



filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

División de Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Informe N° 1443588

Estudio Básico: Investigación modelo hidrológico para inundaciones de crecidas en la región Metropolitana. Resumen ejecutivo.

Santiago, Noviembre de 2017

desde 1938, Innovación para la Empresa y Confianza para Chile

Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago – Chile / Fono: (56-2) 354 4886 / ingenieria@dictuc.cl / www.dictuc.cl

1. Título del informe Estudio Básico: Investigación modelo hidrológico para inundaciones de crecidas en la región Metropolitana. Resumen ejecutivo	2. Cuerpo del informe 70 hojas (incluye portada)
3. Título del proyecto Estudio Básico: Investigación modelo hidrológico para inundaciones de crecidas en la región Metropolitana	4. Fecha informe: 14 de noviembre de 2017
5. Autor(es): Jorge Gironás León Lina Castro Christian Oberli Cristián Escauriaza María Teresa Contreras Joaquín Venegas Vicente Zuazo Jefe de proyecto: Jorge Gironás León Ingeniero de proyecto: María Teresa Contreras	6. Contrato Correlativo: 1557 Fecha: 21 de diciembre de 2016
7. Nombre y dirección de la organización investigadora Nombre : DICTUC S.A. Dirección : Vicuña Mackenna N° 4860, Casilla 306 – Correo 22, Macul – Santiago RUT : 96.691.330-4 Teléfono : 2 2354 4886	8. Periodo de investigación Julio 2016 – Noviembre 2017
9. Antecedentes de la Institución Mandante Nombre : Instituto Nacional de Hidráulica Dirección : Avda. Concordia 620, Peñaflor, Talagante, Región Metropolitana. RUT : 61.211.000-K Teléfono : 2 2812 0100	10. Contraparte técnica Nombre : Gonzalo Montserrat Cargo : Ingeniero Civil Hidráulico Unidad de Ingeniería y Desarrollo
11. Resumen En el presente resumen ejecutivo sintetiza el trabajo desarrollado en cada una de las 5 etapas del proyecto. El objetivo de este documento es facilitar el acceso a la información que se encuentra en cada uno de los informes de las distintas etapas. Cada una de las subsecciones que se presentan a continuación corresponden a las etapas de la consultoría.	

Sr. Jorge Gironás León
Jefe de proyecto
DICTUC S.A.

Sr. Felipe Bahamondes
Gerente General
DICTUC S.A.

Nota: “La información contenida en el presente informe no podrá ser reproducida total o parcialmente, para fines publicitarios, sin la autorización previa y por escrito de DICTUC SA”.

Contenido

_Toc498428004

ÍNDICE DE TABLAS.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
1 RESUMEN DEL PROYECTO.....	7
1.1 ANTECEDENTES GENERALES	8
1.1.1 Antecedentes Relevantes.....	8
1.1.2 Área de Estudio	9
1.1.3 Antecedentes hidro-meteorológicos.....	14
1.1.4 Conclusiones	16
1.2 SISTEMA DE MONITOREO INSTALADO EN TERRENO	18
1.2.1 Determinación de las Variables monitoreadas.....	18
1.2.2 Descripción de la tecnología de monitoreo y sistema de adquisición de datos	21
1.2.3 Trabajo en terreno: estaciones instaladas.....	23
1.2.4 Análisis inicial del impacto de las variables monitoreadas.....	26
1.2.5 Conclusiones	28
1.3 MODELACIÓN METEOROLÓGICA E HIDROLÓGICA.....	29
1.3.1 Modelación Meteorológica.....	29
1.3.2 Modelación Hidrológica.....	31
1.3.3 Modelo Función de Transferencia.....	35
1.3.4 Conclusiones	38
1.4 MODELACIÓN HIDRÁULICA	40
1.4.1 Modelo de simulación hidrodinámica.....	40
1.4.2 Caracterización geomorfológica de la cuenca en la zona urbana	42
1.4.3 Resultados.....	46
1.5 SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA.....	48
1.5.1 Descripción del SAT desarrollado.....	48
1.5.2 Diagrama general del sistema de Alerta	49
1.5.3 Funcionamiento a nivel de servidor ("back-end").....	51
1.5.4 Interfaz de usuario web ("front-end").....	54
1.5.5 Conclusiones	56
2 BIBLIOGRAFÍA.....	57
3 ANEXO.....	58
3.5 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA	58
3.5.1 Funciones de transferencia – Confluencia	58
3.5.2 Funciones de transferencia – Puente Los Peumos	61
3.5.3 Funciones de transferencia – Recinto Aguas Andinas.....	66

Índice de Tablas

Tabla 1: Promedios mensuales de temperaturas extremas en estación Cerro Calán. (Fuente: Elaboración propia).....	15
Tabla 2: Resumen de estaciones instaladas en la Quebrada de Ramón	26
Tabla 3: Caudal máximo esperado (m3/s) dada temperatura mínima diaria y precipitación total del día.....	34
Tabla 4: Caudal máximo esperado (m3/s) dada temperatura mínima diaria y precipitación total de 3 días previos.....	34
Tabla 5: Caudal máximo esperado (m3/s) dada temperatura mínima diaria y precipitación total de 7 días previos.....	34
Tabla 6: Resumen aspectos técnicos de cada componente del sistema de alerta temprana.	52
Tabla 7: Coeficientes de Correlación de las funciones de transferencia – Confluencia. ...	61
Tabla 8: Coeficientes de Correlación de las funciones de transferencia – Puente Los Peumos.	65
Tabla 9: Coeficientes de Correlación de las funciones de transferencia – Recinto Aguas Andinas.	69

Índice de Figuras

Figura 1: Vista Aérea Quebrada de Ramón. (Fuente: Elaboración propia con datos de Google Earth).....	9
Figura 2: Delimitación de la zona de estudio: Considera la cuenca completa y la zona de influencia, determinada por el área afectada por el evento aluvial de 1993. (Fuente: Elaboración propia con datos de Google Earth).....	10
Figura 3: Alcance de los flujos de detritos ocurridos en el evento de 1993 en la Quebrada de Ramón. (Fuente: Naranjo y Varela, 1996 en Lara, 2007).	12
Figura 4: Análisis de frecuencia de la serie de caudales máximos anuales en estación Quebrada de Ramón en Recinto EMOS, entre los años 1991 y 2011. Los datos se muestran como puntos, la línea muestra el ajuste Log-Normal. (Fuente: Catalán, 2013)	16
Figura 5: Mapa de las estaciones fluviométricas instaladas y la estación DGA. (Fuente: Elaboración propia).....	20
Figura 6: Representación esquemática de la tecnología de redes inalámbricas de sensores. (Fuente: Elaboración propia).....	22
Figura 7: Estación LatinaDICTUC, sitio Tambor Bajo, tiempo de instalación 1 hora.....	23
Figura 8: Mapa de la red de monitoreo actualizado al 17 de Octubre del 2017. (Elaboración propia).	24
Figura 9: Precipitación total acumulada durante el evento del día 16 de abril del 2016. (Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Dirección General de Aguas y CIGIDEN). 27	
Figura 10: Funciones de Transferencia en Confluencia, evento 10 de mayo de 2017.....	37
Figura 11: Funciones de Transferencia en Puente Los Peumos, evento 9 de agosto de 2017.	37
Figura 12: Funciones de Transferencia en Aguas Andinas, evento 10 de mayo de 2017. 38	
Figura 13: Zona de estudio para la caracterización del área de potencial inundación. En colores azul-amarillo-rojo se presenta la elevación del terreno en el dominio computacional creado. (Elaboración propia).....	43
Figura 14: Comparación de curvas de probabilidad de no excedencia diseñadas por diversos estudios anteriores en la Quebrada de Ramón. Se incluyen las curvas obtenidas de la modelación hidrológica implementada en el presente estudio. (Elaboración propia) 45	

Figura 15: Resultados de la simulación hidrodinámica correspondiente a 40 m ³ /s de agua clara. (Elaboración propia).....	46
Figura 16: Resultados de la simulación hidrodinámica correspondiente a 50 m ³ /s de agua clara. (Elaboración propia).....	47
Figura 17: Diagrama de las componentes del sistema de alerta temprana para la Quebrada de Ramón, desarrollado en el proyecto.....	50
Figura 18: Pantalla de inicio de la plataforma web.	55
Figura 19: Visualización de un sitio de pronóstico en la plataforma web	56
Figura 20: Visualización de un evento en la plataforma web	56
Figura 21: Funciones de Transferencia para el caudal en el nodo Confluencia.....	60
Figura 22: Funciones de Transferencia para el caudal en el nodo Confluencia.....	61
Figura 23: Funciones de Transferencia para el caudal en el nodo Puente Los Peumos...	64
Figura 24: Funciones de Transferencia para el caudal en el nodo Puente Los Peumos...	65
Figura 25: Funciones de Transferencia para el caudal en Recinto Aguas Andinas.	68
Figura 26: Funciones de Transferencia para el caudal en Recinto Aguas Andinas.	69

1 Resumen del proyecto

Durante los últimos años, en Chile se han registrado eventos importantes y catástrofes causadas por aluviones y crecidas rápidas de ríos provenientes desde la precordillera Andina. Uno de los más importantes ocurridos en la capital tuvo lugar el 3 de Mayo de 1993. En esa ocasión, un corto pero intenso temporal bajo condiciones especialmente cálidas, influenciadas por los efectos del Fenómeno del Niño, provocó el escurrimiento de grandes volúmenes de barro y escombros desde las altas cumbres de la precordillera. Este evento, además de dejar 23 víctimas fatales y 437 mil UF en pérdidas económicas (AC, 1996), planteó serias interrogantes acerca de la seguridad del sector ubicado al oriente de Santiago, en especial aquel que se ubica en la zona de piedemonte, a la llegada de cauces y quebradas que se originan en la precordillera. Desde este punto de vista, una de las quebradas de mayor interés es la Quebrada de Ramón, la cual presenta periódicamente desbordes que significan daños y molestias en su tramo que va desde la entrada a la ciudad hasta su desembocadura en el Canal San Carlos. Esta condición de riesgo se exacerba producto de: (1) el acelerado proceso de urbanización sin una planificación urbana adecuada, (2) el posible aumento de las denominadas lluvias cálidas con una elevada isoterma producto del cambio climático, (3) la todavía escasa red de monitoreo hidrometeorológico, así como un desconocimiento aún importante de los procesos micrometeorológicos en la compleja topografía de la precordillera andina.

Como respuesta, en el país ha existido cierto avance relacionado principalmente a medidas estructurales para la prevención de pérdidas humanas y económicas, entre las cuales destacan una serie de obras de control aluvial y de crecidas líquidas. El desarrollador principal de estas obras ha sido la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras públicas. Sin embargo, aún restan muchas tareas pendientes en lo relacionado a medidas no estructurales, como son la planificación urbana y la gestión de la planicie de inundación de cauces y quebradas. Otra medida prácticamente inexistente, no sólo en el piedemonte de Santiago, sino en todo el país, es la implementación de sistemas de monitoreo y uso de información en línea para la declaración de alertas y gestión de amenazas. En particular hay una falta de experiencia en el desarrollo y operación de sistemas que integren nuevas tecnologías de pronóstico meteorológico, monitoreo en línea y herramientas de modelación basado en nuevo conocimiento científico, para anticipar la ocurrencia de los eventos de crecidas. A esto se agrega que el monitoreo hidrológico a cargo de la Dirección General de Aguas (DGA) está orientado a la caracterización y pronóstico del recurso hídrico y no de la amenaza que pueda existir asociada al comportamiento de las precipitaciones. De este modo, las escalas espaciales y temporales involucradas en las actuales actividades de monitoreo no son las adecuadas para la gestión del riesgo por amenazas hidrometeorológicas.

En función de los antecedentes previos, el Instituto Nacional de Hidráulica (INH) ha estimado necesario desarrollar un estudio en la Quebrada de Ramón, destinado a implementar un sistema de alerta temprana, basado en información hidrometeorológicas medida en tiempo real en la zona de interés. El presente estudio se denomina “Estudio Básico: Investigación modelo hidrológico para inundaciones de crecidas en la Región Metropolitana”. En el proyecto se implementa un sistema de caracterización, pronóstico y seguimiento de crecidas en la cuenca de

la Quebrada de Ramón, el cual se construye a partir de la integración de pronósticos meteorológicos, modelos hidrológicos e hidráulicos, un sistema de monitoreo en línea y una plataforma computacional para la gestión de estos eventos. Así, esta herramienta proveerá la información necesaria, a la población y a las entidades gubernamentales respectivas, para anticipar la ocurrencia de crecidas y dar las alertas correspondientes.

En el presente resumen ejecutivo sintetiza el trabajo desarrollado en cada una de las 5 etapas del proyecto. El objetivo de este documento es facilitar el acceso a la información que se encuentra en cada uno de los informes de las distintas etapas. Cada una de las subsecciones que se presentan a continuación corresponden a las etapas de la consultoría.

1.1 Antecedentes Generales

La Etapa 1 da a conocer la recopilación de antecedentes realizada para caracterizar la zona de estudio, la revisión de estudios existentes y el levantamiento de información in-situ para complementar lo ya disponible. El informe consideró una caracterización detallada del área de estudio, incluyendo morfología y topografía de la cuenca, su red de drenaje y un análisis detallado del cruce del cauce principal por el sector oriente de la ciudad de Santiago. Se describe también la hidrología de la zona de estudio y la región en general. Esta etapa incluyó además los antecedentes que permiten identificar las zonas de riesgo involucradas y su gestión territorial, así como un análisis detallado del Modelo de Elevación Digital (MED) de resolución de 2 m adquiridos como parte de la consultoría.

1.1.1 Antecedentes Relevantes

La revisión de más de 30 documentos, donde se incluye artículos científicos, informes de consultorías, tesis de postgrado y títulos profesionales, entre otros, sintetizan el estado de arte del conocimiento previo de la zona estudiada. Entre ellos se encuentran informes de caracterización y evaluación de eventos meteorológicos importantes en el pasado y sus impactos, e informes que sintetizan las características generales del área de estudio, su climatología, hidrología y geomorfología, así como la amenaza, exposición y vulnerabilidad de las zonas aledañas. Adicionalmente, se incluyen informes técnicos de diseño de obras asociadas a inundaciones y de modelos desarrollados para la zona.

Junto al análisis bibliográfico anterior, existe un amplio rango de información georeferenciada relacionada con el área de estudio que también fue utilizada en la consultoría. Esta información refiere a la topografía del lugar, la hidrología de la región, y los distintos usos de suelo y presencia de vegetación en la cuenca. Mediante la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG), estos antecedentes son usados posteriormente en la caracterización geomorfológica y la construcción de los modelos considerados en las siguientes etapas.

Un elemento fundamental es el modelo de elevación digital (MED) de alta resolución (2 m) de la empresa NTT Data, adquirido para la consultoría. Este modelo fue utilizado en la determinación de la red hidrográfica, los límites de la cuenca y subcuencas involucradas, el cálculo de pendientes de terreno, largos y anchos de los cauces, así como en la cuantificación de otras

propiedades geomorfológicas relevantes para la construcción del modelo hidrológico e hidráulico en las siguientes etapas. También se tiene acceso a un modelo de elevación digital de resolución de 5 m, obtenido gracias a la colaboración con el Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN). Obtenido de la misma compañía, sus especificaciones técnicas son las mismas que las del MED de 2 m de resolución.

Al modelo de elevación digital previamente descrito se agrega el levantamiento LIDAR realizado en las inmediaciones del cauce por ARRAU Ingeniería en el marco del proyecto “Diseño de Obras para el Control Aluvial y de Crecidas Líquidas en la Quebrada de Ramón, Región Metropolitana” el año 2014, para el Ministerio de Obras Públicas (MOP).

1.1.2 Área de Estudio

1.1.2.1 Descripción General

El área de estudio corresponde a la cuenca de la Quebrada de Ramón y su planicie de inundación, identificada a partir de los flujos de detritos ocurridos en Mayo de 1993. La cuenca (Figura 1) se localiza en Chile central, en la provincia de Santiago, comunas de la Reina y las Condes, entre los paralelos 33°24'S y 33°29'S, y los meridianos 70°25'W y 70°30'W. Se encuentra en el límite de la depresión intermedia y el macizo rocoso de la Cordillera de Los Andes, abarcando los faldeos cordilleranos de la zona oriente de la capital.

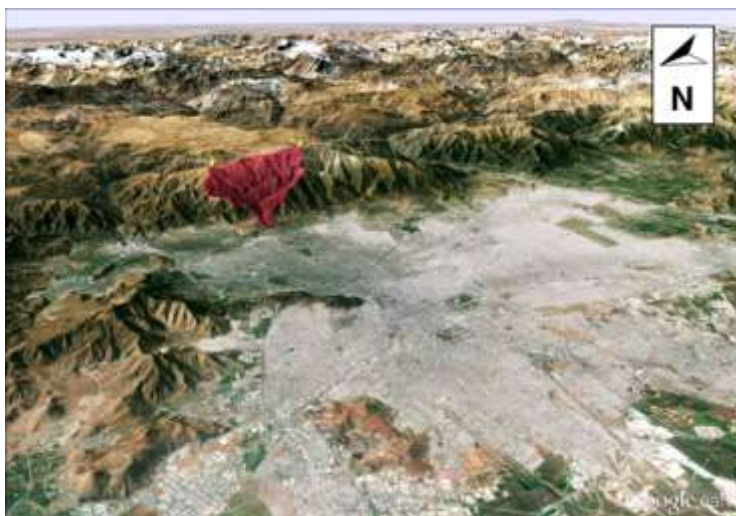


Figura 1: Vista Aérea Quebrada de Ramón. (Fuente: Elaboración propia con datos de Google Earth)

La planicie de inundación incluye el parque Alberto Hurtado y el sector canalizado del canal principal, hasta su descarga en el Canal San Carlos. La hoya hidrográfica de la Quebrada de Ramón posee un área aproximada de 36 km², medida desde la cima del Cerro San Ramón a 3.253 m, hasta la descarga al curso receptor a una elevación aproximada de 830 m. El acceso a la cuenca es a través del Parque Natural Aguas de Ramón, recinto bajo la protección de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) cuyo acceso es por la Avenida Valenzuela Llanos.

También se encuentra una bocatoma de agua potable construida por EMOS, actualmente Aguas Andinas. La Figura 2 muestra la ubicación del parque, así como la localización de la bocatoma.

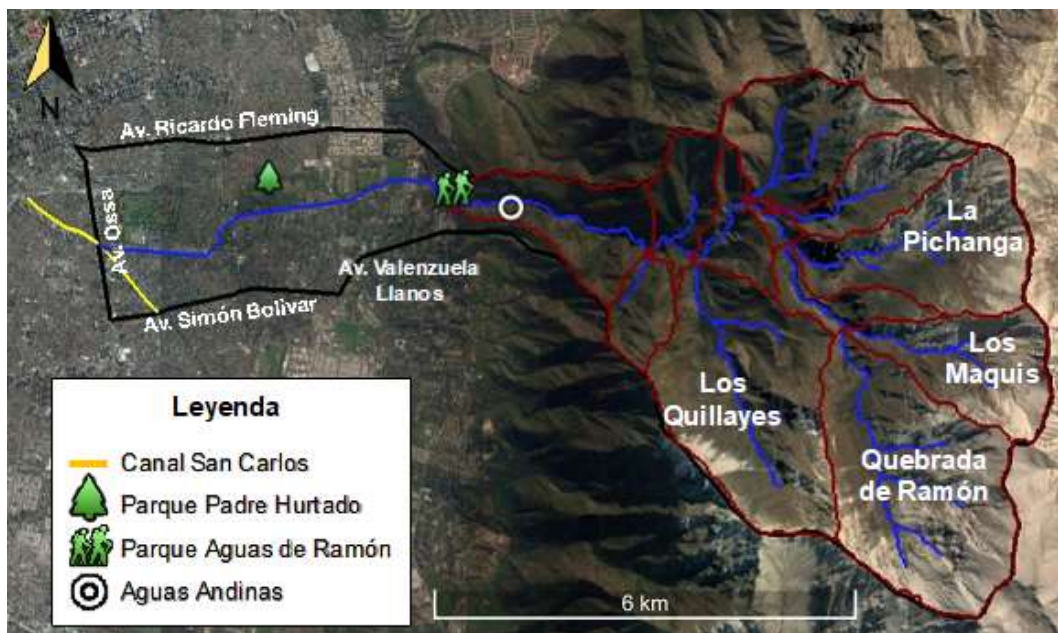


Figura 2: Delimitación de la zona de estudio: Considera la cuenca completa y la zona de influencia, determinada por el área afectada por el evento aluvial de 1993. (Fuente: Elaboración propia con datos de Google Earth)

El uso de suelo de la cuenca está identificado en el mapa generado por Gobierno Regional Metropolitano de Santiago el año 2012. La cuenca presenta una vegetación arbórea, arbustiva y de matorrales conformada por variadas especies. Por otra parte, la influencia del relieve condiciona que la cuenca posea una forma de V en su parte más alta, con el cauce principal encajonado entre paredes de rocas volcánicas. En su tramo medio e inferior, la cuenca adquiere una forma de U con sus laderas en equilibrio con respecto al cauce.

1.1.2.2 Geomorfología de la cuenca

El análisis geomorfológico de la cuenca se llevó a cabo utilizando el Sistema de Información Geográfica ArcGis. En particular, en este análisis se compararon dos modelos de elevación digital (MED); el primero de una resolución de 2 m adquirido para esta consultoría y el segundo de 30 m ASTER disponible sin costo, calculando y analizando las siguientes propiedades representativas de la cuenca:

- La curva hipsométrica. Esta curva fue calculada a partir de cada modelo y comparada con aquellas reportadas en estudios previos. Las diferencias obtenidas fueron muy menores.
- La relación de Hacks entre el área de las distintas subcuencas y largo máximo del cauce principal. La comparación también resultó exitosa, comprobándose que el MED más fino

permite la identificación y caracterización de las subcuencas más pequeñas de la Quebrada.

- La distribución de probabilidad acumulada del área contribuyente a cada una de las celdas del MED. Esta propiedad caracteriza la estructura de agregación de los elementos de ladera y la red de drenaje. Nuevamente la comparación de esta propiedad para los distintos MED descarta diferencias significativas entre ambos modelos.
- La distribución de probabilidad de los largos de flujo de las distintas áreas drenadas por cada celda en la cuenca. La diferencia en el largo posible de encontrar aumenta alrededor de un orden de magnitud al cambiar el MED de 30 m a uno de 2 m de resolución. Por lo tanto, es posible identificar largos hacia aguas arriba menores a 30 m con el MED más fino.

Uno de los factores considerados en el análisis es la topografía escarpada y pendientes empinadas en la cuenca, las cuales disminuyen la estabilidad de los depósitos. La parte alta de la cuenca, definida como la zona comprendida entre los 3.253 m y 2.000 m de elevación, el cauce presenta pendientes entre 20 y 30%. Entre los 1.450 m y 1.650 m, la pendiente disminuye a aproximadamente 10%. Bajo los 1.200 m el cauce escurre en forma encajonada con una pendiente de entre 5 y 10%. En cuanto a la pendiente de las laderas de la cuenca, en la parte más alta de la misma se sitúan en un rango de 25° a 35°, mientras que las cabeceras alcanzan pendientes entre 45° y 50°. En la zona central no se superan los 5° a 7°. Adicionalmente, se registró la presencia de depósitos asociados a remociones en masa que han originado pendientes nulas en algunos sectores. Finalmente, se observa la importancia de contar con MEDs de alta resolución para lograr identificar pendientes pequeñas, las que no son observadas en el MED de 30 m.

