



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

# **INCORPORACIÓN DE PROYECCIONES CLIMÁTICAS EN EL MEJORAMIENTO DE LA RED DE DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS DE LA COMUNA DE MAIPÚ, SANTIAGO, CHILE**

*MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL*

**MARÍA PAZ BOBADILLA PONCE**

**PROFESORA GUÍA**

XIMENA VARGAS MESA

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**

GERARDO AHUMADA THEODULOZ

CARLOS STAPPUNG RUFF

SANTIAGO DE CHILE

MARZO 2015

## RESUMEN

La comuna de Maipú, Región Metropolitana, ha experimentado un explosivo crecimiento demográfico que ha causado deficiencias en el drenaje urbano actual, requiriendo un mejoramiento del manejo de las aguas lluvias. El trabajo de título realizado consiste en determinar opciones de mejoramiento de la red de drenaje pluvial de esta comuna, considerando en el diseño el análisis de datos históricos en conjunto con proyecciones de precipitación.

El objetivo general es diseñar el mejoramiento la red de drenaje de aguas lluvias de Maipú considerando proyecciones climáticas. Para ello se analizó el sistema de drenaje pluvial existente a fin de reconocer deficiencias, y se definieron proyecciones de precipitación, que luego de ser escaladas al área de estudio mediante registros de estaciones meteorológicas cercanas, permitieron seleccionar la precipitación de diseño. Luego, mediante un modelo matemático (Storm Water Management Model, SWMM) capaz de reproducir los fenómenos de escorrentía urbana basado en simulación de precipitaciones, se explica el comportamiento del sistema de drenaje en el estado actual, etapa calibración, y en las condiciones futuras permitiendo la propuesta de nuevas opciones de conducción o dispositivos de almacenamiento local que den solución a problemas de inundación detectados.

Se obtuvo como resultado mejoras al sistema de drenaje de aguas lluvias de Maipú, específicamente la implementación de un estanque de retención en el sector del Pajonal, que permite reducir el caudal peak de escorrentía urbana en un 40%, además la necesidad de conducir en forma independiente agua servida y agua lluvia en las cercanías del colector 5 de Abril para evitar inundaciones., así como también la importancia del mantenimiento de los canales abiertos incorporados en el drenaje urbano para conducir adecuadamente la escorrentía urbana producto de las precipitaciones proyectadas.

## AGRADECMIENTOS

Quiero agradecer en primera instancia a mi familia. A mis padres por el apoyo incondicional, por todos los sacrificios y por el amor entregado día tras día, porque mis logros son sus logros y soy lo que soy gracias a ustedes. A mis hermanos, Carlos y Sofía, por el cariño y la alegría de la que siempre me llenan. A mi mami y tata porque son como mis segundos padres y los quiero infinitamente, gracias por los regaloneos que revitalizaron alma y cuerpo en los momentos más necesarios.

También gracias a ti Felipe, nos encontramos a medio camino para endulzar el último tramo de esta carrera, justo cuando necesitábamos uno del otro para seguir adelante. No hubiera sido lo mismo sin ti. A mis amigas y amigos, que hicieron de este tiempo en la Universidad lo mejor que puso ser.

A todos los académicos y funcionarios que aportaron en mi formación como ingeniera, gracias por la disposición y la entrega, mención especial a Jacqui por alegrar los días en el tercero, la buena onda, las conversaciones y por supuesto el cariño.

Gracias a los integrantes de la comisión por su tiempo y consejos para llevar a puerto este trabajo. Finalmente gracias a la Profesora Ximena, porque estos últimos años ha sido efectivamente una guía para mí, como profesora y como persona, gracias por el apoyo que siempre me hizo sentir, por los desafíos y oportunidades, la confianza y el afecto.

# TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: Introducción .....	9
1.1. Motivación.....	9
1.2. Objetivos .....	10
Objetivo General .....	10
Objetivos Específicos .....	10
1.3. Estructura de Informe .....	10
CAPÍTULO 2: Revisión Bibliográfica .....	12
2.1. Antecedentes.....	12
2.2. Modelo Climático y Escenarios de Proyecciones Climáticas. ....	13
Modelo Climático.....	13
Escenarios de proyección climática .....	14
Proceso de Escalamiento .....	15
2.3. Determinación de precipitaciones de diseño .....	17
2.4. Red de drenaje de Aguas lluvias de Maipú .....	18
2.5. Modelo de Simulación .....	19
2.6. Características SWMM .....	20
CAPÍTULO 3: Caracterización de la Zona en Estudio. ....	22
3.1. Ubicación y antecedentes de la región en estudio .....	22
3.2. Usos de Suelo .....	23
3.3. Recursos Hídricos y Red de Canales .....	23
3.4. Información Meteorológica Disponible .....	24
CAPÍTULO 4: Proyecciones Climáticas de Precipitación .....	27
4.1. Procesamiento de Datos.....	27
Escalamiento de datos .....	28

Verificación del proceso de escalamiento .....	32
Análisis de frecuencia de precipitaciones.....	32
4.2. Análisis de Frecuencia .....	36
4.3. Determinación de Tormenta de Diseño .....	39
CAPÍTULO 5: Modelación SWMM .....	43
5.1. Infraestructura existente.....	44
5.2. Parámetros de Diseño .....	48
Características cuencas.....	48
Incorporación de aguas servidas .....	48
Infiltración .....	49
5.3. Validación con casos reales.....	50
5.4. Resultados de modelación SWMM Situación actual.....	51
Colector Rinconada.....	52
Colector El pajonal.....	54
Canal Santa Marta.....	55
5.5. Soluciones Planteadas y modelación SWMM.....	57
Colector 5 Abril .....	57
Colector El Pajonal .....	58
Canal Santa Marta.....	60
CAPÍTULO 6: Comentarios y Conclusiones.....	62
CAPÍTULO 7: Bibliografía .....	64
ANEXOS .....	67

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Esquema de escalamiento y la relación entre GCM y resoluciones menores .....	15
Figura 3-1 Límites jurisdiccionales de la comuna de Maipú (Ilustre Municipalidad de Maipú, Secretaría comunal de planificación, 2013) .....	22
Figura 3-2 Ubicación Estaciones Meteorológicas .....	25
Figura 3-3 Precipitación Anual de las estaciones meteorológicas utilizadas.....	26
Figura 4-1 Ubicación de Puntos de la grilla del modelo Mk3.6 y estaciones meteorológicas de interés. ....	28
Figura 4-2 Esquema de información disponible.....	29
Figura 4-3 Ejemplo determinación función de transferencia a nivel mensual. ....	33
Figura 4-4 Comparación número días con precipitación entre estaciones meteorológicas y modelo CSIRO MK3.6. Período Histórico 1970-2005 .....	34
Figura 4-5 Precipitación histórica y futura (2045-2065) para escenario A2 y B1. Fuente: Cortés (2012) .....	35
Figura 4-6 Resumen de cantidad de eventos de precipitación según intensidad para escenarios RCP2.6 y RCP8.5 .....	36
Figura 4-7 Variabilidad resultados Análisis de Frecuencia de precipitaciones máximas en 24 horas en Estación Quinta Normal para registro histórico, RCP2.6 y RCP8.5 .....	38
Figura 4-8 Variabilidad resultados Análisis de Frecuencia de precipitaciones máximas en 24 horas en Estación Terrazas DGA Para registro histórico, RCP2.6 y RCP8.5 .....	39
Figura 4-9 Distribución de precipitación de Varas. ....	40
Figura 4-10 Distribución de tormentas según grupos de Varas. ....	40
Figura 4-11 Tormentas de Diseño según distribución de Varas para diferentes probabilidades de ocurrencia. ....	42
Figura 5-1 Sistema colectores Rinconada .....	45
Figura 5-2 Sistema Colector El Pajonal .....	46
Figura 5-3 Sistema Canal Santa Marta .....	47
Figura 5-4 Perfil de variación horario.....	49
Figura 5-5 Tormentas Reales registradas en estación Rio Mapocho en Rinconada de Maipú ....	50
Figura 5-6 Zonas de Inundación Colector El Pajonal .....	51
Figura 5-7 Zonas de Inundación Colector 5 Abril - Rinconada .....	52

Figura 5-8 Modificaciones al Colector 5 Abril .....	53
Figura 5-9 Colapso Colector El Pajonal.....	55
Figura 5-10 Perfil del colector 5 de Abril en instante de mayor solicitud. T=2años .....	57
Figura 5-11 Hidrograma entrada y salida del colector El Pajonal, Situación Actual. T=2 años...	59
Figura 5-12 Hidrograma entrada y salida del colector El Pajonal, implementando el estanque de retención. T=2 años.....	59
Figura 5-13 Hidrograma entrada y salida del colector El Pajonal, implementando el estanque de retención. T=10 años.....	60
Figura 5-14 Perfil del Canal Santa Marta en instante de mayor solicitud. T=10años.....	61

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Trayectorias representativas de concentración .....	15
Tabla 3-1 Usos de Suelo del Área Urbana de la comuna de Maipú .....	23
Tabla 3-2 Descripción estaciones meteorológicas.....	24
Tabla 3-3 Número de días con precipitación según rango de intensidad.....	26
Tabla 4-1 Funciones de Transferencia Estación Quinta Normal.....	30
Tabla 4-2 Funciones de Transferencia Estación Terraza Oficinas DGA.....	30
Tabla 4-3 Funciones de Transferencia Estación Fundo Marruecos.....	31
Tabla 4-4 Correlación entre precipitación modelada y escalada en periodo histórico y registro de precipitaciones en estaciones meteorológicas .....	31
Tabla 4-5 Variación porcentual de días con precipitaciones diarias modeladas respecto del registro de estaciones en periodo histórico .....	33
Tabla 4-6 Análisis de Frecuencia de Registro histórico de precipitaciones. Período 1970-2005 .	37
Tabla 4-7 Análisis de Frecuencia de Resultados Modelo CSIRO Mk3.6 para. Período 1970-2005 .....	37
Tabla 4-8 Análisis de Frecuencia de Resultados Modelo CSIRO Mk3.6 para Estación Quinta Normal. Período 2014-2055 .....	37
Tabla 4-9 Análisis de Frecuencia de Resultados Modelo CSIRO Mk3.6 para Estación Terrazas DGA. Período 2014-2055 .....	38
Tabla 4-10 Precipitaciones diarias (mm) adoptadas para lluvia de diseño .....	41
Tabla 5-1 Puntos Críticos Red de Drenaje Aguas lluvias Maipú .....	43
Tabla 5-2 Coeficientes de Manning .....	48
Tabla 5-3 Resumen de Inundación en Nudos Colector 5 de Abril .....	54
Tabla 5-4 Resumen de Inundación en Nudos Colector El Pajonal.....	54
Tabla 5-5 Escorrentía en Subcuencas, modelación SWMM-Situación Actual. Canal Santa Marta .....	56
Tabla 5-6 Niveles en nudos, modelación SWMM-Situación Actual. Canal Santa Marta .....	56

# CAPÍTULO 1: **Introducción**

## 1.1. **Motivación**

Toda obra hidráulica que interactúe con el recurso hídrico en su estado natural requiere de un análisis hidrológico a fin de determinar la capacidad y seguridad de las estructuras hidráulicas. Con frecuencia, es necesario partir de un conjunto de hechos observados y registros históricos y, mediante análisis empíricos o conceptuales, definir las magnitudes y frecuencias de volúmenes de escurrimiento y caudales. No obstante, producto del cambio climático, las observaciones históricas de variables meteorológicas pueden no ser representativas de su comportamiento en el futuro, afectando el diseño de una obra hidráulica y, en consecuencia, el funcionamiento esperado de ésta. En este trabajo se propone la incorporación de proyecciones climáticas en el mejoramiento de una red de drenaje de aguas lluvias, estimando la precipitación mediante modelos climáticos en escenarios RCP (**R**adiative **C**oncentration **P**athways). De esta forma se diseña para las condiciones esperadas de operación, y no solo en base a un análisis retrospectivo.

La necesidad de mejoramiento de la red de drenaje de Maipú reside en la rápida urbanización que la comuna experimentó en las últimas décadas. Hace cincuenta años Maipú era un pequeño poblado de vocación agrícola en la periferia poniente de la provincia de Santiago; hoy ha pasado a ser el segundo conglomerado más poblado del país. El desarrollo de infraestructura y servicios básicos no fue acorde al explosivo crecimiento demográfico, con tasas de crecimiento anual que llegaron a superar el 8% en la década del 80. Esto provocó deficiencias en la conectividad vial, sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvias, parques urbanos, equipamiento de salud, educación y deportes.

Este trabajo de título busca entregar una solución a las insuficiencias que presenta el drenaje urbano de la Comuna de Maipú, planteando modificaciones a la red de aguas lluvias existente, que serán evaluadas a través del modelo SWMM<sup>1</sup>, innovando en la incorporación de proyecciones de precipitación.

---

<sup>1</sup> SWMM: *Storm Water Management Model*

## 1.2. **Objetivos**

### OBJETIVO GENERAL

- Proponer modificaciones a la red de drenaje de aguas lluvias de Maipú considerando proyecciones climáticas.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el sistema de drenaje de aguas lluvias existente en la comuna de Maipú para reconocer deficiencias.
- Definir proyecciones de precipitación para seleccionar la precipitación de diseño.
- Explicar, a través del modelo SWMM, el comportamiento del sistema de drenaje urbano actual para proponer mejoras.
- Evaluar las propuestas de mejoramiento usando el modelo SWMM.

## 1.3. **Estructura de Informe**

El presente documento está organizado según se detalla a continuación:

En el Capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica, en donde se revisan referencias de cambio climático y modelos de circulación global, además de métodos de procesamiento de información. También se revisa la bibliografía respecto de la red de evacuación y drenaje de aguas lluvias de Maipú, así como características del modelo a implementar para el estudio de ésta.

En el Capítulo 3 se describe la zona en estudio, sus principales características y la información disponible para el estudio.

En el Capítulo 4 se presenta los resultados de la generación de proyecciones climáticas, un

análisis de éstas, y finaliza con la determinación de la precipitación de diseño.

El capítulo 5 comprende la modelación de las zonas de interés de la red de drenaje de aguas lluvias de Maipú mediante el software SWMM, inicialmente en su estado actual y luego en el estado modificado según las mejoras planteadas en cada caso.

Por último, el Capítulo 6 contiene comentarios y conclusiones respecto de los resultados del presente trabajo.

## CAPÍTULO 2: **Revisión Bibliográfica**

### 2.1. **Antecedentes**

Las ciudades están tornándose cada vez más vulnerables a las inundaciones debido a la rápida urbanización y la instalación de una infraestructura compleja. Durante más de un siglo los sistemas de alcantarillado se han construido a gran escala en las ciudades de todo el mundo. Estos sistemas de alcantarillado han reducido la vulnerabilidad de las ciudades en general, pero al mismo tiempo podría hacerlas más vulnerables a las lluvias extremas, en parte debido a la falta de consideración de lo que ocurre cuando se exceden los criterios de diseño. Junto a este aumento de la vulnerabilidad, existen fuertes indicios de que, debido al calentamiento global, las probabilidades y los riesgos de sobrecarga de alcantarillado e inundaciones están cambiando (P. Willems, 2012).

El Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007) informa de hecho para el final del siglo XX un aumento mundial en la frecuencia de las tormentas de lluvia extrema como resultado del calentamiento global. Sobre la base de simulaciones de modelos climáticos con diferentes escenarios futuros de emisiones de gases de efecto invernadero, el IPCC (2007), llegó también a la conclusión de que es muy probable (definida como más del 90% de probabilidad) de que esta tendencia continuará en el siglo XXI. Por lo tanto, los gestores del agua debieran comenzar a contabilizar estos efectos.

En este contexto, la comuna de Maipú, Región Metropolitana, es un buen ejemplo de este conflicto. Maipú ha experimentado un explosivo crecimiento demográfico que ha causado deficiencias en el drenaje urbano actual, el cual interactúa, casi en su totalidad, con el sistema de alcantarillado, requiriendo un mejoramiento del manejo de las aguas lluvias. No obstante es importante comenzar a considerar las implicancias del cambio climático en la caracterización de las precipitaciones e incorporarlas en el diseño hidráulico de obras, y no sólo hacer un análisis de datos históricos.

## 2.2. Modelo Climático y Escenarios de Proyecciones Climáticas.

### MODELO CLIMÁTICO

Para determinar proyecciones cuantitativas del cambio climático futuro, es necesario utilizar modelos climáticos que simulen todos los procesos importantes que rigen la evolución futura del clima. Los modelos climáticos se han perfeccionado en los últimos decenios gracias al desarrollo de las computadoras. Durante ese periodo se crearon modelos separados de cada uno de los componentes principales, la atmósfera, la superficie terrestre, los océanos y el hielo marino, que luego se fueron integrando gradualmente. El objetivo final es incluir en el modelo la mayor parte posible del sistema climático de la Tierra, para que todos los componentes puedan interactuar y, de esa manera, las predicciones del cambio climático puedan siempre tener en cuenta el efecto de las retroalimentaciones entre los distintos componentes. Es importante considerar que el sistema climático es tan complejo y posee tantos grados de libertad y condiciones de borde, que el modelo atmosférico más sofisticado será siempre una aproximación simplificada de la realidad. El arte de la construcción de modelos meteorológicos consiste precisamente en alcanzar un equilibrio entre complejidad, exactitud y utilidad (Ross, 1991).

Para efecto de este trabajo se utiliza el modelo de circulación global CSIRO Mk3.6, que corresponde a un modelo acoplado oceánico-atmosférico desarrollado en conjunto por dos instituciones australianas: el Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation – CSIRO – y el instituto Queensland Climate Change Centre of Excellence – QCCCE – en el marco del proyecto de comparación entre modelos acoplados, fase 5 – CMIP5. Este modelo presenta una resolución horizontal de aproximadamente  $1,9^\circ \times 1,9^\circ$  y cada punto atmosférico está relacionado con dos puntos oceánicos, con el fin de mejorar las interacciones interanuales entre ambas componentes.

Representa una actualización de la versión anterior del modelo CSIRO-MK3.5 desarrollado por los mismos institutos (Gordon et al, 2010). Sin embargo, presenta una mejora considerable con respecto a su antecesor al incorporar dentro de sus planteamientos la inclusión de una dinámica interactiva de los aerosoles a nivel atmosférico, para modelar de mejor manera las forzantes radiativas atmosféricas.

El acceso a los datos de este modelo es de libre disposición con fines de investigación el cual ha sido usado en otros estudios en Chile, donde se ha validado que simula correctamente la estacionalidad de las precipitaciones (Gómez et al, 2013). Por ello el modelo CSIRO-MK3.6 cumple con todas las exigencias para considerarse válido como fuente de información para estudios de proyección, por lo que se selecciona para ser aplicado en este trabajo. La extensión a futuro de las proyecciones de precipitación a generar para este análisis dependerá de la extensión de la serie de datos históricos.

## ESCENARIOS DE PROYECCIÓN CLIMÁTICA

El panel intergubernamental de expertos, el marco de preparación del quinto reporte resumen de cambio climático, han elaborado un conjunto de nuevos escenarios enfocados en los efectos prácticos del cambio climático por sobre forzantes como el crecimiento demográfico, el desarrollo socio-económico y el cambio tecnológico usados anteriormente. Estos nuevos escenarios proponen como factor predominante el incremento de radiación solar que permanece dentro de la atmósfera, considerando que estos valores pueden ser alcanzados por medio de múltiples condiciones de desarrollo.

Estos escenarios son conocidos como como Trayectorias Representativas de Concentración (RCP por su sigla en inglés) y son caracterizados como vías o trayectorias, porque permiten obtener proyecciones de las concentraciones de emisión de gases invernadero siguiendo su trayectoria a través del tiempo. Son representativos, porque concentran escenarios diferentes pero con forzamientos radiativos similares. Existen distintos tipos de escenarios RCP diferenciados por la magnitud de la forzante radiativa. Las particularidades de los diferentes escenarios son explicadas en la Tabla 2.1.

El modelo Mk3.6 basa sus forzantes y directrices de sus proyecciones, en el contexto entregado por el CMIP5 y por tanto, utiliza las definiciones de los escenarios RCP para la definición de las variables atmosféricas en el desarrollo de sus cálculos, de modo que serán estos escenarios los utilizados para la proyección de precipitaciones en este trabajo. Debido a la naturaleza de este estudio, se utilizan los dos escenarios extremos, es decir, RCP 8.5 y RCP 2.6.

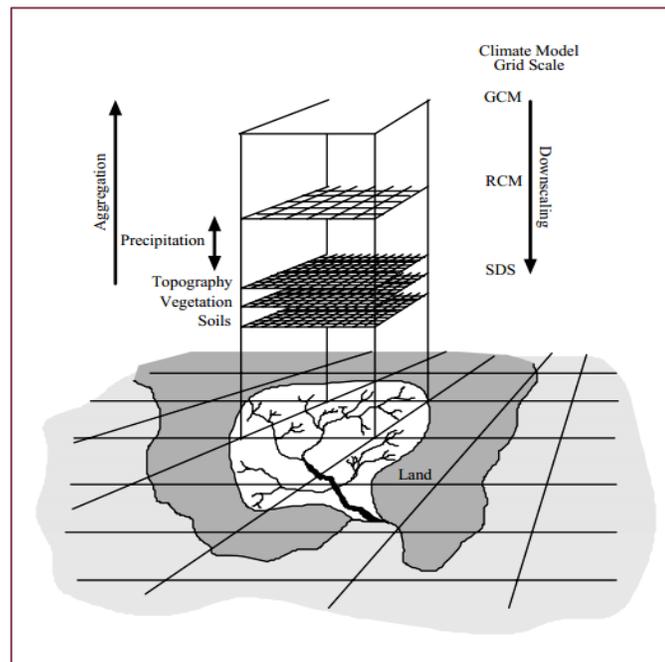
**Tabla 2-1 Trayectorias representativas de concentración**

Fuente: Gómez et al., 2013

Nombre	Radiación Forzante ( $Wm^{-2}$ )	Concentración atmosférica [ppm]	Comportamiento
RCP 8.5	> 8.5 en el año 2100	> 1370 $CO_2$ -equiv. en 2100	En aumento
RCP 6.0	~6 una vez estabilizado después del año 2100	~850 $CO_2$ -equiv. (estabilización posterior al año 2100)	Estabilización sin aumentos radicales
RCP 4.5	~4.5 una vez estabilizado después del año 2100	~650 $CO_2$ -equiv. (stabilization after 2100)	Estabilización sin aumentos radicales
RCP 2.6	Radiación máxima de ~3 antes del año 2100 con descenso posterior.	Concentración máxima de ~490 $CO_2$ -equiv. antes del año 2100, con descenso posterior	Valor máximo a mediados de siglo y posterior descenso.

## PROCESO DE ESCALAMIENTO

Se han desarrollado diversos métodos de refinar la información entregada por los GCM, dentro de los cuales existen distintas categorías. Un esquema de las distintas escalas asociadas al problema de derivar variables a una escala menor se muestra en la Figura 2-1.



**Figura 2-1 Esquema de escalamiento y la relación entre GCM y resoluciones menores**

Fuente: Wilby et al., 2002

Para utilizar de forma confiable un GCM en una zona específica se requiere un escalamiento estadístico de los resultados del modelo, procedimiento que conlleva un escalamiento espacial y otro temporal.

### **Escalamiento Espacial**

La escala espacial de los GCM puede variar de 1.87° a 3.71° Latitud-Longitud por lo que es necesario adaptar los modelos desde la resolución espacial de estos hasta la zona de estudio. Este escalamiento pondera los puntos donde se tiene información en cada modelo con respecto a la ubicación específica donde se necesita la información a través de algún factor que sea influyente sobre la representatividad de los valores.

Un factor ponderador aplicable dada la información disponible, y que se ha usado anteriormente (Gómez, 2013), corresponde a la distancia entre punto de interés y el punto con información, usaba bajo diversas metodologías, entre ellas la asignación de información más cercana, es decir, se asume que la información del punto en la malla más cercano al lugar de interés pudiese representarlo de manera adecuada.

