



Agua



Aeropuertos



Arquitectura



Obras Hidráulicas



Obras Portuarias



Vialidad

# INSTITUTO NACIONAL DE HIDRÁULICAS

## ESTUDIO

Estudio Evaluación áreas de inundación - Quebradas de Valparaíso

ZONA CENTRO



SEPTIEMBRE DE 2014

DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS



“ESTUDIO EVALUACIÓN ÁREAS DE INUNDACIÓN - QUEBRADAS DE VALPARAISO”

TOMO I  
INFORME FINAL  
PEÑAFLO, REGIÓN METROPOLITANA  
SEPTIEMBRE 2014

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                      |            |            |               |                                             |             |               |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------|------------|---------------|---------------------------------------------|-------------|---------------|-----------------------------|----------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|
| <p><i>Mandante:</i></p> <p>MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS<br/>DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                      |            |            |               |                                             |             |               |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
| <p><i>Estudio:</i></p> <p>ESTUDIO EVALUACIÓN ÁREAS DE INUNDACIÓN<br/>QUEBRADAS DE VALPARAÍSO<br/>INFORME FINAL</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                      |            |            |               | <p><i>Fecha:</i></p> <p>Septiembre 2014</p> |             |               |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
| <p><i>Equipo de Trabajo:</i></p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 40%;">Héctor Hernández Jara</td> <td>Ingeniero Civil, Jefe de Proyecto</td> </tr> <tr> <td>Rodrigo Herrera Hernández</td> <td>Ingeniero Civil</td> </tr> <tr> <td>Francisco Ulloa Castillo</td> <td>Ingeniero Civil</td> </tr> <tr> <td>Luis Esquivel Velásquez</td> <td>Dibujante Técnico</td> </tr> </table>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                      |            |            |               |                                             |             |               | Héctor Hernández Jara       | Ingeniero Civil, Jefe de Proyecto      | Rodrigo Herrera Hernández | Ingeniero Civil                                      | Francisco Ulloa Castillo | Ingeniero Civil | Luis Esquivel Velásquez | Dibujante Técnico |
| Héctor Hernández Jara                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Ingeniero Civil, Jefe de Proyecto                    |            |            |               |                                             |             |               |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
| Rodrigo Herrera Hernández                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Ingeniero Civil                                      |            |            |               |                                             |             |               |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
| Francisco Ulloa Castillo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Ingeniero Civil                                      |            |            |               |                                             |             |               |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
| Luis Esquivel Velásquez                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Dibujante Técnico                                    |            |            |               |                                             |             |               |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
| <p><i>Aprobado por:</i></p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 40%;">Eduardo Santibáñez Weidmann</td> <td>Ingeniero Civil, Jefe División Técnica</td> </tr> <tr> <td>Luis Zamorano Riquelme</td> <td>Ingeniero Civil, Jefe Unidad Ingeniería y Desarrollo</td> </tr> </table>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                      |            |            |               |                                             |             |               | Eduardo Santibáñez Weidmann | Ingeniero Civil, Jefe División Técnica | Luis Zamorano Riquelme    | Ingeniero Civil, Jefe Unidad Ingeniería y Desarrollo |                          |                 |                         |                   |
| Eduardo Santibáñez Weidmann                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Ingeniero Civil, Jefe División Técnica               |            |            |               |                                             |             |               |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
| Luis Zamorano Riquelme                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Ingeniero Civil, Jefe Unidad Ingeniería y Desarrollo |            |            |               |                                             |             |               |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
| <p><i>Resumen Ejecutivo:</i></p> <p>El presente informe, solicitado a petición de la DOH, contiene en la evaluación de las zonas y alturas de inundación en sistemas de aguas lluvias y las cuencas aportantes a los colectores Uruguay, Francia, Argentina, Las Heras y Bellavista, los cuales forman parte de la red primaria de la ciudad de Valparaíso. En el caso de los dos últimos, previó análisis de superficies afectadas, se les descartó del análisis utilizando la metodología.</p> <p>La metodología utilizada para realizar las evaluaciones consistió en desarrollar modelaciones hidrológicas-hidráulicas en los softwares EPA-SWMM (unidimensional) y FLO2D (bidimensional), considerando variaciones en los valores iniciales de los parámetros que regulan los cálculos de la infiltración y la escorrentía directa, tomando como referencia valores propuestos en la bibliografía internacional para la evaluación de crecidas post-incendio en cuencas de tipo forestal.</p> |                                                      |            |            |               |                                             |             |               |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                      |            |            |               |                                             |             |               |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
| C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Informe Final                                        | RHH        | FUC        | HHJ           | LZR                                         | ESW         | 23/Sept/2014  |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
| B                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Para aprobación del mandante                         | RHH        | FUC        | HHJ           | LZR                                         | ESW         | 24/Junio/2014 |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Para aprobación del mandante                         | RHH        | FUC        | HHJ           | LZR                                         | ESW         | 05/Junio/2014 |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
| <i>Rev.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <i>Descripción</i>                                   | <i>Por</i> | <i>Por</i> | <i>Revisó</i> | <i>VºBº</i>                                 | <i>VºBº</i> | <i>Fecha</i>  |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |
| <p><i>Clasificación:</i></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                      |            |            |               |                                             |             |               |                             |                                        |                           |                                                      |                          |                 |                         |                   |

## INDICE GENERAL

### TOMO I

|       |                                                                                                         |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUCCIÓN .....                                                                                      | 1  |
| 1.1   | GENERALIDADES .....                                                                                     | 1  |
| 1.2   | ZONA DE ESTUDIO.....                                                                                    | 1  |
| 1.3   | OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA CONSULTORÍA.....                                                             | 2  |
| 1.3.1 | <i>Objetivos Generales:</i> .....                                                                       | 2  |
| 1.3.2 | <i>Alcances:</i> .....                                                                                  | 3  |
| 2     | RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES.....                                                             | 4  |
| 3     | DESARROLLO DEL ESTUDIO.....                                                                             | 6  |
| 3.1   | DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA CON RESPECTO A LA HIDROLOGÍA.....                                        | 6  |
| 3.2   | DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA.....                                                              | 9  |
| 3.3   | ANÁLISIS PRELIMINAR CUENCAS AFECTADAS.....                                                              | 10 |
| 3.4   | MODELACIÓN EPA-SWMM SISTEMA URUGUAY .....                                                               | 11 |
| 3.4.1 | <i>Descripción del sistema de drenaje</i> .....                                                         | 11 |
| 3.4.2 | <i>Descripción del modelo existente</i> .....                                                           | 11 |
| 3.4.3 | <i>Consideraciones realizadas</i> .....                                                                 | 12 |
| 3.4.4 | <i>Resultados obtenidos</i> .....                                                                       | 22 |
| 3.5   | MODELACIÓN EPA-SWMM SISTEMA FRANCIA.....                                                                | 23 |
| 3.5.1 | <i>Descripción del Sistema de Drenaje</i> .....                                                         | 23 |
| 3.5.2 | <i>Descripción del Modelo Existente</i> .....                                                           | 24 |
| 3.5.3 | <i>Consideraciones realizadas</i> .....                                                                 | 25 |
| 3.5.4 | <i>Resultados obtenidos</i> .....                                                                       | 34 |
| 3.6   | MODELACIÓN EPA-SWMM SISTEMA ARGENTINA.....                                                              | 35 |
| 3.6.1 | <i>Descripción del Sistema de Drenaje</i> .....                                                         | 35 |
| 3.6.2 | <i>Descripción del Modelo Existente</i> .....                                                           | 35 |
| 3.6.3 | <i>Consideraciones realizadas</i> .....                                                                 | 37 |
| 3.6.4 | <i>Resultados obtenidos</i> .....                                                                       | 42 |
| 3.7   | MODELACIÓN FLO2D CONJUNTA SISTEMAS URUGUAY Y FRANCIA.....                                               | 44 |
| 3.7.1 | <i>Consideraciones realizadas</i> .....                                                                 | 44 |
| 3.7.2 | <i>Resultados obtenidos</i> .....                                                                       | 47 |
| 3.7.3 | <i>Comparación cualitativa de los resultados en comparación al modelo unidimensional EPA-SWMM</i><br>49 |    |
| 4     | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                                                                    | 50 |
| 4.1   | CONCLUSIONES GENERALES .....                                                                            | 50 |

|       |                                                                                        |           |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2   | RESULTADOS OBTENIDOS EN EPA-SWMM.....                                                  | 50        |
| 4.2.1 | <i>Alturas máximas de inundación.....</i>                                              | <i>50</i> |
| 4.2.2 | <i>Velocidades máximas.....</i>                                                        | <i>51</i> |
| 4.2.3 | <i>Niveles de Peligrosidad.....</i>                                                    | <i>51</i> |
| 4.3   | COMENTARIOS GENERALES DEL USO DEL MODELO EPA-SWMM.....                                 | 51        |
| 4.4   | MEJORAMIENTO DE LAS MODELACIONES FUTURAS .....                                         | 52        |
| 4.5   | MEDIDAS DE MITIGACIÓN EVENTOS DE ARRASTRE DE SEDIMENTOS.....                           | 52        |
| 5     | REFERENCIAS .....                                                                      | 54        |
|       | <i>ANEXO N°1 DESCRIPCIÓN MODELO EPA-SWMM.....</i>                                      | <i>55</i> |
|       | <i>ANEXO N°2 DESCRIPCIÓN MODELO FLO-2D.....</i>                                        | <i>62</i> |
|       | <i>ANEXO N°3 VISITAS DE INSPECCIÓN .....</i>                                           | <i>68</i> |
|       | <i>ANEXO N°4 VALORES CN POST INCENDIO PROPUESTOS POR LIVINGSTON ET AL (2005) .....</i> | <i>73</i> |
|       | <i>ANEXO N°5 PLANOS.....</i>                                                           | <i>75</i> |
|       | <i>ANEXO N°6 MINUTAS RESPUESTA OBSERVACIONES .....</i>                                 | <i>76</i> |

## LISTADO DE TABLAS

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla N° 3-1 Áreas afectadas por cuenca (Elaboración propia).....                                                       | 10 |
| Tabla N° 3-2 Porcentaje de área afectada y parámetros geomorfológicos Modelo EPA-SWMM Uruguay (Elaboración propia)..... | 13 |
| Tabla N° 3-3 Subcuencas con hietograma mayorado (Elaboración propia).....                                               | 16 |
| Tabla N° 3-4 Variación del caudal peak en nodo de control (lt/s) .....                                                  | 17 |
| Tabla N° 3-5 Reducción 20% de capacidad sumideros Uruguay .....                                                         | 18 |
| Tabla N° 3-6 Porcentaje de área afectada y parámetros geomorfológicos Modelo EPA-SWMM Francia (Elaboración propia)..... | 26 |
| Tabla N° 3-7 Subcuencas con hietograma mayorado - Francia (Elaboración propia) .....                                    | 29 |
| Tabla N° 3-8 Variación del caudal peak en nodo de control (lt/s) - Francia.....                                         | 30 |
| Tabla N° 3-9 Reducción 20% de capacidad sumideros Uruguay .....                                                         | 31 |
| Tabla N° 3-10 Propiedades sumideros Avenida Argentina .....                                                             | 42 |
| Tabla N° 3-11 Nodos EPA-SWMM para obtención hidrogramas de ingreso modelo FLO2D.....                                    | 45 |

## LISTADO DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura N° 1-1 Zona de Estudio – Sectores urbanos afectados por el incendio Valparaíso (Elaboración propia en base a información UGIT-DOH) .....                                                    | 2  |
| Figura N° 3-1 Efecto de la intensidad del fuego la vegetación y el suelo subyacente (Parsons et al, 2010).....                                                                                     | 6  |
| Figura N° 3-2 Esquema en planta Cuencas en Estudio (Elaboración Propia) .....                                                                                                                      | 10 |
| Figura N° 3-3 Modelo Uruguay EPA-SWMM (CONIC-BF, 2013).....                                                                                                                                        | 12 |
| Figura N° 3-4 Ejemplo de sección tipo utilizada en calles adicionales.....                                                                                                                         | 19 |
| Figura N° 3-5 Condición de sobrepaso en calle Alessandri y posterior tránsito en quebrada aledaña.....                                                                                             | 20 |
| Figura N° 3-6 Calle Errazuriz y Bandejon Central .....                                                                                                                                             | 21 |
| Figura N° 3-7 Salida superficial a través de calle Errazuriz.....                                                                                                                                  | 21 |
| Figura N° 3-8 Calle Francia.....                                                                                                                                                                   | 23 |
| Figura N° 3-9 Zona Alta, límite Cuencas Aportantes a Francia y Las Heras.....                                                                                                                      | 24 |
| Figura N° 3-10 Modelo Francia EPA-SWMM (CONIC BF, 2013).....                                                                                                                                       | 25 |
| Figura N° 3-11 Ejemplo de sección tipo utilizada en calles adicionales - Francia.....                                                                                                              | 32 |
| Figura N° 3-12 Vista Avenida Errazuriz con calle Francia y Vista en Planta.....                                                                                                                    | 33 |
| Figura N° 3-13 Vista en Planta de las condiciones de borde en salida del modelo Francia.....                                                                                                       | 33 |
| Figura N° 3-14 Modelo Visual SWMM (Caice) Avenida Argentina.....                                                                                                                                   | 36 |
| Figura N° 3-15 Grado de afectación por incendio observado en cuenca alta de Uruguay .....                                                                                                          | 38 |
| Figura N° 3-16 Áreas afectadas por incendio y subcuenca utilizada para la aplicación de factores de corrección en Av. Argentina.....                                                               | 39 |
| Figura N° 3-17 Hidrogramas Link 4-106 Visual Caice Avenida Argentina -La Cantera Inferior.....                                                                                                     | 40 |
| Figura N° 3-18 Vista en planta modelo EPA-SWMM Argentina- tramo Pedro Montt y Descarga al Mar .....                                                                                                | 42 |
| Figura N° 3-19 Modelo de elevaciones digitales de terreno, generado a partir de información de curvas de nivel c/ 5m y cotas de esquinas obtenidas desde restitución estudio CONIC-BF (2013) ..... | 44 |
| Figura N° 3-20 Condición de borde en edificaciones .....                                                                                                                                           | 46 |
| Figura N° 3-21 Esquema alturas de inundación Francia y Uruguay obtenidos desde modelo FLO2D.....                                                                                                   | 47 |
| Figura N° 3-22 Alturas de inundación clasificadas, cuencas Uruguay y Francia, obtenidas a partir de modelo FLO2D .....                                                                             | 48 |
| Figura N° 4-1 Straw wattles instalados para el control de erosión (Fuente: USDA) .....                                                                                                             | 53 |
| Figura N° 4-2 Aplicación de tratamiento Straw mulch post -incendios (Fuente:USDA).....                                                                                                             | 53 |
| Figura A 1 Modelo conceptual del sistema de drenaje urbano.....                                                                                                                                    | 56 |
| Figura A 2 Componente físicos empleados en el modelo de un sistema de drenaje urbano.....                                                                                                          | 58 |

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Generalidades

Entre el 12 y 14 de Abril 2014 recién pasados se desarrolló uno de los eventos más catastróficos del último tiempo, el gran Incendio de Valparaíso. Este tuvo su origen en el fundo El Peral a las 16:40 (hora local), a la altura del camino la Pólvara. Producto de los fuertes vientos de ese día las llamas se propagaron con una gran velocidad alcanzando el sector del Vergel, y desde ahí el fuego avanzó en dirección Norte, afectando doce barrios de la ciudad y los cerros Mariposas, Monjas, La Cruz, El Litre, Las Cañas, Merced, La Virgen, Santa Elena, Ramaditas y Rocuant, dejando una gran cantidad de viviendas destruidas, personas damnificadas, víctimas fatales y heridos, junto con una pérdida importante de cobertura vegetal.

Teniendo en consideración el gran alcance de la zona afectada por el incendio, aproximadamente de 1090 hectáreas según estimaciones preliminares, y los pronósticos realizados por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) que indican que en el presente año el fenómeno del Niño traería un invierno muy lluvioso, con escenarios muy parecidos al año 1997, es que la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) estimó necesario estudiar el efecto sobre la escorrentía superficial y urbana de la red de drenaje existente en las principales cuencas de Valparaíso definidas en el Plan Maestro del Gran Valparaíso: Uruguay, Francia, Av. Argentina, Las Heras y Bellavista, teniendo éste como objetivo principal la obtención rápida de una cartografía de las zonas de inundación del escenario futuro, que apoye la definición de posibles medidas de mitigación en los puntos críticos detectados.

### 1.2 Zona de Estudio

Para el presente estudio la zona de interés está definida por las cuencas aportantes a los colectores Uruguay, Francia, Argentina, Las Heras y Bellavista, que forman parte integral de la red de drenaje urbano existente en la ciudad de Valparaíso, capital regional y provincial. En la figura N°1.1 se muestra el área urbana consolidada que fue afectada por el incendio.



Figura N° 1-1 Zona de Estudio - Sectores urbanos afectados por el incendio Valparaíso (Elaboración propia en base a información UGIT-DOH)

### 1.3 Objetivos y Alcances de la Consultoría

#### 1.3.1 Objetivos Generales:

Generar áreas de inundación y evaluar el comportamiento del sistema de drenaje urbano existente, considerando la metodología propuesta por la DOH para esta emergencia, a fin de evaluar en un plazo ajustado, la escorrentía fluvial sobre las cuencas que fueron afectadas por el siniestro de fecha 12 de abril del 2014.

##### 1.3.1.1 *Objetivos Específicos:*

- Utilizar los antecedentes y modelaciones generadas en consultorías efectuadas por el Departamento de Aguas Lluvias en las cuencas de Valparaíso durante el año 2013, realizando las modificaciones de los parámetros de escorrentía, y mayorando las tormentas de diseño con el fin de considerar el aumento de los volúmenes producto del deterioro de las cuencas.
- Visita a terreno para determinar los parámetros hidrológicos en las cuencas afectadas, y además determinar elementos adicionales que pudieran incluirse en los modelos previos, para representar con mayor definición la escorrentía superficial en los sistemas.

### 1.3.2 Alcances:

- De acuerdo a lo solicitado por el Mandante (DOH), para realizar la modelación de la escorrentía superficial de las aguas lluvias se utilizó el software EPA SWMM, ya que los modelos previos disponibles por la dirección se encuentran en dicho programa. En particular el modelo de los sistemas colectores de la cuenca de Av. Argentina, se encuentran modelados en el software Visual SWMM (CAICE).
- De acuerdo a lo solicitado por el Mandante (DOH), se estudiarán los siguientes colectores en orden de prioridad: Uruguay, Francia, Avenida Argentina y otras.
- Se entregará como resultado, en formato digital, los ejes hidráulicos del escurrimiento en la red de drenaje superficial.
- Los valores de las alturas de escurrimiento, entregan una tendencia de las inundaciones en las avenidas y calles modeladas con potencial de acumulación de agua, y de las que pudieran presentar algún riesgo dada las altas velocidades del escurrimiento.
- Se utilizarán los datos hidrológicos de la DOH, disponibles en los estudios anteriores entregados, como válidos para todos los efectos en este estudio.
- Si bien el modelo EPA SWMM tiene las capacidades para modelar sistemas de aguas lluvias y ejes hidráulicos de manera unidimensional. Cabría mencionar que el modelo involucrado no es capaz de calcular ni modelar la hidráulica e hidrodinámica de fenómenos de flujos no newtonianos; tales como aludes o flujos detríticos, por lo que para los efectos del estudio para simular el aumento en el arrastre de sedimentos se considerará de manera conservadora sólo como una mayoración de los hidrogramas de escorrentía directa.

## 2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Para el desarrollo del estudio se recopilaron los siguientes antecedentes:

- MOP – UGIT DOH (2014) Cartografía Ciudad de Valparaíso. Área afectada por Incendio.

La información entregada por la Dirección de Obras Hidráulicas corresponde a una cartografía temática que cuenta con el detalle de las zonas afectadas por el incendio, mostrando tanto las zonas urbanas como forestales involucradas. Para los fines de este estudio las áreas afectadas por el incendio serán digitalizadas en coberturas digitales, las que serán utilizadas en la determinación de las subcuencas en las que se modificarán los parámetros hidrológicos.

- CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores (2013) Consultoría ALL-**DP43 “Reposición y Mejoramiento Sistema de Aguas Lluvias de Valparaíso, Colectores Bellavista, Phillipi, Uruguay, Francia, Las Heras, Urriola y Las Torpederas.**

La consultoría realizada para la DOH por la Consultora CONIC-BF cuenta con información de los colectores Uruguay, Francia, Las Heras y Bellavista, entre otros. En este estudio se realizaron diversos trabajos entre los que se pueden destacar el desarrollo de diagnósticos estructurales, topografía y catastro de sistemas de aguas lluvias, topografía y catastro de ingeniería de detalle (restitución), mecánicas de suelos, análisis de precios unitarios y especificaciones técnicas para obras de reparación.

Para los fines de este estudio será utilizada la información de hidrología y catastros del sistema de aguas lluvias, como también los modelos elaborados para colector en software EPA SWMM. Cabe resaltar que este informe será la principal fuente de información dado que es el más actualizado de todos los que se recopilaron.

- IRH Ingenieros Consultores Ltda (2009). Diseño Definitivo Reposición del cauce de Av. Argentina Fase II Valparaíso –Región de Valparaíso.

La consultoría realizada por IRH Ingenieros cuenta con información similar a la desarrolla por CONIC-BF en su estudio pero en este caso sólo se analizó el colector existente en la Av. Argentina.

De interés para el presente estudio son las modelaciones realizadas del colector de Av. Argentina en el software Visual SWMM (CAICE), además de todos los antecedentes utilizados para construir los modelos, tales como planos de topología, catastros y análisis hidrológicos.

Como referencia se puede indicar que el estudio además incluye una modelación hidráulica unidimensional en la sección longitudinal del colector mencionado a lo largo del plan de Valparaíso.

- Ingeniería Cuatro Ltda. Consultores (2008). Consultoría ALL\_DP-30-1 **"Diseño Definitivo** Reposición del cauce de Av. Argentina, Valparaíso, Región de Valparaíso – Fase I".

La consultoría realizada por Ingeniería Cuatro cuenta con información preliminar de Avenida Argentina para el desarrollo del estudio Fase II.

Para efectos de este estudio la información será utilizada de manera complementaria.