Ninguno de los MED captura completamente el inicio de los cauces, lo cual es más evidente en la quebrada Los Maquis. Hacia aguas abajo, las mayores diferencias se aprecian en la sinuosidad del cauce. Sin embargo, en la mayor parte del trayecto del cauce principal es capturado por ambos modelos. Sí se observa que el MED más fino es capaz de representar mejor la sinuosidad de los cauces, lo que influye en las modelaciones hidráulicas.

Por otra parte, la delimitación de subcuencas no difiere perceptiblemente al utilizar cada MED, y el área total no difiere en más de 0,6 km². Tampoco se encuentran diferencias notables en la forma de las subcuencas al analizar el coeficiente de Gravelius o los lados de los Rectángulos Equivalentes.

1.1.2.3 Cauce Principal y planicie de Inundación

La planicie de inundación afectada por los flujos de detritos ocurridos en Mayo de 1993 (Figura 3) tiene un área aproximada de 10,7 Km² y está limitada al sur por Avenida Simón Bolívar, al norte por Avenida Ricardo Fleming, al oeste por el eje Av. Américo Vespucio — Av. Ossa, y al este por las avenidas Valenzuela Llanos y Onofre Jarpa. En general la planicie cubre áreas periurbanas de las comunas de La Reina y Las Condes, así como sectores residenciales de la comuna de la Reina y el Parque Padre Hurtado. El cauce principal posee un largo aproximado

de 8,7 Km desde su desembocadura en el Canal San Carlos hasta la confluencia entre el estero Los Quillayes y Quebrada de Ramón, a los 1.200 m de elevación.



Figura 3: Alcance de los flujos de detritos ocurridos en el evento de 1993 en la Quebrada de Ramón. (Fuente: Naranjo y Varela, 1996 en Lara, 2007).

Hacia aguas arriba, el cauce parte desde la desembocadura en el Canal San Carlos, el que se encuentra a una cota inferior. Los 2,2 primeros kilómetros del cauce se encuentran canalizados con mampostería de piedra y paredes lisas de hormigón. La mayor parte del tramo se encuentra paralelo a la Avenida Príncipe de Gales, intersectando las siguientes calles en sentido ascendente: Loreley, Ramón Laval, Monseñor Edwards y Aguas Claras. El primer tramo entre el Canal San Carlos y la calle Loreley se encuentra completamente canalizado con paredes verticales de hormigón, aguas arriba el canal es trapezoidal de mampostería y presenta algunos daños. En el tramo comprendido por la calle Aguas Claras y Avenida Príncipe de Gales hay un entubamiento de aproximadamente 163 m bajo la intersección de las calles Salvador Izquierdo, Príncipe de Gales y Aguas Claras.

Aguas arriba desde la avenida Vicente Pérez Rosales hasta el puente Padre Hurtado, se aprecian 12 espigones perpendiculares al flujo, instalados para captar parte de los sedimentos en el fondo del lecho. Finalmente, aguas arriba de la Av. Padre Hurtado la sección del cauce es más amplia y presenta un lecho de material granular. Por un tramo de aproximadamente 1,9 km hacia aguas arriba, se aprecia una incisión importante del cauce y bastante alteración del lecho del río producto de actividades humanas. Otros tramos a lo largo del cauce son de importancia, tales como el tramo cercano al Centro Nuclear La Reina, el cruce con el canal Las Perdices, los gaviones de defensa en la ribera izquierda, la estación fluviométrica de DGA y la toma de agua de Aguas Andinas.

Adicionalmente, la Quebrada de Ramón presenta una composición compleja debido a los diferentes fenómenos tectónicos que la afectan y a su variada composición litológica. Las rocas existentes comprenden desde rocas volcánicas a intrusivas, incluyendo metamórficas. Se cuenta con una recopilación de 21 curvas granulométricas realizadas por distintos autores. Desde el punto de vista geológico, la Quebrada de San Ramón se encuentra actualmente en un ciclo de sedimentación del material sólido trasladado desde la Cordillera Principal, que pasan a formar parte de la cuenca intermedia. La tasa de arrastre de sedimentos y la concentración de partículas presentes en flujos durante crecidas importantes es difícil de estimar, e inducen una gran incertidumbre.

1.1.2.4 Perfiles Transversales

Los perfiles transversales del cauce principal en una primera instancia fueron extraídos de tres fuentes de información, que incluyen (1) las secciones obtenidas del levantamiento LIDAR existente previo a la consultoría, (2) las secciones medidas en esta consultoría con GPS diferencial extraídas con una resolución de 0,5 m en secciones separadas cada 30 metros y (3) los perfiles transversales medidos por la consultora CYGSA el 2010. A estos perfiles se agregan otros levantados durante la consultoría y reportados finalmente en la Etapa N°3. Es precisamente en esta etapa donde se muestran los perfiles transversales definitivos generados en la consultoría. Estas secciones fueron relevantes para la ejecución del modelo hidráulico y para la determinación del área inundable.

1.1.2.5 Historial de eventos de inundaciones y aluviones

La información cuantitativa disponible respecto a eventos pasados de crecidas y remoción en masa en Santiago y en particular en la Quebrada de Ramón es más bien escasa. Así entonces, la información disponible es más bien de precipitaciones y no de caudales o volúmenes de crecidas. Dentro de las grandes lluvias que han afectado a la capital desde la segunda mitad del siglo pasado, destacan los eventos de Agosto de 1953, Junio de 1982 y Julio de 1987, donde se registraron más de 100 mm en Quinta Normal. Por su parte, los eventos de crecida y aluviones mejor caracterizados son la crecida de 1991 en la Quebrada de Macul y Mayo de 1993 en la Quebrada de Ramón y de Macul, siendo particularmente este último evento el más importante por su magnitud y poder destructivo. Durante este último evento, la temperatura mínima registrada en la estación Quinta Normal fue de 15,7°C, extremadamente alta para la época, ubicando la isoterma 0°C a una gran elevación. El subsecuente aluvión afectó a las comunas de La Florida, La Reina, Peñalolén y Macul, dejando un total de 26 muertos, 9 desaparecidos, 1.832 damnificados, alrededor de 500 damnificados fuera de albergues y múltiples daños a infraestructura pública. El caudal máximo estimado fue sobre los 50 m³/s con una concentración volumétrica de detritos de ~38%.

1.1.2.6 Estudios de zonificación de riesgo en la zona de estudio

En la zona de estudio destacan el Plan Regulador Metropolitano 2014, el Plan Regulador Comunal y el Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO) de La Reina. El primero determina que el límite de expansión urbana en la comuna de La Reina se ubica en la cota 900 m e identifica el

uso de suelo, dividiéndolo en áreas verdes y uso residencial. Este plan identifica con mayor nivel de detalle el uso de suelo comunal, considerando además que tanto las quebradas como los canales son elementos espaciales que representan potenciales peligros de inundación. Por su parte, el PLADECO presenta la “descripción de un escenario futuro para la comuna, altamente deseado por los vecinos”. En los temas de interés para la presente consultoría se refiere a la integración de los recursos naturales; en ello específicamente se menciona la importancia que tiene el patrimonio arbóreo, parques urbanos, y su geografía de pie cordillerano. Sin embargo, no se hace mención explícita a algún plan futuro referente al manejo de cauces naturales.

1.1.3 Antecedentes hidro-meteorológicos

Para efectos de la modelación hidrológica a desarrollar en las siguientes etapas de esta consultoría, se realizó una recopilación de antecedentes disponibles en diversas fuentes, consultando estudios previos e información registrada en estaciones de monitoreo actualmente en funcionamiento en la Región Metropolitana.

1.1.3.1 Precipitación

En términos generales, la Dirección Meteorológica de Chile (2005) describe el clima que caracteriza la zona como templado cálido con estación seca prolongada. Presenta un periodo seco de 7 a 8 meses, entre septiembre y marzo, con precipitaciones menores a 40 mm. Los restantes meses, por otra parte, concentran el mayor porcentaje de precipitaciones. La humedad relativa del aire alcanza un 70% como promedio anual, mientras que las amplitudes térmicas presentan una diferencia de 13°C entre el mes más cálido (enero) y el mes más frío (julio).

La precipitación en Santiago alcanza un promedio anual de 330 mm, en la zona oriente de Santiago las precipitaciones medias son ligeramente mayores al promedio de la ciudad y se dan preferentemente entre los meses de abril y septiembre. Los eventos más frecuentes de precipitación en la zona central de Chile, tienen una duración de 1 a 2 días y son de tipo frontal, equivalen a más del 80% de todos los eventos de precipitación. Sin embargo, con cierta periodicidad, los denominados eventos ciclónicos tienen lugar en Santiago y en promedio provocan precipitaciones más copiosas y ejercen una notable influencia en la generación de crecidas y de flujos de barro. Por otro lado, el fenómeno de El Niño genera eventos de precipitación inusualmente intensos. Se realizó un análisis exhaustivo de la precipitación medida en distintas estaciones DGA, enfocándose en la estación Quebrada de Ramón, y se realizó un análisis de frecuencia para ellas. Las precipitaciones máximas para 10 años de periodo de retorno y un día de duración superan las estimadas para Santiago (i.e 67 mm).

Los registros históricos de en Cerro Calán fueron evaluados para detectar posibles tendencias al alza que puedan tener impacto en la ocurrencia de eventos extremos de precipitación detonantes de crecidas y/o aluviones. Los resultados del análisis muestran que ni la precipitación promedio anual ni la máxima diaria anual presentan una tendencia estadísticamente significativa. Por otra parte el promedio mensual de la precipitación diaria y la precipitación máxima diaria sí presentan una tendencia a la baja estadísticamente significativa para el mes de julio.

1.1.3.2 Temperatura

En cuanto a los registros de temperatura, se contó con datos de las temperaturas diarias extremas en la estación Quinta Normal entre 1971 y 2015. La importancia de la temperatura mínima del día de un evento de precipitación en la estimación de los caudales de la Quebrada ya ha sido enfatizada en estudios previos. También se contó con los registros de temperaturas extremas (mínimos y máximos) diarios en la estación Cerro Calán desde 1976 hasta 2016. En la Tabla 1 se presentan los promedios mensuales de temperaturas mínimas y máximas obtenidos a partir del registro de la estación Cerro Calán. Los meses de menor temperatura promedio corresponden a los meses de otoño e invierno, mientras que los meses de mayor temperatura promedio corresponden a los meses de primavera y verano. El promedio anual de las temperaturas mínimas y máximas diarias sí presentan una tendencia al alza estadísticamente significativa, por lo que se concluye que hay una posibilidad real de un aumento en el promedio anual de las temperaturas extremas diarias en un futuro. Por su parte, el máximo y el mínimo anual de temperaturas máximas diarias no presenta una tendencia significativa. Sin embargo, el máximo anual de temperaturas mínimas diarias sí presenta una tendencia al alza estadísticamente significativa.

Tabla 1: Promedios mensuales de temperaturas extremas en estación Cerro Calán.
(Fuente: Elaboración propia)

Temperaturas Máximas Mensuales - Promedio de Registro (°C)											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
30.7	30.3	28.2	23.2	18.7	16.0	15.2	16.4	18.5	22.3	26.1	29.1
Temperaturas Mínimas Mensuales - Promedio de Registro (°C)											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
14.2	13.9	12.9	10.5	8.5	6.8	5.9	6.2	7.3	8.9	10.9	12.8

1.1.3.3 Caudal

La cuenca de la Quebrada de Ramón es de régimen nivo-pluvial dado que la altura promedio de la isoterma 0°C se ubica típicamente entre los 2.000 m y los 2.500 m. El régimen es Perenne, siendo los caudales alimentada por deshielos y precipitaciones mientras que el resto de las quebradas internas poseen un caudal intermitente.

Existe una estación fluviométrica denominada Quebrada Ramón en Recinto EMOS de la cual se obtienen los caudales mensuales, diarios y máximos instantáneos entre 1991 y 2015, aunque bastante incompletos. El análisis de este registro motiva la necesidad de mejorar la medición de caudales, la estimación de crecidas y el análisis de frecuencia de dicha variable. En la Figura 4 se muestra el análisis de frecuencia realizado por Catalán (2013) utilizando un modelo Log-Normal.

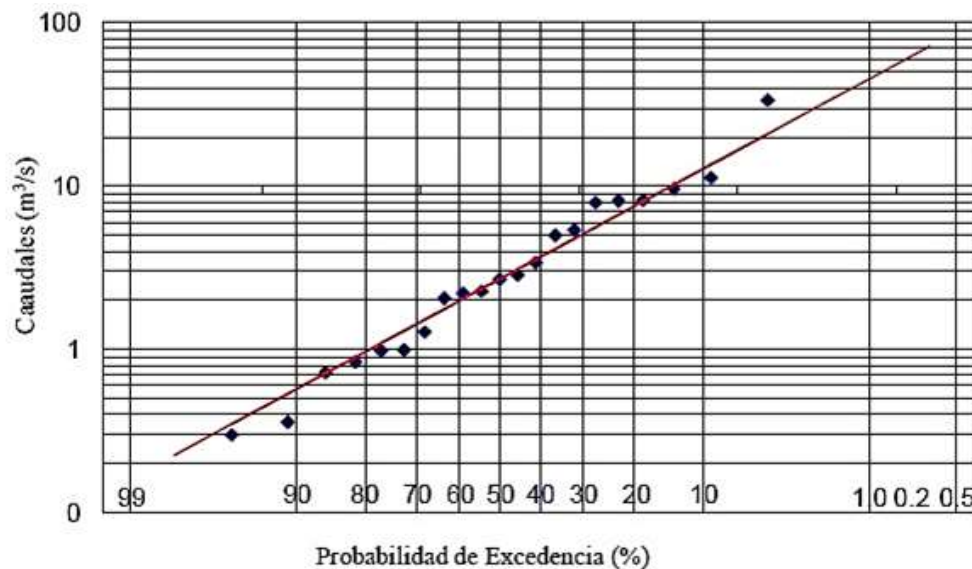


Figura 4: Análisis de frecuencia de la serie de caudales máximos anuales en estación Quebrada de Ramón en Recinto EMOS, entre los años 1991 y 2011. Los datos se muestran como puntos, la línea muestra el ajuste Log-Normal. (Fuente: Catalán, 2013)

1.1.4 Conclusiones

El documento final de la Etapa N°1 resume los antecedentes más importantes sobre la cuenca de la Quebrada de Ramón, los que se recopilaron a partir de la revisión bibliográfica realizada a más de 30 documentos. Entre ellos se incluyó artículos científicos, informes de consultorías realizadas en la zona de estudio, tesis para la obtención de magísteres y títulos profesionales de distintas universidades, etc. El informe caracterizó el cauce principal a partir de la bibliografía disponible y sucesivas visitas a terreno, lo que permitió comprender, en forma más detallada, el

funcionamiento de este cauce y su interacción con el territorio urbano en su tramo final. Esto fue de gran utilidad en las siguientes etapas de la consultoría.

El informe además incluye una caracterización geomorfológica de la cuenca a partir de un Modelo de Elevación Digital (MED) de 2 m de resolución, adquirido específicamente para esta consultoría. La caracterización incluyó la comparación de diversas propiedades obtenidas con este MED y con otro de libre acceso de 30 m de resolución. El MED de 2 m mejora la extracción de las subcuencas y red de drenaje, así como una descripción más fina de las propiedades geomorfológicas de la cuenca.

Por otro lado, se revisaron las características hidrometeorológicas de eventos de crecidas e inundaciones pasados en la zona, y se revisaron documentos relacionados con los potenciales riesgos en la zona de estudio. Además, se identificaron algunas instalaciones de mayor vulnerabilidad. Se realizó también una caracterización hidrológica en base al registro histórico de las estaciones meteorológicas disponibles en la región Metropolitana. Se calcularon eventos asociados a distintos periodos de retorno y duraciones comparándose con estudios hidrológicos previos.

1.2 Sistema de monitoreo instalado en terreno

El objetivo de la segunda etapa del proyecto fue implementar la tecnología necesaria en terreno para el monitoreo hidrometeorológico y el subsecuente desarrollo de un sistema de alerta temprana (SAT) para inundaciones en la Quebrada de Ramón. El informe inicia con la descripción de antecedentes relacionados a los tipos de sistemas de monitoreo y alerta utilizados en otras partes del mundo. Posteriormente, se describe la tecnología de redes de sensores y las micro-estaciones LatinaDICTUC que fueron instaladas durante el estudio. Específicamente, se dan a conocer características técnicas de los sensores utilizados, sus ubicaciones y calibración. Luego, se muestra como es el acceso a los datos, el cual puede ser de dos maneras: vía sitio web mediante la visualización de series de tiempo o a través de una interfaz de programación de aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) que permite el procesamiento de los datos. Además, se describe el monitoreo de la Quebrada de Ramón existente previo al presente proyecto, el que considera 2 estaciones de la DGA y 10 estaciones pertenecientes al CIGIDEN (Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales). Finalmente, se informa sobre el despliegue de 3 estaciones fluviométricas y 8 estaciones hidrometeorológicas.

De manera más específica, se trataron los siguientes temas:

- Una descripción de las variables monitoreadas, con las principales razones que justifican su monitoreo.
- Algunos ejemplos que reflejan la relevancia de la información entregada tanto por las estaciones hidrometeorológicas como fluviométricas.
- Descripción del estado de las estaciones y la disponibilidad de datos previa a la instalación de los equipos desarrollada en el presente proyecto.
- Las especificaciones técnicas de los equipos instalados, considerando sus modelos, condiciones de funcionamiento, y procesos de instalación.
- Ejemplos de las distintas variables que actualmente se están midiendo, y el procedimiento necesario para el acceso a los datos en línea.

El informe se preparó en función de los requerimientos establecidos por la consultoría para dicha etapa, los que a su vez fueron base para la correcta implementación de las herramientas de modelación meteorológica, hidrológica e hidráulica de la cuenca. Adicionalmente, se utilizaron los manuales desarrollados por los fabricantes de los sensores desplegados en terreno y la bibliografía relacionada con su utilización en otras cuencas. Por último, gran parte de la información presentada fue recopilada de visitas a terreno desarrolladas por el equipo consultor durante la ejecución de la etapa.

1.2.1 Determinación de las Variables monitoreadas

Las redes de sensores para el monitoreo de aluviones e inundaciones rápidas cumplen un importante rol. Por un lado, la medición constante, durante largos periodos de tiempo de diversas variables hidrometeorológicas e hidráulicas permite construir un registro histórico que facilita la comprensión de su comportamiento. Por otro lado, la disponibilidad de datos en tiempo real permite llevar un seguimiento del estado de la cuenca y los caudales en el cauce principal, en

particular los de carácter extremo. En este sentido, combinar el nuevo conocimiento científico en modelación meteorológica, hidrológica e hidráulica con las nuevas tecnologías disponibles para la transmisión de datos posibilita la implementación de sistemas que permiten el pronóstico de escenarios futuros al corto plazo, la generación y seguimiento de alertas de peligro por aluviones y crecidas rápidas, y la gestión de amenazas previo y durante un evento.

A partir de la experiencia internacional, es posible identificar dos tipos de sistemas de monitoreo para la generación de alertas de crecidas, los cuales tendrán mayor o menor aplicabilidad dependiendo de ciertas condiciones. El primero alerta durante la ocurrencia del evento mediante el monitoreo del caudal escurriendo en distintos puntos aguas arriba, no utilizando pronósticos meteorológicos en forma significativa. Estos sistemas son generalmente aplicados a cuencas grandes y una de sus principales ventajas es que las alertas generadas no son muy susceptibles a ser falsas alarmas, ya que éstas son generadas al registrarse aumentos de caudal en las estaciones aguas arriba. En contraste, el segundo tipo de sistemas busca alertar con mayor anticipación, razón por la cual se basan fuertemente en el pronóstico y monitoreo de las variables meteorológicas relacionadas. Estos sistemas son de gran utilidad en cuencas con tiempos de respuesta cortos, de pequeño tamaño y con alta pendiente, donde se hace muy impracticable reportar alertas de crecidas en función de mediciones de caudal aguas arriba. En general requieren de una red de monitoreo hidrometeorológico que reporte datos en tiempo real de las condiciones climáticas en la zona de estudio. Mediante modelos hidrológicos e hidráulicos, es posible estimar al mediano plazo los caudales y posibles zonas de inundación a producirse con las condiciones meteorológicas pronosticadas.

Dadas las características de la cuenca de la Quebrada de Ramón (i.e. tamaño pequeño, presencia de altas pendientes y tiempos de respuesta cortos), se decidió implementar el segundo tipo de sistema. Esto implicó la instalación de estaciones de medición de variables meteorológicas que permiten alertar y seguir el desarrollo de eventos de precipitación. También se instalaron estaciones fluviométricas que permiten tanto seguir el comportamiento de las crecidas en la cuenca, como mejorar la calidad de los modelos utilizados en estimar las características de éstas, disminuyendo la incertidumbre del sistema de predicción.

1.2.1.1 Caudales

Para el monitoreo fluviométrico de la cuenca se dispuso de tres estaciones de medición de profundidad de agua, variable que permite estimar el caudal mediante una curva de descarga a ser calibrada para cada sección. Las ubicaciones de las distintas estaciones fueron determinadas considerando condiciones hidráulicas óptimas dentro de lo posible, siendo particularmente relevante la identificación de secciones estables, de forma regular, donde se desarrollan velocidades lo más uniforme posibles en el sentido transversal, y alejadas de singularidades tales como curvaturas o cavidades laterales del cauce. La Figura 5 muestra donde se localizan las estaciones instaladas en el presente proyecto y la de propiedad de la DGA.



Figura 5: Mapa de las estaciones fluviométricas instaladas y la estación DGA. (Fuente: Elaboración propia)

1.2.1.2 Precipitación

Cuando existen importantes diferencias de nivel del terreno, como en la Quebrada de Ramón, se pueden generar notorias variaciones en la distribución espacial de la precipitación dentro de la cuenca. Por lo tanto, la medición espacialmente distribuida de precipitación es de suma importancia. La red de sensores mide las magnitudes de lluvia cada 10 minutos, permitiendo una caracterización correcta y en tiempo real de un evento de precipitación, algo que no se puede lograr con la estación DGA existente.

1.2.1.3 Temperatura

Junto con la precipitación, la temperatura ambiental a distintas altitudes es la otra variable relevante a considerar en el pronóstico de crecidas en la cuenca de la Quebrada de Ramón. Su medición distribuida espacialmente permitiría determinar la elevación de la línea de nieve, donde se diferencia el área aportante de flujo líquido del área sobre la cual está nevando. Esta elevación coincide aproximadamente con la de la denominada isoterma 0°C. En el caso concreto de la cuenca de la Quebrada de Ramón, su topografía es tal que el área aportante de flujo líquido es muy susceptible a variaciones en la elevación de dicha isoterma.

1.2.1.4 Otras variables medidas: Humedad relativa del aire y humedad de suelo

Otras de las variables medidas son la humedad relativa del aire y la humedad del suelo. Estas variables son relevantes en la construcción de modelos hidrológicos, puesto que tienen especial impacto en el balance de agua del suelo, las condiciones iniciales de la cuenca y la evapotranspiración, entre otros. Adicionalmente también se miden la velocidad y dirección del

viento y la altura de nieve, variable que se incluye en las estaciones de alta montaña instaladas posteriormente a esta etapa.

1.2.2 Descripción de la tecnología de monitoreo y sistema de adquisición de datos

Se buscó reemplazar el uso de la tecnología convencional por una más innovadora que permite monitorear la cuenca de estudio con una mayor cantidad de estaciones, una alta frecuencia en la transmisión de los datos, a un menor costo y sin perder la calidad de la información registrada. Además, se consideró un sistema de adquisición de datos alineado con las actuales tecnologías de información, capaz de no sólo permitir el registro de muestras en una base de datos, sino también la implementación de una plataforma o interfaz para la consulta de los datos y el procesamiento de ellos en tiempo real o diferido.