- a. Método del inverso de la distancia: este método pondera respecto del inverso de la distancia de los puntos que forman la grilla que rodea al lugar de interés, a través de la ecuación (2-1)

$$X = \frac{\sum \frac{X_i}{d_i}}{\sum \frac{1}{d_i}} \quad (2-1)$$

Donde

$X$  : Variable meteorológica en el punto de interés

$d_i$  : Distancia entre punto de interés y nodo  $i$  de la grilla del modelo climático

$X_i$  : Variable meteorológica en el nodo  $i$  de la grilla del modelo climático

- b. Método del cuadrado inverso de la distancia: similar a la metodología anterior, pero en este caso se pondera por el cuadrado de la distancia. Ver ecuación (2-2). Este método reduce la influencia de aquellos puntos lejanos y aumenta la importancia los puntos próximos al lugar de interés.

$$X = \frac{\sum \frac{X_i}{d_i}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} \quad (2-2)$$

Donde

$X$  : Variable meteorológica en el punto de interés

$d_i$  : Distancia entre punto de interés y nodo  $i$  de la grilla del modelo climático

$X_i$  : Variable meteorológica en el nodo  $i$  de la grilla del modelo climático

### **Escalamiento Temporal**

Una vez desagregado espacialmente el GCM a la escala de la estación en el periodo de observación, la serie meteorológica se ajusta a las observaciones locales mediante correlaciones estadísticas buscando hacer coincidir por probabilidad de excedencia en una recta de pendiente uno entre ambas series. Es decir se obtiene una función de transferencia a partir de una serie histórica real y la serie histórica entregada por el modelo, función de transferencia que será utilizada en los datos futuros del modelo, ajustando así los valores entregados.

### **2.3. Determinación de precipitaciones de diseño**

Las proyecciones de precipitación resultantes de un modelo climático corresponden a valores diarios de precipitación, no obstante para el diseño de redes de drenaje de aguas lluvias se requiere de un hietograma de diseño, es decir la distribución temporal de la tormenta. Para ello será necesario implementar metodologías que permitan desagregar precipitaciones diarias a intervalos de duración horaria.

Existen varias formas de desarrollar hietogramas de diseño. En determinadas regiones se han determinado hietogramas adimensionales tipo según la proporción de precipitación que ocurra en un determinado cuartil de su duración (Huff, 1967; Varas E., 1986; U.S Department of Agriculture Soil Conservation Service, 1986). Del análisis de eventos de tormentas a partir de datos de lluvias observados (Huff, 1967) desarrolló relaciones de distribución temporal para tormentas fuertes y dio origen a una serie de patrones temporales de precipitación, en que distribuyó las tormentas en cuatro grupos, de acuerdo a la intensidad de ellas. Soil Conservation

Service (SCS, 1986) desarrolló a partir de sus observaciones, una serie de distribuciones temporales sintéticas para ser usadas en sus servicios técnicos con duraciones de tormentas de 6 y 24 horas. Los patrones de distribución de Huff y del SCS provienen del análisis estadístico de datos reales obtenidos en zonas geográficas concretas, por lo tanto siempre queda la duda de cómo se pueden comportar en una zona distinta (Marsalek y Watt, 1984).

En Chile (Varas E. , 1986) estudió la distribución de 296 tormentas registradas en distintas estaciones pluviográficas en Chile. Para cada una de las tormentas se ubicaron los intervalos más lluviosos de 4, 6, 8 y 12 horas de duración, clasificando cada tormenta en cuatro grupos dependiendo si la mayor precipitación se observaba en el primer, segundo, tercer o último cuarto de la duración total del temporal. Los resultados se presentan como curvas de distribución de lluvia acumulada, asociadas a diferentes niveles de probabilidad. Este estudio tiene como resultados curvas de distribución promedio, las cuales son aplicables en diferentes lugares de Chile, para el cálculo de hietogramas representativos que son de gran importancia para el diseño de obras de ingeniería en sitios que no cuentan con suficiente información pluviográfica.

Otra metodología útil corresponde al Método de los bloques Alternados (Alternating block method, Chow et al. 1994), que supone que un conjunto de intensidades obtenidas para episodios de duración conocida, se distribuyen colocando el mayor valor en el centro de la representación y a derecha e izquierda alternativamente el resto de los valores de forma decreciente. También puede desagregarse una precipitación mediante la fórmula de Grunsky que relaciona precipitación e intensidad.

#### **2.4. Red de drenaje de Aguas lluvias de Maipú**

El Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado, SMAPA, es el encargado de administrar los servicios de agua potable y alcantarillado de aguas servidas en las comunas de Maipú, Cerrillos y parte de Estación Central, en la ciudad de Santiago de Chile. No obstante, debido que la red de drenaje de aguas lluvias de la comuna de Maipú se compone de colectores separados y unitarios, es decir, de colectores que transportan sólo aguas lluvias y otros que además conducen aguas servidas, está también a cargo del manejo del drenaje urbano de algunas zonas de la comuna. Esta problemática ha dado origen a este trabajo, que busca mejorar la red de drenaje en algunas de las zonas de conflicto.

El Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de aguas Lluvias del Gran Santiago, realizado por la Dirección de Obras Hidráulicas y la consultora privada CADE-IDEPE en el año 2001, comprende un diagnóstico de los sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvias, la definición de la red primaria y una metodología de evaluación y priorización de soluciones con periodos de retorno definidos en las zonas identificadas como problemáticas.

Maipú se encuentra principalmente en la Zona Centro, según la división territorial propuesta por el Plan Maestro de Santiago, la cual evacúa sus aguas al Zanjón de la Aguada mediante una red de colectores de aguas lluvias. Parte de la comuna también se incluye en la Zona Sur, en la cual existe un sistema de canales receptores denominados Ochagavía, Espejo y Santa Marta, los que evacúan al río Mapocho. El Canal Santa Marta es de importancia para la Comuna de Maipú dado que recibe la descarga de aguas lluvias en el sector de Av. Las Industrias, además de las descargas de varios colectores en la comuna a lo largo del canal hasta su entrega al río Mapocho. La infraestructura de estos canales se detalla en el Estudio de factibilidad y diseño definitivo de la red primaria de aguas lluvias del sistema Gran Avenida-Ochagavía-Espejo-Santa Marta, realizado por la Dirección de Obras Hidráulicas DOH en conjunto con la consultora privada IFARLE Ingenieros Consultores Ltda, en el año 2003.

La red de drenaje de aguas lluvias actual incorpora modificaciones respecto de lo catastrado por el Plan Maestro en 1999 y por IFARLE Ingenieros Consultores Ltda en 2001. Por ello se ha consultado tanto en el Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado, SMAPA, como en el Ministerio de Obras Públicas, específicamente con la Dirección de Obras Hidráulicas DOH, sobre la infraestructura vigente de la red de aguas lluvias en la comuna de Maipú.

## **2.5. Modelo de Simulación**

Para diagnosticar los actuales problemas que representan los sistemas de drenaje de aguas lluvias, así como el diseño de nuevos sistemas de evacuación, se hace necesario el desarrollo de modelos que permitan una adecuada interpretación de la realidad hidrológica e hidráulica del sistema a estudiar.

Se selecciona el software SWMM Storm Water Management Model desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para modelar el comportamiento de la red

de drenaje a estudiar. Esto debido a que permite el análisis del sistema de la red de saneamiento y de drenaje, de tal forma de simular los fenómenos relacionados con el funcionamiento de los sistemas de evacuación existentes. Dicho modelo además es ampliamente utilizado en modelación de drenaje de aguas lluvias, fue utilizado en estudios previos en la zona, como es el caso Plan Maestro de Evacuación y drenaje de Aguas lluvias del Gran Santiago, el estudio de factibilidad de mejoramiento del Canal Santa Marta (Ifarle , 2003), y la mayoría de los estudios de planes maestros realizados para la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas de Chile, a partir del año 1999, lo que avala aún más su aplicación.

## 2.6. Características SWMM

SWMM Storm Water Management Model corresponde a un modelo dinámico de simulación de precipitaciones, pudiendo modelar un acontecimiento único o una simulación continua en un periodo extendido (Manual del Usuario, SWMM Modelo de Gestión de Aguas Pluviales, EPA,2005). El software cuenta con tres módulos de operación Sanitario, Hidrológico e Hidráulico:

Modo Sanitario: Corresponde al control y calidad de agua, donde se puede estudiar principalmente la distribución y propagación de contaminantes en redes.

- Modo Hidrológico: Simula la precipitación que cae sobre la cuenca y realiza la transformación de la precipitación en un hidrograma de escurrimiento a la salida de cada una, o a la entrada a la red de colectores modelada. Se ingresa la información geomorfológica y pluviométrica de las cuencas asociadas.

- Modo Hidráulico: Analiza el recorrido del volumen de agua entregado por la precipitación a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento, bombas y elementos reguladores según la red a modelar. Permite conocer el comportamiento del flujo del colector, además de las características en la o las secciones de control. Se ingresan las características estructurales de cámaras y colectores.

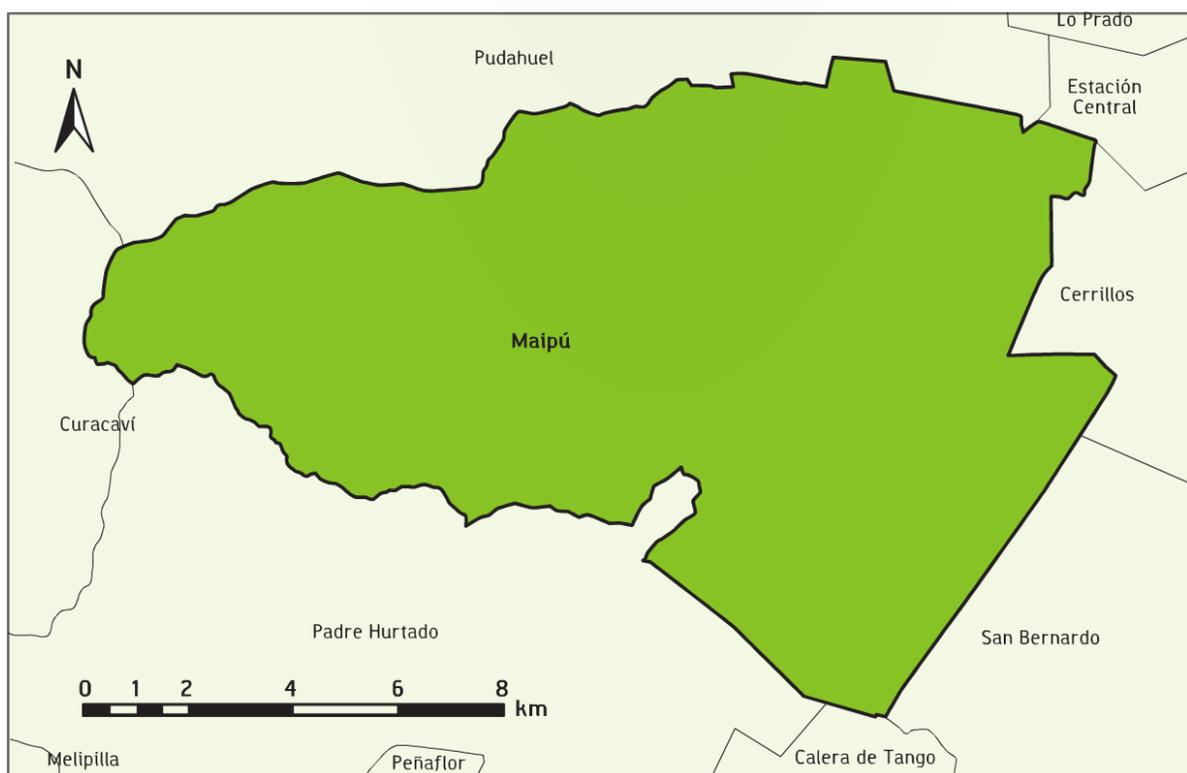
El modelo SWMM se desarrolló inicialmente en 1971, experimentando mejoras que concluyeron en la edición actual que corresponde a la 5° versión del programa. En la modelación de la red de

drenaje de Maipú se utiliza esta última versión, aplicando dos de los módulos descritos, Hidrológico e Hidráulico. Si bien se incorpora en el modelo el transporte de aguas servidas, esta se analiza en cuanto a su aporte en volumen a la red, y no al control de la calidad del agua.

## CAPÍTULO 3: Caracterización de la Zona en Estudio.

### 3.1. Ubicación y antecedentes de la región en estudio

La comuna de Maipú está emplazada en el extremo sur-poniente de la Provincia de Santiago, en la Región Metropolitana, en las coordenadas geográficas 33° 30' Latitud Sur y 70° 46' Longitud Oeste; se encuentra ubicado a 470 m.s.n.m. de altura promedio y a 15 Km. al suroeste del centro de Santiago (Ilustre Municipalidad de Maipú, 2004). Sus límites jurisdiccionales son al Norte, la comuna de Pudahuel; al Nor-oriente y Oriente, las comunas de Estación Central y Cerrillos; al Sur, las comunas de San Bernardo y Calera de Tango (Provincia de Maipo) y al Poniente, las comunas de Padre Hurtado (Provincia Talagante) y Curacaví (Provincia de Melipilla). (Ver Figura 3-1).



**Figura 3-1 Límites jurisdiccionales de la comuna de Maipú (Ilustre Municipalidad de Maipú, Secretaría comunal de planificación, 2013)**

### 3.2. Usos de Suelo

El territorio comunal cubre una superficie de 13.720,5 [ha] (alrededor de un 7% del total de la Provincia de Santiago). De ese total, tal como se muestra en la tabla 3.1, 5.573,1 [ha] corresponden al área urbana, 5.523,6 [ha] corresponden a terrenos de uso agrícola y 2.623,80 [ha] son cerros. (Ilustre Municipalidad de Maipú, Secretaría comunal de planificación, 2013)

**Tabla 3-1 Usos de Suelo del Área Urbana de la comuna de Maipú**

Uso de Suelo	Superficie [ha]	Superficie [%]
Habitacional	2242.22	40.2
Administración Pública	6.97	0.1
Comercio	103.65	1.9
Culto	24.45	0.4
Deporte	67.59	1.2
Educación y cultura	92.99	1.7
Estacionamiento	4.35	0.1
Organizaciones comunitarias	10.61	0.2
Oficinas y empresas	48.97	0.9
Salud	7.86	0.1
Seguridad	1.11	0.0
Industria	421.44	7.6
Almacenaje	62.61	1.1
Taller	26.01	0.5
Transporte	21.78	0.4
Vialidad	1246.47	22.4
Área verde	50.39	0.9
Sitio eriazo	250.68	4.5
Terrenos no urbanizados	820.92	14.7
Otros	62.03	1.1
<b>Total</b>	<b>5573.10</b>	<b>100.0</b>

### 3.3. Recursos Hídricos y Red de Canales

Maipú forma parte de la cuenca del río Maipo y es atravesada en su parte occidental por el río Mapocho que desemboca en el río Maipo, sirviendo de barrera natural entre la zona rural y urbana de la comuna. Además, la comuna contiene en su eje este-oeste al Zanjón de la Aguada, tributario del río Mapocho, que transporta el exceso de aguas lluvias de gran parte de la ciudad de Santiago. Es importante señalar que esta obra ya no transporta aguas servidas, debido a la construcción de un colector que lo recorre de forma paralela a su cauce en una tubería cerrada. (Ilustre Municipalidad de Maipú, Secretaría Comunal de Planificación, 2002)

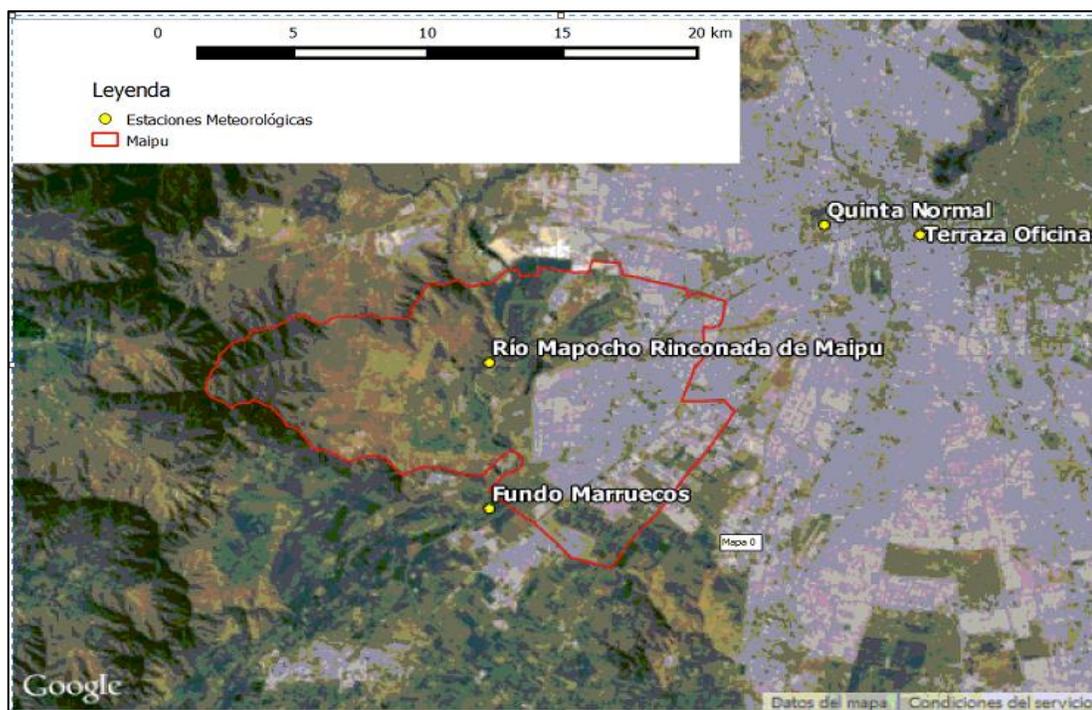
Dentro de la comuna también existen en funcionamiento tres redes de canales principales que cruzan la parte urbana de ésta. La primera red consiste en una derivación del canal Lo Espejo denominado canal Santa Marta que se inicia en Camino Lonquén con Santa Marta, y forma parte de la red primaria de aguas lluvias del sistema Gran Avenida-Ochagavía-Espejo-Santa Marta, captando aguas lluvias de varias comunas de Santiago, entre ellas Maipú. La segunda red corresponde a un canal de derrame de regadío que entra en Camino Lonquén con Av. Américo Vespucio y que cruza hasta Serafín Zamora con Santa Adela. Finalmente, la tercera red corresponde al Canal Ortuzano, el cual inicia en el Zanjón del Aguada y cuya finalidad es la distribución del recurso hídrico entre los diferentes regantes pertenecientes a la Asociación Canal Ortuzano.

### 3.4. Información Meteorológica Disponible

Se cuenta con series de precipitaciones de estaciones controladas por la Dirección General de Aguas y por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), de donde es posible obtener los registros diarios en ubicaciones relativamente cercanas a la cuenca. La longitud del registro es variable en cada estación, pero es suficiente para que no sea necesario realizar ningún procesamiento especial de la información tales como relleno o extensión de series.

**Tabla 3-2 Descripción estaciones meteorológicas**

<b>Nombre Estación</b>	<b>Fundo Marruecos</b>	<b>Rio Mapocho en Rinconada Maipú</b>	<b>Terraza Oficinas Centrales DGA</b>	<b>Quinta Normal</b>
<b>Altitud</b>	430	440	560	527
<b>Vigencia</b>	VIGENTE	VIGENTE	VIGENTE	VIGENTE
<b>Fecha Inicio</b>	30-jun-1989	31-dic-2001	31-may-60	01-ene-1920
<b>UTM Este</b>	331136	331031	346948	343585
<b>UTM Norte</b>	6285852	6291857	6297392	6298112
<b>Región</b>	METROPOLITANA DE SANTIAGO	METROPOLITANA DE SANTIAGO	METROPOLITANA DE SANTIAGO	METROPOLITANA DE SANTIAGO
<b>Provincia</b>	TALAGANTE	SANTIAGO	SANTIAGO	SANTIAGO
<b>Comuna</b>	PADRE HURTADO	MAIPU	SANTIAGO	QUINTA NORMAL
<b>Institución</b>	DGA	DGA	DGA	DMC



**Figura 3-2 Ubicación Estaciones Meteorológicas**

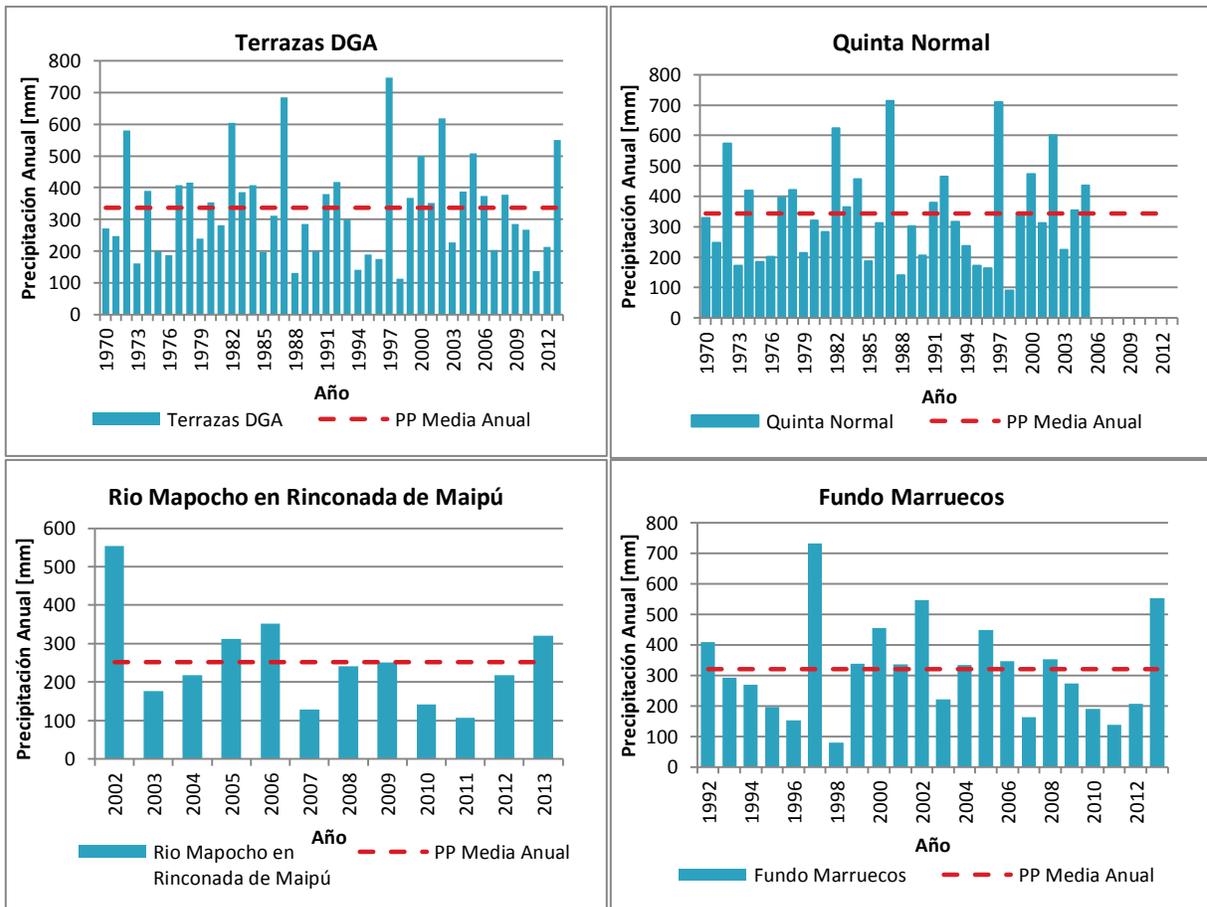
La ubicación de las estaciones de registro de precipitaciones utilizadas, así como un esquema de su posición en la región y su posición con respecto a la cuenca, se muestra en la Figura 3-2. Sus coordenadas exactas, así como la longitud de registro se muestran en la Tabla 3-2

La precipitación media anual en la zona alcanza valores de 320, 252, 336 y 342 [mm] en base a los registros de las estaciones Fundo Marruecos, Río Mapocho en Rinconada de Maipú, Terraza Oficinas DGA y Quinta Normal respectivamente, lo cual se muestra en la Figura 3-3 en conjunto con la precipitación total anual de los años con registro dentro del periodo 1970-2013.