- GSI Ingenieros (2004). Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Valparaíso, Región de Valparaíso.

El estudio desarrollado por GSI Ingenieros cuenta con información general sobre los sistemas de aguas lluvias en el Gran Valparaíso, en especial tiene la definición de la red primaria y los catastros y estudios a nivel de perfil.

Para los efectos de este estudio el documento será utilizado de manera complementaria.

### 3 DESARROLLO DEL ESTUDIO

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA CON RESPECTO A LA HIDROLOGÍA

Previó al análisis considerado, se ha hecho hincapié en destacar los efectos potenciales en la escorrentía derivados del efecto del fuego sobre las cuencas. La descripción que se detalla a continuación se basa en el trabajo desarrollado en el Estado de Ventura, California, Estados Unidos (*West Consultants Inc, 2011*), lugar donde frecuentemente se han presentado este tipo de eventos y en los que se han estudiado y propuesto diferentes metodologías de análisis para evaluar sus efectos sobre la hidrología y las obras civiles.

Los incendios pueden alterar el régimen hidrológico de una cuenca de diferentes maneras. Adicionalmente al aumento de los caudales por efecto del incremento del arrastre de sedimentos (bulking), estos cambios pueden incrementar la escorrentía de la situación previa (sin incendio) y disminuir el tiempo de retardo entre el peak de precipitación y la escorrentía superficial.

En la figura N° 3-1 se muestra esquemáticamente el efecto del fuego sobre la vegetación y el suelo subyacente. Como se ve en la imagen existen diferentes grados de afectación dependiendo del grado de intensidad del fuego. Una excelente guía para el reconocimiento del grado de intensidad el fuego se puede encontrar en (*Parsons et al, 2010*), los cuales realizaron un estudio para el servicio agrícola de estados unidos (USDA) en el centro experimental de Rocky Mountain.

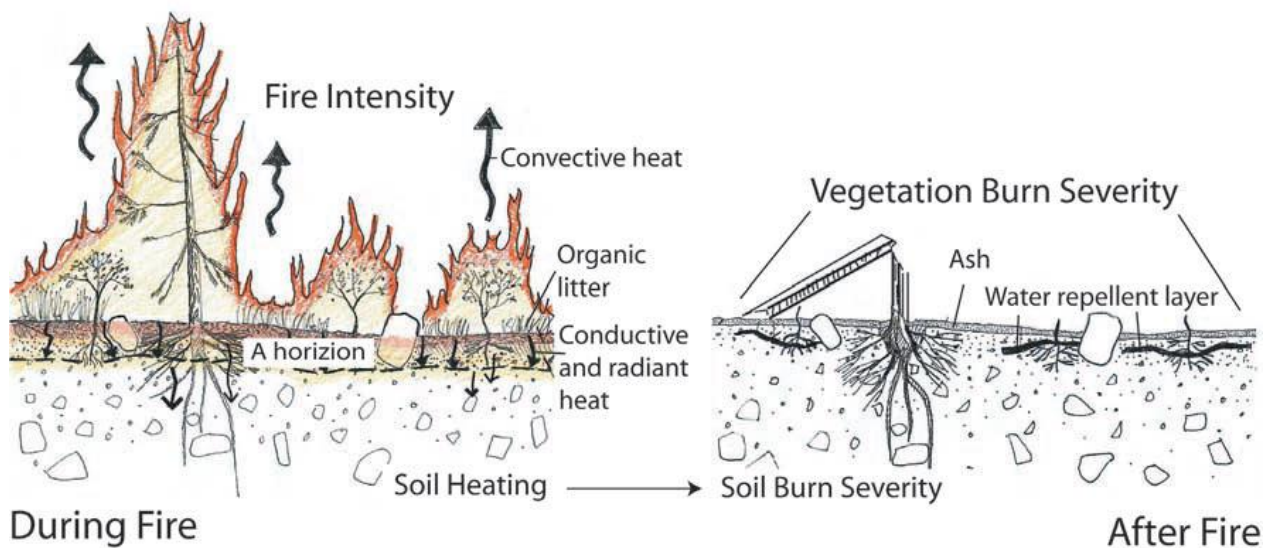


Figura N° 3-1 Efecto de la intensidad del fuego la vegetación y el suelo subyacente (Parsons et al, 2010)

Los efectos del fuego en la escorrentía de aguas limpias incluyen cambios en la evapotranspiración, interceptación, infiltración, almacenamiento superficial y sub-superficial de humedad de los suelos y las direcciones de flujo superficial y sub-superficiales. La disminución del tiempo de concentración de la cuenca (y aumento del caudal peak) son debido a la pérdida de vegetación, humus y tierra de hojas, resultado en una reducción del coeficiente de fricción al escurrimiento en vías, surcos y canales. Los efectos del fuego en la vegetación, suelos, y los procesos hidrológicos son resumidos a continuación:

#### Vegetación

- Reduce la cubierta vegetal e incrementa la exposición del suelo mineral.
- Reduce la evapotranspiración.
- Reduce la interceptación.

#### Propiedades de los suelos

- Reduce la capa de humus y materia orgánica del suelo.
- Reduce la capacidad de almacenamiento de materia orgánica superficial.
- Aumenta los suelos hidrofóbicos (los restos de la materia orgánica volatilizada se desplazan hacia la parte inferior del suelo formando capas repelentes al agua).
- Reduce la infiltración (sellado por las cenizas y los sedimentos finos).

#### Hidrología (laderas)

- Disminuye la rugosidad superficial.
- Se incrementan las vías y surcos de escurrimiento.
- Disminuye el flujo sub-superficial debido a la pérdida de las capas de humus y tierra de hojas.
- Se incrementa la acumulación de nieve y su derretimiento.

#### Hidrología (respuesta de la cuenca)

- Disminuye el tiempo de concentración.
- Disminuye los valores de rugosidad ( $n$ ).
- Cambios estacionales en el flujo base.
- Aumento de los caudales peak.

Presentado lo anterior es claro que existe una amplia gama de efectos sobre la hidrología. En el caso de Valparaíso, las zonas afectadas por el incendio corresponden principalmente a zonas de laderas en las subcuencas de cabecera, y áreas residenciales en zonas de expansión de la planta urbana, que según estimaciones preliminares fueron un total de 1090 hectáreas. En cuanto a la hidrología, las características más relevantes previas al incendio, correspondían a una importante cantidad de vegetación; caracterizada por pastizales, arbustos menores y árboles foráneos (pinos, eucaliptos) y nativos, suelos de tipo arcilloso arenoso y quebradas con considerables pendientes.

De todos los efectos presentados, no todos son considerados en los métodos hidrológicos de transformación de precipitación en escorrentía, dado que son poco relevantes, o bien, están englobados dentro de otras variables de análisis, como es el caso de la intercepción por ejemplo.

En nuestro caso los factores considerados estarán relacionados con el marco conceptual en que se base el modelo numérico implementado. En el presente contrato se está utilizando el modelo EPA SWMM, el cual considera en sus cálculos la infiltración (e implícitamente los tipos de suelos) y la rugosidad de las cuencas, por lo que cualquier metodología utilizada será considerando la variación de estos factores.

### 3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA

Previo al análisis de la hidrología e hidráulica de los sistemas solicitados, se discriminará el real impacto del evento sobre cada uno de ellos, mediante una estimación de la superficie comprometida, determinando la necesidad o no del análisis solicitado por el Mandante.

Posteriormente, para desarrollar el estudio se ha considerado realizar la modelación de los sistemas de drenaje urbano y cuencas aportantes, principalmente a través del modelo EPA-SWMM, y de forma complementaria en el software FLO2D.

En el caso de los modelos desarrollados en EPA SWMM, se describirán y analizarán los modelos entregados por el mandante, modificando su topología en caso de ser necesario para cumplir con los objetivos del estudio. En cuanto a la representación del fenómeno del incendio, se basará principalmente en un análisis tendiente a variar las condiciones hidrológicas previas al incendio, para obtener un escenario modificado. Para esto, se cambiarán los parámetros relacionados con la infiltración y algunos parámetros relacionados con la estimación de la producción de caudal de las subcuencas (cálculo de escorrentía directa), dependiendo la selección de que formulaciones de cálculo existan en el modelo EPA-SWMM o Visual SWMM (Caice) entregado.

Para considerar el aumento de caudal producto del incremento en el aporte de sedimentos de las cuencas se definirán puntos de control en los nodos de inicio del colector seleccionados (bocatomas), en donde se aplicará un factor de corrección que represente el fenómeno mencionado.

El caudal así obtenido, se hará escurrir inicialmente por las calles, no considerando en su tramo inicial los colectores y sumideros, lo que simula su embancamiento producto del arrastre de material. También se modificarán los coeficientes que definen los sumideros, representando de esta manera su pérdida de capacidad por la entrada de sedimentos y basuras. Por último, se agregarán elementos para representar calles o almacenamientos locales que pueden considerarse necesarios para obtener una mejor representación del escurrimiento superficial a través de los sistemas modelados.

En el caso del modelo FLO2D, al ser un modelo bidimensional, se utilizará para contrastar los resultados de los modelos EPA SWMM, modelando para esto un escenario umbral que considera, que la escorrentía se produce solamente a través de las calles, ignorando el funcionamiento del colector.

Las bases conceptuales de ambos modelos se encuentran en los Anexos N°1 y N°2.

### 3.3 ANÁLISIS PRELIMINAR CUENCAS AFECTADAS

Anterior a un análisis detallado se estimaron las áreas afectadas por cuenca utilizando la información entregada por UGIT DOH y las divisorias de cuencas definidas en los estudios de CONIF-BF, Ingeniería Cuatro e IRH Ingenieros Consultores, obteniendo el detalle que se presenta en la tabla N°2.1.

En la figura N°3-1 se entrega un esquema en planta de las zonas comprometidas por cuenca.

Tabla N° 3-1 Áreas afectadas por cuenca (Elaboración propia)

| Cuencas en Análisis | Área Total Cuenca [há] | Área Total Afectada por Incendio [há] | Porcentaje Afectado [%] |
|---------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| Uruguay             | 184.3                  | 79.9                                  | 43.3                    |
| Francia             | 364.8                  | 200.8                                 | 55.0                    |
| Argentina           | 1141.0                 | 400.9                                 | 35.1                    |
| Las Heras           | 95.5                   | 6.5                                   | 6.8                     |
| Bellavista          | 276.6                  | 6.1                                   | 2.2                     |

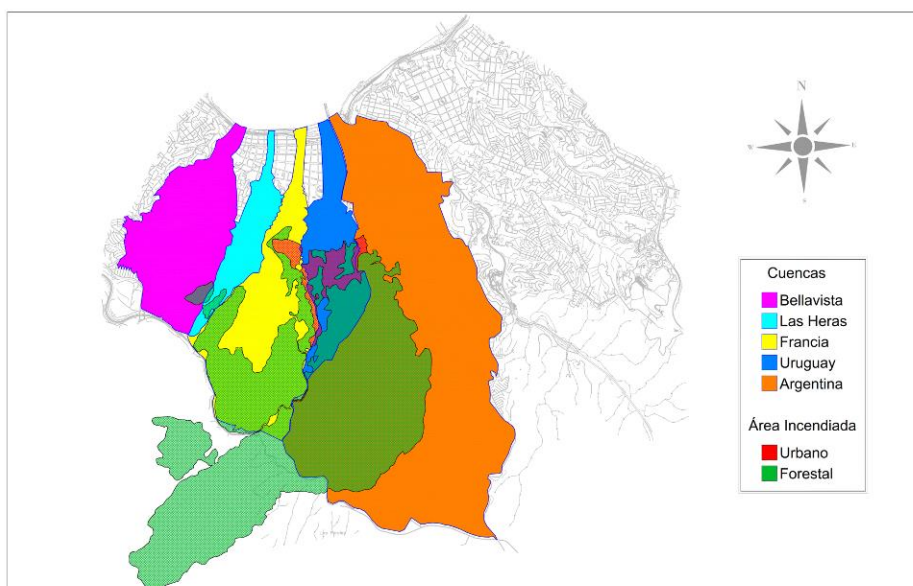


Figura N° 3-2 Esquema en planta Cuencas en Estudio (Elaboración Propia)

Es visible que los porcentajes de afectación de las cuencas de Las Heras y Bellavista son mínimos, con valores de 6.8% (6.5 há) y 2.2% (6.1 há) respectivamente.

Producto de lo anterior, el presente consultor estima innecesario realizar una nueva modelación a las ya realizada por CONIC-BF para esas cuencas, principalmente debido a que como es tan baja la superficie comprometida en ellas, no será notable el cambio en la hidrología previa al incendio, y por ello tampoco para el arrastre de sedimentos.

La representación de las cuencas afectadas se encuentra en los planos 4244-1 (Uruguay), 4245-1 (Francia), 4246-1 (Bellavista), 4247-1 (Las Heras) y 4248- (Argentina).

### 3.4 MODELACIÓN EPA-SWMM SISTEMA URUGUAY

#### 3.4.1 Descripción del sistema de drenaje

El sistema Uruguay es uno de los cinco sistemas ubicados en el llamado “Plan de Valparaíso”; en terreno se logra apreciar que está conformado por 2 grandes quebradas naturales paralelas, la vía principal de escurrimiento es la calle del mismo nombre, la cual posee 2 afluentes principales; el primero corre por la calle Rawson paralela a Uruguay y el segundo proviene de la calle Pocuro. En la zona baja de Uruguay (aguas abajo de la calle Hontaneda), la calle no posee solera, en cambio, posee un gran número de rejillas, paralelas al flujo, las cuales colectan el escurrimiento perpendicular a la calle Uruguay. La zona central, ubicada entre la zona más alta de la calle Pedro de Oña y Hontaneda, se caracteriza por su elevada pendiente y densificación urbana, en ella se encuentran distintos tipos de sumideros, ya sea con rejillas o laterales con entrada libre, los cuales también se encuentran en estados diferentes, en lo que respecta a su conservación y mantención.

Esta, es una de las cuencas que tiene su faja más baja en el “Plan de Valparaíso”, esta faja se encuentra entre la desembocadura del colector y la calle Hontaneda, al igual que los otros sistemas colectores ubicados en el “Plan”, esta zona está completamente urbanizada.

#### 3.4.2 Descripción del modelo existente

El modelo implementado por CONIC-BF (2013) está elaborado en el software EPA-SWMM considerando el aporte incremental de escorrentía desde la parte superior (izquierda) hasta la inferior y su descarga en el mar (derecha), en la cual las subcuencas (subcatchments) entregan su aporte a la subcuenca inmediatamente inferior. En la zona media del dibujo (en colores) se encuentra el inicio de la red de drenaje compuesta por el colector principal y sus ramales. El ingreso de los hidrogramas al sistema, se realiza en los nodos de cabecera del colector, no existiendo en la topología los elementos de regulación (tranques sedimentadores).

La red de aguas lluvias se ha modelado con un sistema dual, lo que implica el uso de la ecuación de onda dinámica para representar la interacción entre calles, sumideros y colectores, además de los elementos de almacenamiento. El modelo cuenta en su parte alta con cuatro ramales, los que al llegar al plan se condensan en dos ramales principales.

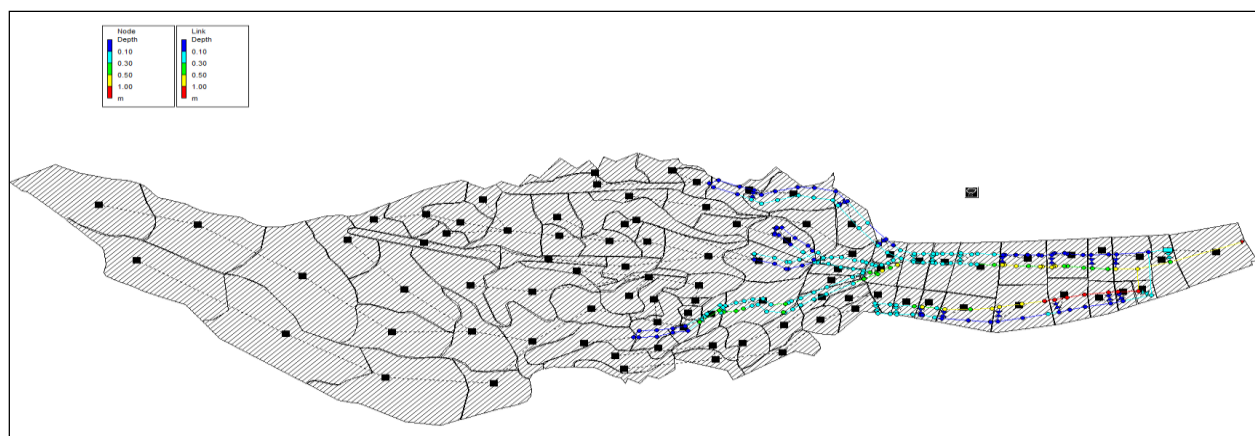


Figura N° 3-3 Modelo Uruguay EPA-SWMM (CONIC-BF, 2013)

### 3.4.3 Consideraciones realizadas

El modelo del sistema Uruguay fue modificado de acuerdo a lo indicado en la metodología del presente estudio. En primera instancia, dado el análisis de los porcentajes de subcuencas afectados por el incendio, se procede a modificar los parámetros relacionados con la infiltración y algunos parámetros relacionados con la estimación de la producción de caudal de las subcuencas (cálculo de escorrentía directa). Posteriormente se agregaron elementos adicionales al sistema y se limitó la capacidad de los sumideros en un porcentaje arbitrario convenido con la Inspección Fiscal.

#### 3.4.3.1 *Modificación de parámetros hidrológicos*

Para efectos de la simulación, en el caso del cálculo de la infiltración, se conserva el método de la Curva Número, utilizado originalmente en la modelación de CONIC. Para considerar el efecto del incendio en la capacidad de infiltración de las subcuencas, se procedió a calcular un valor ponderado del coeficiente de Curva Número, atendiendo a la metodología propuesta por *Livingstone y otros (2005)*, que recomienda un coeficiente de Curva Número de valor 95 para zonas quemadas con alta severidad y para suelos repelentes al agua. Ver Anexo N° 4 con la información de los valores propuestos por este autor. La selección de este valor se ha realizado desde un punto de vista conservador, generando la situación más desfavorable.

Para determinar un coeficiente representativo por subcuenca, se calculó en ésta un área afectada y otra no afectada. Al área afectada se le asignó el valor recomendado por *Livingstone* (CN=95), mientras que al área no afectada se conservó el valor de CN original (modelo CONIC), calculando luego una ponderación del valor de CN por el área total de la cuenca. En la tabla N°3-2 se presentan los valores originales, recomendados y ponderados por subcuenca, y los porcentajes afectados por el incendio en relación al área total de la subcuenca. El criterio anterior fue aplicado indistintamente del porcentaje de afectación de la subcuenca.

Cabe indicar que el modelo conceptual existente en el modelo EPA-SWMM divide cada una de las subcuencas en un área permeable y otra no permeable. Para efectos de este estudio se consideró que los porcentajes de área no permeables se mantuvieron constantes. Esto se decidió debido a que las cuencas forestales tienen porcentajes permeables superiores al 90%, y la aplicación de un cambio en sus porcentajes de área no afectará de gran manera su escorrentía. En el caso de las áreas urbanas los porcentajes son comparables, sin embargo, tal como se observó en visitas a terreno (ver Anexo 3), aun cuando se quemaran las viviendas quedaban sus fundaciones, y sino los pobladores construyen rápidamente viviendas de emergencia que devuelven a una condición similar al escenario previo al incendio en cuanto al porcentaje de área no permeable.

Otro punto que hay que mencionar es que las ponderaciones se han efectuado sólo en las áreas permeables, por cuanto ellas son las principales afectadas, y las que con mayor seguridad cambian sus condiciones hidrológicas.

Tabla N° 3-2 Porcentaje de área afectada y parámetros geomorfológicos Modelo EPA-SWMM Uruguay  
(Elaboración propia)

| Código<br>Área | %   | SWMM Conic-BF |        | SWMM Escenario Incendio |        |
|----------------|-----|---------------|--------|-------------------------|--------|
|                |     | CN            | N-perv | CN                      | N-perv |
| C15-63         | 53% | 85            | 0.13   | 92                      | 0.07   |
| C15-65         | 61% | 85            | 0.13   | 91                      | 0.08   |
| C15-71         | 65% | 85            | 0.13   | 91                      | 0.08   |
| C15-70         | 85% | 85            | 0.13   | 93                      | 0.06   |
| C15-69         | 76% | 85            | 0.13   | 93                      | 0.07   |
| C15-43         | 40% | 89            | 0.14   | 91                      | 0.10   |
| C15-46         | 39% | 95            | 0.13   | 95                      | 0.10   |
| C15-68         | 8%  | 90            | 0.13   | 90                      | 0.12   |
| C15-67         | 64% | 90            | 0.13   | 93                      | 0.08   |
| C15-64         | 14% | 90            | 0.13   | 91                      | 0.12   |

| Código<br>Área | %<br>Afectado | SWMM Conic-BF |        | SWMM Escenario Incendio |        |
|----------------|---------------|---------------|--------|-------------------------|--------|
|                |               | CN            | N-perv | CN                      | N-perv |
| C15-73         | 80%           | 78            | 0.13   | 92                      | 0.07   |
| C15-72         | 75%           | 71            | 0.13   | 89                      | 0.07   |
| C15-50         | 22%           | 95            | 0.13   | 95                      | 0.11   |
| C15-51         | 22%           | 92            | 0.13   | 93                      | 0.11   |
| C15-62         | 70%           | 85            | 0.13   | 92                      | 0.07   |
| C15-57         | 68%           | 87            | 0.18   | 92                      | 0.09   |
| C15-59         | 68%           | 92            | 0.18   | 94                      | 0.09   |
| C15-84         | 56%           | 66            | 0.13   | 82                      | 0.08   |
| C15-85         | 100%          | 66            | 0.13   | 95                      | 0.05   |
| C15-87         | 92%           | 66            | 0.13   | 93                      | 0.06   |
| C15-89         | 54%           | 66            | 0.13   | 82                      | 0.09   |
| C15-86         | 73%           | 70            | 0.13   | 88                      | 0.07   |
| C15-81         | 32%           | 85            | 0.13   | 88                      | 0.10   |
| C15-80         | 53%           | 85            | 0.13   | 90                      | 0.09   |
| C15-76         | 93%           | 85            | 0.13   | 94                      | 0.06   |
| C15-77         | 78%           | 88            | 0.13   | 94                      | 0.07   |
| C15-88         | 64%           | 72            | 0.13   | 87                      | 0.08   |
| C15-74         | 66%           | 85            | 0.13   | 92                      | 0.08   |
| C15-75         | 21%           | 83            | 0.13   | 86                      | 0.11   |
| C15-78         | 71%           | 85            | 0.13   | 92                      | 0.07   |
| C15-79         | 63%           | 85            | 0.13   | 91                      | 0.08   |
| C15-82         | 78%           | 90            | 0.13   | 94                      | 0.07   |
| C15-83         | 100%          | 70            | 0.13   | 95                      | 0.05   |
| C15-52         | 61%           | 93            | 0.37   | 94                      | 0.18   |
| C15-53         | 64%           | 95            | 0.37   | 95                      | 0.17   |
| C15-55         | 29%           | 97            | 0.33   | 97                      | 0.25   |
| C15-56         | 72%           | 98            | 0.37   | 98                      | 0.14   |
| C15-58         | 6%            | 85            | 0.13   | 86                      | 0.13   |
| C15-60         | 24%           | 85            | 0.13   | 87                      | 0.11   |
| C15-61         | 28%           | 85            | 0.13   | 88                      | 0.11   |

#### 3.4.3.2 *Mayoración de caudales considerando aumento transporte sedimentos*

Para considerar la mayoración de caudales por el aumento del transporte de sedimentos producto del incendio se realizó inicialmente una modelación con los parámetros modificados del punto 3.4.3.2, y luego se definió un punto de control en la malla de modelación, para el cual era necesario controlar el caudal mayorado por incendio. La cuenca aportante y el nodo de control se encuentra en el plano 4244-3.

