

# Análisis Hidrológico e Hidráulico del Río Dulcepamba \*

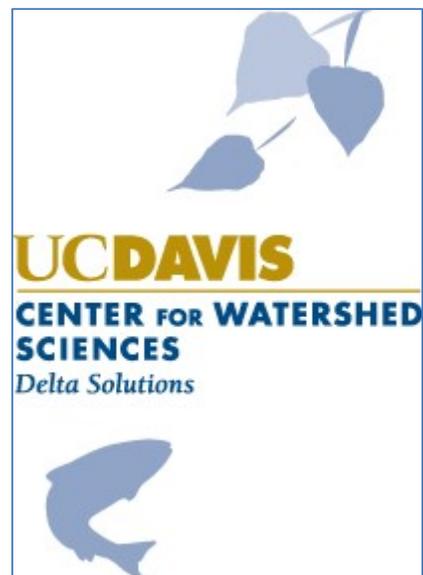
Jeanette Newmiller<sup>1</sup>

Wesley Walker<sup>1</sup>

William Fleenor<sup>2</sup>

Nicholas Pinter<sup>3</sup>

8 de agosto de 2017



---

<sup>1</sup> Investigador de maestría, Centro de Ciencias de Cuencas Hidrográficas, UC, Davis

<sup>2</sup> Investigador Principal de Modelos Hidráulicos, Centro de Ciencias de Cuencas Hidrográficas, UC, Davis, autor correspondiente, [wefleenor@ucdavis.edu](mailto:wefleenor@ucdavis.edu)

<sup>3</sup> Profesor, Departamento de Geología, Centro de Ciencias de Cuenca Hidrográficas, UC, Davis

\* El informe original fue preparado en inglés; los autores no se responsabilizan de cualquier error o cambio producido en la traducción

## Introducción

El día 19 de marzo de 2015, una tormenta impactó a la cuenca Dulcepamba en las faldas de las montañas de los Andes en Ecuador. La consiguiente escorrentía y descarga produjo una grave inundación, que causó pérdidas humanas y materiales en el pueblo de San Pablo de Amalí. La empresa Hidrotambo S.A., propietaria de la central hidroeléctrica adyacente al pueblo, produjo un informe que definió que el caudal del río a la altura de San Pablo de Amalí durante dicho evento llegó a los 400 cms (metros cúbicos por segundo), que dicho caudal se prolongó durante 4 días y que una crecida de esta magnitud tiene un periodo de retorno de 33 años. Los testimonios de testigos presenciales, junto con las medidas de precipitación y descarga, entran en conflicto con las conclusiones del informe de Hidrotambo S.A. Los residentes y un grupo de investigadores y voluntarios encargados por la gente local que, en este informe será referido como el Equipo del Proyecto Dulcepamba (Ver Anexo D Figura 37), barajaron la hipótesis de que el daño producido por la inundación fue resultado de la construcción de una estructura de captación de agua para la planta hidroeléctrica de Hidrotambo S.A., que requirió la modificación del cauce del río más próximo al pueblo. El Equipo del Proyecto Dulcepamba y los habitantes del pueblo solicitaron a los investigadores del “Center for Watershed Sciences (CWS)” (Centro de Ciencias de Cuenca Hidrográficas) en la Universidad de California, Davis (UC Davis) que analice los datos disponibles y complete un análisis forense de la inundación de marzo de 2015.

Los investigadores de la UC Davis desarrollaron (1) un modelo hidrológico para caracterizar la respuesta de la cuenca hidrográfica y de los caudales de escorrentía sobre

los eventos meteorológicos y (2) un modelo hidráulico para analizar los procesos hidráulicos y geomórficos que tuvieron lugar antes, durante y después del evento de marzo de 2015. El modelo hidrológico completa un estudio que abarca en su totalidad el periodo de tiempo que comprenden los datos disponibles de precipitación y descarga (1969-2016), junto con estudios de diferentes eventos de calibración a lo largo del periodo de registro y el evento de marzo de 2015. Los resultados del análisis del modelo determinaron que el evento de marzo de 2015 tuvo su pico con un flujo medio diario de 58.67 cms, tuvo una duración inferior a un día y tiene un periodo de retorno de 6 años (esto es, tiene una probabilidad de 1 entre 6 de ocurrir en cualquier año).

El modelo hidrológico Dulcepamba se usó también para estimar los caudales caudal diarios y mensuales disponibles para el desvío de agua. El modelo indica que cuando el derecho de uso de Hidrotambo es añadido a los caudales ecológicos mínimos requeridos referidos en la pagina 49 y 50 del Estudio de Impacto Ambiental de la compañía, "*Actualizacion del Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Hidroelectrico San Jose del Tambo,*" aprobada por CONELEC en 2012, el total superó los caudales medios diarios en San Pablo de Amalí en un 69.25% de los días durante el periodo de registro.

Se desarrolló un modelo hidráulico en dos dimensiones (2D) usando datos espaciales de un estudio topográfico llevado a cabo por estudiantes de la Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Se usaron los datos de caudales registrados por el Equipo del Proyecto Dulcepamba para asegurar la calibración del modelo. Se ejecutaron simulaciones del modelo hidráulico usando los caudales de la inundación de marzo de 2015 a partir de los análisis hidrológicos del presente informe. Debido a que no se dispuso de datos espaciales de las instalaciones de captación de agua, se ejecutó la simulación del evento

de 2015 como si todo el volumen del caudal pasase a través del tramo del cauce sin ningún tipo de bloqueo. El resultado de este modelo fue una elevación de agua aproximadamente 2 m inferior a la elevación de la superficie de agua medida durante la inundación de 2015. Estos 2 m de diferencia demuestran el impacto aproximado del bloqueo dentro y cerca de las instalaciones de captación de agua de la central hidroeléctrica Hidrotambo. El modelo también aportó una distribución 2D de velocidades que se usaron para calcular el tamaño de las rocas grandes que pueden ser movilizadas por el caudal de agua. Se determinó que el pico de caudal del evento de marzo de 2015 fue capaz de mover rocas grandes sumergidos de hasta 1 m de diámetro.

Se ejecutaron las simulaciones hidráulicas usando un hidrograma sintético con ratios de caudal de hasta 500 cms. Se modelaron estos caudales para evaluar la alta estimación de caudal (400 cms) para el evento de inundación de 2015 sugerido en el informe de Hidrotambo S.A. Los resultados del modelo indican que caudales sin obstruir, incluso de hasta 500 cms, no habrían revasado el margen izquierdo del río e inundado el pueblo de San Pablo de Amalí.

Los resultados producidos por los modelos hidrológicos e hidráulicos indican que el evento de marzo de 2015 en el río Dulcepamba no habría causado el daño que ocurrió en San Pablo de Amalí sin otras actividades humanas en el sitio, particularmente las construcciones dentro del cauce, la desviación del caudal, y las obstrucciones por escombros. La escorrentía y caudal generado durante el evento de marzo de 2015 fue menor que otras tormentas históricas y eventos de caudales recientes que no resultaron en el alcance de daños como los sufridos durante el evento de marzo de 2015.

# Indice

Introducción.....	ii
Figuras .....	viii
Tablas .....	xi
Agradecimientos .....	xii
Acrónimos y abreviaciones.....	xiii
1. Cuenca del Río Dulcepamba e Inundación.....	1
Resumen de la cuenca.....	3
Datos disponibles .....	4
Datos de la cuenca .....	4
Datos pluviométricos .....	4
Datos de descarga.....	5
Datos espaciales .....	8
Inundación de marzo de 2015.....	8
2. Modelo Hidrológico de Dulcepamba.....	11
Sistema de Modelado Hidrológico (HEC-HMS).....	11
Meteorología HMS.....	12
Resumen del modelo.....	13
Sub-Cuencas y uso del suelo .....	14

Parámetros de la Sub-Cuenca .....	15
Estrato superior de follaje .....	15
Superficie .....	16
Métodos de pérdida .....	17
Transformación.....	18
Caudal de base.....	18
Red de caudales.....	19
Fuentes .....	20
Depresiones .....	20
Calibración del modelo.....	21
Estudios de eventos históricos .....	21
Estudio del registro histórico .....	21
Resultados y discusión .....	22
Eventos de escorrentía de abril de 1970, marzo de 1989, enero de 1993 y febrero de 2008 .....	22
Inundación de marzo de 2015 .....	29
Registro histórico .....	31
Evento de febrero de 2017.....	34
Eventos históricos de caudales altos .....	37
Estimación de la disponibilidad de agua y de condiciones de bajos caudales.....	41

Conclusiones de los Análisis Hidrológicos .....	45
3. Modelo hidráulico de Dulcepamba.....	46
Sistema de Modelado del Río (HEC-RAS).....	46
Resumen del modelo.....	47
Datos espaciales .....	47
Datos hidrológicos .....	49
Calibración del modelo.....	50
Etapas temporales.....	50
Rugosidad superficial.....	50
Resultados de calibración .....	52
Limitaciones del modelo .....	55
Resultados del modelo hidráulico y discusion .....	56
Análisis Incipiente del Movimiento.....	65
Conclusiones de los Análisis Hidráulicos.....	69
Trabajo futuro .....	70
Anexo A. Mapas.....	71
Anexo B. Informe de Hidrotambo sobre la inundación de marzo de 2015 .....	72
Anexo C. Isoyetas de la precipitación.....	73
Anexo D. Definicion del Proyecto Dulcepamba.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Referencias .....	75

Sobre los autores .....	76
Certificado de traducción .....	77

## Figuras

Figura 1. Cuenca Dulcepamba, Ecuador. ....	2
Figura 2. Localización del Río Dulcepamba: (a) antes de la construcción, (b) después de la construcción, y (c) después del evento de la inundación de 2015. La línea negra representa la ubicación estimada del bloqueo.....	3
Figura 3. Localización de las estaciones hidrológicas en la cuenca Dulcepamba. ....	7
Figura 4. Bloqueo de la estructura de captación de agua de Hidrotambo por acumulación de escombros. Fotografía facilitada por el Equipo de Proyecto Dulcepamba después de la inundación de marzo de 2015. ....	9
Figura 5. Pantallazo del modelo de Cuenca HMS de Dulcepamba.....	14
Figura 6. Evento de abril de 1970 - Caudal en Sicoto.....	23
Figura 7. Evento de abril de 1970 - Caudal en San José del Tambo. ....	24
Figura 8. Evento de marzo de 1989 - Caudal en Sicoto.....	25
Figura 9. Evento de enero de 1993 - Caudal en Sicoto. ....	26
Figure 10. Evento de febrero de 2008 - Caudal en Sicoto. ....	27
Figura 11. Inundación de marzo de 2015 - Caudal en Sicoto.....	30
Figura 12. Inundación de marzo de 2015 - Caudal en San Pablo de Amalí.....	31

Figura 13. Relación de la frecuencia de las inundaciones en Sicoto de los datos observados, picos de caudal anuales, 1969-2016. ....	32
Figura 14. Relación entre la frecuencia de crecidas de Amalí y los datos modelados, picos de caudal anuales, 1969-2016. ....	33
Figura 15. Inundación de febrero de 2017 – Caudal en Sicoto. ....	36
Figura 16. Inundación de febrero de 2017– Caudal en San Pablo de Amalí. ....	36
Figura 17. Evento de marzo de 1983 – Caudal en San Pablo de Amalí. ....	38
Figura 18. Evento de febrero de 2008 – Caudal en San Pablo de Amalí. ....	39
Figura 19. Evento de abril de 2010 – Caudal en San Pablo de Amalí. ....	40
Figura 20. Caudales medios, caudales de exceso del 90% y del 10% por fecha calendario en Amalí (1969-2016). ....	42
Figura 21. Hidrograma de San Pablo de Amalí, 2010-2017, mostrando los requisitos del caudal ecológico y derechos de aprovechamiento de Hidrotambo S.A. para la estación húmeda y seca. ....	44
Figura 22. Perfil de calibración HEC-RAS, comparando los datos medidos de la estación de Amalí con las tres secciones transversales modeladas cerca de la localización de medición. ....	54
Figura 23. Velocidades para la onda de pico del caudal, 4:05 a.m. 20 de marzo de 2015. La escala máxima es 10 m/s. ....	58
Figura 24. Profundidades para el pico de onda del caudal, 4:05 a.m. 20 de marzo de 2015. La escala máxima es 5 m. ....	59
Figura 25. Elevación de la superficie de agua (WSEL) para el pico del evento de inundación de marzo de 2015. Se muestran las posiciones de las instalaciones de captación de agua y tres de las	

propiedades perdidas. Las líneas marcadas “Grupo 1, 2 y 3” son las localizaciones de las secciones transversales de la Figura 26.....	60
Figura 26. Perfiles de la elevación de la superficie de agua (WSEL); localizaciones mostradas en la Figura 25. El Grupo 2 incluye la estimación del WSEL producida por el bloqueo facilitado por el Equipo de Proyecto Dulcepamba.....	61
Figura 27. Test de capacidad de caudal, con la geometría antes de la inundación y las distribuciones de velocidades para caudales de hasta 500 cms. ....	62
Figura 28. WSEL a 500 cms con respecto al WSEL observado .....	63
Figura 29. Test de capacidad de caudal, con la geometría después de la inundación y las profundidades para caudales de hasta 500 cms. ....	64
Figura 30. Rocas representativas antes y después de la estación de lluvias de 2016 (fotografía facilitada por el Equipo del Proyecto Dulcepamba).....	66
Figura 31. Diagrama de la estabilidad de partícula para rocas con un ángulo de reposo de 40°, de Julien (2002, p. 245).....	67
Figura 32. Estabilidad de partícula calculada durante el pico de caudal de marzo de 2015 para ángulos de reposo representativos usando la ecuación 8.4 de Julien (2002, p. 244), c (ver texto).68	
Figura 33. Vectores de velocidad para el tramo del estudio (a) y para el area destacada en rojo (b).....	69
Figura 34. Mapa de contorno de la Universidad Católica, enero 2016.....	71
Figura 35. Informe de Hidrotambo S.A. sobre la inundación de marzo de 2015. ....	72
Figura 36. Isoyetas para la Provincia de Chillanes.....	73
Figure 37. Definicion del Equipo del Proyecto Dulcepamba proveido por el Equipo.....	77

## Tablas

Tabla 1. Estaciones pluviométricas.....	5
Tabla 2. Parámetros del modelo hidrológico .....	22
Tabla 3. Análisis del error en las calibraciones de eventos.....	29
Tabla 4. Periodos de retorno de las crecidas de Sicoto y Amalí.....	33
Tabla 5. Media mensual y caudal de exceso del 90% en San Pablo de Amalí.....	42
Tabla 6 Estimación del coeficiente de Manning “n” .....	52
Tabla 7. Caudales medidos y modelados, profundidades y velocidades usadas para las condiciones de calibración previas a la inundación.....	53
Tabla 8. Resultados del Test de Capacidad de Caudal. Diámetros de las rocas grandes para moción incipiente calculado en base a la profundidad media y velocidad media.....	64

## **Agradecimientos**

El Centro de Ciencias de Cuencas Hidrográficas en la Universidad de California, UC Davis, apoyó este trabajo como parte de un programa piloto de alcance internacional. Agradecimientos especiales y gratitud a Rachel Conrad y al Equipo del Proyecto Dulcepamba por aportar datos, archivos y fotos y por su rapidez en sus respuestas a innumerables preguntas.

## **Acrónimos y abreviaciones**

DSS - Data Storage System (Sistema de Almacenamiento de Datos)

HEC - Hydrologic Engineer Center (Centro de Ingeniería Hidrológica)

HMS - Hydrologic Modeling System (Sistema de Modelamiento Hidrológico)

INAMHI - Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

RAS - River Analysis Software (Programa de Análisis de Ríos)

USACE - United States Army Corps of Engineers (Cuerpo de Ingenieros del Ejercito de los Estados Unidos)

NASA - National Air and Space Administration (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio)

STRM - Shuttle Radar Topography Mission (Misión Topográfica con Rádar de Lanzadera)

cms -  $m^3/s$  ; cubic meters per second (metros cúbicos por segundo)

1D - one-dimensional (unidimensional)

2D - two-dimensional (bidimensional)

NextGen - HEC Next Generation software (Programa de Nueva Generación)

WSEL - Water Surface Elevation (Elevación de la Superficie del Agua)

USGS - United States Geological Survey (Servicio Geológico de los Estados Unidos)

GPS - Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)



# 1. Cuenca del río Dulcepamba e inundaciones

La cuenca hidrográfica del Río Dulcepamba Figura 1 está localizada en la zona central de Ecuador, en la provincia de Bolívar. La cuenca se extiende desde la zona montañosa del altiplano Andino hasta las faldas de estas montañas en la costa. La mayor parte de la precipitación anual tiene lugar de diciembre a abril y oscila normalmente desde aproximadamente 1.500 mm a 2.000 mm a lo largo de la cuenca, tal y como muestran las curvas isoyetas en el anexo C.

Una tormenta e inundación tuvo lugar entre los días 19 y 20 de marzo de 2015. Muertes, daños a propiedades, y erosiones tuvieron lugar en el pueblo de San Pablo de Amalí que está localizado a lo largo del margen sur del río. En 2012, Hidrotambo S.A. empezó a construir las instalaciones de captación de agua para una central hidroeléctrica de pasada. Las instalaciones de captación de agua están localizadas en el margen opuesto al pueblo, y directamente sobre el cauce original (“flood conveyance path”) del río. Fotografías y declaraciones de testigos presenciales sugieren que se produjo un bloqueo completo o casi-completo de la instalación de captación de agua de Hidrotambo por la acumulación de sedimentos gruesos y otros escombros durante el evento de marzo de 2015.

La construcción de las instalaciones de Hidrotambo comprendió la reubicación del cauce del río más cerca de San Pablo de Amalí. En la Figura 2 se puede observar la comparación de la localización del río antes y después de la construcción, así como las condiciones después de la inundación. Como referencia, las localizaciones de las instalaciones de captación de agua, el bloqueo observado y los daños en las casas se encuentran superpuestos en las tres imágenes.

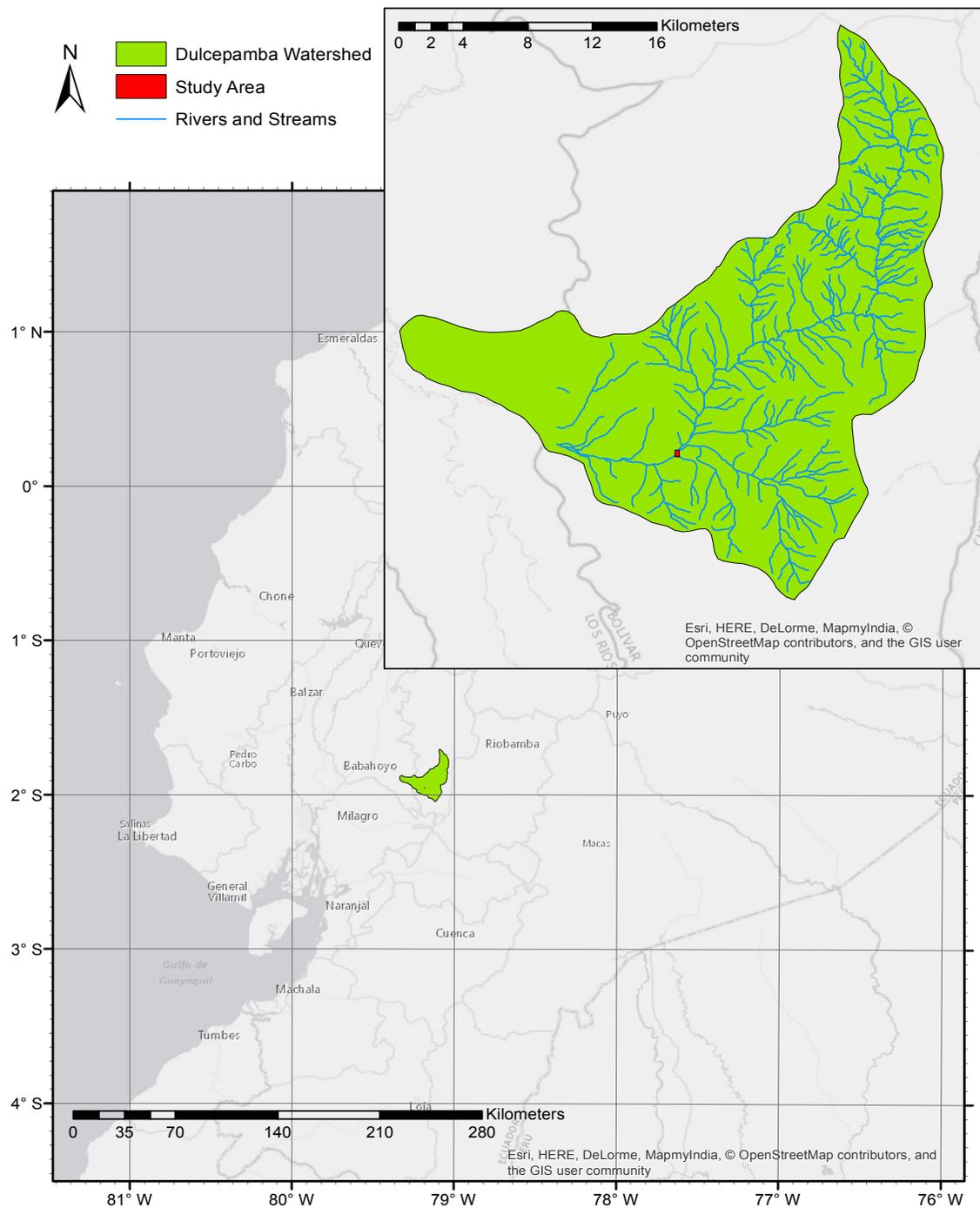


Figura 1. Cuenca Dulcepamba, Ecuador.

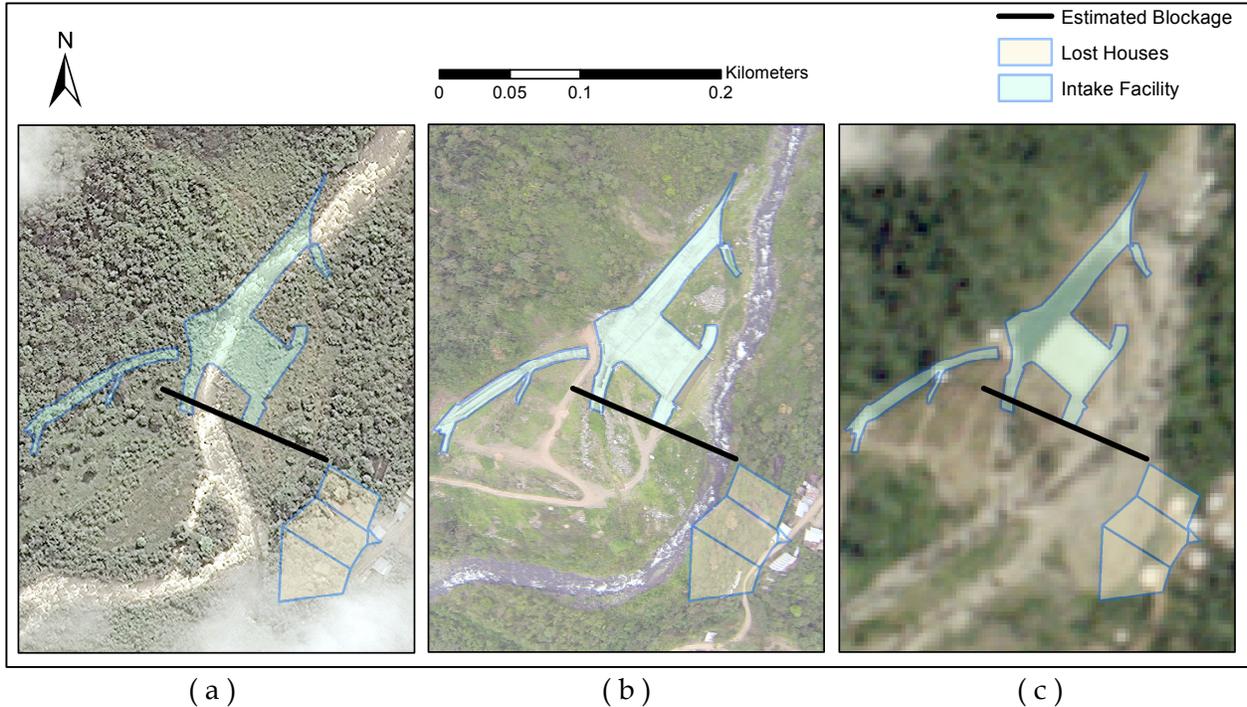


Figura 2. Localización del Río Dulcepamba: (a) antes de la construcción, (b) después de la construcción, y (c) después del evento de la inundación de 2015. La línea negra representa la ubicación estimada del bloqueo, las figuras de color beige casas perdidas, y la figura de color verde, las instalaciones de toma .

### **Resumen de la cuenca**

La Cuenca Dulcepamba cuenta con cerca de 500 km<sup>2</sup> de extensión y varía en elevación desde los 100 m hasta los 3.200 m sobre el nivel del mar. Las zonas norte y este son particularmente escarpadas, montañosas y cubiertas ampliamente por selva o por matorrales. En la zona más llana y de menor elevación, el uso del suelo está dominado por una variedad de usos agrícolas.

El Río Dulcepamba fluye en dirección suroeste, existiendo varios afluentes que se van juntando al cauce principal. La desembocadura de la cuenca se encuentra en las llanuras de la región costera.

## ***Datos disponibles***

Los datos usados en el estudio fueron facilitados por Rachel Conrad y su equipo (el Equipo del Proyecto Dulcepamba) o por fuentes gubernamentales. Esto incluye datos de shapefiles, geometrías de cauce, pluviometría y datos de caudales y encuestas, así como declaraciones de testigos presenciales.

