



DEFINICIÓN DE UMBRALES DE LLUVIA Y NIVELES DE AGUA EN LAS CORRIENTES EN ESTUDIO PARA EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

Proyecto

Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa, en el marco de las declaratorias de calamidad pública y desastre del Municipio de Mocoa - Putumayo, debidas al evento presentado el 31 de marzo de 2017.





**UNIDAD NACIONAL PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
Bogotá D.C., 2018**



	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	7
1 Evaluación del contenido de humedad de los suelos	8
2 Definición del hietograma tipo	9
3 Evaluación de los escenarios probables hidrológicos	11
4 Definición de secciones críticas del SAT	13
4.1 Secciones críticas	14
5 Curva de toma de decisiones.....	19
5.1 Umbrales de precipitación del aguacero	19
5.2 Umbrales de deslizamientos	19
5.2.1 Umbrales de intensidad que generan deslizamientos.....	20
5.2.2 Umbrales de precipitación acumulada que generan deslizamientos	23
5.3 Umbrales de caudal- nivel.....	26
5.4 Reglas de operación del SAT.....	40
5.4.1 Paso 1.....	40
5.4.2 Paso 2.....	40
5.4.3 Paso 3.....	40
5.4.4 Paso 4.....	40
5.4.5 Paso 5.....	42
5.4.6 Paso 6.....	43
5.4.7 Paso 7.....	43
5.5 Recomendaciones para la instrumentación de niveles de los cauces de los ríos Mulato, Sangoyaco y quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.....	44
5.6 Recomendaciones para el acoplamiento de los pronósticos del IDEAM para la zona con el SAT propuesto	45
6 Potencial aplicación del HEPS EN EL SAT.....	45
6.1 Scores para evaluar el pronóstico probabilista.....	47
6.1.1 Continuous Ranked Probability Score (CRPS)	47
6.1.2 El diagrama de confiabilidad (RD)	48
6.2 Análisis del pronóstico meteorológico con el WRF	49
6.3 Incertidumbre estructural.....	53
6.4 Incertidumbre paramétrica.....	53

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p>Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

6.5	Establecimiento del modelo determinista de pronóstico hidrológico	55
6.6	Establecimiento del modelo probabilista de pronóstico hidrológico (HEPS)	59
7	BIBLIOGRAFÍA	63

	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Serie de precipitación cada 10 minutos (estación Acueducto) e Índice de humedad del suelo simulado con el modelo GR4J. Fuente: Elaboración propia.....	8
Figura 2-1 Curvas de Huff para Mocoa, desarrolladas a partir de datos de precipitación (tormentas > 20 mm) para cada cuartil. Fuente: Elaboración propia.....	10
Figura 2-2 Curvas de masa de precipitación para eventos identificados (tormentas > 20 mm) para Mocoa en la parte izquierda y curvas de masa de precipitación adimensionales al margen derecho. En color negro se resalta la curva masa para el evento del 31 de marzo del 2017 y en azul la curva seleccionada (90% de probabilidad de ocurrencia). Fuente: Elaboración propia.....	10
Figura 3-1 Descripción de las consideraciones para la determinación del umbral de precipitación. Fuente: Rogelis (2007).	11
Figura 3-2 Curvas de caudal Vs precipitación en la cuenca para duraciones entre 60 y 360 min estado inicial saturado. Fuente: Elaboración propia.	12
Figura 4-1. Máxima altura de flujo para escenario no. 1. Fuente: elaboración propia.	14
Figura 4-2. Ubicación geográfica secciones críticas seleccionadas. Fuente: FEDERMAN	15
Figura 4-3. Sección transversal (arriba) y esquema de localización de la sección crítica 0. Fuente: Elaboración propia	16
Figura 4-4. Sección transversal (arriba) y esquema de localización de la sección crítica 1. Fuente: Elaboración propia	16
Figura 4-5. Sección transversal (arriba) y esquema de localización de la sección crítica 2. Fuente: Elaboración propia	17
Figura 4-6. Sección transversal (arriba) y esquema de localización de la sección crítica 3. Fuente: Elaboración propia	17
Figura 4-7. Sección transversal (arriba) y esquema de localización de la sección crítica 3. Fuente: Elaboración propia	18
Figura 4-8. Sección transversal (arriba) y esquema de localización de la sección crítica 4. Fuente: Elaboración propia	18
Figura 5-1. Niveles de alerta de precipitación del aguacero. Fuente elaboración propia.....	19
Figura 5-2. Umbrales intensidad - duración de la bibliografía y de los eventos del 31 de marzo y 31 de agosto de 2017. Fuente: elaboración propia.	21
Figura 5-3. Momentos estadísticos de la recopilación bibliográfica. Fuente: adaptado de Ramos et al. (2015).	21
Figura 5-4. Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos dada una duración y evento del 31 de marzo de 2017. Fuente: elaboración propia.....	22
Figura 5-5. Niveles de alerta de intensidad dada una duración que generan deslizamientos en la cuenca de las quebradas Taruca, Taruquita y ríos Sangoyaco y Mulato.....	23
Figura 5-6. Precipitación acumulada vs días antecedentes, estación diaria Mocoa Acueducto desde 1956. Fuente: elaboración propia.....	24
Figura 5-7. Probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa para las quebradas de La Taruca y La Taruquita. Fuente: elaboración propia.	25
Figura 5-8. Niveles de alerta de precipitación acumulada que genera deslizamientos para las quebradas de La Taruca y La Taruquita. Fuente: elaboración propia.	26
Figura 5-9 Esquema de localización sensores de nivel FEDERMAN - SIATA.....	27
Figura 5-10 Umbrales de nivel para Sensor A. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.	29
Figura 5-11 Umbrales de nivel para Sesor B. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.	30
Figura 5-12 Umbrales de nivel para Sensor C. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.	31
Figura 5-13 Umbrales de nivel para Sensor D. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.	32
Figura 5-14 Umbrales de nivel para Sensor E. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.	33
Figura 5-15 Umbrales de nivel para Sensor F. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.	34
Figura 5-16 Umbrales de nivel para Sensor G. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.....	35
Figura 5-17 Umbrales de nivel para Sensor H. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.	36
Figura 5-18 Umbrales de nivel para Sensor I. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.	37
Figura 5-19 Umbrales de nivel para Sensor J. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.	38
Figura 5-20 Umbrales de nivel para Sensor K. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.	39



	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

Figura 5-21. Esquema de reglas de operación del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones en la cuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco y quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa. Fuente: elaboración propia.41

Figura 5-22. Reglas de operación para la obtención del nivel de alerta de deslizamientos. Fuente: elaboración propia.42

Figura 5-23. Reglas de operación para la obtención del nivel de alerta de deslizamientos-precipitación del aguacero. Fuente: elaboración propia.43

Figura 5-24. Reglas de operación para la obtención del nivel de alerta del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones en la cuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco y quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa. Fuente: elaboración propia.....44

Figura 6-1 Evaluación continua del puntaje de probabilidad clasificado. Fuente: elaboración propia.47

Figura 6-2 Diagrama de confiabilidad. Fuente: elaboración propia48

Figura 6-3 PCA de los escenarios de precipitación media generados con el WRF para el período comprendido entre el 19 de noviembre de 2016 y el 25 de enero de 2017. Fuente: Elaboración propia50

Figura 6-4. Comportamiento del escenario determinista de precipitación, días antes del evento crítico de marzo 31 de 2017. Cada gráfica corresponde a un horizonte de pronóstico diferente, desde 3 días en la parte superior, hasta un día en la parte inferior. Fuente: Elaboración propia50

Figura 6-5 Comportamiento de los escenarios probabilistas de precipitación días antes del evento crítico de marzo 31 de 2017. .51

Figura 6-6. Comportamiento de los distintos escenarios deterministas del HEPS, tres días antes del evento crítico de marzo 31 de 2017. Fuente: Elaboración propia56

Figura 6-7. Comportamiento de los distintos escenarios deterministas del HEPS, dos días antes del evento crítico de marzo 31 de 2017. Fuente: Elaboración propia57

Figura 6-8. Comportamiento de los distintos escenarios deterministas del HEPS, un día antes del evento crítico de marzo 31 de 2017. Fuente: Elaboración propia57

Figura 6-9. Comportamiento de los distintos escenarios probabilistas del HEPS, tres días antes del evento crítico de marzo 31 de 2017. Fuente: Elaboración propia60



Figura 6-10. Comportamiento de los distintos escenarios probabilistas del HEPS, dos días antes del evento crítico de marzo 31 de 2017. Fuente: Elaboración propia60

Figura 6-11. Comportamiento de los distintos escenarios probabilistas del HEPS, un día antes del evento crítico de marzo 31 de 2017. Fuente: Elaboración propia61

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p>Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
--	---	--

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Umbrales de precipitación para los diferentes niveles de alerta en la cuenca compuesta por los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita.	12
Tabla 5-1. Coordenadas sensores de nivel.....	27
Tabla 5-2. Umbrales propuestos de altura lámina de agua para cada sensor de nivel instalado.....	28
Tabla 5-3. Umbrales propuestos de caudal para cada sensor de nivel instalado	28
Tabla 6-1 Función objetivo y scores del MEPS para el periodo comprendido entre el 19 de noviembre de 2016 y el 25 de enero de 2017.....	52
Tabla 6-2 Configuración del algoritmo de downscaling temporal para la generación de series de precipitación a resolución de 10 minutos.....	53
Tabla 6-3 Conjuntos paramétricos para el modelo GR4J explorados en el HEPS.	54
Tabla 6-4 Conjuntos paramétricos para el modelo GR4J explorados en el HEPS.	54
Tabla 6-5 Conjuntos paramétricos para el modelo Sacramento explorados en el HEPS.....	54
Tabla 6-6. MAE evaluado para las configuraciones del pronóstico determinista basado en la simplificación de varios esquemas multiescenario en los tres horizontes de pronóstico para el periodo comprendido entre noviembre de 2016 y enero de 2017.	58
Tabla 6-7. Fiabilidad de las distintas configuraciones probabilistas del HEPS.....	62



	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

INTRODUCCIÓN

En esta sección se presentan los umbrales propuestos para el sistema de alerta temprana de la cuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco y las quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa, Putumayo. Se determinaron umbrales en función de diferentes variables que influyen en la generación de flujo de material desagregado con lo que se obtuvieron niveles de alerta para precipitación del aguacero, para intensidad-duración del aguacero, para precipitación acumulada de 4 días antecedentes al aguacero y caudal-nivel en los cauces.

Los umbrales de precipitación fueron evaluados con la metodología FFG (Flash Flood Guidance) establecida por la NOAA (2010). Para su evaluación se presentan las hipótesis de evaluación de la humedad del suelo, hietogramas probables, escenarios hidrológicos, secciones críticas y curvas para la toma de decisiones. Finalmente se presentan simulaciones del Sistema de pronóstico hidrológico probabilista o multi-escenario (HEPS), conformado por la propagación de los pronósticos probabilistas del WRF (Weather Research & Forecasting) en tres modelos hidrológicos con múltiples parametrizaciones.

En la metodología FFG se denomina umbral pluviométrico a la precipitación acumulada que genera un caudal o escorrentía correspondiente al de desborde en una determinada sección hidráulica (Rogelis, 2007; NOAA, 2010). El valor que toma un umbral de precipitación depende de las características geográficas e hidrológicas de la cuenca y del canal del río.

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p>Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

1 EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS SUELOS

Para la definición de los umbrales de precipitación se consideró la variación de humedad inicial en el suelo con base en el índice de humedad del suelo (S) del modelo GR4J.

La humedad del suelo se constituye como una variable clave en el funcionamiento del SAT debido a que ésta cambia continuamente dependiendo de los procesos de pérdidas (evapotranspiración, escorrentía y percolación hacia suelos profundos o un acuífero) y ganancias (precipitación y el deshielo), generando así mayor o menor escorrentía (NOAA, 2010).

En vista de que en el área de estudio no se contó con registros de humedad en el suelo, se determinó esta variable mediante el modelo hidrológico GR4J, calibrado para la cuenca vecina Piedra Lisa II, dada su similitud con la cuenca objeto de estudio y la disponibilidad de información para establecer un marco de optimización paramétrica.

La serie del índice de humedad simulada con el modelo se presenta en la Figura 1-1. No obstante, existe otra variable importante que controla la escorrentía en el modelo; dicha variable es el almacenamiento de agua en el acuífero, de modo que esta variable al igual que la humedad fue tomada como variable a considerar para la definición de las condiciones iniciales en cada paso de tiempo.