Así, con estos nuevos parámetros asignados a las subcuencas indicadas, se realizó la simulación numérica en EPA SWMM, a modo de extraer el hidrograma modificado por incendio en el nodo de control C-POC-05-117, obteniendo un valor peak para dicho hidrograma de 8,32 m<sup>3</sup>/s. Se escogió este nodo por tres razones, primero debido a que se encuentra al comienzo de la bocatoma del ramal Pocuro, segundo, que las subcuencas de cabecera que llegan a él son las más afectadas en la cuenca de Uruguay, y tercero, el área de cabecera era la más grande entre todos los nodos de ingreso a ramales del colector Uruguay. Gran parte de las subcuencas de cabecera son de tipo forestal, con alto porcentaje de área permeable, por lo que el cambio en los parámetros hidrológicos impacta fuertemente en su régimen de escorrentía. El nodo mencionado se ubica aguas abajo del tranque Kayser inferior.

Luego, en función de la metodología presentada, a fin de obtener un hidrograma modificado por incendio y por arrastre de sedimentos en ese nodo, se comenzó a modificar por tanteos el hietograma de tormenta para el período de retorno de 10 años, con el objeto de obtener una amplificación del caudal peak en un 25% partiendo desde el hidrograma modificado por cambio de condiciones hidrológicas de los suelos. El factor de amplificación del hietograma resultante de toda esta iteración fue de 1.18.

Las cuencas sobre las que se asignó la tormenta mayorada, son las que presentan un porcentaje de afectación importante, especialmente en las zonas forestales que fueron afectadas, y que representan mayor probabilidad de aportar sedimentos al drenaje de la cuenca. Se consideró, a criterio del consultor, que un umbral del 50% del área quemada podría discriminar efectivamente las subcuencas que aportarían sedimentos en una lluvia importante. Por lo anterior, las subcuencas a las que se les aplica el hietograma mayorado son las mismas del listado existente en el punto 3.4.3.1, pero descontando las que no sobrepasan el umbral de área quemada.

Lo anterior no afecta de gran manera los resultados finales, debido a que no hay que perder de vista qué lo que se está haciendo es iterar con el hietograma para que el ruteo de los volúmenes de las subcuencas drenantes al nodo de control entreguen un caudal definido a priori mayorado en 25%. En resumen, si se

le aplica el hietograma mayorado a más cuencas, el factor de amplificación del hietograma original es menor, debido a que el caudal esperado en el nodo se mantiene.

En la tabla siguiente se entrega un listado de las cuencas indicando a cuales se les asignó la tormenta mayorada.

Tabla N° 3-3 Subcuencas con hietograma mayorado (Elaboración propia)

| Código Área | Hietograma                 |
|-------------|----------------------------|
| C15-63      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-65      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-71      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-70      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-69      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-43      | Hietograma T= 10           |
| C15-46      | Hietograma T= 10           |
| C15-68      | Hietograma T= 10           |
| C15-67      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-64      | Hietograma T= 10           |
| C15-73      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-72      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-50      | Hietograma T= 10           |
| C15-51      | Hietograma T= 10           |
| C15-62      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-57      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-59      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-84      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-85      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-87      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-89      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-86      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-81      | Hietograma T= 10           |
| C15-80      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-76      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-77      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-88      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-74      | Hietograma mayorado F=1.18 |

| Código Área | Hietograma                 |
|-------------|----------------------------|
| C15-75      | Hietograma T= 10           |
| C15-78      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-79      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-82      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-83      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-52      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-53      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-55      | Hietograma T= 10           |
| C15-56      | Hietograma mayorado F=1.18 |
| C15-58      | Hietograma T= 10           |
| C15-60      | Hietograma T= 10           |
| C15-61      | Hietograma T= 10           |

La hidrología que se ha aplicado en el modelo provenía del estudio de CONIC-BF. Desde su análisis se obtuvo el hietograma de tormenta para una lluvia de 10 años de periodo de retorno con 24 horas de duración, con una lámina total de 143.2 mm. La forma del hietograma fue obtenida mediante el método de pares alternantes.

Finalmente, luego de la aplicación de todas las modificaciones el caudal peak resultante en el nodo de control es el presentado en la tabla 3-4. Las cuencas restantes tuvieron valores mucho menores, el gran valor se debe al alto porcentaje de subcuencas forestales en la cabecera del nodo en cuestión.

Tabla N° 3-4 Variación del caudal peak en nodo de control (lt/s)

|              | Modelo<br>Conic-BF | Modelo CN, N-perv | Escenario Incendio<br>incluyendo aporte<br>de sedimentos |
|--------------|--------------------|-------------------|----------------------------------------------------------|
| C-POC-05-117 | 1887               | 8317              | 10465                                                    |

### 3.4.3.3 Consideraciones sobre el funcionamiento de los sumideros

El modelo dual elaborado por CONIC-BF cuenta con la implementación de sumideros que conectan la escorrentía de la calzada y su ingreso al colector. Los sumideros que se encuentran modelados en Uruguay representan una batería de sumideros, los que se han agrupado en un solo elemento para efectos del modelo.

Conceptualmente están modelados como “outlets”, ocupando una función caudal/carga. La ecuación de los sumideros tiene la siguiente forma:

|                         |              |
|-------------------------|--------------|
| $Q_{OUT} = A * h^B + C$ | Ecuación (1) |
|-------------------------|--------------|

Donde:

Qout : Caudal ingresado al colector  
 A, B, C : Parámetros de ajuste  
 h : altura de aguas sobre el sumidero

Para considerar el efecto de la pérdida de eficiencia por embancamiento se consideró castigar su funcionamiento reduciendo su capacidad a un 20%. Lo anterior se logró modificando el parámetro “A” para cada uno de los sumideros existentes en el modelo.

Tabla N° 3-5 Reducción 20% de capacidad sumideros Uruguay

| Nombre Sumidero | Nodo entrada  | Nodo descarga  | Coeficiente Conic-BF | Coeficiente Modificado |
|-----------------|---------------|----------------|----------------------|------------------------|
| SUM-80          | C-POC-05-119  | CE-URU-05-119  | 2988                 | 598                    |
| SUM-60          | C-POC-05-130  | CE-URU-05-130  | 23904                | 4781                   |
| SUM-40          | C-URU-05-136  | CE-URU-05-136  | 8964                 | 1793                   |
| SUM-35          | C-URU-05-137  | CE-URU-05-137  | 8964                 | 1793                   |
| SUM-30          | C-URU-05-141  | CE-URU-05-141  | 35856                | 7171                   |
| SUM-25          | C-URU-05-144  | CE-URU-05-144  | 35524                | 7105                   |
| SUM-20          | C-URU-05-149  | CE-URU-05-149  | 41168                | 8234                   |
| SUM-55          | C-URU-05-88   | CE-URU-05-88   | 19256                | 3851                   |
| SUM-45          | C-URU-05-111  | CE-URU-05-111  | 2988                 | 598                    |
| SUM-70          | C-PEQ-05-PM69 | CE-URU-05-PM69 | 11952                | 2390                   |
| SUM-75          | C-URUCOUSIÑO  | CE-URUCOUSIÑO  | 2988                 | 598                    |
| SUM-65          | C-COU-05-99   | CE-URU-05-99   | 14940                | 2988                   |
| SUM-105         | C-ALM-05-160  | CE-URU-05-160  | 2988                 | 598                    |
| SUM-110         | C-ALM-05-158  | CE-URU-05-158  | 11952                | 2390                   |
| SUM-115         | C-ALM-05-PM85 | CE-URU-05-PM85 | 11952                | 2390                   |
| SUM-120         | C-ALM-05-82   | CE-URU-05-82   | 20916                | 4183                   |
| SUM-125         | C-ALM-05-79   | CE-URU-05-79   | 11952                | 2390                   |
| SUM-130         | C-ALM-05-76   | CE-URU-05-76   | 5976                 | 1195                   |

|         |                |                 |       |      |
|---------|----------------|-----------------|-------|------|
| SUM-135 | C-ALM-05-75B   | CE-URU-05-75B   | 2988  | 598  |
| SUM-140 | C-ALM-05-75    | CE-URU-05-75    | 2988  | 598  |
| SUM-15  | C-URU-05-153   | CE-URU-05-153   | 14608 | 2922 |
| SUM-10  | C-URU-05-155   | CE-URU-05-155   | 17596 | 3519 |
| SUM-50  | C-URU-05-PM26C | CE-URU-05-PM26C | 5976  | 1195 |
| SUM-100 | C-ALM-05-162   | CE-URU-05-162   | 14940 | 2988 |
| SUM-85  | C-POC-05-117   | CE-URU-05-117   | 15853 | 3171 |
| SUM-05  | C-URU-05-02    | CE-URU-05-02    | 5976  | 1195 |

#### 3.4.3.4 Calles adicionales

El modelo original solo cuenta con las calles Uruguay y Rawson en el plan. Para redistribuir los volúmenes de escorrentía, y modelar de mejor manera, se integraron al modelo la calle longitudinal Morris, y las transversales: Colon, Independencia, Victoria, Pedro Montt, Chacabuco y Yungay.

La información del ancho de las calles y las líneas de edificación fue extraída desde la restitución realizada por CONIC. En el caso de la sección transversal se utilizó una sección tipo de los otros transectos existentes en el modelo SWMM - Uruguay.



Figura N° 3-4 Ejemplo de sección tipo utilizada en calles adicionales

Las condiciones de rugosidad fueron asignadas mediante la identificación visual del tipo de pavimento existente en cada cuadra.

### 3.4.3.5 Consideraciones de borde en la entrada

Si se considera el aumento considerable del arrastre de sedimentos, no se puede descartar que en algún minuto puedan sobrepasarse los tranques sedimentadores que se encuentran aguas arriba de las bocatomas de los ramales.

Para tener en cuenta este efecto en la modelación, los aportes que antes eran ingresados directamente al colector se redirigieron y se asignaron al nodo de calle más cercano, esto modela una situación donde el colector queda inhabilitado en su tramo inicial y la escorrentía se ve forzada a transitar por las calles y avenidas de los cerros afectados.

Estas escorrentías transitarán hacia aguas abajo por las calles ingresando cuando sea posible, si la capacidad de los sumideros lo permite, al colector y sus ramales en el plano de la ciudad.

En el caso de Uruguay, aguas abajo del tranque Kayser Inferior, en la calle Alessandri, se agregaron elementos adicionales al modelo considerando qué por el aumento importante del caudal en la calle se producirá una condición de sobrepaso en el muro que protege las casas ubicadas en la quebrada. Esto se modela con un vertedero sobre el muro el que fue conectado mediante un link hasta la calle Pocuro, representando así su paso directo por la quebrada.



Figura N° 3-5 Condición de sobrepaso en calle Alessandri y posterior tránsito en quebrada aledaña

### 3.4.3.6 Condiciones de borde en la salida

Producto que el modelo modificado transporta un volumen importante de agua por las calles, al llegar al último nodo de entrada al colector aumenta la altura del eje hidráulico de forma considerable. La situación anterior es poco probable, principalmente porque pueden producirse acumulaciones en puntos bajos o sobrepaso y salida en otra dirección no considerada.

Para considerar lo anterior, se agregó una condición de salida adicional que modela el escurrimiento superficial del agua acumulada en la calle Errazuriz. Para efectos del modelo se conectó a través de la calle Morris por medio de una sección tipo seguida de un vertedero que representa al Bandejón Central, siguiendo luego un link hasta su salida al mar modelado como una sección rectangular.



Figura N° 3-6 Calle Errazuriz y Bandejón Central

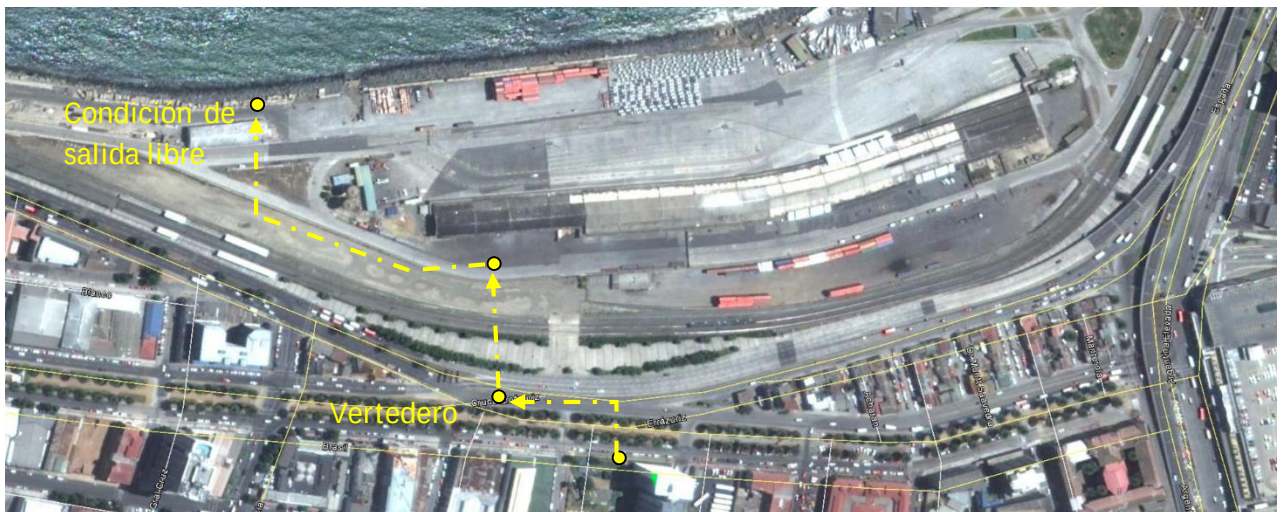


Figura N° 3-7 Salida superficial a través de calle Errazuriz

#### 3.4.4 Resultados obtenidos

Con todas las modificaciones y consideraciones realizadas anteriormente se construyó el modelo existente en el plano 4244-2 “Esquema general Sistema Uruguay – Modelo EPA SWMM – Topología de Construcción”, que representa los elementos integrantes del modelo final realizado.

Para representar los resultados obtenidos de la simulación numérica se elaboró el plano adjunto 4244-4 “Planta General Sistema Uruguay – Alturas Máximas de Esguerrimiento ( $T=10$  años y  $t=24$  hrs)”. Este plano contiene la interpolación de las alturas máximas de esguerrimiento, considerando todo el período de modelación, de los nodos de calle. El plano no representa zonas de inundación, se ha elaborado con gama de colores para generar contraste de las zonas críticas. Adicionalmente, a petición de la Inspección Fiscal, luego de realizada la visita de Inspección del 13 de Mayo del presente año, se han incluido imágenes adicionales y puntos críticos detectados (ver Anexo 3).

En general, los valores de alturas máximas de esguerrimiento en los nodos de calles se encuentran comprendidos entre 0 y 0.6 m. Sin embargo, en la parte más baja de la cuenca, comprendida entre las Avenidas Brasil y Francisco Errazuriz existe un aumento en las alturas máximas, comprendidas entre 0.6 m y 1.0 m. Esto puede generarse por el gran volumen de esguerrimiento que transita por las calles, generado por la condición de borde de entrada y las condiciones de funcionamiento de los sumideros que limitan el ingreso al colector principal, el cual debería tener capacidad para su transporte, generando de esta manera una condición de acumulación en esa zona al no tener capacidad para salir del modelo.

Por otra parte, en las velocidades se obtienen valores máximos comprendidos en un rango entre 5 y 13 [m/s]. Los mayores valores se encuentran en la cabecera de la cuenca, donde las pendientes de las calles son altamente pronunciadas, mayores al 10% en algunos casos, reduciéndose paulatinamente a medida que se disminuye en cota.

De acuerdo al criterio establecido por (Russo et al, 2001) la combinación de alturas y velocidades pueden generar niveles de peligrosidad “ALTO”. Esto debido a que en el punto más álgido de la tormenta de 10 años de periodo de retorno las condiciones de alturas máximas sobrepasan el umbral de 10 [cm] que representan la solera, o las velocidades máximas son mayores a 1.9 [m/s].

### 3.5 MODELACIÓN EPA-SWMM SISTEMA FRANCIA

#### 3.5.1 Descripción del Sistema de Drenaje

Francia es uno de los sistemas colindantes con Uruguay, al igual que éste tiene una vía de escurrimiento principal en la parte baja de la cuenca, esta vía es la calle Francia, que a diferencia de Uruguay, se caracteriza por el gran ancho que posee. Se debe hacer notar que ésta es una de las calles principales de Valparaíso, no sólo por su tamaño, sino por la gran cantidad de afluencia vehicular. Cuando Francia comienza a presentar una mayor pendiente, se angosta y pasa de ser una vía recta a una confluencia de múltiples intersecciones, esto ocurre media cuadra aguas arriba de su encuentro con la calle Baquedano. Existen una gran cantidad de sumideros en la zona baja de la cuenca en un estado aceptable, otro dato a considerar es el tamaño de las tapas de cámaras en la zona, las cuales son de gran tamaño y difícil apertura.



Figura N° 3-8 Calle Francia

La calle Francia comienza en la Av. Alemania, lugar donde termina la zona más poblada de la quebrada que posee este sistema. En las zonas de mayor altitud, gran parte del terreno se encuentra ocupado por abundante vegetación existente, y sólo algunos terrenos de la ladera se encuentran habitados. Cabe destacar que, otro de los aspectos importantes de la zona alta del sistema, es que las vías de escurrimiento no naturales son bastante angostas.

Para la zona sur no urbanizada, la cuenca de Francia tiene su límite con la cuenca del sistema Las Heras; en este sector existe un camino de tierra con menor pendiente que las calles de la faja media de la cuenca, el cual actúa como divisoria de aguas entre ambos sistemas.



Figura N° 3-9 Zona Alta, límite Cuencas Aportantes a Francia y Las Heras

### 3.5.2 Descripción del Modelo Existente

El modelo implementado por CONIC-BF (2013) está elaborado de igual forma que en el caso del colector Uruguay, considerando el escurrimiento desde las cuencas de cabecera (izquierda) hacia el mar (derecha). El ingreso de los hidrogramas afluentes al sistema, se realiza directamente en los nodos de cabecera de los ramales del colector Francia. No se toma en cuenta la regulación de los tranques existentes en cabecera. La modelación del sistema de drenaje se realizó utilizando la ecuación de onda dinámica para simular el comportamiento dual entre las calles y los colectores.

El modelo se encuentra construido de tal manera que en la parte superior las subcuencas entregan su aporte de escorrentía directa a la subcuenca inmediatamente inferior, siguiendo así sucesivamente hasta la subcuenca aledaña al nodo de cabecera del ramal más próximo.

El modelo está construido considerando un ramal principal en cabecera, que en una sección intermedia se comunica con un ramal lateral, llegando luego al plano de la ciudad, transformándose en un solo colector principal.

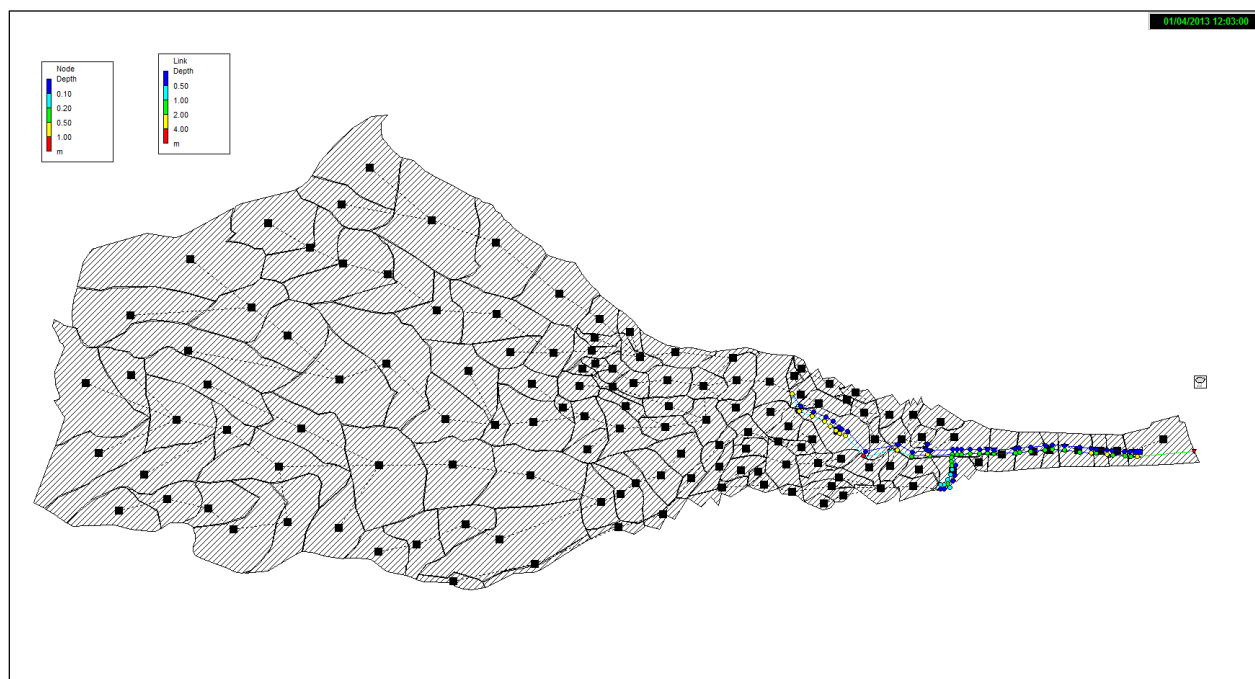


Figura N° 3-10 Modelo Francia EPA-SWMM (CONIC BF, 2013)

### 3.5.3 Consideraciones realizadas

El modelo del sistema Francia fue modificado de acuerdo a lo indicado en la metodología del presente estudio, en su mayoría se siguieron las mismas consideraciones que en el sistema Uruguay.

