1



Ilustración 3-17: Punto crítico N°1, imagen satelital.

Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 3-18: Punto crítico N°1, en estado inundado y no inundado.

Fuente: López (2017)

Punto crítico N°2

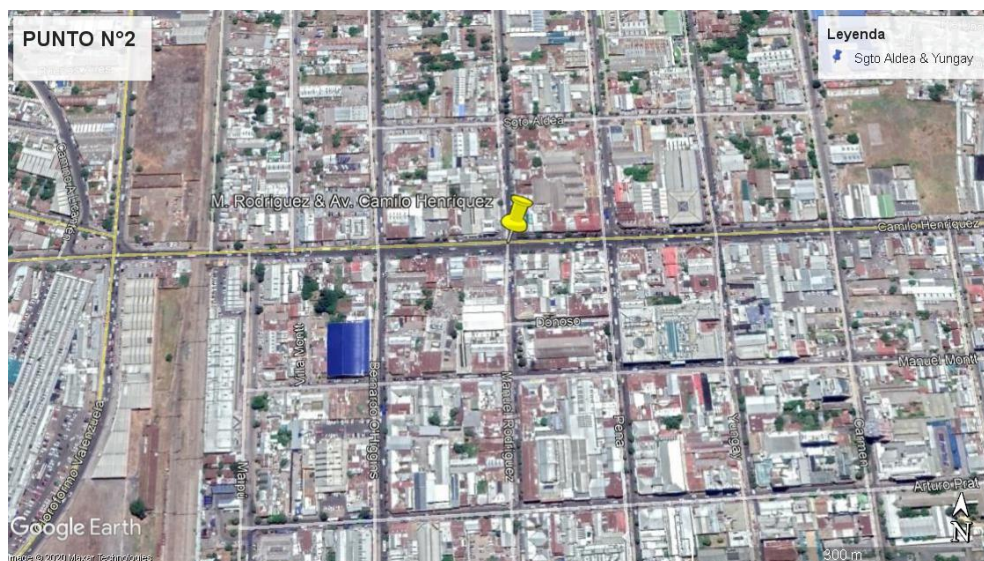


Ilustración 3-19: Punto crítico N °2, imagen satelital.

Fuente: Elaboración propia

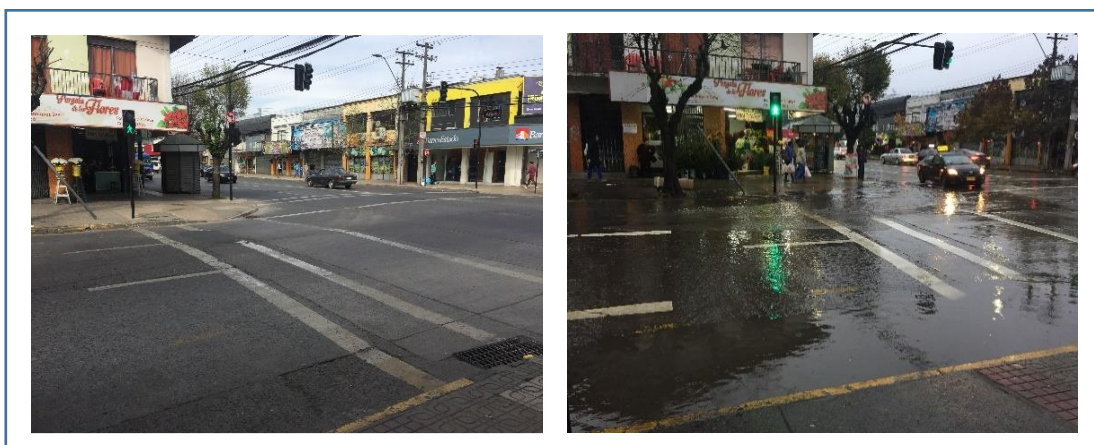


Ilustración 3-20: Punto crítico N°2, en estado inundado y no inundado.

Fuente: López (2017)

3.2 Modelo SWMM

El modelo SWMM integra comandos que permiten la entrada a una serie de datos, con el fin de obtener resultados tales como, el área de drenaje, la calidad del agua, el comportamiento hidráulico, entre otros. Dichos resultados son entregados en diferentes formatos, tales como tablas, gráficos, diagramas de perfil y análisis estadísticos de frecuencia.

SWMM cuenta con dos módulos de cálculos, el módulo hidrológico y el módulo hidráulico. Dichos modelos pueden ser de un único evento pluviométrico o una simulación continua en periodo extendido.

3.2.1 Módulo hidrológico

Para probar la efectividad de la implementación de los pavimentos permeables, el módulo hidrológico calcula la captura y retención de un porcentaje de aguas lluvias y/o escorrentía mediante SUDS, la infiltración en terrenos no saturados, entre otros.

Para la realización de los cálculos, el módulo funciona en base a subcuencas, las cuales interfieren en el punto de análisis. Sobre estas cae el agua lluvia, generando la escorrentía.

Las subcuencas y las series de lluvias son obtenidas según el punto de análisis.

3.2.1.1 Calculo de Precipitaciones

Hoy en día el clima está en constante cambio. Como ya fue mencionado el calentamiento global está causando continuos cambios. Consecuentemente, las lluvias varían anualmente, aumentando la aparición de fenómenos meteorológicos extremos.

Si interactuamos con los registros meteorológicos existentes en las cercanías de nuestra área de estudio, podemos usar varios modelos de predicción de precipitaciones, y aunque estos modelos no son 100% exactos, su margen de error es aceptable.

Gracias a la topografía de nuestra zona de estudio, y a la obtención de datos de las estaciones pluviométricas aledañas, gracias a la Dirección Meteorológica de Chile. Un método que se hace muy efectivo es el de los Polígonos de Thiessen.

Polígonos de Thiessen

Este método se aplica cuando se conoce que los registros de precipitación en las diferentes estaciones pluviométricas adyacentes a la zona de estudio sufren variaciones, teniendo en consideración que la cuenca es de topografía regular o relativamente plana (López, 2017).

Si los datos obtenidos son cualitativos, los polígonos de Thiessen son método de interpolación bastante fácil de realizar:

- Para la utilización de este método, la primera tarea es unir todas las estaciones cercanas al punto de estudio, mediante líneas rectas.

- Como segundo paso se construyen mediatrices, correspondientes a las líneas rectas que unen las estaciones. Las mediatrices se extienden hasta que se intercepten, creando polígonos irregulares.
- Acotamos todas las mediatrices hasta el área de estudio.
- Se calcula el área en la cual interactúa cada estación en la cuenca estudiada.
- Para obtener las precipitaciones ponderadas, ponderamos los datos de cada estación, con su área correspondiente, como lo indica la siguiente fórmula.

$$PM = \frac{\sum_i^n P_i \times A_i}{\sum_i^n A_i}$$

Donde:

PM: Precipitación media del área de estudio (mm).

n: Número de estaciones de análisis.

P_i: Precipitación de la estación (mm).

A_i: Superficie del área de influencia i (km²).

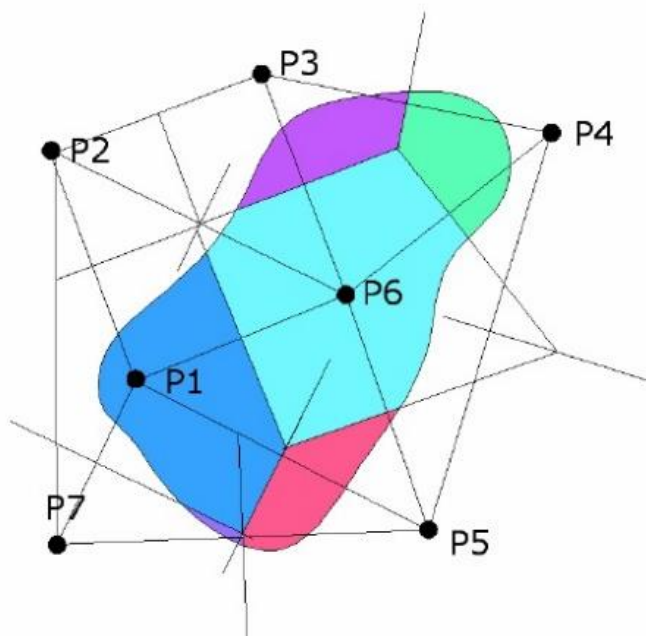


Ilustración 3-21: Polígonos de Thiessen:

Fuente : Bateman (2007)

Cálculo de precipitaciones

Con la utilización del software ArcGIS, podemos aplicar los polígonos de Thiessen, con el fin de lograr una estimación lo más exacta posible de la cantidad de precipitaciones que afectan nuestra área de estudio.

Para comenzar debemos establecer los pluviómetros con los cuales realizaremos nuestros polígonos. Para seleccionar dichas estaciones debemos saber cuáles cuentan con los registros de lluvias máximas en 24 hrs dentro de los años 2008 y 2018. Se considera los datos obtenidos de los anuarios del Subdepartamento de Climatología y Meteorológica Aplicada perteneciente a la dirección Meteorológica de Chile.

Dentro de los registros analizados se tomaron en consideración 5 estaciones pluviométricas. Pertenecientes a la región del Libertador General Bernardo O'Higgins, se encuentran las estaciones de Chimbarongo y Lolol, y pertenecientes a la región del Maule se encuentran las estaciones de las comunas de Curicó, Curepto y Longaví.

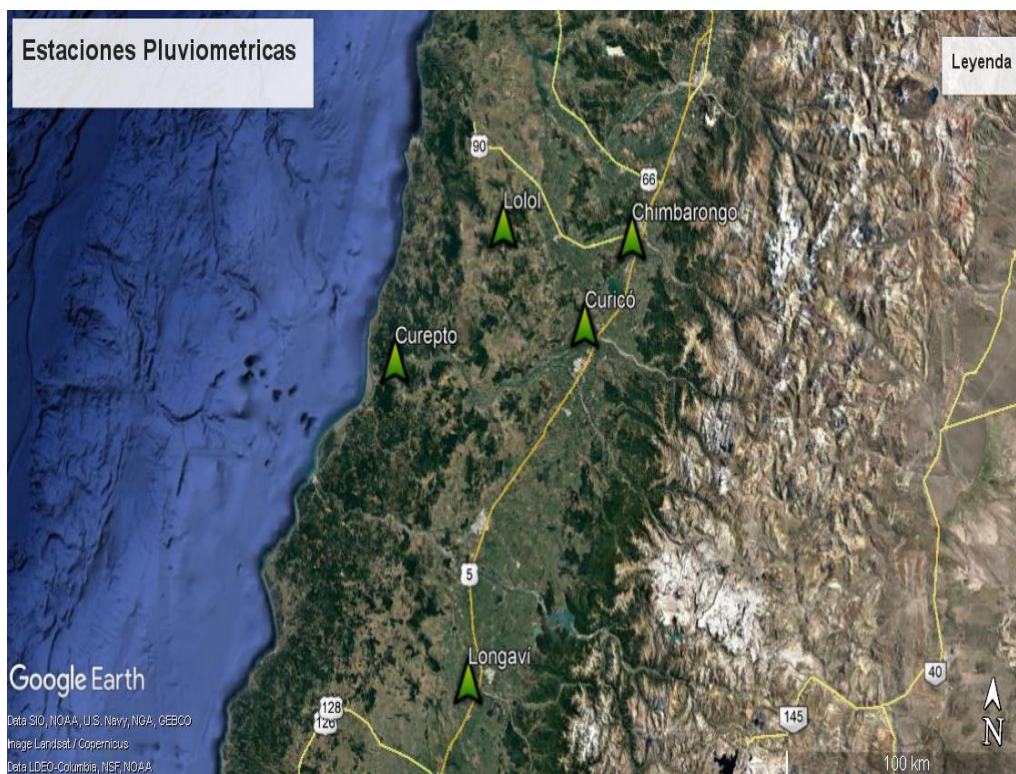


Ilustración 3-22: Ubicación estaciones pluviométricas.

Fuente: Elaboración propia

Registro de máximas lluvias en 24 hrs de las estaciones seleccionadas.

Tabla 3-6: Registro de precipitaciones máximas en 24 hrs, estación de Chimbarongo

Estación Chimbarongo San Benito												
Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2008	0.0	0.0	13.1	20.4	32.5	49.3	51.1	97.6	16.2	1.9	0.0	0.0
2009	0.0	0.0	0.0	0.0	32.5	42.5	11.4	68.8	41.4	13.8	6.4	0.0
2010	0.1	0.0	5.8	0.9	22.8	35.8	33.5	4.7	9.6	19.3	7.6	4.7
2011	15.4	0.0	9.8	76.2	2.5	27.4	29.8	26.5	14.4	0.0	0.0	0.0
2012	0.0	1.9	0.0	0.0	103.2	45.8	3.7	13.9	2.9	26.2	4.8	42.9
2013	3.7	0.0	0.0	0.0	50.5	30.5	78.3	34.0	5.2	0.4	0.0	0.0
2014	0.0	0.0	13.4	0.6	30.8	23.4	16.5	60.5	21.7	1.5	36.5	6.9
2015	0.0	2.6	3.5	2.2	5.2	23.4	28.7	93.2	30.3	21.8	21.3	11.2
2016	8.2	0.0	0.7	27.8	12.2	13.1	47.6	5.2	3.5	38.8	14.3	0.0
2017	0.0	0.0	3.1	12.2	22.2	42.9	28.2	32.1	8.1	44.7	11.1	0.0
2018	0.0	1.2	15.7	1.0	24.3	33.2	61.3	18.2	34.2	9.8	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-7: Registro de precipitaciones máximas en 24 hrs, estación de Lolol