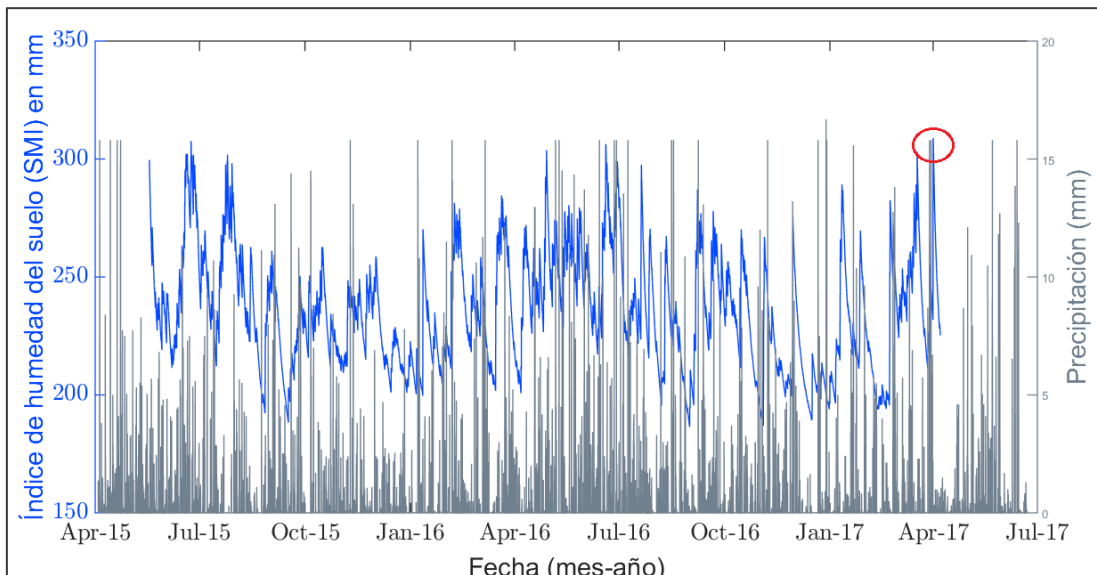




Figura 1-1 Serie de precipitación cada 10 minutos (estación Acueducto) e Índice de humedad del suelo simulado con el modelo GR4J. Fuente: Elaboración propia

	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

La Figura 1-1 muestra claramente que la saturación de la cuenca (picos) se da cuando eventos de gran intensidad se repiten en períodos cortos de tiempo, tal es el caso del evento crítico de marzo de 2017 (resaltado en color rojo). La metodología de la NOAA no establece la forma en la cual se debe establecer el estado de saturación o humedad de la cuenca, y en su defecto indica la búsqueda de fuentes de este tipo de información. Al respecto Rogelis (2007) presenta como indicador la cantidad de precipitación acumulada en un periodo arbitrariamente definido. Criterio que define la autora como un indicador a explorar con atención dada la relación de la precipitación con la duración y la fisiografía de la cuenca.

En este ejercicio, dada la carencia de información observada en la zona de estudio, se propone la evaluación del contenido de saturación de la cuenca como un proceso de inferencia relacionado proporcionalmente al caudal simulado, es decir, si el caudal es bajo la saturación de la cuenca es baja porque es un fenómeno asociado directamente a baja pluviosidad o alta capacidad de retención del suelo; igualmente si el caudal es alto es de esperar que la cuenca está saturada porque el pico obedece directamente a una condición de aporte de caudal superficial importante.

No obstante, la instalación de nuevas estaciones automáticas con sensores de humedad facilitará la determinación directa de esta variable como entrada en la metodología FFG, asimismo tales mediciones permitirán la calibración de los modelos hidrológicos para inferir el estado de saturación de la cuenca como una condición futura de la cuenca dentro de las simulaciones del HEPS.

2 DEFINICIÓN DEL HIETOGRAMA TIPO

En la definición del hietograma tipo se asumió una distribución homogénea de la precipitación a lo largo de todas las unidades de respuesta hidrológica homogénea (URH).

Para saber como se distribuye la lluvia en los diferentes escenarios, se realizó un análisis de la precipitación en Mocoa, tomando como información base los registros precipitación de la estación automática Mocoa Acueducto a una resolución de 10 minutos desde el 2015 al 2017.

El análisis de la lluvia se llevó a cabo mediante el análisis con las curvas de Huff (Luna Vera, 2013), donde se sugiere una familia de curvas adimensionales con patrones temporales de tormentas basado en datos de cuencas del medio oeste de USA. Los eventos de lluvias analizados se dividieron en cuatro grupos, de acuerdo con la fracción de intervalo de tiempo en el cual se presentaba la máxima intensidad de lluvia: en el primer, segundo,

tercer o cuarto cuartil o intervalos de la duración de la tormenta (Ver Figura 2-1), seleccionando el segundo cuartil que representa las duraciones de eventos de precipitación característica para Mocoa.

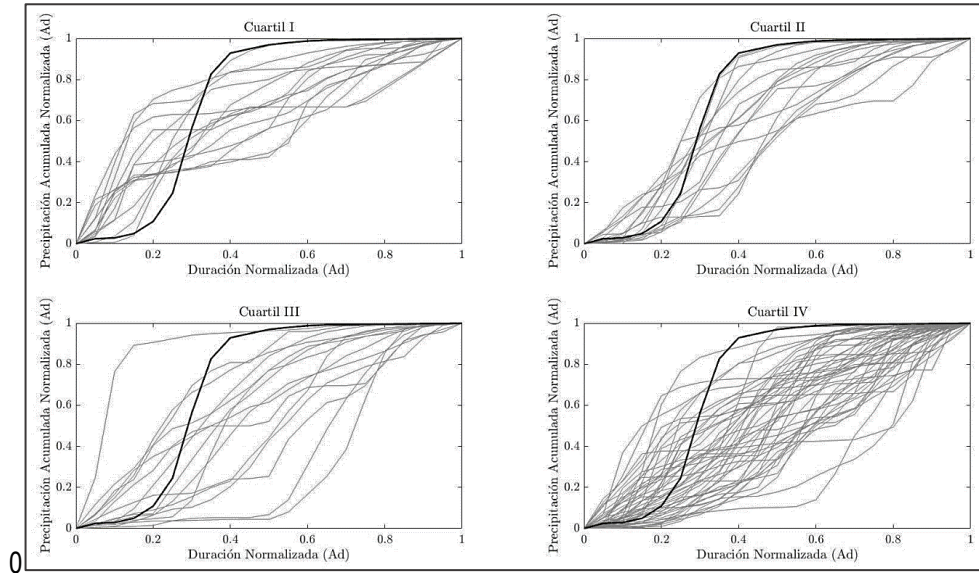


Figura 2-1 Curvas de Huff para Mocoa, desarrolladas a partir de datos de precipitación (tormentas > 20 mm) para cada cuartil. Fuente: Elaboración propia

Además, Huff asoció la probabilidad de ocurrencia de los patrones de tormentas, de 10 a 90%, para este caso se tomó la correspondiente al 90% (Ver Figura 2-2). Para profundizar en la metodología empleada en el análisis de la precipitación remitirse a Bonta (2004). Así mismo, se tomaron duraciones de lluvia entre 60 y 360 minutos cada 30 minutos, distribuidas en el hietotipo obtenido con el análisis de Huff, con cantidades de lluvia incrementales cada 5 minutos hasta llegar a una precipitación máxima de 200 mm.

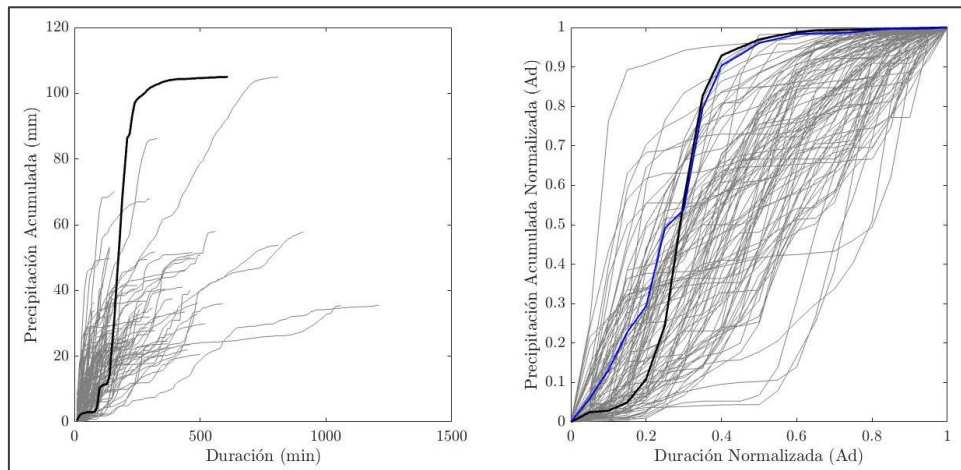


Figura 2-2 Curvas de masa de precipitación para eventos identificados (tormentas > 20 mm) para Mocoa en la parte izquierda y curvas de masa de precipitación adimensionales al margen derecho. En color negro se resalta la curva masa para el evento del 31 de marzo del 2017 y en azul la curva seleccionada (90% de probabilidad de ocurrencia). Fuente: Elaboración propia

3 EVALUACIÓN DE LOS ESCENARIOS PROBABLES HIDROLÓGICOS

Con el propósito de representar diferentes estados de humedad en el suelo, se tomaron de los caudales simulados para la cuenca en los cuantiles 15%, 50% y 95% para la condición seca, media y saturada, respectivamente. Posteriormente se seleccionó el máximo caudal presentado por condición y se realizó la simulación para el día antecedente al cual se generó dicho caudal, obteniendo como resultado de la simulación las variables de estado para cada una de las condiciones antecedentes analizadas.

El hietotipo planteado se introdujo en el modelo hidrológico, implementando las diferentes condiciones iniciales del modelo descritas anteriormente. Para cada una de las evaluaciones se extrajo el caudal máximo alcanzado en una intensidad y duración específica. Con base a la metodología de la NOAA (2010), se trazaron curvas de precipitación-escorrentía para diferentes concentraciones volumétricas. Posteriormente teniendo en cuenta las secciones críticas y las capacidades hidráulicas de cada una de las secciones identificadas se generaron los umbrales de precipitación, resolviendo la relación inversa de la relación lluvia-escorrentía de la cuenca. El esquema metodológico se presenta en la Figura 3-1.

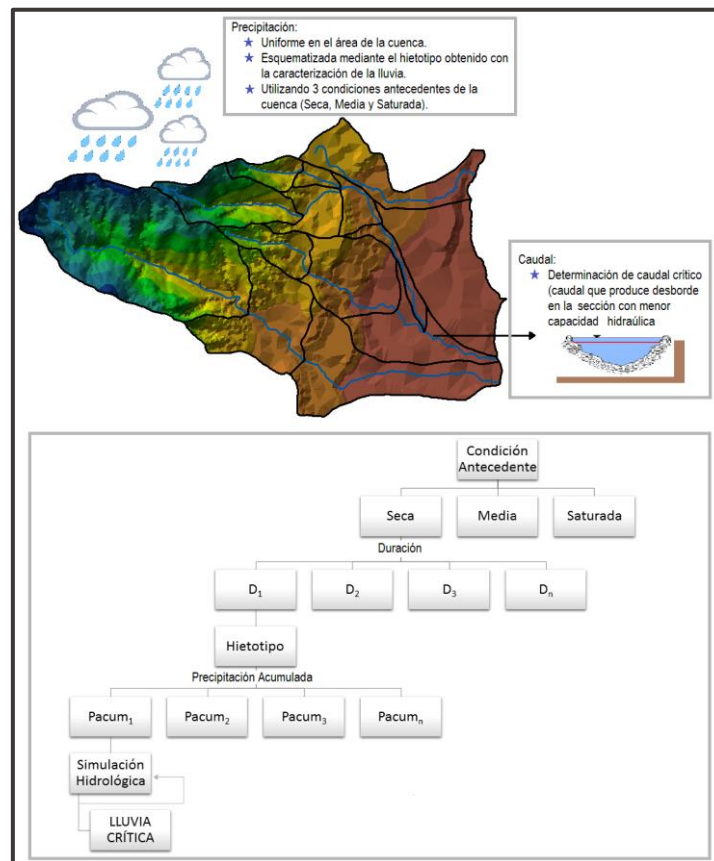


Figura 3-1 Descripción de las consideraciones para la determinación del umbral de precipitación. Fuente: Rogelis (2007).