1.2.2.1 Micro-estaciones y redes inalámbricas de sensores:

El Laboratorio de Tecnologías Inalámbricas (LatinaUC) de la Pontificia Universidad Católica de Chile, dirigido por uno de los integrantes del grupo de trabajo, ha desarrollado la tecnología de redes inalámbricas de sensores. En términos simples, estas redes están compuestas por micro-estaciones, o nodos, cada una de las cuales cuenta con sensores para medir las variables de interés, un procesador que controla los sensores y la comunicación con las demás micro-estaciones y una radio para enviar las mediciones inalámbricamente hacia una micro-estación designada como acumulador. Los datos que llegan al acumulador son comunicados ya sea por red celular o satelital, según la electrónica instalada, hacia un servidor en la Nube para su almacenamiento y procesamiento en tiempo real. La tecnología a la fecha del informe ya contaba con un grado de madurez que permitía abordar su transferencia a la sociedad y es de especial interés para el monitoreo hidrometeorológico, ya que remueve el principal obstáculo que presentan las estaciones tradicionales: su alto costo y la complejidad logística de su instalación en terreno.

1.2.2.2 Sistema de adquisición de datos:

La comunicación de datos desde los nodos hacia el acumulador no es directa y se logra en varios saltos a través de otros nodos de la red. Los datos que llegan al acumulador son procesados localmente o desaguados mediante algún canal de comunicaciones tradicional hacia un servidor remoto para almacenamiento y procesamiento. En el caso de la red inalámbrica de sensores instalada en la Quebrada de Ramón, los datos adquiridos por las estaciones (nodos) son enviados a un servidor en la Nube y son accesibles por medio de cuentas de usuario personales con clave de acceso, inicialmente. En la Figura 6 se muestra un esquema de la tecnología de la red inalámbrica de sensores.

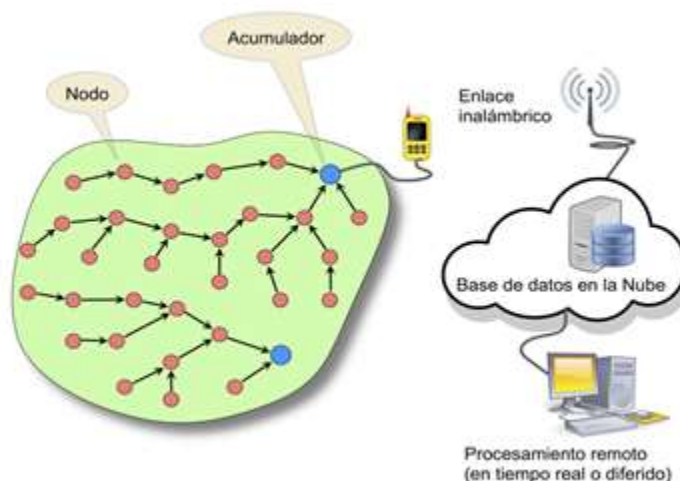


Figura 6: Representación esquemática de la tecnología de redes inalámbricas de sensores. (Fuente: Elaboración propia)

1.2.2.3 Estaciones LatinaDICTUC:

Las estaciones LatinaDICTUC son una solución completa “sensor a nube” para el monitoreo de variables ambientales. A través del total control y conocimiento sobre los diferentes componentes electrónicos y mecánicos, las estaciones son acondicionadas de acuerdo al sitio y propósito de despliegue, logrando menores costos de instalación y fabricación y una alta eficiencia operacional; cada micro-estación se construye de acuerdo a las necesidades del sitio. La Figura 7 muestra una de las estaciones instaladas en la Quebrada de Ramón.

Las principales características de las estaciones instaladas son:

- Microprocesador y electrónica personalizada al sitio de despliegue.
- Memoria SD 16-32 GB para respaldo de datos.
- Torre meteorológica LatinaDICTUC: 3 segmentos de 85 cm y arnés de instrumentos.
- Caja IP 68
- Interfaces de radio nodo a nodo
- Estándar IEEE 802.15.4 para capa física y MAC.
- Interfaces de comunicación nodo a Nube (solo una a la vez):
 - Celular (cualquier proveedor de GSM)
 - Satélite (Iridium)
 - Wifi
- Consumo de potencia:
 - Durante periodos activos: 70 mA @ 3.3 V (típico)
 - Panel solar de 6W
 - Batería: Li-ion 7200 mAh



Figura 7: Estación LatinaDICTUC, sitio Tambor Bajo, tiempo de instalación 1 hora.

Las estaciones instaladas en la quebrada utilizan sensores del mercado y pueden utilizar una gran variedad de protocolos y programarse de acuerdo a los requerimientos del sensor. Como se mencionó, no todas las estaciones miden las mismas variables. En total, la lista completa de sensores incluidos es la siguiente:

- Temperatura del aire (Sensirion SHT21)
- Humedad relativa (HR) del aire (Sensirion SHT21)
- Pluviometría (Decagon ECRN 100)
- Temperatura del suelo (5TM)
- Permeabilidad relativa del suelo (5TM)
- Nivel de agua, Ultrasónico (MB7389)
- Nivel de nieve (MB7574)

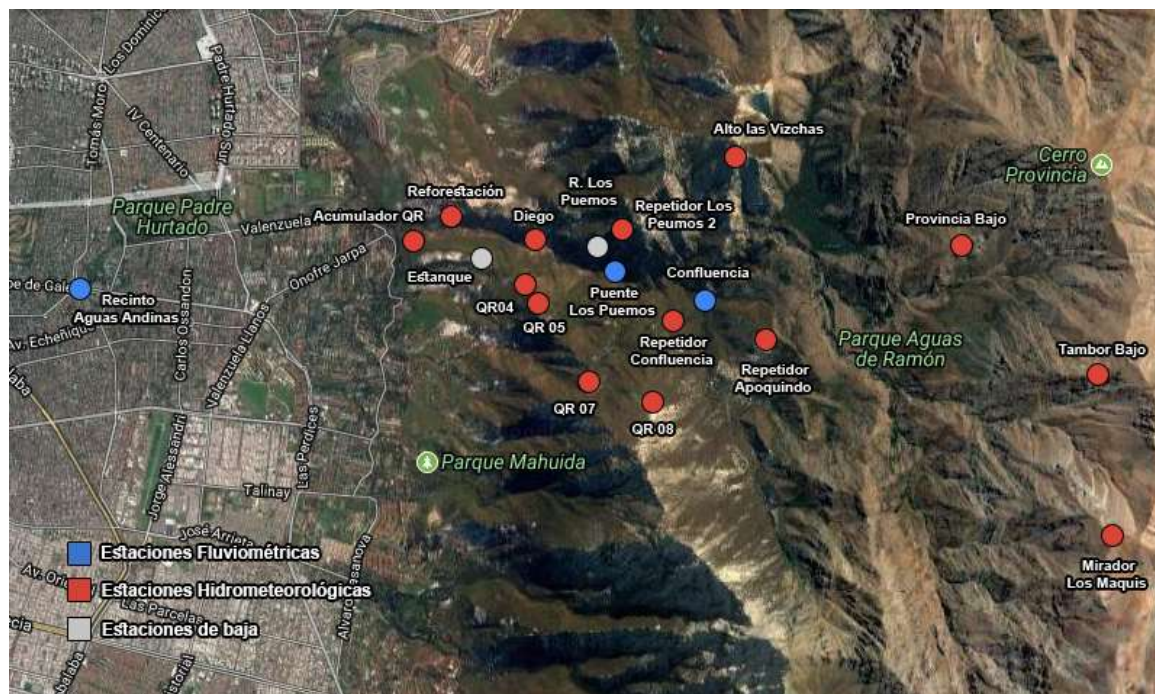
La tasa de muestreo de todos los sensores fue programada para obtener 6 muestras por hora. En la red de la Quebrada de Ramón, el periodo de transmisión de datos estación-Nube es de 10 minutos. La estación acumuladora revisa cada 10 minutos su memoria y en caso de tener nuevos datos que enviar a la Nube, tanto propios como de otras estaciones, inicia la transmisión.

1.2.3 Trabajo en terreno: estaciones instaladas

Anterior a la ejecución de este proyecto, la cuenca de la Quebrada de Ramón contaba con una estación fluviométrica y otra pluviométrica, propiedad de la DGA. Además, el CIGIDEN (Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales) desde el año 2013, ha realizado investigación en la cuenca debido a su historial de inundaciones. Al tiempo de realización de esta etapa, CIGIDEN contaba con una estación tradicional a 1.625 m de elevación

de marca Decagon y la estación Tambor (2.792 m de elevación) que estuvo funcionando parcialmente debido a vandalismo. Por otro lado, ya se encontraban instaladas 8 micro-estaciones LatinaDICTUC.

La Figura 8 muestra el mapa actualizado de estaciones meteorológicas y fluviométricas instaladas en la Quebrada de Ramón, mientras que la Tabla 2 lista cada una de estas estaciones. Al tiempo de realización de esta etapa, estaba pendiente la instalación de 3 estaciones en alta montaña que sí aparecen en esta tabla y figura. Adicionalmente, con el objetivo de ampliar la información fluviométrica de la cuenca se instalaron 3 nuevas estaciones que miden el nivel de agua con sensores ultrasónicos, estas se ubicaron en puntos clave donde la medición de altura de agua resulta importante. Por otro lado, es importante notar que la ubicación de las estaciones meteorológicas instaladas durante el proyecto no sólo tienen por objeto aumentar la cantidad y la diversidad de variables medidas en la cuenca, sino también generar una mayor robustez de la conectividad de la red de sensores. Esto último es necesario para asegurar la existencia de enlaces que permitan la comunicación con estaciones instaladas en sitio encajonados, particularmente las estaciones fluviométricas.



**Figura 8: Mapa de la red de monitoreo actualizado al 17 de Octubre del 2017.
(Elaboración propia).**

La estación fluviométrica “Confluencia” se encuentra ubicada aguas arriba de la confluencia entre la cuenca de Los Quillayes y el aporte de las cuencas de San Ramón, Maquis y Pichanga. El acceso a la estación es por un desvío desde el sendero a los Saltos de Apoquindo de difícil acceso al público general del parque. La estación fluviométrica “Puente Los Peumos” está

emplazada en el puente del mismo nombre, parte de uno de los senderos del Parque Aguas de Ramón. Este punto se ubica aguas abajo de todas las contribuyentes más importantes de la Quebrada y aguas arriba de la bocatoma de agua potable de Aguas Andinas. En esta estación se mide la altura de agua mediante un sensor ultrasónico y un sensor de presión. La estación es visible al público, sin embargo fue el único sitio identificado que tenía un cauce regular y recibe radiación solar durante gran parte del año aguas arriba de la bocatoma de Aguas Andinas. Se decidió instalar dos sensores de distinta naturaleza para agregar redundancia en la medición, dado que es un sitio muy transitado por visitantes del parque. Finalmente, la estación “Recinto Aguas Andinas” mide el caudal en la zona urbana está ubicada en un recinto perteneciente a Aguas Andinas en la intersección de las calles Príncipe de Gales y Salvador Izquierdo, inmediatamente aguas arriba del abovedamiento bajo la calle Príncipe de Gales. En ese punto, el canal es de hormigón y de sección rectangular. El acceso a la estación es desde el interior del recinto, cuya entrada se ubica en la calle Poeta Ángel Cruchaga. Esta estación reporta sus datos mediante enlace celular.

La estación “Reforestación” está ubicada al costado del sendero Los Peumos, lado norte. Mide pluviometría, temperatura y humedad del aire, y temperatura y humedad del suelo a 30 cm de profundidad. En el contexto de la red, la estación es crítica pues recibe gran parte del tráfico de la red y la envía al acumulador. Las estaciones “Alto Las Vizcachas” y “Repetidor Confluencia” agregan información de humedad y temperatura del suelo de la ladera norte, sur y centro de la cuenca.

El día 25 de abril de 2017 se realizó el despliegue en helicóptero de 3 nuevas estaciones meteorológicas en la parte alta de la Quebrada de Ramón. La estación “Mirador Los Maquis” se encuentra ubicada a 2.962 m.s.n.m. en la unión de la cuenca de San Ramón y la cuenca Los Maquis. La estación “Tambor Bajo” se encuentra a 2.627 m.s.n.m. descendiendo desde cerro Tambor. La estación “Provincia Bajo” se encuentra a 2.117 m.s.n.m. y está en la parte baja del cerro Provincia. Estas nuevas estaciones reportan sus datos a través de comunicación satelital por medio de los satélites IRIDIUM debido al impacto que la distancia significativa hasta la estación más cercana y las adversas condiciones meteorológicas en la parte alta de la cuenca puedan tener sobre la comunicación de estas estaciones con el resto de la red. Estas estaciones son idénticas y reportan la humedad y temperatura del suelo y del aire, la pluviometría y el nivel de nieve. Todas las estaciones fueron instaladas sobre una base rocosa y son estabilizadas mediante 3 vientos que están aferrados a cáncamos en anclaje en piedra. El cable del sensor de humedad es protegido mediante un tubo de PVC para evitar daños por parte de los animales del sector. Además, se decidió instalar las estaciones distanciadas del sendero tradicional del parque debido a los antecedentes previos de vandalismo.

Por otro lado, durante mayo de 2017 se realizó el retiro de la estación meteorológica de CIGIDEN asociada al sitio llamado “Estanque”. No se realizará la reposición de la estación debido a que ha sido repetidamente golpeada por animales al interior de la quebrada, principalmente vacas. Además, se cambió uno de los nodos de posición para que sea capaz de actuar como acumulador y reportar a la Nube los datos de la red. Además, durante Julio de 2017 se realizó el cambio de sitio para Repetidor Los Peumos (ahora Repetidor Los Peumos 2) debido al aumento

significativo de vegetación y los cambios en la capacidad de captura de energía solar durante invierno. Además, se le agregó un sensor de humedad de suelo.

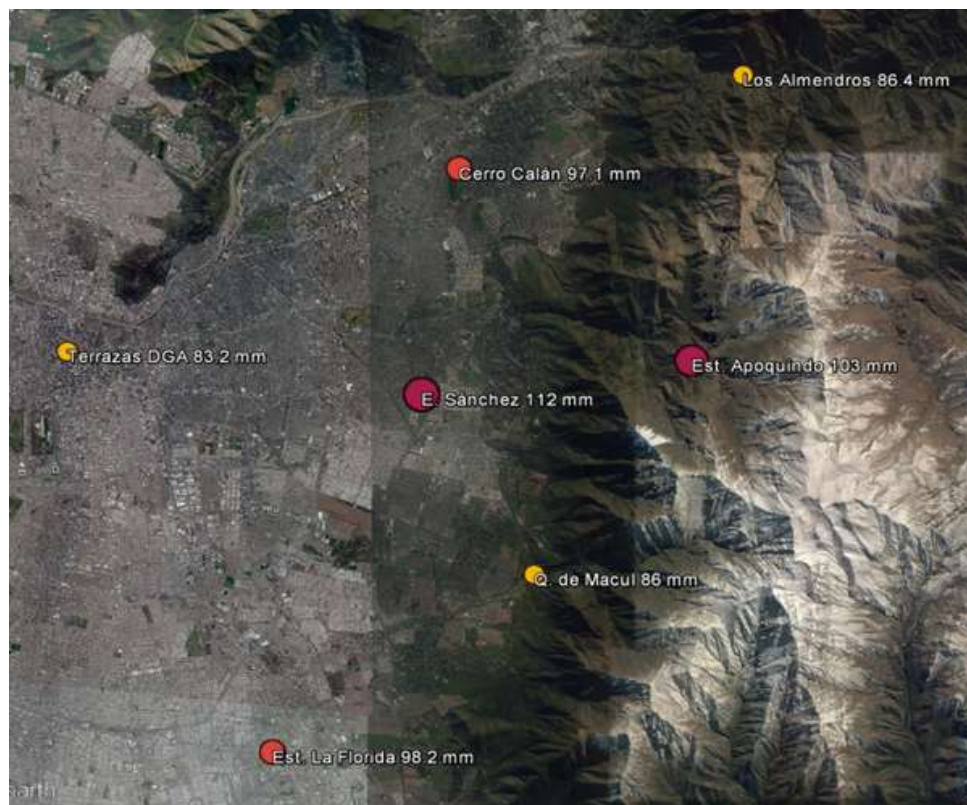
Tabla 2: Resumen de estaciones instaladas en la Quebrada de Ramón

SITIO	Altitud (msnm)	Coord. UTM E (M)	Coord. UTM N (M)	Propietario	Temperatura y humedad del aire	Temperatura y humedad del suelo	Pluviometría	Nivel de nieve	Nivel de agua
Recinto Aguas Andinas	662	355385	6298966	INH					
Acumulador QR	878	359059	6299547	PUC					
Reforestación	948	359467	6299842	PUC					
Diego	1000	360420	6299592	PUC					
Puente Los Peumos	1067	361292	6299255	PUC/INH					
QR 04	1167	360351	6299022	PUC					
Confluencia	1207	362280	6298940	PUC					
QR 05	1236	360455	6298909	PUC					
Repetidor Confluencia	1338	361937	6298718	PUC					
Repetidor Los Peumos 2	1354	361361	6299717	INH					
QR 07	1472	361021	6298040	INH					
Repetidor Apoquindo	1573	362955	6298534	INH					
QR 08	1706	361722	6297834	INH					
Alto las Vizcachas	1751	362592	6300470	INH					
Provincia Bajo	2117	365100	6299597	PUC					
Tambor Bajo	2627	366613	6298203	INH					
Mirador Los Maquis	2962	366796	6296432	INH					

1.2.4 Análisis inicial del impacto de las variables monitoreadas

En este punto se presentaron una serie de ejemplos que buscan demostrar cómo los datos reportados por las estaciones instaladas en la zona de estudio entregan la información necesaria para abordar los aspectos necesarios para el proyecto presentados en la sección inicial del informe.

Una de las principales razones para monitorear la pluviometría a distintas altitudes de la cuenca es la variación espacial del agua caída. Para ejemplificar ello, se analizó la precipitación acumulada total registrada en diversas estaciones en Santiago durante el evento del 16 de abril del año 2016 (Figura 9). Fue posible notar diferencias considerables, particularmente para el caso de la estación Apoquindo, la de mayor altitud a la fecha, ubicada en la Quebrada de Ramón. Si se utilizaran los registros de la estación Terrazas de la DGA, por ser la estación con mediciones más confiables y estables a lo largo del tiempo, se podría subestimar en aproximadamente un 25% la precipitación caída a los 1.700 m de altura en la Quebrada de Ramón. La resolución temporal a la cual los datos son medidos es otro factor de importancia que es abordado con la utilización de las estaciones LatinaDICTUC. En efecto, registros horarios de precipitación no son capaces de captar las variaciones locales en la intensidad de lluvia que sí resultan relevantes al analizar tormentas fuertes.



**Figura 9: Precipitación total acumulada durante el evento del día 16 de abril del 2016.
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Dirección General de Aguas y
CIGIDEN)**

Para ejemplificar los efectos que tiene el conocimiento preciso de la temperatura del ambiente a distintas elevaciones, se presentó un ejercicio donde, a partir distintos registros reales de temperaturas en estaciones consideradas en esta consultoría, se estima el gradiente instantáneo de temperatura, la correspondiente elevación de la isoterma 0°C y el volumen escurrido frente a un evento de precipitación medido en la estación Apoquindo de la Quebrada y en la estación Terrazas DGA. Se alcanzan diferencias de hasta 20% en el área aportante dependiente de los datos utilizados. Asimismo, las diferencias espaciales de temperaturas mínimas y máximas muestran una fuerte dependencia de la temperatura del aire con la altitud y, utilizando datos medidos con las estaciones de la Quebrada, se observaron diferencias de hasta 38% en el cálculo del gradiente en comparación al calculado a partir de datos de las estaciones DGA.

Por su parte, el cálculo de la elevación de la línea de nieve, dependiente de la temperatura y la humedad relativa del aire, alcanza un 12% de diferencia dependiente del origen de datos utilizados.

1.2.5 Conclusiones

El informe de la Etapa N°2 resume las decisiones tomadas para lograr el monitoreo de variables hidrometeorológicas y fluviométricas que permitan elaborar alertas de crecidas y pronósticos de inundaciones precisos y confiables para la cuenca de la Quebrada de Ramón.

En base a la experiencia del equipo consultor en el monitoreo de variables hidro-meteorológicas, utilizando tanto estaciones tradicionales como nuevas tecnologías, se decidió utilizar redes de sensores de micro-estaciones para cumplir con los requerimientos del proyecto. El menor costo de las micro-estaciones permite abarcar una mayor área y obtener una mayor resolución espacial de las variables. El sistema de adquisición de datos está unificado bajo el concepto de “sensor a Nube”, permitiendo al mandante acceder a los datos.

Se presentó una primera muestra de los datos medidos con las estaciones instaladas en la zona de estudio. En ellos se pudo notar que las características de las estaciones utilizadas permiten tanto mejorar la caracterización espacial como temporal de los fenómenos físicos que ocurren en la cuenca durante crecidas.

A la fecha de esta etapa se instalaron un total de 8 nuevas estaciones: 3 fluviométricas y 5 hidrometeorológicas. Actualmente se encuentran instaladas en total 17 estaciones.

1.3 Modelación meteorológica e hidrológica

La Etapa 3 del proyecto está dedicado a la implementación de los modelos meteorológicos e hidrológicos a utilizar en el sistema de alerta temprana. En el informe, la identificación, construcción y validación de estos modelos se propuso en función de un modelo conceptual inicial del sistema de alerta temprana. Este requiere, entre otros elementos, pronósticos de precipitaciones y temperaturas diarias, una base de datos relacionando el valor de estas variables con una estimación del caudal máximo a generarse y un modelo de pronóstico de caudales al corto plazo fuertemente dependiente de la información levantada en tiempo real por el sistema de monitoreo implementado en la cuenca. Todos estos elementos son presentados en detalle en el informe. Además, una planificación preliminar del sistema de alerta temprana a implementar y algunos aspectos pendientes de etapas anteriores fueron también abordados en el informe.

Así, específicamente, la sección incluye:

- Una descripción general del sistema de monitoreo y alerta temprana, con el detalle de las herramientas utilizadas y los flujos de información para la generación de la alerta.
- Detalles de las herramientas utilizadas para obtener los pronósticos meteorológicos en distintos puntos dentro y fuera de la cuenca de estudio.
- Una descripción de los procesos y parámetros considerados en la modelación hidrológica de base física. En este punto se incluyen los detalles de implementación, calibración, validación y algunos resultados preliminares del uso del modelo para la predicción de crecidas.
- Explicación de las distintas metodologías evaluadas para la implementación de un modelo hidrológico de base estadística y presentación de los distintos resultados obtenidos para los eventos de precipitación recientes medidos en la zona de estudio.

1.3.1 Modelación Meteorológica

En el desarrollo del proyecto se hace necesario emplear pronósticos meteorológicos de al menos seis días hacia adelante para la región de estudio. Para ello se usaron los productos del modelo numérico de predicción CFSv2, los cuales fueron desagregados espacialmente (proceso conocido como reducción de escala o downscaling) y corregidos utilizando una técnica estadística llamada **Spatial Disaggregation and Bias Correction** (SDBC) (Abatzoglou and Brown, 2012).