Estación Lolol Hacienda												
Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2008	0.0	0.0	3.9	14.6	21.0	55.4	26.8	32.2	33.1	9.3	7.6	2.6
2009	0.0	0.0	0.0	0.0	19.2	51.0	30.4	53.7	52.7	12.9	6.8	0.0
2010	0.0	0.0	0.0	0.0	29.1	60.0	26.8	15.8	40.0	15.1	7.7	7.8
2011	1.6	0.0	11.7	43.9	4.9	55.2	23.2	27.0	6.5	0.0	8.3	0.0
2012	1.2	1.2	4.7	14.7	26.1	48.6	26.0	32.1	1.6	19.1	7.4	3.1
2013	0.5	0.2	5.2	18.5	24.0	42.6	27.4	27.9	23.6	20.5	0.0	0.0
2014	0.0	0.0	16.7	5.8	71.2	71.3	12.2	31.7	21.5	0.0	16.1	10.5
2015	0.0	0.0	0.0	20.2	7.9	11.6	35.8	36.7	18.1	66.0	5.2	0.0
2016	0.0	0.0	0.0	41.3	11.7	6.5	35.9	2.6	2.9	28.9	8.8	18.5
2017	0.0	0.0	0.0	11.6	38.5	38.2	45.2	48.8	14.3	38.9	9.2	0.0
2018	0.0	0.0	19.2	8.2	20.0	46.2	51.1	23.4	51.9	20.2	2.8	0.0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-8: Registro de precipitaciones máximas en 24 hrs, estación de Curicó

Estación Curicó General Freire												
Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2008	0.0	0.0	8.2	20.5	39.9	37.4	25.6	50.9	14.0	5.4	0.0	0.1
2009	0.0	0.0	0.0	0.0	63.6	39.6	57.8	70.5	40.6	16.8	5.3	0.0
2010	6.5	0.0	0.0	0.0	16.0	28.8	36.2	13.0	7.5	10.7	14.6	13.5
2011	8.7	0.0	13.6	22.3	5.4	37.0	32.3	28.4	4.0	3.3	7.4	0.0
2012	0.0	2.0	0.0	1.6	89.5	50.1	10.2	27.6	1.1	28.5	5.5	63.2
2013	0.0	1.7	0.0	0.0	27.0	20.2	79.7	46.3	5.4	3.6	1.0	0.0
2014	0.0	0.0	13.3	4.4	92.5	38.0	20.5	38.7	41.3	1.4	19.6	14.4
2015	0.0	0.0	1.4	7.5	13.1	13.3	41.9	38.8	17.8	26.8	7.1	0.0
2016	3.2	0.0	0.0	51.6	10.5	7.6	51.3	4.2	3.9	34.8	12.4	0.0
2017	3.2	0.1	1.0	14.8	52.5	61.8	26.3	42.7	17.8	25.5	23.0	0.6
2018	0.1	0.4	33.8	3.4	36.7	40.6	33.0	15.4	45.4	15.2	4.4	0.0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-9: Registro de precipitaciones máximas en 24 hrs, estación de Curepto

Estación Curepto Essam												
Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2008	0.0	0.0	2.5	26.9	84.7	52.3	48.4	48.6	28.6	2.3	0.0	2.1
2009	0.0	0.0	0.0	0.0	21.8	45.7	23.6	84.0	43.2	41.8	10.8	0.0
2010	0.0	0.0	0.0	10.0	17.6	42.1	36.8	13.6	17.8	13.9	9.4	8.6
2011	10.4	0.0	32.4	29.6	31.7	61.5	34.6	38.5	10.8	3.3	5.3	0.0
2012	0.0	2.9	0.0	3.4	81.4	38.8	15.7	26.8	2.9	27.7	8.7	15.7
2013	0.0	10.3	0.0	0.0	32.2	107.9	39.2	43.8	24.8	3.4	0.3	0.0
2014	0.0	0.0	23.5	11.2	119.4	64.2	22.3	39.5	14.2	25.7	4.8	10.5
2015	0.0	0.0	2.7	20.6	9.4	23.8	51.3	52.4	43.8	44.6	0.0	0.0
2016	1.2	0.0	0.0	27.9	22.0	7.8	54.2	5.4	2.6	21.5	7.1	14.8
2017	0.0	0.0	0.0	11.3	22.4	117.5	29.6	26.3	52.6	53.4	2.3	0.0
2018	0.0	0.0	14.1	15.4	23.1	57.1	34.8	20.2	40.2	23.2	7.1	0.0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-10: Registro de precipitaciones máximas en 24 hrs, estación de Longaví

Estación Villa Longaví												
Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2008	2.6	0.0	0.6	55.1	80.1	42.1	43.8	38.8	35.6	10.1	3.8	2.4
2009	0.0	0.0	0.0	2.4	34.6	61.5	27.2	58.2	22.0	37.6	13.1	0.0
2010	1.4	7.5	0.0	0.0	27.5	54.8	28.2	28.5	18.1	27.7	19.3	21.1
2011	12.9	0.0	22.9	29.1	35.8	52.0	50.1	30.1	21.2	8.8	7.8	0.0
2012	0.0	38.7	0.0	0.0	30.1	21.8	12.6	22.9	2.5	22.9	7.9	23.5
2013	0.0	11.9	0.6	0.9	31.4	24.8	40.2	34.8	13.8	10.5	0.0	0.0
2014	3.1	0.0	25.8	25.1	17.6	29.4	23.1	23.1	16.8	10.2	2.6	14.8
2015	0.0	0.0	5.3	1.1	24.8	35.1	25.8	25.9	34.5	37.5	10.2	0.0
2016	2.1	0.0	0.0	24.6	17.5	5.2	32.5	9.5	11.1	24.5	15.5	29.5
2017	1.9	9.0	3.2	26.1	33.1	47.5	120.7	41.9	52.4	25.7	14.6	0.5
2018	0.0	3.2	9.1	38.1	36.1	34.1	24.4	23.1	35.1	21.5	20.1	0.0

Fuente: Elaboración propia

Para introducir los datos de las estaciones dentro del software ArcGIS, debemos crear una tabla de resumen, las coordenadas de ubicación pueden estar en UTM (sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator) o en grados.

Tabla 3-11: Ubicación de estaciones para ArcGis.

ID	NOMBRE	COMUNA	ALTURA	UMT	UTM_X	UTM_Y	LAT	LONG
1	CHIMBARONGO SAN BENITO	CHIMBARONGO	214	19S	315330.2175	6156525.390	-34.7208	-71.0197
2	LOLOL HACIENDA	LOLOL	170	19S	255893.3266	6151441.091	-34.7108	-71.5956
3	CURICÓ GENERAL FREIRE	CURICÓ	225	19S	296104.1946	6128375.346	-34.9694	-71.2169
4	CUREPTO	CUREPTO	60	18S	767826.8900	6112286.730	-35.0967	-72.0619
5	VILLA LONGAVÍ	LONGAVÍ	153	19S	257552.3000	6016436.000	-35.9664	-71.6886

Fuente: Elaboración propia

Ahora sí podemos introducir los datos de las estaciones en el software e identificar nuestra cuenca de estudio.



Ilustración 3-23: Ubicación de estaciones y cuenca a estudiar en el software ArcGIS.

Fuente: Elaboración propia

ArcGIS nos aporta la opción de generar los polígonos de Thiessen respecto a nuestra cuenca de estudio, ocupando la ubicación de cada estación. Una vez realizado el polígono, es fácil apreciar que la estación de Longaví no influye en nuestra cuenca.



Ilustración 3-24: Polígonos de Thiessen formado por las estaciones pluviométricas seleccionadas y el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Para tener una buena ilustración del área de interés, se delimitará la intersección entre los polígonos y nuestra cuenca de estudio.

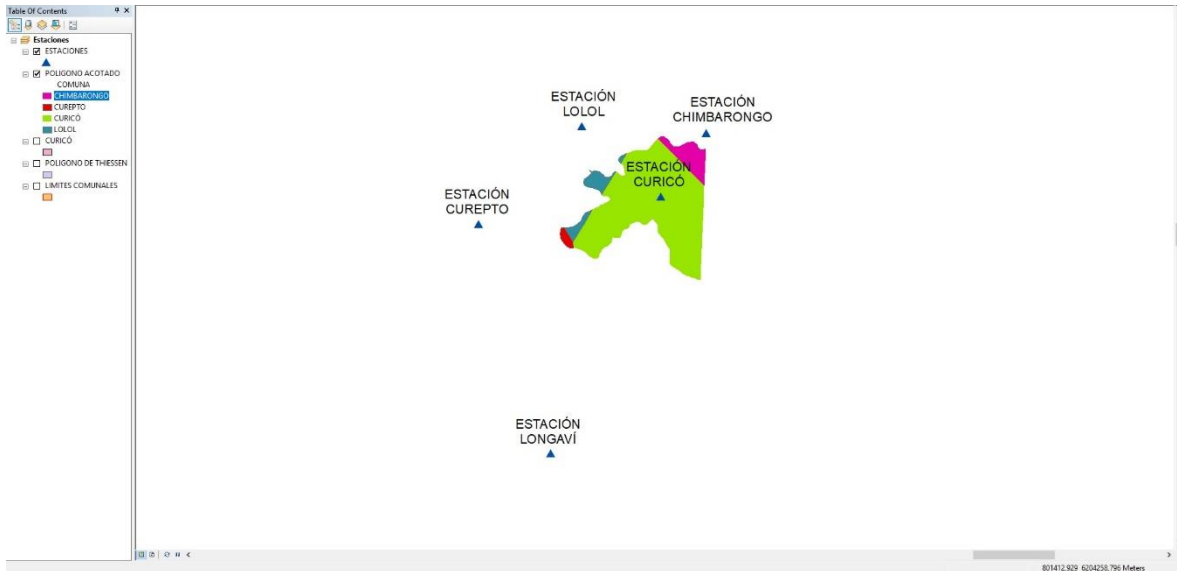


Ilustración 3-25: Área de influencia de los polígonos dentro de la cuenca de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez finalizado el análisis podemos consultar la tabla de resultados, la cual nos arroja el área de influencia que tiene cada estación.

FID	Shape*	Id	Input FID	ID 1	NOMBRE	COMUNA	ALTURA	UMT	UTM X	UTM Y	LAT	LONG	AREA
0	Polygon	0	2	3	CURICÓ GENERAL FREIRE	CURICÓ	225	19S	296104,1946	6128375,3461	-34,969443	-71,216943	1704,0315
1	Polygon	0	3	4	CUREPTO	CUREPTO	60	18S	767826,89	6112286,73	-35,096666	-72,061944	28,7803
2	Polygon	0	0	1	CHIMBARONGO SAN BENITO	CHIMBARONGO	214	19S	315330,2175	6156525,3906	-34,720832	-71,019721	163,9155
3	Polygon	0	1	2	LOLOL HACIENDA	LOLOL	170	19S	255893,3266	6151441,0914	-34,710833	-71,595555	114,5893

Ilustración 3-26: Área de influencia de cada estación en la cuenca de interés.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-12: Resumen de resultados del software ArcGIS.

ID	FORMA	FID	NOMBRE	COMUNA	REGIÓN	ÁREA (Km ²)
1	POLÍGONO	2	CHIMBARONGO SAN BENITO	CHIMBARONGO	VI	163,92
2	POLÍGONO	3	LOLOL HACIENDA	LOLOL	VI	114,58
3	POLÍGONO	0	CURICÓ GENERAL FREIRE	CURICÓ	VII	1.704,03
4	POLÍGONO	1	CUREPTO	CUREPTO	VII	28,78
5	POLÍGONO	4	VILLA LONGAVÍ	LONGAVÍ	VII	-
ÁREA TOTAL						2.011,31

Fuente: Elaboración propia

Volúmenes de precipitaciones para la ciudad de Curicó

Ahora que las áreas de influencia de cada estación, dentro de la cuenca de estudio ya son conocidas, se puede realizar el cálculo de precipitaciones ponderadas máximas en 24 hrs.

Tabla 3-13: Precipitaciones Ponderadas máximas en 24 hrs para la ciudad de Curicó

PRECIPITACIONES PONDERADAS CIUDAD DE CURICO													MAX LLUVIAS
Año	Mes												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
2008	0.0	0.0	8.3	20.2	38.9	39.6	28.1	53.6	15.5	5.3	0.4	0.3	53.6
2009	0.0	0.0	0.0	0.0	57.9	40.6	52.0	69.6	41.4	16.7	5.6	0.0	69.6
2010	5.5	0.0	0.5	0.2	17.3	31.3	35.5	12.5	9.7	11.7	13.6	12.4	35.5
2011	8.9	0.0	13.5	28.0	5.5	37.6	31.6	28.3	5.1	2.8	6.8	0.0	37.6
2012	0.1	2.0	0.3	2.2	86.9	49.5	10.6	26.7	1.3	27.8	5.6	57.4	86.9
2013	0.3	1.6	0.3	1.1	28.8	23.6	76.0	44.2	6.7	4.3	0.9	0.0	76.0
2014	0.0	0.0	13.6	4.3	86.6	39.1	19.7	40.1	38.2	1.7	20.6	13.5	86.6
2015	0.0	0.2	1.5	8.0	12.1	14.2	40.6	43.3	19.2	28.9	8.0	0.9	43.3
2016	3.4	0.0	0.1	48.7	10.9	8.0	50.2	4.2	3.8	34.6	12.3	1.3	50.2
2017	2.7	0.1	1.1	14.4	48.8	59.7	27.6	41.9	17.3	28.2	20.9	0.5	59.7
2018	0.1	0.4	31.2	3.6	34.5	40.6	36.4	16.2	44.8	15.2	4.0	0.0	44.8
MAX LLUVIAS	8.9	2.0	31.2	48.7	86.9	59.7	76.0	69.6	44.8	34.6	20.9	57.4	86.9

Fuente: Elaboración propia

Distribución de Precipitaciones

Primero para conocer la distribución de las precipitaciones de la tabla 3-13 obtendremos las lluvias máximas anuales prolongadas para la ciudad de Curicó.

Tabla 3-14: Máximas precipitaciones prolongadas en 24 hrs por año.

ID	Año	MAX ANUAL (mm)
1	2008	53.61
2	2009	69.60
3	2010	35.45
4	2011	37.61
5	2012	86.89
6	2013	76.03
7	2014	86.64
8	2015	43.31
9	2016	50.16
10	2017	59.71
11	2018	44.78

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se procede al cálculo de las variables probabilísticas asociadas a la distribución de Gumbel, las cuales son; media aritmética, varianza y los parámetros d y μ los cuales son calculados con los datos de la columna 3, De la tabla 3-14.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = 58,53$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} = 18,73$$

$$d = \frac{1}{0.779696 \times S} = 0,07$$

$$\mu = \bar{x} - 0.450047 \times S = 50,09$$

Con los siguientes valores podemos obtener la frecuencia observada acumulada y la frecuencia teórica acumulada mediante la función de Gumbel.

$$\text{Frecuencia Observada} = \frac{n}{N+1}$$

$$\text{Función de Gumbel: } F(x) = e^{-e^{-d(x-\mu)}}$$

Tabla 3-15: Tabla de frecuencia acumulada, teorica y observada de las precipitaciones.