A continuación, se presenta la gráfica lluvia-escorrentía de la cuenca para una condición antecedente saturada (Ver Figura 3-2), siendo ésta la condición más crítica.

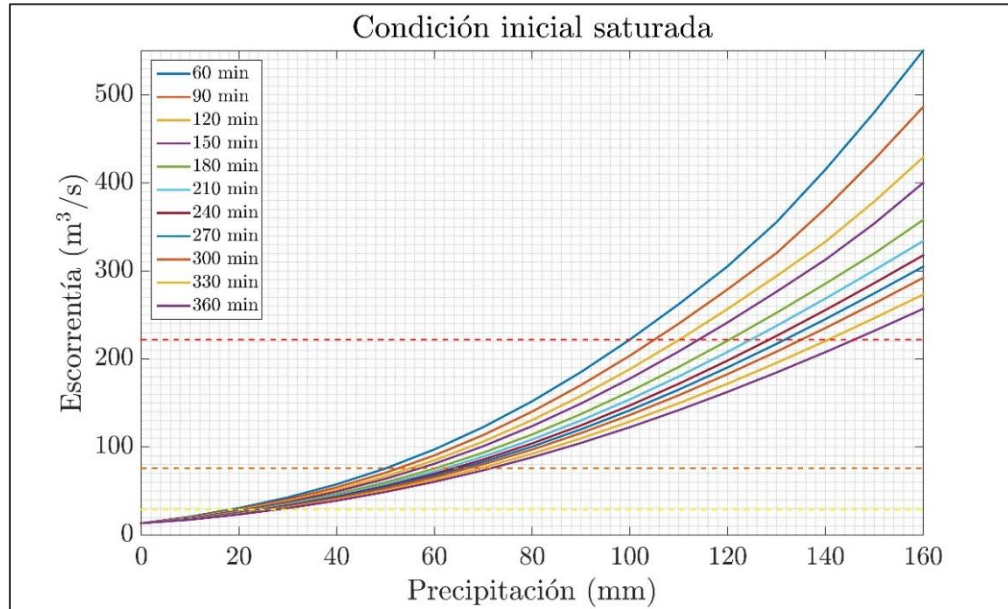


Figura 3-2 Curvas de caudal Vs precipitación en la cuenca para duraciones entre 60 y 360 min estado inicial saturado. Fuente: Elaboración propia.

A partir de las curvas de calibración y de la estimación de los caudales para las secciones críticas, se trazaron los umbrales para los diferentes niveles de alerta (amarillo, naranja y rojo), presentados en las gráficas anteriores. Los umbrales de precipitación se determinan a través del proceso inverso de la relación lluvia-escorrentía de la cuenca, donde se conoce el caudal correspondiente a la alerta y se identifican los diferentes escenarios de precipitación que podrían generar dicho caudal (de Figura 5-10 a Figura 5-20). Los escenarios de precipitación identificados, asociados a cada nivel de alerta se presentan en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Umbrales de precipitación para los diferentes niveles de alerta en la cuenca compuesta por los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita.

Duración (min)	Precipitación (mm)		
	Amarilla	Naranja	Roja
60	18	50	100
120	21	55	110
180	23	60	120
240	24	64	128
300	25	67	135
360	28	72	146

Fuente: Elaboración propia

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p>Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
--	---	--

4 DEFINICIÓN DE SECCIONES CRÍTICAS DEL SAT

En este apartado se presenta una descripción del proceso llevado a cabo para la definición umbrales de nivel, el cual partió de la determinación de sectores críticos o zonas cercanas a los cauces que pueden ser afectadas por una avenida torrencial y de las curvas de gasto producto de la modelación hidráulica. Esta definición hace parte de los análisis propuestos para el diseño del sistema de alerta temprana del municipio y la construcción de herramientas para la toma de decisiones.

Se presentan en primer lugar las zonas que fueron catalogadas como críticas o susceptibles a ser afectadas por una avenida torrencial. Posteriormente, se presenta cómo, a partir de dichas secciones, de determinaron umbrales de nivel en los sensores ubicados en el área por el SIATA y la Unidad Nacional de gestión de riesgo de desastres UNGRD, a través del contratista Federman. Finalmente, se presentan gráficas que resumen los umbrales definidos, en términos de niveles y precipitación, para facilitar la toma de decisiones.

La determinación de las secciones críticas en cada cauce fue realizada inicialmente a partir de los resultados de las modelaciones hidráulicas, que indicaban qué parte de la zona urbana era más susceptible a ser afectada por una avenida torrencial.

Al evaluar los resultados de la modelación antes condiciones de precipitación asociadas a un volumen de deslizamiento mayor al estimado para el evento del 31/03/17, se observaba una mancha de inundación como la presentada en Figura 4-1. En dicha figura se puede observar que las mayores profundidades de flujo se presentan en la parte alta de la quebrada Taruca y del río Sangoyaco y que, bajo condiciones de precipitación acumulada muy desfavorables, los barrios que se verían afectados por un flujo de lodos y/o detritos se podrían agrupar en cuatro áreas principales: (i) zona ubicada en la margen izquierda de la quebrada Taruca en la parte norte del municipio, comprendida por los barrio Altos del bosque, Jose E. Muñoz y los Pinos, presentando alturas de flujo de incluso 10m , (ii) área ubicada en las cercanías de la desembocadura de la quebrada Taruca en el río Sangoyaco, que comprende los barrios Laureles, San Miguel, San Fernando y Urb. Nuevo Horizonte, con alturas de flujo de hasta 3m, (iii) zona comprendida por los barrios El Carmen, la Reserva, Condominio norte y urb. Normandia, que a pesar de estar lejos de la quebrada Taruca, se encuentran en una zona donde drenan una serie de quebradas y por donde puede desviarse parte del flujo de la quebrada Taruca en caso de transportar mucho volumen, se observan allí alturas de flujo de menores a 1m y en algunas partes de hasta 3m, y (iv) área localizada en las cercanías de la desembocadura del río Sangoyaco en el río Mocoa, que comprende principalmente los barrios La Independencia y San Agustín. Se observan igualmente alturas de flujo elevadas en zonas alejadas de la zona

urbana como en la vereda San Antonio, especialmente en las cercanías de la Urb. Altos de Junín, así como en el salto de la quebrada Taruca hacia la quebrada San Antonio.

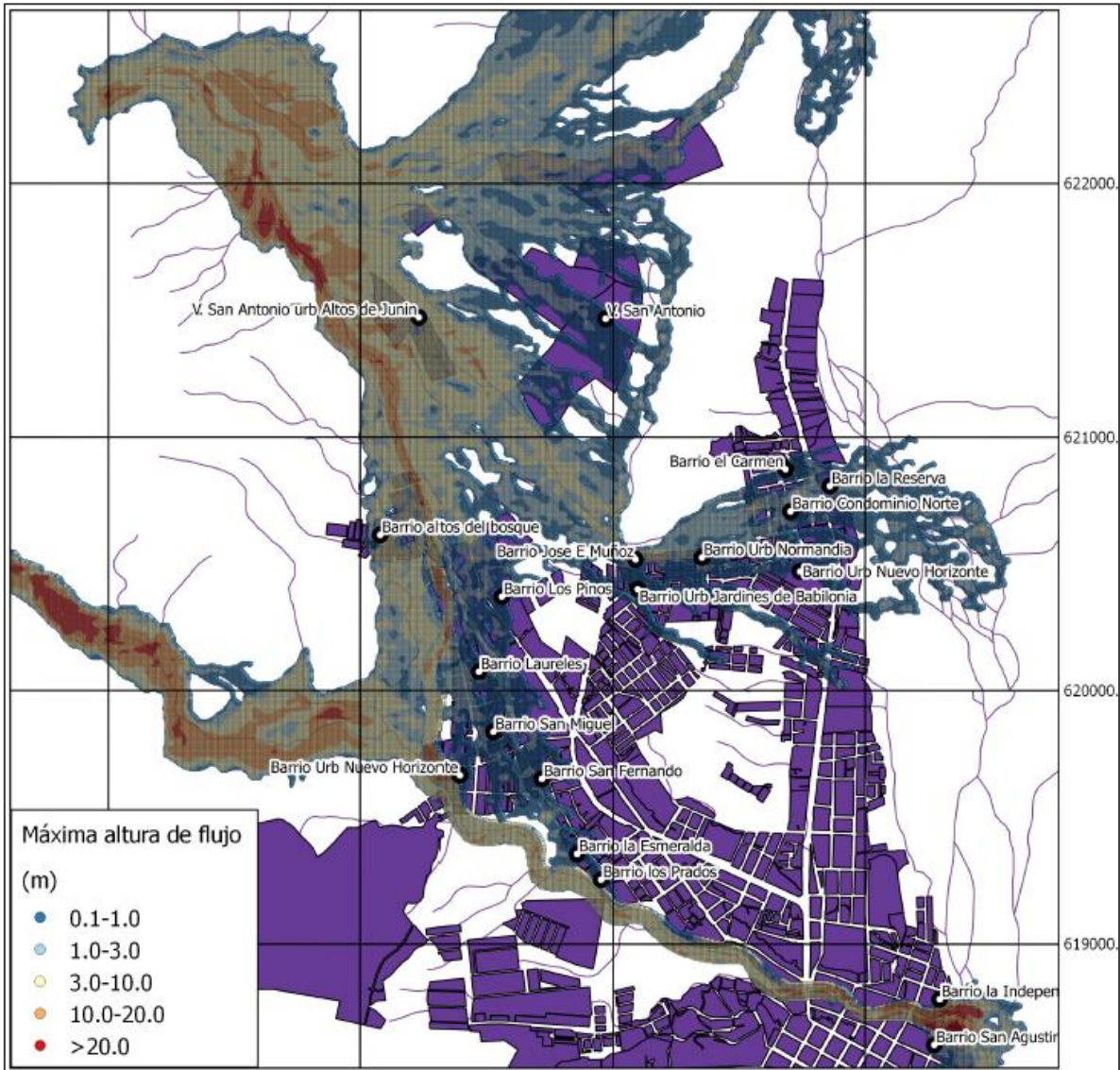


Figura 4-1. Máxima altura de flujo para escenario no. 1. Fuente: elaboración propia.

4.1 Secciones críticas

A partir de la evaluación del perfil de terreno en los barrios mencionados anteriormente y tras la revisión del perfil del terreno en esas zonas, se identificaron las casas más cercanas al cauce y a partir de las mismas, las secciones críticas. Estas secciones son presentadas en Figura 4-2 y se considera que en ellas se presentaría inundación con los caudales más bajos.