El modelo *Climate Forecast System version 2* (CFSv2) es un modelo que representa la interacción global entre los océanos, la tierra y la atmósfera (Saha et al., 2014). Los datos de CFSv2 están disponibles en tiempo real en los servidores del *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) de la NOAA. Sin embargo, también cuenta con pronósticos retrospectivos (reforecast) para un periodo que va desde 1982 hasta 2010 que son empleados en la construcción del modelo SDBC. Los productos vienen con una resolución de 1 grado (aproximadamente 110 km), para paso de tiempo de salida de 6 horas (00, 06, 12 y 18 UTC) y cuentan con pronósticos a corto y medio plazo (45 días, 123 días y 9 meses). La resolución

gruesa de estos pronósticos es bastante útil para reproducir muchos aspectos del clima a gran escala, pero no permite la representación de los procesos a escala regional y local, situación que se amplifica en zonas topográficamente complejas o heterogéneas. Para sobrellevar estas limitaciones, se han desarrollado diferentes enfoques de reducción de escala que básicamente se clasifican en métodos dinámicos y estadísticos. El enfoque dinámico se basa en el uso de un modelo climático regional (RCM – Regional Climate Model), lo que implica contar con personas expertas en meteorología y en el manejo de este tipo de modelos además que es computacionalmente costoso. Por otra parte, los métodos estadísticos implican el establecimiento de relaciones empíricas entre variables climáticas locales y variables predictoras de gran escala obtenidas de los modelos como el CFSv2. Entre los métodos estadísticos de reducción de escala más utilizados está el de corrección de sesgo con el enfoque de desagregación estadística de Wood et al. (2004). Este método llamado BCSD (bias correction-spatial disaggregation) consiste en una corrección de sesgo empleando Quantile Mapping seguido por un proceso de interpolación de las predicciones de los modelos de NWM a escala de estación. Una versión modificada de BCSD que invierte el orden del procedimiento es el método SDBC (spatially downscaled and bias correction) (Abatzoglou y Brown, 2012) el cual ha demostrado tener éxito en la reproducción de la variabilidad espacial exhibida por las observaciones (Hwang y Graham, 2013; Hwang y Graham, 2014). Es precisamente este método el que se implementó en este proyecto.

1.3.1.1 Metodología

La metodología para la desagregación de los pronósticos de precipitación y temperatura obtenidos del modelo CFSv2 y corrección del sesgo consta de una parte de modelación, una de validación y otra de operación en tiempo real. En la fase de modelación se empleó información histórica del modelo CFSv2 y de las estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana, para obtener coeficientes de corrección del modelo SDBC para cada mes y estación meteorológica. En la fase de validación se usó un periodo de registro con el cual se validaron estos coeficientes en términos de la habilidad para detectar los eventos (estadígrafos categóricos) y en la habilidad para estimar la magnitud (estadígrafos numéricos). Por último, se hace la operación del sistema de pronóstico en tiempo real, con la descarga automática de los pronósticos del CFSv2, la aplicación del SDBC y la entrega de resultados para las estaciones meteorológicas representativas en la Región Metropolitana y la Quebrada de Ramón.

Para el pronóstico en tiempo real se usa un conjunto de subrutinas con las cuales se (1) descargan automáticamente los pronósticos de precipitación y temperaturas extremas del servidor de la NOAA, (2) se transforman los productos de GRIB2 (formato original de los productos) a netCDF (formato lectura de rutinas implementadas), (3) se extrae la sección del producto que corresponde a la zona de estudio, y (4) se aplica SDBC para obtener la precipitación diaria acumulada y las temperaturas máximas y mínimas para un tiempo futuro de hasta 6 días. La NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) cuenta con pronósticos de los últimos 7 días, sin embargo, los datos se cargan por completo con 12 horas de retraso. Se entregan los pronósticos diarios de precipitación y temperaturas extremas para la estación Quinta Normal y otras estaciones de la RM, pero existe la opción de entregar pronóstico también para

las estaciones instaladas en la Quebrada Ramón. Sin embargo, la generación de estos pronósticos se debe tomar con cautela dado que se cuenta con pocos meses de datos en estas estaciones, razón por la cual no se obtuvieron los coeficientes de corrección directamente de la información registrada en estas estaciones, sino que se empleó un método indirecto para obtener los pronósticos en esos puntos. Debido a esto se decidió construir la look-up table a partir de los valores de temperatura mínima y precipitación en la estación Quinta Normal.

En base a lo anterior se tomaron las siguientes decisiones: (1) Se descargan los pronósticos cada 6 horas, pero estos corresponden a los últimos pronósticos completos subidos a la plataforma de la NOAA; 2) para la estimación de la precipitación se usan los últimos 12 pronósticos (3 días, cada día cuenta con 4 pronósticos) y con ellos se determina la probabilidad de lluvia; 3) por seguridad se escogió que si al menos el 30% de los pronósticos (4 de 12 o más) indican precipitación, entonces se pronostica lluvia y su magnitud se estima como el promedio de aquellos pronósticos con magnitudes superiores a cero. Los resultados se entregan por estación meteorológica, por día y para 6 días hacia adelante. Para el caso de la temperatura, las temperaturas extremas se estiman con el último pronóstico generado por la NOAA. Tanto para la precipitación como para la temperatura se entrega no solo el pronóstico obtenido a partir de los 12 pronósticos descargados de la NOAA, sino que existe la posibilidad de tener esos pronósticos de manera individual, y en el caso de la precipitación también se entrega la probabilidad de lluvia por día y estación.

1.3.2 Modelación Hidrológica

Para la modelación hidrológica se utilizó el programa de libre acceso *Hec-HMS*, el cual permite la modelación de los procesos físicos involucrados en la transformación de lluvia-escorrentía, mediante la simulación en tiempo continuo considerando periodos húmedos y secos. En términos generales, la modelación consiste en la estimación de la precipitación efectiva mediante el cálculo de abstracciones (intercepción, almacenamiento superficial e infiltración), el cálculo de flujo base y la propagación del hidrograma de exceso de precipitación a través de las subcuencas definidas.

1.3.2.1 Simulación del proceso lluvia-escorrentía

La intercepción se calculó con un modelo simple, en el que toda la precipitación es interceptada, hasta alcanzar la capacidad máxima de almacenamiento. Para el almacenamiento superficial se utilizó una metodología similar, definiendo una capacidad de almacenamiento máxima. Solo habrá escurrimiento superficial si se ha alcanzado la capacidad máxima de almacenamiento y la tasa de precipitación es mayor a la tasa de infiltración de la subcuenca.

La infiltración fue calculada con el método *Soil Moisture Accounting*, el cual permite la modelación hidrológica en tiempo continuo tanto de los periodos húmedos como secos. Los contenidos de almacenamiento en un tiempo dado se calculan durante la simulación y varían continuamente durante y entre tormentas. Los componentes de flujo en el modelo consideran precipitación, infiltración, percolación, escorrentía directa, flujo de agua subterránea y evapotranspiración.

Adicionalmente se utilizaron la ecuación de Priesley-Taylor para simular la evapotranspiración y el método grado-día para simular el derretimiento.

La generación de escorrentía se realiza mediante el Hidrograma Unitario de Clark, un método de hidrograma unitario sintético basado en la implementación de curvas de tiempo-área y de un embalse lineal para propagar y atenuar la respuesta de las diversas subcuenca consideradas. Por su parte, para representar el tránsito de los hidrogramas a través de la red de drenaje, se utilizó el método de simple retraso. Este sólo representa la traslación de las ondas de inundación sin incluir atenuación o procesos difusivos. Este enfoque se adoptó dado el poco almacenamiento que otorga el cauce al flujo debido a lo encañonado del cauce.

Para realizar los cálculos subsuperficiales se utilizó un método embalse lineal que simula el almacenamiento y el movimiento del flujo subsuperficial como almacenamiento y movimiento del agua a través de embalses. Dado que esta metodología necesita de mediciones de caudal en las distintas salidas de las subcuencas, se realizó una extrapolación del registro histórico disponible de la Estación Quebrada de Ramón Recinto EMOS (DGA), entre los años 2005 y 2014.

Los datos meteorológicos de precipitación y temperatura fueron extraídos del registro histórico disponible en la Estación Quinta Normal (DMC). Este registro cuenta con mediciones diarias durante 40 años desde 1971 a 2011 disponibles online. Además, con el objetivo de poder simular en forma continua y de mejor manera las distintas crecidas, se realizó una desagregación temporal de los datos diarios a horarios de tanto la precipitación como temperatura mediante un método estadístico y una descomposición de Fourier respectivamente. Estas metodologías de desagregación temporal fueron validadas con observaciones. Los valores obtenidos se extrapolaron utilizando gradientes constantes para poder implementar registros de entrada de estas variables meteorológicas en las distintas sub-cuencas. En particular, los valores horarios de precipitación y temperatura en las distintas subcuencas implementadas en el modelo permiten determinar la ocurrencia espacial y temporal de precipitación sólida vs. líquida para distintas elevaciones

1.3.2.2 Calibración

Debido a la poca disponibilidad de largos y confiables registros de caudal medidos en la cuenca de estudio, en el informe se presentó una metodología de calibración basada en la representación aproximada de las curvas de frecuencia de caudales anuales máximos propuestas en otros estudios existentes para la cuenca. Esta curva de frecuencia se construyó a partir del análisis de frecuencia de registros continuos de caudales horarios simulados con el modelo. Los registros horarios de precipitación y temperatura se generaron a partir de las desagregaciones horarias de los registros históricos de precipitación y temperatura de la Estación Quinta Normal entre los años 1971 y 2010. Debido al carácter estocástico del método de desagregación de precipitación previamente descrito, el modelo Hec-HMS se ejecutó 5 veces usando la misma serie de temperaturas horarias y 5 series de precipitación horarias desagregadas a partir del registro diario, por lo tanto, la curva de frecuencia de caudales anuales máximos se elaboró con la serie resultante de 200 años. La calibración permite reproducir

adecuadamente el conjunto de curvas de frecuencia de caudales máximos anuales modeladas en estudios previos.

Finalmente, para validar el modelo, se verificó la correcta simulación de 8 crecidas puntuales razonablemente registradas en la Estación Quebrada de Ramón Recinto EMOS. En general, el caudal máximo observado está en el rango de caudales máximos simulados, aunque en algunos casos se subestiman las observaciones. Se destacó entonces la necesidad de mayor información para una validación más rigurosa.

A la fecha de la Etapa N°3, algunos eventos ya habían sido capturados por la red meteorológica instalada en la Quebrada. El primer acercamiento a una validación con estos datos se realizó utilizando los datos registrados durante las tormentas acontecidas en diciembre del 2016. Se obtuvo que los valores originales utilizados para estimar el flujo base parecen ser menores a los obtenidos con esta calibración, mientras que los parámetros de infiltración no mostraron variaciones significativas. Sin embargo, una mejor apreciación de la simulación del flujo base requiere un registro de observaciones de precipitación más largo puesto que el flujo base es típicamente dependiente de la precipitación caída con un desfase temporal significativo.

1.3.2.3 Resultados

Se identificaron los parámetros que controlan la ocurrencia y magnitud de crecidas en la Quebrada de Ramón. En específico, la temperatura mínima del día es la temperatura crítica que mejor explica la ocurrencia y magnitud de una crecida, junto con la precipitación del día y la precipitación acumulada a 3 y 7 días previos. Esto se debe a que un alto valor de la temperatura mínima dentro de todo el día implica temperaturas altas durante todo el resto del día. Por consiguiente, se presentarían las condiciones propicias para la ocurrencia de precipitación líquida significativa en lugar de precipitación sólida. Por el contrario, las temperaturas media y máxima son un peor predictor de las características de la crecida.

En general se observa que la ocurrencia de eventos extremos está caracterizada por precipitaciones inusualmente intensas, bajo condiciones cálidas de temperatura, las que por su parte no necesariamente son tan extremas. Las condiciones usuales de ocurrencia de crecidas extremas se pueden resumir de esta manera:

- Precipitaciones del día dentro del 5% mayor para el mes, con temperaturas mínimas superiores al 60% de lo que ocurre en el mes.
- Precipitaciones acumuladas en 3 días dentro del 10% mayor para el mes, con temperaturas mínimas en el día del evento superiores al 60% de lo que ocurre en el mes.
- Precipitaciones acumuladas en 7 días dentro del 20% mayor para el mes, con temperaturas mínimas en el día del evento superiores al 60% del común del mes.

En lo que respecta a la influencia de la precipitación acumulada los días previos a la tormenta, es importante destacar que el 80% de los eventos se registraron cuando también había precipitado los dos días anteriores al día de la crecida.

El análisis permite también vincular los valores de temperatura mínima y precipitación diaria con rangos de caudales máximos esperados. Es precisamente esta información la que se utiliza para construir la base de datos o look-up table a consultar con los valores de estas variables pronosticadas al mediano plazo (1 a 7 días) por el componente meteorológico de la plataforma del Sistema de Alerta Temprana (Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5).

Tabla 3: Caudal máximo esperado (m3/s) dada temperatura mínima diaria y precipitación total del día

Precipitación (mm)	Temperatura Mínima Diaria (°C)									
	[-5,0)		[0,5)		[5,10)		[10,15)		[15,inf)	
	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax
[0,12)	0.93	1.00	1.53	2.20	1.53	3.08	1.53	6.65	1.53	6.65
[12,24)	1.00	1.00	1.53	2.20	1.53	3.08	1.53	6.65	5.60	6.65
[24,36)	1.00	1.00	1.53	3.88	1.70	7.00	2.28	11.28	5.60	11.28
[36,48)	1.00	1.00	2.40	6.85	2.98	11.90	12.25	21.75	12.25	21.75
[48,60)	1.00	1.00	3.70	11.30	3.83	17.10	12.25	22.88	12.25	22.88
[60,72)	1.00	1.00	9.65	30.05	9.65	30.05	12.25	30.05	12.25	30.05
[72,84)	1.00	1.00	9.65	30.05	14.53	36.98	14.53	36.98	14.53	36.98
[84,inf)	1.00	1.00	9.65	30.05	14.53	36.98	14.53	36.98	14.53	36.98

Tabla 4: Caudal máximo esperado (m3/s) dada temperatura mínima diaria y precipitación total de 3 días previos

Precipitación (mm)	Temperatura Mínima Diaria (°C)									
	[-5,0)		[0,5)		[5,10)		[10,15)		[15,inf)	
	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax
[0,30)	0.93	1.00	0.98	6.00	1.10	6.00	1.30	6.50	5.60	6.50
[30,60)	0.93	1.00	1.80	6.40	1.80	8.75	1.80	13.10	5.60	13.10
[60,90)	0.93	1.00	1.80	10.55	2.33	12.95	2.38	13.10	5.60	13.10
[90,120)	1.00	1.00	4.65	14.25	4.65	14.25	4.65	14.25	5.60	14.25
[120,150)	1.00	1.00	4.65	14.25	5.38	20.10	5.38	20.10	5.60	20.10
[150,180)	1.00	1.00	14.45	20.70	15.73	29.38	15.73	29.38	15.73	29.38
[180,210)	1.00	1.00	14.45	20.70	15.73	29.38	15.73	29.38	15.73	29.38
[210,240)	1.00	1.00	14.45	20.70	15.73	29.38	15.73	29.38	15.73	29.38

Tabla 5: Caudal máximo esperado (m3/s) dada temperatura mínima diaria y precipitación total de 7 días previos

Precipitación (mm)	Temperatura Mínima Diaria (°C)				
	[-5,0)	[0,5)	[5,10)	[10,15)	[15,inf)

	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax
[0,30)	0.93	5.48	1.13	9.15	1.20	9.15	1.25	9.15	5.60	9.15
[30,60)	0.93	5.48	1.50	9.15	1.50	9.15	1.50	9.15	5.60	9.15
[60,90)	0.93	5.48	1.50	9.15	1.90	11.80	2.80	12.90	5.60	12.90
[90,120)	0.93	5.48	2.00	17.30	2.00	17.30	2.80	17.30	5.60	17.30
[120,150)	1.00	5.48	2.50	17.30	2.50	17.30	2.80	17.30	5.60	17.30
[150,180)	1.00	5.48	2.50	17.30	2.50	17.30	2.80	17.30	5.60	17.30
[180,210)	1.00	5.48	13.00	17.30	13.00	17.30	13.00	17.30	13.00	17.30
[210,240)	1.00	5.48	14.45	20.70	14.45	20.70	14.45	20.70	14.45	20.70
[240,270)	1.00	5.48	14.45	20.70	14.45	20.70	14.45	20.70	14.45	20.70

1.3.3 Modelo Función de Transferencia

Los modelos de función de transferencia para el proceso lluvia escurrimiento son modelos estadísticos de caja negra tipo input-output, capaces de transformar precipitación y otras variables en escurrimiento. En su aplicación en el pronóstico de inundaciones, el objetivo es relacionar las observaciones en tiempo real y/o observaciones anteriores y distribuidas en el espacio de caudales, precipitación y otras variables con uno o varios pronósticos de caudal. Durante esta etapa, la red de nodos de la Quebrada de Ramón logró registrar las variables necesarias para un análisis del evento del 9 de diciembre del 2016 a escala horaria y la implementación de un modelo de este tipo. Se describe a continuación esta implementación.

1.3.3.1 Selección de variables de entrada y resultados

En distintos puntos de la cuenca se pueden registrar las mismas variables atmosféricas y ambientales, dando una buena representación de la distribución espacial de sus propiedades; sin embargo, su comportamiento en el tiempo tiende a estar correlacionado. Por esto, resulta importante seleccionar a priori qué variables deben incluirse en un análisis de función de transferencia o, en contraste, utilizar un método que sea capaz de incluir todas las variables disponibles y a la vez lidiar con el problema de la multicolinealidad.

El primer criterio de selección de las variables de entrada al modelo de Función de Transferencia fue basado en las correlaciones existentes entre todas las variables medidas en los distintos nodos de la Quebrada con la variable a explicar, es decir, la altura de agua en los puntos de aforo en la cuenca. Para enfrentar el problema de dependencia o redundancia entre las variables de entrada seleccionadas, se consideró adicionalmente la significancia de cada variable. Para este propósito se utilizó el método *Stepwise*, una metodología sistemática para agregar o remover variables de un modelo de función de transferencia basándose en la significancia estadística de cada una.

Las funciones de transferencia resultantes para cada lugar de medición de altura de agua, considerando las variables y los retardos seleccionados con el análisis de correlación y luego

siguiendo el método *Stepwise* se muestran en los anexos: Confluencia (anexo 3.5.1), Puente Los Peumos (anexo 3.5.2) y Recinto de Aguas Andinas (anexo 3.5.3).

1.3.3.2 Resultados

Los modelos propuestos son capaces de asimilar datos en la medida que estos son medidos para su calibración automática; un nuevo evento siendo registrado por los nodos de la Quebrada de Ramón es utilizado para actualizar los parámetros de los modelos antes descritos. Este nuevo set de datos se utiliza entonces para el siguiente paso de tiempo de predicción. La calibración automática consiste en la aplicación de un filtro de Kalman, que varía los parámetros Beta de las Funciones de Transferencia de cada sitio conforme nueva información meteorológica completa sea medida. La actualización ocurre solamente en aquellos intervalos de 10 minutos donde sí se haya registrado precipitación (evitando la calibración del modelo en tiempos secos) y sólo si todas las variables involucradas en cada función de transferencia fueron medidas correctamente, evitando calibraciones con información errónea. A continuación, se realiza una comparación de las estimaciones de caudal con aquel registrado en las estaciones fluviométricas, tanto utilizando como sin utilizar el filtro de Kalman.

Como ejemplo, se utilizó uno de los eventos ya registrados y utilizados en la definición de los parámetros iniciales, que cuenta con la menor cantidad de información faltante: el evento ocurrido el 10 de mayo de 2017, donde precipitó un total de 53.4 mm medido en las estaciones y tuvo una duración sobre 20 horas. Se realizó una comparación de las estimaciones de caudal con el caudal registrado en la estación Confluencia. Cabe señalar que las variaciones de caudal registrado en esta estación fueron pequeñas.

Las Figura 10, Figura 11 y Figura 12 muestran los resultados obtenidos para el evento del 10 de mayo del 2017 para las estaciones Confluencia, Puentes los Peumos y Recinto Aguas Andinas respectivamente.

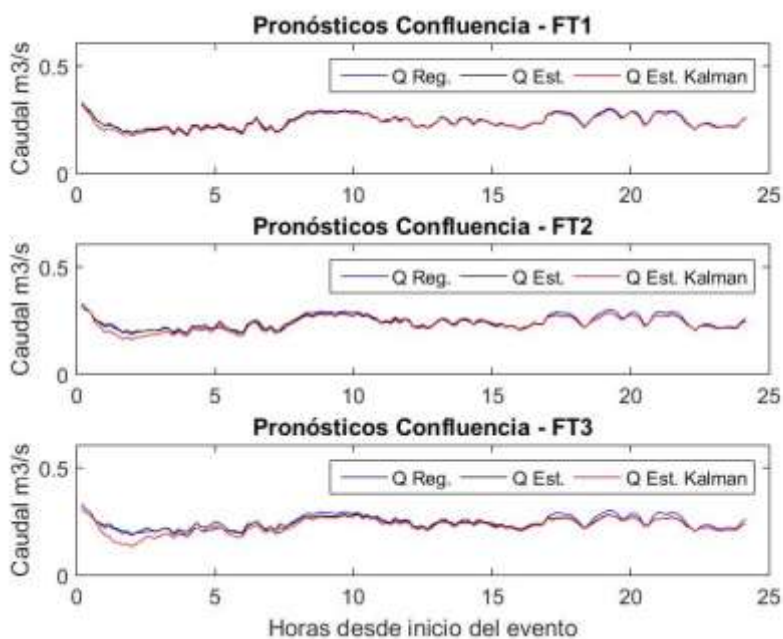


Figura 10: Funciones de Transferencia en Confluencia, evento 10 de mayo de 2017.

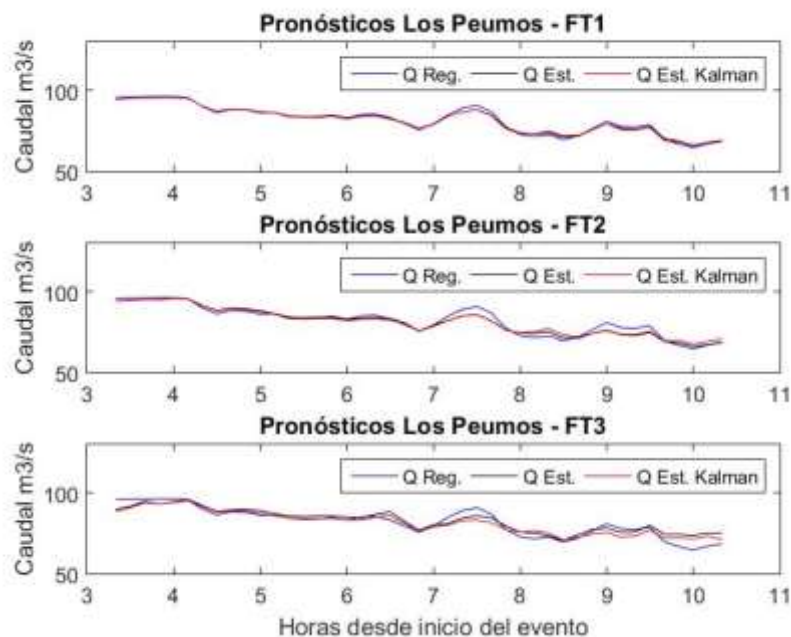


Figura 11: Funciones de Transferencia en Puente Los Peumos, evento 9 de agosto de 2017.