#### 3.5.3.1 *Modificación de parámetros hidrológicos*

En este acápite se siguieron las mismas consideraciones que en el punto 3.4.3.1 de la cuenca de Uruguay, presentando aquí solamente los resultados de su aplicación. En la tabla N°3-6 se presentan los valores originales, recomendados y ponderados por subcuenca, y los porcentajes afectados por el incendio en relación al área total de la subcuenca.

Tabla N° 3-6 Porcentaje de área afectada y parámetros geomorfológicos Modelo EPA -SWMM Francia  
(Elaboración propia)

| Código<br>Área | %    | SWMM Conic-BF |        | SWMM Escenario Incendio |        |
|----------------|------|---------------|--------|-------------------------|--------|
|                |      | CN            | N-perv | CN                      | N-perv |
| c18-115        | 7%   | 72            | 0.13   | 74                      | 0.12   |
| c18-114        | 96%  | 72            | 0.13   | 94                      | 0.05   |
| c18-113        | 100% | 66            | 0.13   | 95                      | 0.05   |
| c18-134        | 89%  | 66            | 0.13   | 92                      | 0.06   |
| c18-133        | 100% | 66            | 0.13   | 95                      | 0.05   |
| c18-116        | 96%  | 66            | 0.13   | 94                      | 0.05   |
| c18-117        | 100% | 66            | 0.13   | 95                      | 0.05   |
| c18-118        | 99%  | 72            | 0.13   | 95                      | 0.05   |
| c18-120        | 100% | 72            | 0.13   | 95                      | 0.05   |
| c18-119        | 100% | 66            | 0.13   | 95                      | 0.05   |
| c18-130        | 100% | 72            | 0.13   | 95                      | 0.05   |
| c18-132        | 100% | 66            | 0.13   | 95                      | 0.05   |
| c18-131        | 94%  | 66            | 0.13   | 93                      | 0.05   |
| c18-129        | 71%  | 55            | 0.13   | 83                      | 0.07   |
| c18-128        | 91%  | 55            | 0.13   | 92                      | 0.06   |
| c18-126        | 91%  | 66            | 0.13   | 92                      | 0.06   |
| c18-125        | 98%  | 66            | 0.13   | 94                      | 0.05   |
| c18-124        | 94%  | 66            | 0.13   | 93                      | 0.05   |
| c18-123        | 97%  | 66            | 0.13   | 94                      | 0.05   |
| c18-101        | 97%  | 66            | 0.13   | 94                      | 0.05   |
| c18-105        | 15%  | 66            | 0.13   | 70                      | 0.12   |
| c18-106        | 9%   | 66            | 0.13   | 69                      | 0.12   |
| c18-110        | 49%  | 66            | 0.13   | 80                      | 0.09   |
| c18-111        | 96%  | 66            | 0.13   | 94                      | 0.05   |
| c18-112        | 91%  | 66            | 0.13   | 92                      | 0.06   |
| c18-109        | 74%  | 66            | 0.13   | 87                      | 0.07   |
| c18-108        | 65%  | 66            | 0.13   | 85                      | 0.08   |
| c18-107        | 92%  | 66            | 0.13   | 93                      | 0.06   |
| c18-87         | 90%  | 71            | 0.13   | 93                      | 0.06   |
| c18-86         | 65%  | 82            | 0.13   | 91                      | 0.08   |
| c18-104        | 1%   | 66            | 0.13   | 66                      | 0.13   |
| c18-102        | 97%  | 72            | 0.13   | 73                      | 0.13   |

| Código<br>Área | %   | SWMM Conic-BF |        | SWMM Escenario Incendio |        |
|----------------|-----|---------------|--------|-------------------------|--------|
|                |     | CN            | N-perv | CN                      | N-perv |
| c18-100        | 73% | 72            | 0.13   | 89                      | 0.07   |
| c18-94         | 18% | 72            | 0.13   | 76                      | 0.12   |
| c18-95         | 88% | 85            | 0.13   | 94                      | 0.06   |
| c18-99         | 15% | 76            | 0.13   | 79                      | 0.12   |
| c18-98         | 76% | 73            | 0.13   | 90                      | 0.07   |
| c18-121        | 69% | 70            | 0.13   | 87                      | 0.07   |
| c18-97         | 72% | 84            | 0.13   | 92                      | 0.07   |
| c18-96         | 77% | 84            | 0.13   | 92                      | 0.07   |
| c18-75         | 32% | 90            | 0.13   | 92                      | 0.10   |
| c18-73         | 58% | 78            | 0.13   | 88                      | 0.08   |
| c18-76         | 67% | 77            | 0.13   | 89                      | 0.08   |
| c18-77         | 1%  | 72            | 0.13   | 72                      | 0.13   |
| c18-70         | 16% | 81            | 0.13   | 83                      | 0.12   |
| c18-72         | 88% | 77            | 0.13   | 93                      | 0.06   |
| c18-71         | 85% | 77            | 0.13   | 92                      | 0.06   |
| c18-74         | 50% | 89            | 0.13   | 92                      | 0.09   |
| c18-58         | 57% | 87            | 0.13   | 92                      | 0.08   |
| c18-59         | 81% | 79            | 0.13   | 92                      | 0.07   |
| c18-60         | 4%  | 85            | 0.13   | 85                      | 0.13   |
| c18-54         | 58% | 87            | 0.13   | 92                      | 0.08   |
| c18-55         | 55% | 88            | 0.13   | 92                      | 0.09   |
| c18-56         | 82% | 94            | 0.13   | 95                      | 0.06   |
| c18-57         | 31% | 94            | 0.13   | 94                      | 0.11   |
| c18-45         | 74% | 94            | 0.13   | 95                      | 0.07   |
| c18-46         | 85% | 94            | 0.13   | 95                      | 0.06   |
| c18-41         | 1%  | 94            | 0.13   | 94                      | 0.13   |
| c18-44         | 69% | 94            | 0.13   | 95                      | 0.07   |
| c18-43         | 26% | 94            | 0.13   | 94                      | 0.11   |
| c18-49         | 84% | 90            | 0.13   | 94                      | 0.06   |
| c18-51         | 30% | 90            | 0.13   | 92                      | 0.11   |
| c18-50         | 17% | 94            | 0.23   | 94                      | 0.20   |
| c18-48         | 79% | 94            | 0.25   | 95                      | 0.09   |
| c18-36         | 69% | 93            | 0.22   | 94                      | 0.10   |
| c18-35         | 2%  | 97            | 0.34   | 97                      | 0.33   |

| Código<br>Área | %   | SWMM Conic-BF |        | SWMM Escenario Incendio |        |
|----------------|-----|---------------|--------|-------------------------|--------|
|                |     | CN            | N-perv | CN                      | N-perv |
| c18-30         | 0%  | 98            | 0.37   | 98                      | 0.37   |
| c18-29         | 1%  | 98            | 0.37   | 98                      | 0.37   |
| c18-37         | 51% | 97            | 0.32   | 97                      | 0.18   |
| c18-47         | 35% | 93            | 0.13   | 94                      | 0.10   |
| c18-122        | 87% | 66            | 0.13   | 91                      | 0.06   |

### 3.5.3.2 *Mayoración de caudales considerando aumento transporte sedimentos*

En el presente acápite se siguió la misma metodología que en el punto 3.4.3.2. Presentando los resultados y comentando cuando fuera necesario complementar información.

Para considerar la mayoración de caudales por el aumento del transporte de sedimentos producto del incendio se realizó inicialmente una modelación con los parámetros modificados del punto 3.5.3.1, y luego se definió un punto de control en la malla de modelación, para el cual era necesario controlar el caudal mayorado por incendio. La cuenca aportante y el nodo de control se encuentra en el plano 4245-3 "Planta General Sistema Francia - Nodos de Control y Cuencas Aportantes".

Luego, con estos nuevos parámetros asignados a las subcuencas indicadas, se realizó la simulación numérica en EPA SWMM, a modo de extraer el hidrograma en el nodo de control CE-FRA-BOC\_FRANCIA, obteniendo un valor peak para dicho hidrograma de 20,481 m<sup>3</sup>/s. Luego, en función de la metodología presentada, a fin de obtener un hidrograma modificado por incendio y por arrastre de sedimentos en ese nodo, se comenzó a modificar por tanteos el hietograma de tormenta para el período de retorno de 10 años, con el objeto de obtener una amplificación del caudal peak en un 25% partiendo desde el hidrograma modificado por cambio de condiciones hidrológicas de los suelos. El factor de amplificación del hietograma resultante de toda esta iteración fue de 1,3. Este nodo de control fue seleccionado debido a que de los dos ramales existentes es el que tiene la mayor cuenca drenante.

Las cuencas sobre las que se asignó la tormenta mayorada, son las que presentan un porcentaje de afectación importante, especialmente en las zonas forestales que fueron afectadas, y que representan mayor probabilidad de aportar sedimentos al drenaje de la cuenca. Se consideró, a criterio del consultor, que un umbral del 50% del área quemada podría discriminar efectivamente las subcuencas que aportarían sedimentos en una lluvia importante. Por lo anterior, las subcuencas a las que se les aplica el hietograma mayorado son las mismas del listado existente en el punto 3.5.3.1, pero descontando las que no sobrepasan el umbral de área quemada.

En la tabla N°3-7 siguiente se entrega un listado de las cuencas indicando a cuales se les asignó la tormenta mayorada.

Tabla N° 3-7 Subcuencas con hietograma mayorado - Francia (Elaboración propia)

| Código Área | Hietograma                 | Código Área | Hietograma                 |
|-------------|----------------------------|-------------|----------------------------|
| c18-115     | Hietograma T=10 años       | c18-98      | Hietograma mayorado F=1.30 |
| c18-114     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-121     | Hietograma mayorado F=1.30 |
| c18-113     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-97      | Hietograma T=10 años       |
| c18-134     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-96      | Hietograma T=10 años       |
| c18-133     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-75      | Hietograma T=10 años       |
| c18-116     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-73      | Hietograma mayorado F=1.30 |
| c18-117     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-76      | Hietograma mayorado F=1.30 |
| c18-118     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-77      | Hietograma T=10 años       |
| c18-120     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-70      | Hietograma T=10 años       |
| c18-119     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-72      | Hietograma mayorado F=1.30 |
| c18-130     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-71      | Hietograma mayorado F=1.30 |
| c18-132     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-74      | Hietograma T=10 años       |
| c18-131     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-58      | Hietograma T=10 años       |
| c18-129     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-59      | Hietograma mayorado F=1.30 |
| c18-128     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-60      | Hietograma T=10 años       |
| c18-126     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-54      | Hietograma mayorado F=1.30 |
| c18-125     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-55      | Hietograma T=10 años       |
| c18-124     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-56      | Hietograma T=10 años       |
| c18-123     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-57      | Hietograma T=10 años       |
| c18-101     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-45      | Hietograma T=10 años       |
| c18-105     | Hietograma T=10 años       | c18-46      | Hietograma T=10 años       |
| c18-106     | Hietograma T=10 años       | c18-41      | Hietograma T=10 años       |
| c18-110     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-44      | Hietograma T=10 años       |
| c18-111     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-43      | Hietograma T=10 años       |
| c18-112     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-49      | Hietograma T=10 años       |
| c18-109     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-51      | Hietograma T=10 años       |
| c18-108     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-50      | Hietograma T=10 años       |
| c18-107     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-48      | Hietograma mayorado F=1.30 |
| c18-87      | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-36      | Hietograma mayorado F=1.30 |
| c18-86      | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-35      | Hietograma T=10 años       |

| Código Área | Hietograma                 | Código Área | Hietograma                 |
|-------------|----------------------------|-------------|----------------------------|
| c18-104     | Hietograma T=10 años       | c18-30      | Hietograma T=10 años       |
| c18-102     | Hietograma T=10 años       | c18-29      | Hietograma T=10 años       |
| c18-100     | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-37      | Hietograma mayorado F=1.30 |
| c18-94      | Hietograma T=10 años       | c18-47      | Hietograma T=10 años       |
| c18-95      | Hietograma mayorado F=1.30 | c18-122     | Hietograma mayorado F=1.30 |
| c18-99      | Hietograma T=10 años       |             |                            |

La hidrología que se ha aplicado en el modelo provenía del estudio de CONIC-BF. Desde su análisis se obtuvo el hietograma de tormenta para una lluvia de 10 años de periodo de retorno con 24 horas de duración, con una lámina total de 152.1 mm. La forma del hietograma fue obtenida mediante el método de pares alternantes.

Finalmente, luego de la aplicación de todas las modificaciones el caudal peak resultante en el nodo de control es el presentado en la tabla 3-8. En Francia el aumento del caudal peak no fue tan dramático como en la cuenca de Uruguay debido a que las subcuencas tienen menores porcentajes de áreas permeables, y por lo tanto no cambia tanto su hidrología al modificar los parámetros de infiltración y escorrentía.

Tabla N° 3-8 Variación del caudal peak en nodo de control (lt/s) - Francia

|                         | Modelo<br>Conic-BF | Modelo CN, N-perv | Escenario Incendio<br>incluyendo aporte<br>de sedimentos |
|-------------------------|--------------------|-------------------|----------------------------------------------------------|
| Node CE-FRA-BOC_FRANCIA | 13977              | 20089             | 22657                                                    |

### 3.5.3.3 Consideraciones sobre el funcionamiento de los sumideros

El modelo dual elaborado por CONIC-BF cuenta con la implementación de sumideros que conectan la escorrentía de la calzada y su ingreso al colector. Los sumideros que se encuentran modelados en Francia representan una batería de sumideros, los que se han agrupado en un solo elemento para efectos del modelo.

Conceptualmente están modelados como “outlets”, ocupando una función caudal/carga. La ecuación de los sumideros tiene la siguiente forma:

$$Q_{OUT} = A * h^B + C$$

Ecuación (2)

Donde:

Qout : Caudal ingresado al colector  
A, B, C : Parámetros de ajuste  
h : altura de aguas sobre el sumidero

Para considerar el efecto de la pérdida de eficiencia por embancamiento se consideró castigar su funcionamiento reduciendo su capacidad a un 20%. Lo anterior se logró modificando el parámetro "A" para cada uno de los sumideros existentes en el modelo.

Tabla N° 3-9 Reducción 20% de capacidad sumideros Uruguay

| Nombre Sumidero | Nodo entrada  | Nodo descarga  | Coeficiente Conic-BF | Coeficiente Modificado |
|-----------------|---------------|----------------|----------------------|------------------------|
| SUM-05          | C-FRA-08-40   | CE-FRA-08-40   | 17928                | 3586                   |
| SUM-10          | C-FRA-08-34   | CE-FRA-08-34   | 14940                | 2988                   |
| SUM-15          | C-FRA-08-31   | CE-FRA-08-31   | 5976                 | 1195                   |
| SUM-20          | C-PJE-08-32A  | CE-FRA-08-32A  | 11952                | 2390                   |
| SUM-25          | C-VAL-08-30I  | CE-FRA-08-30I  | 17928                | 3586                   |
| SUM-30          | C-FRA-08-26   | CE-FRA-08-26   | 23904                | 4781                   |
| SUM-35          | C-FRA-08-19   | CE-FRA-08-19   | 5976                 | 1195                   |
| SUM-40          | C-FRA-08-16   | CE-FRA-08-16   | 17928                | 3586                   |
| SUM-45          | C-FRA-08-13   | CE-FRA-08-13   | 32868                | 6574                   |
| SUM-50          | C-FRA-08-10   | CE-FRA-08-10   | 14940                | 2988                   |
| SUM-55          | C-FRA-08-08   | CE-FRA-08-08   | 20916                | 4183                   |
| SUM-60          | C-FRA-08-05   | CE-FRA-08-05   | 17928                | 3586                   |
| SUM-65          | C-FRA-PM08-03 | CE-FRA-PM08-03 | 11952                | 2390                   |
| SUM-70          | C-FRA-08-02   | CE-FRA-08-02   | 11952                | 2390                   |

#### 3.5.3.4 Calles adicionales

El modelo original solo cuenta con la calle Francia en el plan. Para redistribuir los volúmenes de escorrentía, y modelar de mejor manera, se integró al modelo la calle longitudinal General Cruz, y las transversales: Colon, Independencia, Victoria, Pedro Montt, Chacabuco, Yungay y Brasil.

La información del ancho de las calles y las líneas de edificación fue extraída desde la restitución realizada por CONIC. En el caso de la sección transversal se utilizó una sección tipo de los otros transectos existentes en el modelo SWMM - Francia.



Figura N° 3-11 Ejemplo de sección tipo utilizada en calles adicionales - Francia

Las condiciones de rugosidad fueron asignadas mediante la identificación visual del tipo de pavimento existente en cada cuadra.

#### 3.5.3.5 Consideraciones de borde en la entrada

En este acápite se tomaron las mismas consideraciones que en el punto 3.4.3.5 de la cuenca Uruguay. Asignando el caudal resultante del rastreo en la cabecera del nodo CE-FRA-BOC-FRANCIA de inicio del colector al nodo calle C-FRA-08-40, haciendo escurrir el caudal por las calles.

#### 3.5.3.6 Condiciones de borde en la salida

Al igual que en Uruguay, producto que el modelo modificado transporta un volumen importante de agua por las calles, al llegar al último nodo de entrada al colector aumenta la altura del eje hidráulico de forma considerable. La situación anterior es poco probable, principalmente porque pueden producirse acumulaciones en puntos bajos o sobrepaso y salida en otra dirección no considerada.

Para considerar lo anterior, se agregó una condición de salida adicional que modela el escurrimiento superficial del agua acumulada en la calle Errazuriz. Para efectos del modelo se conectó a través de la

calle General Cruz por medio de una sección tipo, seguida luego por un estanque de almacenamiento que representa la acumulación entre la calle Errazuriz y el muro divisorio de los terrenos de la empresa VTP, y un vertedero que representa el muro divisorio, siguiendo luego un link hasta su salida al mar modelado como una sección rectangular. No se tomó en cuenta el bandejón central en General Cruz debido a que el flujo puede desviarse por la avenida Errazuriz y llegar hasta su encuentro con calle Francia.

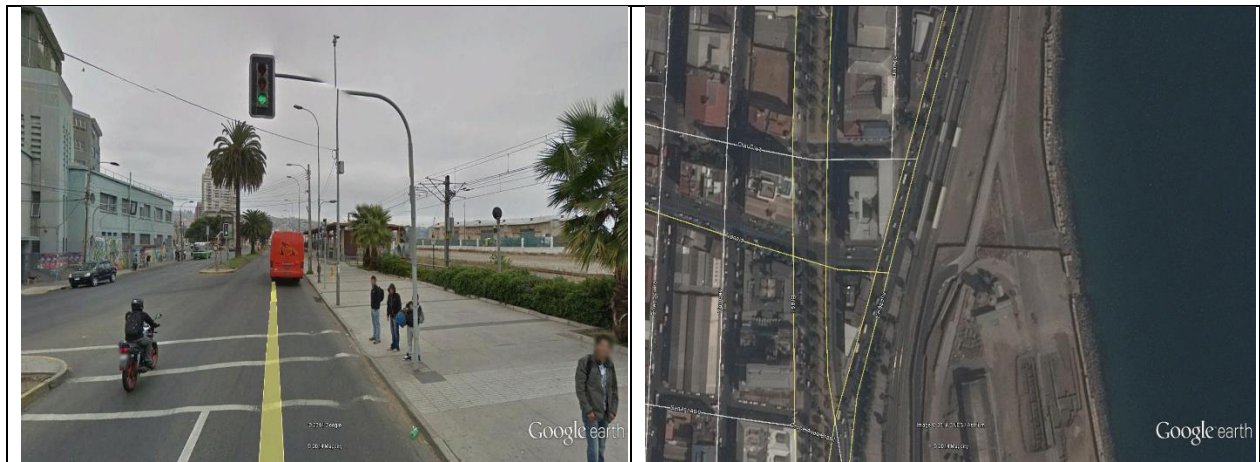


Figura N° 3-12 Vista Avenida Errazuriz con calle Francia y Vista en Planta

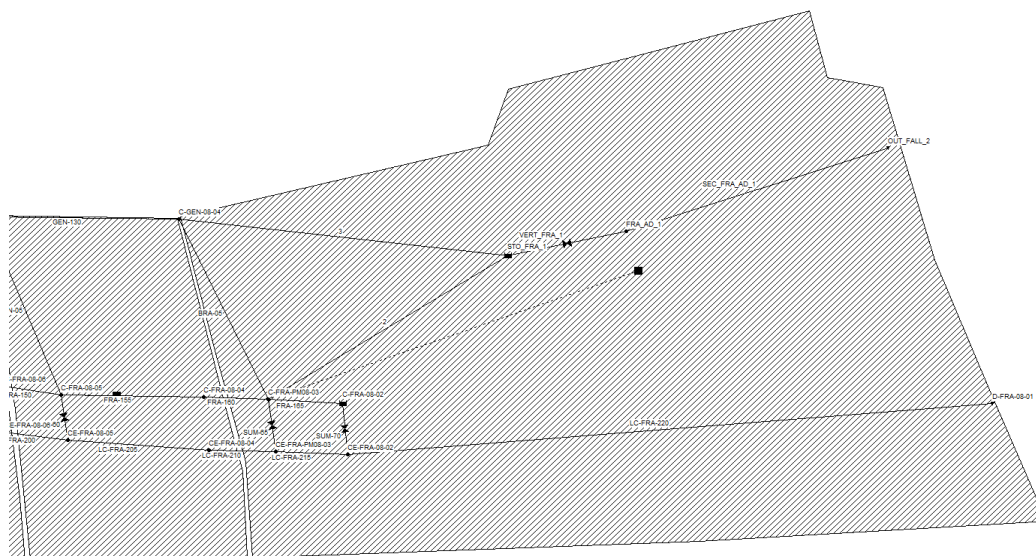


Figura N° 3-13 Vista en Planta de las condiciones de borde en salida del modelo Francia

### 3.5.4 Resultados obtenidos

Con todas las modificaciones y consideraciones realizadas anteriormente se construyó el modelo existente en el plano 4245-2 "Esquema general Sistema Francia - Modelo EPA SWMM - Topología de Construcción", que representa los elementos integrantes del modelo final realizado.