Precipitación (mm)	Frec Obs. Acum.	Frec. Teo. Acum.
35.45	0.083	0.066
37.61	0.167	0.095
43.31	0.250	0.204
44.78	0.333	0.237
50.16	0.417	0.370
53.61	0.500	0.456
59.71	0.583	0.596
69.6	0.667	0.769
76.03	0.750	0.844
86.04	0.833	0.918
86.89	0.917	0.923
Promedio	0.500	0.498

Fuente: elaboración propia.

Con la información de la tabla 3-15, se calcula y busca el valor de D.

$$\text{Sup}|Fn(x)_i - F(x)_i| = D$$

Para este caso, el valor de esta variable corresponde a $D = 0.102$

Para obtener el valor de D tabla, debemos dirigirnos a las tablas de inferencias estadísticas, específicamente en la tabla N°8 del test de ajuste de Kolmogorov-Smirnov sobre bondad de ajuste, en donde un 95 % de confiabilidad, y $n = 11$ adquiere un valor de tabla $D_t = 0.39122$

$$D < D \text{ tabla}$$

Se acepta el ajuste con un 95% de seguridad.

Aplicación del coeficiente de determinación.

La aplicación del coeficiente de determinación (R^2), establece las variaciones de las frecuencias observadas. Es decir que proporción de la variación total de las frecuencias observadas, está influenciada por las frecuencias teóricas acumuladas.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(F_n(x)_i - F(x)_i)^2}{\sum(F_n(x)_i - \bar{F}_n(x)_t)^2}$$

Donde:

R^2 = Coeficiente de determinación $0 < R^2 < 1$

$\overline{F_n(x)}_t$ = Media de las frecuencias observadas acumuladas

Según los datos de la tabla 3-15 nos arroja un valor del coeficiente de determinación de 0.94, es decir las variaciones de las frecuencias observadas se explica en un 95%, lo cual es aceptado.

Ajuste de Gumbel

Debido a que el ajuste de Gumbel ha sido validado, podemos despejar ahora x.

$$X = \mu - \frac{\ln(-\ln(F(x)))}{d}$$

Para conseguir definir la probabilidad implícita es preciso consignar dos conceptos previos, que son el período de retorno, definido como el tiempo que transcurre entre dos sucesos iguales (T) y la probabilidad de excedencia que es la probabilidad asociada al período de retorno(López, 2017).

$$P(x > X) = 1 - F(x) = 1 - \frac{1}{T}$$

Una vez obtenidos los valores F(x) se puede calcular las precipitaciones máximas en un periodo de 24 hrs dependiendo de un periodo de retorno. Para garantizar mayor exactitud en los datos calculados, se recomienda utilizar un valor de T no mayor a 3 veces el numero de ciclos de registros, es decir, debido a que contamos con 11 años de registros, se recomienda no usar un valor T superior a 33.

Tabla 3-16: Intensidades y duración respecto a un periodo de retorno

Frecuencia	Años					
	2	5	10	15	20	30
Duración Hrs						
1	55.45	72.00	82.97	89.15	93.48	99.53
2	27.72	36.00	41.48	44.58	46.74	49.76
3	18.48	24.00	27.66	29.72	31.16	33.18
4	13.86	18.00	20.74	22.29	23.37	24.88
5	11.09	14.40	16.59	17.83	18.70	19.91
6	9.24	12.00	13.83	14.86	15.58	16.59

7	7.92	10.29	11.85	12.74	13.35	14.22
8	6.93	9.00	10.37	11.14	11.69	12.44
9	6.16	8.00	9.22	9.91	10.39	11.06
10	5.54	7.20	8.30	8.92	9.35	9.95
11	5.04	6.55	7.54	8.10	8.50	9.05
12	4.62	6.00	6.91	7.43	7.79	8.29
13	4.27	5.54	6.38	6.86	7.19	7.66
14	3.96	5.14	5.93	6.37	6.68	7.11
15	3.70	4.80	5.53	5.94	6.23	6.64
16	3.47	4.50	5.19	5.57	5.84	6.22
17	3.26	4.24	4.88	5.24	5.50	5.85
18	3.08	4.00	4.61	4.95	5.19	5.53
19	2.92	3.79	4.37	4.69	4.92	5.24
20	2.77	3.60	4.15	4.46	4.67	4.98
21	2.64	3.43	3.95	4.25	4.45	4.74
22	2.52	3.27	3.77	4.05	4.25	4.52
23	2.41	3.13	3.61	3.88	4.06	4.33
24	2.31	3.00	3.46	3.71	3.90	4.15

Fuente: Elaboración propia.

Distribución de precipitaciones

Como ya se conocen los calores de las intensidades de precipitación para las distintas duraciones y periodos de retornos, ya podemos establecer los índices de tormenta de la ciudad de Curicó, para cada una de las horas donde se distribuyen los periodos de retorno.

Tabla 3-17: Series de precipitaciones

Frecuencia	Años					
Duración	2	5	10	15	20	30
1	14.75	19.16	22.07	23.72	24.87	26.48
2	7.38	9.58	11.04	11.86	12.43	13.24
3	4.92	6.39	7.36	7.91	8.29	8.83
4	3.69	4.79	5.52	5.93	6.22	6.62
5	2.95	3.83	4.41	4.74	4.97	5.30
6	2.46	3.19	3.68	3.95	4.14	4.41

7	2.11	2.74	3.15	3.39	3.55	3.78
8	1.84	2.39	2.76	2.96	3.11	3.31
9	1.64	2.13	2.45	2.64	2.76	2.94
10	1.48	1.92	2.21	2.37	2.49	2.65
11	1.34	1.74	2.01	2.16	2.26	2.41
12	1.23	1.60	1.84	1.98	2.07	2.21
13	1.13	1.47	1.70	1.82	1.91	2.04
14	1.05	1.37	1.58	1.69	1.78	1.89
15	0.98	1.28	1.47	1.58	1.66	1.77
16	0.92	1.20	1.38	1.48	1.55	1.65
17	0.87	1.13	1.30	1.40	1.46	1.56
18	0.82	1.06	1.23	1.32	1.38	1.47
19	0.78	1.01	1.16	1.25	1.31	1.39
20	0.74	0.96	1.10	1.19	1.24	1.32
21	0.70	0.91	1.05	1.13	1.18	1.26
22	0.67	0.87	1.00	1.08	1.13	1.20
23	0.64	0.83	0.96	1.03	1.08	1.15
24	0.61	0.80	0.92	0.99	1.04	1.10

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.2 Área de captación

La cuenca o área de captación puede generar grandes variaciones en los resultados, debido a que necesitamos la información más exacta acerca de las áreas de captación y transporte de la escorrentía superficial.

En esta memoria los pavimentos serán implementados solo en las calles, por lo cual debemos saber todos los pavimentos que influyen en nuestro punto de estudio, además saber con la mayor exactitud cuál es el área de cubiertas que influyen en dicho punto de estudio.

Para lograr una estimación adecuada de las áreas de las cuencas se usará el software Google Earth Pro, que, mediante la herramienta polígonos, permite dibujar encima de las cuencas calculando su área.



Ilustración 3-27: Subcuenca Punto de Estudio N°1.

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 3-28: Subcuenca Punto de Estudio N°2.

Fuente: Elaboración propia

Para la creación de subcuencas en SWMM se deben establecer ciertos parámetros como: punto de descarga, pendiente (%), coeficiente de Manning del estrato impermeable (n), coeficiente de Manning del estrato permeable (n), ancho de transporte de aguas de escorrentía (m), área impermeable (%) y el tipo de estructura para saber que SUDS se puede instalar.

Las tablas 3-18 y 3-19 muestran los datos de subcuencas de los puntos 1 y 2 respectivamente. Para ambos casos las subcuencas llevan por nombre SC_ y el número respectivo. Los coeficientes de Manning del estrato permeable e impermeables toman los valores de 0.04 y 0.018 respectivamente.

Tabla 3-18: Subcuencas punto 1

Nombre	Descarga	Área (ha)	Área Imp. (%)	i (%)	Estructura
SC_01-YUNGAY	COL_2	0.0751	80	0.3	Pavimento
SC_02-SGTO.ALDEA	COL_2	0.0577	80	0.3	Pavimento
SC_03-CARMEN	COL_1	0.0669	80	0.3	Pavimento
SC_04-C.HENR	COL_3	0.0929	80	0.3	Pavimento
SC_05	SC_01-YUNGAY	0.1313	85	20	Cubierta
SC_06	SC_01-YUNGAY	0.1700	85	20	Cubierta
SC_07	SC_01-YUNGAY	0.0463	85	20	Cubierta
SC_08	SC_04-C.HENR	0.0204	85	20	Cubierta
SC_09	SC_01-YUNGAY	0.0136	85	20	Cubierta
SC_10	SC_01-YUNGAY	0.0104	85	20	Cubierta
SC_11	SC_01-YUNGAY	0.0245	85	20	Cubierta
SC_12	SC_01-YUNGAY	0.0157	85	20	Cubierta
SC_13	SC_01-YUNGAY	0.0539	85	20	Cubierta
SC_14	SC_01-YUNGAY	0.0173	85	20	Cubierta
SC_15	SC_01-YUNGAY	0.0101	85	20	Cubierta
SC_16	SC_01-YUNGAY	0.0080	85	20	Cubierta
SC_17	SC_01-YUNGAY	0.0100	85	20	Cubierta
SC_18	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0154	85	20	Cubierta
SC_19	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0111	85	20	Cubierta
SC_20	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0091	85	20	Cubierta
SC_21	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0093	85	20	Cubierta
SC_22	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0101	85	20	Cubierta
SC_23	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0124	85	20	Cubierta
SC_24	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0163	85	20	Cubierta
SC_25	SC_03-CARMEN	0.0135	85	20	Cubierta
SC_26	SC_03-CARMEN	0.0076	85	20	Cubierta
SC_27	SC_03-CARMEN	0.0156	85	20	Cubierta
SC_28	SC_03-CARMEN	0.0120	85	20	Cubierta
SC_29	SC_03-CARMEN	0.0461	85	20	Cubierta

SC_30	SC_03-CARMEN	0.0390	85	20	Cubierta
SC_31	SC_04-C.HENR	0.0253	85	20	Cubierta
SC_32	SC_04-C.HENR	0.0162	85	20	Cubierta
SC_33	SC_04-C.HENR	0.0159	85	20	Cubierta
SC_34	SC_04-C.HENR	0.0366	85	20	Cubierta
SC_35	SC_03-CARMEN	0.0363	85	20	Cubierta
SC_36	SC_03-CARMEN	0.0737	85	20	Cubierta
SC_37	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0156	85	20	Cubierta
SC_38	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0208	85	20	Cubierta
SC_39	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0099	85	20	Cubierta
SC_40	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0096	85	20	Cubierta
SC_41	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0106	85	20	Cubierta
SC_42	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0167	85	20	Cubierta
SC_43	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0289	85	20	Cubierta
SC_44	SC_02-SGTO.ALDEA	0.0296	85	20	Cubierta

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-19: Subcuencas punto 2

Nombre	Descarga	Área (ha)	Área Imp. (%)	i (%)	Estructura
SC_C.HENR_1	COL_1	0.0764	80	0.3	Pavimento
SC_C.HENR_2	COL_2	0.0887	80	0.3	Pavimento
SC_C.HENR_3	COL_3	0.0917	80	0.3	Pavimento
SC_04	SC_C.HENR_1	0.0171	85	20	Cubierta
SC_05	SC_C.HENR_1	0.0158	85	20	Cubierta
SC_06	SC_C.HENR_1	0.0240	85	20	Cubierta
SC_07	SC_C.HENR_1	0.0221	85	20	Cubierta
SC_08	SC_C.HENR_1	0.0266	85	20	Cubierta
SC_09	SC_C.HENR_1	0.0184	85	20	Cubierta
SC_10	SC_C.HENR_1	0.0481	85	20	Cubierta
SC_11	SC_C.HENR_2	0.0599	85	20	Cubierta
SC_12	SC_C.HENR_2	0.1037	85	20	Cubierta
SC_13	SC_C.HENR_2	0.0461	85	20	Cubierta
SC_14	SC_C.HENR_2	0.1440	85	20	Cubierta
SC_15	SC_C.HENR_3	0.0218	85	20	Cubierta
SC_16	SC_C.HENR_3	0.0315	85	20	Cubierta
SC_17	SC_C.HENR_3	0.0218	85	20	Cubierta
SC_18	SC_C.HENR_3	0.0291	85	20	Cubierta
SC_19	SC_C.HENR_3	0.0231	85	20	Cubierta
SC_20	SC_C.HENR_3	0.0285	85	20	Cubierta

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Módulo hidráulico

El módulo hidráulico permite analizar el recorrido de la escorrentía, ya sea sobre las subcuencas y/o por un sistema compuesto por tuberías. Este módulo entrega una serie de resultados en distintos formatos, que permiten determinar de manera gráfica si el punto de análisis se inunda o no.

Los datos para la red de drenaje son obtenidos del “Plan Maestro de Aguas Lluvias de la ciudad de Curicó”. La ubicación de los sumideros respectivos del punto de análisis se obtuvieron de la memoria de López (2017).

Tabla 3-20: Datos de nudos red de evacuación punto 1.

Nudos	Cota de Fondo (m)	Profundidad Máxima (m)	Nivel Inicial (m)	Área de Inundación (m ²)
COL_1	204.196	2	0	1.33
COL_2	203.86	2	0	1.33
COL_3	204.19	2	0	1.33
CAM_4	204.023	2	0	0.64

Fuente: López (2017)

Tabla 3-21 Datos conductos de red de evacuación punto 1.