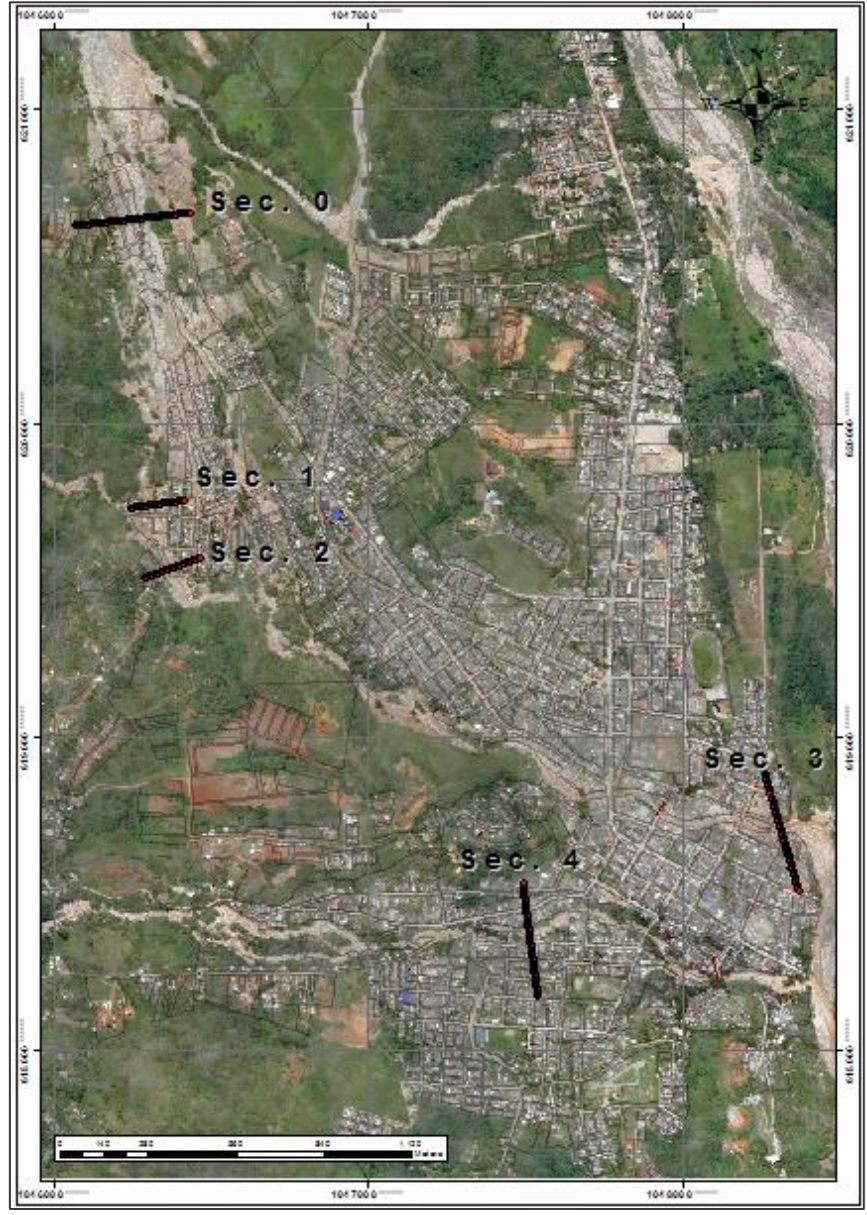


Figura 4-2. Ubicación geográfica secciones críticas seleccionadas. Fuente: FEDERMAN

Para cada una de las secciones críticas, se generó un perfil topográfico en donde se observa la variación de altura y la ubicación de las casas con menor cota. En las siguientes figuras, se presenta la sección transversal de cada una de las secciones identificadas. Las curvas de calibración de cada una de estas secciones y las cotas de las edificaciones más cercanas al cauce, fueron empleadas para estimar un caudal de la inundación de la sección, que posteriormente sería empleado para establecer niveles de alerta en los sensores de nivel que actualmente se encuentran instalados en la zona.

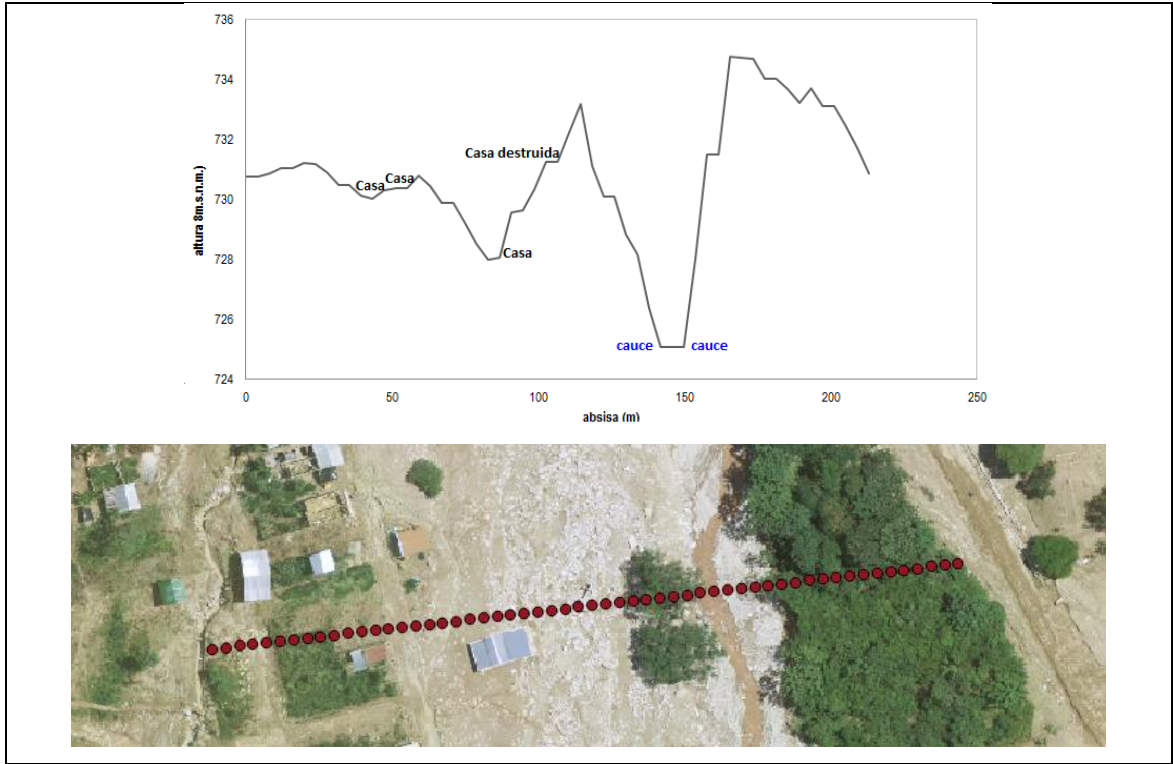


Figura 4-3. Sección transversal (arriba) y esquema de localización de la sección crítica 0. Fuente: Elaboración propia

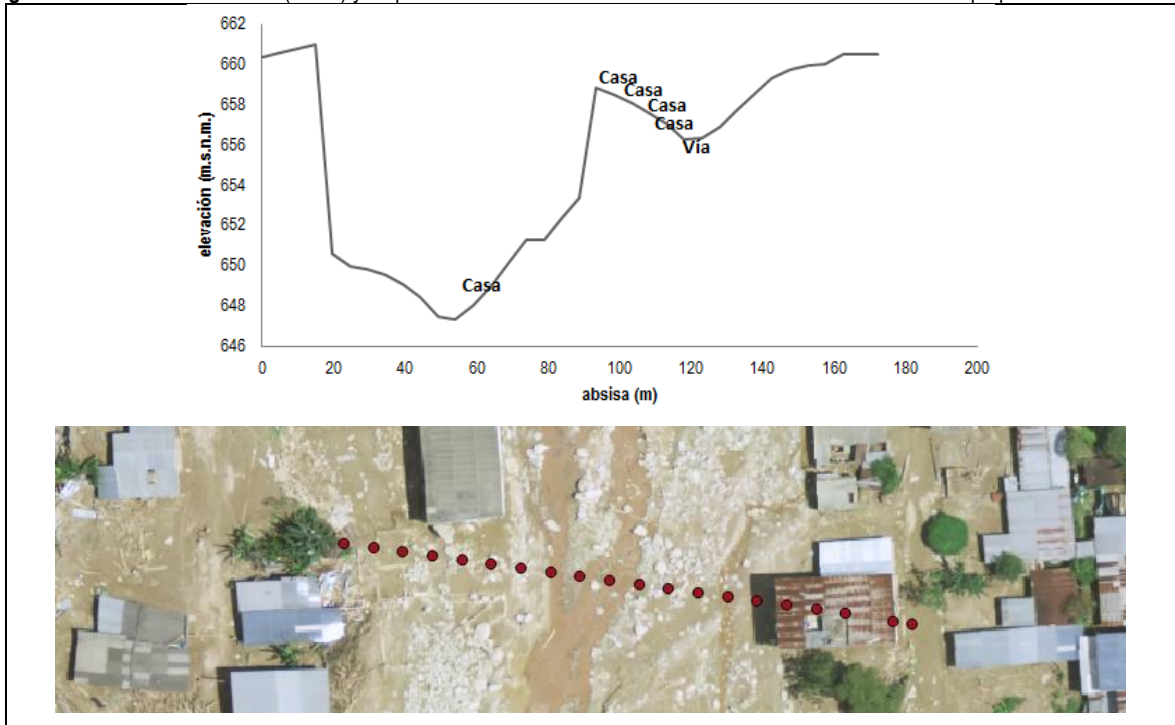


Figura 4-4. Sección transversal (arriba) y esquema de localización de la sección crítica 1. Fuente: Elaboración propia

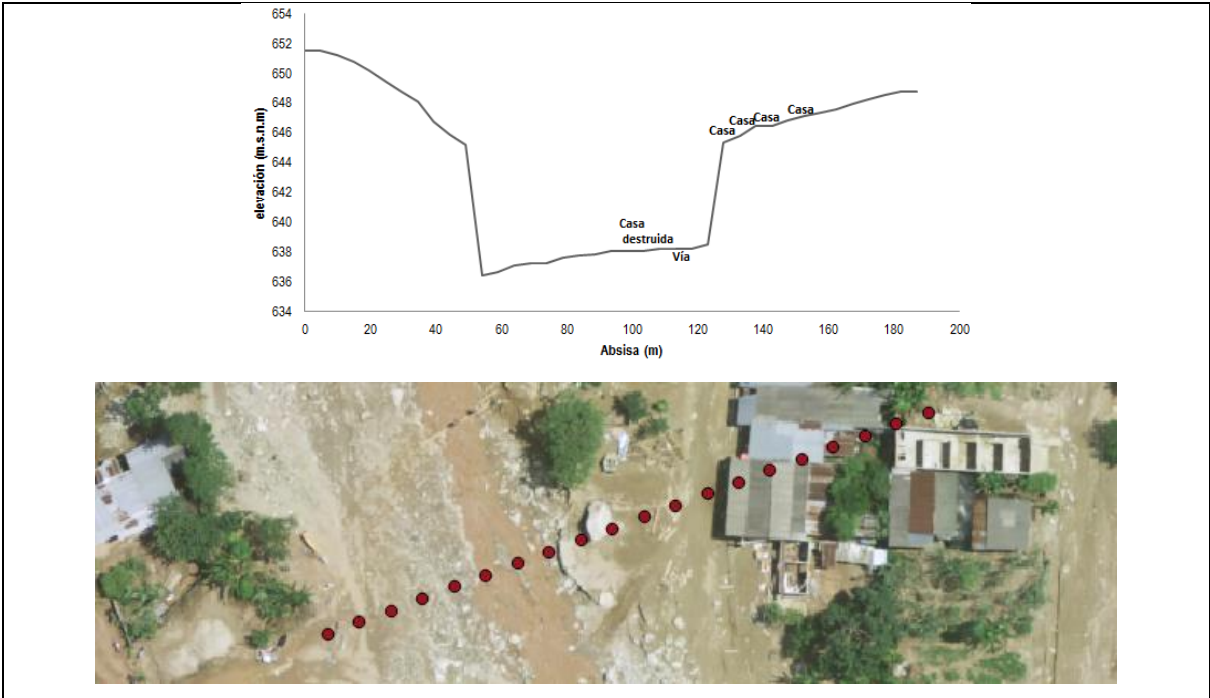


Figura 4-5. Sección transversal (arriba) y esquema de localización de la sección crítica 2. Fuente: Elaboración propia