Para representar los resultados obtenidos de la simulación numérica se elaboró el plano adjunto 4245-4 "Planta General Sistema Francia - Alturas Máximas de Esguerrimiento (T=10 años y t=24 hrs)". Este plano contiene la interpolación de las alturas máximas de esguerrimiento, considerando todo el período de modelación, de los nodos de calle. El plano no representa zonas de inundación, se ha elaborado con gama de colores para generar contraste de las zonas críticas.

En general, los valores de alturas máximas de esguerrimiento en los nodos de calles se encuentran comprendidos entre 0.0 y 0.6 m. Sin embargo, en la parte más baja de la cuenca, comprendida entre las Avenidas Brasil y Francisco Errazuriz existe un aumento en las alturas máximas, comprendidas entre 0.4 m y 1.0 m. Esto puede generarse por el gran volumen de esguerrimiento que transita por las calles, generado por la condición de borde de entrada y las condiciones de funcionamiento de los sumideros que limitan el ingreso al colector principal, el cual debería tener capacidad para su transporte, generando de esta manera una condición de acumulación en esa zona al no tener capacidad para salir del modelo.

Por otra parte, en las velocidades se obtienen valores máximos comprendidos en un rango entre 5 y 12 [m/s]. Los mayores valores se encuentran en la cabecera de la cuenca, donde las pendientes de las calles son altamente pronunciadas, mayores al 10% en algunos casos, reduciéndose paulatinamente a medida que se disminuye en cota.

De acuerdo al criterio establecido por (Russo et al, 2001) la combinación de alturas y velocidades pueden generar niveles de peligrosidad "ALTO". Esto debido a que en el punto más álgido de la tormenta de 10 años de periodo de retorno las condiciones de alturas máximas sobrepasan el umbral de 10 [cm] que representan la solera, o las velocidades máximas son mayores a 1.9 [m/s]. En esta cuenca solo en una calle se presentaron condiciones distintas de peligrosidad, debido a que era una calle en cabecera que tenía poco aporte de caudal.

### 3.6 MODELACIÓN EPA-SWMM SISTEMA ARGENTINA

#### 3.6.1 Descripción del Sistema de Drenaje

El sistema de drenaje del sistema en el caso particular del Colector Argentina, está compuesto por dos cuencas tributarias principales, a saber:

Subcuenca Camino Viejo (a Santiago), próxima a la Avenida O'Higgins.

En esta zona existen cuatro Desarenadores, ordenados de aguas arriba hacia aguas abajo, dentro de los Sectores Camino Viejo (SCV) y Chilectra (Sch), son:

- Desarenador Camino Viejo Superior.
- Desarenador Camino Viejo Inferior.
- Desarenador Chilectra Superior.
- Desarenador Chilectra Inferior.

Subcuenca La Canteras, próxima a la Avenida Santa Elena.

Este sistema está incluido dentro del Sector La Canteras y consta de tres Desarenadores, ordenados desde aguas arriba hacia aguas abajo. Ellos son:

Desarenador La Canteras Superior.  
Desarenador La Canteras Intermedio.  
Desarenador La Canteras Inferior.

La superficie total de la cuenca aportante al colector Argentina es de aproximadamente 11,4 Km<sup>2</sup>, la cual ha sido dividida en 41 subcuencas. Las designaciones de las cuencas son las mismas que el PM-08 de Valparaíso.

#### 3.6.2 Descripción del Modelo Existente

El modelo de drenaje para el colector de Av. Argentina fue completamente desarrollado en Visual SWMM (Caice), modelando solo el colector, exceptuando el ramal de la calle Santa Elena desde el tranque La Canteras Inferior hasta Avenida Argentina que tiene un elemento dual.

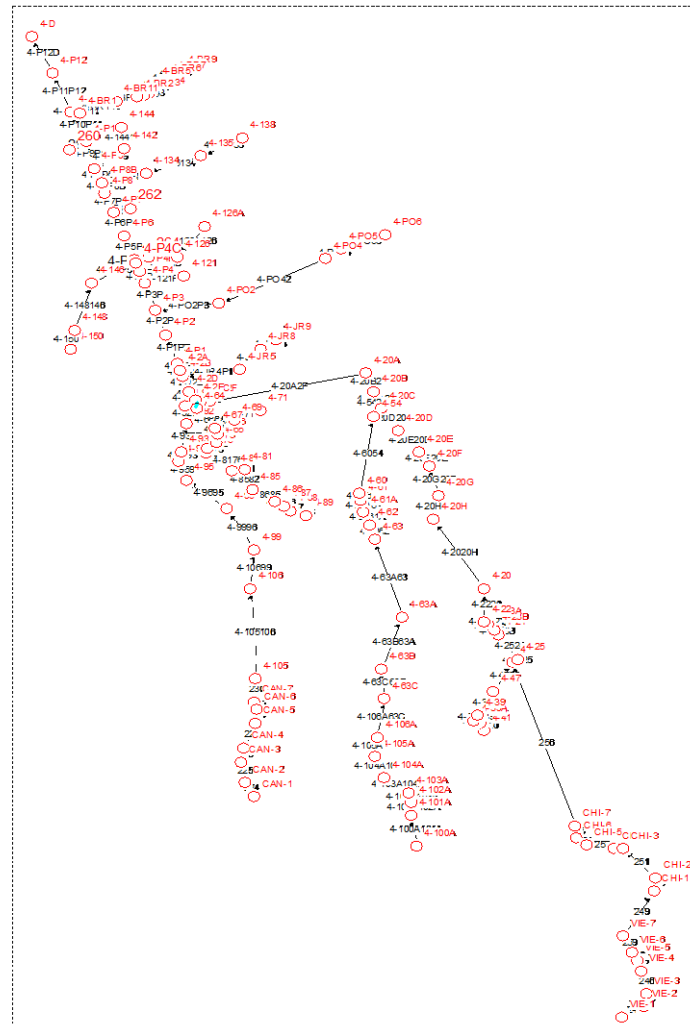


Figura N° 3-14 Modelo Visual SWMM (Caice) Avenida Argentina

El modelo inicial está construido para drenar desde las cuencas de cabecera (abajo en el dibujo) hasta su salida al mar (arriba). En la parte alta es drenado por cuatro ramales principales que se unen al llegar al plan de Valparaíso, formando el colector principal de Avenida Argentina. En el plano de la ciudad el colector principal recibe aportes laterales de los cerros adyacentes.

### 3.6.3 Consideraciones realizadas

Para efectuar la modelación del sistema de drenaje se realizaron las siguientes consideraciones:

#### 3.6.3.1 Hidrología

El modelo desarrollado en Visual SWMM (Caice) fue desarrollado considerando para las subcuencas el cálculo de infiltración por el método de Horton y la obtención de la escorrentía directa por el método racional. Al ser diferente de las cuencas de Uruguay y Francia, calculadas con Curva Número y método de Tanque Modificado (Manning) respectivamente, es que se decidió aplicar una metodología diferente.

- Aplicación de factor de corrección a hidrograma nodo ingreso colector por cambio suelo y vegetación

La metodología utilizada consistirá básicamente en la aplicación del método de Ventura County (Agency Post Fire Hydrologic Methods) (*West Consultants inc, 2011*), el cual consiste en la multiplicación por un factor de corrección que considere el aumento del caudal producto del cambio de las condiciones del suelo y vegetación.

Este método calcula el caudal posterior al incendio aplicando un factor que depende del grado de severidad del incendio, los factores de severidad del incendio propuestos son los que se presentan en la tabla N° 3-1.

Posteriormente al incendio se observa que las cuencas de cabecera existe una condición mixta de los grados de severidad. En el documento "Field Guide for Mapping Post-Fire soil Burn severity" (*Parsons, 2010*) se dan instrucciones para efectuar el reconocimiento del grado de severidad, el que se desarrolla mediante trabajo en terreno y técnicas de teledetección.

Para efectos de este análisis, tomando en cuenta que era es un proyecto de emergencia, se consideró una condición conservadora asociando una severidad media a toda la subcuenca afectada, adoptando un valor de BSF = 1.6. En la figura N° 3-15 se muestra una imagen tomada el 30 de Abril en la zona alta de la cuenca alta de Uruguay que sería de condiciones similares a la cuenca de Avenida Argentina que es aledaña.

Tabla 3-1 Factores por severidad del quemado propuestos

| Condición del incendio                   | BSF | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| No quemado o afectado de manera muy baja | 1.0 | Sin incendio durante 8 años seguidos o muy pequeña afectación.                                                                                                                                                                                                                            |
| Poco Quemado                             | 1.3 | Cenizas negras y vegetación oscurecida desde 0 a 6 meses después de ocurrido el incendio. Las áreas poco quemadas se recuperan más rápido debido a que las semillas y raíces profundas permanecen en su mayoría intactas.                                                                 |
| Quemado Medio                            | 1.6 | Cenizas grises en gran parte del humus, tierra de hojas y arbustos.                                                                                                                                                                                                                       |
| Quemado Alto                             | 2.0 | Cenizas blancas o rojizas en toda la vegetación, y en la materia orgánica superficial y sub-superficial. Se espera la formación de suelos hidrofóbicos. Una zona con quemado alto se demora hasta 10 años en recuperarse debido a que se han quemado gran parte de las semillas y raíces. |

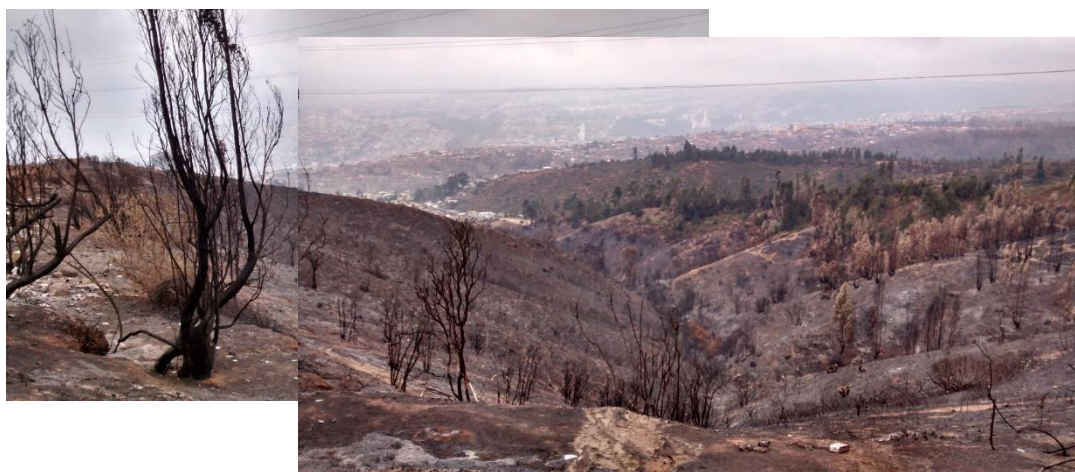


Figura N° 3-15 Grado de afectación por incendio observado en cuenca alta de Uruguay

- Aplicación de factor de corrección a hidrograma nodo ingreso colector por aumento arrastre de sedimentos

Posteriormente, para considerar el efecto del aumento de arrastre de sedimentos (bulking) se tomó en cuenta unos de los *Agency Bulking Factor* propuesto por la Interagency Burned Area Emergency Response (BAER) Team, donde definen que el caudal mayorado por sedimentos será calculado por la siguiente fórmula:

$$Q_B = Q_{pre-fire} + Q_{pre-fire}(\%HighBurn * 0.7 + \%ModerateBurn * 0.5 + \%LowBurn * 0.2)$$

Ecuación (3)

$$BF = 1 + \%HighBurn * 0.7 + \%ModerateBurn * 0.5 + \%LowBurn * 0.2$$

Ecuación (4)

Donde %HighBurn es el porcentaje de área incendiado con una alta severidad en la cuenca, %ModerateBurn con una severidad media y %LowBurn con una baja severidad. La suma de todos estos porcentajes no puede sobrepasar la unidad, y el máximo valor para BF es de 1.7 considerando una cuenca quemada completamente con severidad alta.

En el caso de Av. Argentina la cuenca de control corresponde al nodo P-104 donde se ubica el tranque sedimentador La Cantera Inferior, lugar donde comienza el ramal de la calle Santa Elena, afluente al Colector Argentina. Esta cuenca cuenta con una superficie de 430.2 há, donde se afectaron 374.5 há, teniendo un porcentaje afectado del 87.1%. Para efectos de este estudio se simplificó el análisis y se definió a priori que la cuenca estaba afectada con una severidad media, por lo cual el factor es igual BF=1.435. En el plano 4248-3 se muestran las subcuencas afectadas, la posición del nodo de control y la cuenca afluente a esté.

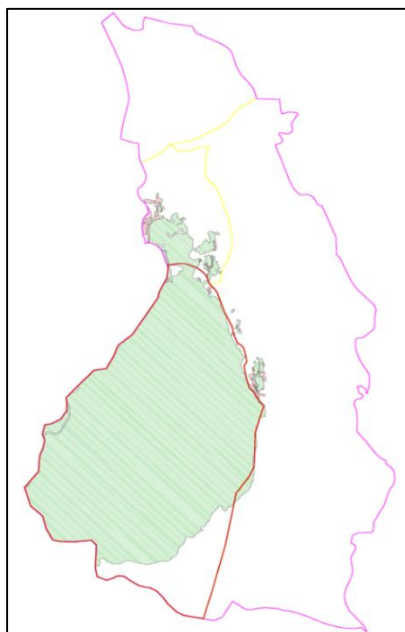


Figura N° 3-16 Áreas afectadas por incendio y subcuenca utilizada para la aplicación de factores de corrección en Av. Argentina.

En la figura 3-16, el área demarcada en rojo considera la cuenca de cabecera afluente al Tranque la cantera Inferior, y la línea magenta toma en cuenta la divisoria de cuenca completa de la Avenida Argentina.

- Factor de corrección total al hidrograma

Finalmente para calcular el hidrograma afluente al Nodo P-104, afectado por cambio de condiciones de suelo y vegetación, además del aumento del aporte de sedimentos, es de  $F=BSF*BF= 2.296$ .

En la figura 3-17 se presenta en azul el hidrograma extraído desde el modelo Visual SWMM en el link 4-106 que está en la posición de La Cantera Inferior, en tanto que en rojo el hidrograma resultante de la aplicación del factor 2.296. El hidrograma modificado será utilizado como un dato de ingreso en el modelo EPA-SWMM a desarrollar.

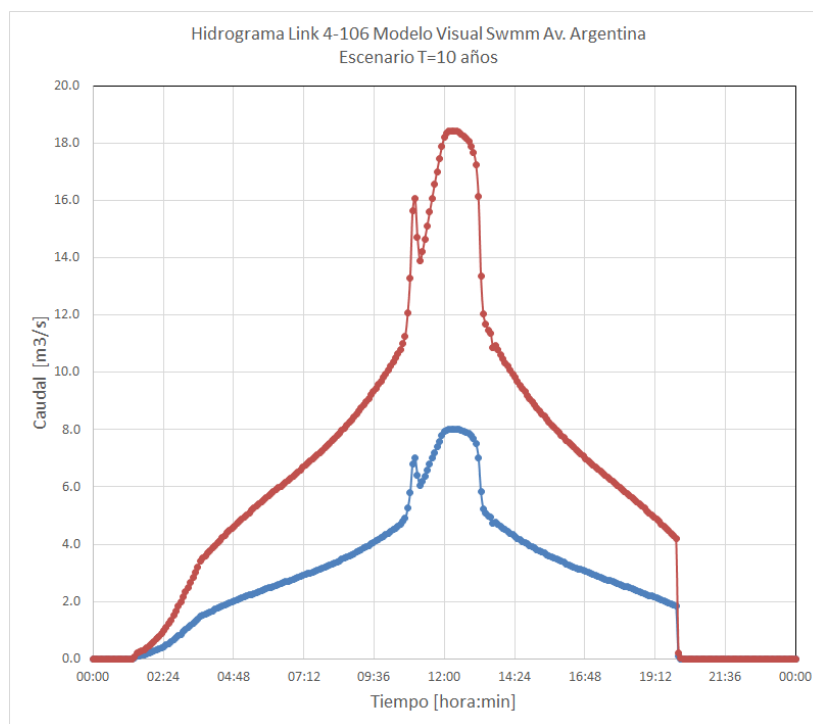


Figura N° 3-17 Hidrogramas Link 4-106 Visual Caice Avenida Argentina -La Cantera Inferior

### 3.6.3.2 Construcción modelo simplificado EPA-SWMM

El modelo existente desarrollado por IRH Ingenieros fue desarrollado completamente en el software Visual SWMM (Caice) no tomando en cuenta el aporte de las calles al drenaje de la cuenca.

Por lo anterior, en vista que los plazos de la consultoría estaban ajustados, se decidió por parte de la Inspección Fiscal y el Consultor, construir un modelo simplificado en el modelo EPA SWMM, considerando lo siguiente:

- El modelo se construyó principalmente para identificar el comportamiento hidráulico que tomaría el exceso de caudal proveniente de una potencial obstrucción de la bocatoma existente en el ramal de calle San Elena. Esta consideración se tomó debido a que en el plano el colector de Avenida Argentina tiene una elevada capacidad de porteo y sería capaz de transportar los aportes de escorrentía provenientes de los ramales que no fueron afectados por el incendio.
- En este caso, el modelo no tomará en cuenta el cálculo de hidrología en subcuencas, sólo modelará la hidráulica y transporte del hidrograma calculado en el punto 3.6.3.1.
- El modelo se construyó considerando sólo la Avenida Argentina y la calle Santa Elena. Esta última esta aguas abajo del tranque Cantera Inferior, y toma en cuenta toda el área afectada por el incendio. En el plano 4248-1 "Planta General Avenida Argentina-Subcuencas Aportantes modelo EPA-SWMM y Zonas Afectadas por Incendio". Los transectos de las calles se construyeron utilizando la topografía con información de anchos de calle y líneas de edificación contenida en los planos de IRH Consultores y los desniveles entre calles, solera y vereda existentes en el modelo Uruguay.
- Dado lo complicado del nudo vial Avenida Argentina, Errazuriz y Brasil, se decidió utilizar información parcial del colector Av. Argentina, existente en el modelo Visual SWMM, para representar las condiciones de Borde de Salida del sistema, tomando en cuenta entonces el colector principal entre la calle Pedro Montt y su descarga al mar. Un esquema de lo anterior puede verse en la Figura 3-18.

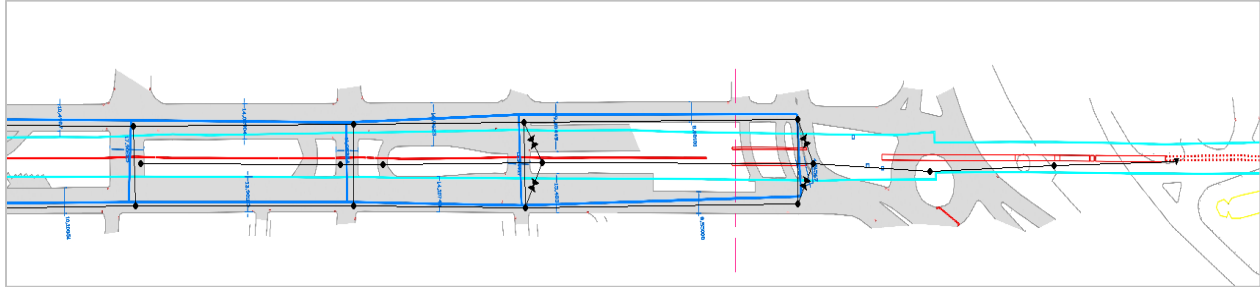


Figura N° 3-18 Vista en planta modelo EPA-SWMM Argentina- tramo Pedro Montt y Descarga al Mar

- Para conectar las calles al colector se modeló utilizando 1 sumidero en cada esquina, que represente la batería de sumideros aledaños a su posición. Como no se tienen datos de las fórmulas de porteo de los sumideros existentes, se utilizaron los datos existentes en los modelos Uruguay y Francia. Los sumideros representados se encuentran sólo en las últimas dos calles finales, Chacabuco y Brasil. A diferencia de los modelos anteriores, en este caso no se afectó la capacidad de los sumideros. En la tabla 3-10 se pueden observar las propiedades asignadas a estos sumideros.

Tabla N° 3-10 Propiedades sumideros Avenida Argentina

| Sumidero    | Nodo Inicio | Nodo Final | Coeficientes |     |     |
|-------------|-------------|------------|--------------|-----|-----|
|             |             |            | A            | B   | C   |
| SUM-ARG-01A | C-ARG-01A   | 4P-10      | 14110        | 1.5 | 0.0 |
| SUM-ARG-01B | C-ARG-01B   | 4P-10      | 14110        | 1.5 | 0.0 |
| SUM-ARG-02A | C-ARG-02A   | 4P-9       | 8960         | 1.5 | 0.0 |
| SUM-ARG-02B | C-ARG-02B   | 4P-9       | 8960         | 1.5 | 0.0 |

El modelo final construido se encuentra representando en el plano 4248-2 "Esquema general sistema Argentina - Modelo EPA SWMM - Topología Construcción", en donde están presentadas las topologías del modelo Visual SWMM utilizada y el modelo en EPA SWMM elaborado.

### 3.6.4 Resultados obtenidos

Para representar los resultados obtenidos de la simulación numérica se elaboró el plano adjunto 4248-4 "Planta General Sistema Argentina - Alturas Máximas de Escurrimiento (T=10 años y t=24 hrs)". Este plano contiene la interpolación de las alturas máximas de escurrimiento, considerando todo el

período de modelación, de los nodos de calle. El plano no representa zonas de inundación, se ha elaborado con gama de colores para generar contraste de las zonas críticas.