### **Datos de la cuenca**

Se usaron shapefiles de los márgenes de la cuenca, cauces de las corrientes de agua, uso de suelos, tipo de suelos, y cobertura vegetal para delinear las sub-cuencas dentro de la línea divisoria que delimita a la cuenca y para estimar la infiltración hidrológica inicial, el almacenamiento y los parámetros de pérdida. Los shapefiles e imágenes ráster del uso del suelo, tipos de suelo y cobertura vegetal se obtuvieron a través del Gobierno Municipal de Chillanes (Chillanes 2012 a&b) y del Equipo del Proyecto Dulcepamba.

Los datos de las secciones transversales fueron suministrados por el Equipo del Proyecto Dulcepamba para diferentes tramos en la cuenca, incluyendo: Dulcepamba Amalí, Chima Guapo, Chima Pesquería, Congón Tendal, Limón y Sicoto. Los datos de las secciones transversales fueron usados en el modelo hidrológico como datos de entrada de la geometría para el método hidráulico de direccionamiento.

### **Datos pluviométricos**

Se disponibilizaron los datos de la precipitación de diferentes localizaciones dentro y cerca de la línea divisoria de la cuenca. Las estaciones hidrológicas usadas en el estudio están listadas en Tabla 1. El instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) facilitó los datos para Chillanes (Código M0130), San Pablo de Atenas (Código# M0131), y San José

Del Tambo (Código# M0384). Los datos de Chillanes y San Pablo de Antenas fueron especialmente útiles para el estudio histórico, ya que los registros datan desde el 1 de enero de 1963 y 1 de agosto de 1968, respectivamente. Los datos para el resto de los sitios fueron registrados y facilitados por el Equipo del Proyecto de Dulcepamba. Los sitios mantenidos por el Equipo de Proyecto Dulcepamba también contienen datos de evapotranspiración (ET), que fue útil para verificar los datos del modelo ET, y como datos de entrada para las más recientes simulaciones de eventos históricos.

**Tabla 1. Estaciones pluviométricas**

Nombre	Latitud (°)	Longitud (°)	Frecuencia de registro
Chillanes	-1.981	-79.068	Diaria
San Pablo de Atenas	-1.822	-79.069	Diaria
Sanabanan	-1.974	-79.102	Diaria
San Pablo de Amalí	-1.951	-79.167	5 minutos
San Vicente	-1.919	-79.138	Diaria
San José del Tambo	-1.943	-79.236	Diaria

### **Datos de descarga**

Los datos históricos consistentes de la descarga se encontraron disponibles únicamente para una estación hidrológica dentro de la cuenca, Sicoto (localizada en -1.881°, -79.121°). Es INAMHI quien realiza el mantenimiento y quien informa sobre la estación (Código # H0334). Los datos del caudal medio diario (cms) están disponibles desde el 1 de enero de 1968. Aunque hay datos de varios días que faltan, existen datos suficientes para su calibración y análisis. La estación de medición está localizada a unos 12 km aguas arriba, y aproximadamente a unos 1.500 m más alto en elevación, respecto a San Pablo de Amalí.

También se encontraban disponibles los datos de caudales diarios para la estación de medición de San José del Tambo (localizada en 1.942°, -79.242°), cuyo mantenimiento también está a cargo de INAMHI (Código# H0395). Aunque los registros se encuentran disponibles solamente desde 1968-1973, estos datos fueron también útiles para calibrar el periodo histórico del registro, así como para ofrecer una expectativa de la magnitud del caudal volumétrico típico aguas abajo respecto a San Pablo de Amalí.

El Equipo del Proyecto Dulcepamba ha tomado medidas instantáneas de descargas en sitios adicionales (Chima Guapo, Chima Pesqueria, Chima Biloban, Chima Changuil, Chima Villa Mora, Congon Tendal, Dulcepamba Limon, San Pablo de Amalí), localizados a lo largo de la cuenca. Durante la mayor parte del periodo de estudio, estas medidas fueron intermitentes e instantáneas, presentando pérdidas de datos en periodos significantivos de tiempo. Estos datos facilitaron observaciones útiles, pero no se usaron para la calibración. Dos excepciones fueron las medidas tomadas del afluente Congon Tendal y de San Pablo de Amalí. Existen datos de eventos durante estaciones secas y tormentas representativas para Congon Tendal, lo que permitió realizar una estimación apropiada de los caudales de dicho afluente. Se obtuvieron medidas de descarga con caudales razonablemente constantes para San Pablo de Amalí desde marzo de 2014 hasta febrero de 2017, lo que permitió el uso de esta base de datos en simulaciones durante este periodo de tiempo.

En la Figura 3 se muestra un plano de la cuenca con todas las estaciones pluviométricas y estaciones de mediciones hidrológicas.

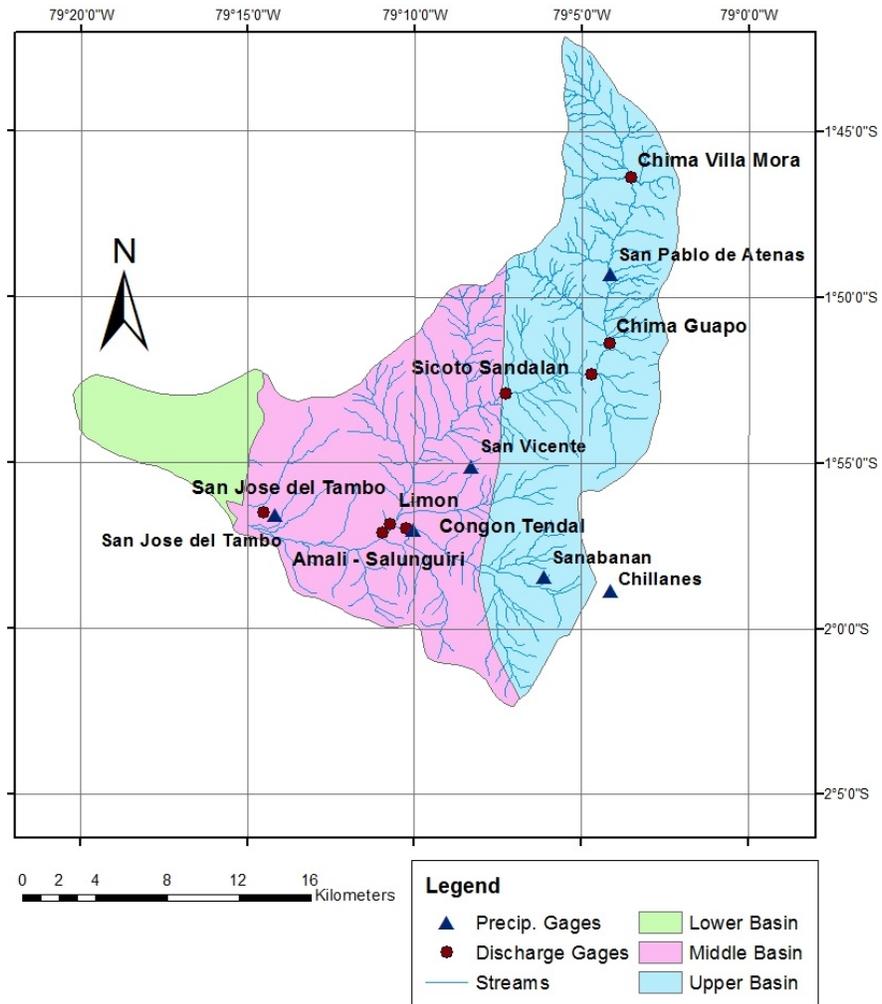


Figura 3. Localización de las estaciones hidrológicas en la cuenca Dulcepamba.

## **Datos espaciales**

Los datos espaciales detallados están limitados al estudio completado por la Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Ecuador en enero de 2016. El estudio consistió en 176 puntos estudiados en un área de aproximadamente 300 m por 400 m. Los puntos están principalmente a lo largo del Río Dulcepamba y en las zonas de escorrentía adyacentes a las instalaciones de captación de agua Hidrotambo que se extienden tanto aguas arriba como aguas abajo. Los puntos estudiados son representativos del terreno después de la erosión. Se definen el escarpado margen del río desviado en el lado de San Pablo de Amalí y la carretera principal que atraviesa el pueblo. Los datos fueron suministrados tanto en formato Excel como en formato PDF para el mapa de contorno que fue producido por las mediciones de campo.

El perfil transversal de San Pablo de Amalí facilitado por el Equipo de Proyecto Dulcepamba se encuentra cerca del extremo norte de los datos proporcionados por la Universidad Católica. Aunque no está georreferenciado con precisión, aporta una representación de la forma del cauce, permitiendo tener una idea aproximada de la profundidad, velocidad y caudal para calibrar el modelo hidráulico.

## ***Inundación de marzo de 2015***

La tormenta que tuvo lugar durante los días 19 y 20 de marzo de 2015 produjo una inundación que causó daños materiales significativos y la muerte de tres residentes en el pueblo de San Pablo de Amalí. La elevación máxima del agua durante la crecida fue observada por miembros de la comunidad y referenciada a un punto fijo en la compuerta de la estructura de captación de agua. Tiempo después, el Equipo del Proyecto Dulcepamba midió la elevación de dicho punto para así reconstruir la elevación máxima

de la superficie del agua durante el evento, información útil para calibrar el modelo de la inundación de marzo de 2015.

Declaraciones de testigos presenciales y evidencias fotográficas durante y después del evento de marzo de 2015 también evidencian que la inundación movilizó grandes volúmenes de sedimentos gruesos y otros escombros sobre el cauce y llanura de inundación del río Dulcepamba. Este sedimento y escombros bloqueó la estructura de captación de agua de Hidrotambo dentro del cauce Dulcepamba (Figura 4). El bloqueo, tal y como ilustrado en la fotografía, desplazaría el caudal del cauce, creando nuevos caminos para dicho caudal, niveles de agua más altos y contribuyendo potencialmente a la erosión y otros daños en las áreas inundadas.



**Figura 4. Bloqueo de la estructura de captación de agua de Hidrotambo por acumulación de escombros. Fotografía facilitada por el Equipo de Proyecto Dulcepamba después de la inundación de marzo de 2015.**

Un informe producido por Hidrotambo S.A. (Soria, 2015) sugiere que un caudal de 400 cms (metros cúbicos por segundo) a través de la región de San Pablo de Amalí empezó

en el día 20 de marzo y duró cuatro días. El informe también indica que el periodo de retorno de este evento es de 33 años, lo que sugiere que el evento de la tormenta y su onda de crecida se cataloga como evento extraordinario. En contraste, declaraciones de testigos presenciales y las medidas de precipitación y descarga disponibles indican que la onda de crecida que, empezando el día 19 de marzo, se desplazó a través de San Pablo de Amalí, no duró tanto como indica el informe de Hidrotambo. Además, los datos disponibles observados de precipitación y de caudales sugiere que los caudales de tormenta e inundación de marzo de 2015 no fueron particularmente extremos o raros, sino que sus características fueron típicas de tormentas observadas y medidas repetidamente en los últimos años.

El Equipo del Proyecto de Dulcepamba se contactó con los investigadores del Centro de Ciencias de Cuencas Hidrográficas de UC Davis en 2015 y 2016, y pidió que analizaran los datos disponibles y completaran un análisis forense del evento de la inundación de marzo de 2015.

## **2. Modelo Hidrológico de Dulcepamba**

Se ha desarrollado un modelo hidrológico para definir las condiciones hidrológicas y de caudales, para el registro histórico completo en la cuenca del Río Dulcepamba. Se ha usado el programa de Sistema de Modelado Hidrológico HEC-HMS (HEC, 2016) para realizar el análisis durante el periodo de registro (simulación continua), durante varios eventos históricos, y durante el evento de la inundación de marzo de 2015. Se generaron los resultados de los modelos por dos razones principales. Primero, los resultados se usaron para determinar el periodo de retorno de la inundación de marzo de 2015. Segundo, los resultados modelados de caudales fueron ingresados como datos de entrada para un modelo hidráulico para realizar un análisis más detallado de los procesos hidráulicos y geomórficos que tuvieron lugar antes, durante y después del evento de marzo de 2015.

### ***Sistema de Modelado Hidrológico (HEC-HMS)***

El programa del Sistema de Modelado Hidrológico (HEC-HMS) es producido y mantenido por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. El programa está diseñado para simular el proceso hidrológico completo de los sistemas dendríticos de las cuencas, e incluye varios procedimientos hidrológicos como los eventos de infiltración, hidrogramas unitarios, y planificación del cauce hidrológico (HEC, 2016). HMS tiene la facilidad de usar y acceder a la interfaz gráfica de usuario, que integrada ininterrumpidamente con HEC-DSS (Sistema de almacenamiento de datos), tiene un robusto motor de computación, y contiene herramientas de elaboración de informes rápidas y útiles. Los resultados de HMS son almacenados en forma de archivos tipo HEC-DSS, lo que permite importar fácilmente

datos de los niveles (stage) y de hidrogramas al modelo hidráulico HEC-RAS (Sistema de Análisis del Río, RAS por sus siglas en inglés). Los dos programas son usados ampliamente tanto en los Estados Unidos de Norteamérica (EE.UU.) como internacionalmente.

La representación física de una cuenca en HMS es llevada a cabo a través de un modelo de cuenca. Elementos hidrológicos (sub-cuencas, tramos de los caudales de agua, intersecciones, embalses, bifurcaciones, fuentes y depresiones) se conectan a una red dendrítica para simular el proceso de lluvia-escorrentía. La computación empieza en el elemento situado más aguas arriba y continúa en dirección aguas abajo. El programa simula los siguientes procesos hidrológicos: pérdidas por infiltración (incluyendo los estratos superiores y componentes superficiales para la intercepción/transpiración y almacenamiento en depresiones, respectivamente), transformación de precipitación excesiva en escorrentía superficial, las contribuciones de los caudales de base en caudales de salida en las sub-cuencas, y el encaminamiento de caudales por cauces abiertos (HEC, 2016). El uso apropiado de los diferentes métodos depende de las características físicas de la cuenca modelada y de los datos disponibles. Los métodos usados en este estudio se encuentran detallados en la sección de Resumen del Modelo.

## **Meteorología HMS**

El objetivo de análisis meteorológico en HMS es preparar las condiciones de contorno meteorológicas para las sub-cuencas. El modelo es también responsable de computar la evapotranspiración potencial sobre la superficie de la tierra. La evapotranspiración puede ser ignorada frecuentemente para simulaciones a corto plazo, pero pasa a ser crítica para simulaciones a más largo plazo (HEC, 2016). Para el modelo Dulcepamba, se usaron valores

de evapotranspiración publicados mensualmente para las simulaciones históricas (Beck, 2008). Los datos de evapotranspiración se encontraban también disponibles desde 2014 hasta el presente para los sitios de estaciones meteorológicas cuyo mantenimiento es llevado a cabo por el Equipo de Proyecto Dulcepamba. Estos datos fueron usados directamente en simulaciones llevadas a cabo más recientemente, pero también sirvieron para verificar los valores mensuales usados en las simulaciones históricas.

La limitada disponibilidad de los datos de precipitación inviabilizó el uso de varios de los modelos meteorológicos HMS disponibles. Dadas las estaciones y datos disponibles, el método de distancia inversa resultó ser el más apropiado. El modelo de distancia inversa crea una tormenta de profundidad media sobre una sub-cuenca basada en la distancia ponderada desde las estaciones pluviométricas más cercanas. Este método fue diseñado para ser aplicado en sistemas de predicción en tiempo real. Como tal, se dirige hacia los problemas de datos dinámicos y disponibilidad mediante el cambio del uso de estaciones más distantes en vez de las estaciones más cercanas cuando las estaciones más cercanas dejan de enviar datos. Se puede aplicar una distancia de búsqueda en cada estación pluviométrica para limitar el radio de influencia a una sub-cuenca en particular (HEC, 2016).

### ***Resumen del modelo***

El principal componente del modelo HMS es el modelo de la cuenca, que se compone a partir de los elementos hidrológicos dentro de las líneas divisorias físicas de la cuenca. Estos elementos están conectados en una red dendrítica para formar la representación del sistema de escorrentías superficiales de la cuenca. Los elementos hidrológicos representan la respuesta y

conversión de las condiciones atmosféricas a una escorrentía superficial en localizaciones específicas dentro de las líneas divisorias de la cuenca. La Figura 5 muestra la cuenca HMS esquematizada delimitada por las líneas divisorias de la cuenca del río Dulcepamba.

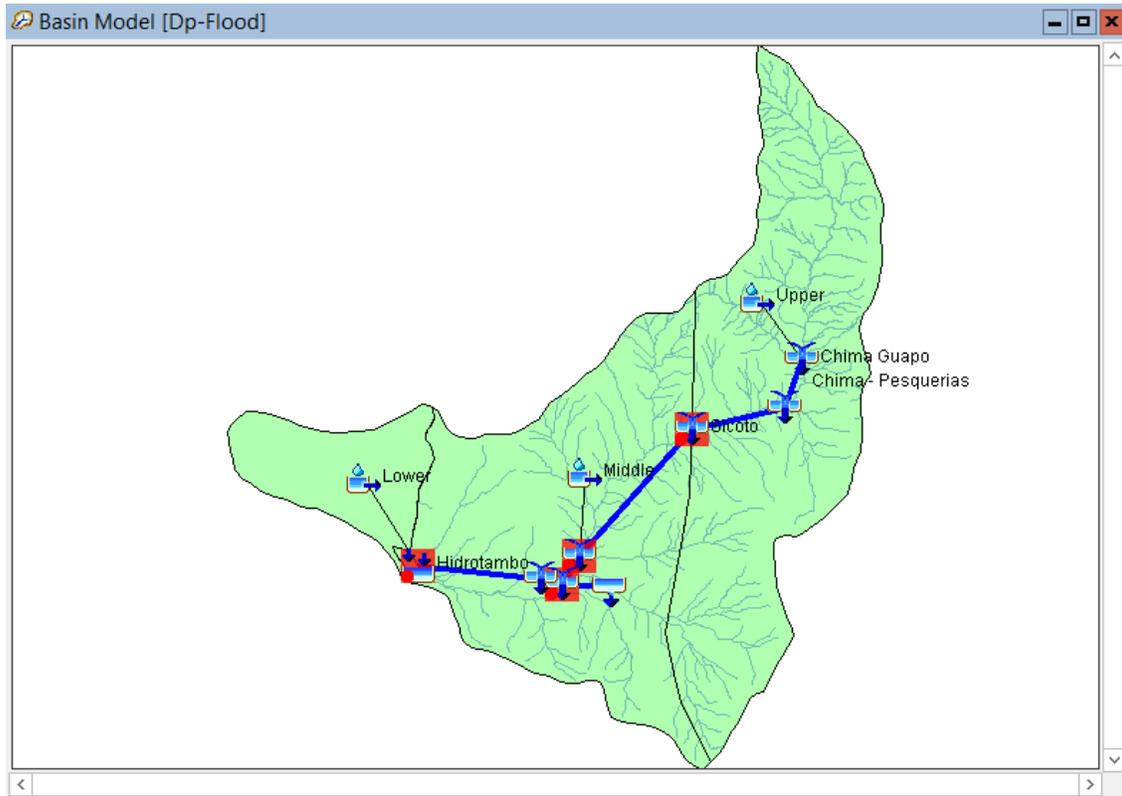


Figura 5. Pantallazo del modelo de Cuenca HMS de Dulcepamba.

### Sub-Cuencas y uso del suelo

Se usaron los datos disponibles de uso de suelo y vegetación junto con las líneas isoyetas de precipitación y los datos topográficos para delinear la cuenca en sub-cuencas menores. Las diferencias en la cobertura vegetal, pendientes topográficos y tipo de suelo darán lugar a diferentes respuestas físicas de la escorrentía provocada por la precipitación. Mediante la delineación de la cuenca en menores sub-cuencas, el modelo es capaz de producir una respuesta física más precisa para un evento de escorrentía dado. El modelo de Dulcepamba se dividió en tres sub-cuencas: Superior, Media e Inferior.

## **Parámetros de la sub-cuenca**

Las siguientes secciones incluyen una breve descripción de los parámetros físicos, sus valores y su significado como datos de entrada para el modelo hidrológico.

### **Estrato superior de follaje**

El almacenamiento del estrato superior de follaje (“canopy” en inglés) determina la cantidad de precipitación interceptada por la vegetación. Toda la evapotranspiración potencial es usada para vaciar el almacenamiento del estrato superior de follaje hasta que el almacenamiento del agua es agotado. La evapotranspiración potencial es multiplicada por el coeficiente de cultivo para determinar la cantidad de evapotranspiración a partir del almacenamiento del estrato superior. El almacenamiento del estrato superior limita la cantidad de precipitación que estará disponible como escorrentía. Valores más bajos del almacenamiento del estrato superior produce mayores volúmenes de escorrentía. Por ello, es necesario que los datos de entrada respectivos al almacenamiento del estrato superior sean precisos para cada sub-cuenca (HEC, 2016).

Para el modelo Dulcepamba, el método simple del estrato superior fue el más apropiado por dos razones: los datos de la cobertura de vegetación disponibles y la integración ininterrumpida con el método de pérdida de velocidad con déficit constante (“deficit constant loss rate method” en inglés). Se requieren dos parámetros para los datos de entrada del modelo: porcentual de almacenamiento inicial y máximo almacenamiento. El almacenamiento máximo es la profundidad máxima efectiva de agua disponible en el almacenamiento del estrato superior, y el porcentaje inicial de almacenamiento establece

la profundidad de llenado del almacenamiento al comienzo de la simulación. El almacenamiento máximo del estrato superior en una sub-cuenca varía dependiendo de la cobertura de tierra y el tipo(s) de vegetación dentro de los límites de la sub-cuenca (Dunne & Leopold, 1978). El almacenamiento máximo del estrato superior y el coeficiente de cultivo usados en el modelo fueron determinados por los shapefiles de la cobertura de cultivos y uso de tierra, facilitados por el Equipo del Proyecto Dulcepamba y el gobierno municipal y por imágenes ráster facilitados por la compañía PlanetLabs a través de su Programa Embajadores del Planeta.

## **Superficie**

El almacenamiento superficial mide la cantidad de precipitación y escorrentía que se está almacenado en las depresiones superficiales del terreno. La escorrentía superficial empezará cuando la velocidad de precipitación exceda la velocidad de infiltración y el almacenamiento superficial llegue a su límite. La precipitación almacenada en la superficie puede infiltrarse cuando el suelo tenga la capacidad de aceptar agua, o puede ser liberada a través de la evaporación. El almacenamiento de superficie funciona de manera similar al almacenamiento del estrato superior. Volúmenes menores del almacenamiento superficial producirán mayores volúmenes de escorrentía. De la misma manera, es también necesario estimar un valor preciso del almacenamiento superficial para que el modelo pueda predecir de forma precisa de la escorrentía superficial.

Se requieren dos parámetros para los datos de entrada del modelo: porcentaje de almacenamiento inicial y máximo almacenamiento. El máximo almacenamiento es la profundidad máxima efectiva de agua disponible en el almacenamiento superficial, y el

porcentaje de almacenamiento inicial define la profundidad de llenado del almacenamiento al comienzo de la simulación. El máximo almacenamiento de superficie en una sub-cuenca depende de la pendiente topográfica de sus laderas y de su cobertura de tierra (Bennett, 2000). Para el modelo Dulcepamba, se usaron datos topográficos y un modelo de elevación digital para estimar la pendiente media para cada sub-cuenca, mientras que los shapefiles del uso del suelo e imágenes tipo ráster se usaron para estimar la cobertura de tierra.

## **Métodos de pérdida**

Un método de pérdida es necesario y describe la cantidad de precipitación que se infiltra en el suelo en cada sub-cuenca. Este método impacta en la escorrentía superficial producida en el modelo, ya que se determina cómo la sub-cuenca absorbe, procesa y libera la precipitación al suelo y del suelo. Cuando el suelo ha alcanzado su capacidad de infiltración, toda la precipitación líquida se convierte en escorrentía superficial.

Dado los datos disponibles sobre el suelo y su uso y los intervalos de simulación, el método de déficit constante fue definido como el más apropiado para el modelo Dulcepamba. El modelo de déficit constante usa un solo estrato de suelo para contabilizar los cambios continuos en contenido de humedad, incluyendo la evapotranspiración al estrato superior y la percolación cuando el suelo está completamente saturado. Para este método, son necesarios tres parámetros como datos de entrada: déficit inicial, déficit máximo y velocidad constante. El déficit inicial es la condición inicial para este método que refleja la profundidad efectiva de agua necesaria para llenar el almacenamiento máximo de el estrato de suelo. El déficit máximo especifica la profundidad efectiva de agua

que el estrato de suelo puede retener. La velocidad constante define la velocidad con el que el agua es desplazada del almacenamiento cuando el estrato de suelo se encuentra saturado (HEC, 2016).

## **Transformación**

El método de transformación calcula el desarrollo cronológico y almacenamiento de la escorrentía superficial dentro de los límites de una sub-cuenca. Este parámetro define cómo y cuándo el exceso de precipitación se convierte en escorrentía superficial. El método de transformación controla el desarrollo cronológico y la distribución del caudal de escorrentía superficial. El método Hidrograma de Unidad Clark (CUH, por sus siglas en inglés) fue seleccionado para el modelo Dulcepamba porque puede ser calibrado fácilmente y precisamente. El programa desarrolla una hidrográfica de transformación (el tiempo de concentración) resultante de una tromba de precipitación. Esta transformación está direccionada a través de un reservorio lineal para contar los efectos de la atenuación del almacenamiento a través de la sub-cuenca (coeficiente de almacenamiento) (HEC, 2016). Tanto el tiempo de concentración como el coeficiente de almacenamiento son necesarios como datos de entrada. Los valores dependen en gran parte del área de la sub-cuenca y su pendiente, y ambos son determinados a través de la calibración del modelo.