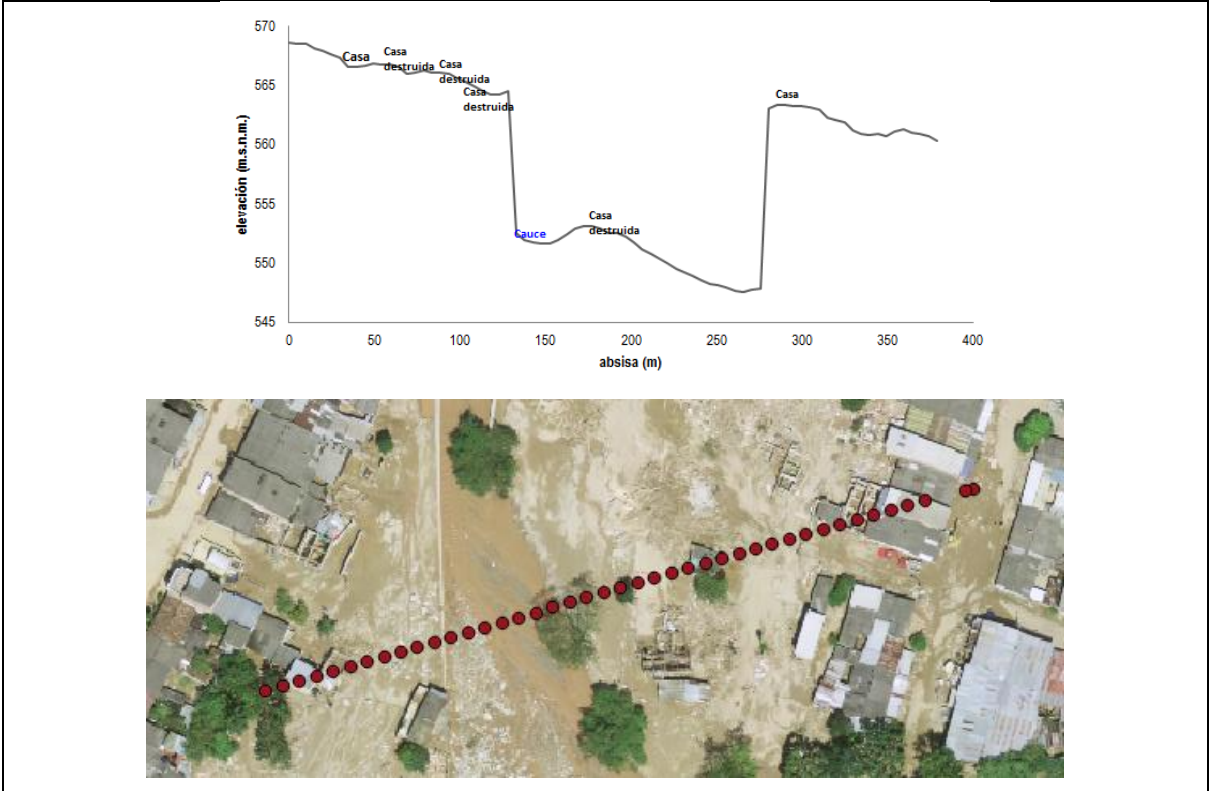


Figura 4-6. Sección transversal (arriba) y esquema de localización de la sección crítica 3. Fuente: Elaboración propia

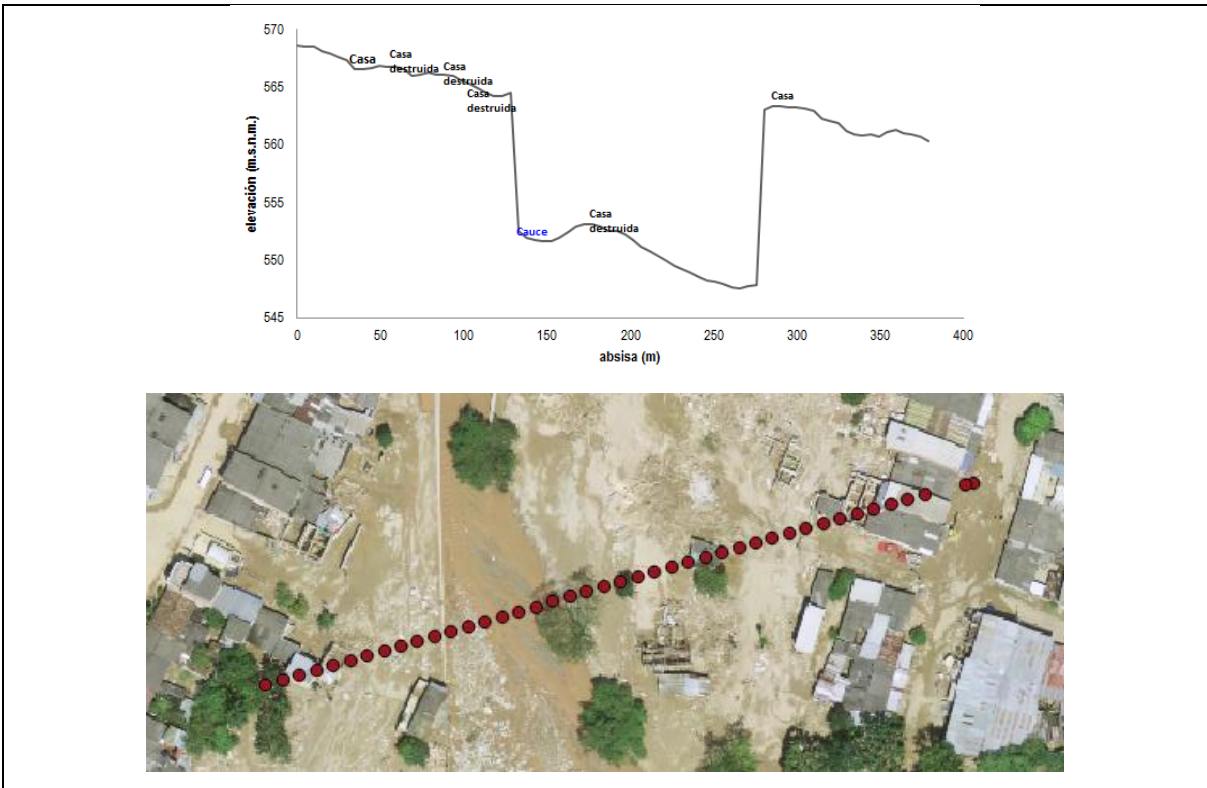


Figura 4-7. Sección transversal (arriba) y esquema de localización de la sección crítica 3. Fuente: Elaboración propia

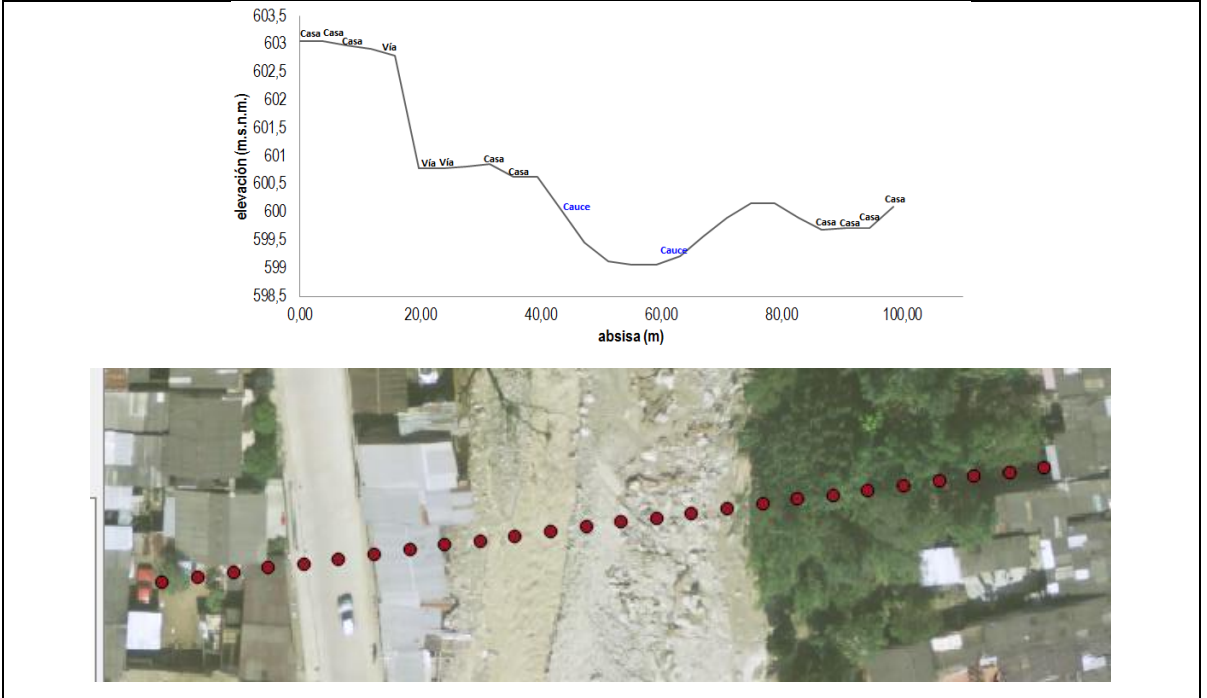


Figura 4-8. Sección transversal (arriba) y esquema de localización de la sección crítica 4. Fuente: Elaboración propia

5 CURVA DE TOMA DE DECISIONES

5.1 Umbrales de precipitación del aguacero

Las diferentes condiciones iniciales del modelo hidrológico presentadas en los capítulos 1, 2 y 3, fueron evaluadas para extraer el caudal máximo alcanzado en una intensidad y duración específica, para finalmente en base a las secciones críticas y las capacidad hidráulica de cada una de las secciones identificadas generar los umbrales de precipitación, resolviendo la relación inversa de la relación lluvia-escorrentía de la cuenca.

A partir de las curvas de calibración y de la estimación de los caudales para las secciones críticas, se trazaron los umbrales para los diferentes niveles de alerta (amarillo, naranja y rojo), donde se conoce el caudal correspondiente a la alerta y se identifican los diferentes escenarios de precipitación que podrían generar dicho caudal. En la Figura 5-1 se presenta la precipitación referente a un nivel de alerta específico en función de la duración de los eventos de precipitación.

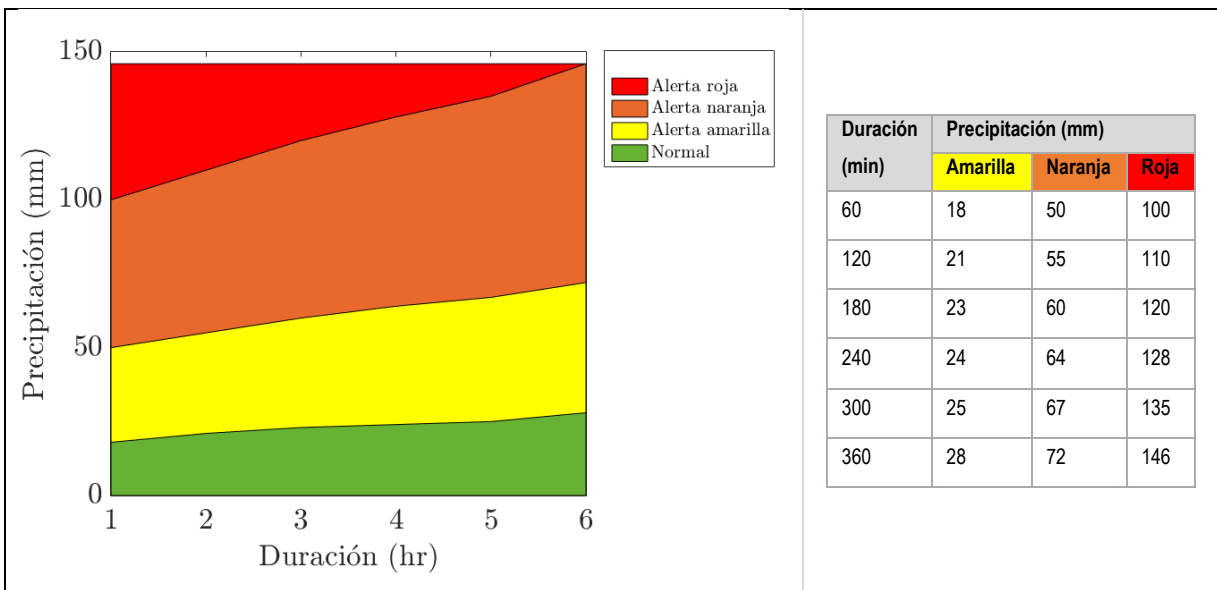


Figura 5-1. Niveles de alerta de precipitación del aguacero. Fuente elaboración propia

5.2 Umbrales de deslizamientos

En el documento “Definición de umbrales de precipitación que generen deslizamientos” se realizó una revisión bibliográfica en la que se recopilaron umbrales reportados en artículos publicados en revistas indexadas, con el fin de conocer las variables de precipitación que más influyen como factores detonantes de deslizamientos y flujos de detritos en diferentes partes del mundo. Se encontró que principalmente la mayoría de los umbrales determinados para zonas particulares corresponden a relaciones intensidad-duración, seguido de la precipitación acumulada

antecedente de varios días. Es por esto que para la determinación de los umbrales se utilizaron los parámetros de lluvia antecedente y de intensidad – duración cuyos procedimientos fueron descritos en los capítulos 2 y 6 del documento “Definición de umbrales de precipitación que generen deslizamientos” respectivamente.

5.2.1 Umbrales de intensidad que generan deslizamientos

Para la determinación de umbrales de lluvia que generan deslizamientos se utilizaron las relaciones intensidad-duración reportadas en la base de datos consolidada por Ramos et al. (2015) y las curvas características de los eventos ocurridos en marzo y agosto de 2017, tal como se describió en el capítulo 6 del documento “Definición de umbrales de precipitación que generen deslizamientos”.