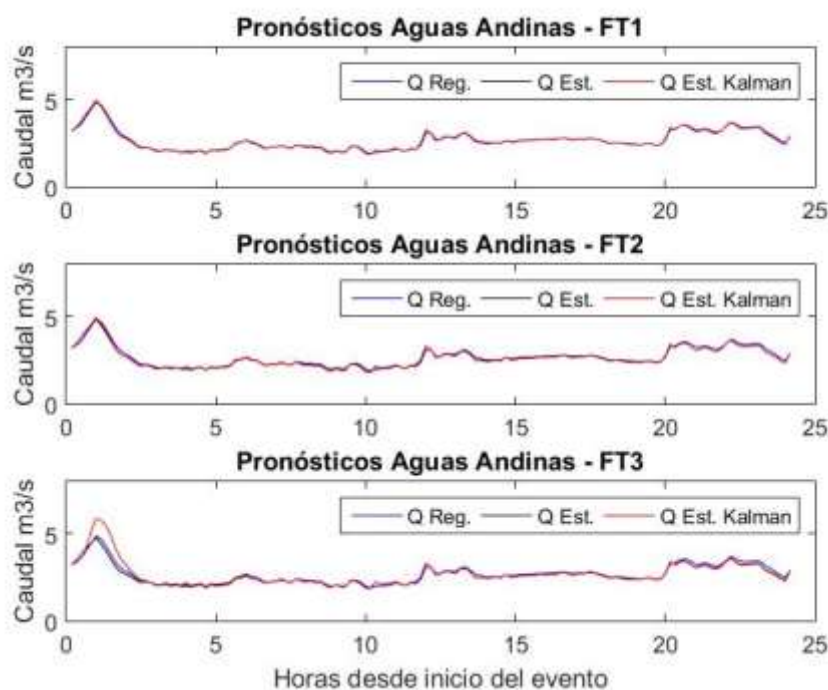


Figura 12: Funciones de Transferencia en Aguas Andinas, evento 10 de mayo de 2017.

1.3.4 Conclusiones

El documento final de la Etapa N°3 resume tanto los aspectos técnicos más generales del sistema de alerta temprana que se buscaba implementar, como la descripción de los modelos meteorológicos e hidrológicos implementados.

En la primera sección del documento se describen los distintos modelos computacionales utilizados para la implementación del sistema de alerta de crecidas. Además, se dieron algunos detalles respecto a los flujos de información asociados al funcionamiento de todos los modelos numéricos con el sistema de monitoreo y las distintas bases de datos que alimentarán el sistema. La identificación e implementación de estos flujos y su integración final sin embargo son materia a ser abordada en la Etapa N°5.

Se presentó también en el modelo meteorológico utilizado para la generación de pronósticos a escala diaria en Santiago y la Quebrada de Ramón. Los resultados de la validación mostraron que los pronósticos de precipitación son consecuentes con las observaciones. Los productos meteorológicos empleados y el método de corrección permiten identificar con buena precisión la ocurrencia de tormentas y su magnitud. Se concluye que el método de pronóstico propuesto es bueno y tiene un carácter conservador puesto que sus errores radican en la posible sobrestimación de los días con lluvia y la magnitud de esta.

Del mismo modo, se dieron a conocer los modelos hidrológicos para la predicción de caudal. Con el primero se identificaron las condiciones de precipitación y temperatura que desencadenarían un evento catastrófico, lo que permite entonces tener una base de datos que junto con el pronóstico meteorológico a mediano plazo (i.e. 1 a 6 días previo al evento) permiten declarar una condición de advertencia con días de anticipación. Por otro lado, se elaboraron métodos estadísticos dependientes de la información medida en tiempo real, los que se utilizan para pronosticar el caudal al corto plazo. Los métodos propuestos predicen bastante bien la única crecida registrado íntegramente por el sistema de monitoreo a la fecha (evento del 9 de diciembre de 2016).

1.4 Modelación Hidráulica

En esta etapa se desarrollaron simulaciones de la propagación de crecidas en el área de estudio, bajo distintas condiciones de caudal máximo instantáneo. Para ello, se utilizó un modelo numérico bidimensional que resuelve las ecuaciones de aguas someras o de St. Venant acopladas a la ecuación de transporte de sedimentos. Se presenta la información necesaria para la implementación de las simulaciones, la cual abarca topografía, granulometría del lecho, concentración de sedimentos suspendidos durante la inundación y los análisis de frecuencia de los distintos caudales testeados. Además, se describe el modelo utilizado y las consideraciones en el tratamiento de las pérdidas de cantidad de movimiento producto de altas concentraciones de sedimentos. Por último, se presenta una caracterización de las zonas de inundación para todos los caudales simulados, considerando la topografía actual del lugar y las piscinas retenedoras que potencialmente se instalarían para el control de inundaciones.

Específicamente, se trataron los siguientes temas:

- Descripción de la información topográfica utilizada para la caracterización del área potencialmente inundable. Se destaca la generación de un dominio de estudio con la topografía actual del terreno, y otro que considera la potencial construcción de piscinas retenedoras, diseñadas por ARRAU (2015) para la DOH.
- Descripción de la rugosidad del lecho basada en las calicatas recopiladas a partir de registros históricos y mediciones en terreno.
- Determinación de la concentración de sedimentos presente durante la inundación.
- Detalle de los análisis de frecuencia de caudales realizados en la presente consultoría y en estudios previos; y la determinación de los caudales a simular.
- Presentación del modelo empleado en las simulaciones y de las consideraciones para su utilización.
- Presentación de las zonas inundadas estimadas para distintos caudales máximos instantáneos.
- Presentación del estado del Sistema de Monitoreo a la fecha de la etapa y una breve descripción del proceso de instalación de las últimas tres estaciones programadas para la Quebrada de Ramón.

1.4.1 Modelo de simulación hidrodinámica

La modelación hidrodinámica de inundación en zonas de topografía compleja, como la Quebrada de Ramón, plantea desafíos no triviales de resolver en modelos numéricos que predicen los valores de profundidad y velocidad del flujo en la zona urbana. Esto se debe principalmente a las altas pendientes y la presencia de sedimentos suspendidos en el flujo, que modifican tanto la morfología del cauce como la reología de la mezcla en su tránsito hacia las áreas urbanizadas. Debido a ello, se utilizó un modelo numérico basado en las ecuaciones no lineales para flujos someros, o ecuaciones de Saint-Venant, las cuales fueron modificadas para considerar

distribuciones heterogéneas de concentración de sedimentos tanto espacial como temporalmente.

Los supuestos principales que son considerados por el modelo numérico son: distribución hidrostática de presiones, velocidades verticales despreciables, velocidades horizontales promediadas en la vertical, densidad del fluido heterogénea en las direcciones horizontales, densidad del fluido uniforme en la vertical y lecho fijo. Las fuentes de cantidad de movimiento consideran el término de gravedad, la resistencia del lecho y la reología de la mezcla.

La clasificación de los flujos conducidos por gravedad con altas concentraciones de sedimentos depende de tres factores; la reología de la mezcla, la distribución de tamaño de las partículas y la composición de los sedimentos. De acuerdo a estas características, los flujos pueden variar desde deslizamientos a flujos de agua clara, con condiciones intermedias tales como flujos de barro. En el modelo aquí implementado se utilizó el *Quadratic Shear Stress Model* para cuantificar la resistencia al flujo; su versión numérica contiene una relación modificada de dicho modelo cuadrático que permite representar mejor los esfuerzos en un amplio rango de concentraciones, expresando claramente las contribuciones de cada mecanismo físico como una combinación de relaciones que han sido derivadas de forma empírica usando datos experimentales.

1.4.1.1 Validación del modelo:

Se presentaron cinco casos de validación del modelo. Los primeros dos buscan verificar el correcto funcionamiento del código en condiciones donde no hay presencia de sedimentos. En estos casos, se representa la convergencia y divergencia del flujo en un rompimiento de presa, y el rompimiento de presa sobre terreno con altas pendientes y fricción del lecho. Los tres siguientes casos son para validar el modelo para flujos con altas concentraciones de sedimento; la primera de estas validaciones busca representar el equilibrio hidrostático en un estanque con fluido de densidad variable; la segunda validación representa el rompimiento de presa controlado por discontinuidades en la densidad del flujo. Finalmente, la tercera validación representa un rompimiento de presa a gran escala desarrollado bajo condiciones extremas de pendiente y concentración de sedimentos. A continuación se resumen los resultados de cada uno de estos ejercicios de validación.

La primera validación para el caso sin sedimentos se trató de un experimento que consiste en un canal de 21,2 m de largo con una sección transversal de ancho variable cuya pendiente puede variar en rango $\pm 1\%$. Cinco metros aguas abajo del inicio del canal existe una curva suave que presenta una contracción y expansión de un ancho mínimo de 0,6 m. Los autores concluyen que el modelo numérico presenta un buen desempeño en la simulación del rompimiento de presa, las profundidades de flujo y los tiempos de arribo del frente mojado se encuentran en muy buena concordancia con los valores experimentales obtenidos por el autor original del experimento.

La segunda validación para el caso sin sedimentos buscó validar el comportamiento del modelo numérico para condiciones de alta pendiente y tomando en cuenta la fricción del fondo. Para esto se simula el flujo producido por un rompimiento de presa en un canal cerrado con tres obstáculos

cónicos. Las simulaciones mostraron una buena concordancia con los resultados originales, lo que representa el buen desempeño del modelo para simular las interacciones entre las celdas secas y mojadas en casos de alta pendiente y fricción.

La tercera validación busca reproducir los resultados de una solución analítica, implementada para demostrar el desempeño del modelo preservando el estado hidrostático de un fluido con densidad variable. Se observa una buena concordancia entre la solución analítica y el modelo numérico, con un error máximo en la altura de agua de 10^{-7} m. Se concluye que el modelo posee un buen desempeño en lo que respecta a mantener las condiciones de flujo permanente.

La cuarta validación tuvo por fin evaluar el desempeño del modelo en condiciones no estacionarias y estudiar la evolución espacial y temporal de las variables hidrodinámicas. La simulación de un rompimiento de presa provocado por diferencias de densidades entre dos fluidos produjo resultados similares a los reportados para el experimento numérico original. Así entonces, la validación permite verificar la adecuada simulación de la propagación de la superficie libre y las magnitudes de las velocidades involucradas.

La quinta y última validación fue la más exigente puesto que buscaba evaluar el funcionamiento del modelo reológico en condiciones supercríticos y de alta concentración de sedimentos. El caso fue extraído de los experimentos de rompimiento de presa con flujos de alta concentración en un canal de pendiente fuerte desarrollados por el United States Geological Survey. Se constató en particular la alta precisión alcanzada en la estimación de los tiempos de arribo del frente de onda.

1.4.2 Caracterización geomorfológica de la cuenca en la zona urbana

Se realizaron simulaciones hidráulicas de la inundación de la zona urbana de la Quebrada de Ramón (Figura 13), poniéndose especial detalle a la zona afectada por el aluvión de 1993 (i.e. la zona delimitada al sur por la Avenida Simón Bolívar, al norte por la Avenida Ricardo Fleming, al oeste por el eje Av. Américo Vespucio — Av. Ossa y al este por las avenidas Valenzuela Llanos y Onofre Jarpa). Para la implementación del modelo hidráulico se caracterizó la topografía del lugar, la rugosidad correspondiente, las concentraciones de sedimento transportado durante las crecidas y el rango posible de caudales a evaluar.

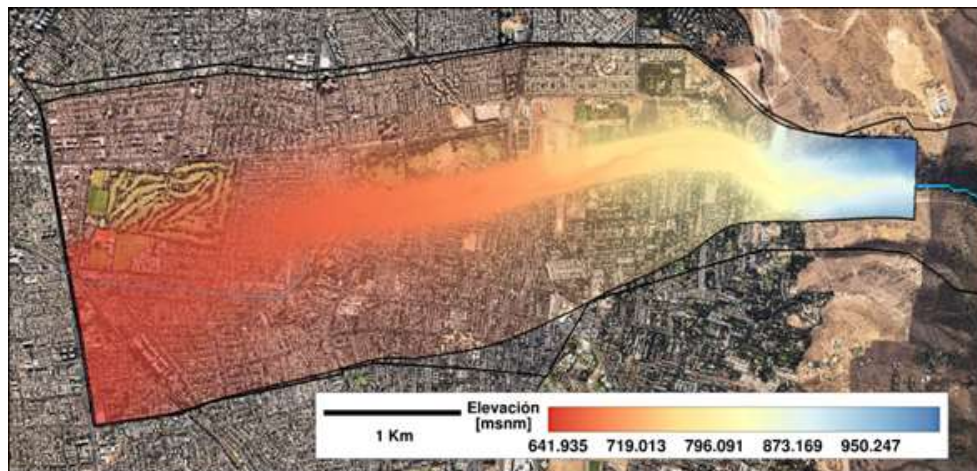


Figura 13: Zona de estudio para la caracterización del área de potencial inundación. En colores azul-amarillo-rojo se presenta la elevación del terreno en el dominio computacional creado. (Elaboración propia)

1.4.2.1 Topografía

Para caracterizar la topografía de la zona se contó con distintos mapas de diversa resolución. Se utilizó el Modelo Digital de Terreno de 2 m de resolución (DTM 2) adquirido a NTT Data, generado partir de imágenes satelitales procesadas para eliminar las elevaciones correspondientes a vegetación y edificaciones. Por otra parte se utilizó un modelo digital de superficie de 0,5 m de resolución (DSM 0,5) que cubre la zona urbana de la Quebrada de Ramón. Este modelo fue adquirido también a NTT Data, aunque no cuenta con un procesamiento para eliminar vegetación y construcciones. Adicionalmente se contó con el levantamiento LIDAR de 1 m de resolución para el cauce y su zona aledaña. Finalmente se contaba con las secciones transversales de 50 cm de resolución medidas cada 30 m en el marco del presente estudio. Estas secciones cubren el tramo comprendido entre Aguas Claras y la desembocadura en el Canal San Carlos.

Toda la información descrita anteriormente se integró en una única base de datos de elevación de terreno. Una vez acopladas todas las fuentes de datos, se creó una malla que cubre toda la zona urbana, cuyas resoluciones fluctúan entre menos de 1 m en las zonas más cercanas al cauce y las zonas potencialmente inundables y 5 a 10 m en los lugares altos menos susceptibles a inundación.

Las simulaciones preliminares con esta malla dieron como resultado alturas de escurrimiento de 2 a 4 m en las calles, producto principalmente del problema de la presencia de vegetación de altura en el sector y al subsecuente angostamiento aparente y artificial de la zona real de escurrimiento. Debido a esto y a sugerencia del mandante, se decidió no utilizar el DSM de 0,5 m de resolución y utilizar el DTM de 2 m en su reemplazo. Los resultados preliminares con esta malla reflejan que no considerar la presencia de casas y edificios no permite determinar correctamente la zona de inundación, subestimando su área y no logrando captar el sentido

esperado del flujo. Por esta razón y a sugerencia del mandante, se decidió modificar la representación topográfica de la cuenca aumentando la elevación de todos los sectores que poseen edificación. Para ello se utilizó la información de Geofabrik, empresa enfocada en la creación de archivos de información geo-referenciada de uso público, cuya principal contribución ha sido la aplicación *OpenStreetMap*. De la información disponible online para la zona de estudio se pudo conocer la ubicación y tipos de calles presentes en el sector. Adicionalmente, por observación de las imágenes satelitales disponibles en Google Earth, se identificaron las principales zonas de vegetación y terrenos no construidos: el Country Club, el Parque Padre Hurtado y el terreno ubicado al norte del Parque Padre Hurtado. Con esta información, se modificó la altura del terreno para identificar las zonas por donde potencialmente debería escurrir una inundación.

1.4.2.2 Topografía con piscinas retenedoras

Actualmente existe en carpeta un proyecto de control fluvial en la Quebrada de Ramón que combina dos tipos de obras: 7 pozos retenedores y 6 mallas dinámicas de retención de sedimentos. Ambos buscan retener los flujos producidos en las zonas alta y media, regulando las crecidas a un caudal máximo instantáneo menor o igual a 20 m³/s. En conjunto todas las piscinas retenedoras permiten almacenar un volumen de aproximadamente 900.000 m³, el que se estima, sería producido por una crecida de 100 años de periodo de retorno.

Aplicando lo que se conocía a la fecha sobre el diseño de las piscinas de retención consideradas por el MOP, se notaron errores en las cotas especificadas en los planos originales. Sin perjuicio de ello, se incorporaron estas obras tal como se encuentran especificadas a la fecha, y nos encontramos a la espera de planos actualizados. Es importante notar que para la modelación hidráulica, todos los flujos asociados a las estructuras del proyecto se asumen como controlados por gravedad.

1.4.2.3 Distribución de tamaño de sedimentos

La rugosidad del lecho se estimó utilizando como datos las calicatas realizadas en la cuenca por diversos estudios previos. Con estos datos se realizó una interpolación por el vecino más cercano a cada punto de la discretización del dominio computacional para determinar el valor del tamaño medio de sedimento en la parte no urbanizada y en todo el canal. Por otra parte, para estimar la rugosidad del terreno en la planicie de inundación y en la zona urbanizada, se utilizaron los valores del coeficiente de Manning existentes en la literatura. Para calcular el coeficiente de Manning a partir del diámetro medio de la distribución de tamaños de sedimento, se utilizó la relación de Strickler.

1.4.2.4 Concentración de sedimentos

La concentración de sedimentos transportado durante una inundación rápida en la cuenca es uno de los parámetros más difíciles de estimar y sobre el que existe una gran incertidumbre. En base a lo reportado para el evento aluvional de 1993, se decidió utilizar una concentración de sedimentos constante e igual a 38%. Este valor es considerado conservador, ya que según los

resultados de un análisis de sensibilidad para esta concentración implementado en el modelo hidráulico, valores superiores a esta concentración no modificarían considerablemente el área inundada ni las profundidades alcanzadas durante el evento.

1.4.2.5 Análisis de frecuencia de caudales

Para determinar los caudales que se emplean en las simulaciones hidrodinámicas, se recopilieron los análisis de frecuencia de caudales realizados en estudios previos y se compararon con los obtenidos de la modelación hidrológica realizada en la Etapa N°3. En términos generales, todas las curvas de probabilidad de excedencia muestran un alto nivel de incertidumbre en la determinación del periodo de retorno de los caudales, como se puede apreciar en la Figura 14. Dado que la modelación hidrológica utilizada en el funcionamiento del sistema de alerta temprana predice los valores de caudal, a sugerencia del mandante se decide no usar el periodo de retorno para simular los distintos escenarios de inundación, sino simplemente usar el caudal. Con tal propósito se subdividió en intervalos iguales el rango posible de caudales, asociándose a cada uno de estos intervalos un valor representativo y su correspondiente mapa de inundación.

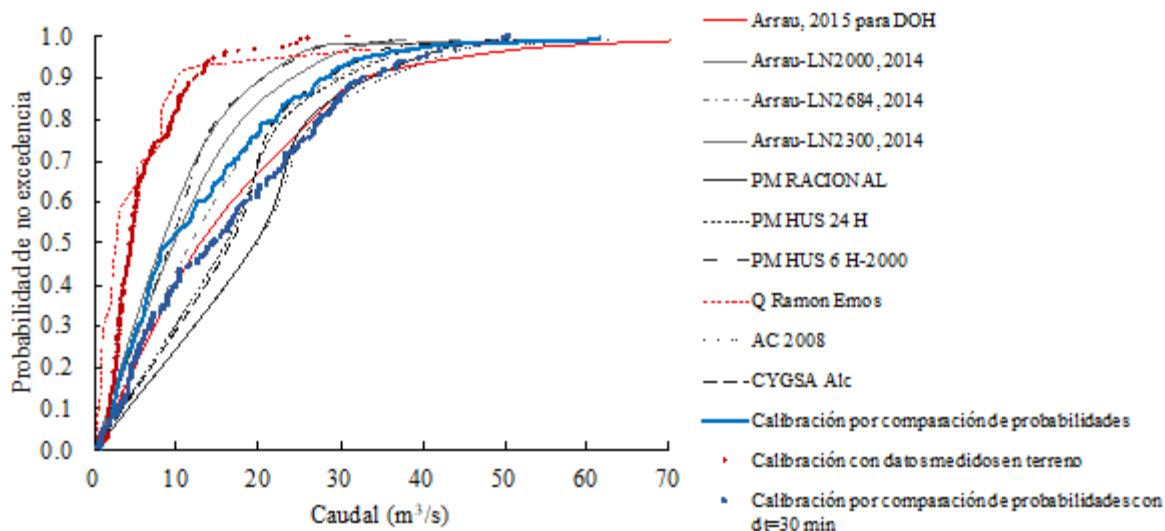


Figura 14: Comparación de curvas de probabilidad de no excedencia diseñadas por diversos estudios anteriores en la Quebrada de Ramón. Se incluyen las curvas obtenidas de la modelación hidrológica implementada en el presente estudio. (Elaboración propia)

1.4.2.6 Implementación numérica de las simulaciones

La implementación de las simulaciones se llevó a cabo considerando toda la información anteriormente descrita. En resumen, se utilizó una malla de 2.728.058 nodos, con una resolución variable entre 40 cm y 2 m en la dirección Este-Oeste de la malla, mientras que en la dirección Norte-Sur la resolución varía entre 50 cm en las cercanías del cauce y 30 m en las zonas con prácticamente nula probabilidad de inundación.

1.4.3 Resultados

Se generaron las zonas de inundación para algunos caudales según se estipuló en la subsección anterior. A modo de resumen, para el caso de un caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, existe una buena representación de la crecida hasta su llegada a el Canal San Carlos, la que por cierto no produce ninguna inundación.

Para una simulación de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua clara, caudal que sobrepasa la capacidad máxima estimada para el cauce de la Quebrada de Ramón ($\sim 20 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua clara), aparecen considerables desbordes del canal, particularmente en las intersecciones del cauce con las distintas calles (Figura 15). El primero de ellos se observa en el Parque Padre Hurtado, lugar donde además se simula la utilización y colapso de pequeñas piscinas de retención existentes en la ribera Norte del cauce. Adicionalmente, se observan desbordes en el recinto de Aguas Andinas y en todas las intersecciones del cauce con las calles entre Príncipe de Gales y el Canal San Carlos.

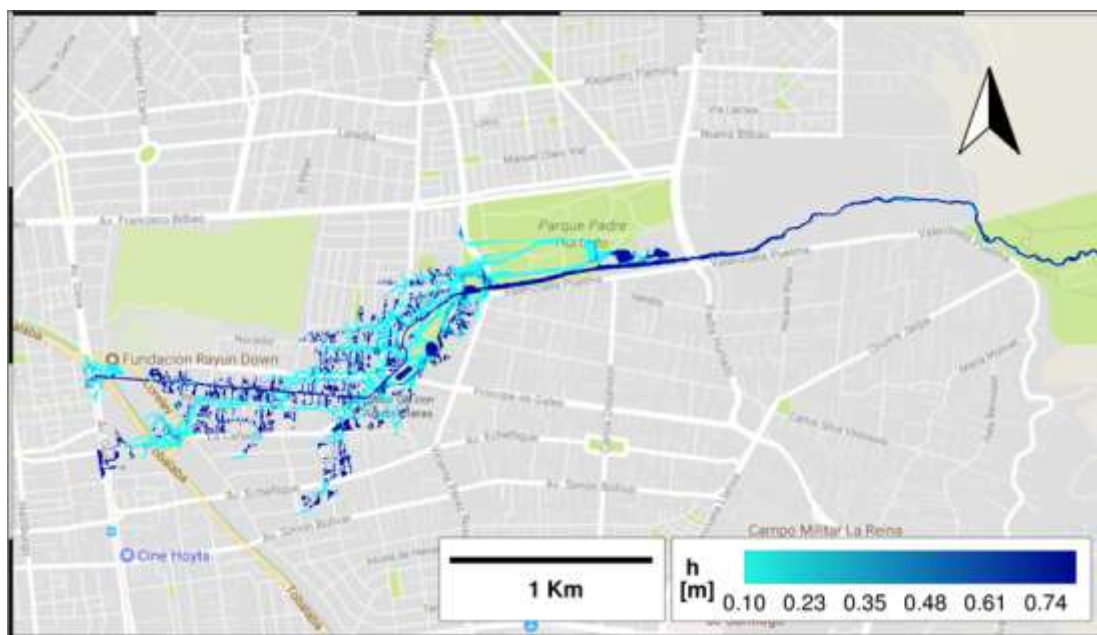


Figura 15: Resultados de la simulación hidrodinámica correspondiente a $40 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua clara. (Elaboración propia)

Para una simulación de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua clara (Figura 16), comparable a las condiciones de caudal estimadas para el evento de 1993, se observa primeramente que las modificaciones realizadas a la malla permiten capturar de mejor manera la zona inundada por dicho evento. Aguas abajo de la intersección del cauce con Príncipe de Gales, se aprecia que el flujo ocupa los mismo lugares inundados en el evento de 1993. El principal desborde ocurre en la intersección del cauce con Florencio Barros, a la salida del Parque Padre Hurtado, produciéndose luego la inundación del sector al sur del cauce.