En cuanto a la frecuencia de precipitaciones, llueve en promedio entre 27 y 29 días al año en base a las estaciones Quinta Normal y Terrazas DGA. La Tabla 3-3 presenta una distribución de los eventos de precipitación según la intensidad de estos.

**Tabla 3-3 Número de días con precipitación según rango de intensidad**

PP [mm]	N° Días	
	Terraza DGA	Quinta Normal
[1-10]	16	16
(10-30]	9	10
>30	2	3



**Figura 3-3 Precipitación Anual de las estaciones meteorológicas utilizadas.**

La información pluviométrica de estas estaciones a escala diaria se encuentra disponible en el Anexo Digital. Estos datos son analizados en el CAPÍTULO 4:, donde se estudia la serie de precipitaciones máximas en 24 horas en las estaciones.

## CAPÍTULO 4: **Proyecciones Climáticas de Precipitación**

### 4.1. **Procesamiento de Datos**

Para estimar el posible impacto del cambio climático sobre los valores esperados de variables meteorológicas, existen modelos matemáticos que permiten simular la dinámica del sistema climático. En este caso el análisis se basa en el modelo global de circulación MK3.6, desarrollado por el instituto australiano CSIRO, que ya no utiliza escenarios de emisión de gases como forzantes del cambio climático sino que otorga relevancia a la radiación, según escenarios denominados RCP propuestos por IPCC, detallados en la Tabla 2-1. Se decide utilizar para este trabajo las proyecciones asociadas a los escenarios RCP2.6 y RCP 8.5, dado que definen las condiciones extremas para la variable forzante radiativa en el modelo MK3.6.

Para que la información resultante del modelo climático sea representativa del área de estudio, se realiza un proceso de escalamiento en base a información meteorológica desde estaciones cercanas. Para esto, el modelo contiene dos conjuntos de datos para cada escenario RCP, la serie histórica y la serie futura. El primer conjunto de datos se emplea en el proceso de escalamiento, después del cual se aplican las correcciones a la serie futura de modo que las proyecciones sean comparables con el registro histórico de estaciones meteorológicas.

La variable meteorológica de interés para efectos de este trabajo es la precipitación, la cual se obtiene desde el modelo a escala diaria. Es importante mencionar que el modelo MK3.6 entrega diez series de proyecciones diferentes para cada una de las variables meteorológicas, denominadas *ensemble*, que son generadas utilizando el mismo modelo pero diferentes condiciones iniciales, lo que genera series alternativas. Se trabaja con la totalidad de series del modelo, y posterior al proceso de escalamiento se seleccionan aquellas que se ajustan de mejor manera al registro histórico.

## ESCALAMIENTO DE DATOS

El primer paso en el escalamiento corresponde a un ajuste espacial de la información. Los datos disponibles desde el modelo MK3.6 corresponden a los resultados de la simulación de un modelo climático global cuya grilla está definido por celdas de aproximadamente  $1.87^{\circ} \times 1.87^{\circ}$ , de modo que para que estos datos sean representativos de los puntos de interés, correspondientes a las estaciones meteorológicas consideradas - Figura 4-1 - , es necesario realizar un escalamiento espacial según lo señalado en el apartado 2.2, generando un valor de precipitación en el punto deseado ponderando cada valor de la grilla según el inverso de la distancia, variable detallada en Anexo. Se obtiene de esta forma series de precipitación diaria asociadas a cada estación meteorológica.

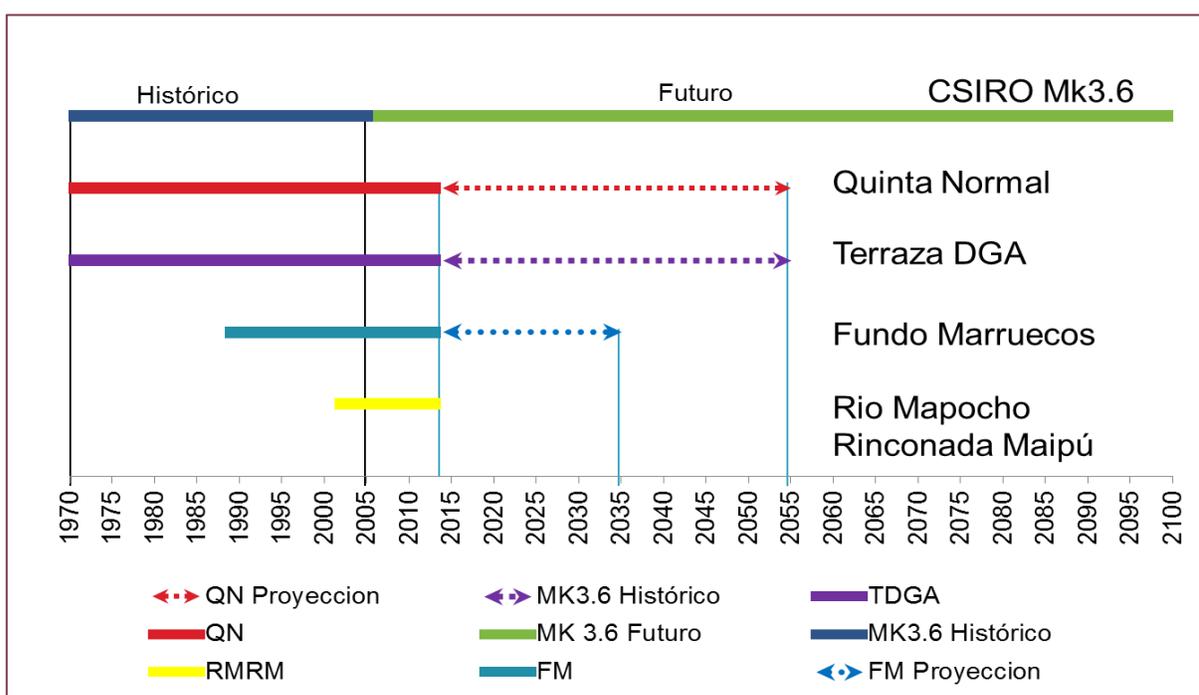


Figura 4-1 Ubicación de Puntos de la grilla del modelo Mk3.6 y estaciones meteorológicas de interés.

Posteriormente al escalamiento espacial, se realiza el escalamiento temporal de la información del modelo climático comparado con el registro de precipitación de las estaciones meteorológicas. Para ello se determinan funciones de transferencia lineales que establecen relaciones entre el valor de la variable estimada por el modelo y el valor real observado en el punto de interés probabilísticamente, es decir, ordenando en forma descendente ambas series

antes de establecer las funciones. Es importante mencionar que el modelo MK3.6 entrega valores diarios de precipitación, no obstante para efectos de la corrección de estos datos se trabaja con la serie de máximas anuales, teniendo en cuenta que para el diseño de obras de drenaje de aguas lluvias interesa conocer los eventos de máxima precipitación.

Considerando la estadística evaluada en el CAPÍTULO 3:, existe un periodo de tiempo de 36 años con información disponible para el ajuste de los resultados del modelo MK3.6 en las estaciones meteorológicas Quinta Normal y Terrazas Oficinas DGA, un total de 17 años para la estación Fundo Marruecos y sólo 5 años para la estación Rio Mapocho en Rinconada de Maipú, como se aprecia en la Figura 4-2. Debido a la escasez de información disponible, se descarta la utilización de la última estación mencionada.



**Figura 4-2 Esquema de información disponible.**

El ajuste lineal ( $y = mx + n$ ) realizado para cada estación y para las diez proyecciones del modelo se resume en Tabla 4-1, Tabla 4-2 y Tabla 4-3. Una vez definidas estas funciones para cada una de las series de proyecciones, y bajo el supuesto de que estas relaciones son invariantes en el tiempo, se aplican al conjunto de diez series, ensemble, que entrega el modelo como resultado al ser ejecutado bajo los escenarios RCP2.6 y RCP 8.5. Ver Figura 4-3.

**Tabla 4-1 Funciones de Transferencia Estación Quinta Normal**

	Intervalo válido		m	n	R <sup>2</sup>
<b>Ensemble 1</b>	5.3	31.8	2.584	-13.666	0.985
	31.8	--	4.601	-71.294	0.910
<b>Ensemble 2</b>	7.6	30.5	2.417	-18.252	0.953
	30.5	40.0	0.118	54.227	0.754
	40.0	--	3.408	-80.016	0.958
<b>Ensemble 3</b>	4.0	32.4	2.132	-8.412	0.958
	32.4	--	15.482	-453.693	0.878
<b>Ensemble 4</b>	1.1	36.6	1.717	-1.863	0.963
	36.6	--	5.373	-137.538	0.884
<b>Ensemble 5</b>	10.3	31.0	2.958	-30.367	0.931
	31.0	--	5.374	-108.769	0.891
<b>Ensemble 6</b>	0.0	22.8	1.379	2.068	0.945
	22.8	25.9	5.446	-88.094	0.904
	25.9	33.1	0.898	32.082	0.890
	33.1	--	2.504	-16.249	0.930
<b>Ensemble 7</b>	7.9	0.0	2.615	-20.547	0.981
<b>Ensemble 8</b>	9.1	29.7	2.588	-23.444	0.933
	29.7	38.2	0.840	30.626	0.931
	38.2	--	3.022	-47.613	0.866
<b>Ensemble 9</b>	13.3	23.2	5.049	-66.802	0.952
	23.2	30.9	1.105	26.125	0.958
	30.9	--	2.395	-6.730	0.907
<b>Ensemble 10</b>	8.0	--	2.452	-19.507	0.973

**Tabla 4-2 Funciones de Transferencia Estación Terraza Oficinas DGA**

	Intervalo válido		m	n	R <sup>2</sup>
<b>Ensemble 1</b>	6.1	31.7	2.763	-16.587	0.980
	31.7	--	4.045	-50.593	0.896
<b>Ensemble 2</b>	7.0	31.3	2.348	-16.405	0.966
	31.3	38.0	0.595	39.664	1.000
	38.0	--	2.645	-40.684	0.935
<b>Ensemble 3</b>	4.0	31.5	2.157	-8.603	0.967
	31.5	--	10.923	-291.431	0.868
<b>Ensemble 4</b>	0.7	35.4	1.695	-1.175	0.975
	35.4	--	4.537	-100.352	0.898
<b>Ensemble 5</b>	0.5	21.0	1.344	-0.584	0.893
	21.0	27.0	4.254	-59.956	0.931
	27.0	--	4.598	-78.676	0.913
<b>Ensemble 6</b>	0.0	22.7	1.439	1.397	0.978
	22.7	27.5	4.170	-56.275	0.964
	27.5	--	2.233	-3.538	0.957
<b>Ensemble 7</b>	8.0	49.0	2.691	-21.449	0.982
<b>Ensemble 8</b>	8.2	50.7	2.453	-19.985	0.980
<b>Ensemble 9</b>	13.0	21.5	4.844	-62.117	0.952
	21.5	30.7	2.233	-3.724	0.949
	30.7	--	2.092	6.541	0.900
<b>Ensemble 10</b>	8.2	--	2.530	-20.548	0.981

**Tabla 4-3 Funciones de Transferencia Estación Fundo Marruecos**

	Intervalo válido		m	n	R <sup>2</sup>
	<b>Ensemble 1</b>	12.3	18.9	5.56	-67.91
18.9		31.7	1.75	7.49	0.933
31.7		--	9.17	-228.60	0.926
<b>Ensemble 2</b>	11.9	29.5	2.42	-28.73	0.951
	29.5	45.4	0.90	18.60	0.904
	45.4	--	4.78	-159.01	0.982
<b>Ensemble 3</b>	12.0	16.0	6.90	-82.20	0.973
	16.0	34.2	1.79	-0.40	0.960
	34.2	--	35.09	-1137.70	0.973
<b>Ensemble 4</b>	4.3	38.4	1.92	-8.13	0.961
	38.4	--	5.96	-160.29	0.980
<b>Ensemble 5</b>	9.1	35.0	2.58	-23.43	0.960
	35.0	--	25.70	-827.28	0.921
<b>Ensemble 6</b>	9.6	--	3.00	-28.55	0.970
<b>Ensemble 7</b>	11.1	--	3.40	-37.43	0.959
<b>Ensemble 8</b>	7.5	39.8	2.13	-15.84	0.942
	39.8	--	8.11	-253.81	0.981
<b>Ensemble 9</b>	19.3	21.7	19.56	-377.04	0.900
	21.7	23.6	4.82	-59.65	0.942
	23.6	27.7	0.90	32.50	1.000
	27.7	--	12.66	-293.52	0.983
<b>Ensemble 10</b>	12.8	29.4	3.60	-45.94	0.922
	29.4	--	1.81	2.65	0.933

**Tabla 4-4 Correlación entre precipitación modelada y escalada en periodo histórico y registro de precipitaciones en estaciones meteorológicas**

	Estación Meteorológica		
	Quinta Normal	Terraza DGA	Fundo Marrueco
Ensemble 1	0.988	0.985	0.983
Ensemble 2	0.989	0.989	0.995
Ensemble 3	0.982	0.986	0.993
Ensemble 4	0.975	0.974	0.990
Ensemble 5	0.983	0.983	0.975
Ensemble 6	0.989	0.993	0.985
Ensemble 7	0.989	0.987	0.979
Ensemble 8	0.987	0.988	0.986
Ensemble 9	0.986	0.992	0.991
Ensemble 10	0.992	0.992	0.985

## VERIFICACIÓN DEL PROCESO DE ESCALAMIENTO

Para verificar que el registro de precipitación sea representado en forma adecuada se grafican los datos reales con respecto a los datos escalados y corregidos en el periodo histórico (ver en Anexo). Las series de precipitación se ajustan a la identidad, mostrando coeficientes de correlación mayores a 0.970 en todos los casos Tabla 4-4. De lo anterior se concluye que el ajuste de funciones de transferencias permite representar en forma adecuada la magnitud de los eventos.

## ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE PRECIPITACIONES

Además de la intensidad de precipitación, es interesante analizar la frecuencia de las precipitaciones del modelo climático, verificando que la cantidad de días con eventos de precipitación sea comparable tanto en el modelo como en los registros históricos. Para este análisis se consideraron sólo las estaciones Quinta Normal y Terraza DGA dado que ambas mantienen un registro de más de 30 años en el periodo histórico.

Para estimar los días con precipitación obtenidas del modelo, se determinan nuevas funciones de transferencia para el modelo climático, incorporando la totalidad de los eventos de precipitación y no sólo los extremos.

Las precipitaciones diarias son desglosadas según el mes en que acontecen, generando funciones de transferencia para cada mes. La importancia de esta disociación radica en la diversidad de intensidad de precipitación en los distintos meses del año, de modo que la intensidad mínima a considerar por el modelo varía mensualmente (ver Figura 4-3), afectando directamente a la frecuencia de precipitaciones de menor intensidad obtenidas desde el modelo climático.

Con los datos de precipitación modelados y escalados, se determina para cada *ensemble* en el periodo histórico la cantidad de días promedio al año en que se producen precipitaciones de diferentes intensidades, agrupadas en intensidades bajas, ente 1 y 10 mm diarios, intensidades medias, entre 10 y 30 mm diarios, y finalmente intensidades mayores de 30 mm diarios. Se compara estos resultados con los obtenidos en base a las estaciones meteorológicas en el mismo periodo, a fin de determinar la representatividad que el modelo tiene respecto de las precipitaciones reales.

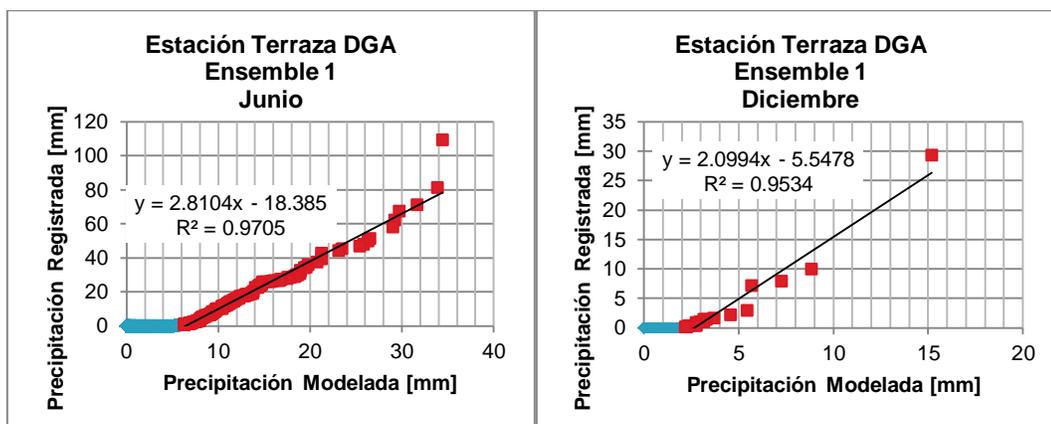


Figura 4-3 Ejemplo determinación función de transferencia a nivel mensual.

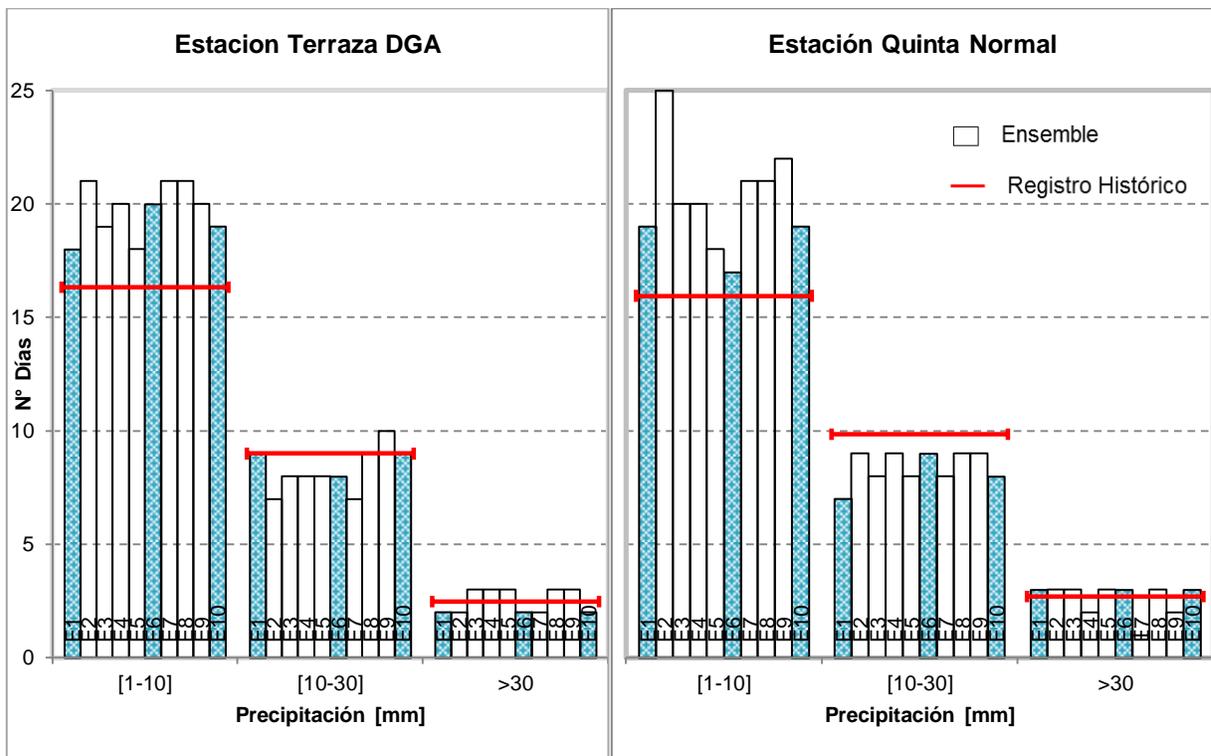
### Periodo Histórico

Los resultados arrojan una gran variabilidad respecto de lo registrado por las estaciones en el periodo histórico, Tabla 4-5, la cual incrementa para las precipitaciones de menor intensidad alcanzando diferencias de 50% para el *ensemble 2*. Se observa además que el modelo sobreestima la cantidad de días con precipitaciones de baja intensidad en todos los casos.

Tabla 4-5 Variación porcentual de días con precipitaciones diarias modeladas respecto del registro de estaciones en periodo histórico

Estación Terrazas DGA										
PP [mm]	Ensemble 1	Ensemble 2	Ensemble 3	Ensemble 4	Ensemble 5	Ensemble 6	Ensemble 7	Ensemble 8	Ensemble 9	Ensemble 10
[1-10]	10.5	31.5	13.4	21.3	7.3	24.5	26.2	27.1	25.1	14.0
[10-30]	-2.6	-24.3	-16.4	-13.2	-10.6	-15.3	-16.9	-1.1	7.4	0.0
>30	-5.8	-23.1	25.0	25.0	36.5	-1.9	-7.7	19.2	1.9	-3.8
Estación Quinta Normal										
PP [mm]	Ensemble 1	Ensemble 2	Ensemble 3	Ensemble 4	Ensemble 5	Ensemble 6	Ensemble 7	Ensemble 8	Ensemble 9	Ensemble 10
[1-10]	24.2	54.1	23.9	26.9	14.6	5.7	31.4	29.3	36.1	21.8
[10-30]	-25.5	-12.0	-21.7	-12.0	-14.4	-13.0	-18.3	-3.8	-5.7	-13.9
>30	4.1	21.7	-3.0	-15.3	11.1	4.1	-45.3	-1.2	-8.3	-1.2

Recordando que para el diseño de obras de drenaje urbano se requiere de las precipitaciones de mayor intensidad, se selecciona las series dando preferencia a disminuir el error obtenido para las precipitaciones de mayor intensidad, no mayor a 5% o 6%, sin exagerar en el error respecto de precipitaciones ente 1 y 30 mm, aceptando hasta un 20% de diferencia.



**Figura 4-4 Comparación número días con precipitación entre estaciones meteorológicas y modelo CSIRO MK3.6. Período Histórico 1970-2005**

Finalmente se seleccionan tres de los diez *ensembles* incluidos en el modelo MK3.6 a fin de descartar aquellas series que no representan en forma adecuada lo registrado por las estaciones meteorológicas. Teniendo en cuenta la precisión de ajuste de las funciones de transferencia y mediante las correlaciones expuestas en la Tabla 4-4, así como la representatividad del modelo climático en cuanto a la frecuencia de precipitaciones, se considera aceptable las series de precipitación asociadas a los *Ensemble 1*, *Ensemble 6* y *Ensemble 10*.

### **Periodo Futuro**

Los resultados obtenidos para el modelo MK3.6 se comparan con modelos de cambio climático estudiados por Cortés (2012), quien analizó el impacto del cambio climático en Santiago de Chile según los modelos: CM3 de Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM, France), modelo MK perteneciente a Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO, Australia), el modelo MIROC\_MEDRES del National Institute for Environmental Studies (NIES, Japan) y finalmente el modelo ECHAM del Max-Planck-Institute for Meteorology (MPI, Germany).

Cortés determinó que, según los modelos mencionados, existiría un descenso en el número de días con precipitaciones de baja intensidad para los escenarios de cambio climático A2 y B1 (Figura 4-5).