Cond.	Forma	∅ (mm)	Long. (m)	Mat.	Rug.	i (‰)	Cota Ent. (m)	Cota Sal. (m)	Δh Entrada	Δh Salida	Q Inicial (l/s)	Q Máx. (l/s)
TUB_1	Circular	200	66.8	Mortero de cemento comprimido	0.014	2.5	204.29	204.46	0.267	0.27	0	15
TUB_2	Circular	200	124.4	Mortero de cemento comprimido	0.014	2.7	204.43	204.77	0.574	0.43	0	16
TUB_3	Circular	200	65.1	Mortero de cemento comprimido	0.014	2.5	204.13	204.29	0.27	0.267	0	15
TUB_4	Circular	200	174.7	Mortero de cemento comprimido	0.014	2.7	203.93	204.43	0.542	0.57	0	16
TUB_5	Circular	200	115.4	Mortero de cemento comprimido	0.014	2.5	203.84	204.13	0.268	0.27	0	15

Fuente: López (2017)

Tabla 3-22: Puntos de vertido punto 1.

Puntos de Vertido	Cota fondo (m)	Compuerta	Tipo
DESC_1	203.338	No	Normal
DESC_2	203.572	No	Normal

Fuente: López (2017)

3.2.3 Módulo LID

Este módulo simula los procesos de captura, retención e infiltración generada por la incorporación de SUDS en la zona de análisis. SWMM cuenta con las herramientas para el cálculo de pavimentos permeables, cubiertas verdes, zanjas de infiltración, cunetas verdes y depósitos.

El comando de SWMM, “LID control editor” permite incorporar el SUDS a utilizar en las subcuencas del punto de análisis. Se deben definir los parámetros geométricos hidráulicos e hidrológicos para cada SUDS a ocupar.

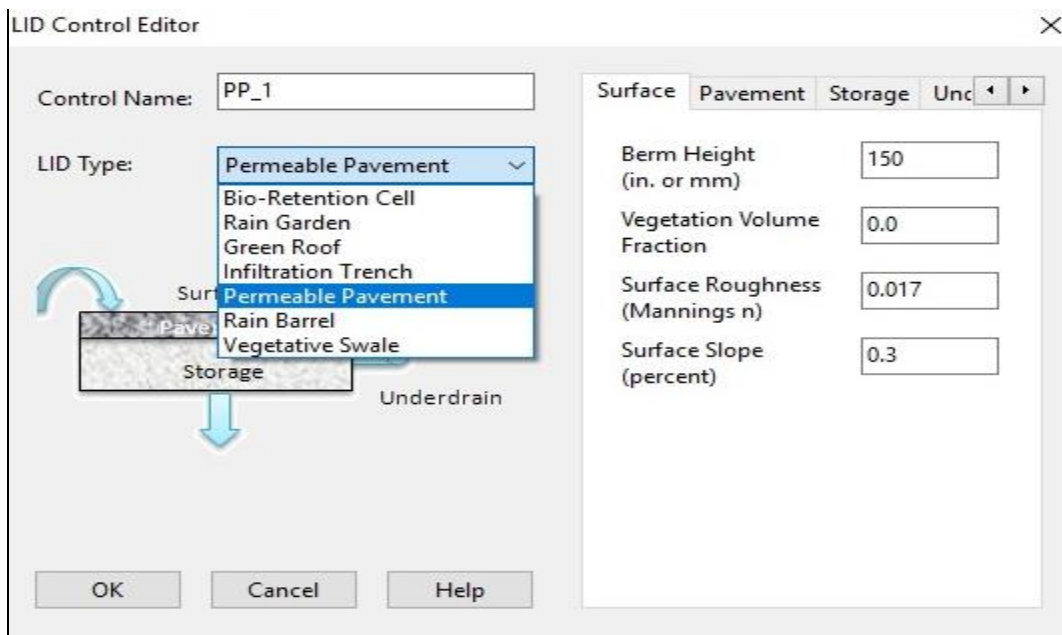


Ilustración 3-29: LID control editor.

Fuente: Elaboración propia.

El LID control editor se divide según las capas del SUDS, en el caso de los pavimentos permeables se divide en superficie, pavimento, almacenamiento y desagüe.

Para este estudio se utilizarán dos tipos de pavimentos permeables, uno expuesto en García (2011b) y el otro obtenido gracias a la entrega de datos de una empresa chilena, que por temas de confiabilidad no puede ser nombrada. Para ambos casos se ocupará la misma superficie, almacenamiento y drenaje.

Superficie

Surface	Pavement	Storage	Unc
Berm Height (in. or mm)		150	
Vegetation Volume Fraction		0.0	
Surface Roughness (Mannings n)		0.017	
Surface Slope (percent)		0.3	

Ilustración 3-30: LID control editor. Datos de Superficie.

Fuente: Elaboración propia.

Se consideran los datos obtenidos por el Plan maestro de aguas lluvias, donde la altura de la berma es de 15 cm y la pendiente superficial es del 0.3%, el coeficiente de Mannings es de 0.017 y la superficie no cuenta con vegetación.

Pavimento

Surface	Pavement	Storage	Unc
Thickness (in. or mm)		120	
Void Ratio (Voids / Solids)		0.21	
Impervious Surface Fraction		0	
Permeability (in/hr or mm/hr)		4320	
Clogging Factor		0	

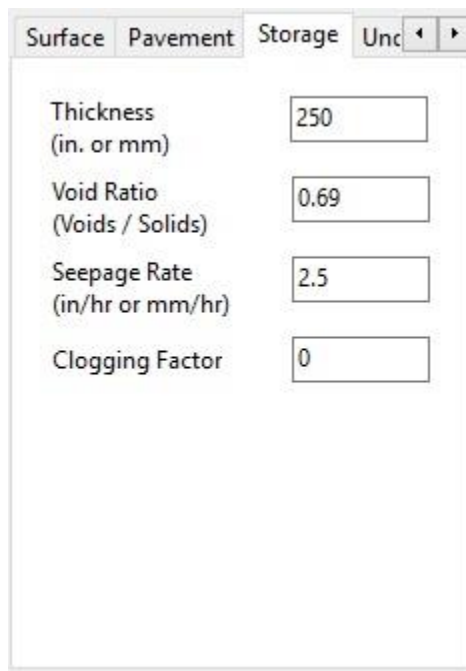
Ilustración 3-31: LID control editor, pavimento.

Fuente: Elaboración propia.

El primer pavimento (PP_1), es el presentado en García Haba (2011b), con un grosor de 120 mm, un índice de huecos de 0.21, con toda su área permeable, con una permeabilidad de 43.200 mm/hrs, al cual se le aplica un factor de seguridad de 10, por lo cual para el modelo se ingresa una permeabilidad de 4.320 mm/hrs, sin obstrucciones.

El segundo pavimento (PP_2), es de datos aportados por la empresa chilena, la cual tiene un grosor de 200 mm, un índice de huecos de 0.21, cuenta con toda su área permeable, sin obstrucciones, con una permeabilidad de 53.340 mm/ hrs y se ingresa con un factor de seguridad de 10.

Almacenamiento

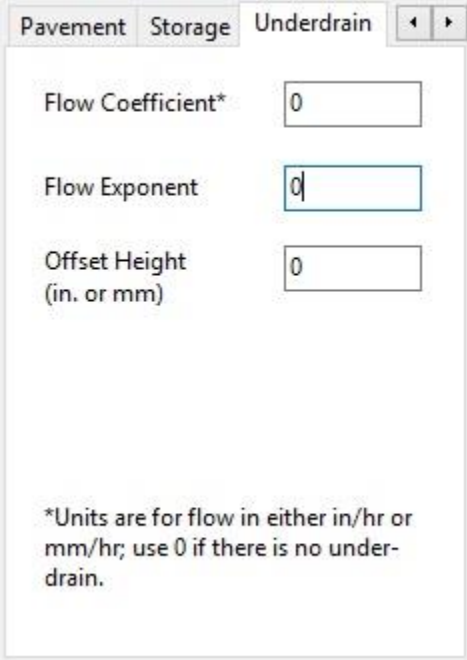


Surface	Pavement	Storage	Unc
		Thickness (in. or mm)	250
		Void Ratio (Voids / Solids)	0.69
		Seepage Rate (in/hr or mm/hr)	2.5
		Clogging Factor	0

Ilustración 3-32: LID control editor, almacenamiento.

Fuente: Elaboración propia.

Se considera el pavimento solo con la capa de subbase, con un espesor de 250 mm, una porosidad del 40%, por lo cual tiene un índice de huecos de 0.67. Según un estudio de suelos realizado en la Universidad de Talca campus Curicó, el terreno natural corresponde a una arcilla limosa, por lo cual se asume un valor de infiltración de 2.5 mm/hrs.

Drenaje

Pavement Storage Underdrain

Flow Coefficient*

Flow Exponent

Offset Height (in. or mm)

*Units are for flow in either in/hr or mm/hr; use 0 if there is no underdrain.

Ilustración 3-33: LID control editor, drenaje.

Fuente: Elaboración propia

Como fue nombrado en el capítulo 2, dentro de los tipos de pavimentos permeables, existen los pavimentos con 100% de infiltración al terreno, y ese es el que se ocupara en este estudio, por lo cual el diámetro del drenaje es 0 y los otros datos no interactúan en la simulación.

Capítulo IV: Análisis de Resultados.

4.1 Diseño SWMM

Los puntos de análisis serán sometidos a 3 series de lluvias distintos. Las series seleccionadas son las expuestas en la tabla 3-17, de las cuales se utilizarán las series para 5, 15 y 30 años, nombras Serie_1, Serie_2 y Serie_3 respectivamente.



Ilustración 4-34: Serie temporal 1.

Fuente: Elaboración propia.

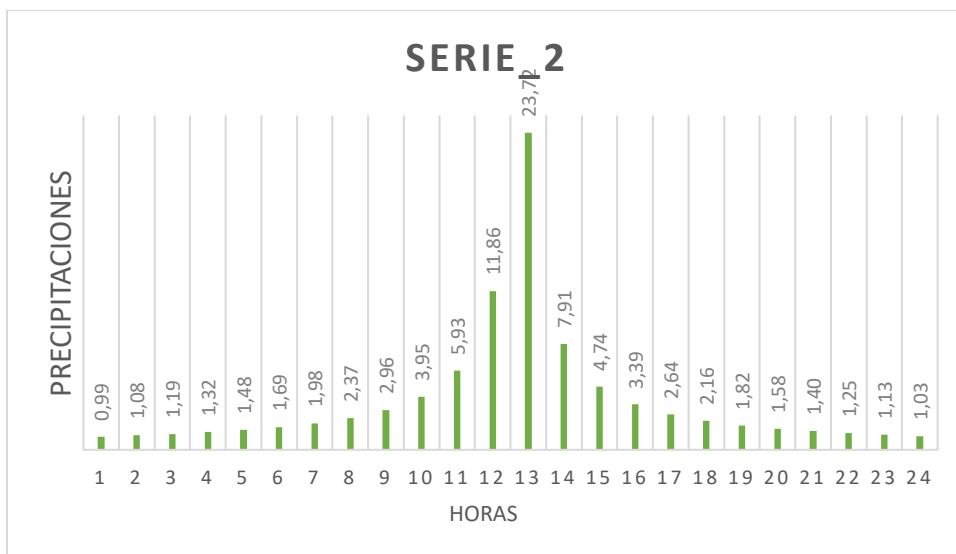


Ilustración 4-35: Serie temporal 2.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 4-36: Serie temporal 3.

Fuente: Elaboración propia.

Para introducir las series en el modelo, se debe seleccionar Time Series y se selecciona la opción de agregar, se le asigna el nombre a la serie, se asigna los intervalos de tiempo en formato H:MM y la frecuencia correspondiente.

Time Series Editor

Time Series Name
SERIE_5

Description

Use external data file named below

Enter time series data in the table below
No dates means times are relative to start of simulation.

Date (M/D/Y)	Time (H:M)	Value
	1:00	0.80
	2:00	0.87
	3:00	0.96
	4:00	1.06
	5:00	1.20
	6:00	1.37
	7:00	1.60
	8:00	1.92
	9:00	2.39
	10:00	3.19
	11:00	4.79

View

OK

Cancel

Help

Ilustración 4-37: Ingreso de series en SWMM.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se debe definir las características de los pluviómetros, formatos de lluvia, intervalo de tiempo, origen de datos y unidades de precipitaciones.

Rain Gage LLUVIA_1	
Property	Value
Name	LLUVIA_1
X-Coordinate	-154.749
Y-Coordinate	9338.314
Description	
Tag	
Rain Format	INTENSITY
Time Interval	1:00
Snow Catch Facto	1.0
Data Source	TIMESERIES
TIME SERIES:	
- Series Name	SERIE_5
DATA FILE:	
- File Name	*
- Station ID	*
- Rain Units	IN
Name of rainfall time series (double-click to edit time series)	

Ilustración 4-38: Características de pluviómetros.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 Modelo Punto 1

Para iniciar un nuevo modelo SWMM, se deben establecer los parámetros generales en la opción **Project + Defaults**, en la sección de subcuencas se asignan los valores comunes como lo son los coeficientes de Manning expuestos en el capítulo 3, además de establecer en la sección **Infiltration Model** la opción **GREEN_AMPT**.

En la sección de nodos las unidades de caudal serán de litros por segundos (LPS), el modelo de cálculo hidráulico será Kinematic Wade y la ecuación de tubería forzada será de Darcy-Weisbach.

Para la creación del punto 1, se utilizan los datos expuestos en el capítulo 3 acerca de Subcuencas, conductos, nodos y desagües.