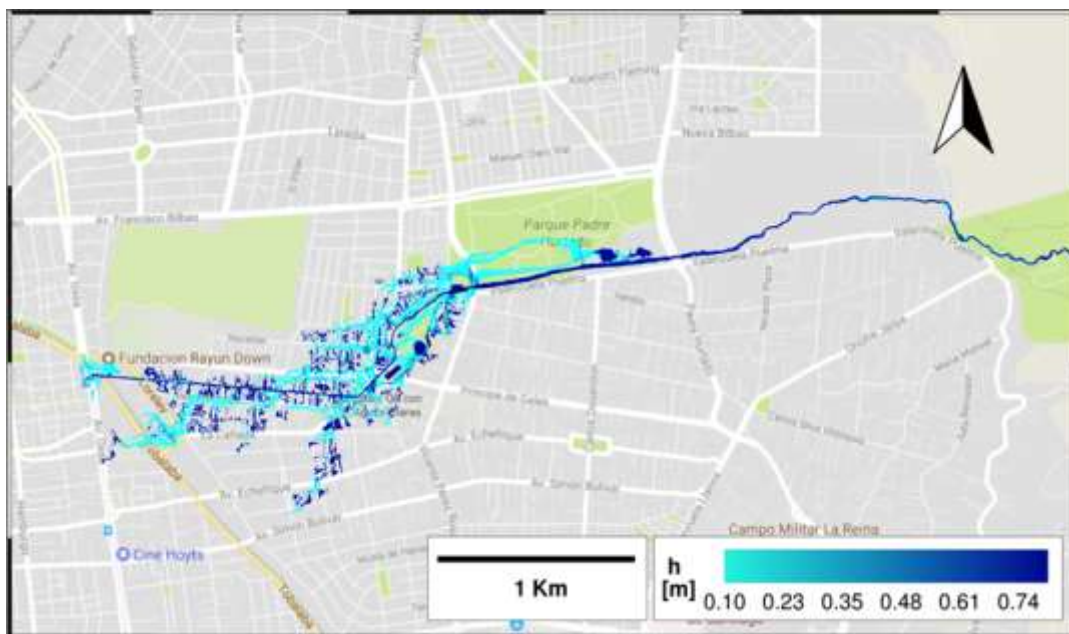


Figura 16: Resultados de la simulación hidrodinámica correspondiente a 50 m³/s de agua clara. (Elaboración propia)

Se realizaron un total de 16 simulaciones con caudales que varían entre 1 m³/s y 75 m³/s de agua clara. Para cada una de las simulaciones se presenta el mapa de inundación respectivo con las alturas de escurrimiento en el área de interés. Por otra parte, para la simulación de las zonas de inundación considerando las piscinas de retención, se quedó a la espera de las modificaciones de los planos comprometidas por Arrau S.A.

1.5 Sistema de Alerta Temprana

La etapa 5 del estudio, desarrollada bajo el capítulo de “Sistema de Alerta Temprana” presenta el sistema de alerta temprana (SAT) desarrollado para la presente consultoría. El capítulo inicia con la descripción de antecedentes de plataformas operativas a nivel internacional y cuáles son los factores importantes a replicar. Luego, describe el funcionamiento de la plataforma en términos de interacción de modelos desarrollados en los capítulos anteriores y generación de eventos de alerta. A continuación, se profundiza en los elementos necesarios para la implementación de la plataforma web del sistema de alerta a través de los dos aspectos centrales de éste: el *back-end* y el *front-end*. El *back-end* corresponde al componente que incorpora a todo aquellos procesos que ocurren de forma automática o semi-automática en un servidor. Por otra parte, el *front-end* corresponde al componente que permite la visualización de los resultados asociados a estos procesos, tales como la presentación de resultados de los modelos y del comportamiento de las variables hidrometeorológicas, así como la visualización y monitoreo del estado de eventos de alerta. Finalmente, se incluye una sección sobre recomendaciones para la operación y mantenimiento de la plataforma y otras sección con las conclusiones del capítulo.

Específicamente, se trataron los siguientes temas:

- Revisión del estado de arte de plataformas de alerta temprana operacionales.
- Identificación de características, restricciones y requerimientos de la plataforma en desarrollo.
- Funcionamiento e interacción entre módulos al interior de la plataforma (“back-end”).
- Visualización de información en la plataforma web (“front-end”).
- Recomendaciones para la operación y mantenimiento del sistema.

A continuación se presenta los aspectos más relevantes de la etapa.

1.5.1 Descripción del SAT desarrollado

Una manera simplificada de comprender cómo funciona la plataforma de alerta temprana, es mediante la división de la misma en 5 grandes módulos dependiendo de su función. Esta división permite explicar desde el punto de vista hidrometeorológico su funcionamiento y mostrar de forma globalizada como módulos interactúan entre sí para lograr un monitoreo en tiempo real del estado presente de la condiciones de la Quebrada y un pronóstico de las condiciones futuras. A continuación, se presenta una breve descripción de cada componente:

- **Sistema de monitoreo:** Red de micro-estaciones instaladas en la Quebrada de Ramón. Miden y reportan variables hidrometeorológicas cada 10 minutos.
- **Modelación meteorológica:** En este componente, a partir de pronósticos meteorológicos a escala global, se realiza un pronóstico diario de variables meteorológicas de temperatura mínima, máxima y precipitación en la cuenca de estudio y sus alrededores. El pronóstico se realiza para los siguientes 7 días y es actualiza cada 6 horas.

- **Modelación hidrológica:** Este componente incluye las herramientas de modelación para el cálculo de caudales en distintos puntos de la Quebrada de Ramón. El sistema considera la utilización de dos modelos, dependiendo de las necesidades a satisfacer.
 - Modelo predictivo de base física, que permite determinar la respuesta de la cuenca frente a una tormenta o una serie de ellas a escala de días.
 - Modelo estadístico que busca pronosticar el caudal en distintos puntos de la cuenca dadas las mediciones en tiempo real de variables meteorológicas y a una escala temporal de 10 minutos.
- **Modelación hidráulica:** Este módulo permite cuantificar la velocidad y profundidad del flujo tanto en el cauce de la Quebrada de Ramón como en las planicies de inundación y zonas urbanas aledañas. Los resultados se entregan en un mapa de inundación en la zona urbana en base a escenarios precalculados. La plataforma está programado para encontrar el mapa con la zona de inundación provocada por el caudal igual o inmediatamente superior al predicho por el módulo de modelación hidrológica o función de transferencia.
- **Módulo de inferencia:** Utilizando la información de los dos tipos de modelación hidrológica, el módulo de inferencia es capaz registrar eventos siempre y cuando el caudal de pronosticado esté dentro del rango de alerta configurado. Además, posee la inteligencia de dar el evento por finalizado cuando se los siguientes N pronósticos se encuentra bajo un rango normal.
- **Visualización:** Los modelos ejecutados de forma interna y periódica obtienen resultados que se muestran en la plataforma web para su interpretación.

1.5.2 Diagrama general del sistema de Alerta

La plataforma de alerta temprana está configurada para trabajar bajo el concepto de **sitios de pronóstico**. En este caso la Quebrada de Ramón agrupa 3 sitios de pronósticos asociados convenientemente a las localidades de las estaciones fluviométricas: Recinto Aguas Andinas, Confluencia y Puente Los Peumos. No obstante, un “sitio de pronóstico” no necesariamente debe coincidir con la localización de una estación fluviométrica.

A continuación se describe cómo ocurre la interacción entre los módulos de la plataforma y adicionalmente se muestra un diagrama en la Figura 4 que sirve de apoyo para la explicación:

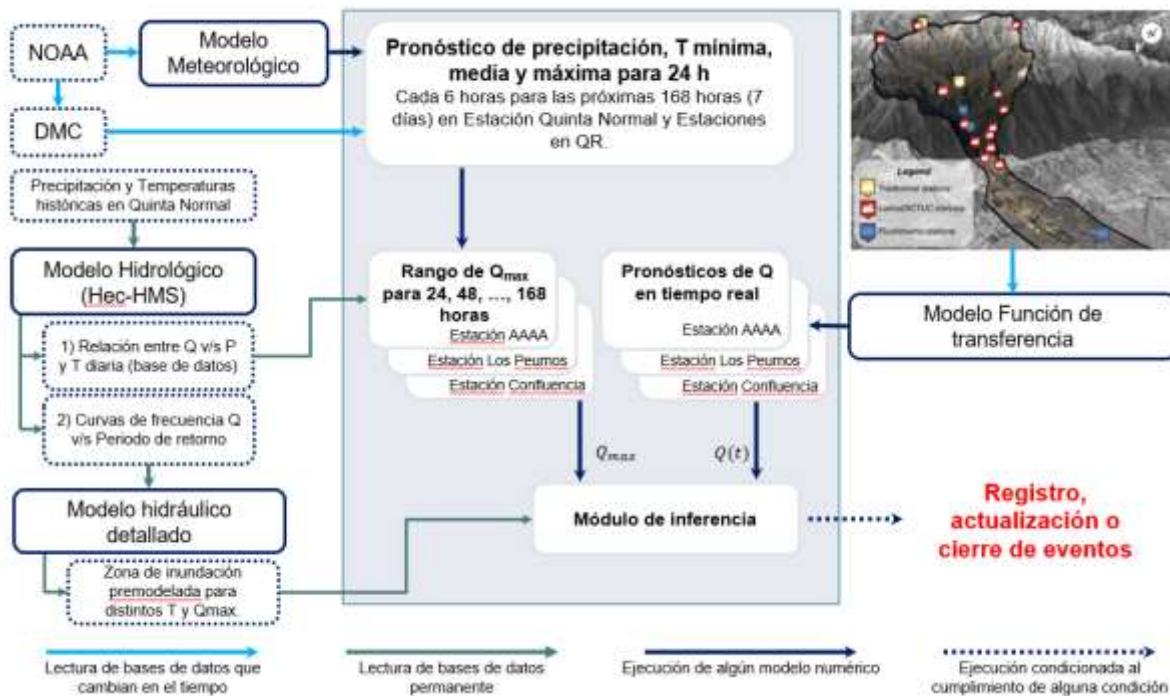


Figura 17: Diagrama de las componentes del sistema de alerta temprana para la Quebrada de Ramón, desarrollado en el proyecto.

1. **Descarga de datos:** El sistema realiza internamente 3 tareas periódicamente:
 - a. Descarga cada 6 horas la base de datos de pronósticos en tiempo real CFSv2RealTime administrada por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* de los Estados Unidos (NOAA).
 - b. Consulta los pronósticos de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), los que se producen a partir de la misma información proveniente de NOAA.
 - c. Se comunica cada 10 minutos con la plataforma de estaciones meteorológicas LatinaDICTUC para obtener los últimos datos reportados por las estaciones en la Quebrada de Ramón.
2. **Modelo Meteorológico:** Una vez que el sistema ha obtenido un nuevo conjunto de datos del NOAA se extraen específicamente las variables precipitación y temperatura para la zona de interés. Una vez que los pronósticos son agregados a escala diaria, se procede a corregirlos dependiendo del mes del año y de la estación meteorológica en este caso Quinta Normal. El proceso genera como resultado una serie de tiempo de carácter diario para un tiempo futuro que va desde 24 h hasta 168 h para valores de precipitación, temperatura mínima y máxima. Los resultados de este módulo se utilizan como datos de entrada para la siguiente parte del sistema.
3. **Modelo predictivo de base física:** Mediante ejecuciones sucesivas del modelo Hec-HMS se creó una base de datos que tiene rangos de valores esperados para el caudal máximo (Q_{max}) esperable frente a distintos escenarios de precipitación y temperatura

mínima diaria. Utilizando los datos desde el módulo de pronóstico meteorológico, se realiza un pronóstico del rango de caudales en los tres sitios de pronóstico (i.e. sector Aguas Andinas, Los Peumos y Confluencia). La salida de esta función va dirigida al módulo de inferencia encargado de identificar eventos de alerta.

4. **Función de transferencia:** Paralelamente a las ejecuciones anteriores, la plataforma realiza pronósticos para las 3 estaciones fluviométricas para la próxima hora, a intervalos de 10 minutos, utilizando un modelo de función de transferencia y los datos en tiempo real de las estaciones de la Quebrada..
5. **Módulo de inferencia:** Utilizando los pronósticos de caudal del modelo de base física se creará un evento de alerta para todos aquellos pronóstico diarios de Q_{max} cuyo caudal sea mayor a un determinado umbral (configurable). Por otro lado, el módulo de inferencia recibe además los pronósticos de caudal de la función de transferencia asociada a cada estación fluviométrica. Éstos permiten crear nuevos eventos de alerta o reforzar la credibilidad de los existentes, pero no permiten descartar eventos existentes. En la siguiente sección se explica en detalle este punto.
6. **Modelo hidráulico:** Una vez que existe un evento de alerta, el sistema busca en su base de datos pre-calculada los mapas de inundación obtenidos con el modelo hidrodinámico 2D de alta resolución. Empleando las áreas de inundación generadas por distintos caudales, este módulo selecciona el mapa correspondiente al caudal que es igual o inmediatamente superior al caudal pronosticado por el modelo de base física para ese evento en particular, Q_{max} .

1.5.3 Funcionamiento a nivel de servidor (“back-end”)

Dentro del sistema de alerta temprana, *back-end* contiene la ejecución de programas que permiten descargar y procesar información de terceras fuentes, por ejemplo, datos de la Dirección Meteorológica de Chile, NOAA y LatinaDICTUC. Además, incluye la ejecución y guardado de la información de modelos de pronóstico meteorológicos, modelo de función de transferencia y modelo hidrológico.

Desde el punto de vista técnico el sistema de alerta funciona mediante en la ejecución periódica de funciones, modelos y programas generados a partir de los desarrollos descritos en los capítulos anteriores. La Tabla 6 muestra un resumen de la configuración e interacción entre los distintos sub-programas que contiene la plataforma. Todo esos módulos son programados para ejecutarse bajo 10 minutos o 6 horas y, además, comparten dos características: Primero poseen una bitácora de errores (en computación usualmente se utiliza la palabra *log*), con la que se pueden identificar y solucionar de forma más rápida errores técnicos. Por ejemplo, si los archivos de pronósticos de NOAA no se encuentran disponibles por cualquier motivo, el sistema es capaz de informar el usuario que el modelo meteorológico no se va ejecutar correctamente. Segundo, todos los módulos deben ser capaces de soportar un “modo simulación”, bajo el cual sea posible fijar la fecha actual y entrar en un modo de experimentación. El modo simulación requiere la instalación de la plataforma en un servidor diferente por temas de seguridad y operación de la plataforma oficial.

Tabla 6: Resumen aspectos técnicos de cada componente del sistema de alerta temprana.

N°	Programa	Descripción	Entrada	Salida	Frecuencia de ejecución
1	Descarga NOAA	Descarga pronósticos CFSv2RealTime a las 00, 06, 12 y 18 horas.	Fecha y hora actual o anterior	Archivos GRIB	6 horas
2	Meteorológico	Pronóstico de precipitación y temperatura para los 6 días siguientes.	Archivos GRIB con pronósticos de Precipitación y Temperatura máxima y mínima.	Archivos .csv con pronósticos de P , $T_{\min}$ y $T_{\max}$ de 24-168 horas en Estaciones Quinta Normal y QR	Después de (1)
3	Hidrológico	Base de datos de escenarios de PP y T	Precipitación y temperatura para las próximas 24 horas desde el modelo Meteorológico, y registros diarios de 7 días previos obtenidos en la estación Quinta Normal.	Rango de valores para caudal máximo en los 3 puntos de aforo en la cuenca, así como periodo de retorno asociado a la crecida	Después de (2)
4	Datos estaciones, DMC y DGA	Obtiene y actualiza datos desde la API Latina, de la Dirección Meteorológica de Chile y de estaciones de la Dirección General de Aguas.	Fecha y hora actual o anterior	Series de tiempo de variables hidrometeorológicas	10 minutos

5	Hidrológico: Función de Transferencia	Produce pronósticos cada 10 minutos del caudal que se espera durante la próxima hora	Últimas 9 horas y media de registro de variables hidrometeorológicas de la cuenca.	Hidrograma de 1 hora de pronóstico, en 3 puntos de control de la cuenca	Después de (4)
6	Motor de Inferencia	Verifica si las condiciones en curso significan un aviso o riesgo de inundación y registra esto en una base de datos. También determina si la situación ya se resolvió o sigue siendo riesgosa.	Pronósticos de caules	Registro y modificación en la base de datos de eventos.	Después de (3) o (5)
7	Hidráulico: Escenarios precalculados	Base de datos con mapas de áreas de inundación del cauce.	Rango de caudal y periodo de retorno de crecida.	Archivo KML	Después de (6) bajo Evento activo

La obtención de datos en el sistema de alerta temprana es una componente esencial. Sin embargo, no todas los recursos a los cuales se necesita consultar ofrecen la herramientas para facilitar su descarga:

1. **NOAA:** Cada 6 horas el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos sube un archivo nuevo cuyo tamaño es alrededor de 60 MB con pronósticos globales obtenidos del CFS (Climate Forecast System).
2. **DMC:** El modelo hidrológico de base física requiere los datos diarios de temperatura mínima, precipitación actual y la precipitación acumulada considerando 3 y 7 días anteriores. Para descargar de forma automática los datos desde la DMC es necesario utilizar una técnica llamada Web Scraping para transformar la información disponible en tablas a un formato de texto utilizable por Matlab.
3. **DGA:** Con el objetivo de tener información de respaldo se decidió realizar una integración con las estaciones de la DGA. Para obtener los datos de las estaciones de la DGA es necesario simular el uso de un navegador web ya que la página correspondiente de la DGA abre una sesión y la exige en las páginas que muestran datos para poder acceder a ellas.

4. **LatinaDICTUC:** Provee acceso a los datos reportados por las estaciones instaladas en la Quebrada de Ramón mediante una interfaz de programación de aplicaciones (API, en sus siglas en inglés) para que éstos puedan ser consultados en forma autónoma por programas de software como el sistema de alerta temprana. Una API funciona mediante una dirección web y una contraseña o llave que permite el acceso a la información deseada

1.5.4 Interfaz de usuario web (“front-end”)

La plataforma web está compuesta por 4 secciones principales: estaciones, eventos, zonas (sitios de pronóstico) y página de inicio. A continuación se presenta una muestra de cada una de ella.

- Estado actual de variables hidro-meteorológicas: Una de las secciones de la plataforma corresponde a la visualización de las variables hidrometeorológicas medidas por las estaciones instaladas o por servicios de terceros (DMC o DGA).
- Página principal: Muestra los últimos eventos y pronósticos ingresados junto con la información del último evento en curso.
- Seguimiento de eventos: una vez que el sistema ha detectado algún evento, basado en los rangos configurables de alerta de caudal, se registra en la sección de Eventos. Al entrar en la visualización de un evento en particular, este puede estar en dos estados: alerta o finalizado.
- Registro de advertencias pasadas: La sección “Eventos” muestra un registro de los eventos pronosticados y tiene por objetivo ser el historial de la plataforma para poder analizar con posterioridad cuales fueron las condiciones que generaron una alerta

La Figura 18 muestra la página principal del sistema de alerta. En ella existen tres secciones importantes: 1) En el lado izquierdo existe un mensaje grande que indica si existen eventos activos y en qué rango de alerta se encuentra según el color. Además, en la parte inferior muestra el mapa de inundación junto con información del evento mismo como: fecha de inicio de registro, caudal máximo y caudal medio. 2) En el centro se muestra una vista rápida la registros de eventos activos por zona 3) Al lado derecho se muestran los últimos pronósticos realizados por el modelo hidrológico de base física.

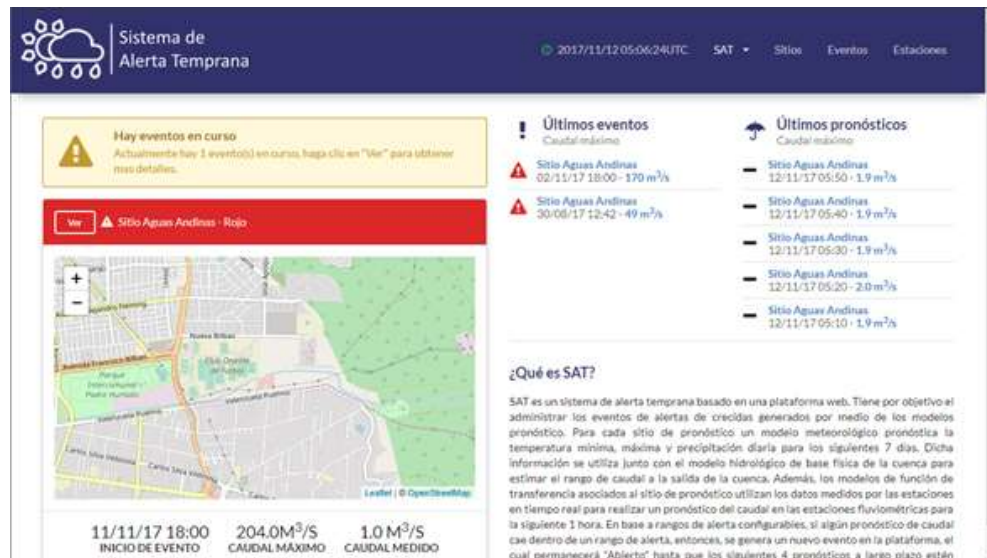


Figura 18: Pantalla de inicio de la plataforma web.

Una vez que el sistema ha detectado algún evento, basado en los rangos configurables de alerta de caudal, se registra en la sección de Eventos. Al entrar en la visualización de un evento en particular, este puede estar en dos estados: alerta o finalizado. En caso de estar activo el evento muestra los resultados de los modelos (hidráulico y función de transferencia) para el sitio de pronóstico, junto con el mapa de inundación esperado. Además, está la posibilidad de acceder a la página de sitio de pronóstico para observar los resultados de los modelos del sitio sin depender si un evento está activo o no (ver

Figura 19 y Figura 20).