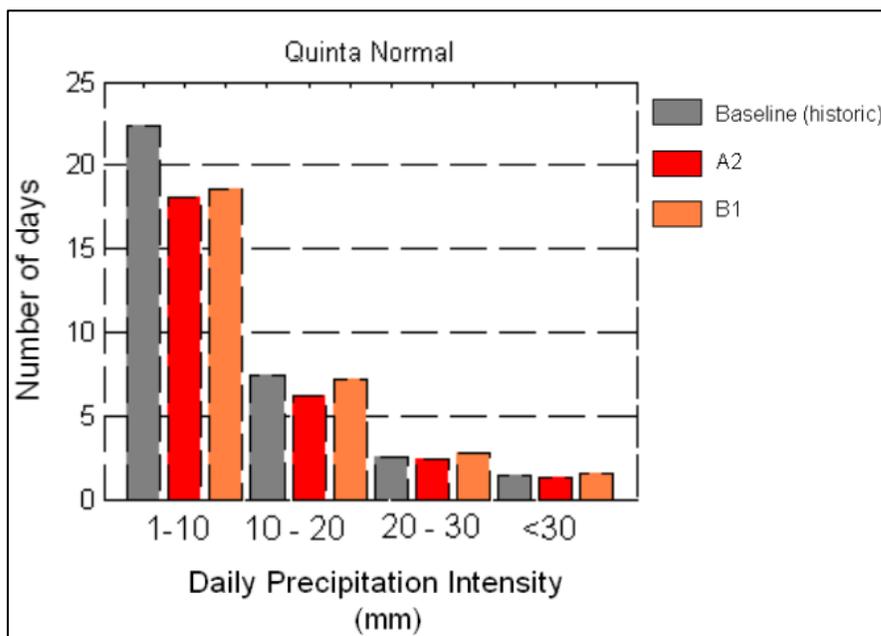


Figura 4-5 Precipitación histórica y futura (2045-2065) para escenario A2 y B1. Fuente: Cortés (2012)

El modelo climático MK3.6 revela un comportamiento similar a lo obtenido por Cortés, evidenciando una disminución de la frecuencia de eventos de precipitación en ambos escenarios RCP analizados, para los tres ensembles estudiados, aunque más significativamente para el escenario RCP 8.5 (Ver Figura 4-6). Para altas las intensidades la disminución no es clara, pero para precipitaciones de baja intensidad, es decir, entre 1 y 10 milímetros, se acentúa la disminución de días con precipitaciones en ambos escenarios, alcanzando descensos del 30% según el escenario RCP 8.5 y del 15% para RCP 2.6.

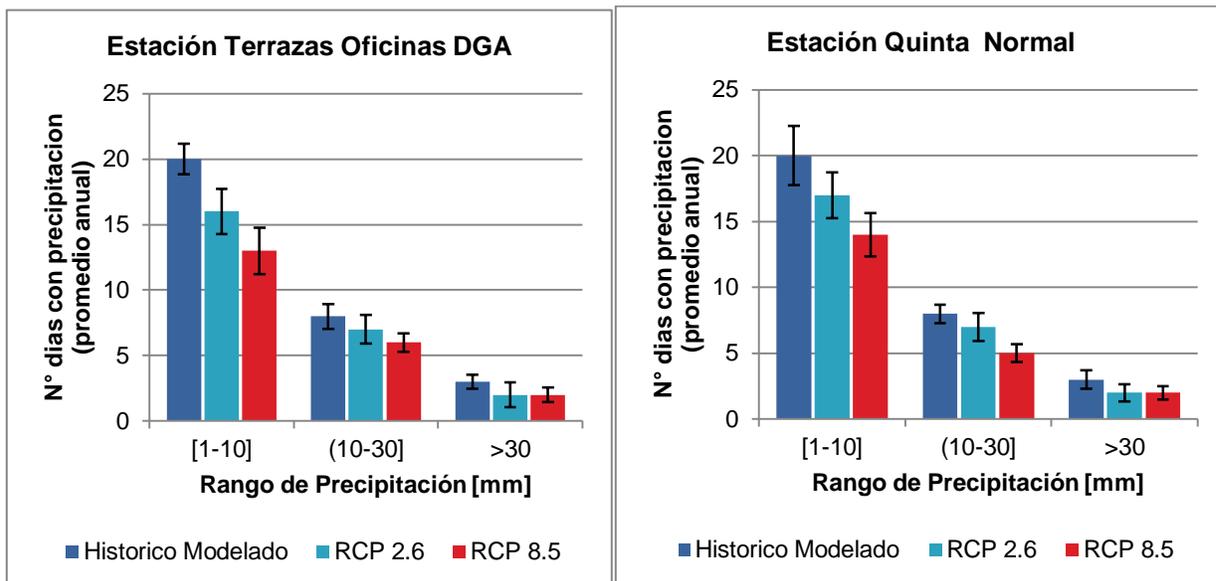


Figura 4-6 Resumen de cantidad de eventos de precipitación según intensidad para escenarios RCP2.6 y RCP8.5

## 4.2. Análisis de Frecuencia

Con los datos de precipitaciones del modelo MK 3.6 escalados a las estaciones Quinta Normal y Terraza oficinas DGA, se realiza un análisis de frecuencias a fin de definir la intensidad de precipitaciones asociadas a ciertos periodos de retorno. Se analizan varias series de datos, la primera serie corresponde a las precipitaciones máximas diarias registradas en el periodo 1970-2005 en las estaciones meteorológicas estudiadas, cuyos resultados se resumen en la

Tabla 4-6. Posteriormente se realiza el análisis de frecuencia de las precipitaciones máximas diarias proyectadas para el periodo 2014-2055 bajo los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 cuyos resultados para los *ensembles* 1, 6 y 10 se resumen en Tabla 4-8 y Tabla 4-9. Los resultados para la totalidad de *ensembles* se adjuntan en Anexo.

Tabla 4-6 Análisis de Frecuencia de Registro histórico de precipitaciones. Período 1970-2005

		Estación: Quinta Normal	Terraza DGA
		Ajuste: Log-Normal	Log-Normal
$P_{exc}$ [%]	T [años]	$P_{max}^{24 hr}$ [mm]	
50	2	43,0	43,0
20	5	61,9	63,2
10	10	75,0	77,4
2	50	104,8	110,3
1	100	118,0	125,0

Tabla 4-7 Análisis de Frecuencia de Resultados Modelo CSIRO Mk3.6 para. Período 1970-2005

Estación:		Quinta Normal				Terraza DGA			
Ensemble		Ensemble 1	Ensemble 6	Ensemble 10	Promedio	Ensemble 1	Ensemble 6	Ensemble 10	Promedio
Ajuste:		Log-Normal	Gumbel	Log-Normal		Log-Normal	Pearson	Gumbel	
$P_{exc}$ [%]	T [años]	$P_{max}^{24 hr}$ [mm]				$P_{max}^{24 hr}$ [mm]			
50	2	46.9	43.2	44.2	<b>44.8</b>	47.5	46.2	42.6	<b>45.4</b>
20	5	65.6	61.8	64.7	<b>64.0</b>	67.0	65.0	63.5	<b>65.2</b>
10	10	78.1	74.5	78.4	<b>77.0</b>	80.3	76.6	77.4	<b>78.1</b>
2	50	106.2	103.6	108.4	<b>106.1</b>	110.3	100.2	107.8	<b>106.1</b>
1	100	118.4	116.4	121.1	<b>118.6</b>	123.4	109.5	120.7	<b>117.9</b>

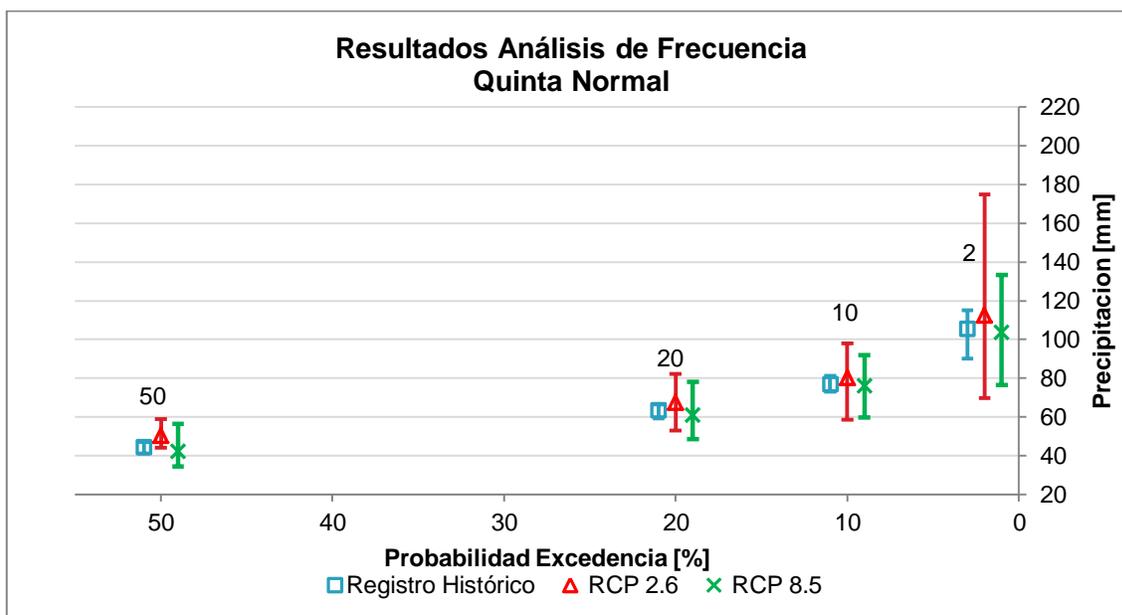
Tabla 4-8 Análisis de Frecuencia de Resultados Modelo CSIRO Mk3.6 para Estación Quinta Normal. Período 2014-2055

Estación: Quinta Normal					
Escenario		RCP 2.6		RCP 8.5	
Periodo Retorno		T=2 años	T=10 años	T=2 años	T=10 años
Serie	$P_{max}^{24 hr}$ [mm]		$P_{max}^{24 hr}$ [mm]		
Ensemble 1	55.2	84.5	50.2	85.6	
Ensemble 6	49.9	80.2	39.1	69.8	
Ensemble 10	45.6	73.2	41.4	75.7	

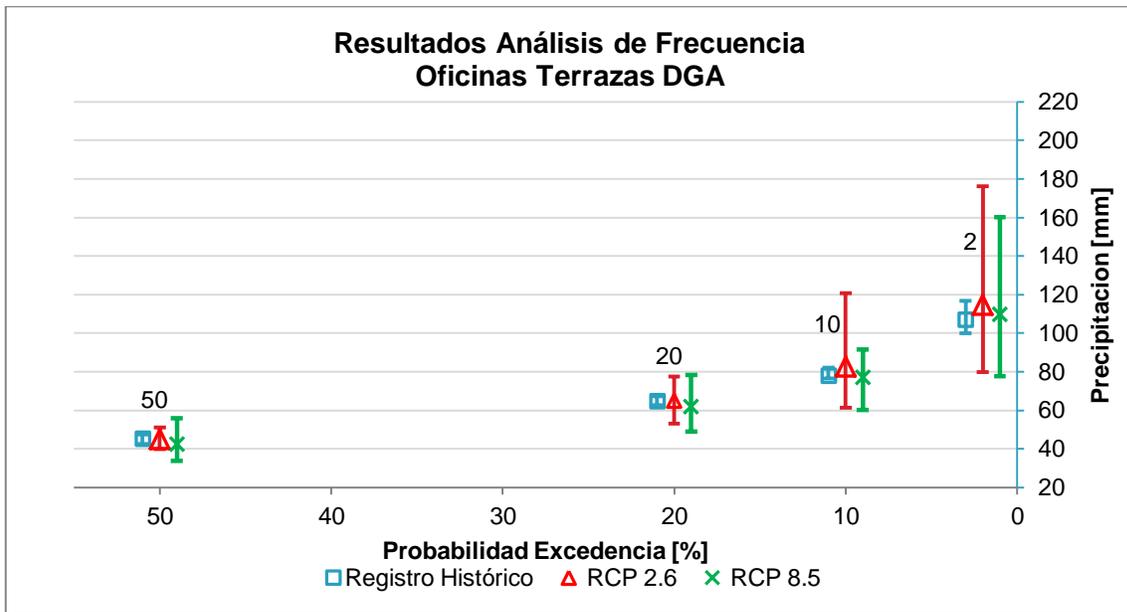
**Tabla 4-9 Análisis de Frecuencia de Resultados Modelo CSIRO Mk3.6 para Estación Terrazas DGA. Período 2014-2055**

Estación: Terraza Oficinas DGA				
Escenario		RCP 2.6		RCP 8.5
Periodo Retorno	T=2 años	T=10 años	T=2 años	T=10 años
Serie	$P_{\max}^{24 \text{ hr}}$ [mm]		$P_{\max}^{24 \text{ hr}}$ [mm]	
Ensemble 1	51.2	86.5	50.7	86.8
Ensemble 6	49.0	73.3	40.0	75.7
Ensemble 10	39.8	77.5	41.9	77.2

Se observa que, en promedio, las precipitaciones de periodo de retorno 2 y 10 proyectadas por el escenario 2.6 son mayores que las obtenidas mediante el análisis de frecuencia de la información histórica de estaciones meteorológicas. No obstante no se distingue una tendencia clara de las precipitaciones estimadas por el modelo climático luego del análisis de frecuencia, dado que la incertidumbre del modelo engloba las precipitaciones estimadas en base al registro en estaciones meteorológicas como se esquematiza en las figuras.



**Figura 4-7 Variabilidad resultados Análisis de Frecuencia de precipitaciones máximas en 24 horas en Estación Quinta Normal para registro histórico, RCP2.6 y RCP8.5**

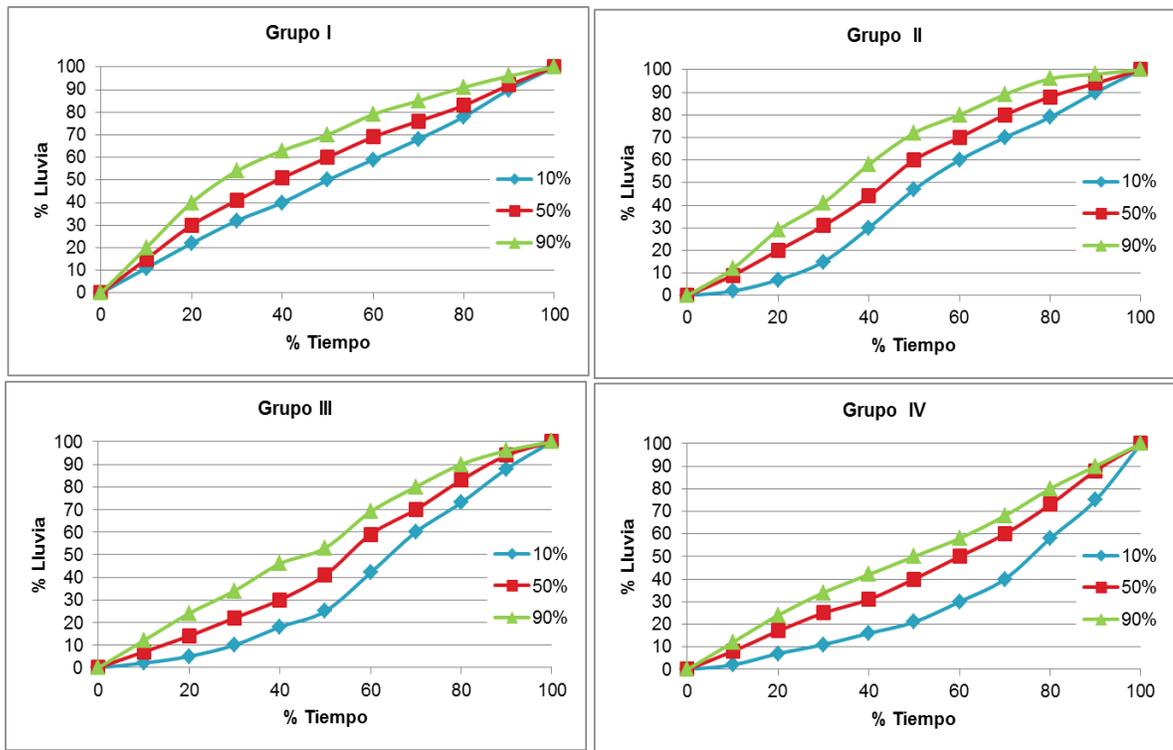


**Figura 4-8 Variabilidad resultados Análisis de Frecuencia de precipitaciones máximas en 24 horas en Estación Terrazas DGA Para registro histórico, RCP2.6 y RCP8.5**

### 4.3. Determinación de Tormenta de Diseño

Hasta este punto del análisis se dispone de precipitaciones diarias, de modo que es necesario distribuir las temporalmente a nivel horario para efectos del diseño de obras de drenaje urbano. La herramienta utilizada en este proceso es la aplicación de las distribuciones de Varas (Varas E., 1985), quien determinó diferentes distribuciones temporales de la precipitación en diferentes grupos y porcentajes de ocurrencia. (Ver Figura 4-9)

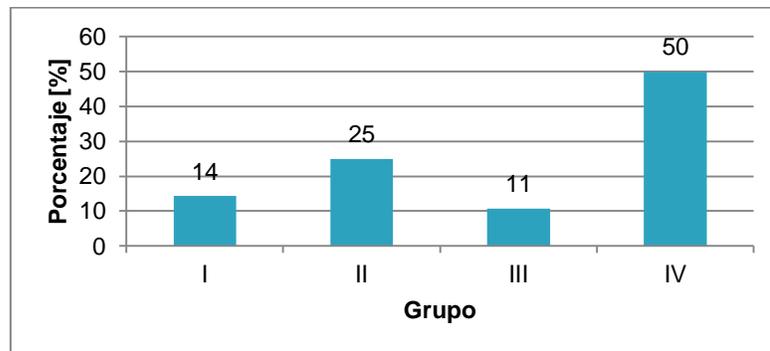
Para la evaluación del grupo al cual corresponde cada evento de precipitación es necesario saber en qué cuartil de tiempo cae la mayor cantidad de precipitación. El criterio indica que si la cantidad mayor cae en el primer, segundo, tercer o cuarto cuartil, la precipitación corresponderá al grupo 1, 2, 3 o 4 respectivamente.



**Figura 4-9 Distribución de precipitación de Varas.**

Fuente: Varas, E. (1985)

Se analiza las máximas precipitaciones en 24 horas, a escala horaria, registradas en estación Rio Mapocho en Rinconada de Maipú, para determinar qué grupo de la distribución de Varas caracteriza las tormentas en la zona de estudio. Los resultados presentados en la Figura 4-10 indican que se debe adoptar el grupo IV de la distribución de Varas.



**Figura 4-10 Distribución de tormentas según grupos de Varas.**

Se decide utilizar las precipitaciones obtenidas en la estación Quinta Normal para el diseño de las obras de drenaje urbano por la calidad de la información, y por ubicarse más próxima al área de estudio que la estación Terraza DGA.

De los valores obtenidos en el análisis de frecuencia se decide utilizar para la lluvia de diseño en base a las proyecciones climáticas, lo obtenido para el escenario RCP 2.6 según un criterio conservador dado que las precipitaciones son mayores que el escenario RCP 8.5 y que lo obtenido por análisis de registro de estaciones meteorológicas. De esta forma las tormentas de diseño para distintas probabilidades de ocurrencia se muestran en la Figura 4-11, seleccionando para el cálculo aquella de mayor probabilidad de ocurrencia.

**Tabla 4-10 Precipitaciones diarias (mm) adoptadas para lluvia de diseño**

Serie	RCP 2.6	
	T=2 años	T=10 años
Ensemble 1	55.2	84.5
Ensemble 6	49.9	80.2
Ensemble 10	45.6	73.2
Promedio	50.2	79.3

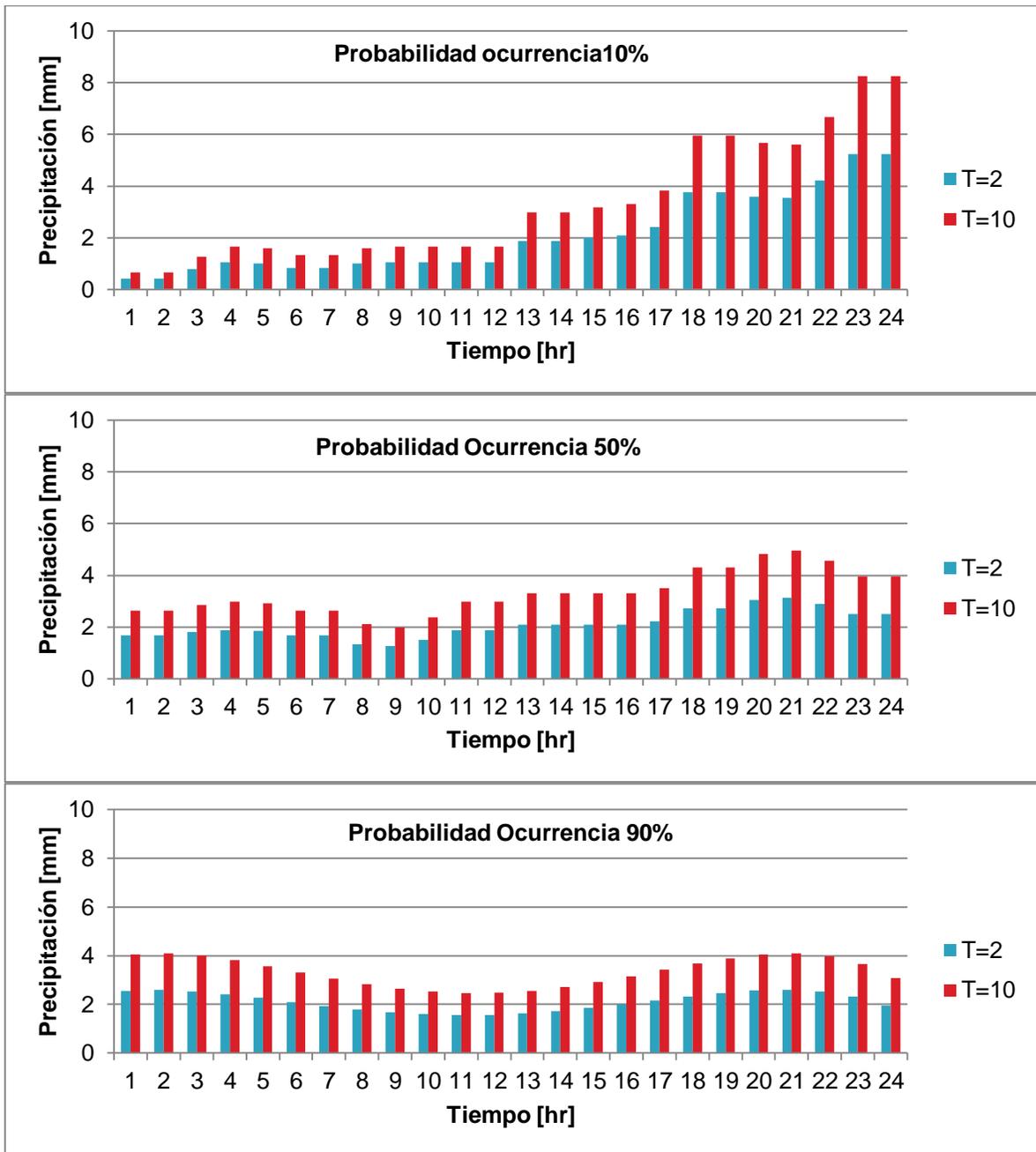


Figura 4-11 Tormentas de Diseño según distribución de Varas para diferentes probabilidades de ocurrencia.

## CAPÍTULO 5: Modelación SWMM

En este ítem se tiene como objeto representar la red de colectores y canales existentes a la fecha, con la condición actual de esorrentía, junto con los parámetros geomorfológicos de la cuenca. De esta forma es posible obtener la respuesta del sistema de drenaje de Maipú, que permita cuantificar, los caudales que escurren por las vías de evacuación, y los volúmenes de inundación, en las zonas correspondientes. Con esto se puede evaluar eventuales soluciones para disminuir los volúmenes de inundación, estableciendo un sistema de drenaje aceptable para esta zona.