En la Figura 5-2 se presentan los 87 umbrales de lluvia que generan deslizamientos recopilados de la bibliografía por Ramos et al, 2015 y adicionalmente se presentan las curvas intensidad – duración características de los eventos del 31 de marzo y del 31 de agosto de 2017 entregadas por el componente hidrológico. Se observa que las curvas características de intensidad – duración de los días de los eventos en Mocoa se ubican en la parte superior del conjunto de umbrales de la bibliografía, de lo que se concluyó que efectivamente las intensidades y duraciones ocurridas en esas fechas representan magnitudes altas, especialmente las del 31 de marzo de 2017 en donde se conoce que ocurrieron alrededor de 276 deslizamientos (SGC, 2017b).

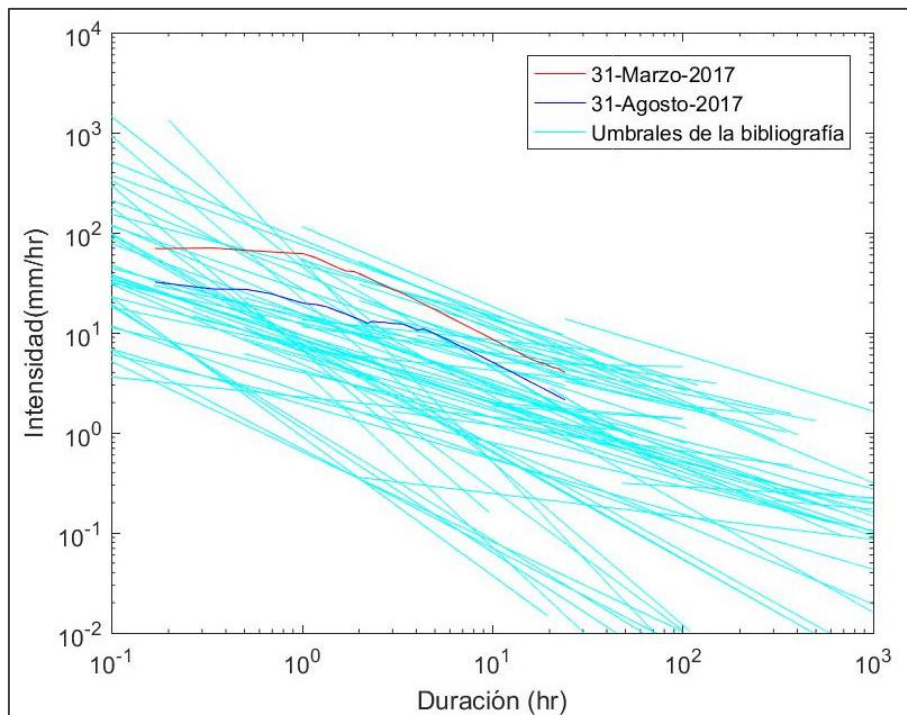


Figura 5-2. Umbrales intensidad - duración de la bibliografía y de los eventos del 31 de marzo y 31 de agosto de 2017. Fuente: elaboración propia.

El siguiente paso para la determinación de umbrales de lluvia que generan deslizamientos en Mocoa fue determinar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. Para este análisis se utilizó la totalidad de los umbrales intensidad – duración reportados en la bibliografía recopilados por Ramos et al (2015). Como parte del procedimiento se calculó el valor esperado de la intensidad dada una duración y su desviación estándar haciendo uso de todas las relaciones intensidad–duración disponibles. En la Figura 5-3 se presentan todos los umbrales reportados en la literatura y además su valor esperado. En color verde se presenta una línea que representa el valor esperado más una desviación estándar, con el fin de visualizar la dispersión del conjunto de umbrales con respecto al valor esperado.

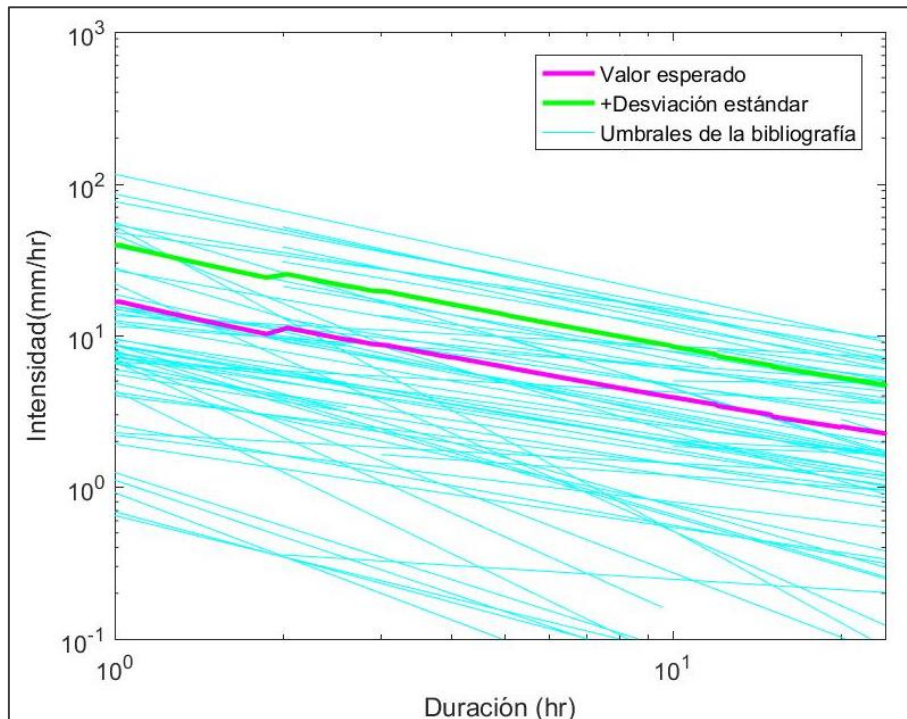


Figura 5-3. Momentos estadísticos de la recopilación bibliográfica. Fuente: adaptado de Ramos et al. (2015).

Con lo anterior se tienen los dos primeros momentos estadísticos dada una duración de la recopilación de umbrales intensidad–duración. Se supuso que los datos siguen una función de densidad de probabilidad normal estándar y a partir de esto se calcularon las probabilidades ocurrencia de deslizamientos dada una duración. En la Figura 5-4 se presentan las probabilidades de ocurrencia de deslizamientos dada una intensidad y duración de la lluvia y adicionalmente en color rojo se representa la curva característica intensidad-duración del evento del 31 de marzo de 2017.

Dado que se observa que la curva característica de intensidad-duración del evento del 31 de marzo se ubica entre el 70% y el 100% de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos y que se conoce que esas condiciones de lluvia generaron deslizamientos que aportaron sedimentos al flujo de detritos, los niveles de alerta fueron propuestos en función de dichas probabilidades de ocurrencia de deslizamientos.

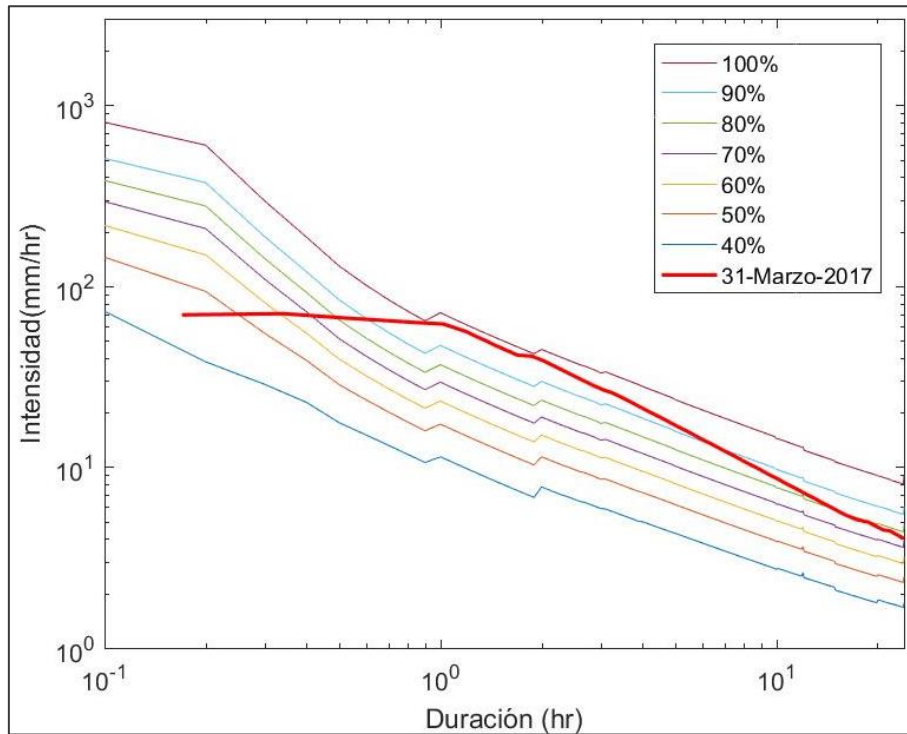


Figura 5-4. Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos dada una duración y evento del 31 de marzo de 2017. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5-5 se presentan los niveles de alerta para intensidad dada una duración, que generan deslizamientos en las cuencas de las quebradas Taruca, Taruquita y ríos Mulato y Sangoyaco. La franja roja representa probabilidades de ocurrencia de deslizamiento mayores al 70% similares a las del evento del 31 de marzo, la franja naranja se encuentra entre el 50% y 70% de probabilidad, la franja amarilla corresponde a probabilidades entre 40% y 50% y finalmente la franja verde representa las condiciones normales de los cauces con probabilidades de ocurrencia de deslizamientos menores al 40%.

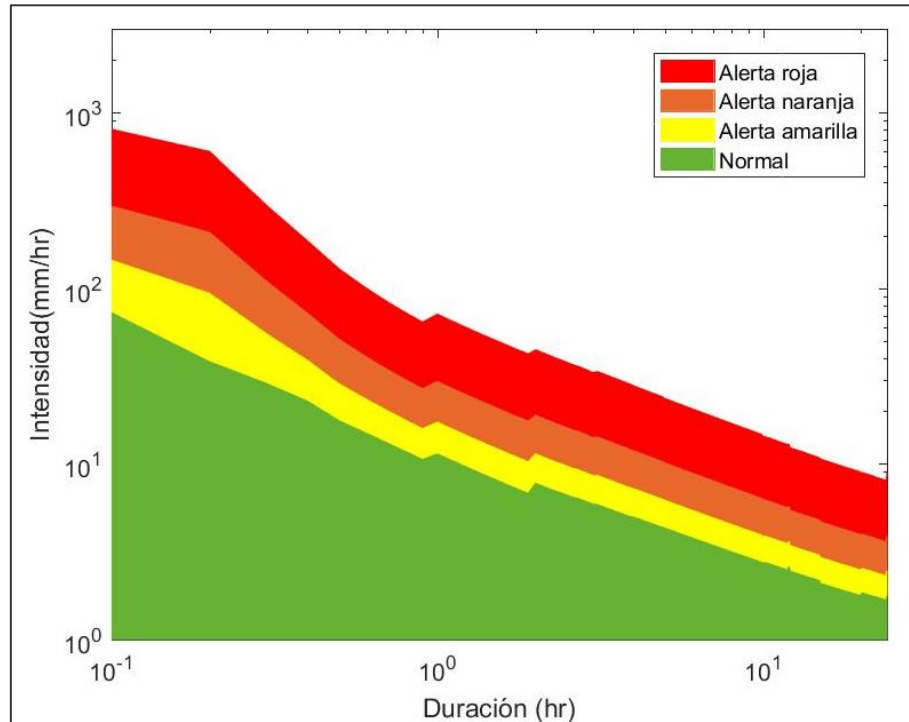


Figura 5-5. Niveles de alerta de intensidad dada una duración que generan deslizamientos en la cuenca de las quebradas Taruca, Taruquita y ríos Sangoyaco y Mulato.

5.2.2 Umbrales de precipitación acumulada que generan deslizamientos

Ramos et al (2015) reportan que el segundo parámetro de lluvia más usado como umbral para la generación de deslizamientos es la lluvia acumulada antecedente de varios días, esto dado que es un parámetro conveniente cuando la escala de medición de lluvia en las estaciones no es horaria o subhoraria como para utilizar el parámetro de intensidad – duración.