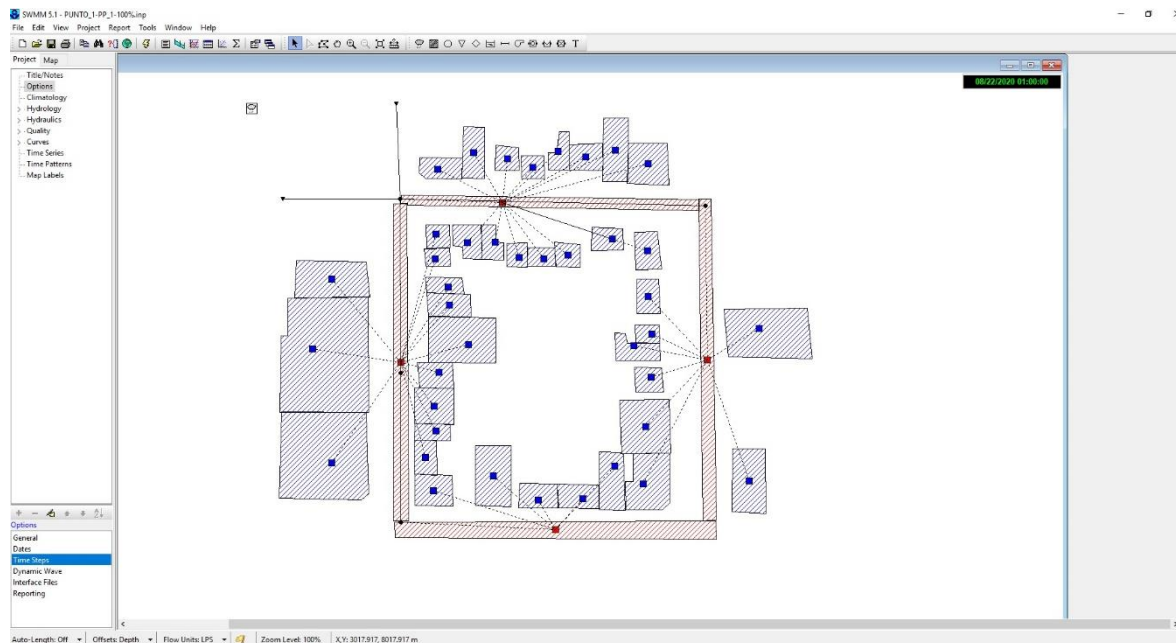


Ilustración 4-39: Modelo Punto 1 SWMM.

Fuente: Elaboración propia.

Como se estableció anteriormente hay subcuencas que son pavimentos y las otras cubiertas de edificación que colaboran a la escorrentía, según estos criterios se establecen las subcuencas donde se puede implementar pavimentos permeables. Dichas subcuencas son; SC_01-YUNGAY, SC_02-SGTO.ALDEA, SC_03-CARMEN y SC_04-C.HENR.

Para aplicar las características de los pavimentos permeables, se debe seleccionar la subcuenta y seleccionar la opción **Edit Object** y se selecciona **LID Controls**. En el cuadro de resumen de **LID Controls** se le da la opción **Add**. En el recuadro **LID Usage Editor** establecemos el SUDS y el área que ocupara en la subcuenta.

Como objeto de estudio, se generan distintas simulaciones en donde se establecen distintos porcentajes de ocupación de pavimentos permeables en el total de las subcuencas que cumplen las características para su uso, y cada porcentaje es analizado para las 3 series de lluvia.

Este procedimiento se realiza para ambos pavimentos permeables mencionados en el capítulo 3 (PP_1 Y PP_2)

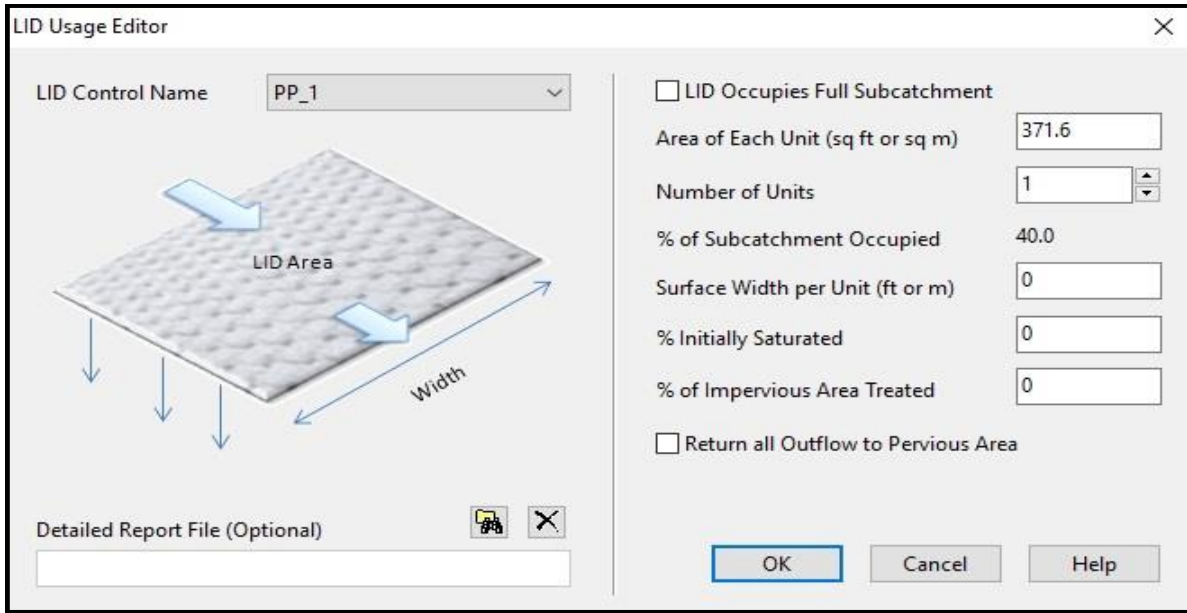


Ilustración 4-40: LID Usage Editor.

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la simulación obtenemos una serie de resultados, dentro de los que destacamos es el valor de escorrentía y de infiltración al terreno natural. Ambos obtenidos de la opción **Report + Status**.

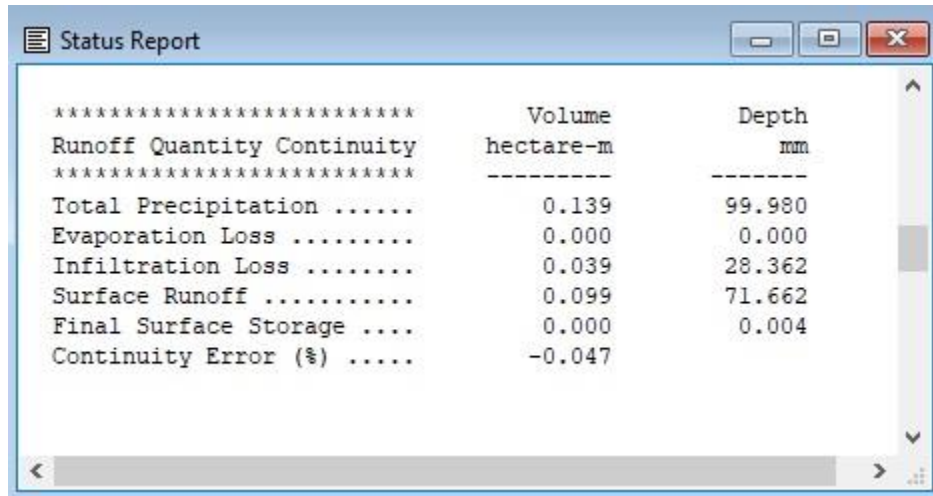


Ilustración 4-41: Informe de resultados; infiltración al terreno, escorrentía superficial y almacenamiento.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4-23: Resumen simulaciones a diferentes % PP_1, Serie_1

Serie_1			
PP_1	Perdidas por infiltración (mm)	Escorrentía superficial(mm)	Almacenamiento total (mm)
0%	3.16	69.21	0.00
20%	14.72	57.65	0.00
40%	26.30	46.08	0.00
60%	37.90	34.47	0.00
80%	49.53	22.84	0.00
100%	61.20	11.17	0.00

Fuente: Elaboración propia.

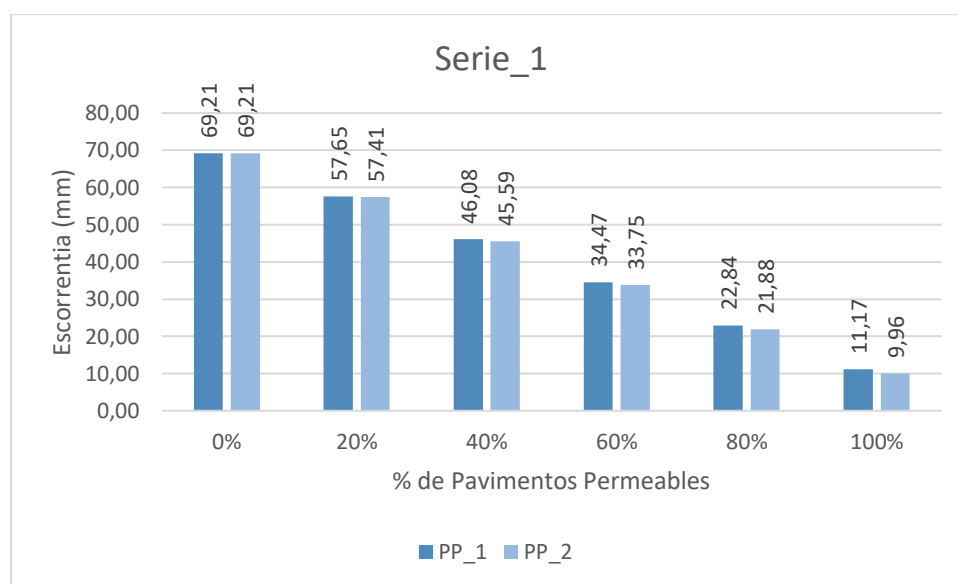


Ilustración 4-42: Escorrentía Superficial punto 1, con la incorporación de distintos % de PP_1 Y PP_2 para la Serie_1.

Fuente: Elaboración propia.

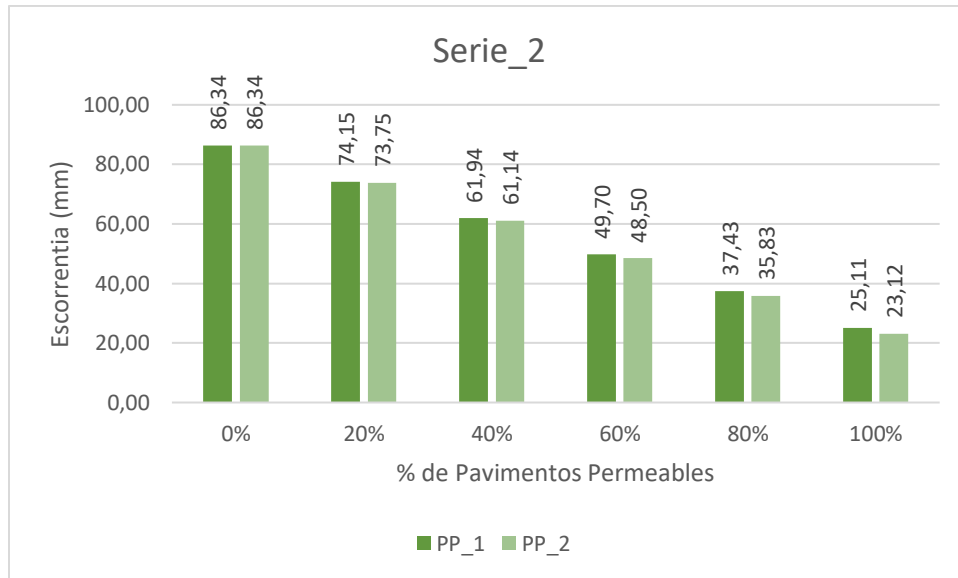


Ilustración 4-43: Escorrentía Superficial punto 1, con la incorporación de distintos % de PP_1 Y PP_2 para la Serie_2.

Fuente: Elaboración Propia.

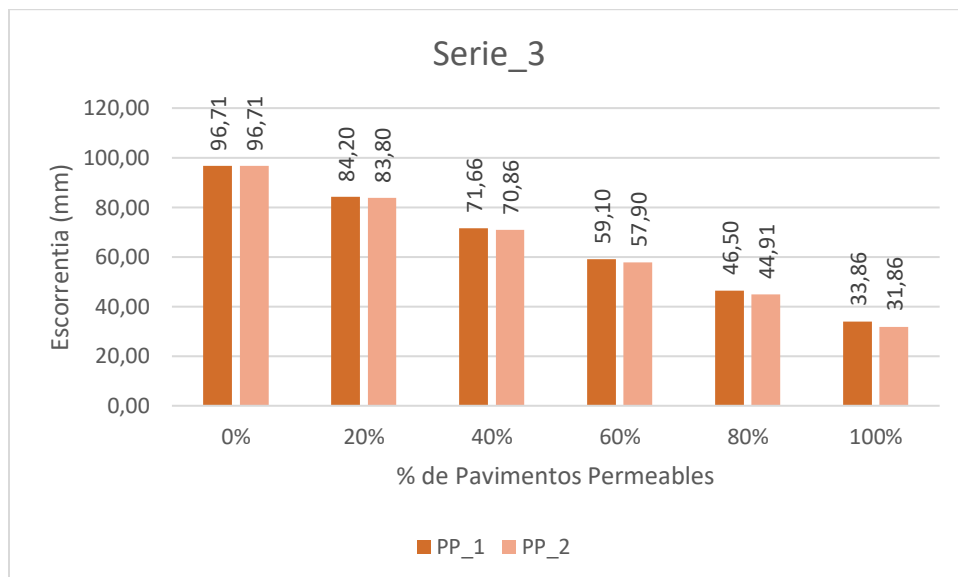


Ilustración 4-44: Escorrentía Superficial punto 1, con la incorporación de distintos % de PP_1 Y PP_2 para la Serie_3.

Fuente: Elaboración Propia.

Para examinar si existe o no inundación en el punto de análisis se debe ingresar a la opción **Create a Profile Plot** y se analizarán todos los elementos que intervienen en el transporte de la escorrentía desde el nodo COL_1 hasta la descarga DESC_2.