Los eventos de precipitación acontecidos en los últimos años, han dejado en evidencia deficiencias en la red de drenaje de aguas lluvias de Maipú, generando reiteradamente inundaciones producto de la insuficiencia de la infraestructura existente para portear la esorrentía superficial. La Tabla 5-1 detalla las principales zonas de inundación en la comuna de Maipú según SMAPA y que son de interés para este trabajo.

**Tabla 5-1 Puntos Críticos Red de Drenaje Aguas lluvias Maipú**

<b>Ubicación</b>	<b>Infraestructura Existente</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Segunda Transversal intersección La Bandera</li></ul>	Colector el Pajonal / Alaska.
<ul style="list-style-type: none"><li>• Portales intersección Huáscar</li></ul>	Colector Diego Portales, en la confluencia con Colector Nueva San Martín,
<ul style="list-style-type: none"><li>• Primera Transversal entre Maipú y 5 Abril</li></ul>	Colector 5 de Abril
<ul style="list-style-type: none"><li>• Desborde Canal Santa Marta</li></ul>	Canal Santa Marta

## 5.1. Infraestructura existente

### COLECTOR RINCONADA

Este colector forma parte del área de drenaje denominada Rinconada, compuesta por los colectores unitarios 5 de Abril-Chacabuco, Diego Portales, Nueva San Martín, Borgoño y 4 Poniente los que desembocan en el colector Rinconada, el cual alcanza un diámetro de 1200[mm]. Este sistema atraviesa la zona central de la comuna de oriente a poniente, drenando un área de alrededor de 1100 [ha]. Ver Figura 5-1 El detalle estructural se encuentra en Anexo

### COLECTOR EL PAJONAL

Corresponde a un colector unitario a cargo de SMAPA, que descarga en el colector paralelo al Zanjón de La Aguada. Drena un área de 270[ha] correspondiente tanto a la comuna de Maipú como a la de Cerillos. El colector tiene un diámetro de 1000 [mm] y su recorrido comprende la avenida Los Trabajadores y calle Alaska, con un total de 1450[m] de longitud. El detalle estructural se encuentra en el Anexo

### CANAL SANTA MARTA

El Canal santa Marta es último del sistema compuesto por los canales Ochagavía y Lo Espejo. El canal se extiende por 5.4 kilómetros, presentando diferentes secciones transversales con un ancho basal promedio de 6 metros y altura de 2.5 m . Luego de la intersección con el canal Lo Espejo el canal Santa Marta continúa por Las Industrias, 3 Poniente, atraviesa y continúa paralelo a la Ruta 78, dobla por Cerro Barón hasta avenida Silva Carvallo por donde continúa hasta descargar en el río Mapocho. Ver detalle en Anexo.





**Figura 5-2 Sistema Colector El Pajonal**



## 5.2. Parámetros de Diseño

### CARACTERÍSTICAS CUENCAS

Para cada nudo de la red de drenaje se determina el área de la cuenca aportante, su pendiente característica y porcentaje de impermeabilización mediante información topográfica disponible y a través del análisis de imágenes satelitales.

El coeficiente de rugosidad de Manning,  $n$ , utilizado tanto para la estimación de la escorrentía superficial como para flujo en canales, depende de las características de cada cuenca y/o conducto, tomando valores recomendados por bibliografía estudiada resumidos en la Tabla 5-2.

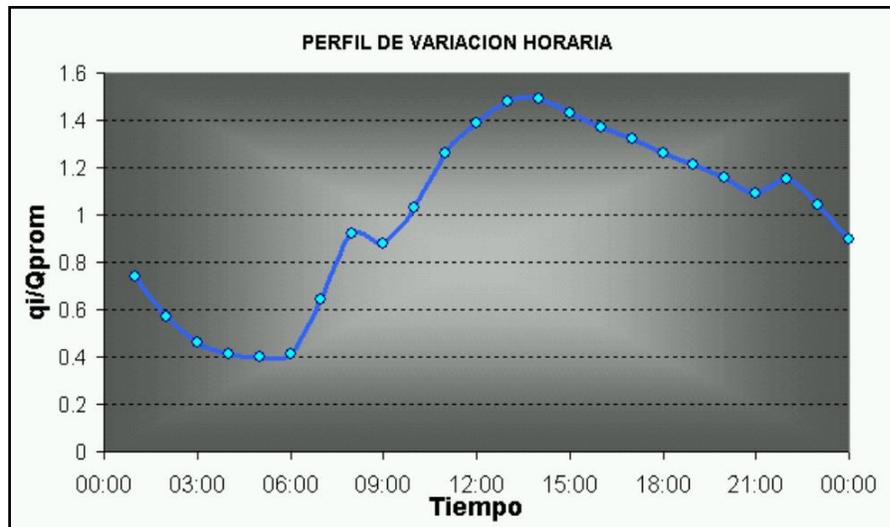
**Tabla 5-2 Coeficientes de Manning**

<b>Tipo de conducción</b>	<b>n</b>
Asfalto	0.011
Pasto Natural	0.013
Planicies Agrícolas y áreas verdes	0.050
Tubería Cemento Comprimido	0.015
Tubería PVC, HDPE	0.010
Camino de tierra	0.035
Camino asfalto (mal estado)	0.025
Camino Pavimentado	0.020

### INCORPORACIÓN DE AGUAS SERVIDAS

Considerando que la red de aguas lluvias de Maipú se compone principalmente de colectores unitarios, es importante incorporar el aporte de aguas servidas a la modelación con el propósito de asemejar lo más fielmente posible las exigencias de la red. Este fenómeno se modela en base a un perfil de variación horaria del caudal afluente a la planta El Trebal, al cual descargan las aguas servidas de Maipú y otras comunas (Berroeta,C, 2003).

Para cada una de los nodos de la red de drenaje, se incorpora el patrón de aguas servidas en función de un caudal promedio diario, el cual varía para cada área tributaria ya que depende del número de habitantes de cada subcuenca. El número de habitantes se estima en base a la densidad poblacional de la comuna correspondiente 3876.2 habitantes/km<sup>2</sup>.



**Figura 5-4 Perfil de variación horario.**

Fuente (Berroeta,C, 2003).

## INFILTRACIÓN

Para calcular la infiltración se aplica el modelo de Green-Ampt, que combina la ecuación de Darcy para flujo en medios porosos y la ecuación de continuidad. El modelo considera que al comienzo de la infiltración la humedad inicial del suelo  $\theta_i$  es homogénea en toda la profundidad del suelo cuya porosidad es  $\eta$ , y que éste tiene una capacidad última de infiltración dada por la conductividad hidráulica saturada  $K$ . Para obtener estos parámetros se necesita la caracterización física del suelo.

Los suelos sobre los cuales se emplaza el área urbana de la Comuna de Maipú corresponden a tres tipologías (Ilustre Municipalidad de Maipú, Secretaría Comunal de Planificación, 2002):

- Depósitos de abanicos aluviales constituidos por gravas en matriz arenosa.
- Depósitos de abanicos aluviales constituidos por gravas en matriz areno-limo-arcillosa. Presentan intercalaciones de arenas, limos y arcillas.
- Depósitos de cenizas volcánicas con fragmentos líticos y pómez subordinados. En zonas erosionados y re depositados, con abundante mezcla de arenas limos y arcillas.

De esta forma, se adopta los siguientes parámetros para modelar la infiltración:

Conductividad hidráulica  $K=10.92$  (mm/h)

Déficit inicial de humedad del suelo  $\Delta\theta = 0.263$  (fracción)

Altura de succión del suelo  $\psi = 110$  (mm)

### 5.3. Validación con casos reales

A fin de validar el modelo SWMM, se analiza la respuesta de la red de drenaje ante tormentas registradas en la estación Río Mapocho en Rinconada de Maipú en los años 2002, 2005 y 2006, detalladas en la Figura 5-5. La consistencia de lo modelado versus lo observados en estos casos reales se considera un buen indicador de la verosimilitud de la modelación. Esto permite fiarse de los resultados de las modelación en situaciones futuras.

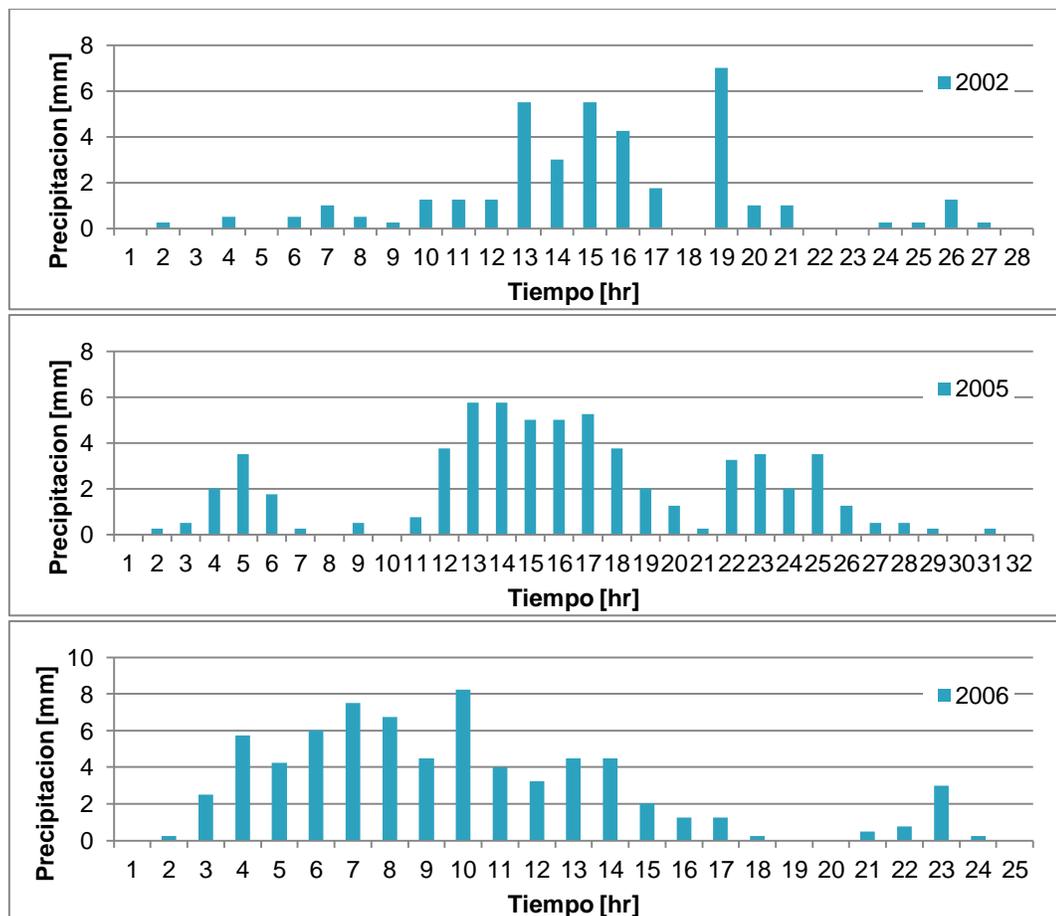


Figura 5-5 Tormentas Reales registradas en estación Río Mapocho en Rinconada de Maipú

La modelación para las tormentas reales deja en evidencia el colapso de algunas cámaras del colector 5 de Abril. Este sector se encuentra a la altura del Templo Votivo de Maipú, justo donde el colector tiene un cambio de dirección y una disminución de 0.5 a 0.4 metros en su diámetro. Esto es concordante con los datos entregados por el Plan Regulador Regulador de Maipú (2003), que muestra zonas de inundación en el mismo sector. De igual forma se corrobora la presencia de inundaciones en los tramos de Avenida Segunda Transversal, al norte de la calle Alaska, y las calles interiores de la Villa Oscar Castro, sector donde el colector unitario El Pajonal no da abasto

#### 5.4. Resultados de modelación SWMM Situación actual

En este escenario se presentan la respuesta de la red de colectores indicada en Tabla 5-1 ante la precipitación de diseño,  $P=50.2$  [mm] correspondiente a un periodo de retorno de 2 años considerando proyecciones climáticas y  $P=43$  [mm] correspondiente a un periodo de retorno de 2 años en base a datos estación Quinta Normal, modelado a través de SWMM.

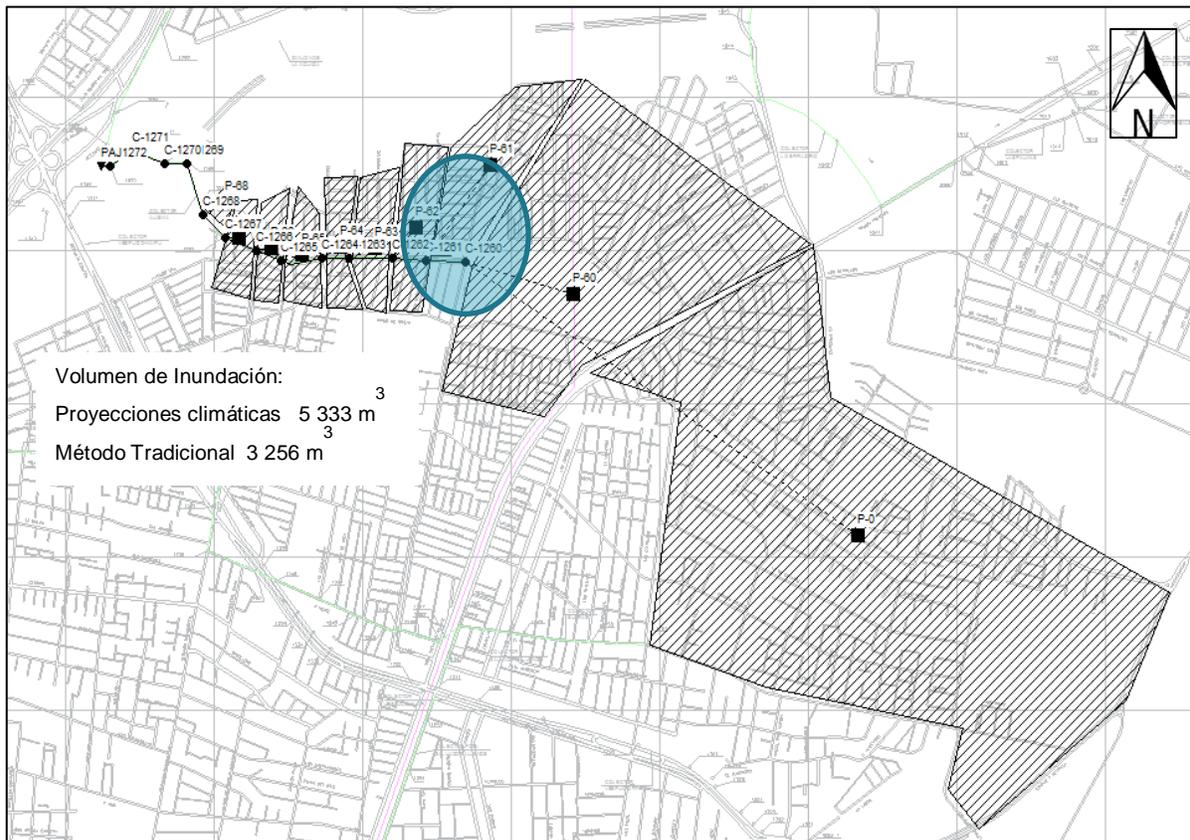
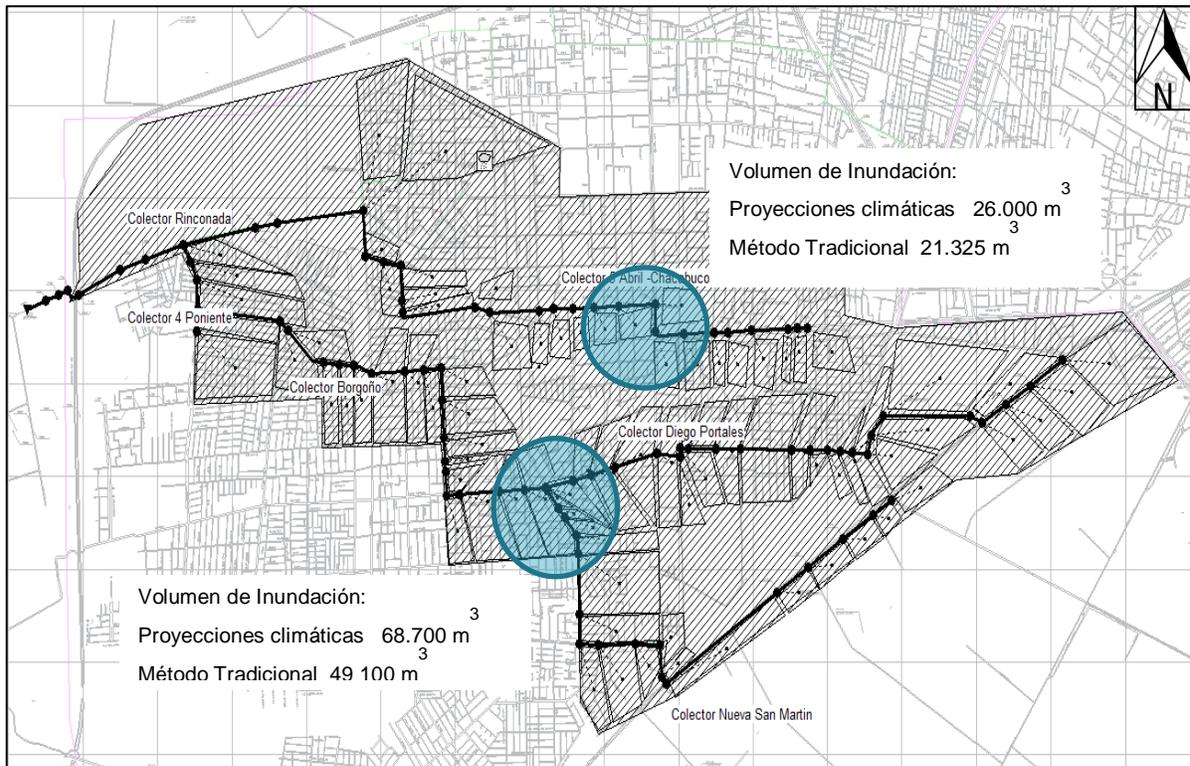


Figura 5-6 Zonas de Inundación Colector El Pajonal



**Figura 5-7 Zonas de Inundación Colector 5 Abril - Rinconada**

### COLECTOR RINCONADA

Los colectores 5 de Abril, y Diego Portales colapsan generando volúmenes de inundación total de 26.000 m<sup>3</sup> y 68.700 m<sup>3</sup> respectivamente. (Ver Tabla 5-3)

En el caso del colector 5 de Abril, se considera que el problema recae en la contracción del diámetro del colector de 0,5 a 0,4 metros entre la cámara C1139 y C1140, donde además existe un cambio de dirección. Esto es concordante con los datos entregados por el Plan Regulador, que indica como zona de inundación los alrededores de la intersección de calle los Pajaritos con Chacabuco, donde se ubican estas cámaras.

Otro punto de conflicto en este colector corresponde a un tramo con pendiente negativa entre las cámaras C1130 y C1131, posiblemente a causa de la existencia de un punto alto en el relieve del terreno en esta zona, por calle Camino a Rinconada entre De la Victoria y Del Rey. Ver Figura 5-8)

En este contexto, dado la importancia de las deficiencias encontradas y debido al alto nivel de urbanización en la zona adyacente al eje del colector, se considera necesario diseñar un colector separado para la conducción de aguas lluvias.

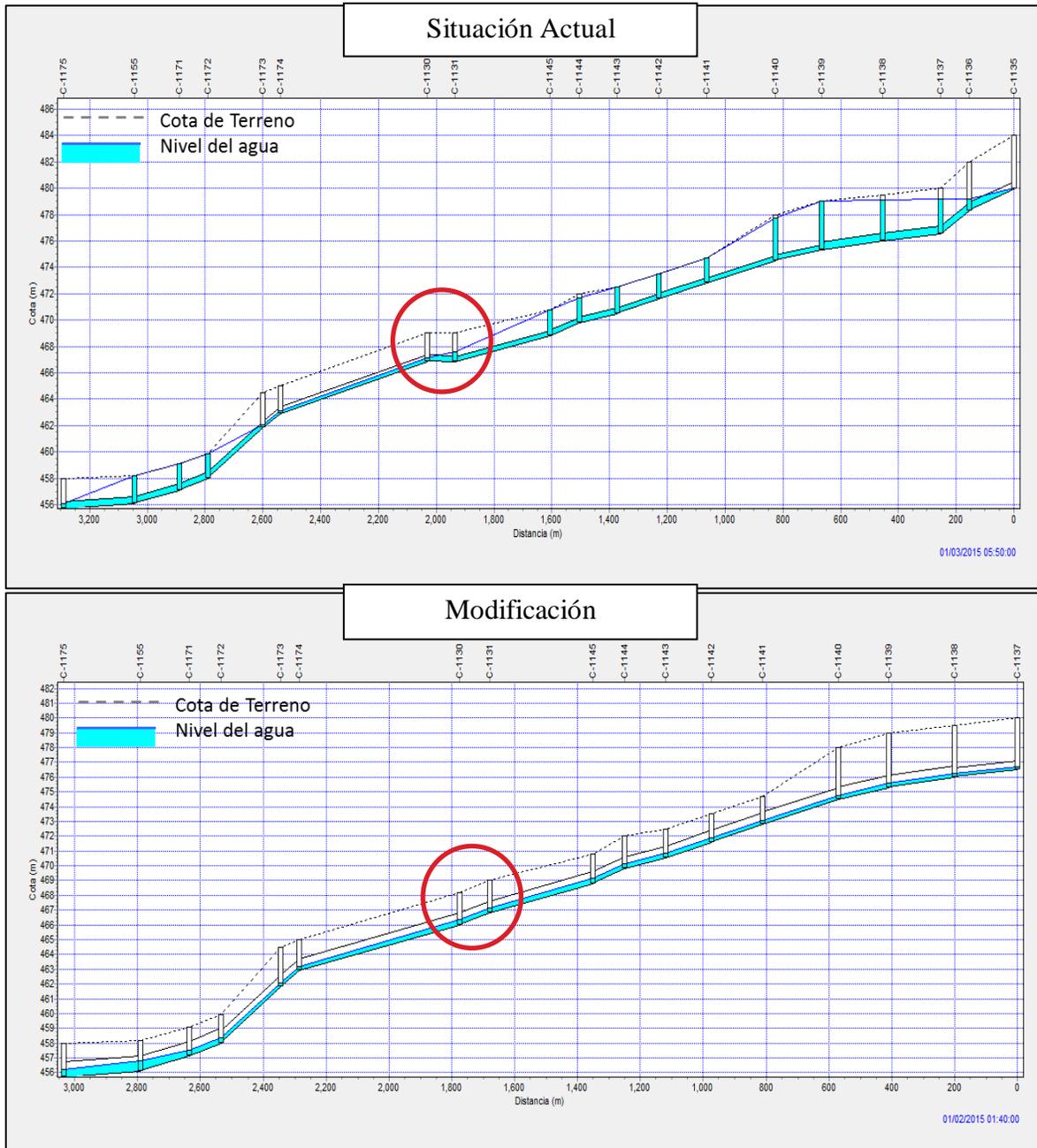


Figura 5-8 Modificaciones al Colector 5 Abril

**Tabla 5-3 Resumen de Inundación en Nudos Colector 5 de Abril**

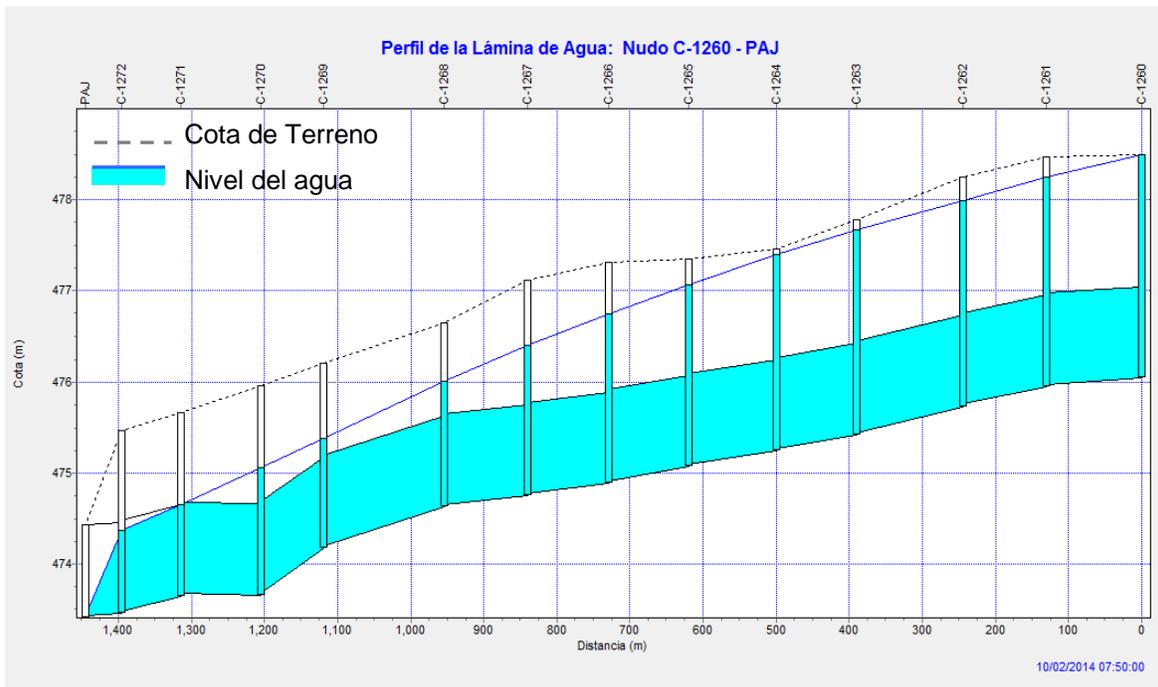
Nudo	Horas Inundado	Caudal Máximo [l/s]	Instante en que sucede el Máximo [días hr:min]		Volumen Total Inundado 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	Volumen Máximo Estancado [ha*mm]
C-1139	10.8	108.53	1	0:00	1.89	0
C-1141	21.2	101.98	1	0:00	5.14	0
C-1142	23.1	19.45	1	0:00	1.17	0
C-1143	23.8	101.14	1	0:00	5.38	0
C-1145	20.8	24.70	1	0:00	0.81	0
C-1172	18.3	105.00	1	0:00	2.68	0
C-1171	23.4	68.60	1	0:00	4.81	0
C-1155	21.5	76.07	1	0:00	2.66	0