## **Caudal de base**

El cálculo del caudal de base es necesario para definir la interacción entre la infiltración y la escorrentía superficial de agua transferida a la subsuperficie. El caudal de base producido por el modelo simula el caudal en la cuenca durante periodos secos, y

cómo el caudal en la cuenca se reajusta después de los caudales de tormenta (HEC, 2016). El método llamado recesión de caudal de base fue escogido para el modelo Dulcepamba por su simplicidad, desempeño e interpretación precisa del comportamiento histórico observado por el caudal de base. En el método de caudal de base se requieren tres parámetros como dato de entrada: caudal de base inicial, constante de recesión y ratio de reajuste. El caudal de base inicial se calculó como descarga inicial por área, ya que este método permite la calibración simple de los datos observados. La constante de recesión es un valor calibrado que describe la velocidad con la que el caudal de base retrocede entre eventos de tormentas. Finalmente, el método de ratio a pico fue elegido para determinar cuándo el caudal de base es reajustado después de un evento de tormenta.

## **Red de caudales**

La red de caudales actúa como el esqueleto del modelo que conecta los elementos hidrológicos en una representación del sistema de escorrentías superficiales en la cuenca. El caudal de un elemento al siguiente es computado por uno de los métodos de direccionamientos disponibles para simular el caudal de cauce abierto (HEC, 2016). En varios de los tramos muy cortos en la cuenca del Dulcepamba, se aplicó el método de atraso de direccionamiento, ya que dicho método sólo requiere el tiempo de viaje y no tiene en cuenta la atenuación o la difusión. Para los tramos más largos, los datos físicos y las secciones transversales de los ríos aportan suficientes datos de entrada para usar el método de direccionamiento Muskingum-Cunge. Este método requiere la longitud total del tramo, la pendiente media, el coeficiente de rugosidad de Manning medio ( $n$ ) para el cauce y las márgenes del río, forma y geometría de la sección transversal y el ratio del pendiente lateral.

## Fuentes

Una fuente es un elemento del modelo sin entrada de caudales y con una salida de caudales. Las fuentes son usadas típicamente para representar condiciones de contorno de modelos de cuenca, como el caudal de salida medido de reservorios o regiones de nacimiento de fuentes de agua no modelados (HEC, 2016). Para el modelo Dulcepamba, se usó una fuente para el afluente (Congon Tendal) que se une al río justo al norte de Santo Pablo de Amalí. Aunque están disponibles varias mediciones de la descarga instantánea para este afluente, no fue suficiente para completamente calibrar los datos de entrada utilizables para la sub-cuenca. Sin embargo, dada la proximidad del pueblo, se determinó que se necesitaba incluir estos caudales. Dados los datos disponibles, se estimó una descarga de 4.0 m<sup>3</sup>/s para las inundaciones y una descarga de 2.2 m<sup>3</sup>/s para el periodo de simulación de registro.

## Depresiones

Una depresión es un elemento del modelo con uno o más caudales de entrada pero no de salida. Las depresiones son usadas normalmente para representar el punto más bajo de un drenaje interior o la desembocadura de un modelo de cuenca (HEC, 2016). Para el modelo de la cuenca de Dulcepamba, se definió una depresión en la localización del caudal de salida de la planta hidroeléctrica Hidrotambo. Para el objetivo del estudio hidrológico, el caudal de salida de dicha planta hidroeléctrica es considerado como la desembocadura de la cuenca. Esta configuración si aporta los datos de caudal necesarios en esta localización del río, sin necesitar cálculos adicionales e innecesarios aguas abajo.

## **Calibración del modelo**

Se calibró el modelo HEC-HMS para los eventos de precipitación-escorrentía históricos y para los datos del periodo de registro. Se ajustaron los parámetros del modelo (dentro de los límites aceptados conocidos) hasta que el modelo reprodujo, tan preciso como posible, la descarga observada en los sitios disponibles de las estaciones hidrológicas.

## **Estudios de eventos históricos**

Se modelaron varios eventos históricos como medio para refinar más a fondo los parámetros de calibración y demostrar la precisión del modelo. Se completaron estudios de los eventos de escorrentía en abril de 1970, marzo de 1989, enero de 1993, febrero de 2008 y febrero de 2017. Se eligieron estos eventos para demostrar la respuesta del modelo a un rango de condiciones hidrológicas y meteorológicas. Se ajustaron ligeramente parámetros del modelo relacionados al nivel de caudal de base y condiciones de humedad del suelo sólo para reflejar las condiciones anteriores de la cuenca para cada ejecución de la simulación. Se ejecutaron todas las simulaciones con una frecuencia diaria para aportar una comparación apropiada para los datos de caudales observados que se encontraban disponibles.

## **Estudio del registro histórico**

Se completó un estudio del periodo de registro (simulación continua) con dos objetivos. El primero fue determinar los valores de referencia para los parámetros del modelo que produjeron resultados precisos de dicho modelo cuando fueron comparados con los caudales históricos observados en Sicoto y San José del Tambo. La Tabla 2 agrupa

el resumen de los valores finalizados de los parámetros del modelo. El segundo objetivo fue llevar a cabo un análisis de la frecuencia de crecidas en San Pablo de Amalí mediante el desarrollo de un hidrograma histórico. Se completó una simulación para el periodo de registro desde el 1 de enero de 1969 hasta el 31 de diciembre de 2016. Se produjeron los resultados con una frecuencia diaria para poder compararlos adecuadamente con los datos históricos disponibles.

Tabla 2. Parámetros del modelo hidrológico

Parámetro	Sub-cuenca		
	Superior	Media	Inferior
Area (km <sup>2</sup> )	221.5	204.1	48.2
Max Almacen. Estrato Superior (mm)	3	3	-
Max Almacen. Superficial (mm)	3	4	-
Max Déficit (mm)	18	20	18
Velocidad de Pérdida Constante (mm/h)	3.3	2.6	2.7
% Impermeabilidad	4	6	6
Tiempo de concentración (horas)	5	7	6
Coeficiente de almacenamiento (horas)	22	25	15
Constante de recesión del caudal de base	0.95	0.95	-
Ratio del caudal de base	0.5	0.45	-

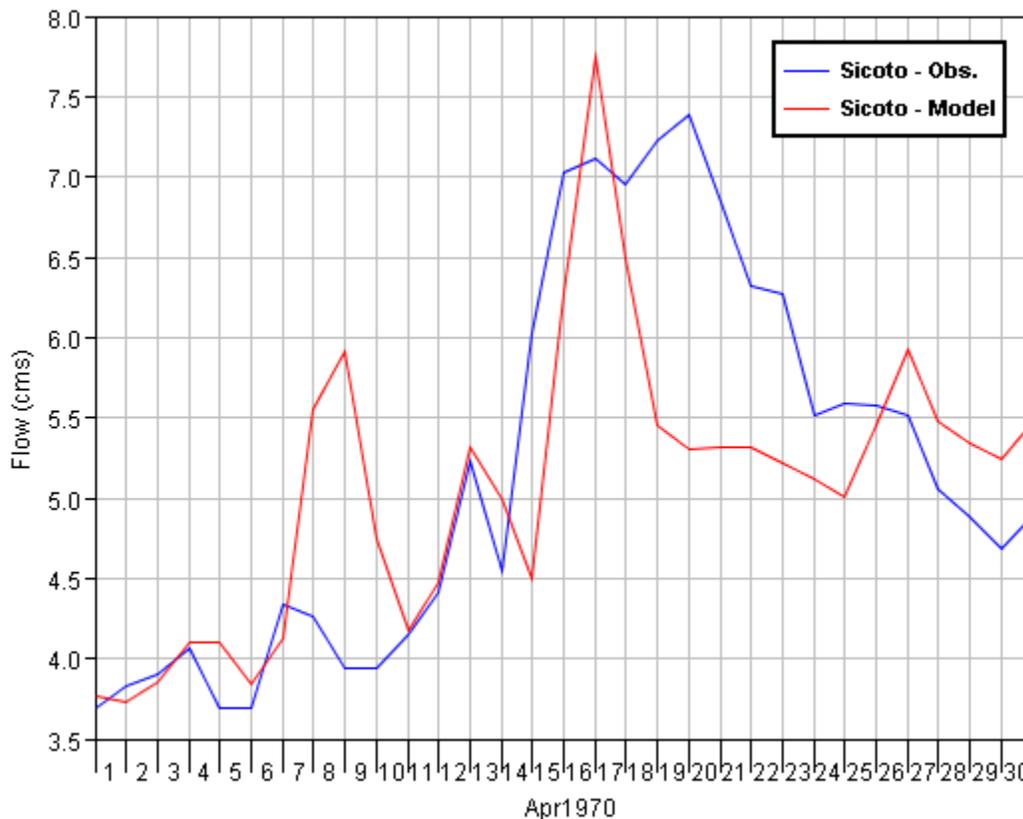
## **Resultados y discusión**

A continuación, se presentan y se analizan los resultados de la calibración de los eventos, la simulación continua y la inundación de marzo de 2015.

### **Eventos de escorrentía de abril de 1970, marzo de 1989, enero de 1993 y febrero de 2008**

La simulación de abril de 1970 arranca el día 1 de abril de 1970 y llega hasta el 30 de abril de 1970, con una frecuencia diaria. Los resultados observados estuvieron

disponibles para Sicoto y para San José del Tambo. La Figura 6 y Figura 7 muestran los hidrogramas de los caudales observados y modelados para ambas localizaciones, respectivamente. El desarrollo y la magnitud de algunos datos de precipitación no son perfectos, ya que el modelo genera caudales menores a los observados en Sicoto entre el 18 y 23 de abril, un pico temprano el día 16 y un pico mayor que el observado el día 8. Sin embargo, el modelo genera un valor preciso para la magnitud del pico de caudal (error del 5.41%), y aporta un buen calculo para el caudal total (error del 2.27%). La Tabla 3 muestra los datos del análisis de error.



**Figura 6. Evento de abril de 1970 - Caudal en Sicoto.**

Los resultados modelados en San José del Tambo también mantuvieron una buena concordancia con los valores observados tanto para el primer pico de caudal (3.14% de error) como para el volumen de caudal global (error del 2.34%). Los datos de precipitación vuelven

a sugerir que la magnitud es menor a la esperada para el periodo del día 11 a 19 de abril. De la misma forma, el caudal modelado para el segundo y tercer pico de caudal es menor de lo observado. Sin embargo, el caudal modelado se encuentra aún dentro de la misma magnitud de lo observado y demuestra un comportamiento de caudal similar.

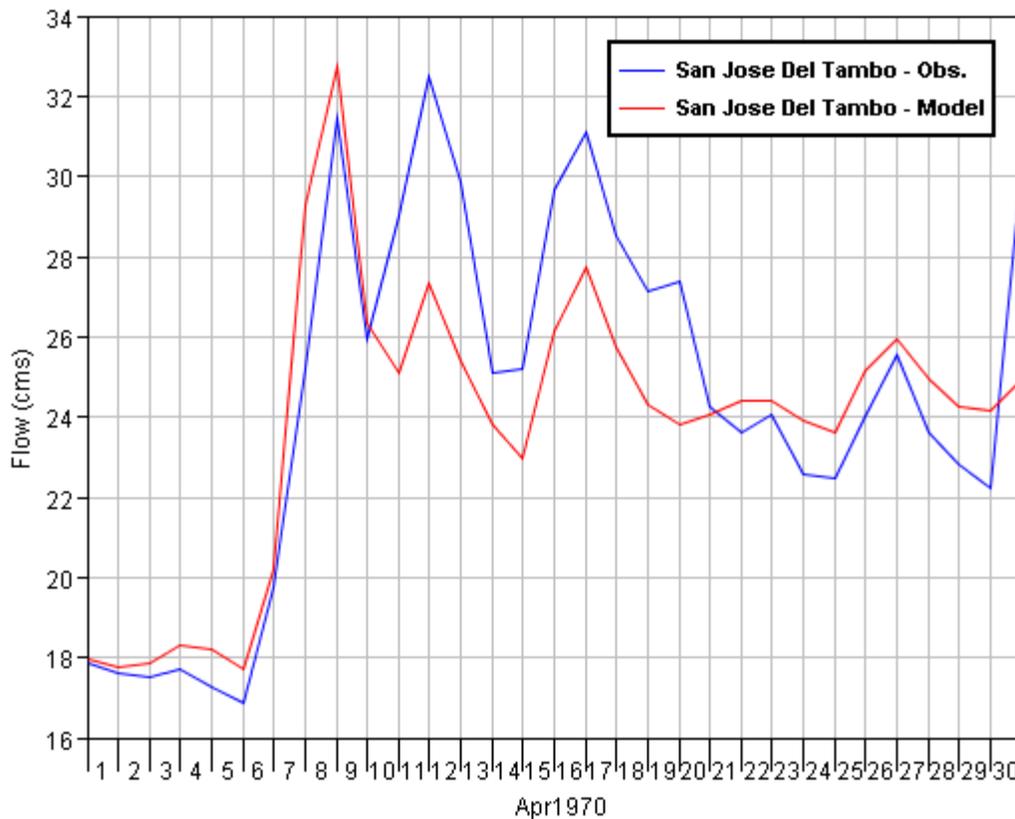
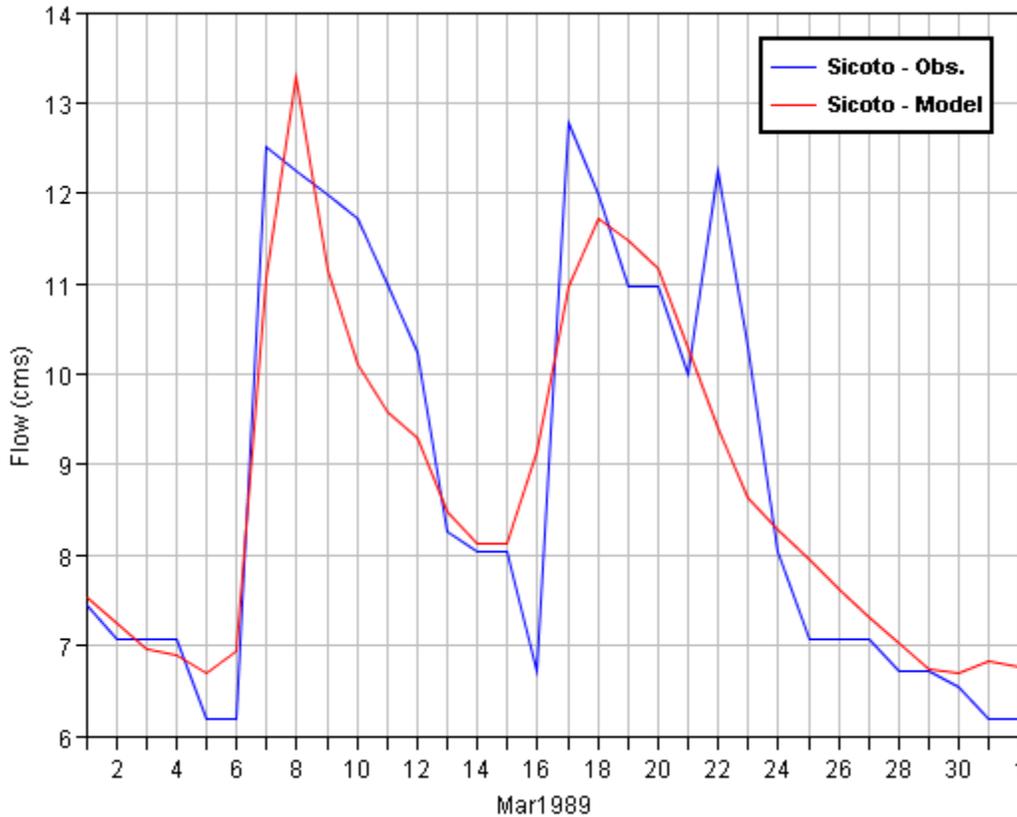


Figura 7. Evento de abril de 1970 – Caudal en San José del Tambo.

La simulación de marzo de 1989 arranca el 1 de marzo de 1989 y llega hasta el 31 de marzo de 1989, con una frecuencia diaria. Los resultados observados se encontraron disponibles sólo para Sicoto, y la Figura 8 muestra la comparación entre los hidrogramas modelados y observados. Se escogió este evento para representar la habilidad del modelo para manejar eventos con picos dobles, así como demostrar la precisión del modelo en cuanto al cálculo de volúmenes. Los resultados del modelo presentan buena concordancia con los caudales observados, con sólo 6.4% de error en la magnitud del

pico, y 1.24% de error en el caudal total. El modelo también demuestra un comportamiento comparable de las recesiones del pico de caudal y de la magnitud del caudal de base. La Tabla 3 recoge los datos del análisis de error.



**Figura 8. Evento de marzo de 1989 - Caudal en Sicoto.**

La simulación de 1993 arranca el 1 de enero de 1993 y llega hasta el 24 de enero de 1993, con una frecuencia de tiempo diaria. Los resultados observados sólo estaban disponibles para Sicoto y la Figura 9 muestra la comparación entre los hidrogramas modelados y observados. Este evento demuestra la habilidad del modelo para simular eventos de caudales bajos, además de demostrar la modelación de caudales de bases. Aunque la cronología del pico es ligeramente imprecisa, la magnitud del mismo pico modelado es altamente precisa, con un error del 0%. El volumen del caudal tiene un error del 19.95%, aunque hay que destacar que las diferencias en caudal para un evento pequeño tienen un

error relativamente muy superior. De nuevo, el modelo imita razonablemente el patrón del evento y también demuestra una recesión y comportamiento del caudal de base apropiado. La Tabla 3 recoge los datos del análisis de error.

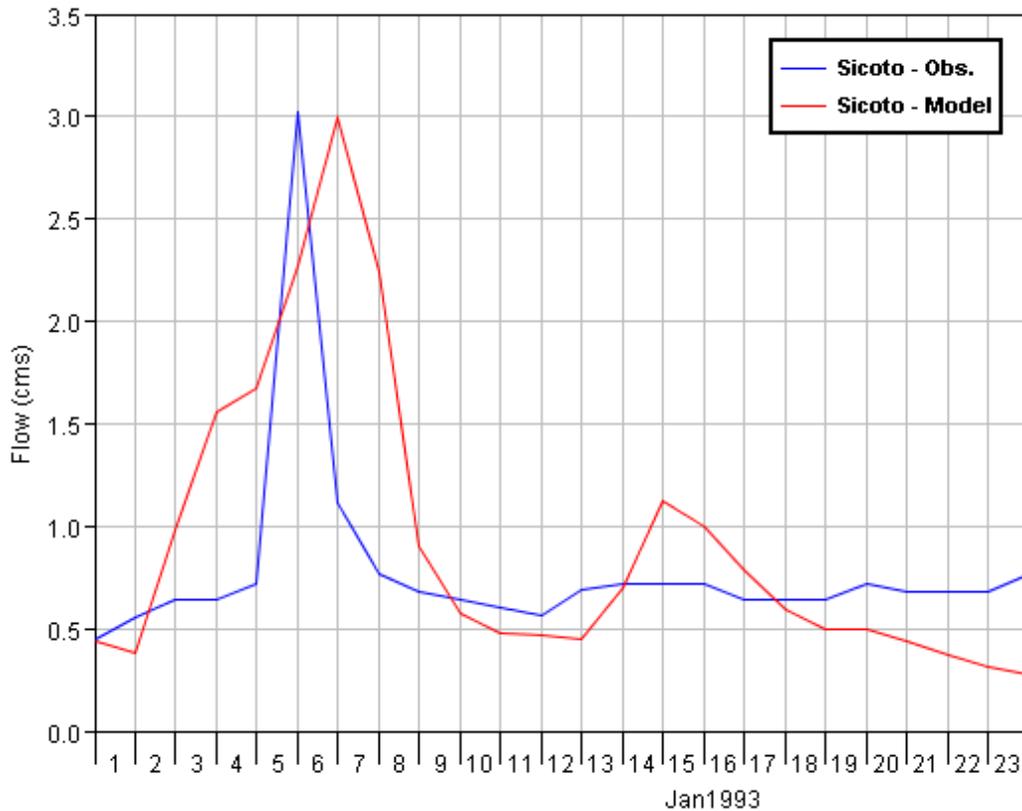


Figura 9. Evento de enero de 1993 - Caudal en Sicoto.

La simulación de febrero de 2008 arranca el 1 de febrero de 2008 y llega hasta el 29 de febrero de 2008 con una frecuencia de tiempo diaria. Los resultados observados sólo estaban disponibles para Sicoto, y la Figure 10 muestra la comparación entre los hidrogramas modelados y observados. Este evento fue el segundo mayor pico entre los registros históricos para esta estación hidrológica. De forma parecida a los otros eventos modelados, el modelo simula de manera precisa el caudal de base, comportamiento de la recesión y la magnitud del pico de caudal (error del 7.75%). El volumen del caudal modelado tiene una imprecisión del 9.15%, un error que parece ser debido en su mayor parte a los datos que

“faltan” de la precipitación y de las bajas magnitudes del caudal en los días 14, 15 y 19 de febrero. Aunque el desarrollo cronológico del pico de caudal presenta una imprecisión de dos días, el modelo sigue el patrón general del evento. Existe también alguna cuestión sobre la precisión de los datos observados. El comportamiento no es típico de otros caudales de la cuenca.

La Tabla 3 recoge los datos del análisis de error.

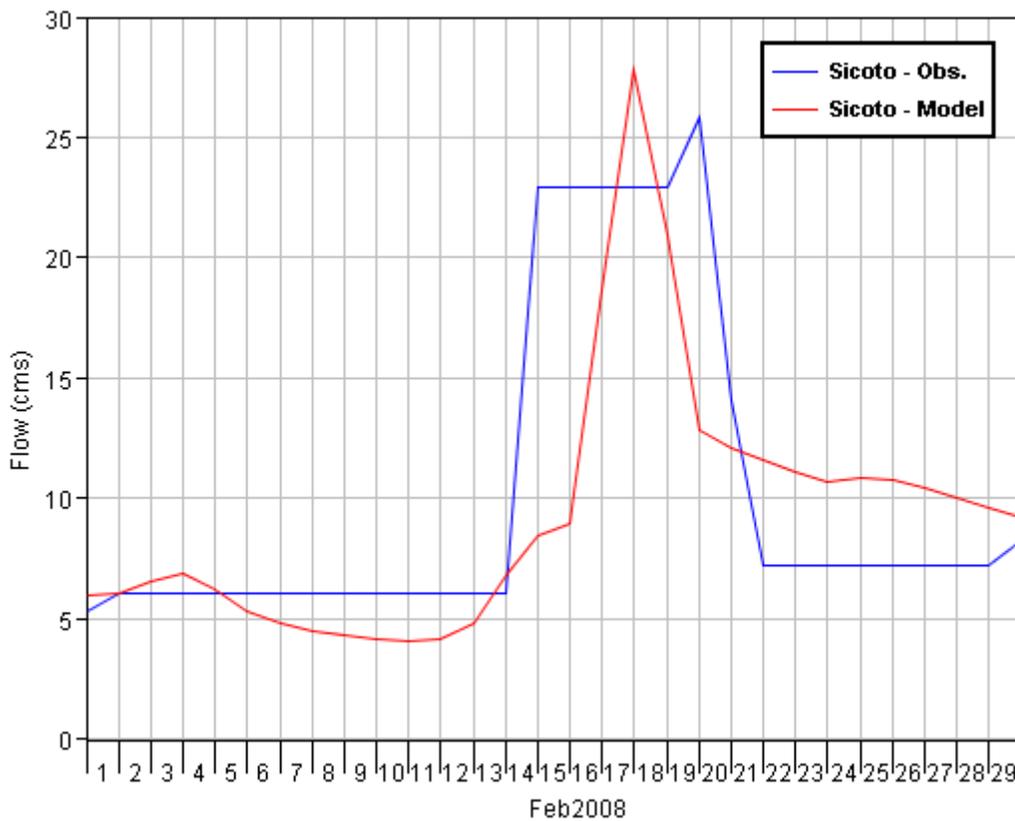


Figure 10. Evento de febrero de 2008 – Caudal en Sicoto.

La Tabla 3 recoge el valor de pico del caudal y el caudal total para cada evento de calibración, incluyendo el evento de marzo de 2015. Como se puede ver en los hidrogramas de cada evento, el modelo produce consistentemente un valor preciso para el pico de

caudal, comparado con el caudal observado. El volumen total del caudal es también modelado con una precisión más que aceptable. Como se destacó previamente, el desarrollo cronológico del caudal de pico modelado mostró una ligera imprecisión para alguno de los eventos. Esto es probablemente un resultado del error en los datos de precipitación y de caudales, disponibilidad pobre de datos (sólo se dispone de datos diarios), o errores en el modelo meteorológico. Para algunos de los eventos, los datos de precipitación estuvieron disponibles sólo para un sitio de estación pluviométrica, lo que implica errores de magnitud y de desarrollo cronológico en el modelo meteorológico. A pesar de esto, los resultados de estas simulaciones demuestran la habilidad del modelo para replicar, de manera precisa y realista, los hidrogramas de caudales observados y la magnitud de los picos de caudal.

El resultado de todas estas simulaciones de eventos es que el modelo calcula con éxito los caudales de pico y determina los periodos de retorno de la inundación para la cuenca del río Dulcepamba.