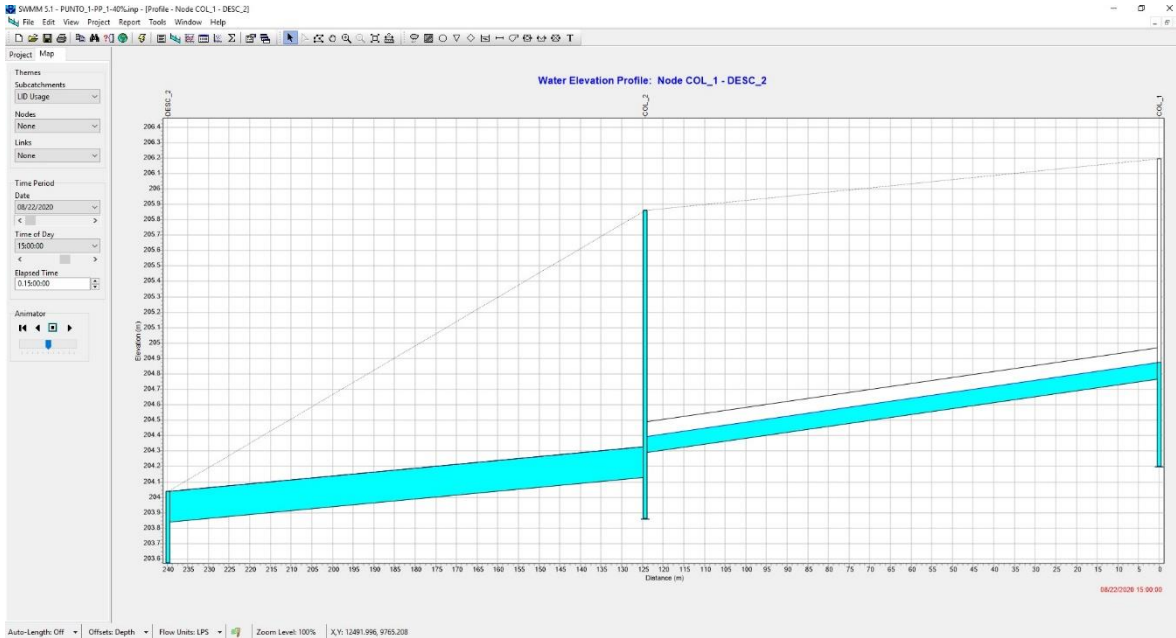


Ilustración 4-45: Perfil longitudinal desde COL_1 hasta DESC_2, a las 15 hrs, en el Punto 1, Serie_3, con 40% de PP_1.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4-24: Tabla de colores para demostrar con rojo las situaciones donde ocurre inundación en el punto 1 con los diferentes % de PP_1 para todas las series y la escorrentía (mm) generada.

Series	% PP_1					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Serie_1	69.21	57.65	46.08	34.47	22.84	11.17
Serie_2	86.34	74.15	61.94	49.70	37.43	25.11
Serie_3	96.71	84.20	71.66	59.10	46.50	33.86

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-25: Tabla de colores para demostrar con rojo las situaciones donde ocurre inundación en el punto 1 con los diferentes % de PP_2 para todas las series y la escorrentía (mm) generada.

Series	% PP_2					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Serie_1	69.21	57.41	45.59	33.75	21.88	9.96
Serie_2	86.34	73.75	61.14	48.50	35.83	23.12
Serie_3	96.71	83.80	70.86	57.90	44.91	31.86

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Modelo Punto 2

Para iniciar un nuevo modelo SWMM, se deben establecer los parámetros generales en la opción **Project + Defaults**, en la sección de subcuencas se asignan los valores comunes como lo son los coeficientes de Manning expuestos en el capítulo 3, además de establecer en la sección **Infiltration Model** la opción **GREEN_AMPT**.

En la sección de nodos las unidades de caudal son de litros por segundo (LPS), el modelo de cálculo hidráulico será Kinematic Wade y la ecuación de tubería forzada será de Darcy-Weisbach.

Para la creación del punto 2, se utilizan los datos expuestos en el capítulo 3 y en anexos acerca de Subcuencas, conductos, nodos y desagües.

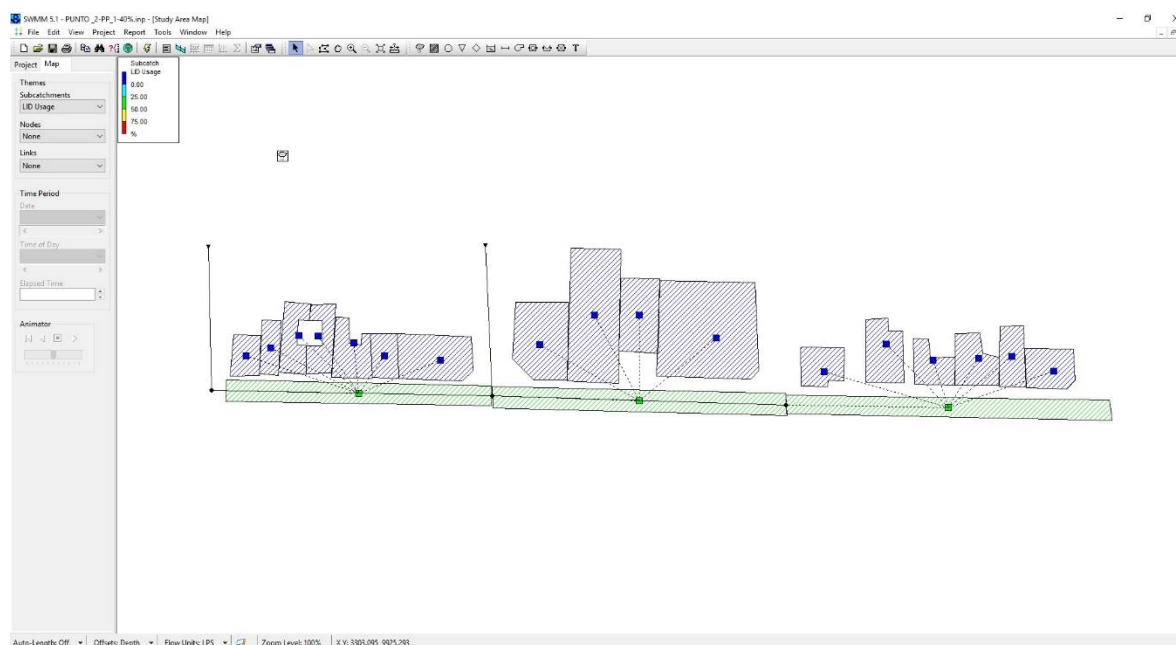


Ilustración 4-46: Modelo punto 2 SWMM.

Fuente: Elaboración propia.

Como se estableció anteriormente hay subcuencas que son pavimentos y las otras cubiertas, según estos criterios se establecen las subcuencas donde se puede implementar pavimentos permeables. Dichas subcuencas son; SC_C.HENR_1, SC_C.HENR_2 Y SC_C.HENR_3.

Al igual que en el punto 1, se generan distintas simulaciones en donde se establecen distintos porcentajes de ocupación de pavimentos permeables en el total de las subcuencas que cumplen las características para su uso, y cada porcentaje es analizado para las 3 series de lluvia.

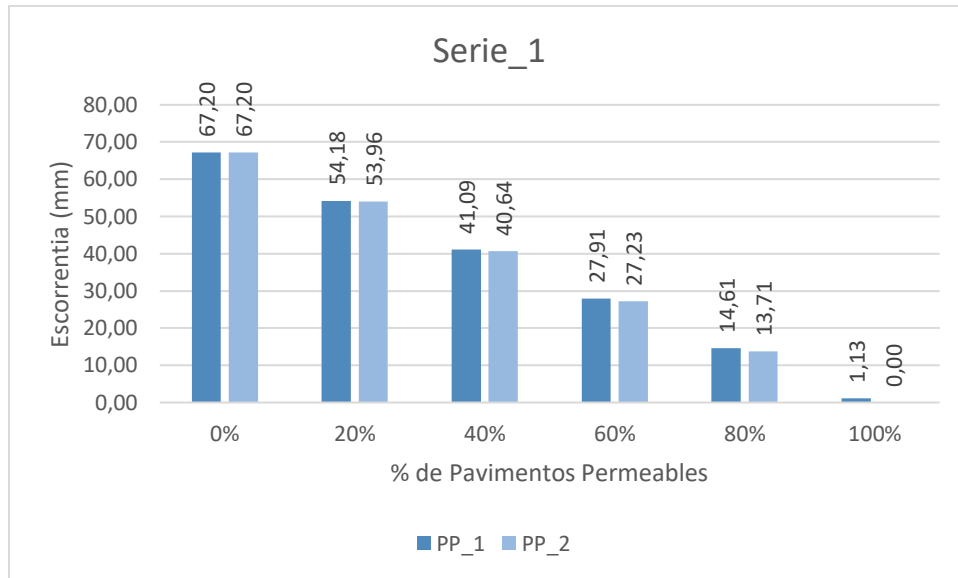


Ilustración 4-47: Escorrentía Superficial punto 2, con la incorporación de distintos % de PP_1 Y PP_2 para la Serie_1.

Fuente: Elaboración Propia.

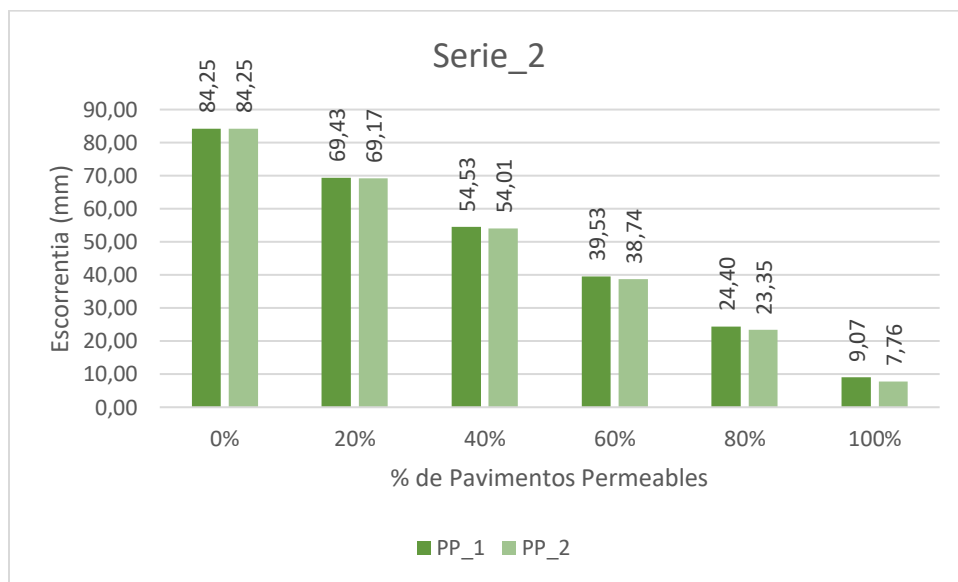


Ilustración 4-48: Escorrentía Superficial punto 2, con la incorporación de distintos % de PP_1 Y PP_2 para la Serie_2.

Fuente: Elaboración Propia.

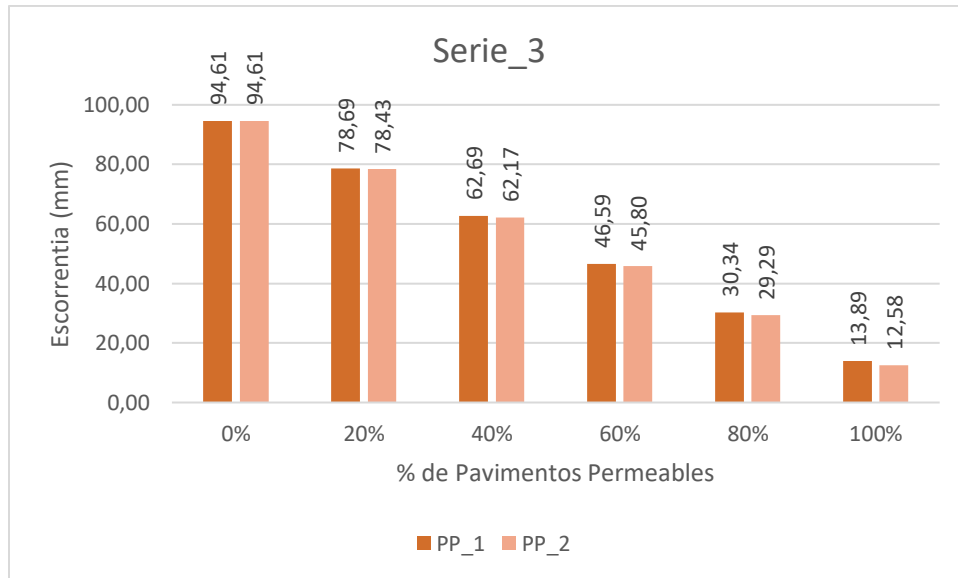


Ilustración 49: Escorrentía Superficial punto 2, con la incorporación de distintos % de PP_1 Y PP_2 para la Serie_3.

Fuente: Elaboración Propia.

Para examinar si existe o no inundación en el punto de análisis se debe ingresar a la opción **Create a Profile Plot** y se analizarán todos los elementos que intervienen en el transporte de la escorrentía desde el nodo COL_3 hasta la descarga DESC_2.

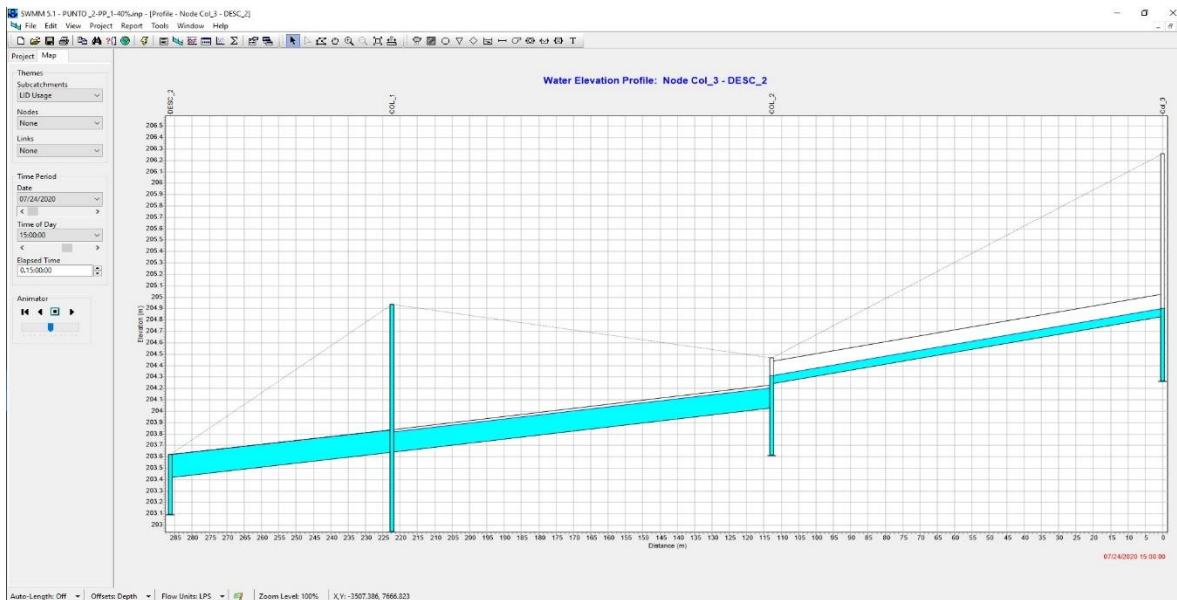


Ilustración 4-50: Perfil longitudinal desde COL31 hasta DESC_2, a las 15 hrs, en el Punto 2, Serie_3, con 40% de PP_1.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4-26: Tabla de colores para demostrar con rojo las situaciones donde ocurre inundación en el punto 2 con los diferentes % de PP_1 para todas las series y la escorrentía (mm) generada.