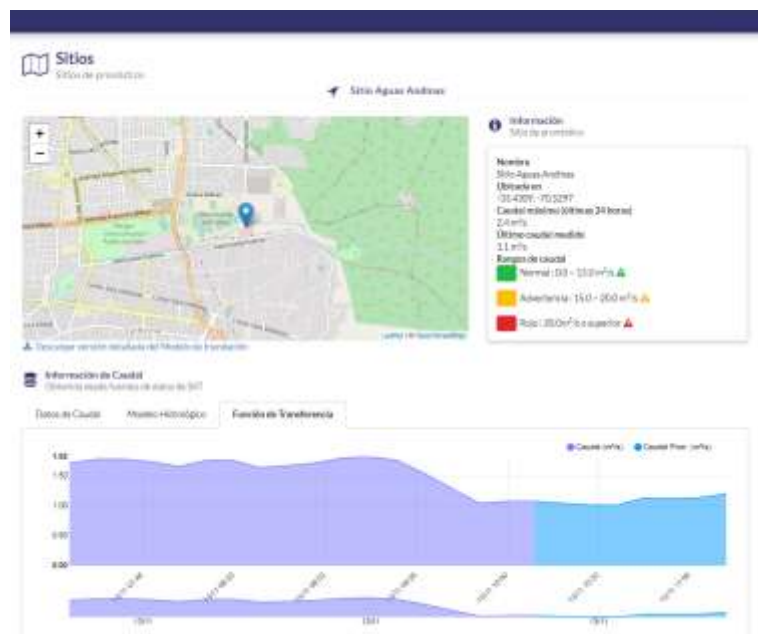


Figura 19: Visualización de un sitio de pronóstico en la plataforma web

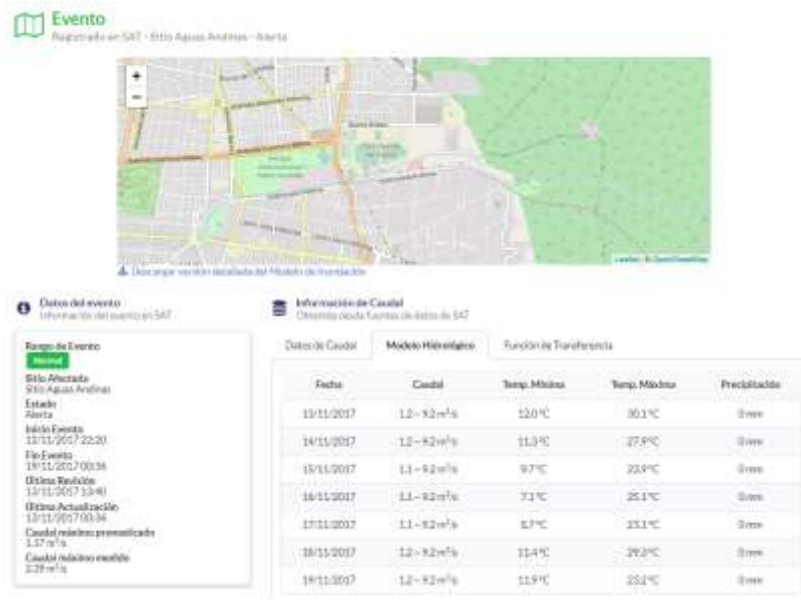


Figura 20: Visualización de un evento en la plataforma web

1.5.5 Conclusiones

En este capítulo se resume los aspectos técnicos implementados y en desarrollo del sistema de alerta temprana, como los modelos implementados y su interacción al interior del servidor, los requisitos computacionales y la visualización web. Además, se describen las recomendaciones para su operación y mantención, y un resumen metodológico para la implementación en otras cuencas.

Bajo la separación de la plataforma en sus componentes *back-end* y *front-end* se explicaron los requerimientos y límites de cada parte. Por un lado, el *back-end* contiene todas ejecuciones automáticas y periódicas como: ejecución de modelos bajo rutinas de MATLAB y conexión a servicios de datos como lo son NOAA, DMC, DGA y LatinaDCITUC. Por otro lado, el *front-end* entendido como la visualización del contenido del *back-end* está dividido en 4 secciones: página de inicio con las últimas actualizaciones de eventos, registro de eventos, visualización detallada de los pronósticos durante un eventos y ficha informativa sobre las estaciones hidrometeorológicas y fluviométricas.

Además, se presentaron dos conceptos importantes para entender la plataforma: El primero es el “sitio de pronóstico” (zona en la plataforma web), entendido como aquél punto de encuentro de todos los pronósticos para cualquier modelo que puede o no estar asociado a una estación fluviométrica existente. El segundo concepto importante es el registro de Eventos. Cada vez que un sitio de pronóstico recibe la ocurrencia futura de un caudal sobre el rango de seguridad, la plataforma inserta un nuevo registro de evento el que irá actualizando hasta que el caudal vuelva a un estado seguro y de por finalizado el evento.

2 Bibliografía

- Catalán, M. (2013). *Acondicionamiento de un modelo hidrológico geomorfológico urbano de onda cinemática para su aplicación en cuencas naturales*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil con Diploma en Ingeniería Hidráulica. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Lara M. (2007). *Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana*. Tesis para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile.
- Naranjo J. y Varela J (1996). *Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de Mayo de 1993*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No.47, 42p.

3 Anexo

3.5 Funciones de Transferencia

3.5.1 Funciones de transferencia – Confluencia

$$Q_t^{[Conf]} = 0.004079573 + 0.002529822 P_{t-4}^{[Ref]} + 0.002794803 P_{t-14}^{[Ref]} + 0.000221226 AT_{t-2}^{[QR04]} + 1.103500313 Q_{t-1}^{[Conf]} - 0.279665279 Q_{t-2}^{[Conf]} + 0.068294014 Q_{t-3}^{[Conf]} + 0.083698778 Q_{t-5}^{[Conf]} - 0.049807933 Q_{t-6}^{[Conf]} + 0.004976958 P_{t-13}^{[Maquis]} + 0.001976272 P_{t-16}^{[Maquis]} + 2.4 \cdot 10^5 H_{t-35}^{[Prov]} + 0.006604491 P_{t-7}^{[Prov]} + 0.0102344 P_{t-3}^{[R.Apoq]} - 0.008377517 P_{t-4}^{[R.Apoq]} + 0.003522007 P_{t-17}^{[R.Apoq]} - 0.004014804 P_{t-18}^{[R.Apoq]} + 0.002920359 P_{t-37}^{[R.Apoq]} \quad (14)$$

$$Q_{t+1}^{[Conf]} = 0.015545342 + 0.000207738 AT_{t-24}^{[Ref]} + 0.00514092 P_{t-4}^{[Ref]} + 0.000418136 AT_{t-1}^{[QR04]} + 0.936444055 Q_{t-1}^{[Conf]} - 0.236339758 Q_{t-2}^{[Conf]} + 0.133584667 Q_{t-3}^{[Conf]} + 0.031708088 Q_{t-5}^{[Conf]} + 0.003718455 P_{t-12}^{[Maq]} + 0.00578623 P_{t-13}^{[Maq]} - 0.003770023 P_{t-16}^{[Maq]} + 0.010225921 P_{t-6}^{[Prov]} + 0.01709563 P_{t-2}^{[R.Apoq]} - 0.01261925 P_{t-4}^{[R.Apoq]} + 0.005340896 P_{t-13}^{[R.Apoq]} \quad (15)$$

$$Q_{t+2}^{[Conf]} = 0.028121908 + 0.007499233 P_{t-3}^{[Ref]} - 0.004553879 P_{t-6}^{[Ref]} + 0.006850191 P_{t-13}^{[Ref]} + 0.00071219 AT_{t-1}^{[QR04]} + 0.001790698 AT_{t-22}^{[Acum]} - 0.001069982 AT_{t-26}^{[Acum]} - 0.000770162 TS_{t-22}^{[RepC]} + 0.793963188 Q_{t-1}^{[Conf]} - 0.202463007 Q_{t-2}^{[Conf]} + 0.190681393 Q_{t-3}^{[Conf]} + 0.005702011 P_{t-11}^{[Maq]} + 0.004034307 P_{t-12}^{[Maq]} + 0.005020128 P_{t-13}^{[Maq]} - 0.005305817 P_{t-15}^{[Maq]} + 0.014968264 P_{t-5}^{[Prov]} + 0.018275482 P_{t-1}^{[R.Apoq]} - 0.007801725 P_{t-3}^{[R.Apoq]} + 0.005186 P_{t-14}^{[R.Apoq]} \quad (16)$$

$$Q_{t+3}^{[Conf]} = 0.025179164 - 0.001534384 AT_{t-25}^{[Ref]} + 0.010523917 P_{t-1}^{[Ref]} - 0.00498707 P_{t-5}^{[Ref]} + 0.005405076 P_{t-12}^{[Ref]} + 0.000931218 AT_{t-1}^{[QR04]} + 0.00261184 AT_{t-21}^{[Acum]} - 0.076313619 HS_{t-1}^{[RepC]} + 0.108754853 HS_{t-4}^{[RepC]} - 0.000681482 TS_{t-21}^{[RepC]} + 0.618477353 Q_{t-1}^{[Conf]} + 0.097616556 Q_{t-3}^{[Conf]} + 0.002747027 P_{t-10}^{[Maq]} + 0.01036279 P_{t-11}^{[Maq]} + 0.004558993 P_{t-13}^{[Maq]} - 0.004370417 P_{t-14}^{[Maq]} + 0.015556036 P_{t-4}^{[Prov]} + 0.011449317 P_{t-1}^{[R.Apoq]} + 0.007278683 P_{t-13}^{[R.Apoq]} \quad (17)$$

$$Q_{t+4}^{[Conf]} = 0.021297178 - 0.00242388 AT_{t-21}^{[Ref]} + 0.013167529 P_{t-1}^{[Ref]} + 0.004952952 P_{t-12}^{[Ref]} + 0.001178479 AT_{t-1}^{[QR04]} + 0.0035966 AT_{t-20}^{[Acum]} + 0.001870963 AT_{t-21}^{[RepC]} + 0.042330907 HS_{t-3}^{[RepC]} + 0.644801611 Q_{t-1}^{[Conf]} - 0.002248542 AT_{t-23}^{[Viz]} + 0.009632815 P_{t-10}^{[Maq]} + 0.005634013 P_{t-11}^{[Maq]} + 0.015340195 P_{t-3}^{[Prov]} - 0.0060263 P_{t-10}^{[R.Apoq]} + 0.006917408 P_{t-12}^{[R.Apoq]} + 0.006553596 P_{t-13}^{[R.Apoq]} \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
 Q_{t+5}^{[Conf]} = & 0.028841582 - 0.002246663 AT_{t-20}^{[Ref]} - 0.001353332 AT_{t-23}^{[Ref]} + 0.011933474 P_{t-1}^{[Ref]} \\
 & + 0.001332071 AT_{t-1}^{[QR04]} + 0.004574892 AT_{t-19}^{[Acum]} + 0.002115888 AT_{t-20}^{[RepC]} \\
 & + 0.057168602 HS_{t-2}^{[RepC]} + 0.599673453 Q_{t-1}^{[Conf]} - 0.002222725 AT_{t-22}^{[Viz]} \\
 & - 0.002164338 AT_{t-19}^{[Tamb]} + 0.002322771 AT_{t-21}^{[Maq]} + 0.009541694 P_{t-9}^{[Maq]} \\
 & + 0.004060707 P_{t-10}^{[Maq]} + 0.003747478 P_{t-11}^{[Maq]} + 0.01618598 P_{t-2}^{[Prov]} \\
 & + 0.011117006 P_{t-12}^{[R.Apoq]} \quad (19)
 \end{aligned}$$

Donde:

- $Q_{t+i}^{[Conf]}$ es el pronóstico de Caudal en Confluencia en m³/s, en el tiempo i intervalos más hacia el futuro.
- $Q_{t+x}^{[Conf]}$ es el Caudal en Confluencia en m³/s, con un retardo de x intervalos.
- $AT_{t-x}^{[Ref]}$ es la Temperatura del Aire en el nodo Reforestación en °C, con un retardo de x intervalos.
- $AT_{t-x}^{[QR04]}$ es la Temperatura del Aire en el nodo QR 04 en °C, con un retardo de x intervalos.
- $AT_{t-x}^{[Acum]}$ es la Temperatura del Aire en el nodo Acumulador QR en °C, con un retardo de x intervalos.
- $AT_{t-x}^{[RepC]}$ es la Temperatura del Aire en el nodo Repetidor Confluencia en °C, con un retardo de x intervalos.
- $AT_{t-x}^{[Tamb]}$ es la Temperatura del Aire en el nodo Tambor Bajo en °C, con un retardo de x intervalos.
- $AT_{t-x}^{[Maq]}$ es la Temperatura del Aire en el nodo Los Maquis en °C, con un retardo de x intervalos.
- $AT_{t-x}^{[Viz]}$ es la Temperatura del Aire en el nodo Vizcachas en °C, con un retardo de x intervalos.
- $HS_{t-x}^{[RepC]}$ es la Humedad del suelo en el nodo Repetidor Confluencia en %, con un retardo de x intervalos.
- $H_{t-x}^{[Prov]}$ es la Altura de nieve en el nodo Provincia Bajo en cm, con un retardo de x intervalos.
- $P_{t-x}^{[Ref]}$ es la Precipitación en el nodo Reforestación en mm, con un retardo de x intervalos.
- $P_{t-x}^{[Maq]}$ es la Precipitación en el nodo Los Maquis en mm, con un retardo de x intervalos.
- $P_{t-x}^{[Prov]}$ es la Precipitación en el nodo Provincia Bajo en mm, con un retardo de x intervalos.
- $P_{t-x}^{[R.Apoq]}$ es la Precipitación en el nodo Repetidor Apoquindo en mm, con un retardo de x intervalos.

La Figura 21 y Figura 22 ilustran gráficamente el grado de ajuste del modelo al comparar el pronóstico en tiempo real con lo observado durante los eventos analizados. Hay una similitud bastante buena, destacando la buena estimación del caudal máximo y una aceptable

representación de los tiempos de respuesta. En orden, los coeficientes de correlación de las funciones de transferencia para este sitio se ven en la Tabla 7.

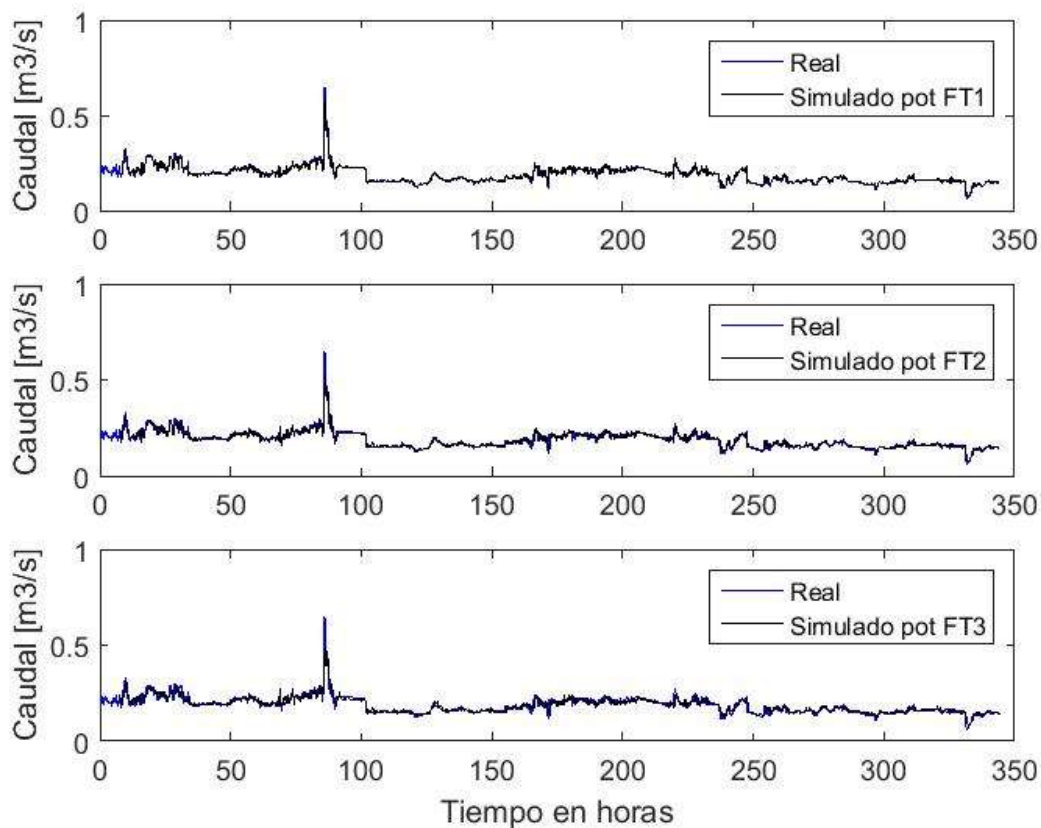


Figura 21: Funciones de Transferencia para el caudal en el nodo Confluencia.

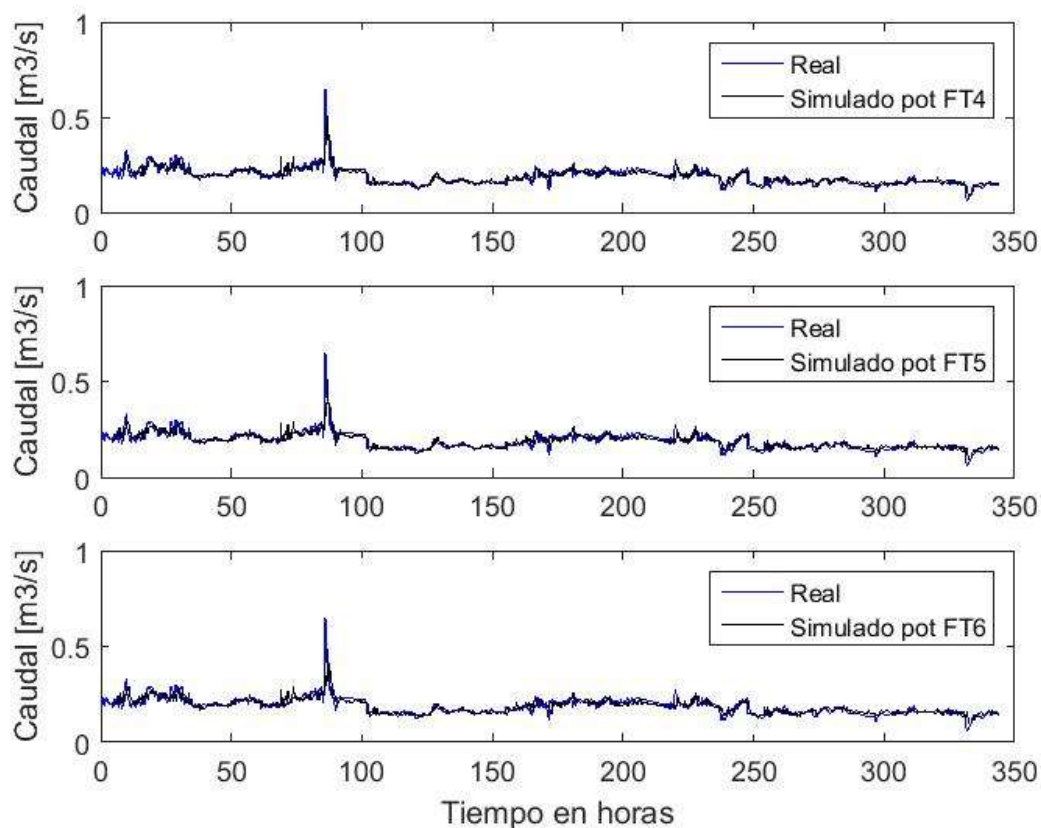


Figura 22: Funciones de Transferencia para el caudal en el nodo Confluencia.

Tabla 7: Coeficientes de Correlación de las funciones de transferencia – Confluencia.

Función de Transferencia	Tiempo de Pronóstico (minutos hacia adelante)	Coeficiente de Correlación
FT1	10	0.942
FT2	20	0.870
FT3	30	0.822
FT4	40	0.778
FT5	50	0.745
FT6	60	0.718

3.5.2 Funciones de transferencia – Puente Los Peumos

$$\begin{aligned}
 Q_t^{[Peum]} = & -0.116674945 + 0.010265471 P_{t-43}^{[Ref]} + 0.079766015 HS_{t-7}^{[Ref]} \\
 & - 0.149234085 HS_{t-7}^{[QR07]} + 0.111775572 HS_{t-1}^{[QR08]} - 0.152908417 Q_{t-4}^{[Conf]} \\
 & + 1.123044646 Q_{t-28}^{[Conf]} - 0.826858701 Q_{t-29}^{[Conf]} + 0.729820905 Q_{t-30}^{[Conf]} \\
 & - 0.833255447 Q_{t-31}^{[Conf]} + 0.644894415 Q_{t-1}^{[Peum]} + 0.174072332 Q_{t-2}^{[Peum]} \\
 & + 0.046800552 Q_{t-6}^{[Peum]} + 0.001791146 H_{t-24}^{[Prov]} - 0.001348456 H_{t-26}^{[Prov]} \\
 & - 0.015913869 P_{t-5}^{[R.Apoq]} + 0.012263216 P_{t-11}^{[R.Apoq]} - 0.018108433 P_{t-18}^{[R.Apoq]} \\
 & + 0.124757296 P_{t-19}^{[R.Apoq]} - 0.093773473 P_{t-20}^{[R.Apoq]} \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{t+1}^{[Peum]} = & -0.187728249 + 0.020285105 P_{t-43}^{[Ref]} + 0.126357333 HS_{t-6}^{[Ref]} \\
 & - 0.222068748 HS_{t-6}^{[QR05]} + 0.143638398 HS_{t-1}^{[QR08]} + 0.247586335 Q_{t-2}^{[Conf]} \\
 & - 0.494585483 Q_{t-3}^{[Conf]} + 1.227258108 Q_{t-27}^{[Conf]} - 0.791645898 Q_{t-30}^{[Conf]} \\
 & + 0.530910908 Q_{t-1}^{[Conf]} + 0.182880883 Q_{t-2}^{[Peum]} + 0.052831247 Q_{t-6}^{[Peum]} \\
 & + 0.001209753 H_{t-23}^{[Prov]} + 0.002700249 H_{t-24}^{[Prov]} - 0.003282133 H_{t-25}^{[Prov]} \\
 & - 0.021475279 P_{t-4}^{[Prov]} - 0.019319737 P_{t-6}^{[Prov]} + 0.016342683 P_{t-9}^{[Prov]} \\
 & + 0.016619896 P_{t-10}^{[R.Apoq]} - 0.025945843 P_{t-17}^{[R.Apoq]} + 0.108478537 P_{t-18}^{[R.Apoq]} \\
 & - 0.042729206 P_{t-19}^{[R.Apoq]} \quad (21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{t+2}^{[Peum]} = & -0.285545599 - 0.003136236 AT_{t-55}^{[Ref]} + 0.019404954 P_{t-42}^{[Ref]} + 0.197817153 HS_{t-5}^{[Ref]} \\
 & - 0.40162344 HS_{t-5}^{[QR07]} + 0.291188662 HS_{t-1}^{[QR08]} + 0.000389643 HA_{t-1}^{[Acum]} \\
 & - 0.001389475 HA_{t-54}^{[Acum]} + 0.0011808 HA_{t-56}^{[Acum]} - 0.342769756 Q_{t-3}^{[Conf]} \\
 & + 1.035418237 Q_{t-26}^{[Conf]} + 0.780395778 Q_{t-28}^{[Conf]} - 1.248891106 Q_{t-29}^{[Conf]} \\
 & + 0.467675012 Q_{t-1}^{[Peum]} + 0.153445826 Q_{t-2}^{[Peum]} + 0.044103312 Q_{t-5}^{[Peum]} \\
 & + 0.015460538 HA_{t-41}^{[Maq]} + 0.005465269 H_{t-23}^{[Prov]} - 0.004455854 H_{t-24}^{[Prov]} \\
 & - 0.024325654 P_{t-4}^{[R.Apoq]} - 0.02448726 P_{t-5}^{[R.Apoq]} + 0.031153416 P_{t-9}^{[R.Apoq]} \\
 & - 0.024136933 P_{t-16}^{[R.Apoq]} + 0.10522267 P_{t-17}^{[R.Apoq]} - 0.038853854 P_{t-18}^{[R.Apoq]} \quad (22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{t+3}^{[Peum]} = & -0.380046163 + 0.024517909 P_{t-41}^{[Ref]} + 0.276388008 HS_{t-4}^{[Ref]} \\
 & - 0.194574103 HS_{t-4}^{[QR05]} - 0.320479037 HS_{t-4}^{[QR07]} + 0.284901563 HS_{t-1}^{[QR08]} \\
 & - 0.164383106 Q_{t-1}^{[Conf]} - 0.266798764 Q_{t-4}^{[Conf]} + 0.940075774 Q_{t-25}^{[Conf]} \\
 & + 1.039912862 Q_{t-27}^{[Conf]} - 1.2578516 Q_{t-28}^{[Conf]} + 0.424786487 Q_{t-1}^{[Peum]} \\
 & + 0.101122331 Q_{t-2}^{[Peum]} + 0.050944747 Q_{t-4}^{[Peum]} + 0.017806567 HA_{t-41}^{[Maq]} \\
 & + 0.003031088 H_{t-21}^{[Prov]} - 0.001795279 H_{t-23}^{[Prov]} + 0.193852161 HS_{t-28}^{[Prov]} \\
 & - 0.019537869 P_{t-2}^{[R.Apoq]} - 0.037942255 P_{t-4}^{[R.Apoq]} + 0.038803297 P_{t-8}^{[R.Apoq]} \\
 & - 0.018480645 P_{t-15}^{[R.Apoq]} + 0.101063121 P_{t-16}^{[R.Apoq]} - 0.037145514 P_{t-17}^{[R.Apoq]} \quad (23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{t+4}^{[Peum]} = & -0.484694319 + 0.025655628 P_{t-40}^{[Ref]} + 0.338900133 HS_{t-3}^{[Ref]} \\
 & - 0.224093187 HS_{t-3}^{[QR05]} - 0.429389344 HS_{t-3}^{[QR07]} + 0.366937766 HS_{t-1}^{[QR08]} \\
 & + 0.000320016 HA_{t-1}^{[Acum]} - 0.459724572 Q_{t-3}^{[Conf]} + 0.846596555 Q_{t-24}^{[Conf]} \\
 & + 0.91743088 Q_{t-26}^{[Conf]} - 0.934986748 Q_{t-27}^{[Conf]} + 0.361321048 Q_{t-1}^{[Peum]} \\
 & + 0.128880422 Q_{t-2}^{[Peum]} + 0.009586524 HA_{t-40}^{[Maq]} + 0.012105664 HA_{t-41}^{[Maq]} \\
 & + 0.003204819 H_{t-20}^{[Prov]} - 0.001713019 H_{t-22}^{[Prov]} + 0.206348314 HS_{t-27}^{[Prov]} \\
 & - 0.039803411 P_{t-1}^{[R.Apoq]} - 0.031970387 P_{t-3}^{[R.Apoq]} + 0.025695609 P_{t-7}^{[R.Apoq]} \\
 & + 0.018889668 P_{t-8}^{[R.Apoq]} - 0.019040848 P_{t-14}^{[R.Apoq]} + 0.104561912 P_{t-15}^{[R.Apoq]} \\
 & - 0.038462567 P_{t-16}^{[R.Apoq]} (24)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{t+5}^{[Peum]} = & -0.551212946 + 0.026580638 P_{t-39}^{[Ref]} + 0.394349756 HS_{t-2}^{[Ref]} \\
 & - 0.25726677 HS_{t-2}^{[QR05]} - 0.523294778 HS_{t-2}^{[QR07]} + 0.424868184 HS_{t-1}^{[QR08]} \\
 & + 0.000347656 HA_{t-1}^{[Acum]} - 0.483703492 Q_{t-2}^{[Conf]} + 0.840517111 Q_{t-23}^{[Conf]} \\
 & + 0.912678463 Q_{t-25}^{[Conf]} - 0.830377969 Q_{t-26}^{[Conf]} + 0.319256101 Q_{t-1}^{[Peum]} \\
 & + 0.109340906 Q_{t-2}^{[Peum]} + 0.01584963 HA_{t-40}^{[Maq]} + 0.003359006 H_{t-19}^{[Prov]} \\
 & - 0.001640292 H_{t-21}^{[Prov]} + 0.207244083 HS_{t-26}^{[Prov]} - 0.046597171 P_{t-1}^{[R.Apoq]} \\
 & - 0.027543021 P_{t-2}^{[R.Apoq]} + 0.02136869 P_{t-6}^{[R.Apoq]} + 0.019942184 P_{t-7}^{[R.Apoq]} \\
 & - 0.019003149 P_{t-13}^{[R.Apoq]} + 0.107410107 P_{t-14}^{[R.Apoq]} - 0.034388094 P_{t-15}^{[R.Apoq]} (25)
 \end{aligned}$$