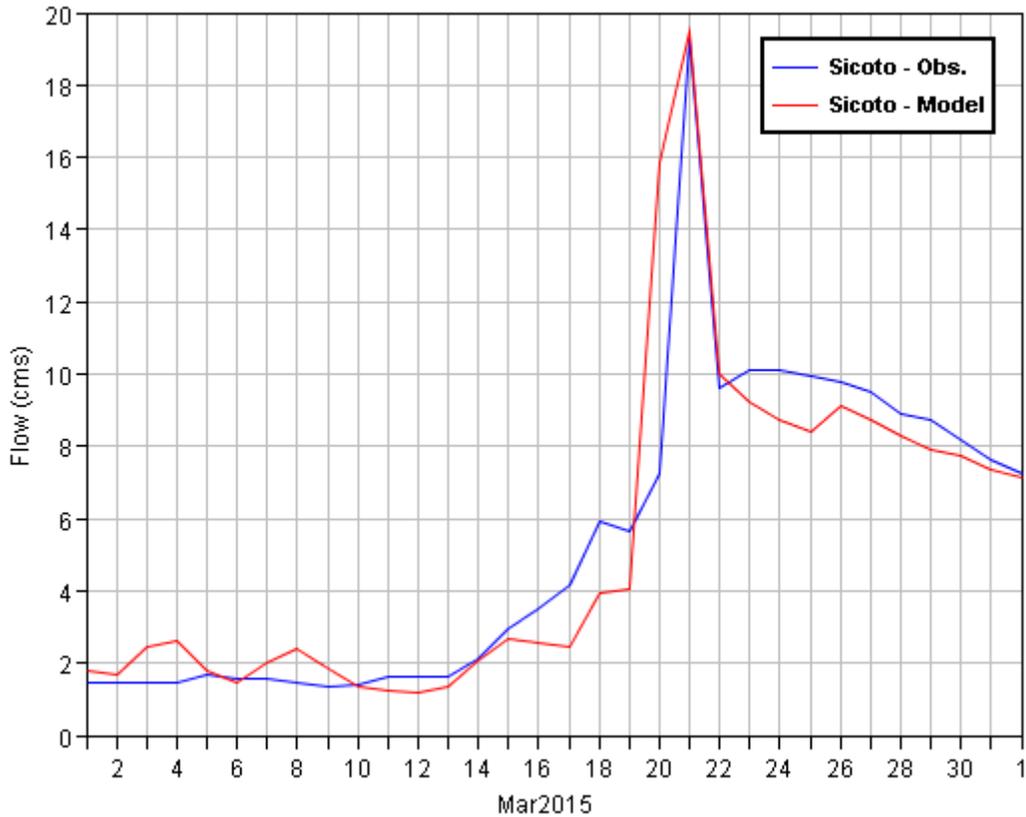
Evento	Descarga en Sicoto					
	Pico computado (cms)	Pico observado (cms)	Error	Volumen computado (1000 m <sup>3</sup> )	Volumen observado (1000m <sup>3</sup> )	Porcentaje de error
Abril 1970	7.8	7.4	5.41%	13195	13501	2.27%
Marzo 1989	13.3	12.5	6.40%	23532	23827	1.24%
Enero 1993	3.0	3.0	6.67%	1870	1559	19.95%
Febrero 2008	27.8	25.8	7.75%	23445	25807	9.15%
Marzo 2015	19.5	19.2	1.56%	14217	14340	0.86%
<b>Descarga en San José del Tambo</b>						

Evento	Pico computado (cms)	Pico observado (cms)	Error	Volumen computado (1000 m <sup>3</sup> )	Volumen observado (1000m <sup>3</sup> )	Porcentaje de error
Abril 1970	32.7	31.7	3.15%	61933	63420	2.34%

Tabla 3. Análisis del error en las calibraciones de eventos

### Inundación de marzo de 2015

Subsecuente a la calibración, el modelo fue configurado para ser ejecutado en el periodo comprendido entre el 1 de marzo de 2015 y 31 de marzo de 2015, que comprende el evento de la inundación de marzo de 2015. Los resultados del modelo fueron de nuevo generados con una frecuencia diaria para ofrecer una comparación adecuada al ser comparada con los datos disponibles la estación hidrológica situada en Sicoto. La Figura 11 presenta los modelos hidrogramas observados y modelados. Se modeló el mes entero para demostrar lo siguiente: interpretación del modelo de condiciones anteriores en la cuenca, respuesta a condiciones anteriores a la tormenta, respuesta al evento de pico y recesión del caudal después de la tormenta. El modelo produce resultados altamente precisos para dicho evento en la estación hidrológica de Sicoto. El error del pico de caudal es sólo del 1.56%, el del volumen total de caudal de 0.86%. El modelo refleja con precisión el desarrollo del evento y de la recesión del caudal.



**Figura 11. Inundación de marzo de 2015 - Caudal en Sicoto.**

La Figura 12 muestra el hidrograma modelado en San Pablo de Amalí. Los resultados en esta representación están también fijados con una frecuencia diaria. Se ejecutó una simulación adicional para el mismo periodo de tiempo, lo que resultó en una frecuencia horaria para usar como datos de entrada al modelo hidráulico, la descripción y resultados serán revisados en mayor detalle posteriormente en este informe. Los datos del análisis de error de los resultados del modelo están disponibles en la Tabla 3. Los resultados en Amalí siguen un patrón similar al hidrograma de Sicoto, aunque con una magnitud del caudal mayor, como es de esperar.

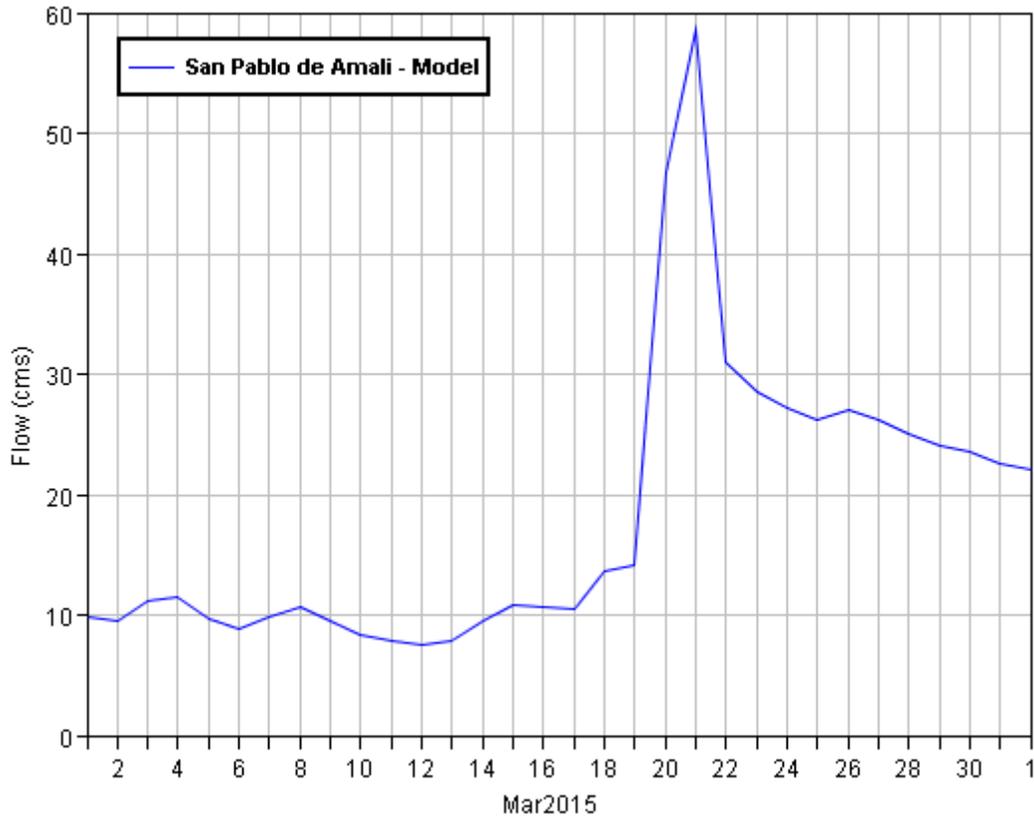
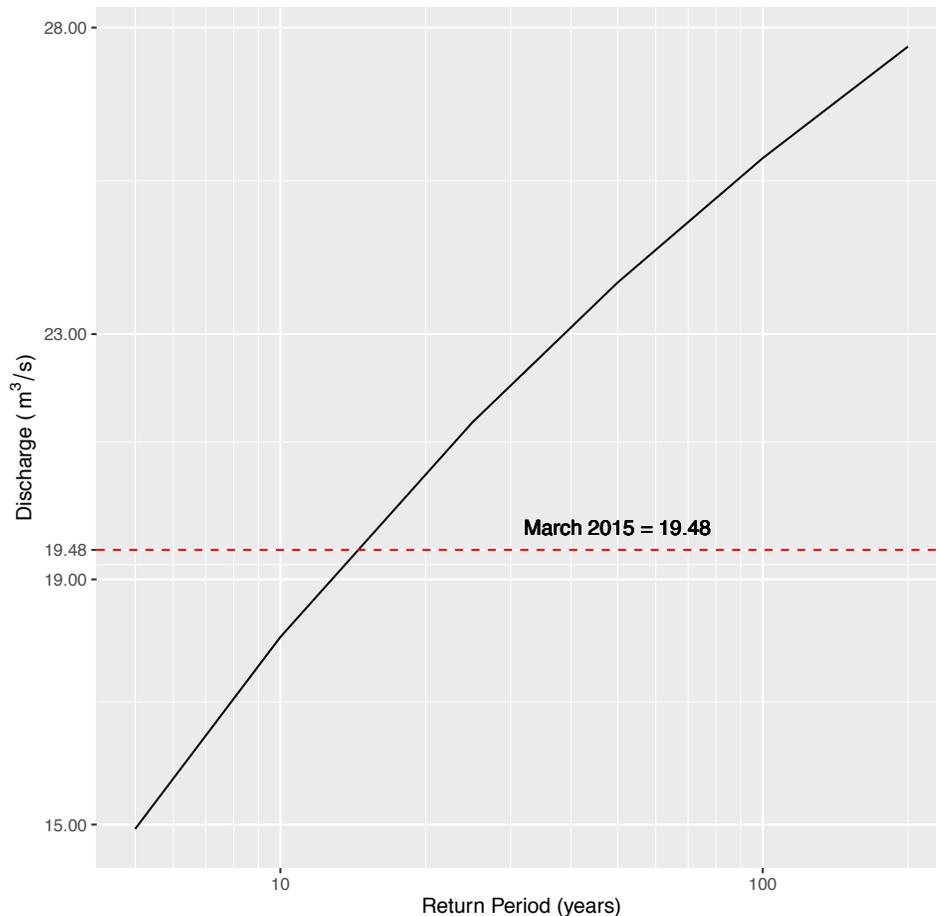


Figura 12. Inundación de marzo de 2015 - Caudal en San Pablo de Amali.

### Registro histórico

La Distribución de Log-Pearson III es usada comúnmente para ajustar los datos de distribución de frecuencia apropiados para predecir la crecida de diseño de un río. Una vez que el análisis está completo, se extraen directamente de la curva (OSU, 2005) las probabilidades de crecidas de varias magnitudes. Se computó una Distribución Log-Pearson III para los datos observados en Sicoto con el objetivo de determinar el periodo de retorno esperado para varias inundaciones en Sicoto. Los resultados, mostrados en la Figura 13 y Tabla 4, sugieren un periodo de retorno de 15 años para el evento de marzo de 2015. Mientras que el periodo de retorno es mayor al calculado por Amalí, el caudal en Sicoto el día 20 de marzo de 2015 fue significativamente menor al caudal de registro (el mayor caudal registrado), observado el 28 de

marzo de 1983 (26.94 cms), y el evento reciente del día 19 de febrero de 2008 (25.84 cms). Los daños resultantes de estos dos eventos ni se acercan a lo ocurrido en marzo de 2015.



**Figura 13. Relación de la frecuencia de las inundaciones en Sicoto de los datos observados, picos de caudal anuales, 1969-2016.**

Según mencionado anteriormente, uno de los objetivos principales de la simulación del registro histórico fue generar un hidrograma histórico para San Pablo de Amalí. Después de completar la calibración del registro histórico, se calculó el pico de caudal diario para cada año de análisis (1969 - 2016). Se completó entonces un análisis de la frecuencia de crecidas para los picos de caudal usando una Distribución Log-Pearson Tipo III (Figura 14; Tabla 4). Para el evento de marzo de 2015, el análisis de frecuencia completado en este estudio indica un periodo de retorno de unos 6 años para el caudal de

San Pablo de Amalí (estación hidrológica para el modelo de Dulcepamba-Salunguiri). Este es un periodo de retorno más bajo que el sugerido por el registro histórico en Sicoto, y además confirma las declaraciones de testigos presenciales y otros reportajes locales que afirman que el evento de marzo de 2015 no fue una tormenta extraordinaria.

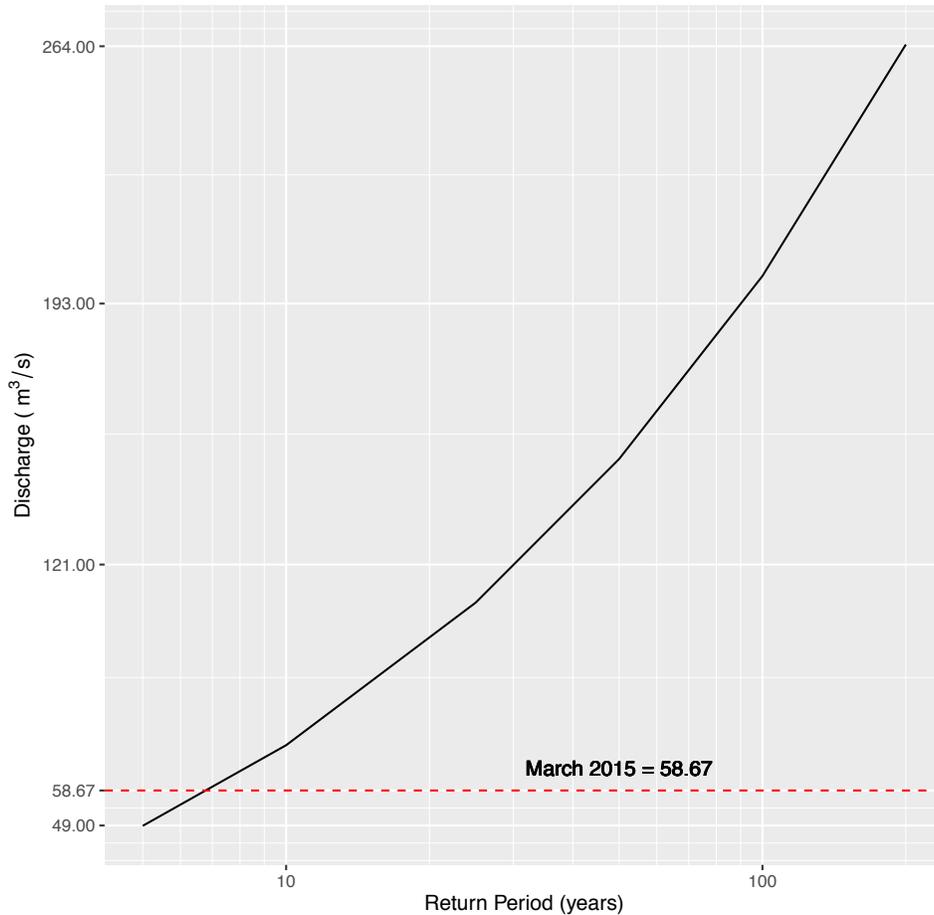


Figura 14. Relación entre la frecuencia de crecidas de Amalí y los datos modelados, picos de caudal anuales, 1969-2016.

Tabla 4. Periodos de retorno de las crecidas de Sicoto y Amalí

Localización	Porcentaje de probabilidad de eventos de exceso (caudal cms)						
	50% (2años)	20 % (5años)	10 % (10años)	4% (25años)	2% (50años)	1% (100años)	0.5% (200años)
Sicoto*	9.63	14.93	18.06	21.56	23.84	25.87	27.69
Amalí**	26.19	48.91	71.16	110.50	150.10	200.62	264.48

\*Datos observados

\*\*Datos modelados

Se usaron datos sintéticos de precipitación como datos de entrada para el modelo y así poder estimar la magnitud de lluvia necesaria para producir una escorrentía de 400 cms, según fijado en el informe de Hidrotambo S.A. Esta simulación concluyó que debería de haber llovido más de 300mm en un solo día. Tendría que mantenerse durante varios días una cantidad similar de lluvia para mantener la magnitud de este caudal durante 4 días.

### **Evento de febrero de 2017**

Una tormenta grande afectó a la mitad sur de la cuenca Dulcepamba en el día 11 de febrero de 2017. El pueblo de San Pablo de Amalí sufrió de nuevo importantes daños, aunque por suerte los residentes tuvieron un aviso suficiente para proceder a la evacuación y no se registraron pérdidas humanas. Se encuentran disponibles datos de precipitación y de descarga suficientes para completar la ejecución de la simulación para este evento. Sin embargo, la estación de descarga en San Pablo de Amalí fue barrida por el alto caudal en la noche del 11 de febrero y únicamente se encontraron disponibles datos diarios en este periodo de tiempo. Se completó la ejecución de la simulación mediante el modelo de Dulcepamba entre el día 25 de enero y 20 de febrero de 2017, con una frecuencia diaria. En la Figura 15 y Figura 16 se muestran representaciones de los hidrogramas en Sicoto y San Pablo de Amalí. Este evento estuvo limitado en gran parte a la mitad sur de la cuenca Dulcepamba. Por ello, se generó poca escorrentía cerca de la estación Sicoto. La discrepancia entre el caudal modelado y observado en Sicoto es probablemente porque los

valores de caudales para este periodo fueron estimados usando una ecuación altura-caudal y no hubo medidas directas. Sin embargo, el modelo produce resultados buenos en San Pablo de Amalí cuando se compara con lo observado. Aunque los datos observados en Amalí son medidas instantáneas y los resultados del modelo son una media diaria, el modelo simula caudales con una magnitud apropiada, así como una tendencia hidrográfica correcta y respuesta a eventos de tormenta anteriores. El caudal de pico diario para este evento en San Pablo de Amalí fue de casi 20 m<sup>3</sup>/seg (cms) superior a los valores registrados durante el evento de marzo de 2015 y los caudales elevados duraron un mayor periodo de tiempo. Los resultados de esta simulación ofrecen más evidencias de dos hechos importantes relacionados con el evento de marzo de 2015. Primero, la tormenta y subsecuente pico en el caudal que viajó a través de San Pablo de Amalí en marzo de 2015 no fue excepcional. Segundo, dado el daño relativamente mínimo ocasionado durante el evento de febrero de 2017, la inundación de marzo de 2015 se vió probablemente agravada por complicaciones adicionales, como una obstrucción.

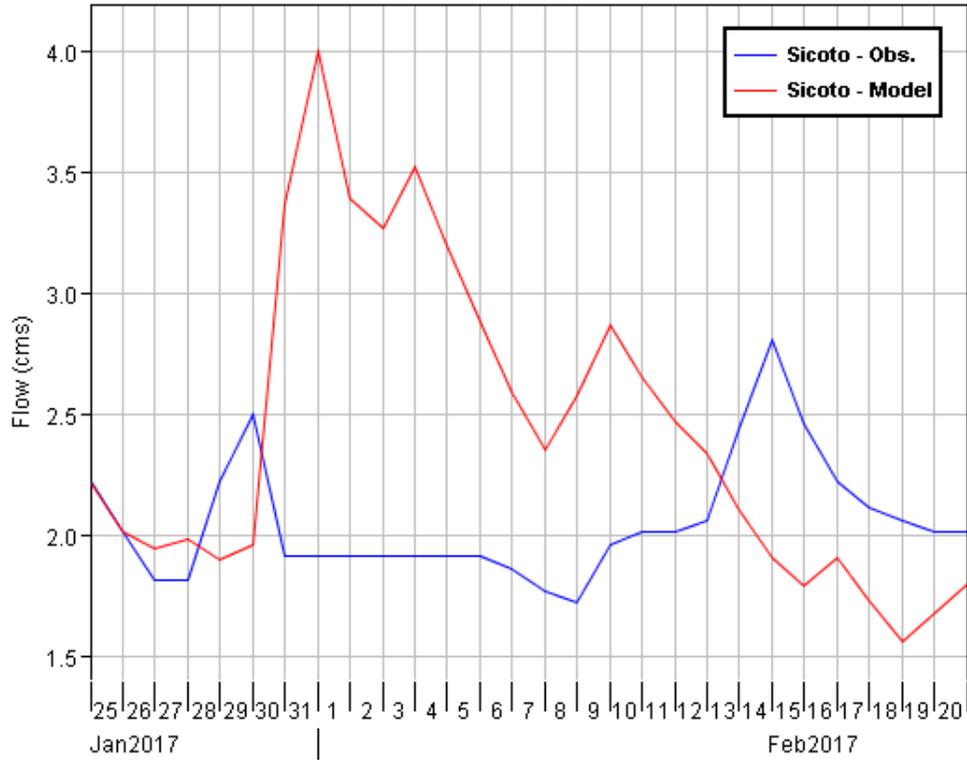


Figura 15. Inundación de febrero de 2017 – Caudal en Sicoto.

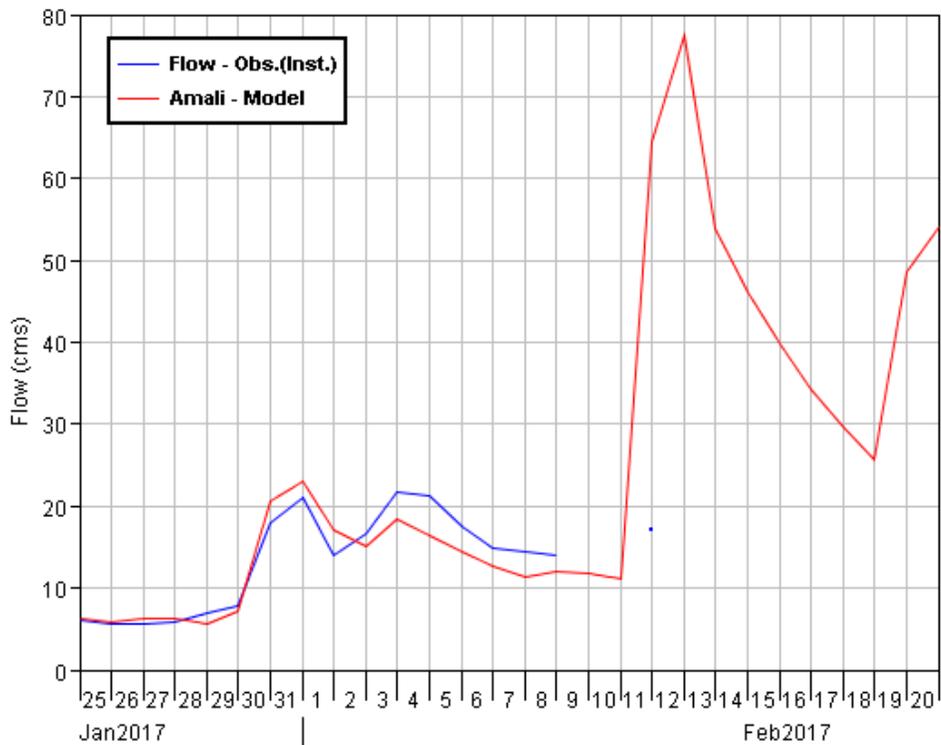
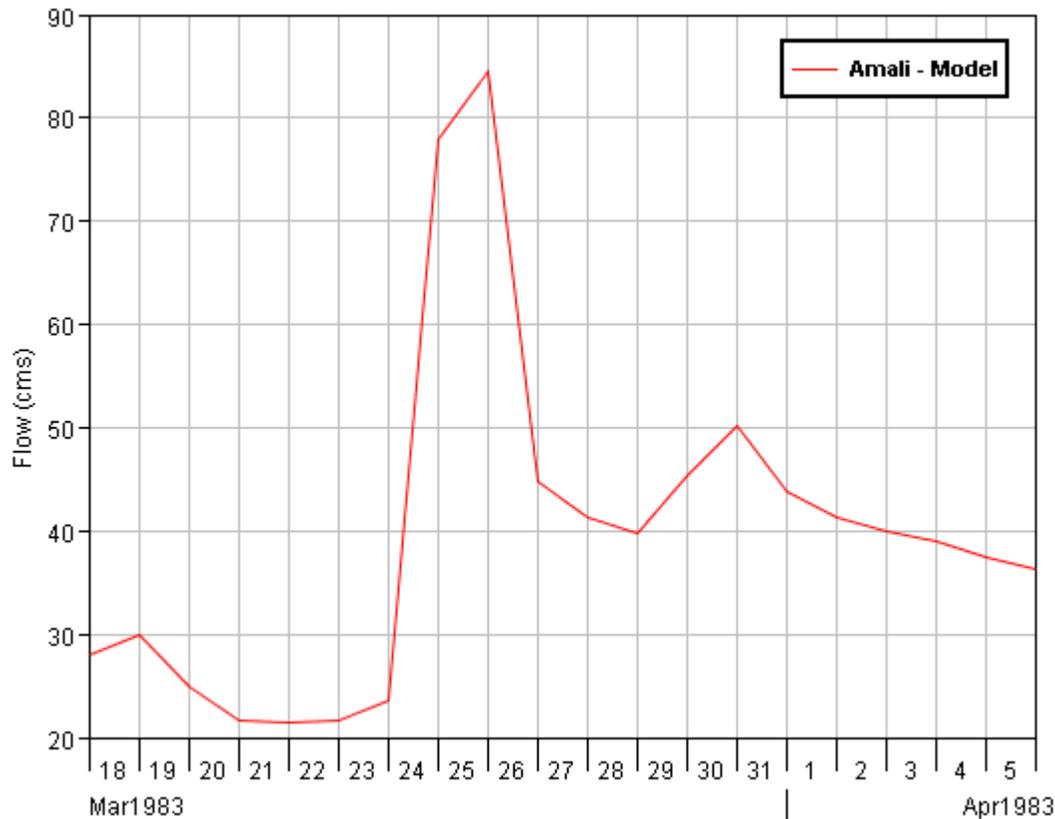


Figura 16. Inundación de febrero de 2017- Caudal en San Pablo de Amalí.