El procedimiento seguido para la determinación de umbrales en función de la variable precipitación acumulada fue descrito en el capítulo 2 de documento “Definición de umbrales de precipitación que generen deslizamientos”. Para el análisis de la influencia de la precipitación en la ocurrencia de deslizamientos se acumuló la precipitación durante 30 días antecedentes partiendo del 31 de marzo de 2017, adicionalmente se acumuló la precipitación de 30 días antecedentes partiendo de las fechas anteriores al 31 de marzo con el fin de tener gran cantidad de eventos que representaran un espacio muestral para el cálculo de probabilidades. (Ver Figura 5-6)

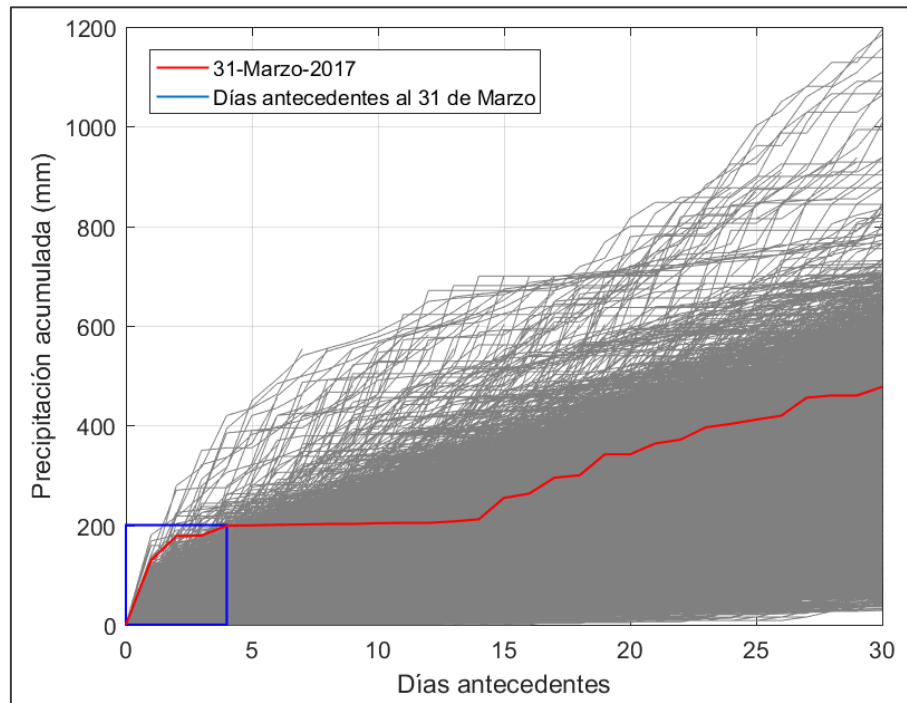


Figura 5-6. Precipitación acumulada vs días antecedentes, estación diaria Mocoa Acueducto desde 1956. Fuente: elaboración propia.

Una vez se obtuvieron los eventos que representan el espacio muestral, se procedió a calcular la probabilidad de que no se excediera la precipitación antecedente del 31 de marzo dado un número de días antecedentes de acumulación, de lo que se obtuvo que la probabilidad de no exceder el valor acumulado el 31 de marzo es muy cercana a 1, lo que quiere decir que esa acumulación de lluvia en 4 días es una de las más altas que se han presentado para la zona.

Los resultados mostraron claramente que la lluvia antecedente es uno de los factores extrínsecos que generan procesos de remoción en masa en la parte alta de las quebradas La Taruca y La Taruquita. Además, se observó que dichos procesos de remoción en masa se asocian hasta con cuatro días antecedentes de precipitación dada las altas probabilidades de no excedencia. Dado lo anterior, en la Figura 5-7 se presentan los umbrales de precipitación acumulada en términos probabilísticos dadas las incertidumbres inherentes a la modelación de este proceso, atribuida principalmente a la falta de información de las fechas de ocurrencia de procesos de remoción en masa en los catálogos de deslizamientos disponibles.

Nuevamente los niveles de alerta fueron propuestos en función de las probabilidades de ocurrencia de deslizamientos. La Figura 5-8 representa entonces los niveles de alerta de procesos de remoción en masa dada

una precipitación antecedente acumulada de cuatro días para la cuenca de las quebradas Taruca y Taruquita y los ríos Sangoyaco y Mulato.

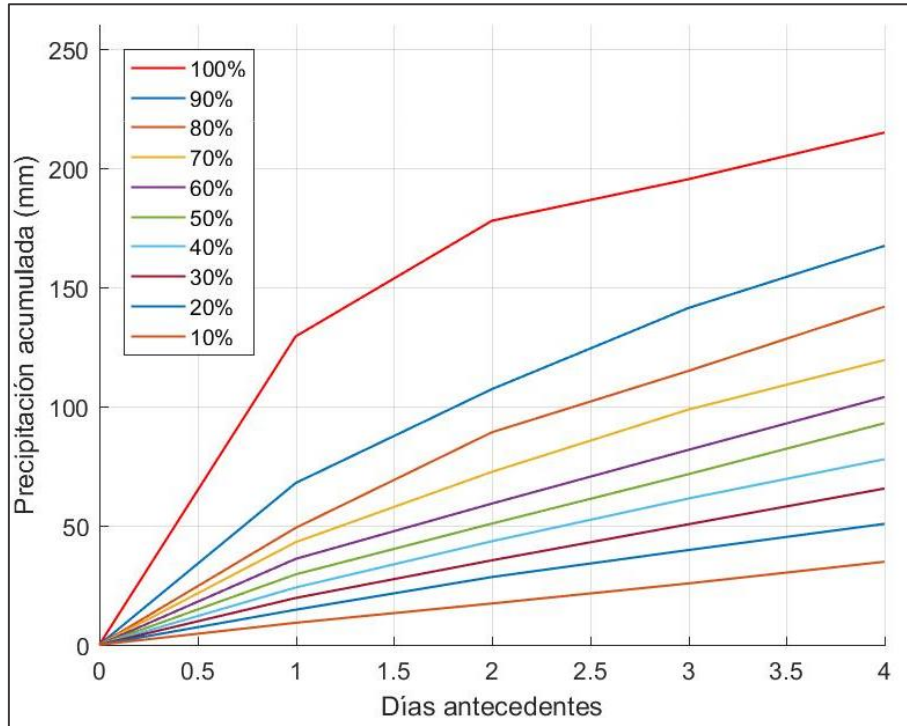


Figura 5-7. Probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa para las quebradas de La Taruca y La Taruquita. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5-8 la franja roja corresponde a probabilidades mayores al 70%, la franja naranja se encuentra entre el 40% y el 70% de probabilidad, la franja amarilla representa probabilidades entre 20% y 40% y la franja verde corresponde a condiciones de precipitación con probabilidades menores al 20% de generar procesos de remoción en masa.

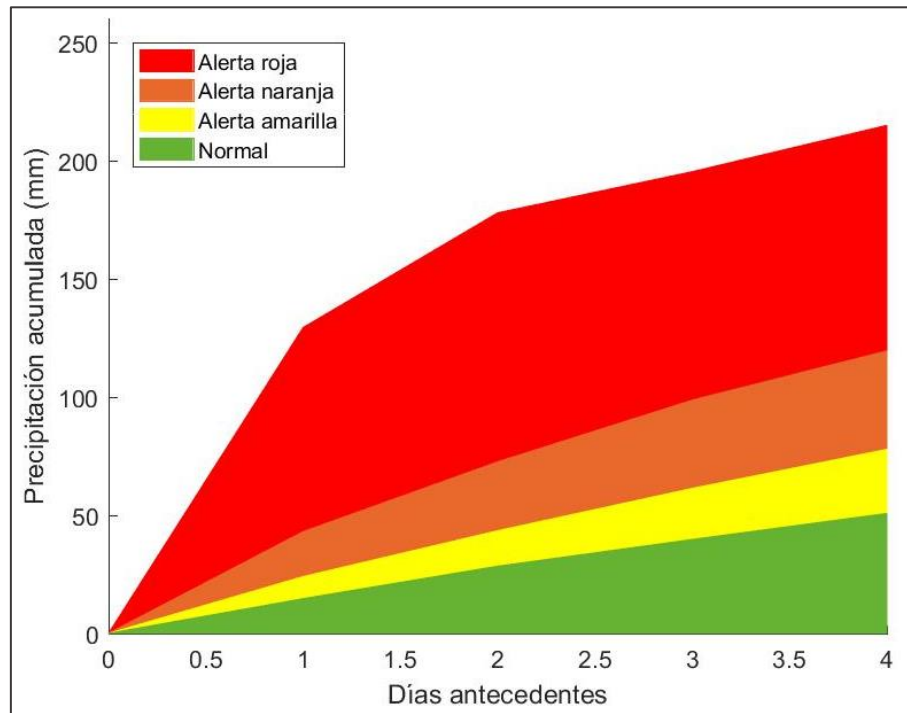


Figura 5-8. Niveles de alerta de precipitación acumulada que genera deslizamientos para las quebradas de La Taruca y La Taruquita. Fuente: elaboración propia.

5.3 Umbrales de caudal- nivel

En un sistema de alerta temprana es necesaria la definición de umbrales de nivel y precipitación para establecer los diferentes niveles de alerta. Los umbrales de nivel corresponden a niveles de flujo que permiten emitir advertencias y alertas de inundación en ciertos puntos del cauce.

Teniendo en cuenta los resultados de las modelaciones de los diferentes eventos y las secciones críticas determinadas, fue estimada una serie de caudales con los que podría inundar cada una de las secciones. Con estos caudales, se establecieron niveles de alerta en las secciones transversales donde se ubican actualmente los sensores de nivel (ver Figura 5-9). A partir del nivel determinado para cada sensor, se establecieron niveles de alerta amarilla, naranja y roja como un porcentaje de dicho nivel de inundación; los porcentajes para cada alerta correspondieron a 70, 50 y 25, para el caso de la quebrada Taruca y el río Sangoyaco, y a 70,40 y 20 para el caso del río Mulato. La diferencia en los valores de estos porcentajes, se debió principalmente a diferencias en las formas de las secciones transversales y las diferentes pendientes de las curvas de calibración, que llevaban a que pequeños cambios en el valor del nivel, se asociaran a grandes variaciones en el valor del caudal. Las coordenadas de los sensores de nivel actualmente instalados y de uno adicional propuesto, en el sistema de referencia Magna-Sirgas, son presentadas en la Figura 5-9.





Figura 5-9 Esquema de localización sensores de nivel FEDERMAN - SIATA.

Tabla 5-1. Coordenadas sensores de nivel

Nombre dado al sensor	Corriente	Entidad	Coordenda X	Coordenada Y
A	Q. Taruca	FEDERMAN	1045848.66	621664.91
B	Q. Taruca	FEDERMAN	1045116.2	622380.239
C	Q. Taruquita	FEDERMAN	1044220.2	622748.333
D (Propuesto)	Q. Taruquita	FEDERMAN	1044002.88	622725.165
E	R. Sangoyaco	FEDERMAN	1045259.03	619886.736
F	R. Sangoyaco	FEDERMAN	1044303.97	620617.517
G	R. Mulato	FEDERMAN	1044873.06	618161.673
H	R. Mulato	SIATA	1048113.01	618243.971
I	R. Mulato	SIATA	1047930.39	618764.766
J	Q. Taruca	FEDERMAN	1043789.58	621955.431
K	R. Mulato	FEDERMAN	1043097.62	619637.635

Fuente: elaboración propia

En la salida de campo realizada en el mes enero de 2018, fueron levantadas, con GPS de alta precisión, 8 de las 10 las secciones transversales donde se ubican los sensores de nivel. Los datos recogidos fueron incorporados al

	<p align="center">Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

DEM con el fin de obtener, una mejor aproximación de la forma de las secciones para contar con curvas de gasto más cercanas a lo que se podría observar en la realidad. Los umbrales de nivel propuestos para las tres alertas en cada sensor, son presentados en la Tabla 5-2 y Tabla 5-3. Las curvas de gasto y la forma de la sección transversal para cada una, se presentan a continuación.