Series	% PP_1					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Serie_1	67.20	54.18	41.09	27.91	14.61	1.13
Serie_2	84.25	69.43	54.53	39.53	24.40	9.07
Serie_3	94.61	78.69	62.69	46.59	30.34	13.89

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-27: Tabla de colores para demostrar con rojo las situaciones donde ocurre inundación en el punto 2 con los diferentes % de PP_2 para todas las series y la escorrentía (mm) generada.

Series	% PP_2					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Serie_1	67.20	53.96	40.64	27.23	13.71	0.00
Serie_2	84.25	69.17	54.01	38.74	23.35	7.76
Serie_3	94.61	78.43	62.17	45.80	29.29	12.58

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Comparación entre pavimentos permeables y cubiertas verdes

Considerando las subcuencas de los puntos analizados anteriormente, las cubiertas cubren gran porcentaje del área total de captación que aporta a la escorrentía. Considerando los SUDS expuestos en el capítulo 2, las cubiertas verdes son un SUDS factible para implementar en dichos puntos de análisis.

Existen variados criterios de comparación entre un SUDS y otro. En esta memoria se escogerán ciertas cubiertas que al sumarlas generan la misma área que al sumar todas las áreas para pavimentos permeables.

La cubierta verde a analizar es la expuesta en la memoria de López (2017), CV_04:

- **Tipo:** Semi-extensiva.
- **Altura máxima total del sistema:** 320 mm.
- **Pendiente de inclinación:** 10°
- **Tipo de vegetación:** Flora semi densa.
- **Altura de vegetación:** 150 mm.
- **Tipo de sustrato:** Arcilla orgánica (composite).

- **Espesor máximo de sustrato:** 130 mm.
- **Espesor estera drenante:** 40 mm.
- **Volumen de retención de agua aproximado:** 70 lts/m² -
- **Peso saturado de agua:** 195 kg/ m²

El pavimento permeable para comparar es el PP_2 y el análisis será en el punto 1.

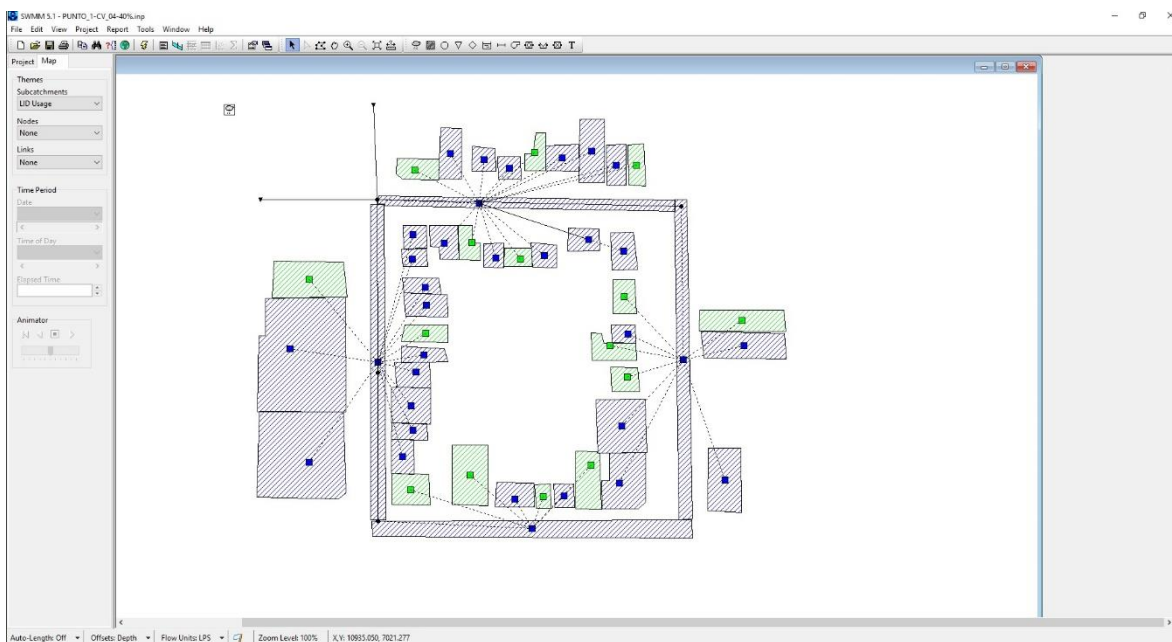


Ilustración 4-51: Modelo SWMM de cubiertas verdes, punto 1.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-28: Resumen simulaciones a diferentes % CV_04, Serie_1

Serie_1					
CV_04	Perdidas por infiltración (mm)	Escorrentía superficial(mm)	Almacenamiento total (mm)	Almacenamiento Inicial CV (mm)	Disminución total (mm)
0%	3.16	69.21	0.00	0.00	3.16
20%	3.86	65.461	4.05	0.99	6.92
40%	3.67	62.60	8.09	1.97	9.78
60%	3.48	59.74	12.13	2.96	12.65
80%	3.29	56.87	16.17	3.95	15.51
100%	3.10	54.00	20.21	4.94	18.37

Fuente: Elaboración propia

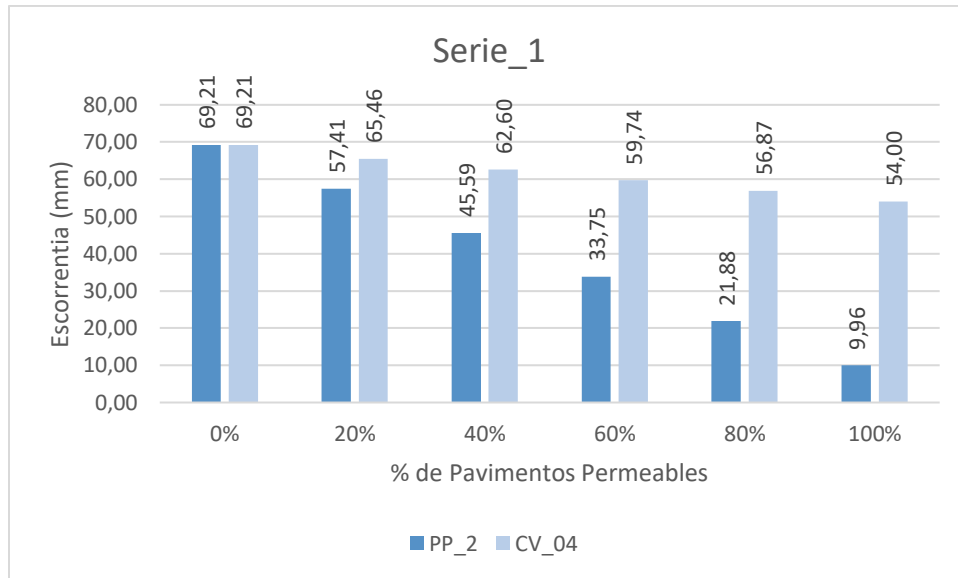


Ilustración 4-52: Escorrentía Superficial punto 1, con la incorporación de distintos % de PP_2 Y CV_04 para la Serie_1.

Fuente: Elaboración propia.

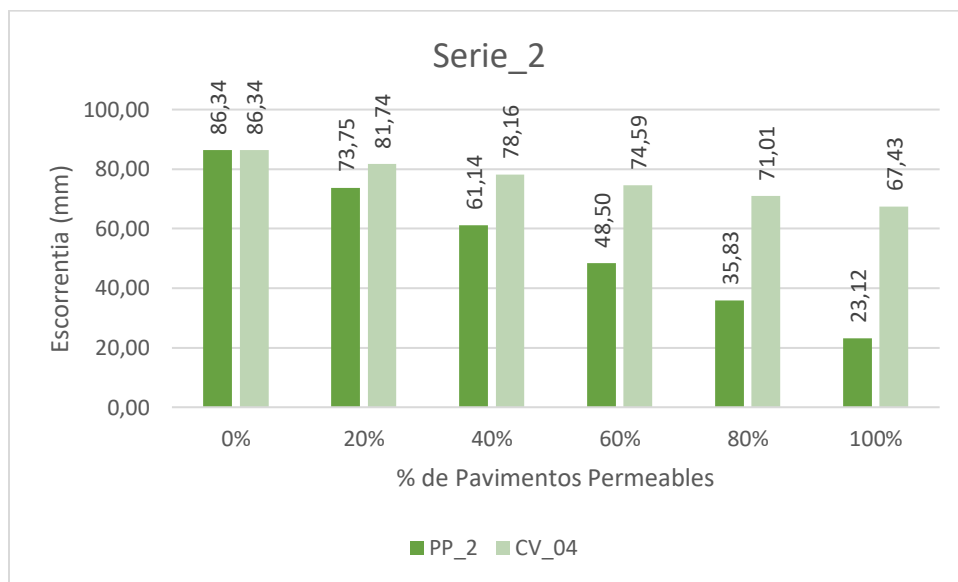


Ilustración 4-53: Escorrentía Superficial punto 1, con la incorporación de distintos % de PP_2 Y CV_04 para la Serie_2.

Fuente: Elaboración propia.

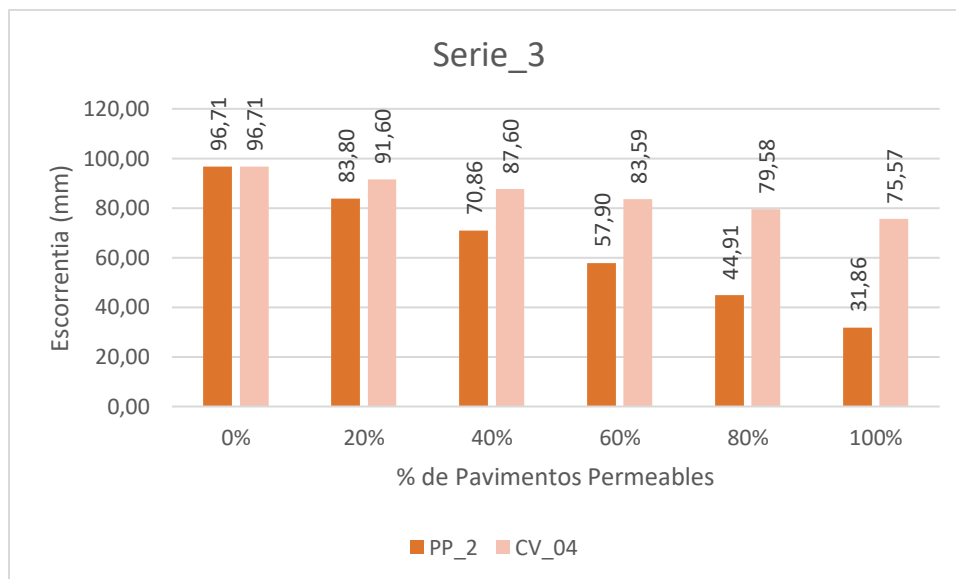


Ilustración 4-54 Escorrentía Superficial punto 1, con la incorporación de distintos % de PP_2 Y CV_04 para la Serie_3.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-29: Tabla de colores para demostrar con rojo las situaciones donde ocurre inundación en el punto 1 con los diferentes % de CV_04 para todas las series y la escorrentía (mm) generada.

Series	% CV_04					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Serie_1	69.21	65.461	62.60	59.74	56.87	54.00
Serie_2	86.34	81.74	78.16	74.59	71.01	67.43
Serie_3	96.71	91.60	87.60	83.59	79.58	75.57

Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Caudales de escorrentía

Los datos de caudales faltantes se encuentran en la zona de Anexos, todos esos datos son analizados a continuación.

Escorrentía Punto_1 con PP_1 Y PP_2

Gracias a las tablas 4-24 y 4-25 podemos analizar los cambios de escorrentías en el punto 1, con las 3 series de lluvias. Se observa que para la Serie_1 ambos pavimentos comienzas a ser efectivos al usar el 40% del área de pavimentos.

Para la Serie_2, los PP_1 son efectivos cuando ocupan el 80% o más del área total de pavimentos. Los PP_2 con la Serie_2 usando un 60% del área total de pavimentos, evita las inundaciones.

Si solo se toman en cuenta las Serie_1 y la Serie_2 hay una concordancia en el valor de los caudales, debido a los con caudales menores a 48,5 mm deja de producirse una inundación.

La Serie_3 derrumba ambas hipótesis planteadas en el capítulo 1, debido a que ni con el 100% del área de pavimentos usado por los pavimentos permeables planteados evitan la inundación, aunque cabe mencionar que la escorrentía superficial generada por ambos pavimentos al 100% es menor a las escorrentías generadas por las otras series al momento de dejar de generar inundaciones.

Escorrentía Punto_2 con PP_1 Y PP_2

Gracias a las tablas 4-26 y 4-27 podemos analizar los cambios de escorrentías en el punto 2, con las 3 series de lluvias. Se observa que para la Serie_1 ambos pavimentos comienzas a ser efectivos al usar el 40% del área de pavimentos.

Con la Serie_2 ambos pavimentos logran eliminar las inundaciones cundo son implementados en un 60% del área total de pavimentos.

En este punto la utilización de cualquiera los pavimentos permeables expuestos instalado sobre un 80% del área total disponibles para estos, logran evitar las inundaciones con la Serie_3.

En este punto se puede concluir de alguna forma que cuando la escorrentía superficial es menor o igual a 41,09 mm, deja de generarse inundaciones.