#### COLECTOR EL PAJONAL

El origen de las inundaciones por colapso del colector se debe a que el área tributaria al primer nodo del colector es de gran tamaño, ocasionando inundaciones desde el inicio del colector, y afectando la capacidad del mismo hacia aguas abajo como se observa en la Figura 5-9. El volumen de inundación correspondiente al primer nodo, cámara C-1260, supera los 5000 m<sup>3</sup>. (Ver Tabla 5-4)

**Tabla 5-4 Resumen de Inundación en Nudos Colector El Pajonal**

Nudo	Horas Inundado	Caudal Máximo l/s	Instante en que sucede el Máximo [días hr:min]	Volumen Total Inundado 10 <sup>6</sup> Ltr	Volumen Máximo Estancado [ha*mm]
C-1260	6.91	392.11	1 00:00	5.333	0.00
C-1264	2.14	17.57	1 00:00	0.107	0.00



**Figura 5-9 Colapso Colector El Pajonal**

## CANAL SANTA MARTA

Para evaluar la respuesta del canal, se modela el canal para el periodo de retorno de diseño correspondiente a 10 años. Para modelar el aporte del canal Lo Espejo hacia el canal Santa Marta se consideran los valores determinados por el Estudio de factibilidad y diseño definitivo de la red primaria de aguas lluvias sistema Gran Avenida – Ochagavía -Espejo – Santa Marta (Ifarle, 2003) correspondientes a  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La modelación del canal Santa Marta corrobora el periodo de retorno de diseño del canal, el cual conduce adecuadamente las aguas hasta el Rio Mapocho.

**Tabla 5-5 Escorrentía en Subcuencas, modelación SWMM-Situación Actual. Canal Santa Marta**

```

*****
Resumen de Escorrentía en Subcuencas
*****

```

Subcuenca	Precip Total mm	Aporte Total mm	Evap Total mm	Infil Total mm	Escor. Total mm	Escor. Total 10 <sup>6</sup> ltr	Escor. Punta LPS	Coef. Escor.
ASAM5	79.272	0.000	0.000	31.709	47.476	71.747	1243.226	0.599
Vivaceta	79.272	0.000	0.000	15.854	63.204	15.561	267.742	0.797
SilviaCarvallo	79.272	0.000	0.000	15.854	63.143	44.832	768.072	0.797
HectorFuenzalida	79.272	0.000	0.000	15.854	63.304	12.484	216.342	0.799
R78	79.272	0.000	0.000	44.392	34.853	32.762	569.684	0.440
A1998	79.272	0.000	0.000	35.672	43.529	49.859	864.742	0.549
MorroArica	79.272	0.000	0.000	15.854	63.261	9.173	158.494	0.798
ASAM9	79.272	0.000	0.000	23.782	55.449	19.014	330.626	0.699
LasNaciones	79.272	0.000	0.000	15.854	61.968	83.484	1355.242	0.782
Elconquistador	79.272	0.000	0.000	19.818	59.173	35.268	603.184	0.746
ASAM4	79.272	0.000	0.000	35.672	43.474	173.896	2998.745	0.548
Sistema	79.272	0.000	0.000	29.971	49.018	548.078	9376.102	0.618

**Tabla 5-6 Niveles en nudos, modelación SWMM-Situación Actual. Canal Santa Marta**

```

*****
Resumen de Nivel en Nudos
*****

```

Nudo	Tipo	Nivel Medio Metros	Nivel Máximo Metros	Altura Máxima Metros	Instante Nivel Máx. días hr:min
SAM4	JUNCTION	1.74	2.80	488.60	0 00:00
SAM5	JUNCTION	1.54	2.19	481.19	0 00:04
SAM6	JUNCTION	1.40	2.02	474.62	0 00:06
SAM7	JUNCTION	1.44	1.94	464.54	0 00:10
SAM8	JUNCTION	1.15	1.67	461.87	0 00:10
SAM9	JUNCTION	1.10	1.90	459.40	0 00:11
SAM10	JUNCTION	1.39	2.87	446.97	0 00:14
610	JUNCTION	1.95	2.32	485.12	0 00:02
700	JUNCTION	1.90	2.15	484.35	0 00:03
800	JUNCTION	1.74	2.39	484.19	0 00:03
1219	JUNCTION	1.93	2.27	481.57	0 00:04
1500	JUNCTION	1.51	2.40	479.20	0 00:05
1700	JUNCTION	1.59	2.76	477.36	0 00:05
2642	JUNCTION	1.66	2.13	468.53	0 00:09
1998	JUNCTION	1.66	2.66	474.26	0 00:07
3500	JUNCTION	1.44	2.06	460.86	0 00:10
3900	JUNCTION	1.22	1.96	456.86	0 00:12
4360	JUNCTION	1.02	1.62	452.82	0 00:13
4500	JUNCTION	1.06	1.93	451.03	0 00:13
4700	JUNCTION	1.06	2.15	448.75	0 00:14
5005	JUNCTION	1.20	2.51	445.21	0 00:14
5035	JUNCTION	1.07	2.73	444.73	0 00:15
5380	OUTFALL	1.07	2.14	433.84	0 00:15

## 5.5. Soluciones Planteadas y modelación SWMM

### COLECTOR 5 ABRIL

La propuesta para el colector 5 de Abril consiste en el diseño de un nuevo colector de aguas lluvias, separado del sistema de alcantarillado. A fin de determinar las características necesarias la nueva infraestructura, se simula la creación de un colector separado paralelo al existente, que conduzca únicamente el agua lluvia, así la infraestructura existente se destina exclusivamente a conducción de aguas servidas. El nuevo colector se modela con características similares al existente pero modificando el diámetro a 0.8 [m] en el tramo comprendido entre el nodo C1138 y C1172, y desde este punto hasta el término del colector 5 de abril se aumenta el diámetro a 1 [m]. Se corrige además la pendiente negativa, modificando la cota de fondo del nodo C1131 a 466.8 [msnm].

Al incluir estas modificaciones en la modelación del sistema Rinconada, la red es capaz de portear la escorrentía producto de la precipitación futura de periodo de retorno 2 años, no obstante se generan volúmenes de inundación menores para la tormenta futura de 10 años de periodo de retorno.

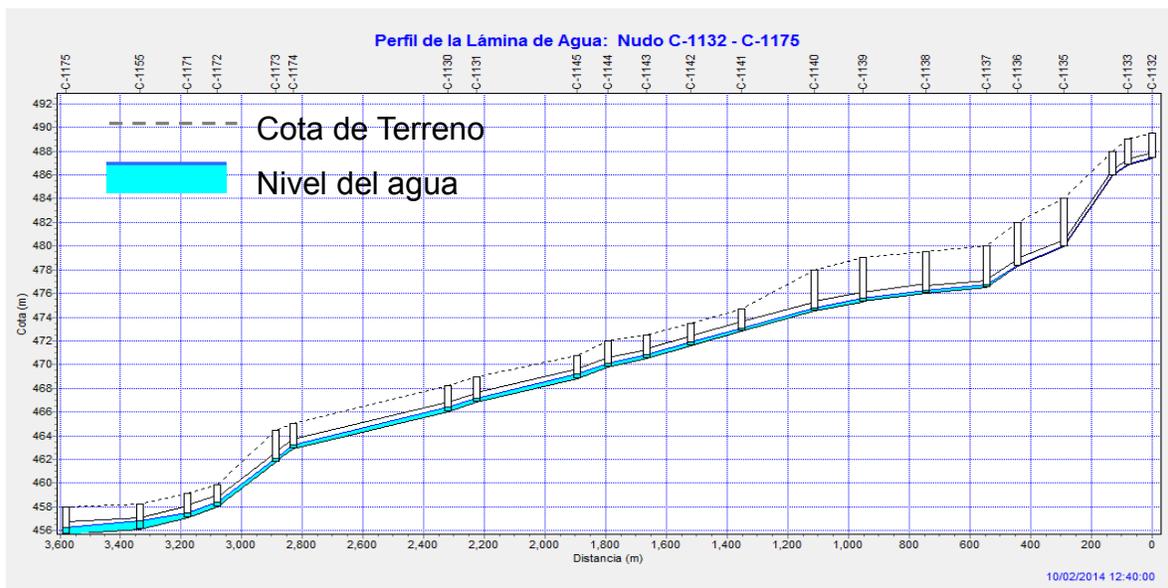


Figura 5-10 Perfil del colector 5 de Abril en instante de mayor sollicitación. T=2años

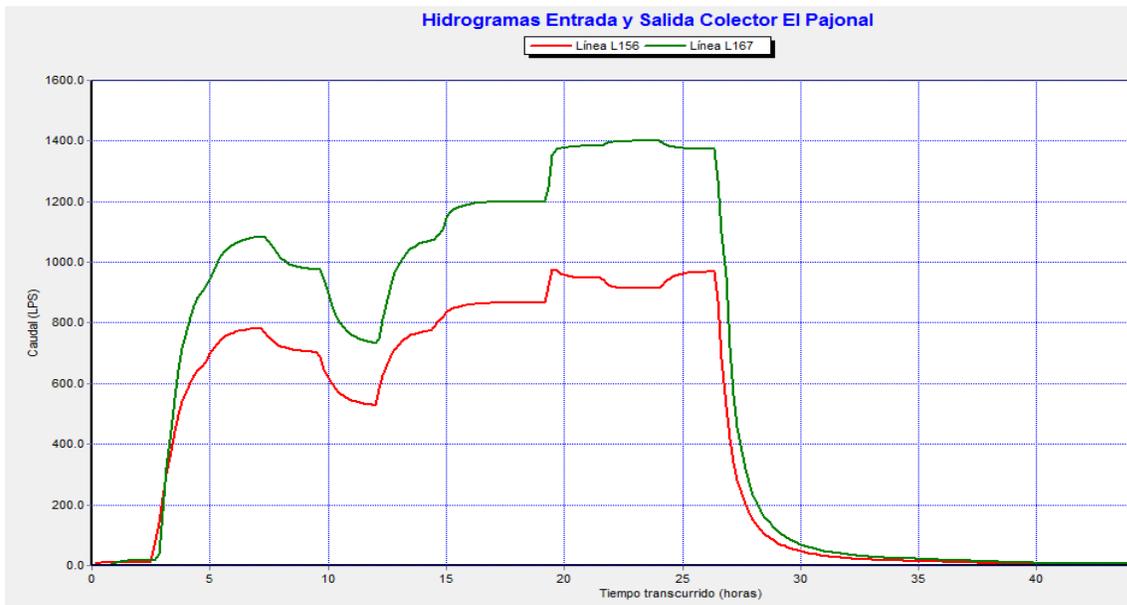
## COLECTOR EL PAJONAL

Respecto de lo obtenido en la modelación de la situación actual, se concluye que el principal problema de este sistema es el gran tamaño de la cuenca aportante a la primera cámara aguas arriba del colector, lo cual genera inundación en al inicio del colector. Esto provoca que el colector comience transportando el caudal máximo, disminuyendo la capacidad de porteo hacia aguas abajo.

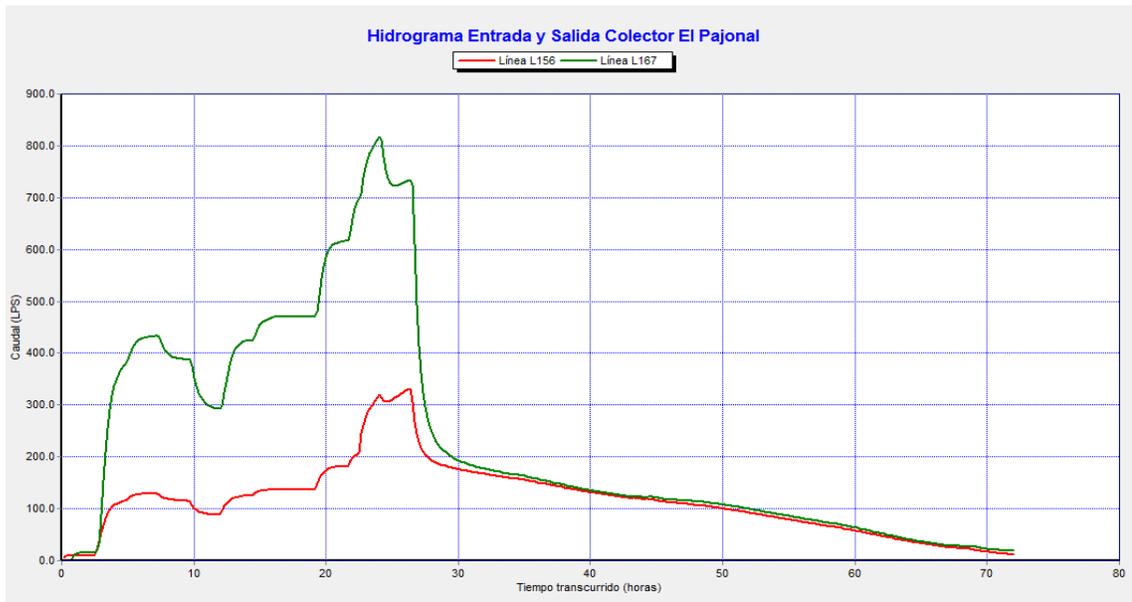
En este contexto se propone la implementación de un Estanque de Retención en la zona inmediatamente aguas arriba de la primera cámara del colector, donde existen terrenos baldíos para una eventual construcción (ver imágenes en Anexo).

El estanque de retención se modela siguiendo las recomendaciones del Manual de Drenaje Urbano, y obteniendo un volumen de almacenamiento de 20.000 m<sup>3</sup> y una curva de descarga igual a  $Q_d = 0.339 * h^{0.5}$  donde  $h$  corresponde a la altura de agua en el estanque.

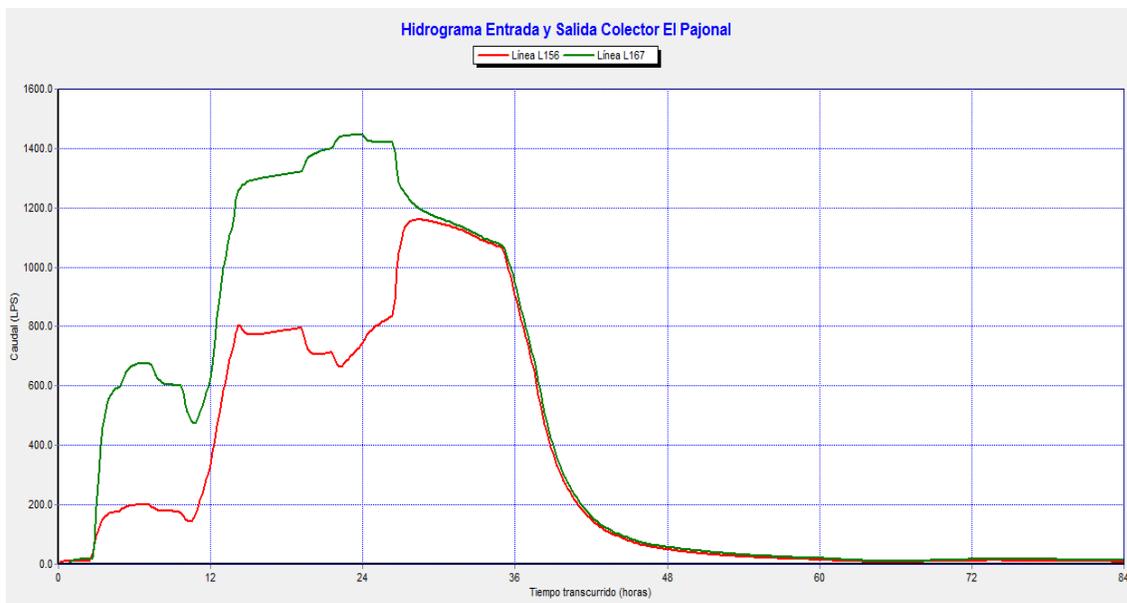
Al incorporar esta obra al modelo SWMM se obtuvo los hidrogramas de entrada y salida al colector para precipitaciones de periodo de retorno 2 y 10 años (Figura 5-12 y Figura 5-13), los cuales comparados con el hidrograma obtenido en la situación actual, Figura 3-1, evidencian la disminución del caudal peak desde 1400 [l/s] a 800 [l/s], no obstante el tiempo en alcanzar el caudal peak es similar. La modelación indica que no existen volúmenes de inundación para la precipitación asociada al periodo de retorno 2 años, no obstante para periodos de retorno de 10 años el estanque no es suficiente, accionando el vertedero de seguridad que descarga hacia el mismo colector en forma superficial. En este se generan volúmenes de inundación de 647 m<sup>3</sup>, en un tiempo de 4 horas.



**Figura 5-11 Hidrograma entrada y salida del colector El Pajonal, Situación Actual. T=2 años**



**Figura 5-12 Hidrograma entrada y salida del colector El Pajonal, implementando el estanque de retención. T=2 años**

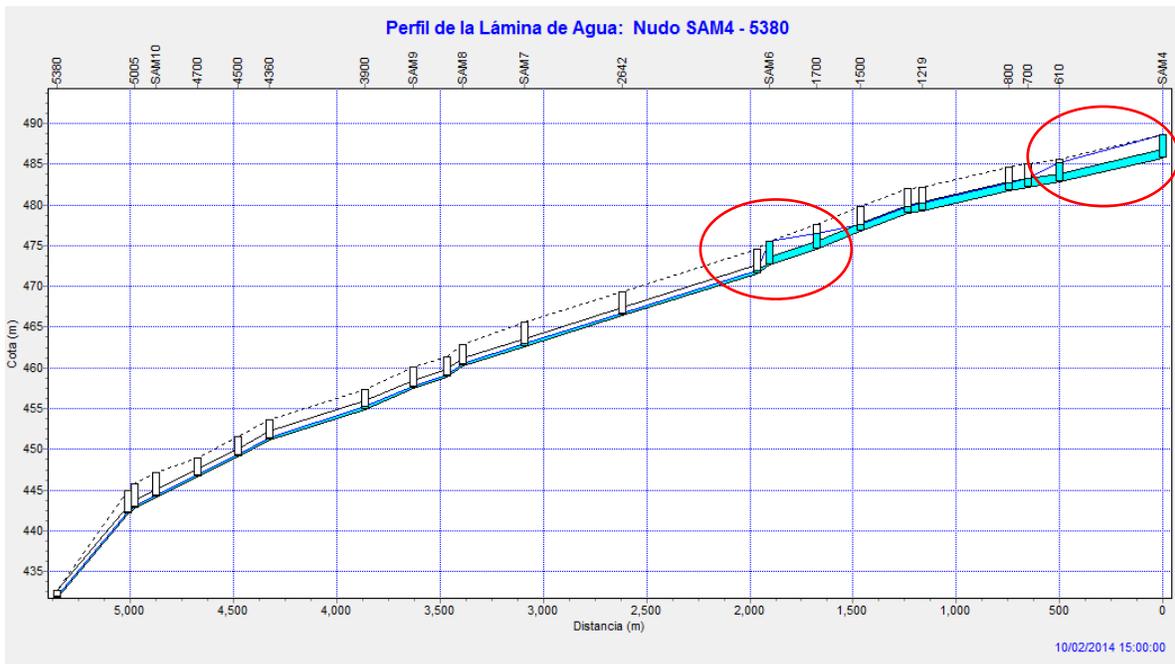


**Figura 5-13 Hidrograma entrada y salida del colector El Pajonal, implementando el estanque de retención.  
T=10 años**

## CANAL SANTA MARTA

Considerando que la modelación del canal Santa Marta en la situación actual no generó inundaciones producto de la tormenta de diseño de periodo de retorno 2 y 10 años, se modela el canal sujeto a obstrucciones en la sección transversal, con el fin de simular el efecto de desechos y/o basura depositada a lo largo del canal.

En este caso se generan volúmenes de inundación en la zona en que el canal atraviesa la ruta 78, camino a Melipilla. Sumado a lo anterior, en este punto del canal existe una curva en 90° que aumenta el riesgo de rebase de canal.



**Figura 5-14 Perfil del Canal Santa Marta en instante de mayor sollicitación. T=10años**

## CAPÍTULO 6: Comentarios y Conclusiones

Respecto del estudio de proyecciones climáticas, se obtuvo que el modelo Mk3.6, para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, indica una disminución a futuro del número de días con eventos de las precipitaciones de baja intensidad. Sin embargo, es importante mencionar la sensibilidad de este resultado al ajuste de funciones de transferencias determinadas en el proceso de downscaling. Considerando la variabilidad de intensidad de precipitaciones a lo largo del año, se requiere un escalamiento de las precipitaciones diarias para cada mes para evitar no considerar precipitaciones menores en el periodo.

En cuanto al modelo Mk 3.6 se recalca la variabilidad entre las distintas series que el modelo incluye (*ensemble*). Esto impide concluir una tendencia clara de las precipitaciones estimadas por el modelo climático luego del análisis de frecuencia, dado que la incertidumbre del modelo engloba las precipitaciones estimadas en base al registro en estaciones meteorológicas. A pesar que aquello, el valor promedio de las precipitaciones de los *ensemble* considerados representativos indica, según el escenario RCP2.6, un aumento del orden de 5 [mm] en la precipitación de periodo de retorno 2 años, y un incremento menor, del orden de 2 [mm] para periodo de retorno 10 años.

Las diferencias encontradas entre las precipitaciones máximas diarias estimadas en base a información histórica de estaciones meteorológicas versus las determinadas incorporando proyecciones climáticas, no son relevantes para efectos del diseño de obras de evacuación y drenaje de aguas lluvias debido a que el modelo CSIRO MK3.6 indica un aumento de precipitación menor a 10 mm respecto de la precipitación máxima diaria en Estación Quinta Normal, variable que para periodos de retorno de 2 y 10 años aumentaría en 7 y 4 mm específicamente.