## ***Eventos históricos de caudales altos***

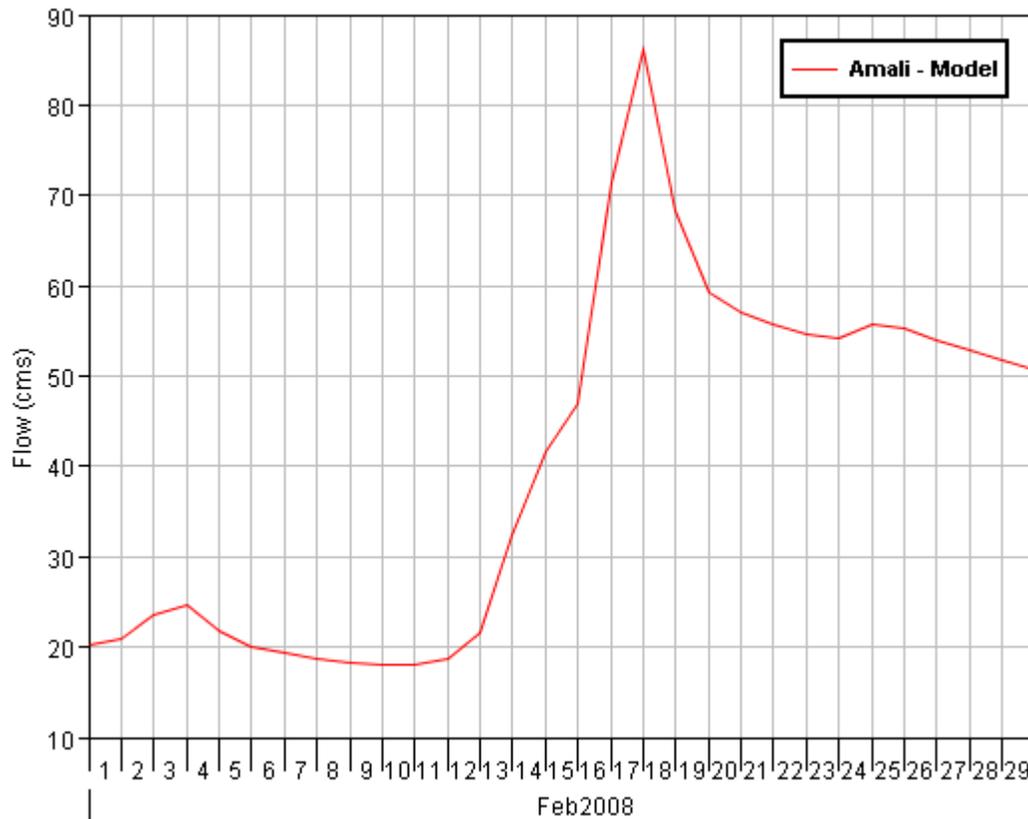
Para aportar una comparación adicional a la inundación de marzo de 2015, se han modelado varios eventos históricos con alto caudal. Las siguientes figuras incluyen hidrogramas de San Pablo de Amalí durante las inundaciones de marzo de 1983 febrero de 2008 y abril de 2010.

El evento de marzo de 1983 fue el de mayor caudal observado en el periodo de registro para la estación de Sicoto. La estación de San Pablo de Amalí fue modelada con una frecuencia de tiempo diaria a lo largo del periodo comprendido entre el 17 de marzo y 15 de abril de 1983, para demostrar los hidrogramas del pico de caudal y de recesión (Figura 17). El caudal de pico diario observado fue de 84.5 cms, significativamente superior al caudal observado durante el evento de marzo de 2015. El caudal estuvo por encima de 40 cms durante casi 10 días, pero siguió una recesión predecible comparado con otros grandes eventos de inundación.



**Figura 17. Evento de marzo de 1983 – Caudal en San Pablo de Amalí.**

El evento de febrero de 2008 fue el segundo de mayor caudal observado en el periodo de registro para la estación de Sicoto. La estación de San Pablo de Amalí fue modelada con una frecuencia de tiempo diaria a lo largo del periodo comprendido entre el 1 y 29 de febrero de 2008, para demostrar el hidrograma de pico de caudal y de recesión (Figura 18). El caudal de pico diario observado fue de 86.1 cms, de nuevo significativamente superior al caudal observado durante el evento de marzo de 2015. El caudal estuvo por encima de 50 cms durante unos 15 días, mayormente debido a la precipitación continua después del pico. A pesar del extenso periodo de caudales altos (cerca de los que hubo en el evento de marzo de 2015), no existen reportes de daños en o cerca del pueblo durante dicho evento.



**Figura 18. Evento de febrero de 2008 – Caudal en San Pablo de Amalí.**

El evento de abril de 2010 fue el quinto de mayor caudal modelado en el periodo de registro para San Pablo de Amalí. La estación de San Pablo de Amalí fue modelada con una frecuencia de tiempo diaria a lo largo del periodo comprendido entre el 5 y 30 de abril de 2010, para demostrar un evento con un hidrograma similar al evento de marzo de 2015 (Figura 19). El pico de caudal diario observado fue de 76.1 cms, de nuevo significativamente superior al caudal observado durante el evento de marzo de 2015. A pesar de la mayor magnitud, a este evento le siguió un patrón muy similar al del evento de marzo de 2015. De nuevo, no existen reportes de daños en o cerca del pueblo durante dicho evento.

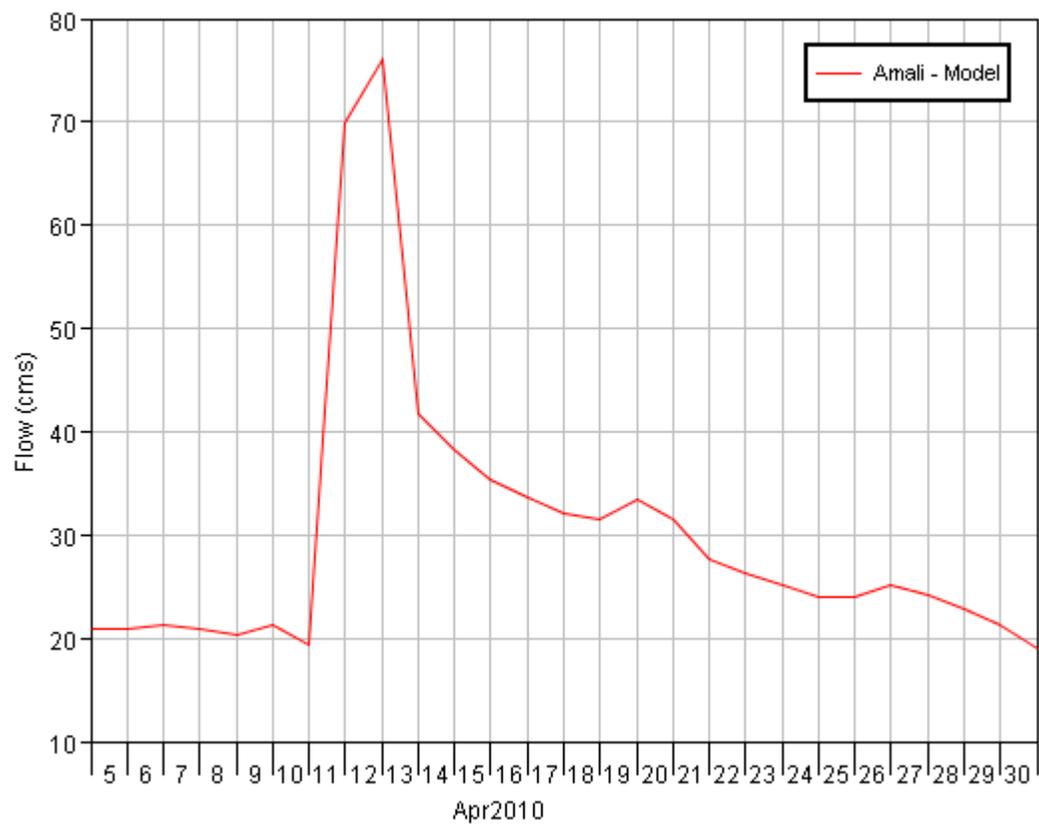


Figura 19. Evento de abril de 2010 - Caudal en San Pablo de Amalí.

## ***Estimación de la disponibilidad de agua y de condiciones de bajos caudales***

El modelo hidrológico de Dulcepamba puede ser usado también para estimar el caudal mensual y diario disponible para el desvío de agua. Se completó un análisis cíclico para las descargas modeladas en San Pablo de Amalí para niveles de exceso de la media, del 90% y del 10%, así como los caudales diarios medios y mensuales del periodo 1969-2016. La Figura 20 muestra los caudales de exceso para el 90% y 10%, junto con el caudal mensual medio en San Pablo de Amalí, mientras que la Tabla 5 indica el exceso de caudal del 90%, 10% junto con el caudal mensual medio en San Pablo de Amalí. Los valores de nivel de exceso describen la frecuencia con la que los caudales observados han sido mayores que los diferentes valores límites a lo largo del periodo de registro. Por ejemplo, un exceso de caudal del 90% para cualquier día es el caudal excedido, de media, en un 90% de los años. Análisis como este pueden potencialmente extenderse a otras localizaciones dentro de los límites de la cuenca del río Dulcepamba.

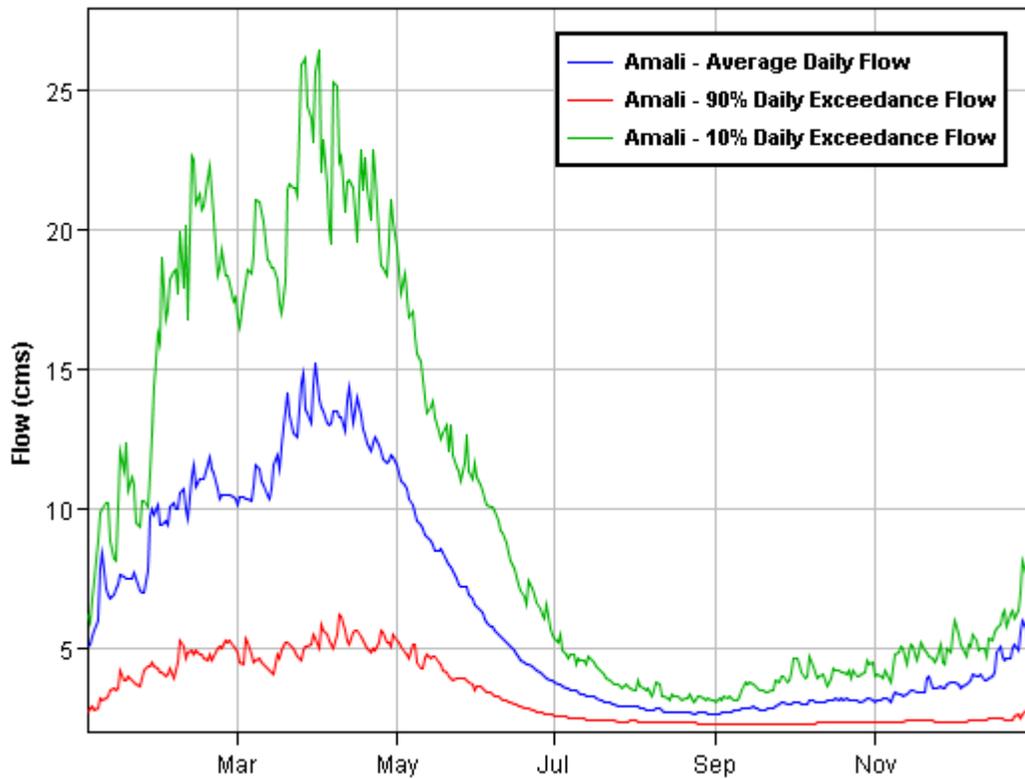


Figura 20. Caudales medios, caudales de exceso del 90% y del 10% por fecha calendario en Amalí (1969-2016).

Tabla 5. Media mensual y caudal de exceso del 90% en San Pablo de Amalí

Caudales medios mensuales en Amalí (cms)												
	Enero	Feb	Mar	Abril	Mayo	Jun	Jul	Agosto	Sep	Oct	Nov	Dec
Media mensual	7.51	10.6	12.13	12.85	8.69	4.91	3.21	2.71	2.82	3.08	3.42	4.42
90% Caudal de exceso sobre la media mensual	4.39	5.12	5.11	5.85	4.6	2.99	2.43	2.31	2.27	2.42	2.43	2.58
10% Caudal de exceso sobre la media mensual	10.14	20.2	19.95	21.33	12.81	8.09	4.45	3.21	3.57	3.87	4.24	5.48

Para cuantificar más a fondo la disponibilidad de agua local, se muestra en la

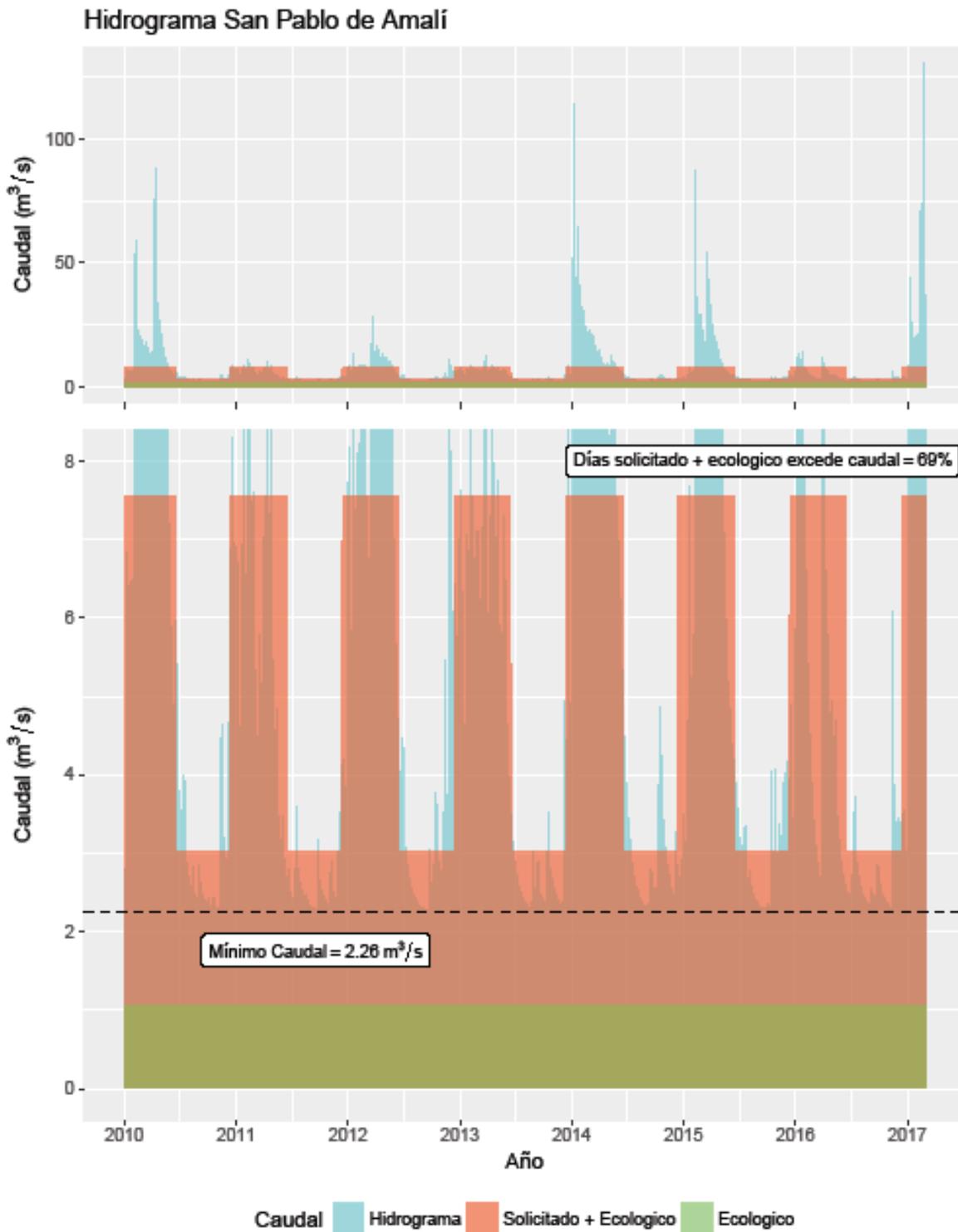


Figura 21 un hidrograma que representa los caudales en San Pablo de Amalí, junto con el

requisito mínimo del caudal ecológico de 1.059 cms y el anterior derecho de agua de la estación húmeda de Hidrotambo (6.50 cms; del 15 de diciembre al 15 de junio) y estación seca (1.96 cms; del 15 de junio al 15 de diciembre). Se eligió el periodo de enero de 2010 a febrero de 2017 para demostrar los patrones recientes de caudal dado el uso del suelo y condiciones hidrológicas actuales. También se muestra el caudal mínimo absoluto que tuvo lugar durante este periodo (2.26 cms; llamado caudal mínimo) y la frecuencia de exceso describiendo con qué frecuencia el caudal medio diario real no ha superado el caudal ecológico más el derecho de aprovechamiento que tuvo Hidrotambo. El modelo indica que el caudal medio diario en San Pablo de Amalí está por debajo del caudal ecológico más el derecho de aprovechamiento que tuvo Hidrotambo (tanto para la estación húmeda y seca) durante el 69% de los días durante este periodo. Mientras este informe analiza el suministro disponible de agua, es necesario notar que el modelo hidrológico no toma en cuenta usos humanos de agua. Por lo tanto, caudales reales podrían ser menores, especialmente durante la época seca, cuando el riego agrícola es lo más alto. El Equipo del Proyecto Dulcepamba está recogiendo actualmente las estimaciones de demanda de agua en la zona de aguas arriba para establecer un balance hídrico para la cuenca. Este esfuerzo ayudará a informar la repartición responsable de los derechos de agua en la cuenca.

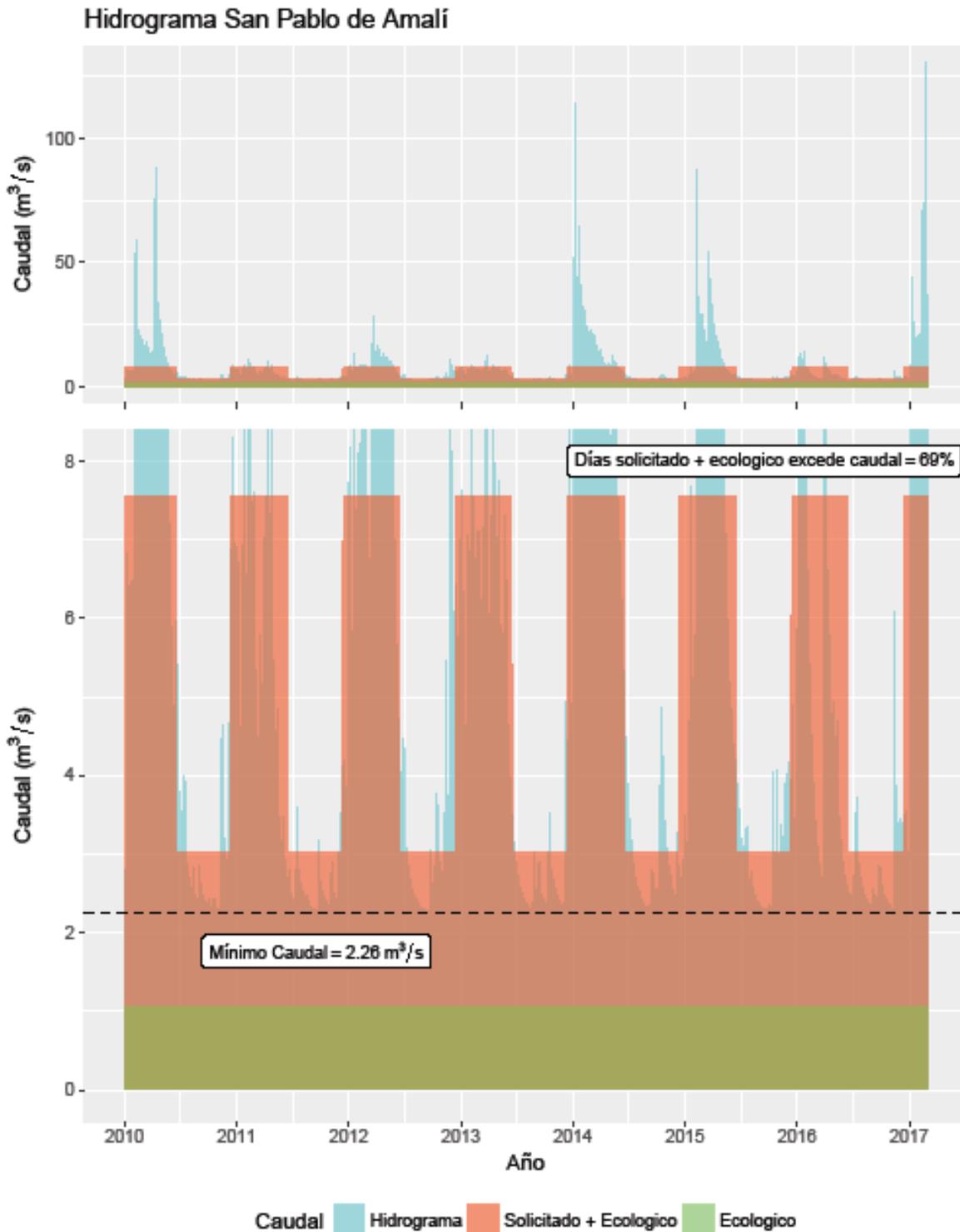


Figura 21. Hidrograma de San Pablo de Amalí, 2010-2017, mostrando los requisitos del caudal ecológico y anteriores derechos de aprovechamiento de Hidrotambo S.A. para la estación húmeda y seca.

## ***Conclusiones de los análisis hidrológicos***

El modelo hidrológico de la cuenca del río Dulcepamba calibra bien los resultados respecto a los datos observados de eventos de inundaciones pasadas y genera de manera fiable hidrogramas de caudales precisos. Los resultados generados por el modelo hidrológico para la simulación del periodo de registros y las simulaciones de eventos específicos demuestran que la inundación de marzo de 2015 no fue una inundación de récord, ni siquiera un evento particularmente excepcional. Los resultados del modelo hidrológico siguen de cerca las declaraciones de los testigos presenciales (Conrad, 2015,2017 “comm.pers.”) para los eventos de marzo de 2015 y febrero de 2017.

Los resultados del modelo y el análisis estadístico de crecidas contradicen los resultados sugeridos por el informe de Hidrotambo S.A. (Soria, 2015). El pico de caudal diario modelado fue de 58.6 cms (según comparado con el informe de Hidrotambo que sugiere que hubo 400 cms) y el caudal de pico sólo duró un día (comparado con los 4 días sugeridos por Hidrotambo). Además, el informe de Hidrotambo indica un periodo de retorno de 33 años para el evento de la inundación de 2015, mientras que el modelo hidrológico indica un periodo de retorno de solamente 6 años. El modelo hidrológico demuestra en última instancia que inundaciones y daños en San Pablo de Amali no pueden ser atribuidos simplemente a las condiciones meteorológicas o hidrológicas extremadamente poco comunes o extremas dentro de los límites de la cuenca.

Se usó el modelo hidrológico Dulcepamba también para informar sobre la disponibilidad de agua y de niveles de exceso de caudales. Como se muestra en la figura 21, 69% de los caudales diarios en San Pablo de Amalí entre enero de 2010 y febrero de 2017 no alcanzan

los requisitos mínimos de caudal ecológico más los derechos de aprovechamiento que tuvo Hidrotambo S.A. entre 2005 y 2016.

### **3. Modelo hidráulico de Dulcepamba**

Se desarrolló un modelo hidráulico para informar sobre el proceso hidráulico y geomórfico que tuvo lugar durante el evento de marzo de 2015. Se usó el programa de Sistema de Modelamiento de Río, HEC-RAS, para completar el análisis usando los resultados del modelo hidrológico. Se usaron las simulaciones del modelo hidráulico para determinar la profundidad del caudal, su velocidad y el esfuerzo de cizalladura de un cauce sin obstrucciones.

#### ***Sistema de Modelado del Río (HEC-RAS)***

Modelaciones hidráulicos computacionales incluye la representación matemática del caudal de un fluido a lo largo de un sistema de río. El programa Sistema de Análisis de Río (HEC-RAS) es producido y mantenido por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (HEC). Dicho programa es capaz de producir cálculos de estado estacionario (“steady-state” en inglés) en una dimensión (1-D), así como simulaciones de caudal fluctuante en una dimensión (1-D) y en dos dimensiones (2-D), computaciones del transporte de sedimentos y de la cama móvil, y modelado de la temperatura y calidad del agua. El programa HEC-RAS es capaz de modelar regímenes de caudal subcríticos, críticos y mixtos. El programa es parte del programa de ingeniería hidrológica de HEC de Nueva Generación (NextGen), con lo que puede leer y escribir datos hidrológicos a los archivos HEC-DSS para el intercambio de varios módulos NextGen (HEC-RAS 2016).

Se seleccionó el HEC-RAS por su habilidad para llevar a cabo 1D/2D, régimen de caudal mixto y simulación de caudal fluctuante. En las siguientes secciones se tratan los métodos usados para el estudio hidráulico.

## **Resumen del modelo**

Un modelo HEC-RAS está formado por datos espaciales e hidrológicos. Los datos espaciales incluyen las secciones transversales del río, que pueden extenderse por las márgenes de las llanuras de inundación para elementos de modelo de una dimensión (1D) y archivos topográficos tipo ráster para áreas de dos dimensiones (2D). Se requieren datos hidrológicos fluctuantes y estables para todas las condiciones de contorno y pueden ser suministrados como caudales o como hidrograma de niveles del río. Los párrafos siguientes describen los datos espaciales e hidrológicos empleados en el modelo de este estudio, así como una breve discusión de la teoría relevante usada para desarrollar la red del modelo computacional.

## **Datos espaciales**

Los datos espaciales para el área de estudio son limitados. Los estudiantes y el profesor de Ingeniería Eddy Sanchez S. de la Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Ecuador (Universidad Católica) llevaron a cabo un estudio topológico y produjeron un mapa que data del 9 de enero de 2016 (ver la Figura 34 en el anexo A). Esta topografía fue considerada como representativa de las condiciones espaciales después del evento en cuestión (de marzo de 2015). Fotografías aéreas realizadas con drones e imágenes satelitales producidas por Planet Labs, que aportan información sobre la localización del cauce antes de la construcción de las instalaciones de toma de agua de Hidrotambo, después

de la construcción pero antes del evento de marzo de 2015, y después del evento de marzo de 2015. La topografía de dominio público está limitada a una resolución de 30m producidos por el “National Aeronautic and Space Administration’s Shuttle Radar Topography Mission” (NASA STRM).