En general, los valores de alturas máximas de escurrimiento en los nodos de calles se encuentran comprendidos entre 0.2 y 0.6 m. Las alturas van aumentando paulatinamente a medida que se baja en la cota, principalmente porque el eje hidráulico comienza a tomar carga y hacer ingreso al colector.

Por otra parte, en las velocidades se obtienen valores máximos comprendidos en un rango entre 0.2 y 7 [m/s]. Los mayores valores se encuentran en la cabecera de la cuenca, donde las pendientes de las calles son altamente pronunciadas, mayores al 10% en algunos casos, reduciéndose paulatinamente a medida que se disminuye en cota. Los mayores valores de velocidad se encuentran en la calle Santa Elena.

De acuerdo al criterio establecido por (Russo et al, 2001) la combinación de alturas y velocidades pueden generar niveles de peligrosidad "ALTO". Esto debido a que en el punto más álgido de la tormenta de 10 años de periodo de retorno las condiciones de alturas máximas sobrepasan el umbral de 10 [cm] que representan la solera, o las velocidades máximas son mayores a 1.9 [m/s].

En el caso de Avenida Argentina, a diferencia de los otros modelos, las velocidades son en general más moderadas en el plano, por lo que el valor del nivel de peligrosidad se obtiene principalmente por los valores de alturas de inundación en las calles.

### 3.7 MODELACIÓN FLO2D CONJUNTA SISTEMAS URUGUAY Y FRANCIA

#### 3.7.1 Consideraciones realizadas

##### 3.7.1.1 Construcción malla de modelación

La información utilizada en la construcción de las mallas de modelación consistió básicamente en las curvas de nivel cada 5 [m]; desde la zona alta hasta el veril 10 [m], y cotas de esquinas en las cuerdas obtenidas desde los archivos CAD de la restitución realizada por CONIC-BF.

A partir de esos datos se generó una malla TIN en AutoCAD 2014, a partir de la cual se obtuvo una nube de puntos con una densidad de 2,5 x 2,5 [m]. Esta nube sirvió luego como base para el modelo de terreno, que se compone de una malla cuadrada con elementos de 5,0 x 5,0 [m] de longitud en un área que incluye por completo las cuencas de Uruguay, Francia, Bellavista y Las Heras.

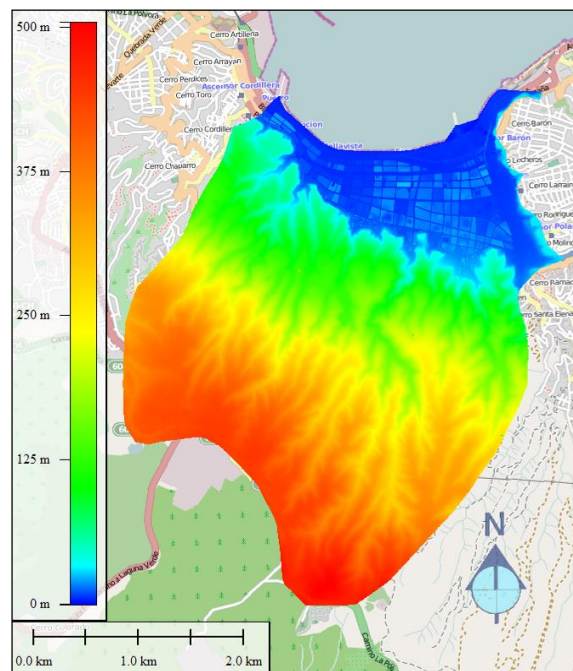


Figura N° 3-19 Modelo de elevaciones digitales de terreno, generado a partir de información de curvas de nivel c/ 5m y cotas de esquinas obtenidas desde restitución estudio CONIC -BF (2013)

En el caso de la Av. Argentina esta no fue considerada en la modelación conjunta debido a que no se encuentra en el mismo sistema topográfico, puesto que su información proviene de otro estudio.

### 3.7.1.2 Construcción del modelo numérico

El software FLO2D es capaz de modelar precipitación, escorrentía superficial incluyendo infiltración, manning variable, calles, paredes o incluso acoplar un modelo SWMM georreferenciado. También posee módulos numéricos para desarrollar el cálculo hidráulico de flujos hiperconcentrados tales como aludes.

Sin embargo, en una primera instancia se trató de construir un modelo unitario de la cuenca de Uruguay utilizando los módulos hidrológicos que tiene integrado el software, aplicando una precipitación de 10 años de periodo de retorno, tomando en la infiltración la formulación de Green Amp o la Curva Número global.

Finalmente se decidió no seguir avanzando en esta dirección debido a que el modelo es muy limitado en cuanto a sus opciones para la modelación hidrológica, y que además era necesario contar con información de los parámetros en forma distribuida, información que al momento no está disponible.

Tomando en cuenta lo anterior, se decidió realizar un modelo utilizando sólo el módulo hidráulico del software, simulando entonces la escorrentía superficial producto de la descarga de los hidrogramas de entrada amplificados por el efecto del incendio en las calles de los sistemas Francia y Uruguay.

Los hidrogramas mencionados se obtuvieron a través del rastreo de crecida en los nodos de control en los modelos EPA-SWMM. Estos se encuentran identificados en la Tabla N° 3-11. De los resultados del modelo SWMM para Uruguay y Francia se extrajeron los caudales en las cabeceras de las calles, teniendo dos hidrogramas para el sistema Francia y cinco para Uruguay. Dichos hidrogramas se ingresaron de manera simultánea según la serie de tiempo extraída. A continuación se exponen los nodos utilizados para las descargas.

Tabla N° 3-11 Nodos EPA-SWMM para obtención hidrogramas de ingreso modelo FLO2D

| Sistema | Nodo Modelo EPA_SWMM |
|---------|----------------------|
| Francia | C-VAL-08-30I         |
|         | CE-FRA-BOC_FRANCIA   |
| Uruguay | BOC-URULITRE         |
|         | C-PEQ-05-PM69        |
|         | C-URUCOUSIÑO         |
|         | C-POC-05-117         |
|         | C-ALM-05-162         |

La modelación anterior esta por el lado de la seguridad debido a que considera que el volumen total de la tormenta que drena hasta los nodos escurrirá superficialmente, no considerando el aporte del colector.

### 3.7.1.3 Condiciones de Borde

Para modelar bidimensionalmente el sistema se establecieron las siguientes condiciones de borde:

- Para la condición de borde en la salida del modelo (salida al mar) se consideró una condición de tipo libre (free).
- En el caso del cálculo del eje hidráulico no se discriminó por distintos escenarios de rugosidad, sino que se estableció un coeficiente de manning de 0.015 para todo el modelo. La decisión anterior se tomó debido a que las mallas numéricas, por lado, son de tamaño considerable.
- En el caso de los sectores edificados se bloqueó el flujo lateral desde las calles hacia los sectores construidos, con el fin de canalizar el flujo por las calles. En la figura N°3-20 las celdas de edificaciones se encuentran bloqueadas para el tránsito de flujo, en color gris-naranja se muestran las celdas completamente bloqueadas y en amarillo las celdas parcialmente bloqueadas dependiendo de la dirección de las calles.

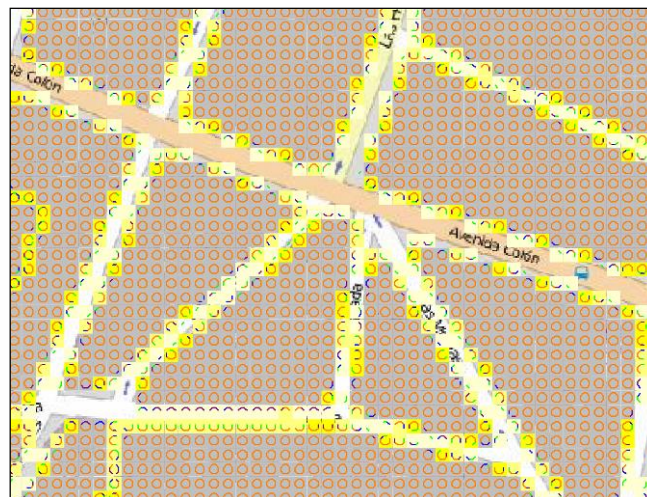


Figura N° 3-20 Condición de borde en edificaciones

### 3.7.2 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos de generar una modelación bidimensional, con los criterios definidos anteriormente, para las cuencas de Uruguay y Francia se presentan en la Figura N°3.21. La misma información se puede encontrar más elaborada en el plano 4249-1 "Alturas de Inundación FLO2D Sistemas Francia y Uruguay".

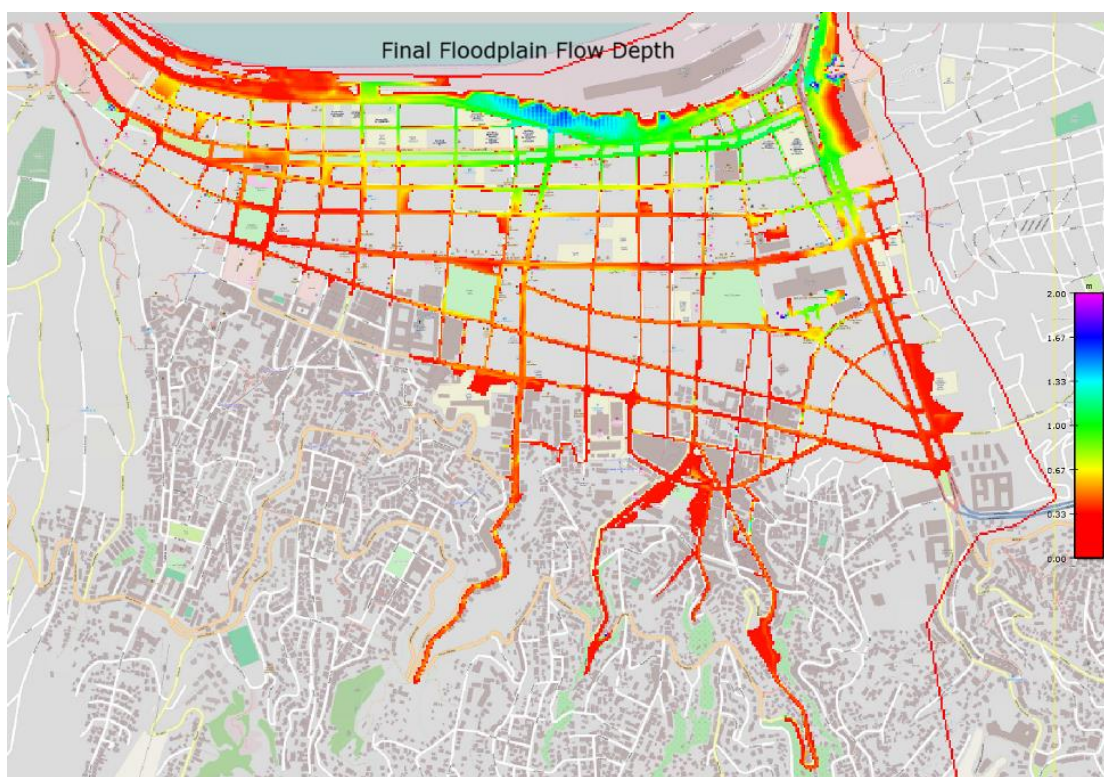


Figura N° 3-21 Esquema alturas de inundación Francia y Uruguay obtenidos desde modelo FLO2D

Dado que la Figura N° 3.21 es complicada de leer se construyó la Figura N°3-22, donde se clasificaron las alturas de inundación en tres rangos, obteniendo de esta manera un mayor contraste para realizar análisis cualitativos de los resultados. La clasificación utilizada es la siguiente:

- Amarillo: Alturas bajas, comprendidas entre 0.0 y 0.30 metros.
- Naranja: Alturas medias, comprendidas entre 0.30 y 1.0 metros.
- Rojas: Alturas altas, superiores a 1.0 metros.

Como se ve en la figura la zona de inundación se extiende fuera de los límites de las cuencas modeladas, lo anterior es debido a que el modelo no tiene limitaciones en los bordes, lo que se considera sería mucho más representativo de la realidad física en caso de producirse las inundaciones esperadas.

El objetivo de dejar libre los bordes es lograr que los volúmenes de agua se distribuyan y se dirijan de acuerdo a la línea de energía existente en las calles, buscando siempre los puntos más bajos de acuerdo a la hidráulica presente. Pero sin embargo, para efectos del análisis, las alturas obtenidas sólo son válidas dentro de los límites de las cuencas.



Figura N° 3-22 Alturas de inundación clasificadas, cuencas Uruguay y Francia, obtenidas a partir de modelo FLO2D

### 3.7.3 Comparación cualitativa de los resultados en comparación al modelo unidimensional EPA-SWMM

Al observar el plano 4249-1, o en su defecto la figura 3-22, se puede mencionar que los resultados obtenidos son muy similares a los presentados en el plano 4250-1 "Resultados Alturas de Inundación Sistemas Uruguay, Francia y Argentina", donde se presentan las alturas obtenidas en los nodos utilizando el modelo EPA-SWMM. Ambos planos entregan sólo información de las alturas.

En la parte alta de las cuencas Uruguay y Francia se presentan alturas menores a los 30 cm, principalmente por la gran pendiente de las laderas. Al ingreso de los nodos en el modelo Unidimensional las alturas se presentan altas producto del peraltamiento necesario para entrar al colector, este efecto no puede ser captado por el modelo Bidimensional ya que fue construido de manera muy rudimentaria. Aguas abajo de la bocatoma el escurrimiento es de baja altura, y en régimen de torrente, por lo que ambos modelos entregan prácticamente el mismo comportamiento.

En la zona media de las cuencas, en el plano, se muestran alturas bajas que van aumentando paulatinamente. En el caso de Avenida Francia la calle desde donde se presentarían alturas superiores comenzaría en la calle Chacabuco, en tanto que en Uruguay, serían a partir de calle Yungay. Bajo estas calles las alturas son están entre 0.3 y 1 metro en FLO2D, lo que es consistente con los resultados obtenidos en los modelos EPA-SWMM.

Las mayores alturas obtenidas en el FLO2D han resultado ser en la zona donde se consideró un elemento de almacenamiento en el modelo Francia, quedando delimitada la zona baja hasta donde escurrirán las aguas por cota de energía si tienen libre su tránsito, y que es aguas abajo de la calle Errazuriz.

Las diferencias de altura en los ejes hidráulicos de los modelos EPA-SWMM y FLO2D están dentro del límite establecido de 0.50 metros, por lo que se considera que los resultados del modelo EPA-SWMM en Uruguay y Francia serán válidos.

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones Generales

En el presente estudio se han analizado los efectos en la hidrología y escorrentía de las cuencas afectadas por el Incendio de Valparaíso, aplicando una metodología propuesta por la Dirección de Obras Hidráulicas, consistente en la utilización de modelos previamente construidos en EPA-SWMM, mejorando su topología, modificando los parámetros de escorrentía de las subcuencas afectadas y aplicando un hietograma de tormenta amplificado para representar el aumento del arrastre de sedimentos producto del deterioro de las cuencas. Junto con lo anterior se revisó en terreno el estado de las cuencas y la red de drenaje, obteniendo la información necesaria para discriminar el cambio en las condiciones pre-incendio.

Realizados todos los cálculos y modelaciones se obtuvieron resultados de alturas de inundación máximas, determinando una situación por el lado de la seguridad (escenario conservador), que entrega información sobre los puntos críticos a tener en consideración por la Inspección Fiscal en su proposición de medidas de mitigación.

### 4.2 Resultados obtenidos en EPA-SWMM

#### 4.2.1 Alturas máximas de inundación

En el caso de la cuenca de Uruguay los valores de alturas máximas de escurrimiento en los nodos de calles se encuentran comprendidos entre 0 y 0.6 m. Sin embargo, en la parte más baja de la cuenca, comprendida entre las Avenidas Brasil y Francisco Errazuriz existe un aumento en las alturas máximas, comprendidas entre 0.6 m y 1.0 m.

En la cuenca de Avenida Francia, los valores de alturas máximas de escurrimiento en los nodos de calles se encuentran comprendidos entre 0.0 y 0.6 m. Entre las Avenidas Brasil y Francisco Errazuriz existe un aumento en las alturas máximas, comprendidas entre 0.4 m y 1.0 m.

En la Avenida Argentina, los valores de alturas máximas de escurrimiento en los nodos de calles se encuentran comprendidos entre 0.2 y 0.6 m. Las alturas hidráulicas van aumentando paulatinamente a medida que se disminuye en cota, principalmente porque el eje hidráulico comienza a tomar carga para hacer ingreso al colector en su parte final.

#### 4.2.2 Velocidades máximas

Las velocidades máximas están distribuidas en la siguiente forma:

- Uruguay:  
Se obtienen valores máximos comprendidos en un rango entre 5 y 13 [m/s]. Los mayores valores se encuentran en la cabecera de la cuenca, donde las pendientes de las calles son altamente pronunciadas, mayores al 10% en algunos casos, reduciéndose paulatinamente a medida que se disminuye en cota.
- Francia:  
Se obtienen valores máximos comprendidos en un rango entre 5 y 12 [m/s]. Los mayores valores se encuentran en la cabecera de la cuenca.
- Argentina:  
Se obtienen valores máximos comprendidos en un rango entre 0.2 y 7 [m/s]. Los mayores valores de velocidad se encuentran en la calle Santa Elena.

#### 4.2.3 Niveles de Peligrosidad

Indistintamente para todas las cuencas se presentan niveles de peligrosidad altos (ver plano 4251-1), los niveles fueron calculados utilizando la clasificación planteada por (*Russo et al, 2011*). La formulación anterior se encuentra sugerida también en el Manual de Drenaje Urbano recientemente publicado por la Dirección de Obras Hidráulicas en el 2013.

Si bien las tres cuencas tienen niveles altos, la avenida argentina presenta mayor preponderancia de mayores alturas que de velocidades, por lo que no sería tan conflictiva como en el caso de las cuencas restantes.

#### 4.3 Comentarios generales del uso del modelo EPA-SWMM

Las formulaciones matemáticas utilizadas para el cálculo de la hidráulica en los links son las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales, estas ecuaciones están restringidas para algunos caso particulares, entre ellas se puede mencionar que: solamente son válidas cuando las aceleraciones verticales son despreciables y las presión hidrostática es dominante, la curvatura de las líneas de flujo son pequeñas y que la pendiente de fondo del canal es pequeña, como que también que el canal no está afecto a erosión o depositación.

De entre todas las condiciones, en las laderas de Valparaíso, no se estaría cumpliendo la condición de pendiente de fondo, dado que para considerarse una pendiente baja estas deben ser menores a  $8^\circ$ , umbral donde las funciones trigonométricas tienen igual valor que el operando. Lo anterior, si bien es crítico, sólo indica que ahí los ejes hidráulicos calculados cuentan con un grado de incerteza mayor, pero como son tan altas las pendientes no cambiarán drásticamente las alturas sino que se ajustarán las velocidades. En el resto de las zonas no se presentarían estos problemas.

Otro punto que hay que mencionar, es que al operar el modelo, cuando se hacen ingresar altos caudales por las calles los elementos de conexión al colector comienzan a generar inestabilidades numéricas, por lo que se debe extremar cuidado cuando se está operando.

#### 4.4 Mejoramiento de las modelaciones futuras

Dado que el presente estudio fue realizado en un corto período de tiempo se estima que sus resultados obtenidos son óptimos en el proceso de planificación de medidas de mitigación dirigidos a mantener niveles de seguridad en la población.

Sin embargo, si se quisiese estudiar otros fenómenos se plantea la utilización de modelos bidimensionales que tomen en cuenta la reología del flujo, entre ellos el modelo FLO2D, el que tiene integrado una formulación especial para el cálculo de la hidráulica de flujos no newtonianos tipo Mudflows, flujos detríticos y Debris Flows.

#### 4.5 Medidas de mitigación eventos de arrastre de sedimentos

Dado que la tuición del mandante solo considera la red primaria, se deja abierta la posibilidad de coordinar con CONAF el manejo forestal de las cuencas de cabecera fuera de las zonas de los cauces. Lo anterior se plantea debido a que es esperable, de acuerdo a lo revisado en la bibliografía, que las cuencas no se recuperen antes de unos tres a cinco años, especialmente debido a que existe un grado de severidad medio a alto en las zonas afectadas por el incendio.

En el documento "Post-Fire Treatment Effectiveness for Hislope Stabilization" el Servicio Agrícola de Estados Unidos (USDA) recoge la experiencia de los estudios realizados en el centro de Investigación Rocky Mountain en Colorado, en cuanto a las medidas de mitigación y recuperación de cuencas afectadas por incendios. En el ámbito nacional se puede consultar lo realizado por el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental (CTHA) de la Universidad de Talca.

Las medidas tienden principalmente a la aplicación de elementos para la recuperación de la biota y las condiciones del suelo previo al incendio. Entre ellas se cuentan la aplicación de aserrines diametrados, emulsiones y tratamientos químicos. En las figuras 4-1 y 4-2 se ejemplifican algunas de estas medidas.

La otra línea considera la implementación de medidas de bajo costo para la estabilización de laderas y el control de su erosión.