A lo anterior se debe añadir que el modelo climático contiene información a nivel diario como menor escala temporal, no obstante para drenaje urbano resulta más interesante el análisis de las variaciones a nivel horario que el cambio climático pudiese concebir. Por lo anterior los resultados obtenidos están condicionados por el método de desagregación horaria de la precipitación.

Como se mencionó anteriormente, se desarrolló un modelo de simulación basado en el software SWMM, con las especificaciones necesarias para representar la escorrentía de la zona de estudio. La evaluación de la red de colectores en condiciones actuales permitió determinar la magnitud de sus deficiencias y, en el caso que las hubiere, su posterior solución.

Queda en evidencia que el alto crecimiento de la comuna de Maipú ha aumentado la exigencia de la red de drenaje de aguas lluvias, sumado a que producto de la misma urbanización se dispone de menos espacios para la búsqueda de alternativas de mejoramiento. Este es el caso de lo ocurrido en el colector 5 de Abril donde se opta por el diseño de un nuevo colector de aguas lluvias.

De lo obtenido para el canal Santa Marta, cabe recalcar la relevancia de la mantención de este tipo de obras para el adecuado funcionamiento de las mismas. En mayo del presente año la Municipalidad de Maipú ha llevado a cabo una exhaustiva limpieza de este canal, lo que según el análisis realizado debiera bastar para evitar inundaciones producto del rebase de esta obra.

Se destaca la implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible para solventar deficiencias de un sistema de drenaje predefinido. El estanque de Retención modelado para el sistema el pajonal logra disminuir el caudal peak en un 40%, evitando inundaciones en los alrededores. Sin la incorporación de obras de mejoramiento el colector pajonal presenta en el nodo de entrada un caudal peak de  $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$  para dos años de periodo de retorno, el cual disminuye a  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$  considerando el estanque de retención diseñado. Verificando el estanque para 10 años de periodo de retorno se obtiene un caudal máximo del orden de  $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , equivalente al simulado para dos años de periodo de retorno sin mejoras.

## CAPÍTULO 7: **Bibliografía**

(EPA), U. E. (s.f.). (2005). Manual del Usuario, SWMM Modelo de Gestión de Aguas Pluviales 5.0 vE. (GMMF, Trad.)

Berne, A. (2004). Temporal and spatial resolution rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, 299(3-4), 166-179.

Berroeta B, J. S. (Octubre de 2003). Modelación de redes de aguas servidas área tributaria a planta de tratamiento. XV CONGRESO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL AIDIS – CHILE. Concepción, Chile.

Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). (2013). Manual de Drenaje Urbano. Santiago. Obtenido de [www.doh.gov.cl/manualdrenajeurbano](http://www.doh.gov.cl/manualdrenajeurbano)

Frick, J. (2007). Efectos ambientales en los suelos del sector poniente de Santiago como consecuencia del proceso de expansión urbana. Memoria para optar al título profesional de geógrafo, Universidad de Chile.

Gómez, T. I. (2013). Evaluación del Impacto del Cambio Climático en Centrales Hidroeléctricas de la cuenca del Alto Cachapoal. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.

Cortés G., (2012). Assessment of the current climate and expected climate changes in the Metropolitan Region of Santiago de Chile. Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Report 03. Department of Urban and Environmental Sociology.

Huff. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resource Research*, 3(4), 1007-1019.

Ifarle Ingenieros Civiles Consultores Ltda. , Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). (2003) Estudio de factibilidad y diseño definitivo de la red primaria de aguas lluvias sistema Gran Avenida – Ochagavía -Espejo – Santa Marta., Región Metropolitana.

Ilustre Municipalidad de Maipú. (2004). Memoria Explicativa Plan Regulador Comunal de Maipú. Santiago.

Ilustre Municipalidad de Maipú, Secretaría Comunal de Planificación. (2002). Estudio de Riesgos y de Protección Ambiental PRC de Maipú. Santiago de Chile.

Ilustre Municipalidad de Maipú, Secretaría comunal de planificación. (2013). Maipú 2013: Indicadores y tendencias generales de desarrollo. Santiago de Chile.

IPCC Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. 2007. Cuarto informe de evaluación del Cambio Climático.

Langeveld, J. (2013). Climate change and urban wastewater infrastructure: There us more to explore. Journal of Hydrology, 112-119.

Lee, T. R. (2000). Urban water management for beter urban life in Latin America. Urban Water 2, 2, 71-78.

Muñoz, J. (2003). Incorporación de la incertidumbre en el diseño de una red de drenaje de aguas lluvias. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.

Otondo, I. (2004). Validación de campos de precipitación y su desagregación mediante análisis multi-escalar. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de Ingeniería Mención Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.

Willems P., K. A.-N. (2012). Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric Research*, 106 - 118.

U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service (1986) Urban hydrology for small watersheds, U.S. Department of Agriculture Soil Conservation, Service tech release No. 55, June.

Varas E. C. (1985) Hietogramas de tormentas de diseño Anales VII Congreso Nacional del Agua de Chile – Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. pp 533-548.

Varas E. C. (1986) Comparación entre perfiles de tormentas, XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica – AHIR - IARH – AIPH. Volumen II pp 41-50 del 31 de Agosto al 4 de Septiembre.

Zuñiga, P. (2003). Instrumentación y control de un sistema de aguas lluvias Gran Avenida - Ochagavía - Lo Espejo - Santa Marta. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.

Wilby, RL, Dawson, CW, & Barrow, EM. 2002. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 145–157.

# **ANEXOS**

## ANEXO A. Proceso Escalamiento Datos

**Distancia en kilómetros entre Grilla del modelo Mk3.6 y las estaciones meteorológicas de interés**

			<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>
		UTM Este	288947	464828	465577	293441
		UTM Norte	6386163	6388338	6181541	6179306
<b>Quinta Normal</b>	UTM Este	343585	103,626	151,131	168,733	128,955
	UTM Norte	6298112				
<b>Fundo Marruecos</b>	UTM Este	331136	108,822	168,454	170,162	113,017
	UTM Norte	6285852				
<b>Terraza Oficinas Centrales DGA</b>	UTM Este	346948	106,040	148,885	165,814	129,643
	UTM Norte	6297392				
<b>Río Mapocho Rinconada de Maipú</b>	UTM Este	331031	103,270	164,955	173,989	118,662
	UTM Norte	6291857				

## ANEXO B. Validación de funciones de transferencia. Series máximas anuales Precipitación diarias

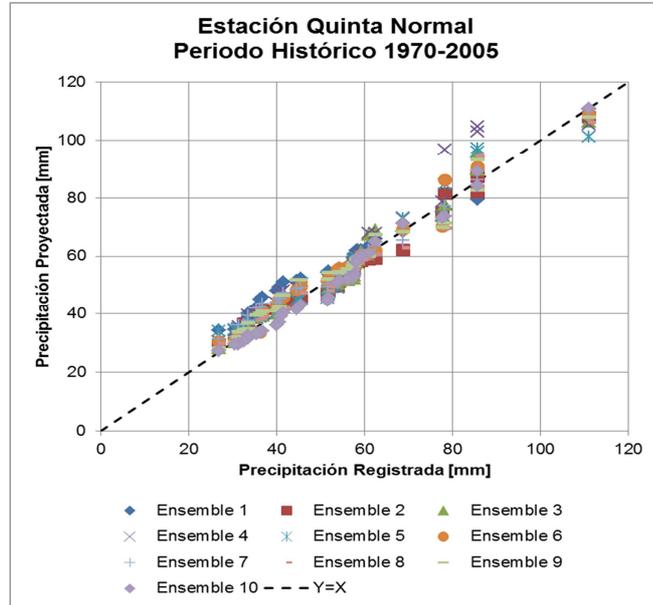


Figura 1 Verificación del Proceso de escalamiento Estación Quinta Normal

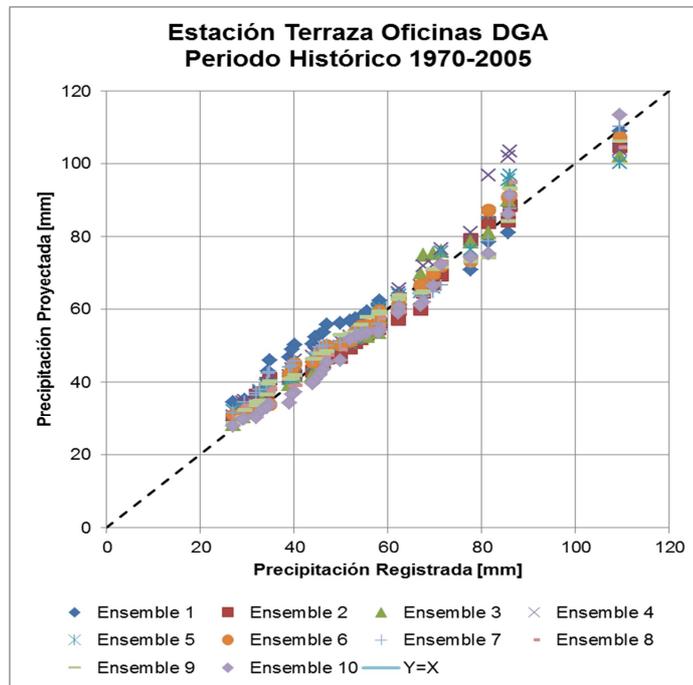
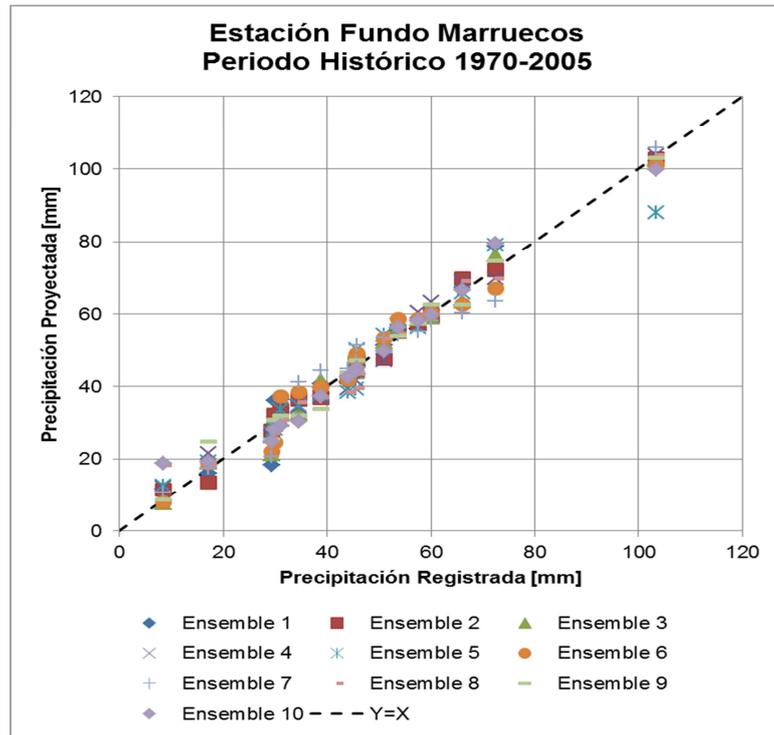


Figura 2 Verificación del Proceso de escalamiento Estación Terraza DGA



**Figura 3 Verificación del Proceso de escalamiento Estación Fundo Marruecos**



**Tabla 2 Resultados análisis de frecuencia estación Terrazas Oficinas Centrales DGA**

Período Histórico		P max 24 [mm]													
1970-2013		Ajuste Pp:		Log-Normal		Pearson		Log-Normal		Gumbel					
Promedio	Max Hist	Min Hist	T [años]	Pexc [%]	Ensemble 1	Ensemble 2	Ensemble 3	Ensemble 4	Ensemble 5	Ensemble 6	Ensemble 7	Ensemble 8	Ensemble 9	Ensemble 10	
45,2	42,6	47,5	2	50	46,3	44,5	46,3	46,1	45,4	46,2	45,3	42,7	45,3	42,6	
65,0	62,8	67,4	5	20	65,7	64	65,7	67,4	64,4	65	64,2	62,8	65,6	63,5	
78,1	76,6	82,3	10	10	80,3	76,9	77,2	82,3	77,3	76,6	77	76,9	79	77,4	
107,1	99,9	116,7	2	50	110,3	105,4	99,9	116,7	106,6	100,2	106,1	109,7	108,5	107,8	
119,5	108,7	132,0	1	100	123,4	117,4	108,7	132	119,4	109,5	118,8	124,3	121	120,7	
P max 24 [mm]															
RCP 2.6 2014-2055															
Promedio/Min RCP 2. Max RCP 2.		Ajuste Pp:		Log-Normal		Ajuste Gráfico		Log-Normal		Pearson		Log-Normal		Gumbel	
Promedio	Min	Max	T [años]	Pexc [%]	Ensemble 1	Ensemble 2	Ensemble 3	Ensemble 4	Ensemble 5	Ensemble 6	Ensemble 7	Ensemble 8	Ensemble 9	Ensemble 10	
45,0	39,8	51,2	2	50	51,2	39,8	43,2	39,9	41,5	49,0	50,5	44,6	50,3	39,8	
65,0	53,0	77,5	5	20	72,2	53,3	62,4	53	69,2	64,7	72,1	62,8	77,5	62,5	
82,7	61,5	120,8	10	10	86,5	62	120,8	61,5	90,4	73,3	84,5	75,2	95,5	77,5	
114,6	79,7	176,3	2	50	118,6	81	176,3	79,7	144,7	89,1	108,2	103,1	135	110,6	
127,9	87,4	195,3	1	100	132,5	89	195,3	87,4	170,9	94,9	117,1	115,2	151,8	124,6	
P max 24 [mm]															
RCP 8.5 2014-2055															
Promedio		Ajuste Pp:		Log-Normal		Ajuste Gráfico		Log-Normal		Normal		Log-Normal		Gumbel	
Min	Max	T [años]	Pexc [%]	Ensemble 1	Ensemble 2	Ensemble 3	Ensemble 4	Ensemble 5	Ensemble 6	Ensemble 7	Ensemble 8	Ensemble 9	Ensemble 10		
42,3	33,8	55,9	50	2	50,7	40,6	40,2	35,9	45,7	40,0	38,6	33,8	55,9	41,9	
61,9	48,9	78,5	20	5	72,2	62,2	52,2	48,9	73,3	63,4	54,6	50,8	78,5	62,6	
77,1	60,2	91,6	10	10	86,8	76,4	87,1	60,2	91,6	75,7	63,0	62,7	90,3	77,2	
109,7	77,8	160,3	2	50	120,0	107,8	160,3	94,6	131,9	90,8	77,8	91,0	111,0	111,7	
127,2	83,0	210,5	1	100	134,6	121,1	210,5	114,3	148,9	110,4	83,0	103,8	118,3	127,2	

## ANEXO D. Dimensionamiento Sistema Rinconada

AREA TRIBUTARIA RINCONADA					
COLECTOR RINCONADA					
Tramo		Diametro	Longitud	Pendiente	
Inicio	Fin	[mm]	[m]	[m/m]	
1175	- 1156	1000	540.00	0.0084	
1156	- 1157	1000	130.00	0.0019	
1157	- 1162	1000	490.00	0.0047	
1162	- 1163	1000	270.00	0.0039	
1163	- 1164	1200	175.00	0.0052	
1164	- 1165	1200	310.00	0.0030	
1165	- 1167	1200	100.00	0.0016	
1167	- 1168	1200	70.00	0.0050	
1168	- 1169	1200	90.00	0.0033	
1169	- 1170	1200	130.00	0.0028	
COLECTOR 4 PONIENTE					
Tramo		Diametro	Longitud	Pendiente	
Inicio	Fin	[mm]	[m]	[m/m]	
1158	- 1159	1000	150.00	0.0021	
1159	- 1160	1000	280.00	negativa	
1160	- 1161	1000	90.00	0.0000	
1161	- 1162	1000	120.00	0.0041	
COLECTOR BORGÑO					
Tramo		Diametro	Longitud	Pendiente	
Inicio	Fin	[mm]	[m]	[m/m]	
1127	- 1146	800	60.00	0.0207	
1146	- 1147	800	100.00	0.0058	
1147	- 1148	800	130.00	0.0105	
1148	- 1149	1000	130.00	0.0006	
1149	- 1150	1000	105.00	0.0047	
1150	- 1151	1000	115.00	0.0024	
1151	- 1152	1000	200.00	0.0039	
1152	- 1153	1000	115.00	0.0038	
1153	- 1159	1000	550.00	0.0116	
COLECTOR 5 ABRIL - CHACABUCO					
Tramo		Diametro	Longitud	Pendiente	
Inicio	Fin	[mm]	[m]	[m/m]	
1132	- 1133	500	80.00	0.0069	
1133	- 1134	500	50.00	0.0194	
1134	- 1135	500	160.00	0.0375	
1135	- 1136	600	155.00	0.0099	
1136	- 1137	600	100.00	0.0181	
1137	- 1138	600	200.00	0.0028	
1138	- 1139	600	210.00	0.0034	
1139	- 1140	400	160.00	0.0046	
1140	- 1141	400	240.00	0.0072	
1141	- 1142	400	165.00	0.0074	
1142	- 1143	400	145.00	0.0074	
1143	- 1144	400	130.00	0.0055	

1144	-	1145	400	100.00	0.0676
1145	-	1131	400	330.00	negativa
1131	-	1130	500	95.00	0.0047
1130	-	1174	500	510.00	0.0081
1174	-	1173	500	60.00	0.0178
1173	-	1172	500	190.00	0.0091
1172	-	1171	500	100.00	0.0088
1171	-	1155	500	155.00	0.0063
1155	-	1175	500	245.00	0.0017
COLECTOR DIEGO PORTALES					
Tramo		Diametro	Longitud	Pendiente	
Inicio		Fin	[mm]	[m]	[m/m]
1090	-	1091	500	290.00	0.0032
1091	-	1092	500	130.00	0.0061
1092	-	1093	500	180.00	0.0032
1093	-	2003	500	90.00	0.0076
2003	-	2004	500	580.00	0.0076
2004	-	1094	500	130.00	0.0076
1094	-	1095	500	125.00	0.0056
1095	-	1096	500	140.00	0.0081
1096	-	1097	500	70.00	0.0089
1097	-	1098	500	95.00	0.0073
1098	-	1099	500	110.00	0.0072
1099	-	1100	500	125.00	0.0078
1100	-	1101	500	350.00	0.0080
1101	-	1102	500	165.00	0.0119
1102	-	1103	500	160.00	0.0057
1103	-	1104	500	75.00	0.0052
1104	-	1105	500	50.00	0.0020
1105	-	1106	400	150.00	0.0054
1106	-	1107	400	290.00	0.0055
1107	-	1108	400	160.00	0.0071
1108	-	1109	400	130.00	0.0055
1109	-	1111	400	180.00	0.0083
1111	-	1120	400	115.00	0.0034
1120	-	1121	600	175.00	0.0046
1121	-	1122	600	260.00	0.0093
1122	-	2006	600	85.00	0.0040
2006	-	1123	600	130.00	0.0039
1123	-	1124	600	50.00	0.0022
1124	-	1125	600	120.00	0.0036
1125	-	1126	600	200.00	0.0036
1126	-	1127	700	170.00	0.0045
COLECTOR NUEVA SAN MARTIN					
Tramo		Diametro	Longitud	Pendiente	
Inicio		Fin	[mm]	[m]	[m/m]
1534	-	1533	500	140.00	0.0097
1533	-	1532	500	250.00	0.0108
1532	-	1531	600	280.00	0.0098
1531	-	1530	800	290.00	0.0027
1530	-	2007	500	850.00	0.0025
2007	-	2008	500	50.00	0.0026

2008	-	1119	500	180.00	0.0025
1119	-	1118	500	130.00	0.0082
1118	-	1117	500	170.00	0.0109
1117	-	1116	500	130.00	0.0060
1116	-	1115	500	150.00	0.0049
1115	-	1114	500	330.00	0.0050
1114	-	2005	500	90.00	0.0050
2005	-	1113	500	110.00	0.0051
1113	-	1112	500	90.00	0.0072
1112	-	1110	500	115.00	0.0080
1110	-	1111	500	13.00	0.0192

COLECTOR RINCONADA				
Cámara	Cota Terreno	Cota Fondo	Área Aportante	Impermeabilización de la cuenca
Número	[msnm]	[msnm]	[ha]	[%]
1175	458.0	455.7	77	60
1156	454.0	451.2	13	60
1157	453.8	450.9	8	75
1162	451.4	448.6	6	75
1163	450.3	447.6	7	75
1164	449.2	446.7	14	65
1165	448.0	445.7	0	0
1167	447.9	445.6	0	0
1168	447.6	445.2	0	0
1169	447.3	444.9	0	0
1170	446.9	444.6	0	0
COLECTOR 4 PONIENTE				
Cámara	Cota Terreno	Cota Fondo	Área Aportante	Impermeabilización de la cuenca
Número	[msnm]	[msnm]	[ha]	[%]
1158	451.81	449.67	18	80
1159	451.6	449.35	9	80
1160	452.1	449.55	11	77
1161	451.8	449.55	4	77
1162	451.36	448.64	6	75
COLECTOR BORGÑO				
Cámara	Cota Terreno	Cota Fondo	Área Aportante	Impermeabilización de la cuenca
Número	[msnm]	[msnm]	[ha]	[%]
1127	464.9	461.5	5.6	77
1146	464.1	460.2	4.7	80
1147	463.0	459.6	17.7	77
1148	461.2	458.2	15.4	77
1149	460.3	458.0	9.4	10
1150	459.5	457.5	1.5	70

1151	459.0	457.1	1.6	70
1152	458.1	456.2	17.6	70
1153	457.8	455.8	18.1	77
1159	451.6	449.4	9.3	80
<b>COLECTOR 5 ABRIL - CHACABUCO</b>				
<b>Cámara</b>	<b>Cota Terreno</b>	<b>Cota Fondo</b>	<b>Área Aportante</b>	<b>Impermeabilización de la cuenca</b>
<b>Número</b>	<b>[msnm]</b>	<b>[msnm]</b>	<b>[ha]</b>	<b>[%]</b>
1132	489.5	487.4	3.1	71
1133	489.0	486.8	2.4	72
1134	488.0	485.9	3.7	53
1135	484.0	479.9	5.6	37
1136	482.0	478.3	4.1	13
1137	480.0	476.5	7.7	26
1138	479.5	476.0	26.8	52
1139	479.0	475.3	9.6	54
1140	478.0	474.5	18.1	42
1141	474.7	472.8	8.5	55
1142	473.5	471.6	3.1	55
1143	472.5	470.5	18.3	55
1144	472.0	469.8	13.3	32
1145	471.0	468.8	5.8	48
1131	469.0	466.8	7.3	27
1130	469.5	467.0	8.6	37
1174	465.0	462.9	8.3	43
1173	464.5	461.8	15.9	29
1172	459.9	458.0	21.6	56
1171	459.1	457.1	4.2	48
1155	458.2	456.1	27.4	60
1175	458.0	455.7	77.3	60
<b>COLECTOR DIEGO PORTALES</b>				
<b>Cámara</b>	<b>Cota Terreno</b>	<b>Cota Fondo</b>	<b>Área Aportante</b>	<b>Impermeabilización de la cuenca</b>
<b>Número</b>	<b>[msnm]</b>	<b>[msnm]</b>	<b>[ha]</b>	<b>[%]</b>
1090	499.8	496.3	13.8	77
1091	498.9	495.3	16.9	77
1092	497.5	494.4	9.5	77
1093	496.5	493.7	8.9	77
2003	495.9	492.9	21.9	60
2004	491.5	488.4	36.6	10
1094	490.5	487.3	11.0	5
1095	490.0	486.5	10.2	10
1096	488.5	485.3	5.3	75
1097	488.0	484.6	1.1	75
1098	487.2	483.8	3.0	75
1099	486.3	482.9	3.1	75
1100	485.1	481.8	4.3	77