El mapa topográfico de la Universidad Católica contiene líneas de contorno con la información de su elevación y 177 puntos de datos estudiados, cubriendo un tramo de aproximadamente 430 metros de largo entre el río Dulcepamba y el pueblo adyacente de San Pablo de Amalí. El mapa especifica la localización de la línea central del cauce en el momento de estudio, la carretera que atraviesa el pueblo de San Pablo de Amalí y también una estructura cerca del margen erosionado. Los datos aportan suficiente información para establecer la pendiente general del cauce y de los márgenes. Se digitalizaron y georeferenciaron las líneas de contorno y los puntos de estudio para producir un modelo ráster de elevación representativo de la situación posterior al evento de marzo de 2015. Se importó dicho archivo al modelo HEC-RAS para el modelamiento en 2D.

Las imágenes de drones y de satélite aportaron información sobre cómo se han movido las localizaciones de la línea central del cauce y de los márgenes a lo largo del tiempo. Se georeferenció una imagen tomada con drone con fecha del día 2 de noviembre de 2014 mediante puntos de enlace a unas imágenes satelitales establecidas usando el programa ArcMap GIS para generar un mayor detalle del area que las imágenes satelitales podrían ofrecer por sí solas. Se usó la imagen drone para definir la localización previa al evento de 2015 de la línea central del cauce y de los márgenes. Se crearon las directrices de estos rasgos mediante el programa ArcMap para posteriormente se los importaron a HEC-RAS. Se usaron las herramientas de la geometría de cauces dentro del HEC-RAS junto con

las directrices de localización producidas mediante ArcMap para aproximar la forma del terreno anterior a la inundación.

Declaraciones de testigos presenciales y fotografías tomadas durante y después del evento de marzo de 2015 ayudan también a llevar a cabo el modelo hidráulico del evento. Como se ha constatado anteriormente, sedimentos gruesos y otros escombros bloquearon la estructura de toma de agua de Hidrotambo dentro del cauce del río Dulcepamba (Figura 4). Además, miembros de la comunidad observaron la máxima altura de la crecida en un punto fijo de la compuerta ubicada en la parte de aguas abajo de la estructura de captación de agua. El Equipo del Proyecto Dulcepamba midió más tarde la elevación en este punto, ofreciendo la elevación máxima de la superficie del agua (WSEL por sus siglas en inglés) durante el evento.

## **Datos hidrológicos**

Se introdujeron los datos hidrológicos para el límite aguas arriba del modelo hidráulico a través del archivo DSS dentro del editor de caudales fluctuantes para la calibración del modelo, simulación de la crecida y prueba de la capacidad de la crecida. Se usaron cuatro medidas de caudal aportadas por el Equipo de Proyecto de Dulcepamba como caudales de calibración. Se usó la hidrología modelada del evento de marzo de 2015 (en el Capítulo 2) para la modelación hidráulica. Finalmente, se ejecutó una prueba de capacidad de crecida a partir de un caudal sintético mediante el incremento de los volúmenes de caudal de entrada de 20 a 500 cms sobre un periodo de tiempo de 7 horas.

## **Calibración del modelo**

### **Etapas temporales**

El tamaño y frecuencia temporal de las células de la malla computacional están relacionadas entre sí a través de la definición del número de Courant. Cada célula tiene un único WSEL representativo que se aplica en el centro de la célula. El tamaño de la célula es por lo tanto ajustado de tal forma que la pendiente de la línea conectando el WSEL con dos centros de células adyacentes es mínima y es estimada por la pendiente del terreno. La velocidad media estimada y el tamaño medio de célula son usados para calcular la frecuencia temporal de forma que el número de Courant tiene un valor de 1. El tamaño de la célula se fijó inicialmente a 5.0 m<sup>2</sup>. Se ejecutó el modelo usando el método de difusión y ajustando la frecuencia temporal hasta que la solución era matemáticamente estable. Se ejecutó entonces el modelo usando las ecuaciones de conservación de moméntum completos, y los tamaños de las células que contribuían a un error significativo en el WSEL calculado fueron reducidas tanto como fue requerido para producir tolerancias razonables.

### **Rugosidad superficial**

La rugosidad se cuantifica según HEC-RAS y la mayoría de otros paquetes de modelación hidráulico mediante el uso de los coeficientes de Manning "n". Hay dos referencias usadas frecuentemente para establecer el valor del coeficiente de Manning "n": o bien (1) la tabla de Manning "n" de Chow (1959), que contiene las descripciones físicas para varios cauces, o bien (2) de Barns (1987), que aporta una lista con valores de los coeficientes de Manning (n) previamente medidas para ríos específicos. La descripción más apropiada en la tabla

de Chow is para arroyos de montaña e incluye vegetación sumergida en los márgenes del río pero no en el cauce, márgenes empinados y un fondo de cauce cubierto con cantos y rocas grandes. No se especifican la profundidad del flujo ni la pendiente. Esta tabla recomienda un valor de rugosidad comprendido entre 0.04 y 0.07. El valor más aproximado de Barns (1987) es 0.075 para el "Rock Creek" cerca de Darby, en el estado de Montana. El tramo del estudio tuvo una pendiente media de 0.04 y el 50% de las rocas se clasificaron como 0.22 m o menores ( $d_{50}$ ).

El manual del usuario de HEC-RAS hace referencia a una ecuación usada comunmente que se deriva de las ecuaciones de Chezy y de Manning y que depende de la altura de la rugosidad y del radio hidráulico. Asumiendo que el tamaño medio de la roca ( $d_{50}$ ) del río es de 0.5 m, este método recomienda un coeficiente de Manning de entre 0.06 y 0.08, lo que es consistente con las tablas de referencia mencionadas más arriba.

Debido a la pendiente del cauce modelada en este estudio, se consideró el método adicional desarrollado por Jarret (1984) para pendientes pronunciadas. El tramo del estudio de Dulcepamba tiene una pendiente media de 0.125, encontrándose por encima del rango de 0.002 a 0.04 verificado en el método de Jarret. Si se usa el método de Jarret, el valor resultante para el coeficiente de Manning se sitúa entre 0.23 y 0.25, considerablemente superior a lo sugerido más arriba.

En la Tabla 6 se resumen los resultados de los dos métodos de cálculo. Se aplicó un coeficiente de Manning uniforme para todo el dominio del área 2D, empezando la calibración con un valor de 0.06. La calibración fue limitada a una sola la sección transversal medida cerca del límite aguas arriba de dicho dominio. Se usaron cuatro caudales medidos para la calibración del modelo, con valores comprendidos entre 2.77 cms y 38.89 cms. Se ajustó el

coeficiente de Manning (n) dentro del rango recomendado hasta que la velocidad calculada y las profundidades del cauce mostraron una estrecha concordancia con los valores medidos.

**Tabla 6 Estimación del coeficiente de Manning “n”.**

Fecha	Ratio de Caudal (cms)	Valor de Manning n (rugosidad)	Valor de Manning n (pendiente)
07 enero 2014	8.39	0.07	0.24
31 enero 2014	38.89	0.06	0.23
25 marzo 2014	12.38	0.08	0.25
16 octubre 2014	2.77	0.08	0.25

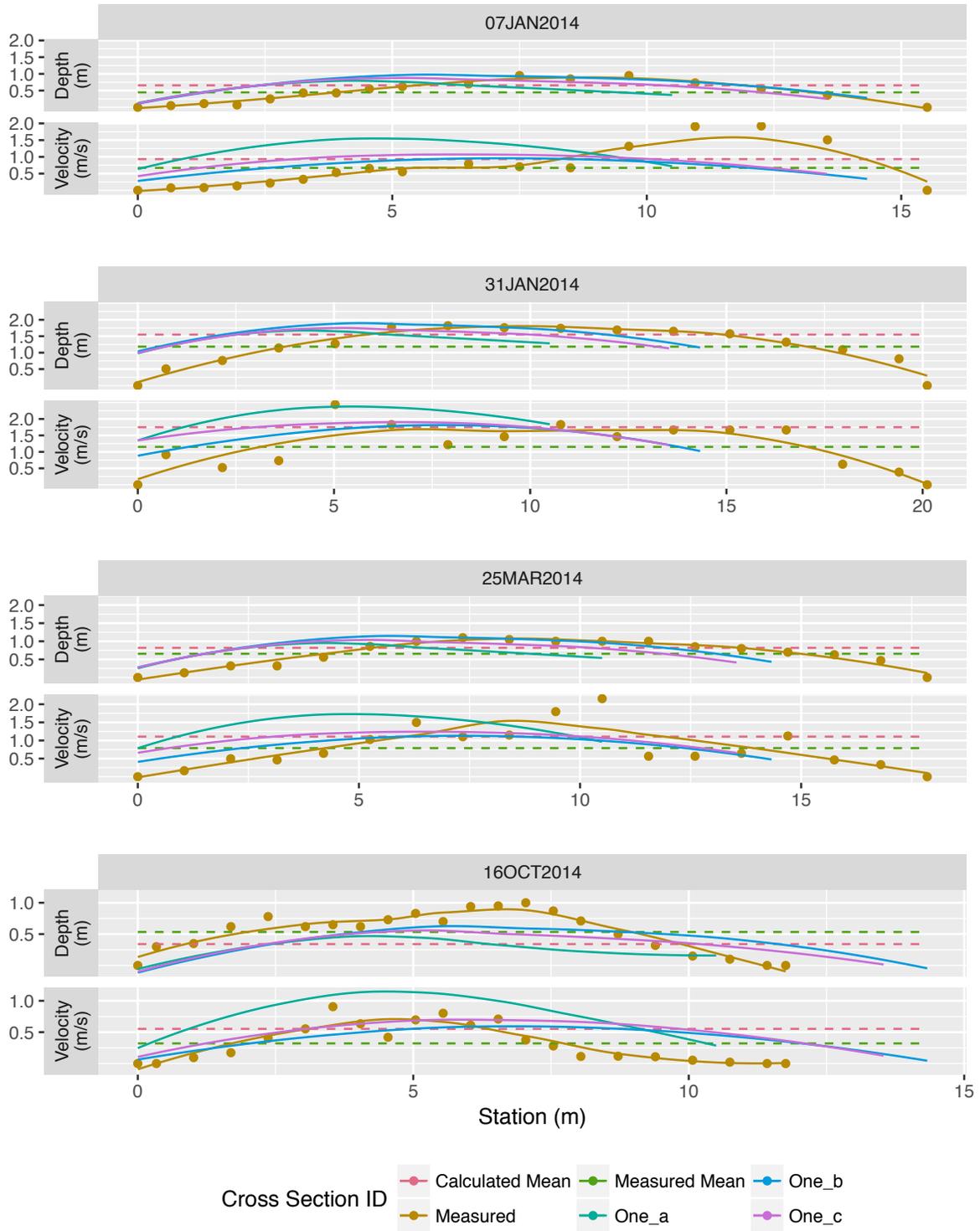
## Resultados de calibración

El modelo final tiene una malla computacional con células de 5 metros reducidas en tamaño de hasta a un metro en las secciones que recogen las pendientes más acusadas. La frecuencia temporal computacional es de 0.5 segundos y el coeficiente de Manning está fijado en 0.1 de manera uniforme. No fue posible establecer perfiles longitudinales coincidentes entre los datos medidos y los datos modelados debido a discrepancias en los datos espaciales. Los datos de la Universidad Católica no incluyen las medidas del lecho del río y las medidas de la secciones transversales facilitadas por el Equipo de Proyecto Dulcepamba indican que el perfil cambia a lo largo del tiempo. Adicionalmente, se adquirieron la localización de los valores de la velocidad y profundidad medidos mediante unidades de GPS cuya precisión se desconoce. De esta forma, la calibración del coeficiente de Manning (n) se centró en la velocidad y profundidad media de secciones transversales del cauce. Se ejecutó el modelo con cuatro de los caudales medidos por el Equipo del Proyecto Dulcepamba. Para cada ejecución se extrajeron tres perfiles de la sección transversal aproximadamente ubicada en la localización de los datos medidos para su

comparación (Figura 22). El valor más aproximado para el coeficiente de Manning (n) resultó ser de 0.1. La Tabla 7 resume la velocidad y la profundidad media y máxima experimentados en el tramo de cada uno de los caudales calibrados.

**Tabla 7. Caudales medidos y modelados, profundidades y velocidades usadas para las condiciones de calibración previas a la inundación**

Fecha	Volumen caudal (cms)	Media medida		Media calculada		Máximo calculado	
		Prof. (m)	Velocidad (m/s)	Prof. (m)	Velocidad (m/s)	Prof. (m)	Velocidad (m/s)
<b>07 enero 2014</b>	8.39	0.45	0.67	0.66	0.93	1.3	3.36
<b>31 enero 2014</b>	38.89	1.18	1.15	1.55	1.75	2.31	5.35
<b>25 marzo 2014</b>	12.38	0.66	0.79	0.82	1.11	1.5	3.78
<b>16 octubre 2014</b>	2.77	0.53	0.32	0.34	0.55	0.86	2.36



**Figura 22. Perfiles de calibración HEC-RAS, comparando los datos medidos de la estación de Amalí con las tres secciones transversales modeladas cerca de la localización de medición.**

## ***Limitaciones del modelo***

El programa HEC-RAS usa las ecuaciones para aguas poco profundas tanto para el modelo en 1D como en 2D. Estas ecuaciones toman la hipótesis de que la pendiente del cauce es menor a 1:10 (vertical:horizontal). La pendiente global de este tramo es de 1:8, lo que es mayor que la pendiente máxima recomendada. La última generación del modelo HEC-RAS utiliza batimetría con una sub-malla para ofrecer un volumen de célula y área de célula más detallado respecto a otros modelos 2D. Se determinó que usando células relativamente pequeñas en las áreas más empinadas y usando valores más altos de Manning ( $n$ ) como sugerido por Jarret (1984), el modelo ofrecía aproximaciones confiables para el objetivo de este estudio. El modelo es estable matemáticamente mientras se utilicen las ecuaciones más complejas de momentum como mencionado anteriormente en la sección de la calibración de la frecuencia temporal. Se alcanza estabilidad cuando se usa el valor  $n$  del coeficiente de Manning que se encuentra en el rango aceptado generalmente como mencionado anteriormente en la sección de rugosidad superficial. La limitada calidad del detalle del terreno, tal y como mencionado en la sección de datos espaciales, se refleja en la forma de las secciones transversales de velocidad y profundidad tal y como se muestra en las representaciones de calibración (Figura 22). A pesar que la forma de la curva no se correlaciona exactamente, los valores generales de profundidad y velocidad se aproximan en mayor medida con los valores medidos.

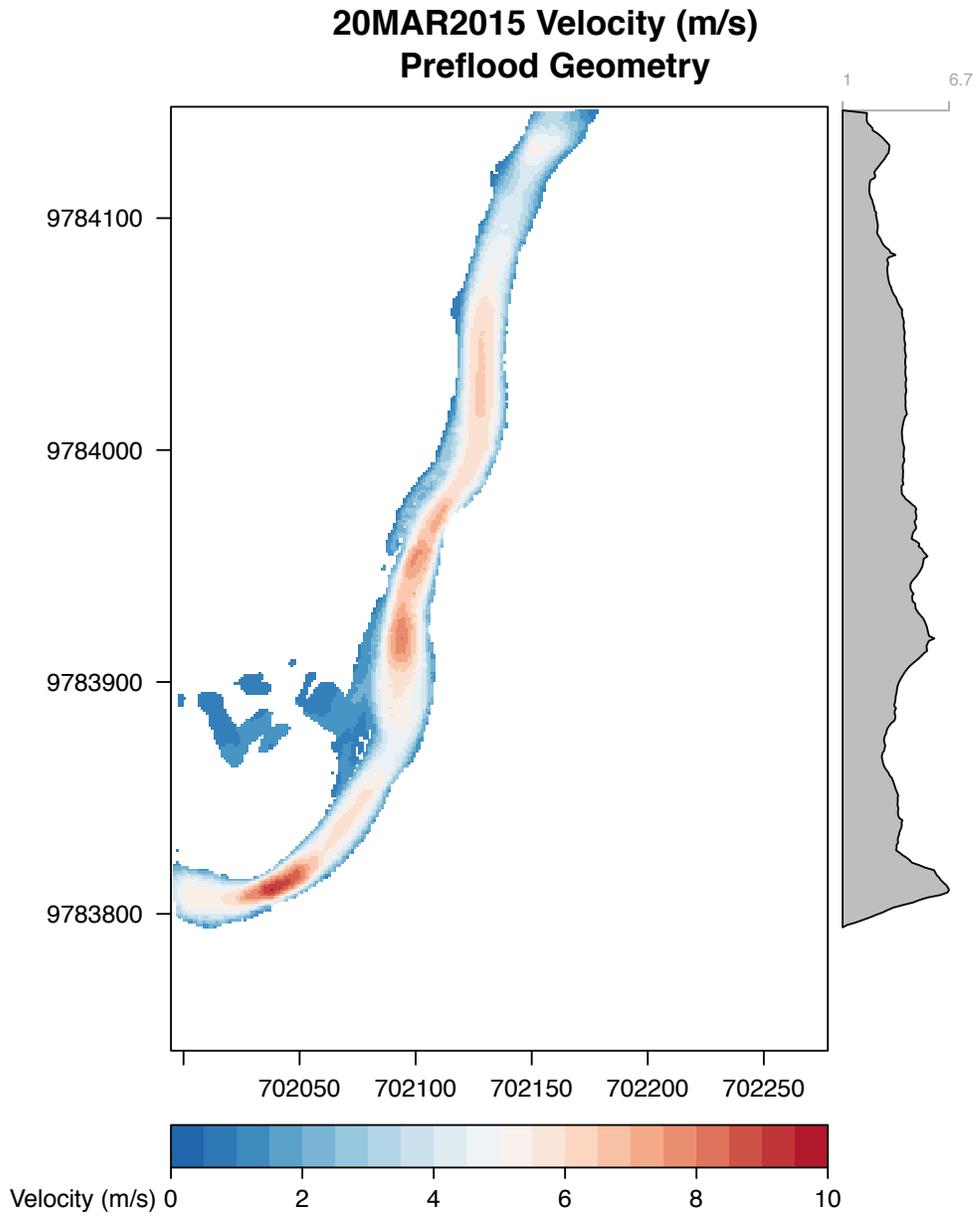
Adicionalmente, no se encontraron datos espaciales o de caudales disponibles para las instalaciones de captación de agua. Para el modelo hidráulico, se asumió que todo el volumen de caudal pasó a través del tramo, sin atravesar las instalaciones. Esta suposición incluye zero obstrucción en la zona de captación de agua debido a sedimentos

o escombros, a pesar de la evidencia mostrada en la Figura 4. Como resultado, este modelo es fundamentalmente conservador, subestimando necesariamente las elevaciones de la superficie de agua y el aumento de crecidas que resultarían de cualquier restricción geométrica y/o bloqueo de la instalación de Hidrotambo o del lecho adyacente.

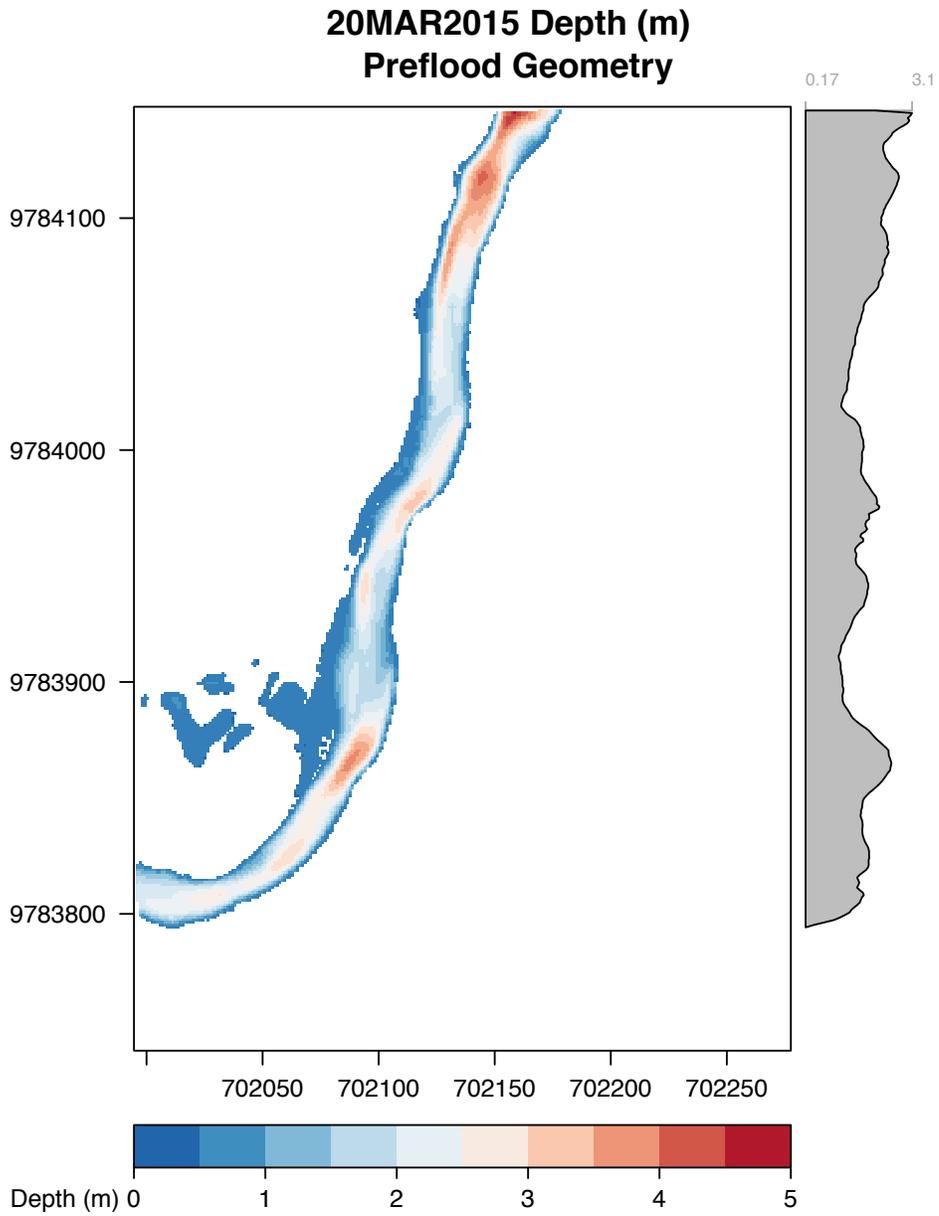
## **Resultados del modelo hidráulico y discusión**

De acuerdo con el hidrograma del evento de marzo de 2015, la onda del pico de caudal entró en el límite aguas arriba del alcance del modelo aproximadamente a las 3:55 am el día 20 de marzo de 2015, y tiene un caudal máximo en 15 minutos de 82.5 cms (la media diaria es de 58 cms). La Figura 23 y Figura 24 representan las distribuciones de la velocidad y profundidad del caudal a través del tramo modelado a medida que la cresta de la onda de caudal avanza. Las Figura 25 y Figura 26 muestran la distribución WSEL y los perfiles transversales respectivamente. Las localizaciones de las secciones transversales se muestran en la Figura 25. Para calibrar el modelo se usaron las secciones transversales del *Grupo 1*, localizadas en el límite aguas arriba del tramo. Las secciones transversales del *Grupo 2* están localizadas en el sitio de obstrucción, tal y como lo identificada el Equipo del Proyecto Dulcepamba. El equipo facilitó también la estimación del WSEL durante el pico de caudal incluso referenciando un objeto fijo en la compuerta de la estructura de la toma de agua. El WSEL observado se incluye en la representación del perfil del *Grupo 2*. Las secciones transversales para el *Grupo 3* se encuentran en el límite aguas abajo del area de estudio. No hay indicación de inundaciones sobre el margen izquierdo para este caudal y apenas pequeñas cantidades sobre el margen derecho en el límite aguas abajo del alcance en el area del *Grupo 3*.