Figura N° 4-1 Straw wattles instalados para el control de erosión (Fuente: USDA)



Figura N° 4-2 Aplicación de tratamiento Straw mulch post-incendios (Fuente:USDA)

## 5 REFERENCIAS

En la elaboración del presente estudio se ha utilizado las siguientes referencias:

- Parsons, Annette; Robichaud, Peter R.; Lewis, Sarah A.; Napper, Carolyn; Clark, Jess T. 2010. Field guide for mapping post-fire soil burn severity. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-243. Fort Collins, CO: United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 49 p.
- West Consultants Inc.; 2011. Sediment/ Debris Bulking Factors and Post-Fire Hydrology for Ventura County. Final Report. Contract No. AE09-G20. WEST Project No. COUN002-003. Preparado para Ventura County Watershed Protection District, San Diego, California, EEUU. 184p.
- Foltz, Randy B.; Robichaud, Peter R.; Rhee, Hakjun. 2009. A synthesis of post fire road treatments for BAER teams: methods, treatment effectiveness, and decisionmaking tools for rehabilitation. Gen.Tech. Rep. RMRS-GTR-228 Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 152p.
- Robichaud, Peter R.; Ashmun, Louise E.; Sims, Bruce D. 2010. Post-Fire treatment effectiveness for hill-slope stabilization. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-240. Fort Collins, CO: United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 62p.
- Parsons, Annette. 2003. Soil Burn Severity Definitions and Mapping Guidelines (Draft). Burned Area Emergency Rehabilitation (BAER)
- Livingston, Russell K.; Earles, T. Andrew; Wright, Kenneth R. 2005. Los Alamos post-fire watershed recovery: a curve number-based evaluation. In: Moglen, Glenn E., eds. Proceedings: 2005 watershed management conference-managing watersheds for human and natural impacts: engineering, ecological, and economic challenges; 2005 July 19-22; Williamsburg, VA. Alexandria, VA: American Society of Civil Engineers: 471-481.
- Russo, B; Gómez, M; Macchionne, F. 2011. Experimental approach to determine flood hazard criteria in urban áreas. 12th International conference on urban Drainage, Porto Alegre/Brazil.

## ANEXO N°1 DESCRIPCIÓN MODELO EPA-SWMM

### 1. INTRODUCCIÓN: DESDE SWMM 1 HASTA SWMM 5.0

El modelo de gestión de aguas pluviales EPA SWMM (Storm Water Management Model) de la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (USEPA, U.S. Environmental Protection Agency), es un modelo numérico que permite simular el comportamiento hidrológico-hidráulico de un sistema de drenaje urbano, tanto en términos de cantidad de agua como en la calidad de la misma. Este modelo lleva más de treinta años de uso en los Estados Unidos y se ha difundido por todo el mundo, siendo una herramienta de cálculo reconocida a nivel mundial.

Desde sus inicios hasta antes de la actual versión 5.0, SWMM estuvo estructurado en bloques de cálculo (rutinas), donde cada bloque simulaba numéricamente algún proceso hidrológico o hidráulico en particular. Según Butler y Davies (2004), los principales bloques de cálculo que utilizan las versiones anteriores a la 5.0 son:

- RUNOFF, el cual simula la generación de escorrentía superficial y de contaminantes sobre la cuenca en estudio debido a la precipitación
- TRANSPORT, el cual propaga el flujo y los contaminantes a través del sistema de alcantarillado. Este bloque simula el flujo no permanente usando la aproximación de la onda cinemática
- EXTRAN, el cual propaga el flujo (pero no los contaminantes) resolviendo las ecuaciones completas del régimen no permanente unidimensional (ecuaciones de Saint Venant)
- STORAGE/TREATMENT, el cual estudia el comportamiento del flujo y los contaminantes a través de depósitos de almacenamiento o estaciones de tratamiento de aguas.

### 2. ESQUEMA DE MODELACIÓN USADO POR EPA SWMM 5.0

El programa EPA SWMM 5.0 es un modelo numérico desarrollado principalmente para el estudio, diseño y análisis de sistemas de drenaje urbanos. Este programa simula la formación de escorrentía y cargas contaminantes sobre subcuencas. Luego, estos flujos son transportados a través de la red de drenaje del medio urbano en estudio.

## 2.1 MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE DRENAJE

SWMM 5.0 considera el sistema de drenaje como una colección de elementos y flujos diversos (Objetos) dentro de módulos o capas. Cada una de estas capas representa en forma general diversos procesos hidrológicos o hidráulicos tal como la precipitación o el flujo de aguas pluviales a través de alcantarillas. La siguiente figura muestra el esquema del modelo conceptual de sistema de drenaje que utiliza SWMM 5.0.

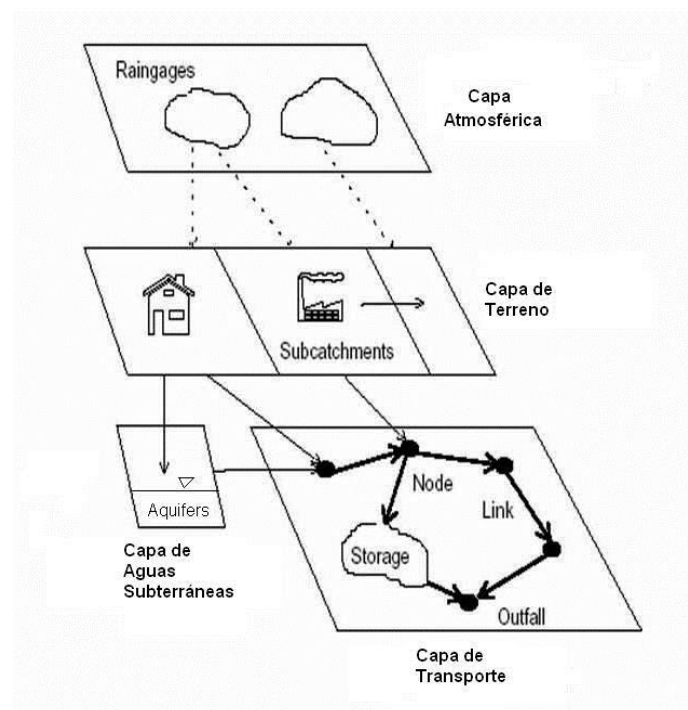


Figura A 1 Modelo conceptual del sistema de drenaje urbano

En el esquema de la figura A1, la capa inicial es la Atmosférica, en la cual se genera la precipitación que cae sobre la capa de Terreno. Este proceso de precipitación es representado en SWMM 5.0 mediante objetos tipo Rain Gage (pluviómetro).

Siguiendo el proceso hidrológico, la capa de Terreno recibe la precipitación proveniente de la capa Atmosférica en forma de lluvia o nieve. En este módulo de Terreno se producen dos procesos hidrológicos: las pérdidas de precipitación, y la escorrentía superficial. Dentro del primer proceso, que considera los fenómenos de infiltración, almacenamiento en depresiones, intercepción, y humidificación superficial, una parte del volumen precipitado se mantiene dentro del módulo de Terreno, y otra fracción se envía

como flujo hacia el módulo de Aguas Subterráneas. En el segundo proceso (escorrentía superficial), se envía flujo y cargas contaminantes hacia la capa de Transporte. Ambos procesos son representados en la capa de Terreno mediante objetos tipo Subcatchment (área captadora o subcuenca).

El módulo de Aguas Subterráneas recibe la infiltración proveniente del módulo Terreno y transfiere una parte hacia la capa de Transporte. Esta capa de Aguas Subterráneas es modelada mediante objetos tipo Acuífer (Acuífero). Por otro lado, la capa de Transporte es la que representa a la red de drenaje en sí misma, la cual puede estar compuesta de secciones de cauce natural, conductos, bombas, reguladores de flujo, así como por elementos de almacenamiento (depósitos de retención), siendo todos ellos los que transfieren el flujo y la carga contaminante hacia los puntos de salida de la red o hacia plantas depuradoras. Los flujos de entrada para este módulo pueden venir de la escorrentía superficial (módulo de Terreno), del flujo interno del módulo de Aguas Subterráneas, de flujos de aguas residuales, o de hidrogramas de entrada definidos por el usuario. Los elementos de la capa de Transporte son representados por EPA SWMM 5.0 como objetos tipo Node (nodo) y Link (conector).

Es importante destacar el hecho de que no necesariamente todas las capas podrían estar en un modelo particular construido con SWMM 5.0. Por ejemplo, se podría analizar sólo la capa de Transporte utilizando como entrada algunos hidrogramas definidos por el usuario.

## 2.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE DRENAJE Y SU REPRESENTACIÓN CON EPA SWMM 5.0.

EPA SWMM 5.0 representa los diversos elementos del sistema de drenaje (conductos, pozos, depósitos, etc.) y los procesos hidrológicos-hidráulicos que ocurren en el sistema (precipitación, infiltración, etc.) mediante objetos. SWMM 5.0 considera dos tipos de objetos:

- Visuales, los cuales pueden ser visualizados por el usuario en el área de trabajo de SWMM 5.0. En general los objetos visuales representan elementos físicos del sistema de drenaje o procesos hidrológicos dentro de éste.
- No visuales, los cuales no se encuentran en el área de trabajo del programa. Estos objetos describen características y procesos adicionales dentro del sistema de drenaje.

El sistema de drenaje se esquematiza como un conjunto de tramos de conducto (denominados enlaces) interconectados por medio de nodos o uniones. El concepto enlace- nodo resulta muy útil para representar dispositivos de control del flujo. Los enlaces transmiten el flujo de nodo a nodo y sus

propiedades asociadas son la rugosidad, la longitud, el área de la sección transversal, el radio hidráulico y el ancho superficial de los conductos; éstas tres últimas son funciones del tirante del flujo.

Los nodos son elementos de almacenamiento del sistema y se corresponden con las cámaras de inspección o uniones de conductos. Tanto las entradas al sistema (hidrogramas de entrada) como las salidas se ubican en los nodos del sistema idealizado.

La Figura A2 muestra componentes físicos típicos que se aplican para modelar un sistema de drenaje de aguas pluviales. Estos componentes u objetos pueden representarse dentro del mapa de SWMM. Conforme se van añadiendo los objetos visuales en SWMM, el usuario debe ingresar las propiedades (datos de lluvia, parámetros geométricos, hidrológicos e hidráulicos y otros).

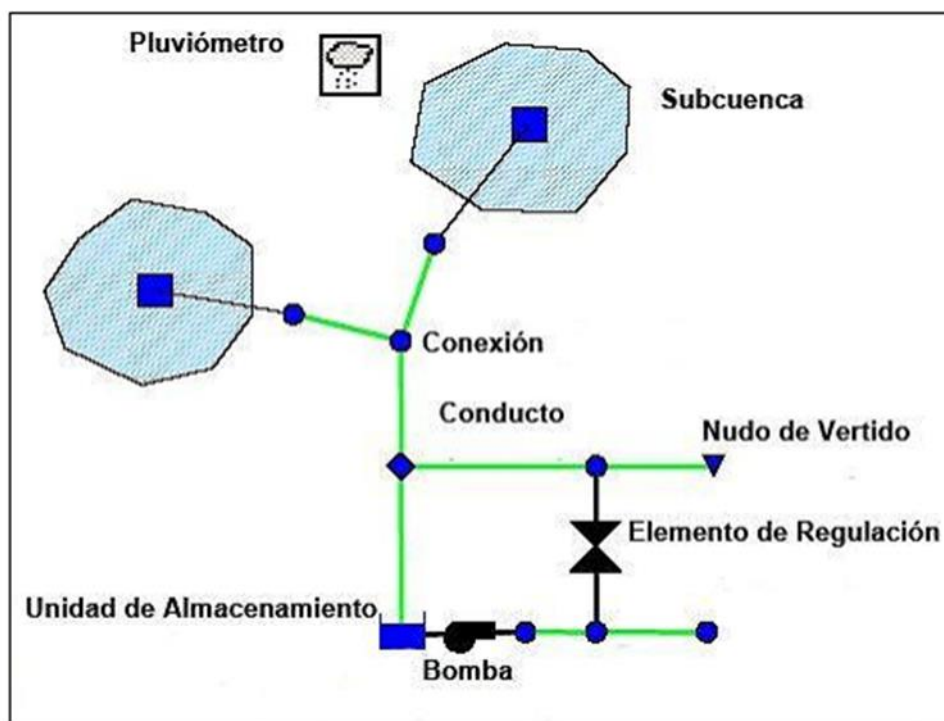


Figura A 2 Componente físicos empleados en el modelo de un sistema de drenaje urbano

La cuenca urbana se desagrega en un conjunto de subcuencas de características hidrológicas homogéneas. Cada subcuenca, se idealiza compuesta por tres áreas: permeable, impermeable con almacenamiento en depresión e impermeable sin almacenamiento en depresión.

Para descontar las pérdidas por infiltración en las áreas permeables el modelo utiliza opcionalmente los métodos de Horton, Green-Ampt y el método del Número de Curva.

## 2.3 MÉTODOS DE CÁLCULO

SWMM 5.0 es un programa hidrológico- hidráulico cuyas rutinas de cálculo se desarrollan sobre los principios de Conservación de la Masa y Conservación de la Cantidad de Movimiento para calcular caudales, calados, velocidades, concentraciones, y otras variables de interés, sobre intervalos de tiempo discretos. Procesos tales como la escorrentía superficial, infiltración, propagación del flujo en la red, y el transporte de contaminantes, son simulados usando estos principios.

La escorrentía superficial que se produce en cada Subcatchment es calculada por SWMM 5.0 asumiendo que cada subcuenca se comporta como un depósito no lineal. El modelo de depósito no lineal es un modelo “agregado” que aplica la ecuación de Conservación de la Masa y una ecuación tipo Onda Cinemática para calcular el caudal de escorrentía superficial a la salida de cada subcuenca. En este modelo de depósito se requieren parámetros tales como el área en planta y el ancho característico de la subcuenca, así como la rugosidad superficial de ella, entre otros parámetros. Además, la infiltración que podría producirse en cada Subcatchment puede ser calculada usando alguno de los tres diferentes métodos que SWMM 5.0 incorpora: método de Horton, método de Green-Ampt, y el método del Número de Curva del NRCS.

EPA SWMM 5.0 permite elegir entre tres diferentes metodologías de cálculo del flujo en la red de drenaje. La primera, denominada como Steady Flow Routing, consiste en asumir que en cada intervalo de tiempo de cálculo las condiciones del flujo no cambian; es decir, se tiene flujo permanente. La segunda metodología es denominada como Kinematic Wave (onda cinemática), y en ésta se considera la variabilidad temporal del flujo. Este método resuelve la ecuación de Conservación de la Masa y una aproximación de la ecuación de Conservación de la Cantidad de Movimiento. El tercero de estos métodos consiste en la resolución de las ecuaciones completas de Saint Venant (Conservación de la Masa y Cantidad de Movimiento), denominado como método de la Onda Dinámica (Dynamic Wave). Este método es el físicamente más correcto, aunque demanda un mayor tiempo de proceso computacional.

El modelo propaga el flujo en cada subcuenca idealizando a ésta como un reservorio no lineal de parámetros concentrados. El caudal de salida de una subcuenca hacia los canales o tuberías se calcula como el producto de la velocidad, obtenida de la ecuación de Manning, la profundidad y el ancho de escurrimiento (Huber y Dickinson, 1992). Esto significa despreciar los términos de inercia y presión de la ecuación dinámica:

$$Q = \frac{W * (d - d_p)^{5/3} * S^{1/2}}{n}$$

Ecuación (A.1)

W: ancho hidráulico de la subcuenca, n: coeficiente de rugosidad de Manning, d: tirante de agua en el reservorio, d: profundidad del almacenamiento en depresión y S: pendiente de la subcuenca.

La ecuación de continuidad es:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = AI - Q$$

Ecuación (A.2)

V: volumen de agua en la subcuenca, t: tiempo, A: área superficial de la subcuenca, I: lluvia en exceso y Q: caudal a la salida

Combinando las ecuaciones (1) y (2) se obtiene la ecuación diferencial del reservorio no lineal:

$$\frac{dd}{dt} = I - \frac{W * (d - d_p)^{5/3} * S^{1/2}}{A * n}$$

Ecuación (A.3)

La ecuación (3) se resuelve mediante un esquema de diferencias finitas simple:

$$\frac{d_2 - d_1}{\Delta t} = I - \frac{W * S^{1/2}}{A * n} \left( d_1 + \frac{1}{2}(d_2 - d_1) - d_p \right)^{5/3}$$

Ecuación (A.4)

Los subíndices 1 y 2 en la ecuación indican el inicio y el fin de un paso de tiempo, respectivamente y  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo.

Las ecuaciones diferenciales básicas para el tratamiento del flujo son las ecuaciones de flujo impermanente, unidimensional y gradualmente variado para canales abiertos, conocidas como ecuaciones de Saint Venant.

Para la opción de onda dinámica, las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento se combinan resultando:

|                                                                                                                                                                                               |                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| $\frac{\partial Q}{\partial t} + g \cdot A \cdot S_f - 2 \cdot V \cdot \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial H}{\partial x} = 0$ | Ecuación (A.5) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|

Q: caudal a través del conducto, V: velocidad media en el conducto, A: área de la sección transversal del flujo, H: carga hidráulica (elevación del umbral del conducto más el tirante de agua),  $S_f$ : pendiente de fricción.

La ecuación que debe ser resuelta en cada enlace-nodo y en cada paso de tiempo. Si se despeja la pendiente de fricción de la ecuación de Manning, se la sustituye en (5) y se expresa la ecuación en diferencias finitas mediante un esquema adelantado, resulta:

|                                                                                                                                                                                         |                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| $Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + \frac{gn^2 \Delta t}{R_h^{4/3}}  V } \left( Q_t + 2V(A_{t+\Delta t} - A_t) + V^2 \frac{A_2 - A_1}{L} \Delta t - gA \frac{H_2 - H_1}{L} \Delta t \right)$ | Ecuación (A.6) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|

Las incógnitas en (6) son  $Q_{t+\Delta t}$ ,  $H_2$  y  $H_1$ . Las variables V,  $R_h$  y A se pueden obtener con Q y H. No obstante, se requiere otra ecuación que relacione Q y H. Esta ecuación se puede obtener a partir de la ecuación de continuidad en un nodo:

|                                                           |                |
|-----------------------------------------------------------|----------------|
| $\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q_t}{A_{St}}$ | Ecuación (A.7) |
|-----------------------------------------------------------|----------------|

$A_{St}$ : área superficial del nodo que se considera.

La ecuación (7) expresada en diferencias finitas con un esquema adelantado resulta:

|                                                           |                |
|-----------------------------------------------------------|----------------|
| $H_{t+\Delta t} = H_t + \frac{\sum Q_t \Delta t}{A_{St}}$ | Ecuación (A.8) |
|-----------------------------------------------------------|----------------|

## ANEXO N°2 DESCRIPCIÓN MODELO FLO-2D

### 1. FORMULACIÓN MATEMÁTICA GENERAL

FLO-2D es un modelo de conservación de volumen simple. Se mueve el volumen de inundación en dos dimensiones a través de una integración numérica de las ecuaciones de movimiento y la conservación del volumen del líquido, ya sea para una inundación de agua o un flujo de sedimentos hiperconcentrada (ejemplo flujos laháricos).

Las ecuaciones de fluidos constitutivas generales incluyen la ecuación de continuidad y la ecuación de movimiento (ecuación de onda de impulso dinámico):

|                                                                                                                                     |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV}{\partial x} = i$                                                                | (A.1) |
| $S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$ | (A.2) |

Donde  $h$  es la profundidad de flujo y  $V$  es la velocidad de la profundidad promediada en una de las ocho direcciones de flujo. El exceso de intensidad de la lluvia ( $i$ ) puede ser distinto de cero en la superficie de flujo. La fricción de la componente  $S_f$  se basa en la ecuación de Manning. Los otros términos incluyen la pendiente del lecho ( $S_0$ ), gradiente de presión y las condiciones de aceleración convectiva y local.

### 2. FLUJOS HIPERCONCENTRADOS

En cuanto a la conservación del volumen del líquido, se tiene que para este estudio el flujo lahárico es un tipo de flujo de sedimento hiperconcentrado con características viscosas. Que se comportan como inundaciones transitorias no Newtonianas, no homogéneos, cuyas propiedades cambian significativamente a medida que fluyen por canales o cuencas empinadas. El comportamiento de este flujo está en función de la geometría del canal, pendiente, rugosidad y a la concentración del fluido compuesto por líquido y sólido. Debiendo considerar que a concentraciones altas los sólidos alteran las propiedades del fluido incluyendo la densidad, viscosidad y tensión de fluencia.

Hay varias relaciones de concentración que ayudan a definir la naturaleza de los flujos de sedimentos hiperconcentrados. Estas relaciones se refieren a la concentración de sólidos y volumen, concentración de sólido en peso, densidad de los sólidos, densidad de la mezcla flujo y el factor de

aumento de volumen. Al examinar los parámetros relacionados con este tipo de flujo, es importante identificar la concentración de sólidos como una medida de peso o volumen. La concentración de sólidos viene dada por:

|                                                                |       |
|----------------------------------------------------------------|-------|
| $C_v = \frac{\gamma C_w}{\gamma_s - C_w\{\gamma_s - \gamma\}}$ | (A.3) |
|----------------------------------------------------------------|-------|

Dónde:

$C_v$  Volumen de sedimento / volumen de agua más sedimentos.

$C_v$  Está relacionada con la concentración de sólidos en peso ( $C_w$ ).

$\gamma$  peso específico del agua.

$\gamma_s$  peso específico del sólido.

$g$  aceleración gravitacional.

El peso específico de la mezcla ( $\gamma_m$ ) es una función de la concentración de sólidos en volumen:

|                                              |       |
|----------------------------------------------|-------|
| $\gamma_m = \gamma + C_v(\gamma_s - \gamma)$ | (A.4) |
|----------------------------------------------|-------|

Del mismo modo la densidad de la mezcla ( $\rho_m$ ) está dada por:

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| $\rho_m = \rho + C_v(\rho_s - \rho)$ | (A.5) |
| $\rho_m = \frac{\gamma_m}{g}$        | (A.6) |

Finalmente, el volumen de la mezcla total de agua y sólido se puede determinar multiplicando el volumen de agua por el factor de aumento de volumen final. El factor de aumento de volumen es simplemente:

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| $BF = \frac{1}{1 - C_v}$ | (A.7) |
|--------------------------|-------|

FLO-2D calcula el movimiento del fluido viscoso en función de la concentración de sólidos. Además se emplea un método reológico cuadrático de tensiones viscosas y rendimiento en función de la concentración de sólidos.

El esfuerzo cortante de los flujos hiperconcentrados se puede calcular a partir de la suma de los cinco componentes de la tensión de cizallamiento. El esfuerzo de corte total de  $\tau$  depende del límite elástico cohesivo ( $\tau_c$ ), el esfuerzo cortante Mohr-Coulomb ( $\tau_{mc}$ ), la fuerza cortante viscosa ( $\tau_v$  ( $\eta dv / dy$ )), el  $\tau_t$  esfuerzo cortante turbulento y el esfuerzo cortante dispersiva  $\tau_d$ .