1101	482.8	478.9	14.7	55
1102	481.0	476.8	12.7	77
1103	479.5	475.8	9.0	77
1104	479.1	475.3	4.0	80
1105	479.1	475.1	18.5	80
1106	477.2	474.2	11.3	80
1107	474.9	472.5	4.0	65
1108	473.8	471.3	9.2	55
1109	473.2	470.5	6.7	70
1111	471.5	468.9	2.5	77
1120	470.3	468.4	7.5	70
1121	469.3	467.4	10.5	70
1122	467.2	464.9	8.4	80
2006	466.9	464.5	3.6	80
1123	466.0	463.8	12.7	60
1124	465.9	463.6	7.1	60
1125	465.5	463.1	7.0	77
1126	465.0	462.4	9.4	77
1127	464.9	461.5	5.6	77
COLECTOR NUEVA SAN MARTIN				
Cámara	Cota Terreno	Cota Fondo	Área Aportante	Impermeabilización de la cuenca
Número	[msnm]	[msnm]	[ha]	[%]
1534	492.9	488.6	40.0	0
1533	491.0	487.2	3.1	60
1532	489.0	484.5	6.7	60
1531	486.5	481.7	9.9	60
1530	486.0	480.9	6.5	60
2007	484.0	478.7	6.0	60
2008	483.9	478.5	2.1	60
1119	481.2	478.0	5.3	60
1118	480.1	476.9	3.6	79
1117	478.2	475.0	8.4	30
1116	477.2	474.1	14.9	77
1115	476.5	473.3	15.2	77
1114	474.0	471.6	38.6	60
2005	474.0	471.1	9.0	80
1113	473.2	470.5	21.0	80
1112	472.4	469.8	4.0	80
1110	471.7	468.8	6.1	80
1111	471.5	468.5	2.5	77

## ANEXO E. Dimensionamiento Colector El Pajonal

AREA TRIBUTARIA EL PAJONAL (PAJ)						
COLECTOR ALASKA						
Tramo			Diametro	Longitud	Pendiente	
Inicio		Fin	[mm]	[m]	[m/m]	
1260	-	1261	1000	130.00	0.0007	0.630
1261	-	1262	1000	115.00	0.0019	1.048
1262	-	1263	1000	145.00	0.0021	1.110
1263	-	1264	1000	110.00	0.0016	0.971
1264	-	1265	1000	120.00	0.0014	0.904
1265	-	1266	1000	110.00	0.0016	0.971
1266	-	1267	1000	110.00	0.0013	0.855
1267	-	1268	1000	115.00	0.0010	0.774
1268	-	1269	1000	165.00	0.0028	1.267
1269	-	1270	1000	80.00	0.0064	1.916
1270	-	1271	1000	110.00	0.0001	0.228
1271	-	1272	1000	85.00	0.0022	1.135

Cámara	Cota Terreno	Cota Fondo	Área Aportante	Impermeabilización de la cuenca
Número	[msnm]	[msnm]	[ha]	[%]
1260	478.49	476.04	132	70
1261	478.47	475.95	58	40
1262	478.25	475.73	19	70
1263	477.78	475.42	5	70
1264	477.43	475.24	7	70
1265	477.35	475.07	3	70
1266	477.31	474.89	4	70
1267	477.12	474.75	4	70
1268	476.35	474.63	0	
1269	476.10	474.17	0	
1270	475.40	473.66	0	
1271	475.36	473.65	0	
1272	475.40	473.46	0	

## ANEXO F. Dimensionamiento Canal Santa Marta

**Tabla 3 División de Tramos en el Canal Santa Marta.**

TRAMO	NODO INICIO	INICIO		FIN		Q diseño (m <sup>3</sup> /s)
		Km	Descripción	Km	Descripción	
I-A	SAM-4	0,00	Descarga Canal Lo Espejo	1,9	Camino a Melipilla	65,0
I-B	SAM-6	1,9	Camino a Melipilla	3,04	Balmaceda	67,0
II-A	SAM-7	3,04	Balmaceda	4,36	Las Naciones	69,0
II-B		4,36	Las Naciones	5,4	Descarga río Mapocho	72,5

**Tabla 4 Secciones Típicas Proyectadas.**

Nº	KM	Tipo	B <sub>total</sub> (m)	k	i (%)	n	H <sub>rev</sub> (m)	h <sub>máx</sub> (m)	R <sub>mín</sub> (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	V <sub>máx</sub> (m/s)	Fr <sub>máx</sub>	OBSERVACIONES
1	0,000-0,040				3.5								Empalme provisorio de tierra con obras existentes
2	0,060-1,199	T	5.0	0.67	0.55	0.0237	2.8	2.49	0.31	65.0	4.89	0.99	
3	1,219-1,280	CD	6.0	0	0.55	0.0150	3.0	2.39	0.61	65.0	4.74	1.00	Curva que cruza calle 3 Poniente
4	1,300-1,840	T	6.0	0.67	0.55	0.0225	2.6	2.31	0.29	65.0	4.63	0.99	
5	1,860-1,997	R	7.2	0	0.55	0.0150	2.2-2.4	2.31	0.09	67.0	4.51	1.00	Incluye Mejoramiento cruce actual Camino a Melipilla
6	2,017-3,040	CD	6.0	0	0.50	0.0150	3.0	2.96	0.04	67.0	4.80	1.00	
7	3,060-3,669	T	6.0	0.67	0.50	0.0228	2.6	2.31	0.29	69.0	4.73	0.99	
8	3,679-4,904	T	8.0	0.67	0.4	0.0212	2.4-3.5	3.33	0.17	69.0	4.39	0.99	
9	4,934-5,013	CD	6.0	0	0.55	0.0150	3.0	2.55	0.45	72.5	4.92	1.00	Incluye cruce actual de Autopista del Sol
12	5,013-5,359	T	6.0	0.67	0.55	0.0240	3.0	2.649	0.36	72.5	4.41	1.01	

donde:

Tipo R

: Canales rectangulares.

Tipo T

: Canales trapezoidales.

Tipo CD

: Cajones dobles de hormigón armado.

B<sub>total</sub>

: Ancho basal útil del canal.

K

: Talud (razón horizontal/vertical).

I

: Pendiente longitudinal del tramo.

N

: Coeficiente de rugosidad de Manning.

H<sub>rev</sub>

: Altura del revestimiento proyectado.

H<sub>máx</sub>

: Altura máxima del agua en el tramo según eje hidráulico de diseño.

R<sub>mín</sub>

: Revancha mínima con respecto a H<sub>rev</sub>.

Q

: Caudal de diseño.

V<sub>máx</sub>

: Velocidad media máxima en el tramo para el caudal de diseño.

Fr

: Número de Froude máximo en el tramo.

**Tabla 5 Transiciones Canal Santa Marta**

N°	Km	i	L(m)	Tipo	Sección aguas arriba			Sección aguas abajo		
					B(m)	h(m)	k	B(m)	h(m)	k
1	0.040	0.0055	20	1	9.0	3.5	0	5.0	2.8	2/3
2	1.199	0.0055	20	2	5.0	2.8	2/3	6.0	3.0	0
3	1.280	0.0055	20	3	6.0	3.0	0	6.0	2.6	2/3
4	1.840	0.0055	20	ESP.	6.0	2.6	2/3	7.2	2.4	0
5	1.997	0.0050	20	ESP.	7.2	2.4	0	6.0	3.0	0
6	3.040	0.0050	20	3	6.0	3.0	0	6.0	2.6	2/3
7	3.669	0.0050	10	3	6.0	2.6	2/3	8.0	2.4	2/3
8	4.904	0.0055	30	4	8.0	3.5	2/3	6.0	3.0	0

**Tabla 6 Descargas de Aguas Lluvias**

N°	NOMBRE	CARACTERÍSTICAS			PROYECTO			
		KM	MARGEN (I/D)	DESCRIPCIÓN	D (mm)	L (m)	COTA DESC.	DESCRIPCIÓN
1	Aguas Lluvias Empresa EMALCO	1,22	I	Alcantarilla de D=800 mm	800	20	481,54	Se mejora ángulo de descarga
2	Sumidero 3 Poniente con Las Industrias	1,28	I	Sumidero existente a pozo absorbente	200	12		Se conectará a canal San Juan de Chena
3	Aguas Lluvias Canal San Juan de Chena	1,28	I	Descarga actual embancada	800	20	480,00	Se mejorará su ángulo de descarga
4	Descarga superficial G. Navales	2,52	D	Canalón de descarga superficial	200	5	469,61	Se construye sumidero y conexión
5	Descarga superficial G. Navales	2,53	D	Canalón de descarga superficial	200	5	469,61	Se construye sumidero y conexión
6	Colector Héctor Fuenzalida	2,70	D	Se mantiene la descarga	500	20	467,51	Se mantiene la descarga
7	Calle René Olivares	2,78	D	No existe descarga	200	5	467,42	Se proyecta conexión de sumidero
8	Calle René Olivares	2,80	D	No existe descarga	200	5	467,42	Se proyecta conexión de sumidero
9	Calle Balmaceda	3,02	D	No existe descarga	200	5	466,31	Se proyecta conexión de sumidero
10	Calle Balmaceda	3,04	D	No existe descarga	200	5	466,31	Se proyecta conexión de sumidero
11	Calle González Videla	3,30	D	Existe sumidero mal ubicado	200	5	463,93	Se reubica sumidero
12	Calle González Videla	3,33	D	No existe descarga	200	5	463,93	Se proyecta conexión de sumidero
13	Colector Morro de Arica	3,38	I	Cámara de descarga dentro del canal	400	20	462,73	Se elimina cámara y se conecta descarga
14	Descarga superficial Silva Carvallo	3,64	D	Descarga superficial artesanal	200	5	460,13	Se construye sumidero y conexión
15	Sumidero 4 Poniente	4,38	I	Descarga superficial en buen estado	600		452,5	Se mantiene la descarga
16	Colector El Conquistador	4,90	D	Descarga en mal estado	600	20	446,17	Se mejora la descarga

## ANEXO G. Parámetros modelación SWMM

### INFILTRACIÓN: MÉTODO DE GREEN-AMPT

Tasa de infiltración en el tiempo,

$$f(t) = K \left( \frac{\psi \Delta \theta}{F} + 1 \right)$$

Infiltración acumulada

$$F(t) = Kt + \psi \Delta \theta \ln \left( 1 + \frac{F}{\psi \Delta \theta} \right)$$

**Tabla 7 Características del Suelo**

Textura del suelo	K (mm/h)	Ψ (mm)	ϕ	FC	WP
Arena	120,40	49	0,437	0,062	0,024
Arena margosa	29,97	61	0,437	0,105	0,047
Marga Arenosa	10,92	110	0,453	0,190	0,085
Marga	3,30	89	0,463	0,232	0,116
Sedimentos de marga	6,60	170	0,501	0,284	0,135
Marga areno-arcillosa	1,52	220	0,398	0,244	0,136
Marga arcillosa	1,02	210	0,464	0,310	0,187
Sedimentos de marga arcillosa	1,02	270	0,471	0,342	0,210
Arcilla arenosa	0,51	240	0,430	0,321	0,221
Sedimentos de arcilla	0,51	290	0,479	0,371	0,251
Arcilla	0,25	320	0,475	0,378	0,265

K=Conductividad hidráulica

ψ =altura succión

ϕ=porosidad (fracción)

FC=Capacidad de campo (fracción)

WP= Punto de marchitamiento (fracción)

## PATRÓN DRENAJE AGUAS SERVIDAS

Tabla 8 Patrón Drenaje Aguas Servidas

Hora	$Q_i/Q_{\text{promedio diario}}$	l/s/hab
0	0.913	0.001521
1	0.743	0.001238
2	0.573	0.000955
3	0.443	0.000738
4	0.403	0.000671
5	0.393	0.000655
6	0.401	0.000668
7	0.643	0.001071
8	0.933	0.001554
9	0.873	0.001454
10	1.043	0.001738
11	1.273	0.002121
12	1.403	0.002337
13	1.473	0.002454
14	1.483	0.002471
15	1.433	0.002387
16	1.363	0.002271
17	1.303	0.002171
18	1.253	0.002087
19	1.203	0.002004
20	1.153	0.001921
21	1.093	0.001821
22	1.163	0.001938
23	1.053	0.001754
24	0.913	0.001521

# ANEXO H. Validación Modelo SWMM.

## COLECTOR RINCONADA

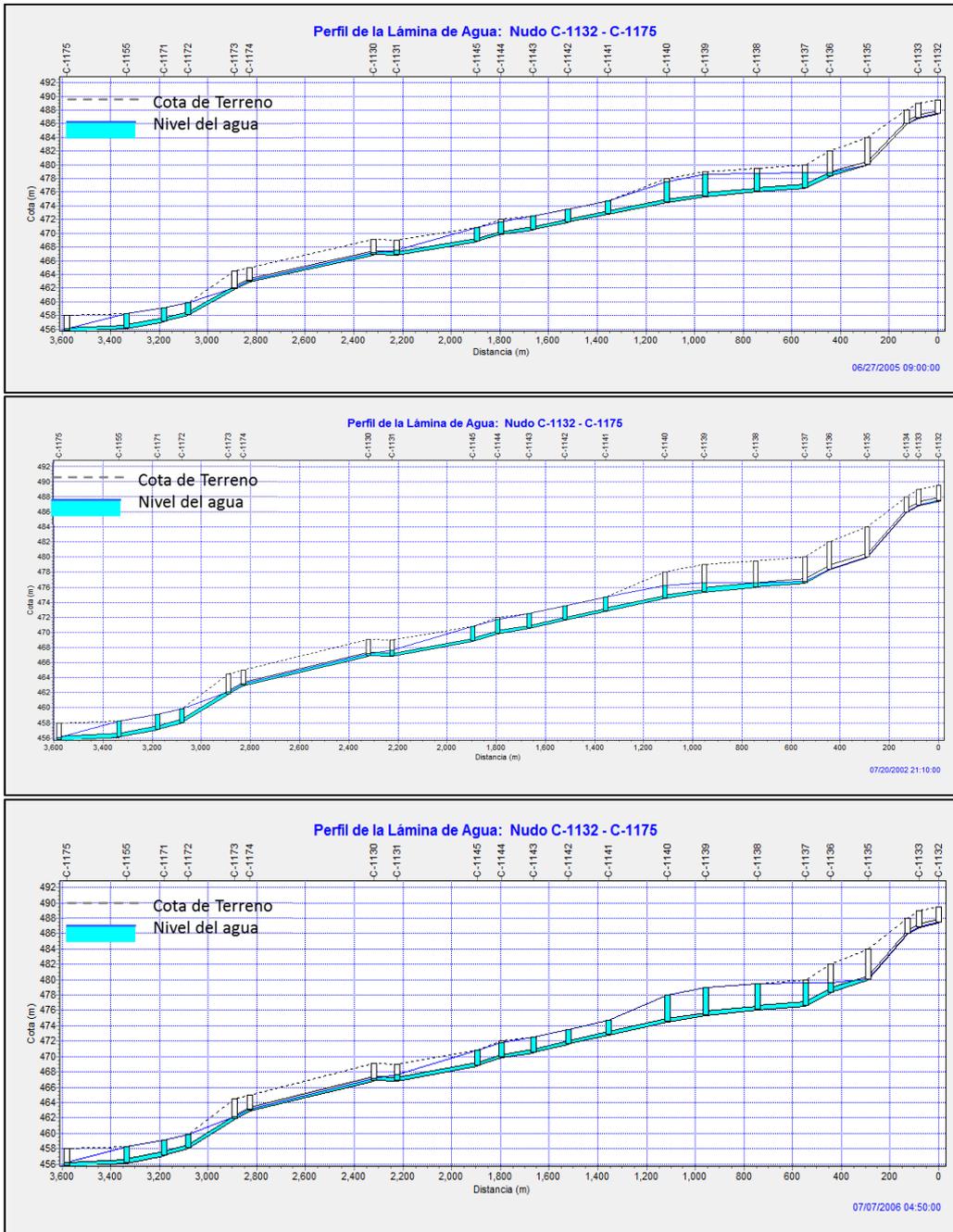
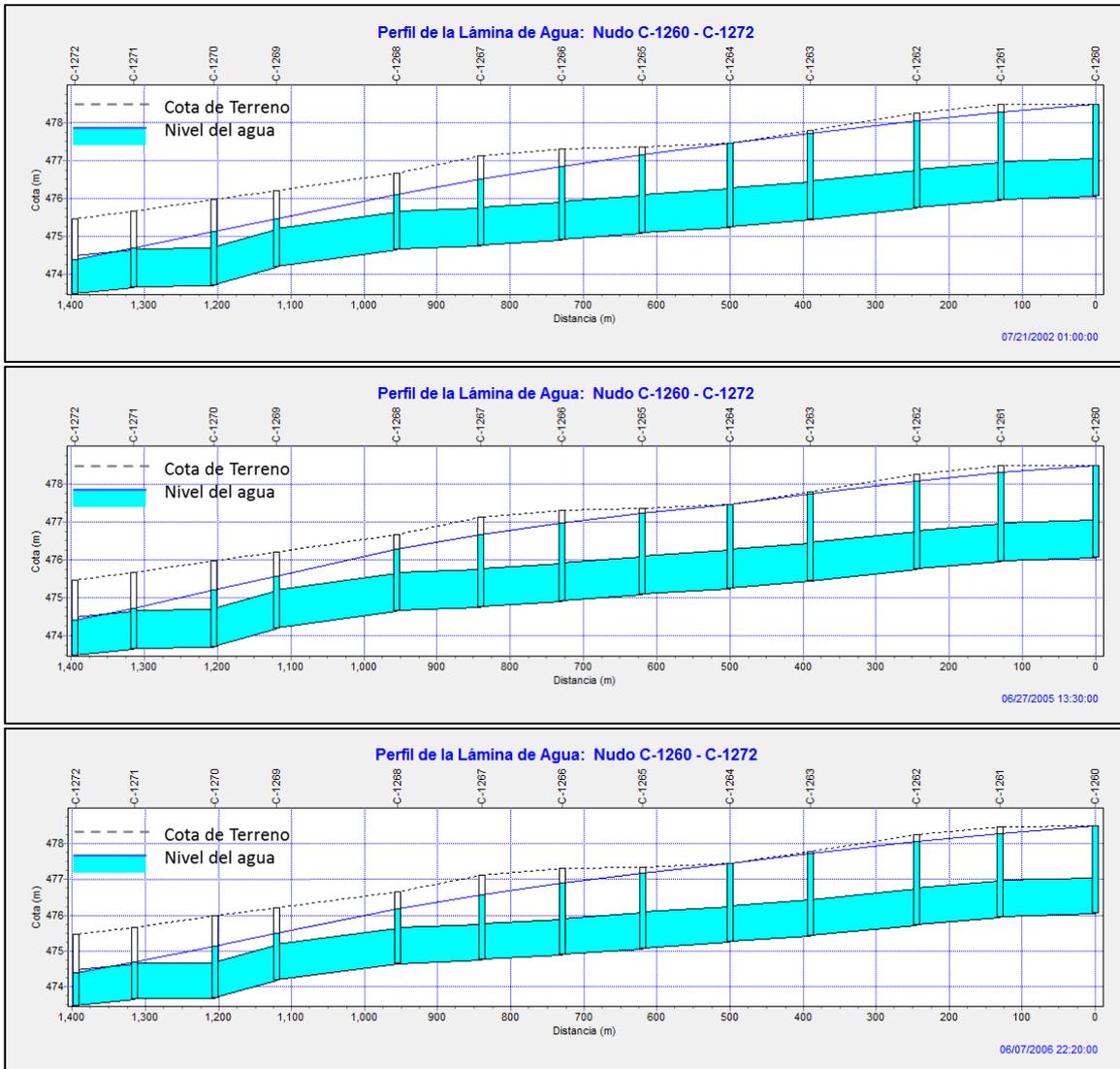


Figura 4 Eje hidráulico del Colector 5 de Abril en punto crítico de modelación de tormentas reales. (De arriba abajo año 2002,2005 y 2006).

# COLECTOR EL PAJONAL



**Figura 5 Eje hidráulico del Colector El Pajonal en punto crítico de modelación de tormentas reales. (De arriba abajo año 2002,2005 y 2006).**

## **ANEXO I. Mejoras Propuestas a la Red de Drenaje.**

### **FOTOS DE ZONA PROPUESTA PARA EMPLAZAMIENTO DE ESTANQUE DE RETENCIÓN SECTOR EL PAJONAL.**



**Figura 6 vista desde Alaska con Las Torres dirección sur-oeste**



**Figura 7 visto desde Primo de Rivera con Domingo de Colon dirección noreste**



**Figura 8** vista desde Alaska con Groenlandia dirección sur-oeste

## RESULTADOS SWMM PARA MODELACIÓN CANAL SANTA MARTA

\*\*\*\*\*  
Resumen de Escorrentía en Subcuencas  
\*\*\*\*\*

Subcuenca	Precip Total mm	Aporte Total mm	Evap Total mm	Infil Total mm	Escor. Total mm	Escor. Total 10^6 ltr	Escor. Punta LPS	Coef. Escor.
ASAM5	79.272	0.000	0.000	44.392	34.834	52.641	914.002	0.439
Vivaceta	79.272	0.000	0.000	15.854	63.204	15.561	267.742	0.797
SilviaCarvallo	79.272	0.000	0.000	19.818	59.217	42.044	721.383	0.747
HectorFuenzalida	79.272	0.000	0.000	15.854	63.304	12.484	216.342	0.799
R78	79.272	0.000	0.000	44.392	34.853	32.762	569.684	0.440
A1998	79.272	0.000	0.000	44.392	34.835	39.900	692.881	0.439
MorroArica	79.272	0.000	0.000	15.854	63.261	9.173	158.494	0.798
ASAM9	79.272	0.000	0.000	23.782	55.449	19.014	330.626	0.699
LasNaciones	79.272	0.000	0.000	23.782	54.422	73.318	1199.352	0.687
Elconquistador	79.272	0.000	0.000	23.782	55.250	32.929	564.158	0.697
ASAM4	79.272	0.000	0.000	44.392	34.802	139.209	2407.952	0.439
sistema	79.272	0.000	0.000	37.116	41.949	469.034	8042.617	0.529

\*\*\*\*\*  
Resumen de Nivel en Nudos  
\*\*\*\*\*

Nudo	Tipo	Nivel Medio Metros	Nivel Máximo Metros	Altura Máxima Metros	Instante Nivel Máx. días hr:min
SAM4	JUNCTION	0.82	2.80	488.60	0 00:00
SAM5	JUNCTION	0.68	1.19	480.19	0 00:04
SAM6	JUNCTION	2.97	3.00	475.60	0 00:06
SAM7	JUNCTION	0.70	0.76	463.36	1 00:00
SAM8	JUNCTION	0.53	0.58	460.78	1 00:00
SAM9	JUNCTION	0.53	0.60	458.10	0 00:14
SAM10	JUNCTION	0.63	0.73	444.83	0 00:19
610	JUNCTION	0.93	1.55	484.35	0 00:01
700	JUNCTION	0.90	1.40	483.60	0 00:02
800	JUNCTION	0.82	1.44	483.24	0 00:03
1219	JUNCTION	0.91	1.26	480.56	0 00:04
1500	JUNCTION	0.66	1.17	477.97	0 00:05
1700	JUNCTION	0.78	1.25	475.85	0 00:06
2642	JUNCTION	0.73	0.77	467.17	1 00:00
1998	JUNCTION	0.72	0.84	472.44	0 00:09
3500	JUNCTION	0.69	0.75	459.55	1 00:00
3900	JUNCTION	0.59	0.64	455.54	1 00:00
4360	JUNCTION	0.49	0.55	451.75	1 00:00
4500	JUNCTION	0.51	0.57	449.67	1 00:00
4700	JUNCTION	0.51	0.58	447.18	0 00:18
5005	JUNCTION	0.55	0.62	443.32	0 00:19
5035	JUNCTION	0.49	0.59	442.59	0 00:19
5380	OUTFALL	0.49	0.56	432.26	0 00:19