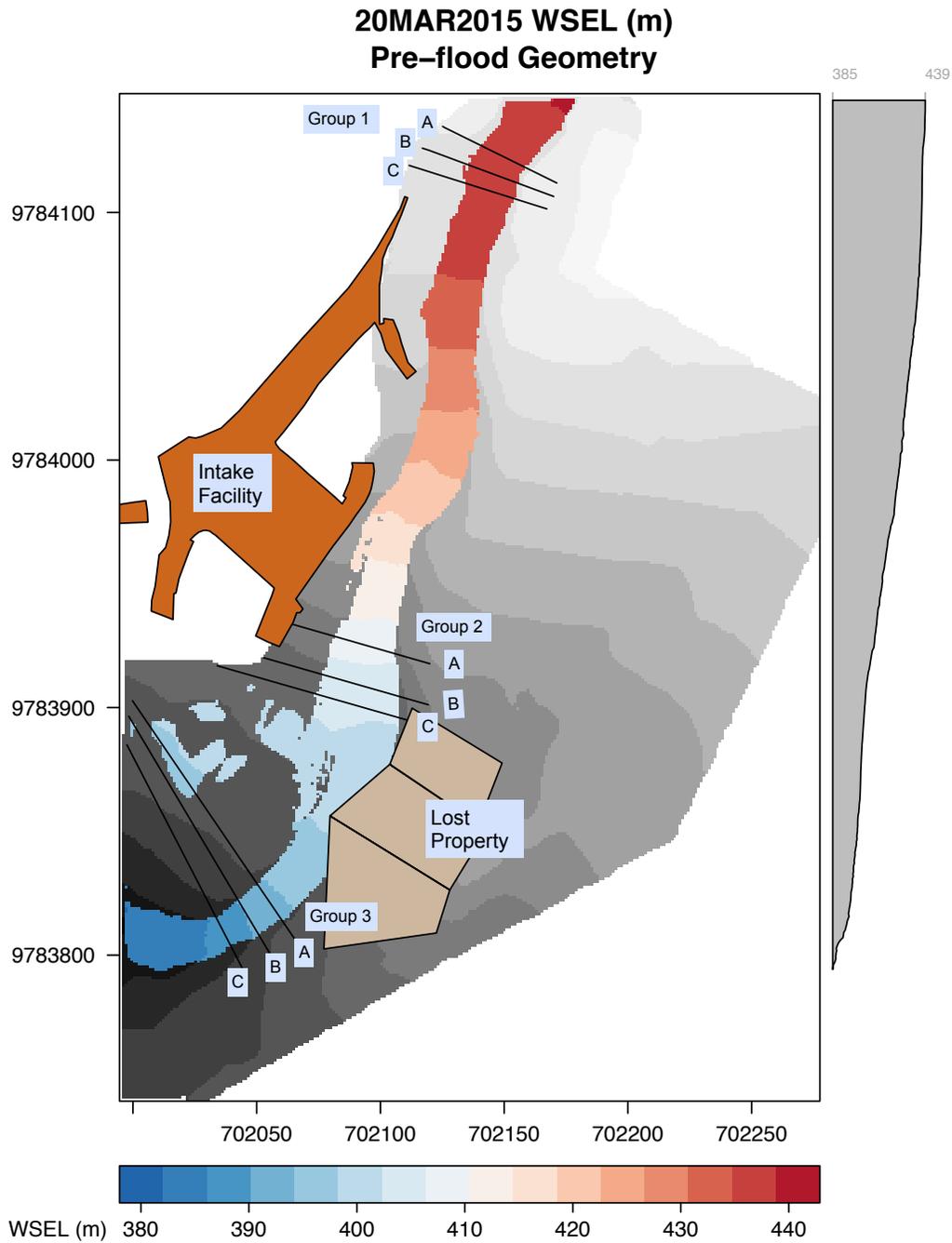
En un informe con fecha 30 de septiembre de 2015 emitida por el Ing. Diego Soria Re, Gerente General, Hidrotambo S.A. y enviada a la Señora Doctora Gabriela Sánchez (ver Anexo B), el pico de caudal de marzo de 2015 está estimado en 400 cms. Este valor se encuentra significativamente por encima de los 82.5 cms calculados por el modelo aquí completado. Para evaluar el caudal sugerido de 400 cms al que se refiere el informe, se simuló con el modelo un hidrograma sintético con un aumento de caudal hasta 500 cms (Figura 27, Figura 28, Figura 29, Tabla 8). Incluso para este caudal extremo, se observa que un caudal sin obstrucciones no presenta riesgo de inundación en el margen izquierdo y en el pueblo de San Pablo de Amalí. Se hace notar que la velocidad media a lo largo del área de estudio cuando hay 420 cms es de 4.01 m/s, lo que es capaz de inducir el movimiento de rocas grandes de hasta 1 metro de diámetro.



**Figura 23.** Velocidades para la onda de pico del caudal, 4:05 a.m. 20 de marzo de 2015. La escala máxima es 10 m/s.



**Figura 24.** Profundidades para el pico de onda del caudal, 4:05 a.m. 20 de marzo de 2015. La escala máxima es 5 m.



**Figura 25.** Elevación de la superficie de agua (WSEL) para el pico del evento de inundación de marzo de 2015. Se muestran las posiciones de las instalaciones de captación de agua y tres de las propiedades perdidas. Las líneas marcadas "Grupo 1, 2 y 3" son las localizaciones de las secciones transversales de la Figura 26

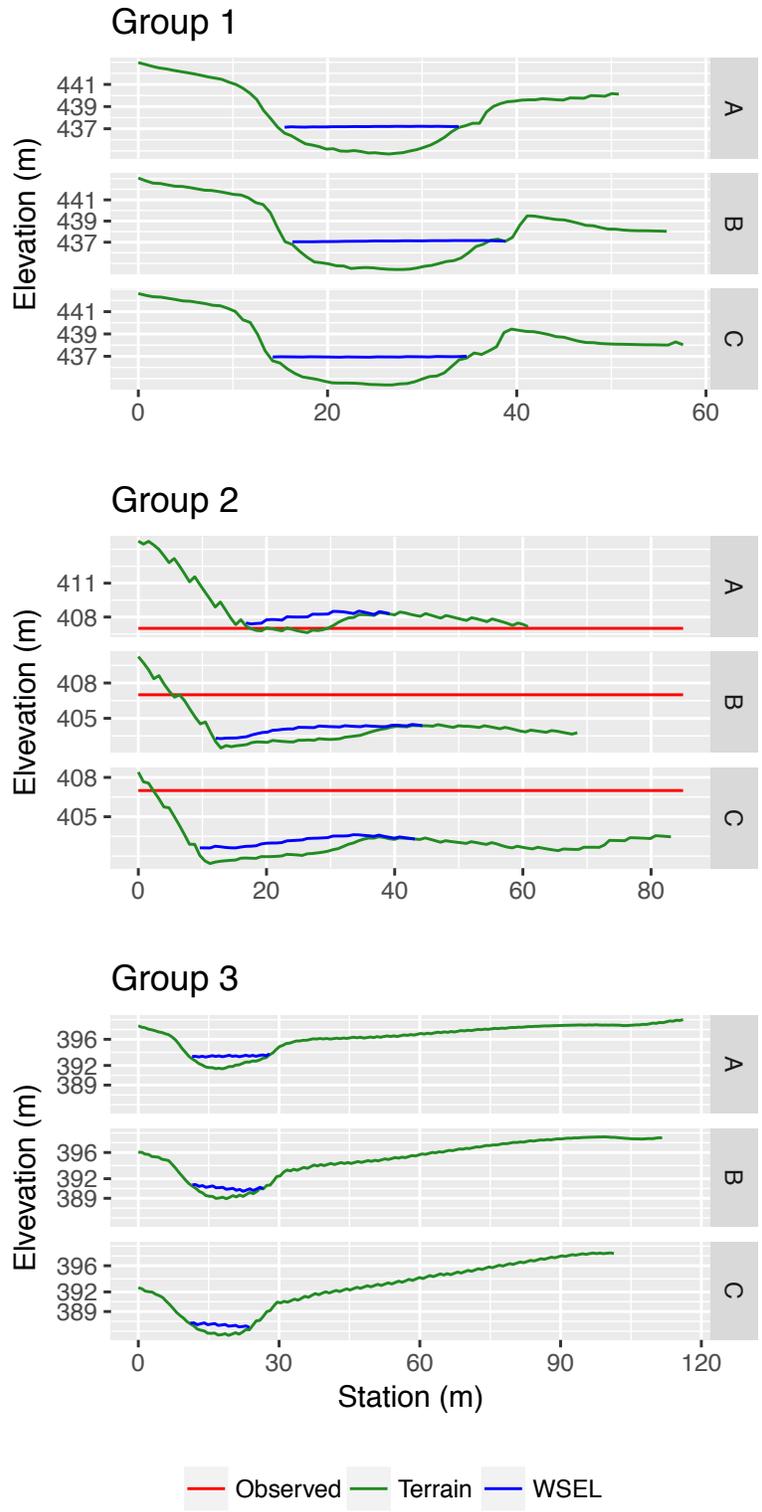


Figura 26. Perfiles de la elevación de la superficie de agua (WSEL); localizaciones mostradas en la Figura 25. El Grupo 2 incluye la estimación del WSEL producida por el bloqueo facilitado por el Equipo de Proyecto Dulcepamba.

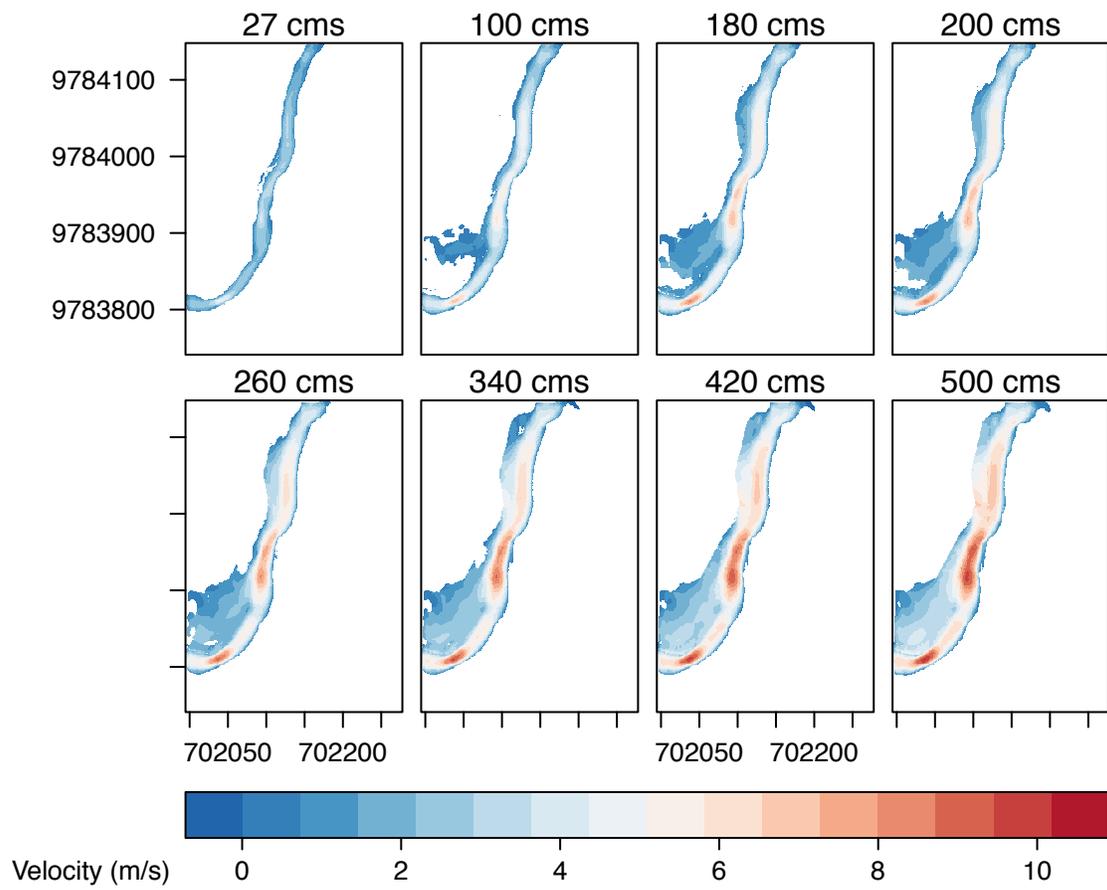


Figura 27. Test de capacidad de caudal, con la geometría antes de la inundación y las distribuciones de velocidades para caudales de hasta 500 cms.

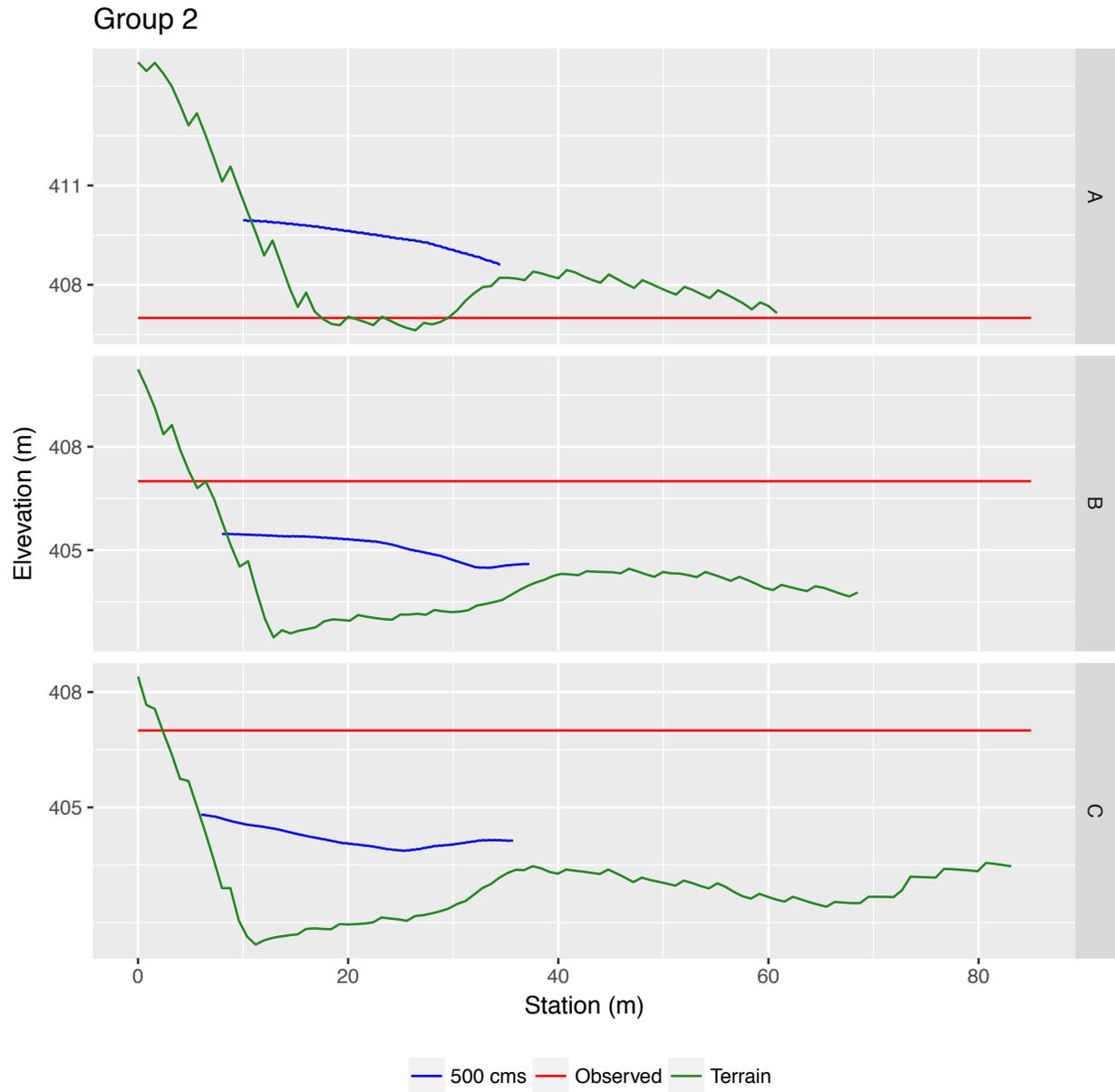


Figura 28. WSEL a 500 cms con respecto al WSEL observado

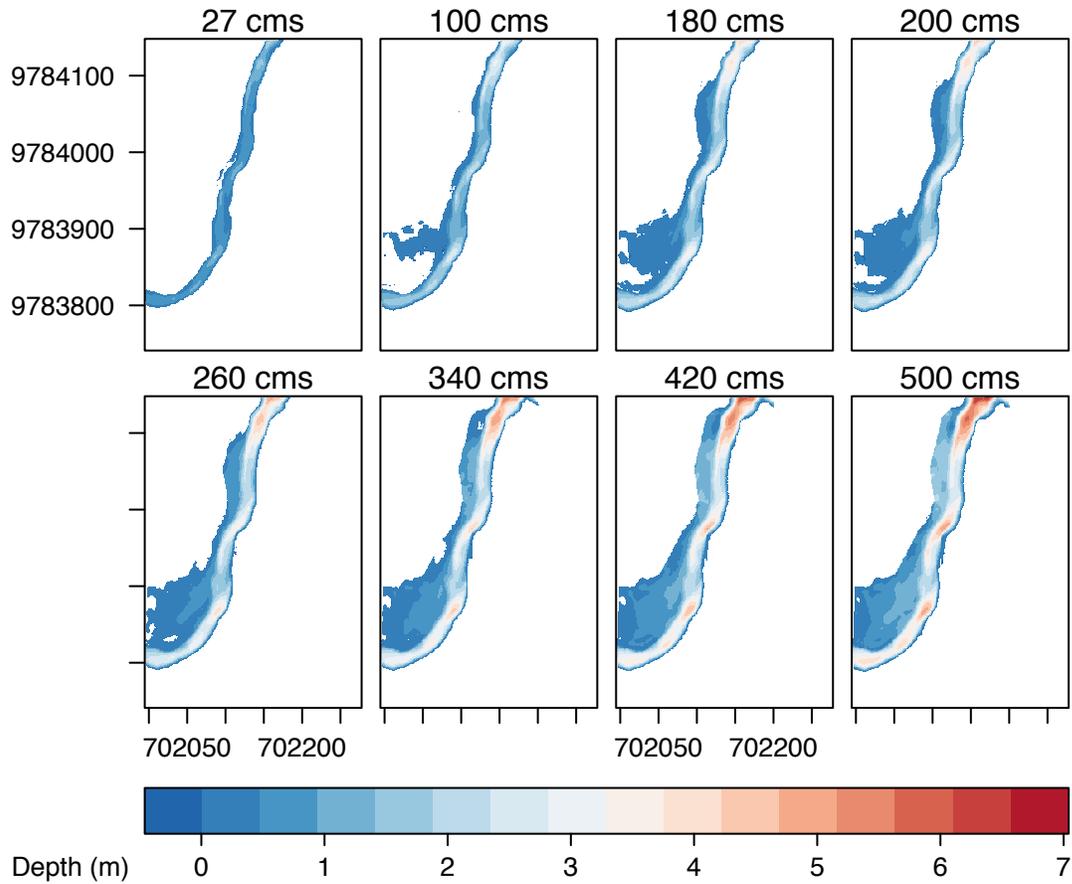


Figura 29. Test de capacidad de caudal, con la geometría antes de la inundación y las profundidades para caudales de hasta 500 cms.

Tabla 8. Resultados del Test de Capacidad de Caudal. Diámetros de las rocas grandes para moción incipiente calculado en base a la profundidad media y velocidad media.

Caudal (cms)	Max		Media		Diámetro de canto (m) por ángulo de reposo		
	Prof. (m)	Velocidad. (m/s)	Prof. (m)	Velocidad (m/s)	20°	30°	36°
27	2.01	4.66	0.64	2.09	0.5	0.1	0
100	3.33	7.02	0.98	2.60	0.75	0.25	0.1
180	4.23	8.21	1.10	2.86	1	1	0.1
200	4.42	8.44	1.15	2.99	1	1	0.1
260	4.96	9.02	1.31	3.34	1	1	0.25
340	5.59	9.58	1.46	3.65	1	1	0.25
420	6.11	10.16	1.64	4.01	1	1	1
500	6.59	10.82	1.82	4.35	1	1	1

## **Análisis Incipiente del Movimiento**

Julien (2002) aborda la estabilización del río, erosión de márgenes y escollera de revestimiento para márgenes de ríos. La ecuación 8.4 en la página 244 se facilita como método para calcular la velocidad crítica del agua para mover rocas grandes en el río. La ecuación depende de la profundidad del caudal, el ángulo de reposo de la roca y la inclinación lateral del margen del río si dicha roca se encuentra en él. Se proporciona una ilustración de la velocidad vs. diámetro de la roca con un ángulo de reposo de  $40^\circ$  (Figura 31). Hay seis curvas en la ilustración representando la velocidad crítica para cinco pendientes de margen diferentes y el lecho del río.

Se puede definir la angulosidad de las rocas grandes por sus ángulos de reposo, que está definido por el número de vértices que contiene una sección transversal de la roca grande. Rocas más redondeadas tienen un ángulo de reposo inferior que aquellas rocas con ángulos más cerrados. Las fotografías en la Figura 30 enseñan una muestra representativa de los tamaños y angulosidad de las rocas grandes del Río Dulcepamba. Los tamaños varían entre gravilla pequeña hasta rocas de aproximadamente 1 m de diámetro. Ya que la mayoría de dichas rocas tienen un ángulo de reposo menor al facilitado en la Figura 31, se aplicó el pico de caudal durante el evento de marzo de 2015 a la ecuación 8.4 mencionada más arriba. Se aplicó la distribución de las profundidades para el pico de caudal junto con una pendiente de margen de  $0^\circ$ , para representar el lecho del río, y tres valores para el ángulo de reposo:  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $36^\circ$ . Se calcularon las velocidades críticas para mover las piedras con diámetros comprendidos entre 0.1 y 1.0 m. Se compararon estas velocidades críticas con las velocidades de pico modeladas para el evento de inundación de marzo de 2015 para evaluar el mayor diámetro de la roca grande para cada ángulo de reposo que podrían entrar en movimiento incipiente (Figura 32). Los resultados de este análisis demuestran que las profundidades y velocidades generadas durante la inundación de marzo de 2015 fueron suficientes para mover rocas de gran tamaño, de hasta  $\sim 1$  m de diámetro.



**Figura 30. Rocas representativas antes y después de la estación de lluvias de 2016 (fotografía facilitada por el Equipo del Proyecto Dulcepamba).**

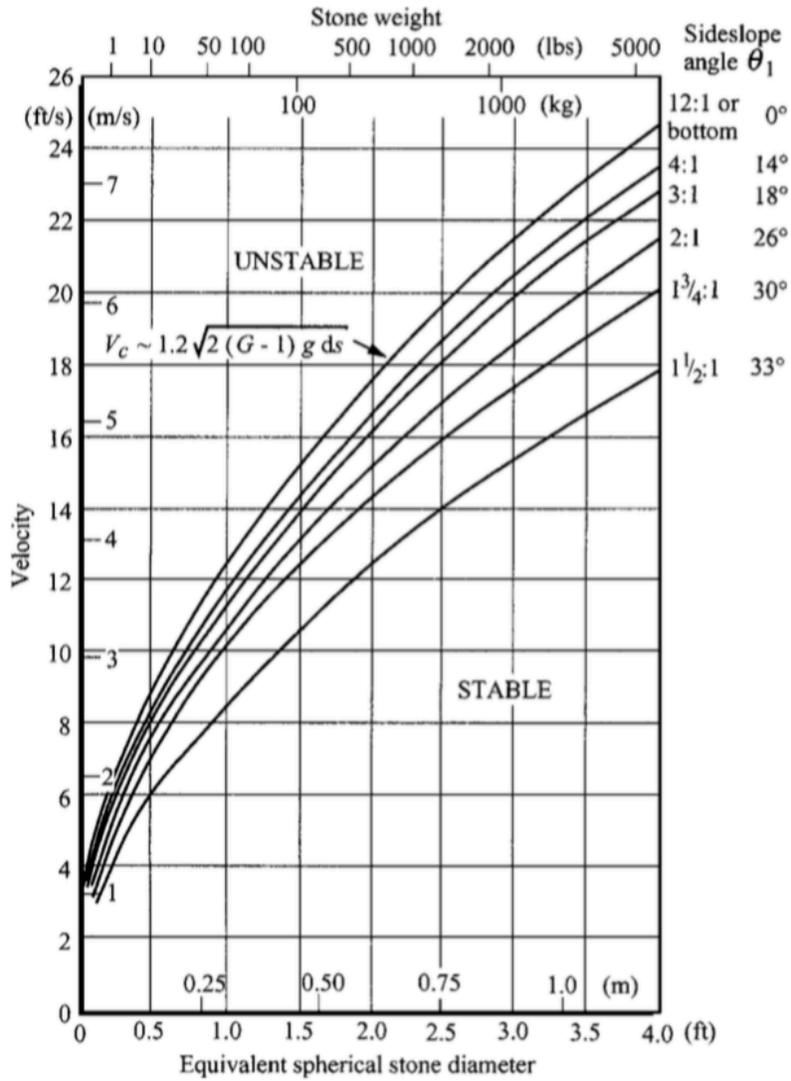
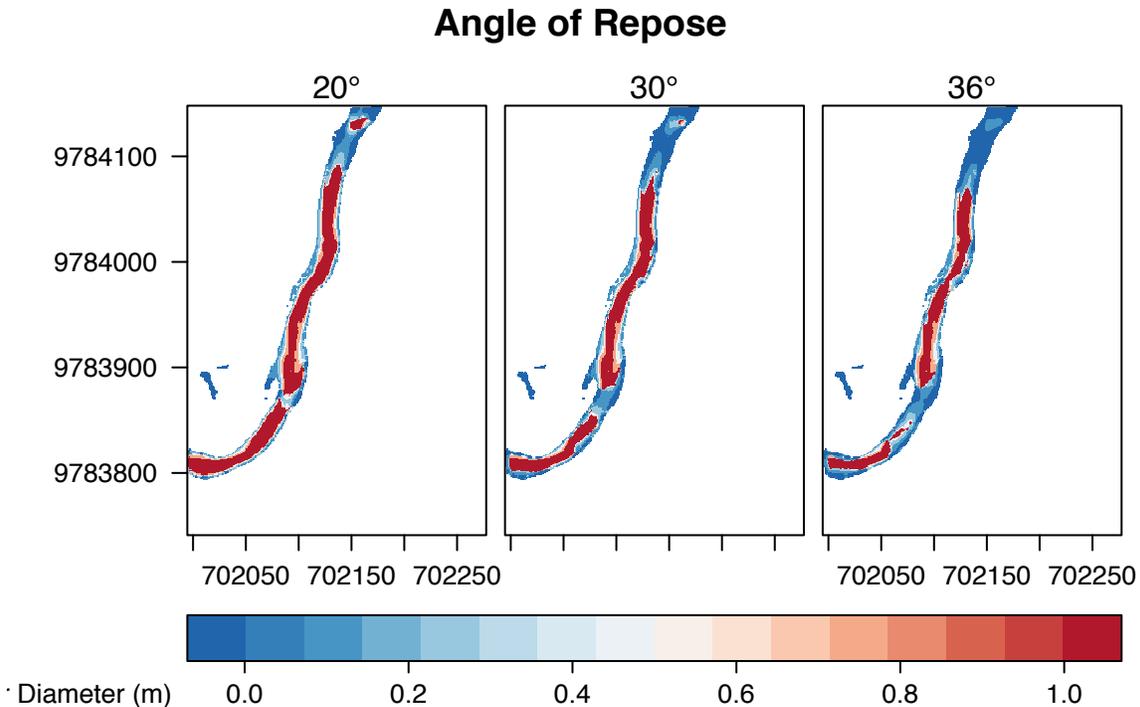


Figura 31. Diagrama de la estabilidad de partícula para rocas con un ángulo de reposo de 40°, de Julien (2002, p. 245).