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (A.8)$$

Cuando se escribe en términos de velocidades de cizalla ( $dv / dy$ ), el siguiente modelo reológico cuadrática se puede definir, (O'Brien, (1985))

$$\tau = \tau_y + \eta \left( \frac{dv}{dy} \right) + C \left( \frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (A.9)$$

En estas ecuaciones  $\eta$  es la viscosidad dinámica;  $\tau_c$  es el límite elástico cohesivo; el estrés Mohr Coulomb  $\tau_{mc} = p_s \tan \phi$ , depende de la presión  $p_s$  intergranular y el ángulo de reposo del material  $\phi$ ,  $C$  denota el coeficiente de esfuerzo cortante inercial, para mayor información ir a FLO-2D, (2009).

Para definir todos los términos de esfuerzo cortante para su uso en el modelo FLO-2D, se tomó el siguiente enfoque. Por analogía, de la obra de Meyer-Peter y Müller (1948) y Einstein (1950), la relación de tensión de corte es la profundidad integrada y reescrito en el siguiente formulario como una pista de dimensiones:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} \quad (A.10)$$

Donde la fricción total de la pendiente  $S_f$  es la suma del pendiente producida ( $S_y$ ), la pendiente viscoso ( $S_v$ ), y la pendiente turbulenta-dispersiva ( $S_{td}$ ). Los términos de pendiente viscoso y turbulento-dispersivo se escriben en términos de velocidad de la profundidad promediada en  $V$ . La pendiente viscosa puede ser escrita como:

$$S_v = \frac{K n}{8 \gamma_m} \frac{V}{h^2} \quad (A.11)$$

Donde  $\gamma_m$  es el peso específico de la mezcla de los sedimentos. El parámetro  $K$  es la resistencia para el flujo laminar, igual a 24 para los canales sin problemas de ancho rectangular, pero aumenta significativamente ( $\sim 50.000$ ) con la rugosidad y la sección transversal de geometría irregular.

La resistencia al flujo de los componentes de esfuerzo cortante turbulento y dispersivo se combina en una dotación equivalente de  $n$ -valor para el flujo:

$$S_{td} = \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (A.12)$$

En concentraciones muy altas, el estrés producido por el contacto de dispersión de partículas de sedimentos aumenta la resistencia al flujo. Para estimar este incremento en la resistencia al flujo, la resistencia al flujo turbulento convencional valor de  $n_{td}$  se incrementa por una función exponencial de la concentración de sedimentos  $C_v$ :

|                            |        |
|----------------------------|--------|
| $n_{td} = n_t b e^{m C_v}$ | (A.13) |
|----------------------------|--------|

En que  $n_t$  es el valor turbulento,  $b$  es un coeficiente (0.0538) y  $m$  es un exponente (6,0896). Esta ecuación se basa en el documento no publicado por Julien y O'Brien (1998) que se refiere la dispersión y la resistencia turbulenta en los flujos de sedimentos hiperconcentrados como función de la relación de la profundidad de flujo para el tamaño de grano del sedimento.

Los componentes de la pendiente de fricción se pueden combinar de la siguiente forma:

|                                                                                                   |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| $S_f = \frac{\tau_\gamma}{\gamma_m h} + \frac{KnV}{8\gamma_m h^2} + \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}}$ | (A.14) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|

Una solución de la ecuación cuadrática para la ecuación de pendiente de fricción anterior se ha formulado en el modelo FLO-2D para estimar la velocidad para su uso en la ecuación de momento. La velocidad estimada representa la velocidad de flujo calculado a través de la zona de inundación usando la profundidad media de flujo entre los elementos.

Deben considerarse para simular flujos hiperconcentrados en el modelo, la subrutina MUD y la viscosidad y el rendimiento variables de estrés en la subrutina SED.DAT. Al final de la simulación, el modelo entrega información sobre la cantidad de agua y sedimentos removidos del área de estudio, cantidad y ubicación del agua, sedimentos que quedan en el canal, extensión del área de inundación, profundidades máximas de flujo y las velocidades.

### 3. RESOLUCIÓN NUMÉRICA

Si bien la ecuación (1.1) y (1.2) representan una dimensión promedio de flujo de canal, FLO-2D es un modelo de flujo de multidirección, en que las ecuaciones de movimiento se aplican mediante el cálculo de la velocidad de flujo promediado a través de una grilla, en donde hay ocho posibles direcciones de flujo, los cuatro puntos cardinales (norte, este, sur y oeste) y las cuatro direcciones diagonales (noreste, sureste, suroeste y noroeste). Todos los cálculos de la velocidad son esencialmente unidimensionales en la naturaleza, por lo que se resuelve de forma independiente de las otras siete direcciones. La estabilidad de este esquema numérico explícito se basa en criterios estrictos para controlar el paso del tiempo.

FLO-2D calcula el flujo superficial en 8-direcciones, considerando la conservación de la masa con un esquema de paso del tiempo variable, incorporándose criterios de estabilidad numérica.

La solución de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento se resuelven considerando un *esquema numérico central en diferencias finitas*. Este esquema explícito resuelve la ecuación de momento para la velocidad del flujo por cada cuadrícula de la malla. La solución de la forma diferencial de la ecuación de momento resulta de una representación discreta de la ecuación cuando se aplica en un punto.

El dominio de la solución en el modelo FLO-2D es discretizado en elementos cuadrados de red uniforme. El procedimiento de cálculo para el flujo superficial implica el cálculo de la descarga a través de cada uno de los límites en las ocho posibles direcciones de flujo y comienza con una estimación lineal de la profundidad de flujo en el límite del elemento de rejilla. Estimaciones no lineales de la profundidad límite se intentaron en las versiones anteriores del modelo, pero no mejoró significativamente los resultados. Otros parámetros hidráulicos también se promedian entre los dos elementos de la red para calcular la velocidad de flujo que incluye resistencia al flujo (Manning de n-valor), área de flujo, la pendiente, elevación de la superficie del agua y el perímetro mojado. La velocidad de flujo (variable dependiente) se calcula a partir de la solución de la ecuación de momento.

De la ecuación completa de segundo orden de onda dinámica, no lineal, diferencial parcial, se resuelve la velocidad de flujo en un elemento de cuadrícula de la malla, inicialmente se calcula con la ecuación de onda difusiva usando la pendiente media de la superficie del agua (más el gradiente de la pendiente del lecho cabeza de presión). Esta velocidad se utiliza entonces como una primera estimación en la ecuación de onda dinámica completa que considera Newton-Raphson de segundo orden con método de tangente para determinar las raíces de la ecuación FLO-2D (2009). La ecuación de Manning se aplica para calcular la pendiente de fricción. Si la solución de Newton-Raphson no converge después de 3 iteraciones, el algoritmo por defecto entrega la solución de onda difusiva.

Los criterios de estabilidad numéricos se comprueban para cada elemento de la rejilla en cada paso de tiempo para asegurar que la solución es estable. Si se exceden los criterios de estabilidad numérica, se disminuye el paso de tiempo y todos los cálculos hidráulicos anteriores para ese paso de tiempo se descartan. La mayoría de los esquemas explícitos están sujetos a la condición de Courant-Friedrich-Lewy (CFL) para la estabilidad numérica. La interpretación física de la condición CFL es que una partícula de fluido no debe viajar más que el incremento espacial en un paso de tiempo.

El paso de tiempo  $\Delta t$  está limitada por:

|                                             |        |
|---------------------------------------------|--------|
| $\Delta t = \frac{C \Delta x}{\beta V + c}$ | (A.15) |
|---------------------------------------------|--------|

Dónde:

Ces el número de Courant ( $C \leq 1,0$ ).

$\Delta_x$  es el ancho cuadrado elemento de cuadrícula.

V es la velocidad de la sección transversal media calculada.

$\beta$  es un coeficiente.

c es la celeridad de la onda computarizada.

En el caso que la condición de CFL no se pueda cumplir en el modelo configurado, existe la posibilidad en el modelo de definir la estabilidad en base al porcentaje de cambio en la profundidad (DEPTOL) y los criterios de estabilidad dinámica de la onda completa (WaveMax), FLO-2D (2009). Sin embargo para la mayoría de simulaciones de inundación, la variación del número de Courant será suficiente para la estabilidad numérica.

El paso de tiempo por lo general va entre 0,1 a 30 segundos, comenzando con un paso de tiempo mínimo igual a 1 segundo y cambia en función de que los criterios de estabilidad sean cumplidos.

Los parámetros de calibración son: (1) volumen de descarga asociados en los hidrogramas, (2) porcentaje de sólidos en el flujo, (3) rugosidad de las cuencas, (4) coeficientes de los sedimentos hiperconcentrados, (5) tiempo total y (6) paso de tiempo de la modelación.

## ANEXO N°3 VISITAS DE INSPECCIÓN

### A. Visita 30 de abril 2014

|             |      |                    |                                                  |
|-------------|------|--------------------|--------------------------------------------------|
| Asistentes: | INH: | Rodrigo Herrera    | Ingeniero de Proyecto                            |
|             |      | Héctor Hernández   | Jefe de Proyecto                                 |
|             |      | Luis Zamorano      | Jefe Unidad Ingeniería y Desarrollo              |
|             |      | Eduardo Santibáñez | Jefe División                                    |
|             | DOH: | Luis Estellé A.    | Inspector Fiscal Contrato Emergencia Valparaíso, |
|             |      | Willy Cordero      | Inspector Fiscal DOH                             |

#### Objetivos:

- Recorrer las cuencas afectadas por el incendio, para determinar la validez de los valores propuestos por el consultor para los parámetros hidrológicos.

#### Observaciones

El recorrido de terreno comenzó en la zona urbana de la cuenca de cabecera del colector Uruguay, luego se revisó el estado de avance de las obras de remoción de escombros desde los tranques sedimentadores. Posteriormente, se pasó a la cuenca del Colector Francia, subiendo hasta llegar al camino de la Pólvara, para bajar a continuación por la parte posterior de la cárcel de Valparaíso por el cerro Bellavista.

#### Conclusiones generales

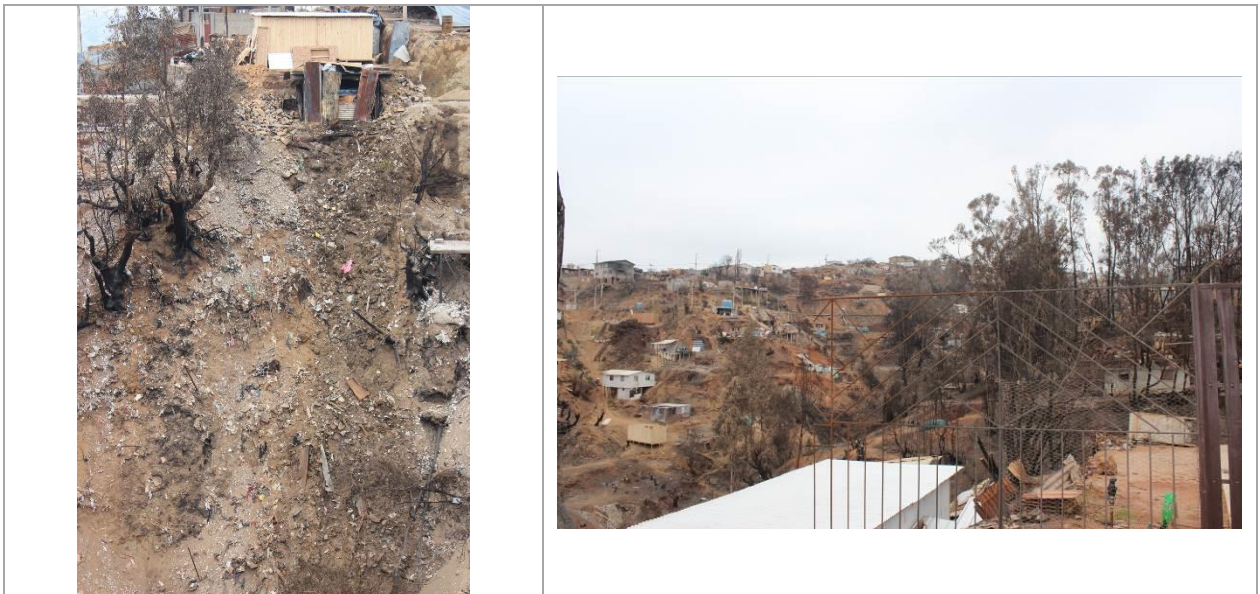
Desde la visita a terreno se pudo validar que la información planimétrica de las áreas afectadas en Bellavista y las Heras es veraz, estado ellas muy poco afectadas.

Adicionalmente, se validó la hipótesis propuesta de que los porcentajes de área "no permeable" se mantienen en la zona urbana a pesar de estar quemadas las casas, esto debido a que en su gran mayoría de los casos quedaron las losas de fundación.

En cuanto al arrastre de sedimentos, por las características de los suelos, la cantidad escombros y sedimentos sueltos existe una gran posibilidad que se produzca un evento importante de flujo denso.



Condiciones presentes en la zona urbana al momento de la visita. A la derecha se observan las losas de fundación existentes, en la izquierda la rápida reconstrucción de viviendas temporales.



En la fotografía de la izquierda se observa el depósito de escombros en las laderas de los cerros. En la fotografía de la derecha las condiciones de afectación en el Cerro Las Cañas.



En la imagen derecha se observa una panorámica desde el camino la pólvora hacia la cuenca de Uruguay. Gran parte de la vegetación desapareció, quedando solo los restos carbonizados. A la derecha imagen de las cenizas existentes en la posición de la primera imagen.



En la imagen izquierda se observa el grado de afectación en la zona forestal de la cuenca de Uruguay. En la imagen de la derecha se muestra una vista de uno de los tranques sedimentadores visitados.

## B. Visita 13 de Mayo 2014

|             |      |                                     |                                                                                         |
|-------------|------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Asistentes: | INH: | Héctor Hernández                    | Jefe de Proyecto                                                                        |
|             | DOH: | Luis Estellé A.<br>Rodrigo Mansilla | Inspector Fiscal Contrato Emergencia Valparaíso,<br>Jefe Aguas Lluvias y Drenaje Urbano |

### Objetivos:

- Revisar en terreno los resultados de la modelación de la cuenca del colector Uruguay.

### Observaciones

A partir de los resultados obtenidos para las modelaciones hidráulicas en EPA-SWMM se visitaron los puntos críticos con alturas importantes o velocidades altas. Los puntos corresponden a la zona alta, específicamente en la calle Pocuro, y en el plano, en las inmediaciones del Congreso, y en las Calles Brasil y Avenida Francisco Errazuriz. Además se revisó el estado de avance de las obras de limpieza del tranque Kayser Inferior.

### Conclusiones generales

Revisados los puntos críticos del modelo se plantean medidas de mitigación por parte de la inspección fiscal en las zonas afectadas. Estas observaciones se encuentran recogidas en el plano N°4244-04.



En la imagen izquierda y derecha se observa la condición existente en el tranque kayser inferior.



En la imagen izquierda se muestra la calle Francisco Errazuriz en su intersección con calle Morris, en esta zona se agregó un vertedero para representar el peraltamiento del eje hidráulico que podría producirse por el Bandejón central de la calle Errazuriz. En la imagen de la derecha se observa la contaminación del colector Uruguay en la zona del Mercado Cardonal, donde los feriantes ocupan las cámaras como basureros, obstruyendo parcialmente su sección transversal.



En las imágenes de izquierda y derecha se presentan las condiciones de severidad del incendio en la zona alta de Uruguay, en la subcuenca drenante hacia el tranqué Kayser Superior (derecha).

#### ANEXO N°4 VALORES CN POST INCENDIO PROPUESTOS POR LIVINGSTON ET AL (2005)

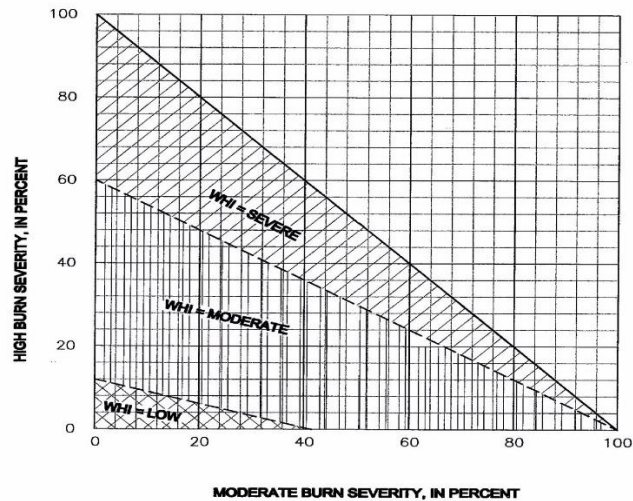
Livingston y sus colaboradores entregaron indicaciones para escoger valores de CN post incendio. Ellos usaron valores registrados de CN pre y post incendio de 31 subcuencas comprendidas entre 28 y 595 hectáreas en el área de Los Alamos en Nuevo México, y 24 subcuencas afectadas el 2002 por el incendio de “Long Mesa” en el Parque Nacional Mesa Verde en Colorado, Estados Unidos. Los resultados de sus estudios son aplicables las áreas en Los Alamos y otras áreas al sureste con similares valores de CN pre incendio e hidrología, no son aplicables a áreas con diferentes características de precipitación y escorrentía previas al incendio.

| Severidad de quemado del suelo          | Curva Numero Estimada |
|-----------------------------------------|-----------------------|
| Alta, con suelos repelentes al agua     | 95                    |
| Alta, sin suelos repelentes al agua     | 92                    |
| Moderada, con suelos repelentes al agua | 89                    |
| Moderada, sin suelos repelentes al agua | 87                    |
| Baja                                    | 80-83                 |
| No afectada                             | 55-75                 |

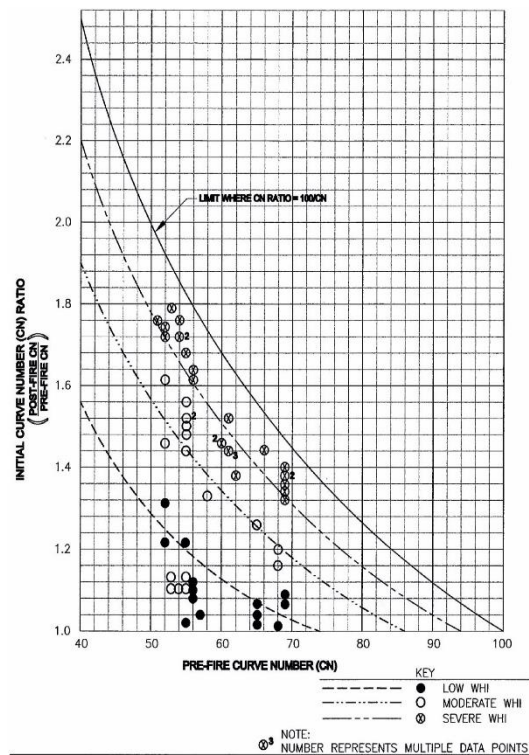
Para estimar la severidad del suelo quemado ellos usaron el Índice WHI (Wildfire Hydrologic Impact), basado en el porcentaje de severidad del suelo quemado alto y moderado, y la relación general entre el cociente de las curvas números pre y post incendio.

El índice WHI puede ser determinado usando la tabla o la figura siguiente:

| Porcentaje de cuenca con una severidad de quemado del suelo alta | WHI - Clasificación |
|------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 49-80                                                            | Severa              |
| 7-48                                                             | Moderada            |
| 0-6                                                              | Baja                |



La curva número post incendio puede ser estimada usando la siguiente figura si la CN es conocida.



Revisado en:

<http://forest.moscowfsl.wsu.edu/BAERTOOLS/ROADTRT/Peakflow/CN/supplement.html#CNLivingston>

## ANEXO N°5 PLANOS

| Numeración | Correlación | Escala     | Denominación                                                                                         | Cantidad Total |
|------------|-------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 4244       | 1           | 1 : 2.500  | Planta General Sistema Uruguay - Subcuencas aportantes modelo EPA-SWMM y Zonas Afectadas Incendio    | 1              |
|            | 2           | 1 : 2.500  | Esquema General Sistema Uruguay - Modelo EPA-SWMM - Topología de Construcción                        | 2              |
|            | 3           | 1 : 5.000  | Planta General Sistema Uruguay - Nodos de Control y Cuencas Aportantes                               | 3              |
|            | 4           | 1 : 2.500  | Planta General Sistema Uruguay - Alturas Máximas de Escurrimiento (T=10 años y t=24hrs)              | 4              |
| 4245       | 1           | 1 : 2.500  | Planta General Sistema Francia - Subcuencas aportantes modelo EPA-SWMM y Zonas Afectadas Incendio    | 5              |
|            | 2           | 1 : 2.500  | Esquema General Sistema Francia - Modelo EPA-SWMM - Topología de Construcción                        | 6              |
|            | 3           | 1 : 7.500  | Planta General Sistema Francia - Nodos de Control y Cuencas Aportantes                               | 7              |
|            | 4           | 1 : 2.500  | Planta General Sistema Francia - Alturas Máximas de Escurrimiento (T=10 años y t=24hrs)              | 8              |
| 4246       | 1           | 1 : 2.500  | Planta General Sistema Bellavista - Subcuencas aportantes modelo EPA-SWMM y Zonas Afectadas Incendio | 9              |
| 4247       | 1           | 1 : 2.500  | Planta General Sistema Las Heras - Subcuencas aportantes modelo EPA-SWMM y Zonas Afectadas Incendio  | 10             |
| 4248       | 1           | 1 : 5.000  | Planta General Sistema Argentina - Subcuencas aportantes modelo EPA-SWMM y Zonas Afectadas Incendio  | 11             |
|            | 2           | 1 : 5.000  | Esquema General Sistema Argentina - Modelo EPA-SWMM - Topología de Construcción                      | 12             |
|            | 3           | 1 : 10.000 | Planta General Sistema Argentina - Nodos de Control y Cuencas Aportantes                             | 13             |
|            | 4           | 1 : 2.500  | Planta General Sistema Argentina - Alturas Máximas de Escurrimiento (T=10 años y t=24hrs)            | 14             |
| 4249       | 1           | 1 : 2.500  | Alturas de Inundación Flo2D Sistemas Uruguay y Francia                                               | 15             |
| 4250       | 1           | 1 : 2.500  | Resultados Alturas de Inundación Sistemas Uruguay, Francia y Argentina                               | 16             |
| 4251       | 1           | 1 : 2500   | Niveles de Peligrosidad por Inundación                                                               | 17             |

## ANEXO N°6 MINUTAS RESPUESTA OBSERVACIONES