Escorrentía Punto_1 con PP_2 Y CV_04

Para la comparación de pavimentos permeables y cubiertas verdes se ocuparán las tablas 4-25 y 4-29. Se observa que las cubiertas verdes reducen menos la escorrentía superficial. En la Serie_1 podemos observar que las cubiertas verdes evitan la inundación con un área equivalente al 80% del área de pavimentos, siendo que el PP_2 con un 40% ya evita las inundaciones. Además, cabe mencionar que la escorrentía superficial generada al instalar cubiertas verdes en un área igual al 100% del área de pavimentos es de 54 mm siendo mayor que la escorrentía generada por la instalación de PP_2 en un 40% del área disponible.

Ya con las Serie_2 y la Serie_3 las cubiertas verdes no impiden la generación de inundaciones, al usar un área igual a la de los pavimentos.

Capítulo V: Conclusiones y Propuestas Futuras

5.1 Conclusiones

Abordar una problemática específica y de gran importancia como lo son las inundaciones causadas por las lluvias, genera en el escritor una meta de descubrir cómo combatir y erradicar de manera definitiva dicho problema.

En esta memoria no se cumplieron las hipótesis planteadas en el capítulo 1, las cuales abordaban la eliminación total de inundaciones debido a la implementación de pavimentos permeables, y para ser más ambicioso también se planteó que ayudarían a reducir en un 10% el diámetro de los drenes de evacuación de aguas lluvias en construcciones futuras.

Según los datos obtenidos en esta memoria, se puede concluir que la efectividad de pavimentos permeables depende de muchos parámetros entre un punto y otro. Por ejemplo, al comparar el trabajo de reducción de escorrentías en ambos puntos con las mismas lluvias y los mismos pavimentos, se podría plantear que no solo varía según el área que tengo de pavimentos permeables, sino que va en una proporción entre las subcuencas que pueden ser para pavimentos permeables y las que no.

Otro punto comparativo a considerar es el grosor de pavimentos permeables, es verdad que, a mayor grosor, mayor es la cantidad de agua que almacena, pero hay que tener en cuenta la realidad constructiva, es inaudito construir un pavimento de 40 cm de espesor, tanto en el ámbito estético, de ejecución y de costos.

En la comparación entre pavimentos permeables y cubiertas verdes, si se ve un mejor comportamiento por metro cuadrado de los pavimentos permeables, pero si solo consideramos el punto 1, el área disponible para pavimentos permeables es solo el 25% del área total de subcuencas, es decir que solo se analizó un tercio del área que podía ser ocupada por las cubiertas verdes, por lo cual nos quedó un 50% del área total de subcuencas, que pudo ser ocupado por cubiertas verdes, para saber la eficiencia verdadera entre cubiertas verdes y pavimentos permeables se debe incorporar un nuevo parámetro, que sería el costo.

5.2 Propuestas futuras

Como un estudio complementario a esta memoria, sería interesante el agregar la fabricación de un pavimento permeable, ensayado en laboratorio y luego introducir dichos datos a SWMM, agregando el criterio de resistencia mínima que deben tener los pavimentos en Chile.

Como manera comparativa con cubiertas verdes, hacer un análisis desde el punto de vista de costos, generando un criterio más acertado a los porcentajes de área que ocupar. De igual manera se podrían agregar otros SUDS disponible y agregar más áreas que no fueron consideradas en esta memoria, como la ubicación de franjas filtrantes.

Como último estudio propuesto, sería agregar predicciones de lluvias para un futuro más lejano, para probar hasta qué punto nos sirven los SUDS, tomando en cuenta los cambios climáticos que sufre el planeta, que crea eventos climáticos fuera de lo normal.

Bibliografía

- MIMVU. (1996). *Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos*. Guía de diseño. Chile
- Cifuentes, Luis y Meza, Francisco. (2008). *Cambio climático: consecuencias y desafíos para Chile*. Centro Interdisciplinario de Cambio Global. Santiago. Chile.
- Trapote, Arturo y Fernández, Héctor. (2016). *Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible. Memoria de Pregrado* Instituto del Agua y de las Ciencias Ambientales. España.
- Departamento técnico de Naturalea. (2017). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*. Artículo. España
- Perales, Sara y Andrés-Doménech, Ignacio. (2008). *Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: Una alternativa a la gestión del agua lluvia*. Artículo. España.
- Barahona, A. J. (2014). *Análisis y diseño para solución de aguas lluvias mediante sistemas urbanos de drenaje sostenible aplicando la técnica de firmes permeables en condominio Ercilla, comuna de Temuco X región de la Araucanía*. 136.
- Bateman, A. (2007). Hidrología básica y aplicada. *UPTC: Grupo de Investigación En Transporte de Sedimentos (GITS)–2007*.
- Fresno, D. C., Bayón, J. R., Hernández, J. R., & Muñoz, F. B. (2005). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). *Interciencia*, 30(5).
- García Haba, E. (2011a). *Control De Escorrentías Urbanas Mediante Pavimentos Permeables: Aplicación En Climas Mediterráneos*. 1, 218. https://doc-00-bg-apps-viewer.googleusercontent.com/viewer/secure/pdf/jh4v4pvalqc27df2d0e8sj9aoqp33p5g/sp703hs41tvsb6nstl14une9t81tg55v/1464515625000/lantern/16486836545879537562/ACFrOgBghipTx6DCH34jNhi_oxumf_QWhnx_8Z9fMTiHyADm3bdhpYKsnaqQTa7-xpDPSo_FYvHI
- García Haba, E. (2011b). *CONTROL DE ESCORRENTÍAS URBANAS MEDIANTE PAVIMENTOS PERMEABLES: APLICACIÓN EN CLIMAS MEDITERRÁNEOS Intensificación: Autor: Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio*. 218. http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15383/TFM_EGH.pdf?sequence=1
- González Fernández, J., & Rodríguez Hernández, J. (2016). *Grado en Ingeniería Civil ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE FIRMES PERMEABLES*. 1–103.
- Istúriz, D. (2020). *Tres consecuencias del cambio climático que ya se sienten en Chile*. <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/tres-consecuencias-del-cambio-climatico-ya-se->

sienten-chile/375289/

- Legret, M. (2001). *Pollution et impact d'eaux de ruissellement de chaussées* (LCPC (ed.); Etude et R). Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- López, C. (2017). *LAS CUBIERTAS VERDES COMO ELEMENTO CLAVE EN EL*.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2016). Tomo II: Pavimentos y Circulaciones, mobiliario urbano. In *Manual de elementos urbanos sustentables*.
- MINVU. (2018). *Código de normas y especificaciones técnicas para obras de pavimentación*.
- Rodríguez Hernández, J. (2008). *Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la ...*
- RODRIGUEZ, J., RODRÍGUEZ, J., CASTRO, D., & CALZADA, M. (2006). *CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS PERMEABLES PARA EL CONTROL EN ORIGEN DE LA ESCORRENTÍA URBANA : EJEMPLO PRÁCTICO DEL problemas los cortes de agua o las inundaciones . Del mismo modo la calidad es fundamental humano . El servicio por su parte incluye todo aquel. May 2014.*
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Woods Ballard, B., Construction Industry Research and Information Association, Great Britain, Department of Trade and Industry, & Environment Agency. (2007). The SUDS manual. In *Ciria,*
<http://www.persona.uk.com/A47postwick/deposit-docs/DD-181.pdf>

Anexo 1: Datos de nudos red de evacuación punto 2.

Nudos	Cota de fondo (m)	Profundidad Máxima (m)	Nivel Inicial (m)	Área de Inundación (m ²)
COL_1	202.94	2	0	1.33
COL_2	203.61	2	0	1.33
COL_3	204.26	2	0	1.33

Anexo 2: Datos conductor punto 2.

Cond.	Forma	∅ (mm)	Long. (m)	Mat.	Rug.	i (‰)	Cota Ent. (m)	Cota Sal. (m)	Δh Entrada	Δh Salida	Q Inicial (l/s)	Q Máx. (l/s)
TUB_1	Circular	200	112.8	Mortero de cemento comprimido	0.014	2.5	204.24	204.83	0.63	0.57	0	22
TUB_2	Circular	200	65	Mortero de cemento comprimido	0.014	2.7	203.93	204.27	0.31	0.66	0	22
TUB_3	Circular	200	109.5	Mortero de cemento comprimido	0.014	3.5	203.64	207.03	0.7	0.42	0	18
TUB_4	Circular	200	64	Mortero de cemento comprimido	0.014	3.5	203.42	203.64	0.33	0.7	0	18

Anexo 3: Datos de vertido punto 2.

Puntos de Vertido	Cota fondo (m)	Compuerta	Tipo
DESC_1	203.62	NO	Normal
DESC_2	203.09	NO	Normal

Anexo 4: Resumen simulaciones a diferentes % PP_1, Serie_2, Punto_1

Serie_2			
PP_1	Perdidas por infiltración (mm)	Escorrentía superficial (mm)	Almacenamiento total (mm)
0%	3.26	86.34	0.00
20%	15.45	74.15	0.00
40%	27.67	61.94	0.00
60%	39.91	49.70	0.00

80%	52.18	37.43	0.00
100%	64.49	25.11	0.00

Anexo 5: Resumen simulaciones a diferentes % PP_1, Serie_3, Punto_1.

Serie_3			
PP_1	Perdidas por infiltracion (mm)	Escorrentia superficial(mm)	Almacenamiento total (mm)
0%	3.31	96.71	0.00
20%	15.82	84.20	0.00
40%	28.36	71.66	0.00
60%	40.93	59.10	0.00
80%	53.52	46.50	0.00
100%	66.15	33.86	0.00

Anexo 6: Resumen simulaciones a diferentes % PP_2, Serie_1, Punto_1

Serie_1			
PP_2	Perdidas por infiltracion (mm)	Escorrentia superficial(mm)	Almacenamiento total (mm)
0%	3.16	69.21	0.00
20%	14.96	57.41	0.00
40%	26.78	45.59	0.00
60%	38.63	33.75	0.00
80%	50.50	21.88	0.00
100%	62.41	9.96	0.00

Anexo 7: Resumen simulaciones a diferentes % PP_2, Serie_2, Punto_1

Serie_2			
PP_2	Perdidas por infiltracion (mm)	Escorrentia superficial(mm)	Almacenamiento total (mm)
0%	3.26	86.34	0.00
20%	15.85	73.75	0.00
40%	28.47	61.14	0.00
60%	41.11	48.50	0.00
80%	53.78	35.83	0.00
100%	66.49	23.12	0.00

Anexo 8: Resumen simulaciones a diferentes % PP_2, Serie_3, Punto_1

Serie_3			
PP_2	Perdidas por infiltracion (mm)	Escorrentia superficial(mm)	Almacenamiento total (mm)
0%	3.31	96.71	0.00
20%	16.22	83.80	0.00
40%	29.16	70.86	0.00
60%	42.13	57.90	0.00
80%	55.12	44.91	0.00
100%	68.15	31.86	0.00

Anexo 9: Resumen simulaciones a diferentes % PP_1, Serie_2, Punto_2

Serie_2			
PP_1	Perdidas por infiltracion (mm)	Escorrentia superficial(mm)	Almacenamiento total (mm)
0%	6.02	84.25	0.04
20%	20.80	69.43	0.04
40%	35.66	54.53	0.03
60%	50.61	39.53	0.03
80%	65.67	24.40	0.03
100%	80.91	9.07	0.02

Anexo 10: Resumen simulaciones a diferentes % PP_1, Serie_3, Punto_2

Serie_3			
PP_1	Perdidas por infiltracion (mm)	Escorrentia superficial(mm)	Almacenamiento total (mm)
0%	3.31	96.71	0.00
20%	15.82	84.20	0.00
40%	28.36	71.66	0.00
60%	40.93	59.10	0.00
80%	53.52	46.50	0.00
100%	66.15	33.86	0.00

Anexo 11: Resumen simulaciones a diferentes % PP_2, Serie_1, Punto_2

Serie_1			
PP_2	Perdidas por infiltracion (mm)	Escorrentia superficial(mm)	Almacenamiento total (mm)
0%	3.16	69.21	0.00

20%	14.96	57.41	0.00
40%	26.78	45.59	0.00
60%	38.63	33.75	0.00
80%	50.50	21.88	0.00
100%	62.41	9.96	0.00

Anexo 12: Resumen simulaciones a diferentes % PP_2, Serie_2, Punto_2

Serie_2			
PP_2	Perdidas por infiltracion (mm)	Escorrentia superficial(mm)	Almacenamiento total (mm)
0%	3.26	86.34	0.00
20%	15.85	73.75	0.00
40%	28.47	61.14	0.00
60%	41.11	48.50	0.00
80%	53.78	35.83	0.00
100%	66.49	23.12	0.00

Anexo 13: Resumen simulaciones a diferentes % PP_2, Serie_3, Punto_2

Serie_3			
PP_2	Perdidas por infiltracion (mm)	Escorrentia superficial(mm)	Almacenamiento total (mm)
0%	3.31	96.71	0.00
20%	16.22	83.80	0.00
40%	29.16	70.86	0.00
60%	42.13	57.90	0.00
80%	55.12	44.91	0.00
100%	68.15	31.86	0.00

Anexo 14: Resumen simulaciones a diferentes % CV_04, Serie_2, Punto_1

Serie_2					
CV_04	Perdidas por infiltración (mm)	Escorrentía superficial(mm)	Almacenamiento total (mm)	Almacenamiento Inicial CV (mm)	Disminución total (mm)
0%	3.26	86.34	0.00	0.00	3.26
20%	4.09	81.74	4.78	0.99	7.88
40%	3.88	78.16	9.54	1.97	11.45
60%	3.68	74.59	14.31	2.96	15.02
80%	3.47	71.01	19.07	3.95	18.60

100%	3.27	67.43	23.84	4.94	22.17
------	------	-------	-------	------	-------

Anexo 15: Resumen simulaciones a diferentes % CV_04, Serie_3, Punto_1

Serie_3					
CV_04	Perdidas por infiltracion (mm)	Escorrentia superficial(mm)	Almacenamiento total (mm)	Almacenamiento Inicial CV (mm)	Disminución total (mm)
0%	3.31	96.71	0.00	0.00	3.31
20%	4.20	91.60	5.21	0.99	8.43
40%	3.99	87.60	10.42	1.97	12.43
60%	3.78	83.59	15.62	2.96	16.44
80%	3.56	79.58	20.83	3.95	20.44
100%	3.35	75.57	26.03	4.94	24.45