**Figura 32. Estabilidad de partícula calculada durante el pico de caudal de marzo de 2015 para ángulos de reposo representativos usando la ecuación 8.4 de Julien (2002, p. 244), c (ver texto).**

El movimiento de rocas de gran tamaño durante el evento de inundación de 2015 puede haber: (1) dañado cualquier medida de estabilización de las margenes existente, (2) conducido a la obstrucción observada del cauce de Dulcepamba y (3) conducido al subsiguiente remocion en masa posterior. Si el caudal producido por el evento de marzo de 2015 no hubiera sido obstruido, no habría producido el WSEL observado por los habitantes de San Pablo de Amalí tal y como mostrado en la Figura 32, Grupo 2. Un análisis más detallado del diagrama de vectores de velocidades en la Figura 33 indica un segmento de 9 a 10 m en el margen izquierdo cerca de la localización de los límites aguas arriba del evento de erosión con relativamente altas velocidades. Esto indicaría un area de interés ya que el esfuerzo cortante en este segmento sería el máximo experimentado a lo largo del margen izquierdo y adyacente al pueblo.

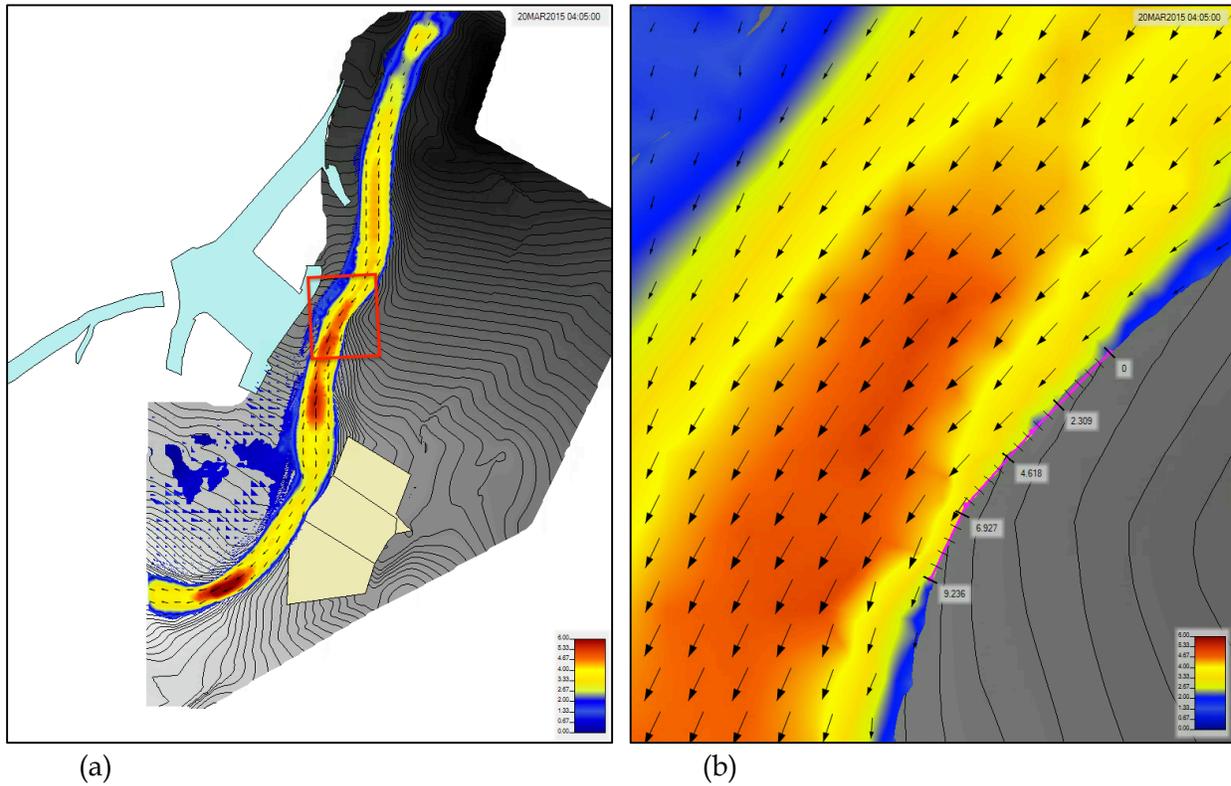


Figura 33. Vectores de velocidad para el tramo del estudio (a) y para el area destacada en rojo (b).

### **Conclusiones de los Análisis Hidráulicos**

No se disponibilizaron para este estudio datos espaciales para las instalaciones de captación de agua de Hidrotambo. Por ello, el modelo es representativo de las condiciones del río sin la influencia del agua atravesando las instalaciones de captación de agua. La foto en la Figura 4 se tomó mirando aguas arriba desde el interior de las instalaciones de captación de agua. La cantidad y localización de escombros en la foto son una indicación del nivel de pico de agua y concuerda con la elevación del nivel de agua medido por el Equipo del Proyecto Dulcepamba. Además, los escombros habrían reducido el caudal de agua pasando a través de las instalaciones, forzándolo hacia el lecho de río adyacente, según está modelado en este estudio. La diferencia entre la elevación de la superficie de agua observada vs. modelada puede observarse en las secciones transversales de la Figura 25 Grupo 2.

## **Trabajo futuro**

El Equipo de Proyecto Dulcepamba localizó recientemente un mapa topográfico realizado por Hidrotambo S.A sobre las condiciones anteriores a la construcción de las instalaciones de captación de agua. Parece ser que la topografía aportaría información adicional sobre las condiciones previas a la construcción. Esto permitiría una mejor comparación directa de cualquier cambio producido en la profundidad y velocidad del río a través del area de estudio. Un modelo hidráulico de las condiciones anteriores a la construcción podría aportar una percepción adicional del papel que la redirección del río jugó en la erosión, pérdida de propiedades y de vidas humanas que ocurrieron durante la inundación de marzo de 2015. Adicionalmente, esta información podría ayudar a definir medidas futuras de estabilización de los márgenes del rio. El Equipo del Proyecto Dulcepamba ha solicitado la topografía digitalizada completa a las agencias gubernamentales.

Una modelización futura se vería beneficiada de los datos espaciales de las instalaciones de captación de agua. Estos datos permitirían la integración de las instalaciones en el modelo y ayudaría a entender las condiciones de caudal durante la inundación de marzo de 2015. Además, un modelo que incluyese estos datos definiría mejor el diseño ingenieril para futuras medidas de estabilización del margen. Además, las siguientes investigaciones ayudarían a informar el diseño ingenieril de las medidas de estabilización de los márgenes y cimentaciones, investigar lo siguiente seria útil:

- Investigación geotécnica para definir las condiciones subterráneas.
- Evaluación detallada del terreno sobre las situaciones actuales incluyendo el area cubierta por las instalaciones de captación de agua.
- Estaciones de caudal aguas arriba y aguas abajo respecto a las instalaciones.
- Medidas del caudal a través de la central hidroeléctrica.

# Anexo A. Mapas

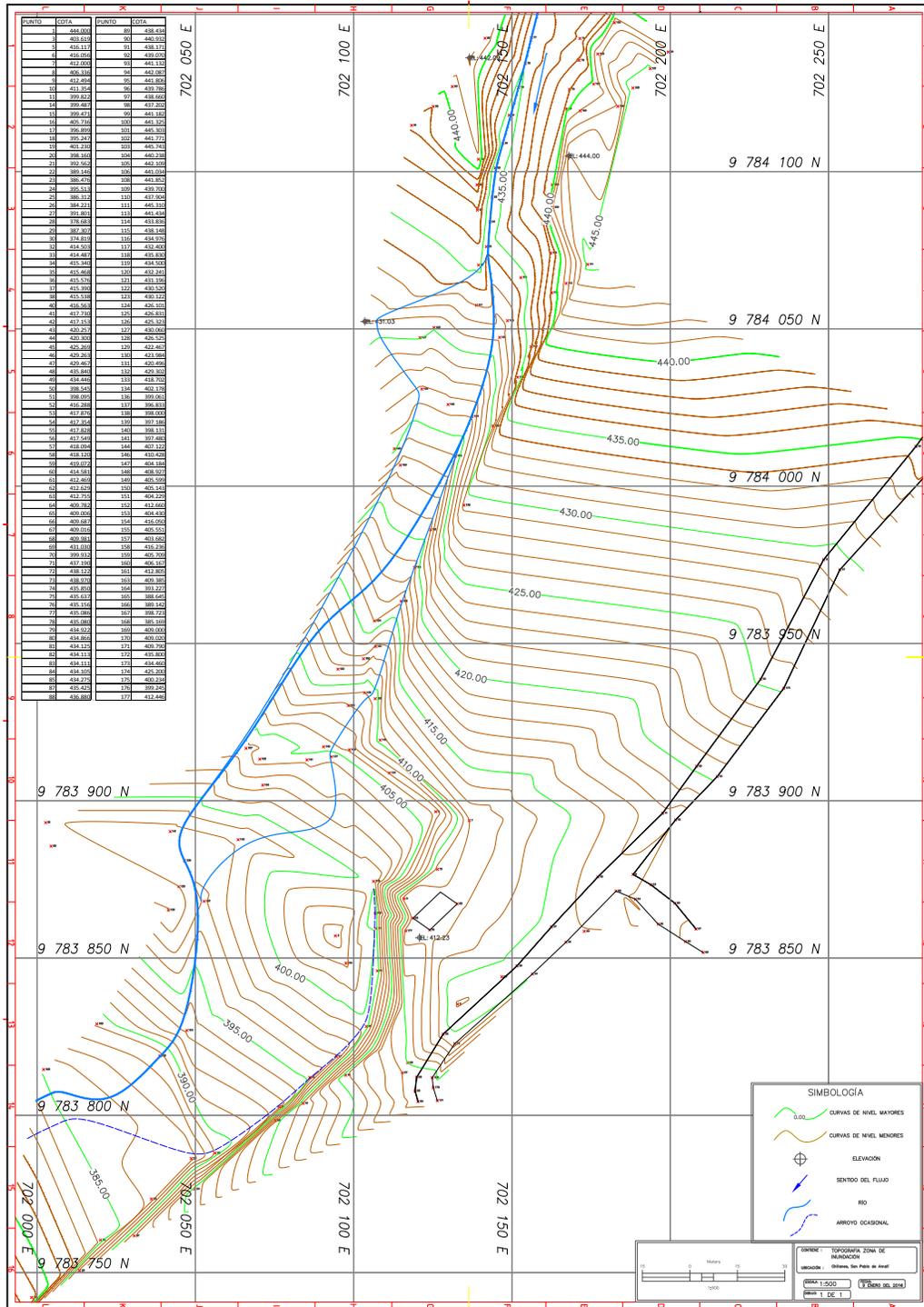


Figura 34. Mapa de contorno de la Universidad Católica, enero 2016.

# Anexo B. Informe de Hidrotambo sobre la inundación de marzo de 2015



HTSA 0078-2015

Ambato, 30 de septiembre de 2015

Señora doctora  
Gabriela Sanchez  
Dirección Nacional de Derechos Colectivos, Naturaleza y Ambiente  
**DEFENSORIA DEL PUEBLO**  
Presente:

**DISEÑO DE PROTECCIÓN HIDRÁULICA PARA  
SAN PABLO DE AMALI**

## ANTECEDENTES

En Marzo 20 de 2015, se presentó en el río Dulcepamba una avenida torrencial con un caudal estimado de 400 m<sup>3</sup>/s que duró 4 días, precedida por un torrente. San Pablo de Amali se encuentra en la confluencia de los ríos Dulcepamba y Salunguire, donde morfológicamente termina la cuenca de recepción e inicia el canal de desague. El último torrente amplió el cauce del río, al descender la crecida el cauce presenta anastomosis, cauce cruzado. Este cauce cruzado se convertirá en cauce meandrónico, hasta la próxima avenida en la que se repetirá el ciclo. Por la pendiente del cauce el río Dulcepamba en este sector (4,96%) es un río torrencial, razón por la que cuando aparecen avenidas tienden a ser siempre torrenciales. El periodo de ocurrencia de las avenidas en el río Dulcepamba es de 33 años y las de su afluente, el río Salunguire 15 años. En esto el río Dulcepamba es más caudaloso que el Salunguire, pero la parte proporcional de la cuenca que corresponde al Salunguire es mayor, razón por la que en invierno el río Salunguire es más caudaloso.

## DE LA PROTECCIÓN

La mejor alternativa de protección en este cruce de avenidas es una escollera a pie de talud de 2,5 m de altura de dos capas con una pendiente de 45°, entre la confluencia del río Salunguire en el Dulcepamba y el estero que desemboca en el río al sur del poblado. Con espigones para entarquinar el cauce meandrónico.

Sin más por el momento, aprovecho la oportunidad para enviarle un muy atento saludo.

Ing. Diego Soria Re  
Gerente General  
HIDROTAMBO S.A.

Figura 35. Informe de Hidrotambo S.A. sobre la inundación de marzo de 2015.

# Anexo C. Isoyetas de la precipitación

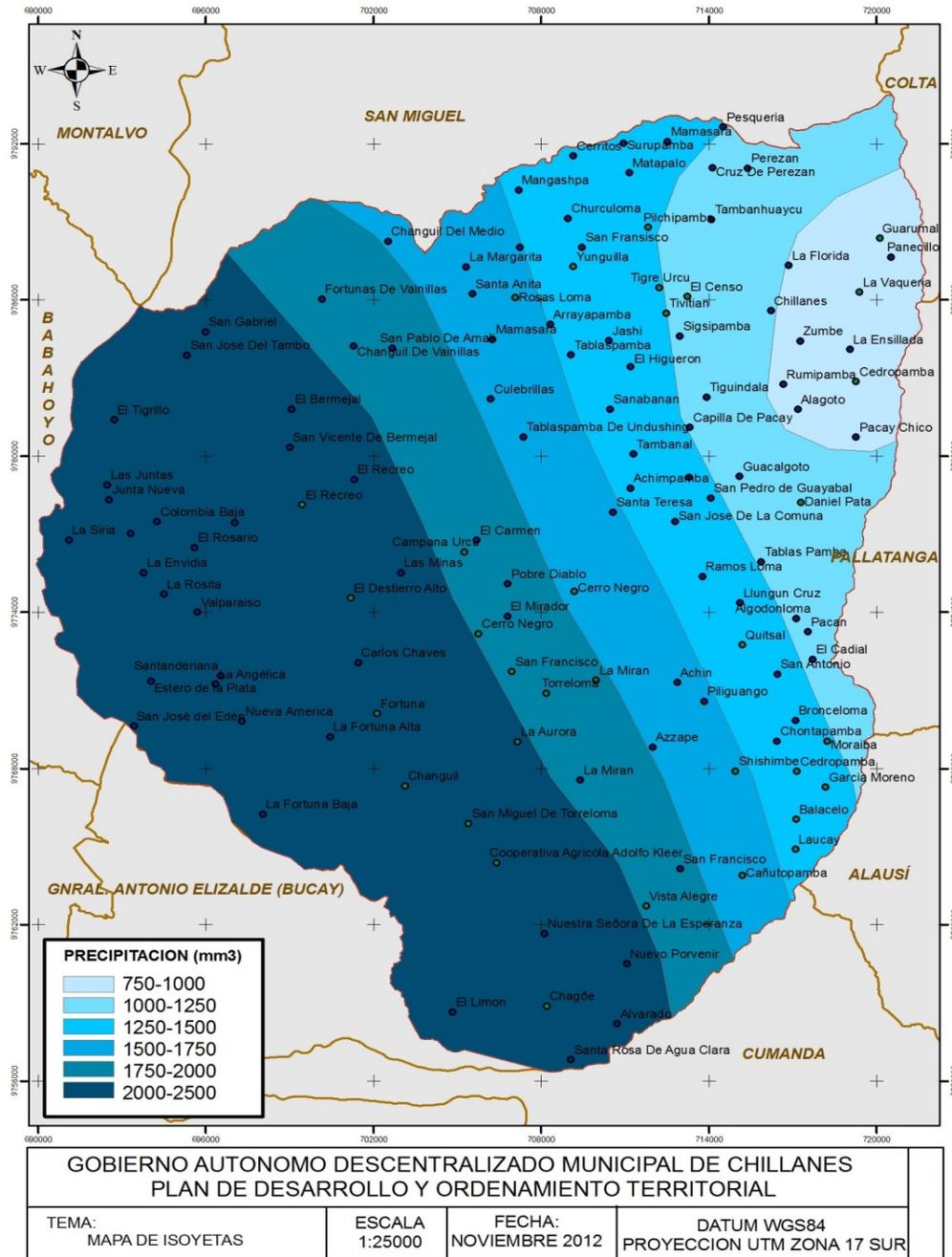


Figura 36. Isoyetas para el canton Chillanes.

## Anexo D. Definición del Equipo Dulcepamba



### EL PROYECTO DULCEPAMBA

El Proyecto Dulcepamba ha colaborado con el Centro de Cuencas Hidrográficas de la Universidad de California, Davis para hacer un análisis hidráulico e hidrológico de la cuenca Dulcepamba, ubicada en las laderas occidentales de los Andes en la Provincia Bolívar, Ecuador.

El equipo del Proyecto Dulcepamba fue comisionado por la comunidad de San Pablo de Amalí en 2013, para llevar a cabo un estudio de balance hídrico de la cuenca hidrográfica del río Dulcepamba para mejor informar la planificación de uso de agua y las solicitudes para la adjudicación de agua de conformidad con lo dispuesto en la Ley de Aguas Ecuatoriana.

Las metas del Proyecto desde su inicio han sido: 1) Realizar un estudio de disponibilidad de agua utilizando datos recolectados de estaciones hidrológicas y meteorológicas colocadas a lo largo de la cuenca hidrográfica del río Dulcepamba. 2. Realizar un estudio de necesidad de agua a través de una encuesta de un muestreo representativo de 10% de las familias residentes de la cuenca hidrográfica y un mapeo de usos del suelo actuales, utilizando la teledetección de imágenes satelitales y la tecnología de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El proyecto también ha analizado los riesgos que esperan para los agricultores de la cuenca hidrográfica en caso de perder, o no poder conseguir, sus derechos al agua.

El ámbito del Proyecto Dulcepamba se amplió para incluir una evaluación de las causas y riesgos de inundación debajo de la toma de agua del proyecto hidroeléctrico San José del Tambo después de que se una crecida de la época húmeda en el río Dulcepamba el 20 de marzo del 2015, que terminó en daños devastadores a la comunidad de San Pablo de Amalí.

El equipo del Proyecto Dulcepamba está compuesto por investigadores y voluntarios de muchos campos académicos y profesionales incluyendo:

**Rachel Conrad, Lic. Análisis Ambiental, Lic. Sociedad y Medioambiente Latinoamericano, Pitzer College (Mayo 2013-Presente)**

**Ramiro Trujillo, Lic. en Derecho, Universidad Central de Ecuador, Antiguo alcalde del Cantón de Chillanes, adonde se ubica la mayoría de la cuenca hidrográfica (Julio 2017 – Presente)**

**Pablo Tapia, Masters, Ambiente y Desarrollo, London School of Economics, Lic. Economía, Pontificia Universidad Católica de Ecuador (PUCE) (Septiembre 2015 – Presente)**

**Julio Sardan Muiba, Masters, Desarrollo Local y Territorial, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales Sede (FLACSO) (Julio 2015 –Diciembre 2015)**

\*Las fechas indican el tiempo dedicado a trabajar en el Proyecto

**Manuel Trujillo, Campesino local y Presidente de la comunidad de San Pablo de Amalí (Mayo 2013 – Presente)**

**Darwin Paredes, Campesino local y líder de adjudicaciones de agua (Enero 2015 – Presente)**

**Emily Conrad, Lic. Estudios Medioambientales, Connecticut College (Septiembre 2016- Presente)**

**Ian Reichardt, Lic. Comunicaciones con enfoque en Ciencias de Computación y Sostenibilidad, Universidad de Maryland (Enero 2014 – Enero 2017)**

**Beatriz Stambuk-Torres, Lic. Análisis Medioambiental y Estudios Internacionales e Interculturales, Pitzer College (Septiembre 2014 – Septiembre 2016)**

**Isiah Johnson, Lic. Ciencias Botánicas, Universidad de Maryland (Mayo 2014 – Agosto 2014)**

**Pasantes: 6 pasantes en el tercer y cuarto año de estudios de biología, estudios medioambientales, análisis ambiental, economía, política, periodismo, y estudios de paz y conflictos. (3-4 meses)**

En adición a su trabajo con la Universidad de California, Davis, el proyecto cuenta con el apoyo de la facultad de Ciencias Botánicas de la Universidad de Maryland a través de la donación y la instalación de las cuatro estaciones meteorológicas mencionadas, y a través del desarrollo de cálculos localizados de las necesidades de agua para los cultivos, basados en datos recolectados por las cuatro estaciones meteorológicas y las metodologías de evapotranspiración y aplicación de coeficientes de cultivos "Penman-Monteith". El proyecto también ha colaborado con la Universidad Católica del Ecuador (PUCE) en la realización de un levantamiento topográfico de la zona afectada por la crecida del río el 20 de marzo, 2015.

En 2016, el Proyecto ganó el Premio Embajadores del Planeta de Laboratorios para el Planeta (PlanetLabs), debido a su dedicación en el trabajo de hacer cambios globales visibles, accesibles y accionables, a través de su trabajo con la tecnología de teledetección para caracterizar necesidad de agua y riesgo de inundación.

El Proyecto Dulcepamba es principalmente financiado por la fundación Conservation Food and Health Foundation, y el Instituto de Estudios Ecologistas del Tercer Mundo es su patrocinador local.

Figure 37. Definición del Equipo del Proyecto Dulcepamba proveído por el Equipo.

## Referencias

- Alexander, J., and M.J. Cooker, 2016. Moving boulders in flash floods and estimating flow conditions using boulders in ancient deposits, *Sedimentology*, vol. 63, no. 6, pp. 582-1595.
- Barnes, H., 1987. Roughness Characteristics of Natural Channels: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849. United States Government Printing Office, Washington, 1987.
- Beck, E., J. Bendix, I. Kottke, F. Makeschin, and R. Mosandl (Eds.), 2008. Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador, *Ecological Studies*, vol. 198.
- Bennett, T.H., and J.C. Peters, Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management, 2000.
- Casulli, V. 2011. Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 67, no. 4, pp. 441-449.
- Chow, V.T., 1959. Open-channel hydraulics. McGraw-Hill.
- Conrad, R., 2016. Personal Communication (Email, Phone).
- Dunne, T., and L.B. Leopold, 1978. *Water In Environmental Planning*. Macmillan.
- Gobierno Autonomo Decentralizado Municipal Chillanes, 2012a. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial, Tipos de Suelo (Taxonomia), November 2012.
- Gobierno Autonomo Decentralizado Municipal Chillanes, 2102b. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial, Aptitud del Suelo November 2012.
- Jarrett, R.D., 1984. Hydraulics of high- gradient streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 110, no. 11, pp. 1519-1539.
- Julien, P.Y., 2002. *River Mechanics*. Cambridge University Press.
- Julien, P.Y., 2016. Sediment Mechanics, presented at the River Mechanics and Sediment Transport, Lima Peru, January, 2016.
- Oregon State University (OSU), 2005. Analysis Techniques: Flood Frequency Analysis, Streamflow Evaluations for Watershed Restoration Planning and Design, 2005. Accessed December 15, 2015 from <http://streamflow.engr.oregonstate.edu/analysis/floodfreq/#log>
- Soria, D.R. (General Manager, Hidrotambo S.A.), 2015. Engineer. HTSA 0078-2015. September 30th, 2015
- U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center (HEC), 2016. HEC-HMS, 2016, available at [www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/).

## Sobre los autores

**Jeanette Newmiller** es una estudiante de posgrado del Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental de la UC Davis, y una investigadora posdoctoral del Centro de Ciencias de Cuenca Hidrográficas de la UC Davis. Su trabajo se centra en el desarrollo de modelos de superficie de agua para la integración de necesidades humanas y ecológicas.

**Wesley Walker** es una estudiante de posgrado del Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental de la UC Davis y una investigadora posdoctoral del Centro de Ciencias de Cuenca Hidrográficas de la UC Davis. Su trabajo se centra en los sistemas de ingeniería de los recursos hídricos, gestión del agua y modelado hidrológico.

**William E. Fleenor** es un investigador y modelador hidráulico experimentado del Centro de Ciencias de Cuenca Hidrográficas de la Universidad de California, Davis. Su trabajo con dicho centro ha incluido modelos hidráulicos de caudales de crecida del Delta Norte, investigaciones de las restricciones hidrológicas en los efectos de restauración a través del Delta Sacramento-San Joaquin. Otros trabajos recientes incluyen el guiado de modelado de terrenos inundables para FEMA mediante modelos multidimensionales.

**Nicholas Pinter** ostenta la cátedra del Departamento de Ciencias de la Tierra y Planetarias en la Universidad de California, Davis y es Director Asociado del Centro de Ciencias de Cuenca Hidrográficas de la UC Davis. Su trabajo de investigación se centra en los procesos tierra-superficie (geomorfología) aplicada a un amplio rango de problemas, ríos particulares, geomorfología fluvial, hidrología de crecidas, terrenos inundables y cuencas hidrográficas. Su grupo de investigación aplica geomorfología fluvial, herramientas hidrológicas y estadísticas y otros métodos para evaluar las dinámicas de ríos y riesgos de inundaciones.

# Certificado de traducción

## Translator Certification

*I, Victoria Torres, Court certified interpreter of the State of California with License number 300478, hereby state that the attached translation entitled:*

*Analisis Hidrologico e Hidraulico del rio Dulcepamba*

*Is a true and accurate translation from its original in English into Spanish to the best of my knowledge and ability.*

*That I sign the present certification this day Monday, August 28<sup>th</sup> 2017 in the City of Santa Ana, California.*



**Victoria Torres  
State Certified Interpreter  
#300478**

*In collaboration with Alvaro Diez Campomanes, freelance translator and Civil Engineer with Master Degree in Structures, Geotechnics and Hydraulics by the "Universidad Politécnica de Madrid (UPM)" and by the "Ecole des Ponts ParisTech (ENPC)".*