Donde:

- $Q_{t+i}^{[Peum]}$ es el pronóstico de Caudal en Los Peumos en m³/s, en el tiempo i intervalos más hacia el futuro.
- $Q_{t+x}^{[Peum]}$ es el Caudal en Los Peumos en m³/s, con un retardo de x intervalos.
- $Q_{t+x}^{[Conf]}$ es el Caudal en Confluencia en m³/s, con un retardo de x intervalos.
- $AT_{t-x}^{[Ref]}$ es la Temperatura del Aire en el nodo Reforestación en °C, con un retardo de x intervalos.
- $HA_{t-x}^{[Maq]}$ es la Humedad del Aire en el nodo Los Maquis en %, con un retardo de x intervalos.
- $HA_{t-x}^{[Acum]}$ es la Humedad del Aire en el nodo Acumulador QR en %, con un retardo de x intervalos.
- $HS_{t-x}^{[Prov]}$ es la Humedad del suelo en el nodo Provincia Bajo en %, con un retardo de x intervalos.
- $HS_{t-x}^{[Ref]}$ es la Humedad del suelo en el nodo Reforestación en %, con un retardo de x intervalos.
- $HS_{t-x}^{[QR05]}$ es la Humedad del suelo en el nodo QR 05 en %, con un retardo de x intervalos.
- $HS_{t-x}^{[QR07]}$ es la Humedad del suelo en el nodo QR 07 en %, con un retardo de x intervalos.

- $HS_{t-x}^{[QR08]}$ es la Humedad del suelo en el nodo QR 08 en %, con un retardo de x intervalos.
- $P_{t-x}^{[Ref]}$ es la Precipitación en el nodo Reforestación en mm, con un retardo de x intervalos.
- $P_{t-x}^{[Prov]}$ es la Precipitación en el nodo Provincia Bajo en mm, con un retardo de x intervalos.
- $P_{t-x}^{[R.Apoq]}$ es la Precipitación en el nodo Repetidor Apoquindo en mm, con un retardo de x intervalos.
- $H_{t-x}^{[Prov]}$ es la altura de nieve en el nodo Provincia en cm, con un retardo de x intervalos.

Las Figura 23 y Figura 24 muestran el ajuste gráfico de los modelos. Se observa una buena representación del caudal máximo en los eventos mayores y una peor representación en los caudales de los eventos menores, sin embargo, las funciones de transferencia desde 40 minutos a futuro (FT4, FT5 y FT6) no representan bien el caudal en el primer máximo del mayor evento del registro. En general, el tiempo de ocurrencia es bien representado. Los coeficientes de correlación están entre 0.67 y 0.86, como se ve en la Tabla 8.

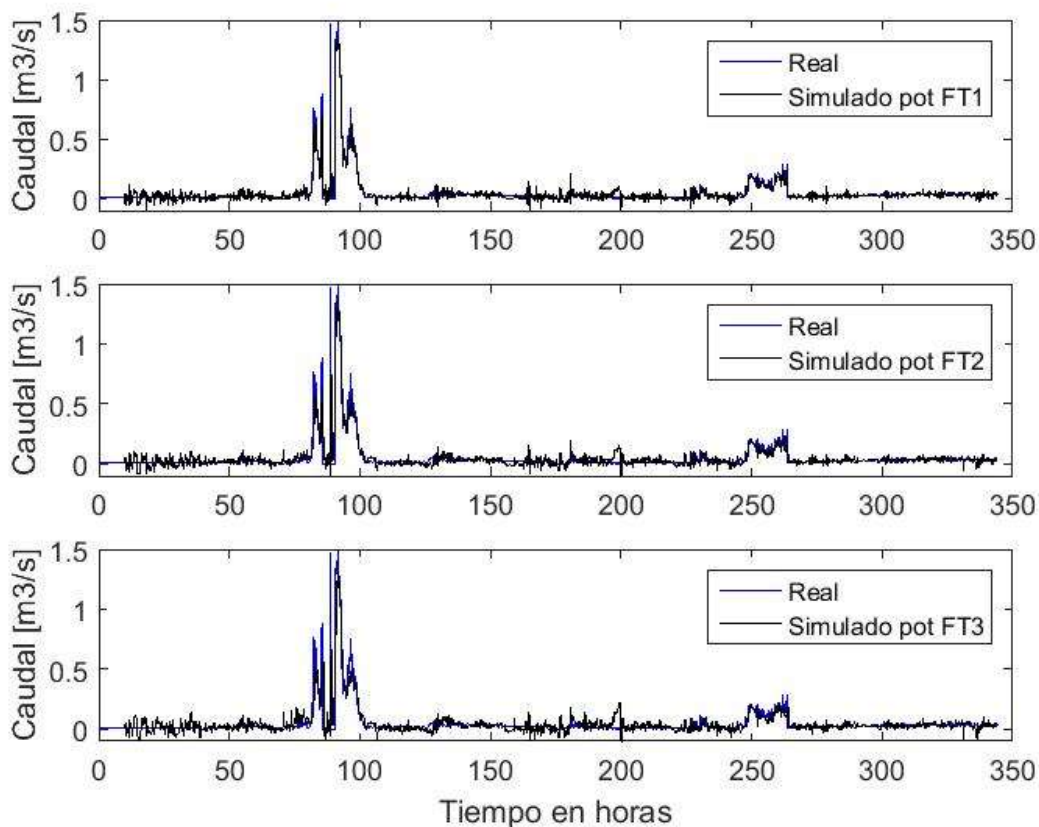


Figura 23: Funciones de Transferencia para el caudal en el nodo Puente Los Peumos.

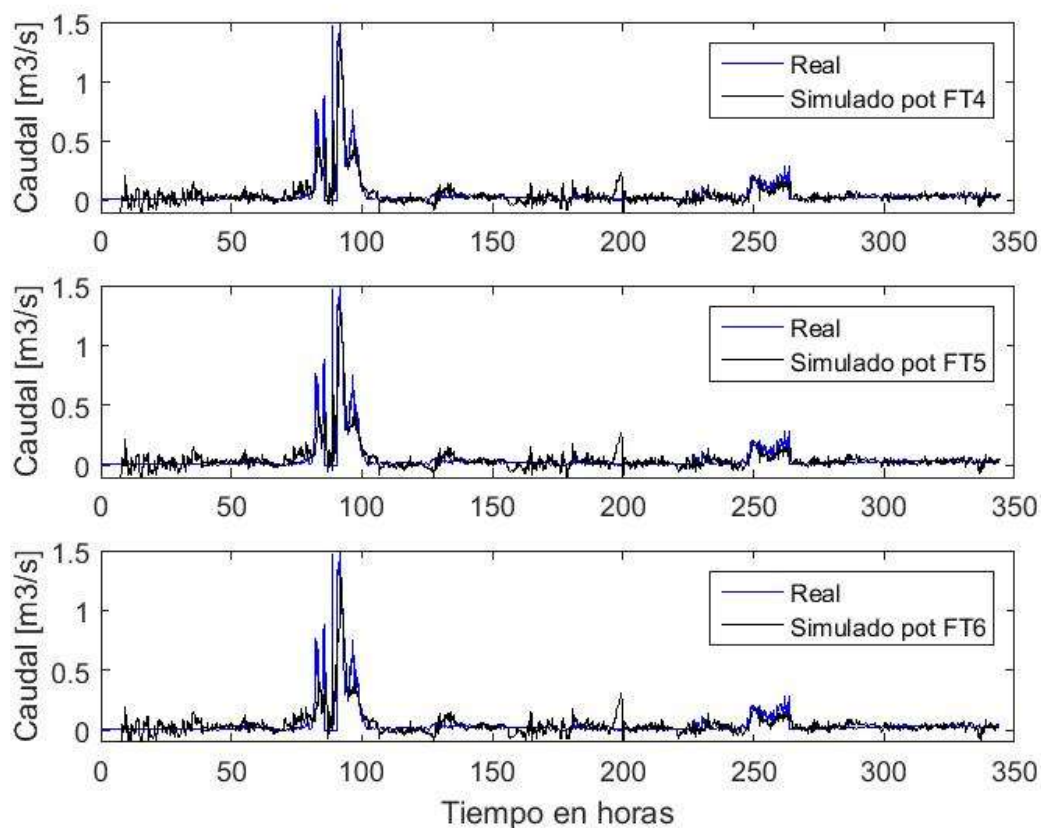


Figura 24: Funciones de Transferencia para el caudal en el nodo Puente Los Peumos.

Tabla 8: Coeficientes de Correlación de las funciones de transferencia – Puente Los Peumos.

Función de Transferencia	Tiempo de Pronóstico (minutos hacia adelante)	Coeficiente de Correlación
FT1	10	0.867
FT2	20	0.806
FT3	30	0.767
FT4	40	0.727
FT5	50	0.699
FT6	60	0.679

3.5.3 Funciones de transferencia – Recinto Aguas Andinas

$$Q_t^{[Rec]} = 0.026877949 - 0.028376855 P_{t-48}^{[Ref]} + 0.039447669 P_{t-46}^{[Ref]} + 0.051785783 P_{t-23}^{[Prov]} + -0.261890741 Q_{t-2}^{[Rec]} + 1.238799104 Q_{t-1}^{[Rec]} \quad (26)$$

$$Q_{t+1}^{[Rec]} = 0.058429395 + 0.053083922 P_{t-45}^{[Ref]} + 0.035171908 P_{t-19}^{[Ref]} + 0.100788884 P_{t-23}^{[Prov]} - 0.356024669 Q_{t-2}^{[Rec]} + 1.300838793 Q_{t-1}^{[Rec]} \quad (27)$$

$$Q_{t+2}^{[Rec]} = 0.062618163 + 0.056958744 P_{t-45}^{[Ref]} + 0.123936642 P_{t-23}^{[Prov]} + 0.001308436 HA_{t-21}^{[Acum]} - 0.370331678 Q_{t-2}^{[Rec]} + 1.271962045 Q_{t-1}^{[Rec]} + 0.4693737 Q_{t-2}^{[Conf]} - 0.869102183 HS_{t-47}^{[Prov]} \quad (28)$$

$$Q_{t+3}^{[Rec]} = 0.100713415 + 0.148723808 P_{t-45}^{[Prov]} + 0.15359932 P_{t-22}^{[Prov]} - 0.004329418 AT_{t-2}^{[QR07]} + 0.002035564 HA_{t-19}^{[Acum]} - 0.370203039 Q_{t-2}^{[Rec]} + 1.22897047 Q_{t-1}^{[Rec]} + 0.640706079 Q_{t-2}^{[Conf]} + 2.882340036 HS_{t-49}^{[Prov]} - 4.05858891 HS_{t-46}^{[Prov]} \quad (29)$$

$$Q_{t+4}^{[Rec]} = 0.011681746 + 0.155392787 P_{t-45}^{[Prov]} + 0.146226323 P_{t-21}^{[Prov]} + 0.001189241 HA_{t-43}^{[QR08]} - 0.003663426 HA_{t-11}^{[QR08]} + 0.003441538 HA_{t-1}^{[QR08]} + 0.002357383 HA_{t-18}^{[Acum]} - 0.302582342 Q_{t-2}^{[Rec]} + 1.128295684 Q_{t-1}^{[Rec]} + 0.916906456 Q_{t-2}^{[Conf]} + 4.077058685 HS_{t-48}^{[Prov]} - 5.429516049 HS_{t-45}^{[Prov]} \quad (30)$$

$$Q_{t+5}^{[Rec]} = 0.148974056 + 0.071559419 P_{t-41}^{[Ref]} + 0.091912951 P_{t-15}^{[Ref]} + 0.161697575 P_{t-45}^{[Prov]} + 0.200743495 P_{t-18}^{[Prov]} + 0.000850984 HA_{t-42}^{[QR08]} + 0.00216683 HA_{t-16}^{[Acum]} - 0.242677905 Q_{t-2}^{[Rec]} + 1.040124723 Q_{t-1}^{[Rec]} + 0.711488571 Q_{t-2}^{[Conf]} + 4.446157071 HS_{t-47}^{[Prov]} - 6.163266797 HS_{t-44}^{[Prov]} \quad (31)$$

Donde:

- $Q_{t+i}^{[Rec]}$ es el pronóstico de Caudal en Recinto Aguas Andinas en m^3/s , en el tiempo i intervalos más hacia el futuro.
- $Q_{t+x}^{[Rec]}$ es el Caudal en Recinto Aguas Andinas en m^3/s , con un retardo de x intervalos.
- $Q_{t+x}^{[Conf]}$ es el Caudal en Confluencia en m^3/s , con un retardo de x intervalos.
- $AT_{t-x}^{[QR07]}$ es la Temperatura del Aire en el nodo QR 07 en $^{\circ}C$, con un retardo de x intervalos.
- $HA_{t-x}^{[Acum]}$ es la Humedad del Aire en el nodo Acumulador QR en %, con un retardo de x intervalos.
- $HA_{t-x}^{[QR08]}$ es la Humedad del Aire en el nodo QR 08 en %, con un retardo de x intervalos.
- $HS_{t-x}^{[Prov]}$ es la Humedad del suelo en el nodo Provincia Bajo en %, con un retardo de x intervalos.
- $P_{t-x}^{[Ref]}$ es la Precipitación en el nodo Reforestación en mm, con un retardo de x intervalos.
- $P_{t-x}^{[Prov]}$ es la Precipitación en el nodo Provincia Bajo en mm, con un retardo de x intervalos.

Las Figura 25 y Figura 26 muestran gráficamente el ajuste de las funciones de transferencia con el registro de eventos utilizado. Existe una buena representación de los caudales máximos y de su tiempo de ocurrencia, no obstante, esta representación empeora para pronósticos 50 y 60 minutos adelante (FT5 y FT6). Los coeficientes de correlación varían entre 0.76 y 0.97 (Tabla 9).

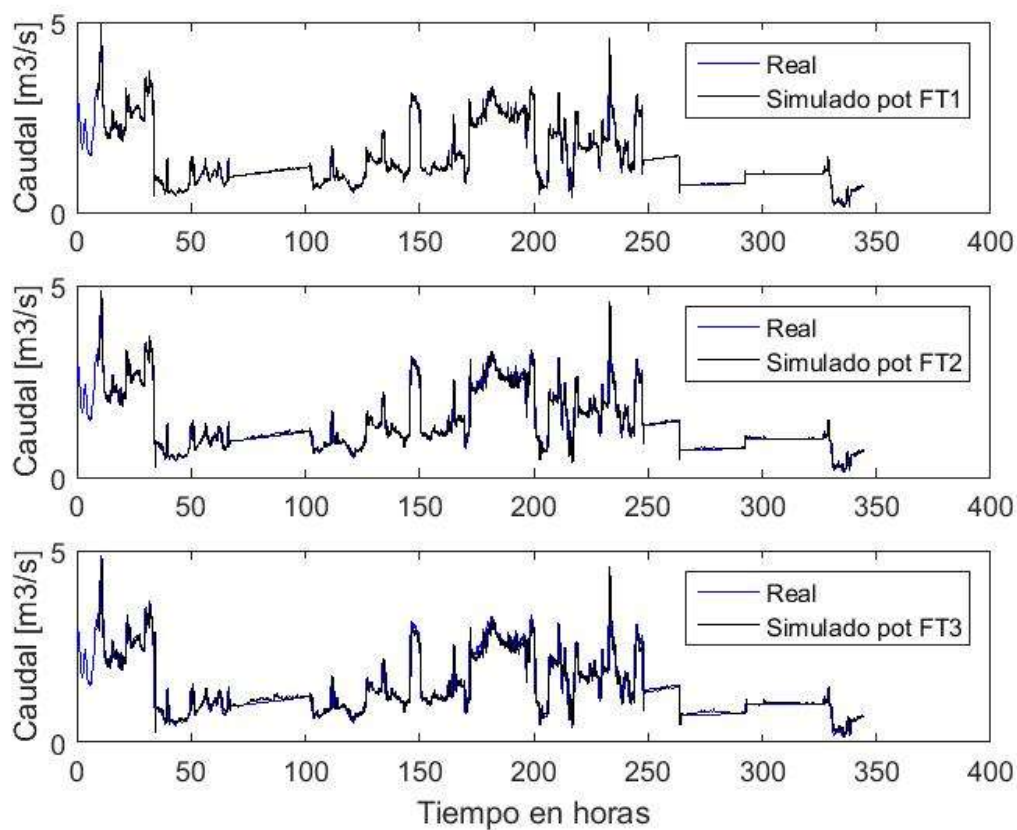


Figura 25: Funciones de Transferencia para el caudal en Recinto Aguas Andinas.

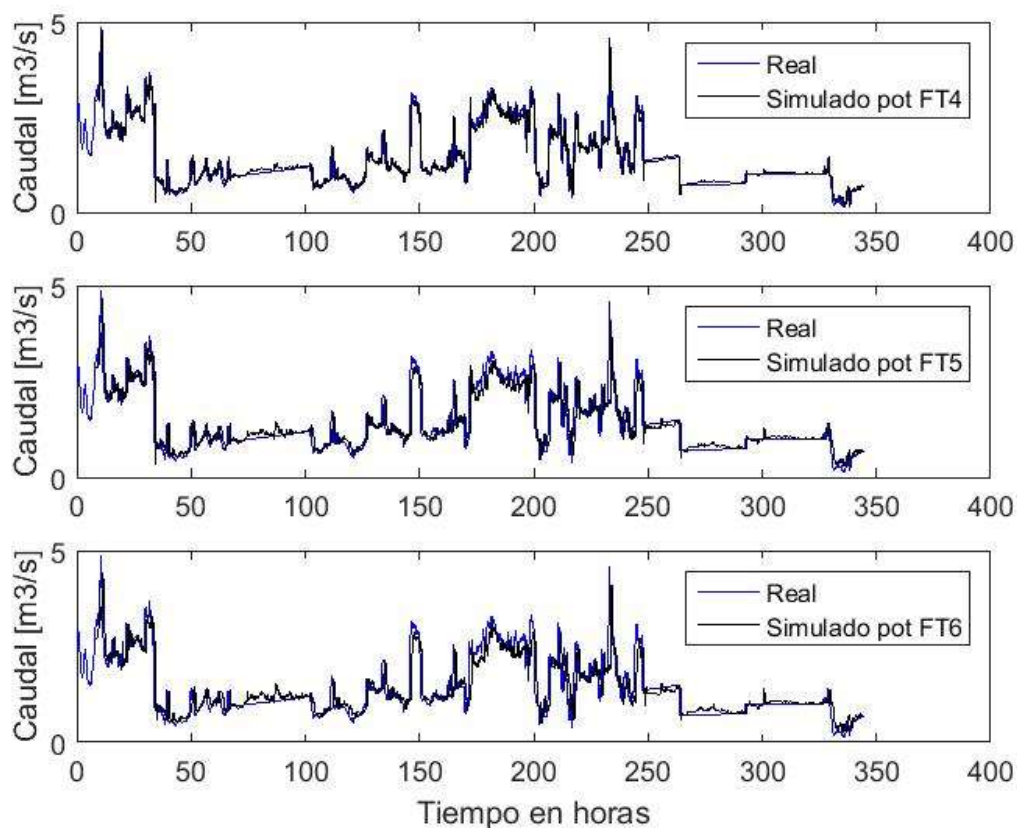


Figura 26: Funciones de Transferencia para el caudal en Recinto Aguas Andinas.

Tabla 9: Coeficientes de Correlación de las funciones de transferencia – Recinto Aguas Andinas.

Función de Transferencia	Tiempo de Pronóstico (minutos hacia adelante)	Coeficiente de Correlación
FT1	10	0.973
FT2	20	0.932
FT3	30	0.877
FT4	40	0.876
FT5	50	0.804
FT6	60	0.768