Tabla 5-2. Umbrales propuestos de altura lámina de agua para cada sensor de nivel instalado

	Amarilla	Naranja	Roja
Sensor A	1.50	2.90	4.20
Sensor B	1.01	2.02	2.85
Sensor C	0.87	1.74	3.05
Sensor D	0.42	0.84	1.48
Sensor E	0.88	1.77	2.47
Sensor F	0.69	1.38	1.94
Sensor G	2.75	3.75	5.1
Sensor H	1.63	2.5	3.38
Sensor I	1.90	3.80	5.45
Sensor J	1.25	2.40	4.30
Sensor K	2.9	4.3	5.75

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5-3. Umbrales propuestos de caudal para cada sensor de nivel instalado

	Amarilla	Naranja	Roja
Sensor A	35.99	161.36	323.6
Sensor B	35.50	172.51	375.1
Sensor C	23.11	100.37	329.30
Sensor D	33.37	122.23	348.64
Sensor E	24.17	109.93	229.33
Sensor F	48.08	155.05	273.72
Sensor G	11.20	60.66	218.44
Sensor H	10.90	70.30	206.9
Sensor I	23.2	131.36	323.6
Sensor J	24.83	68.8	171.1
Sensor K	71.21	112.6	157.83

Fuente: elaboración propia.

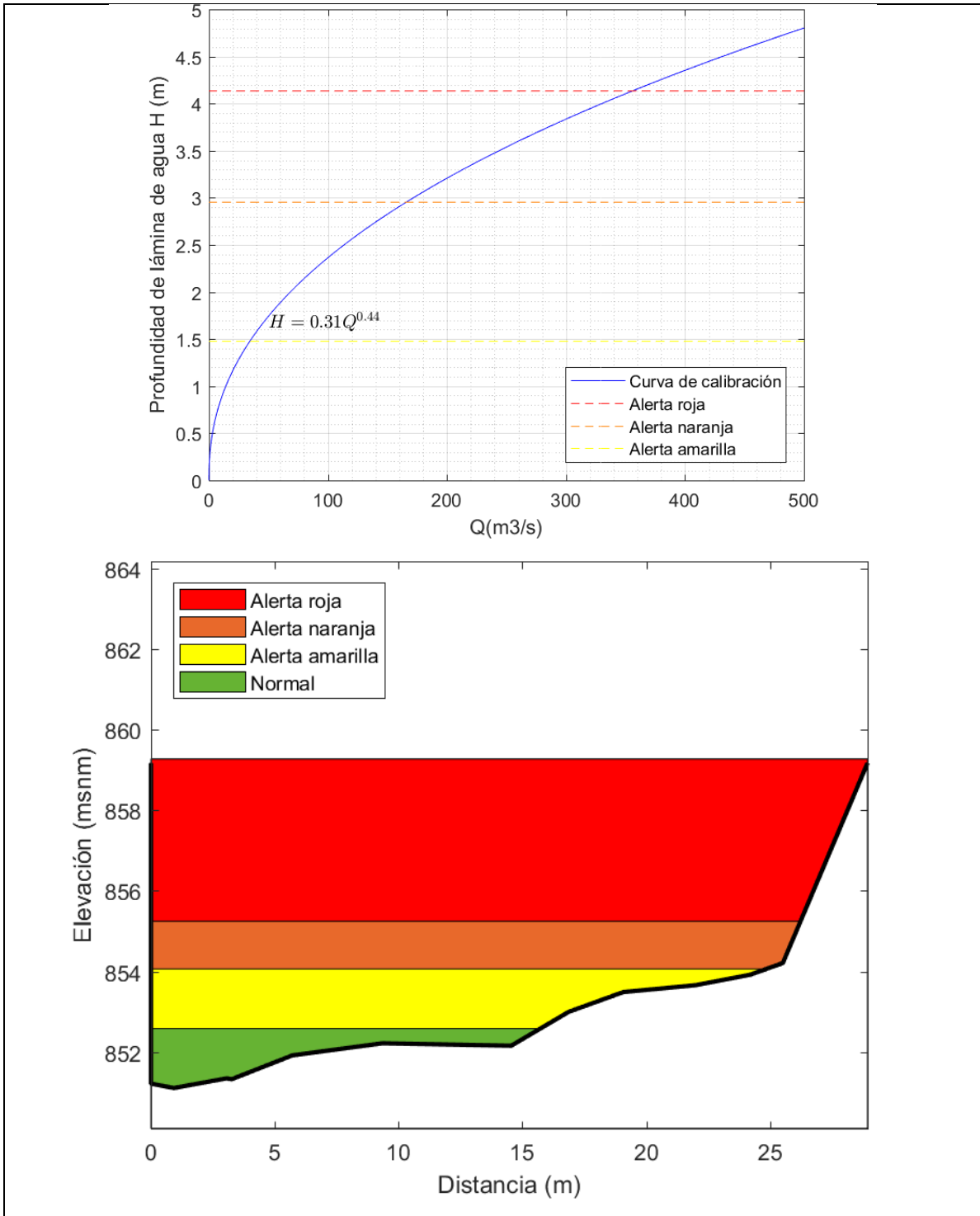


Figura 5-10 Umbrales de nivel para Sensor A. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.

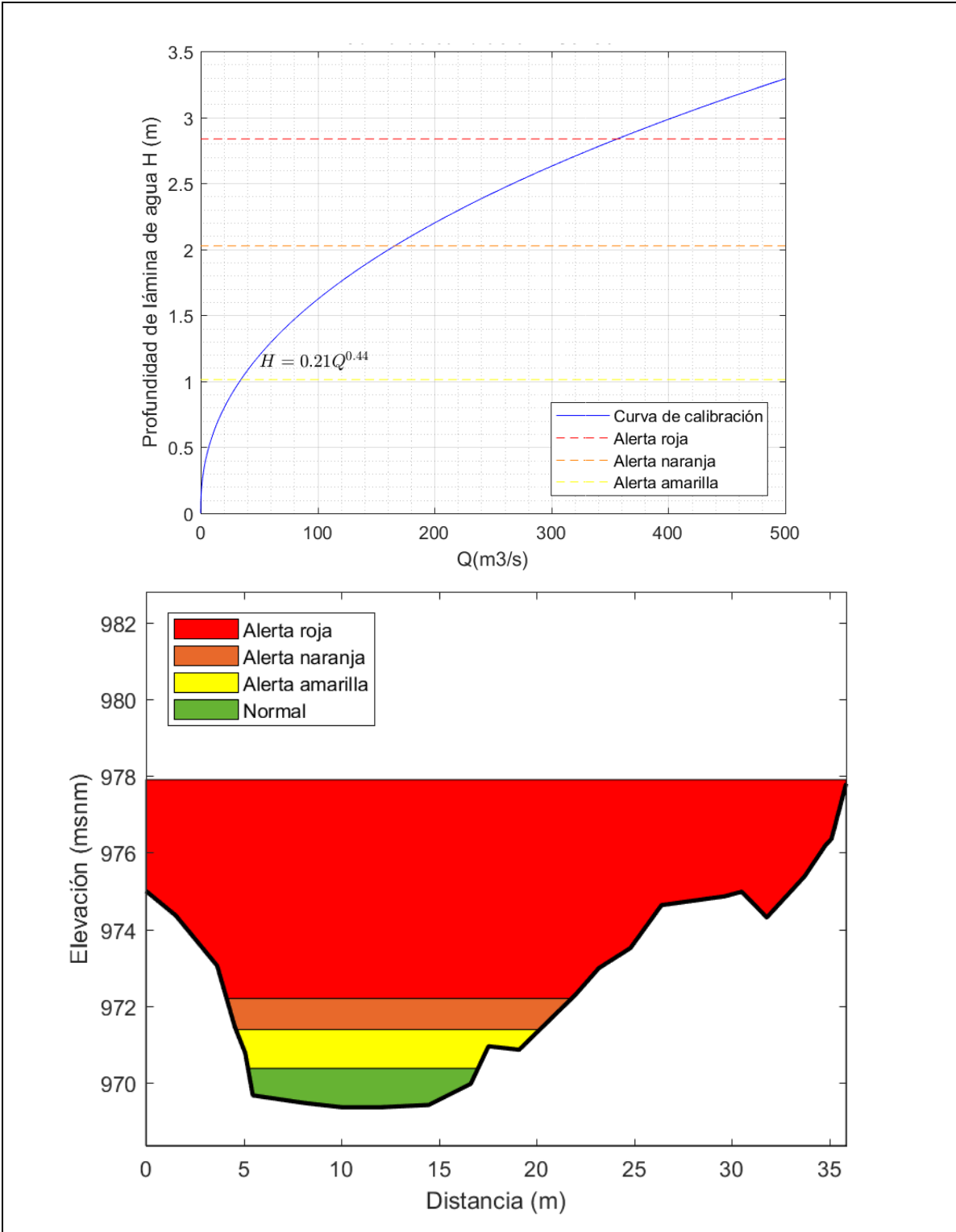


Figura 5-11 Umbrales de nivel para Sesor B. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.

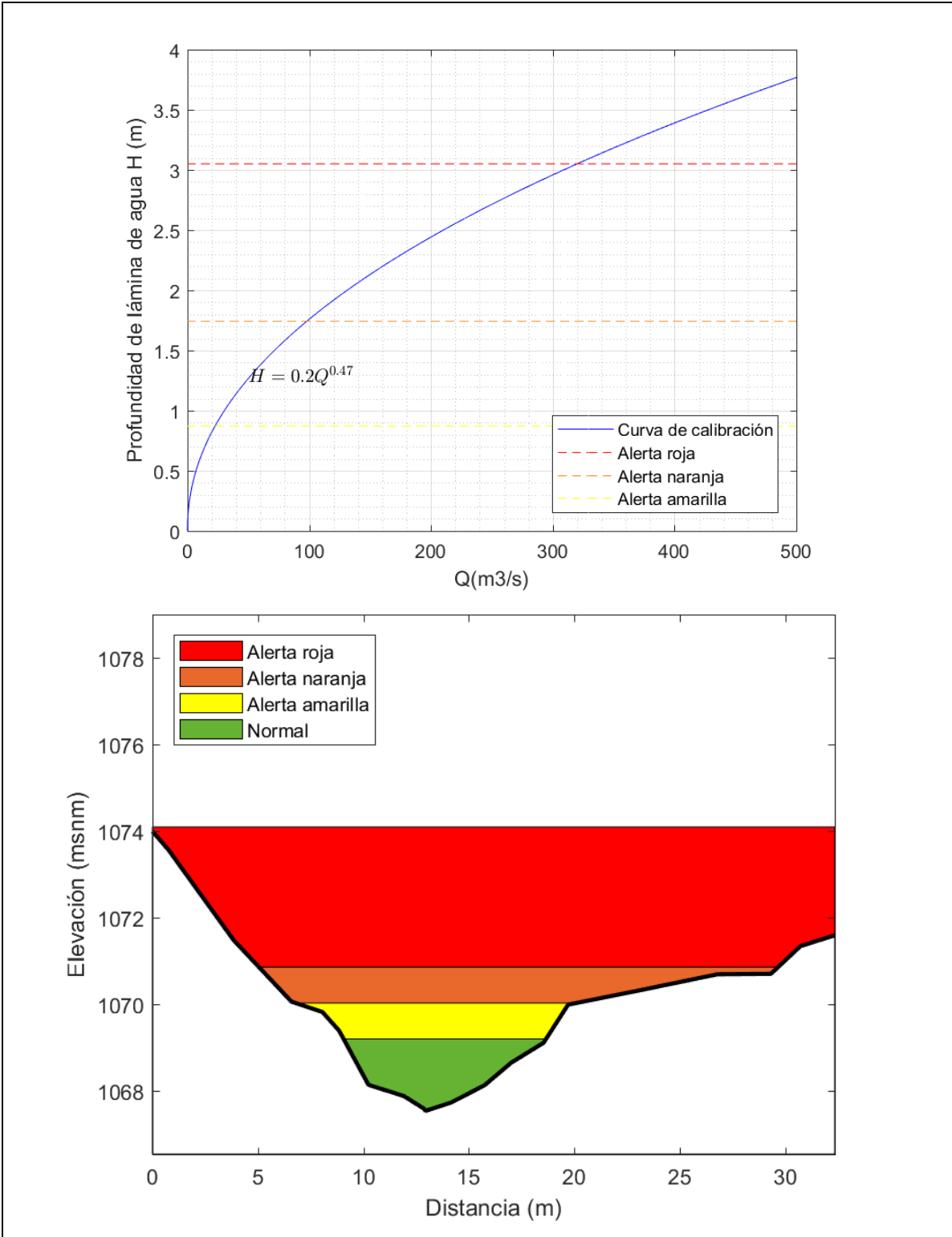


Figura 5-12 Umbrales de nivel para Sensor C. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.

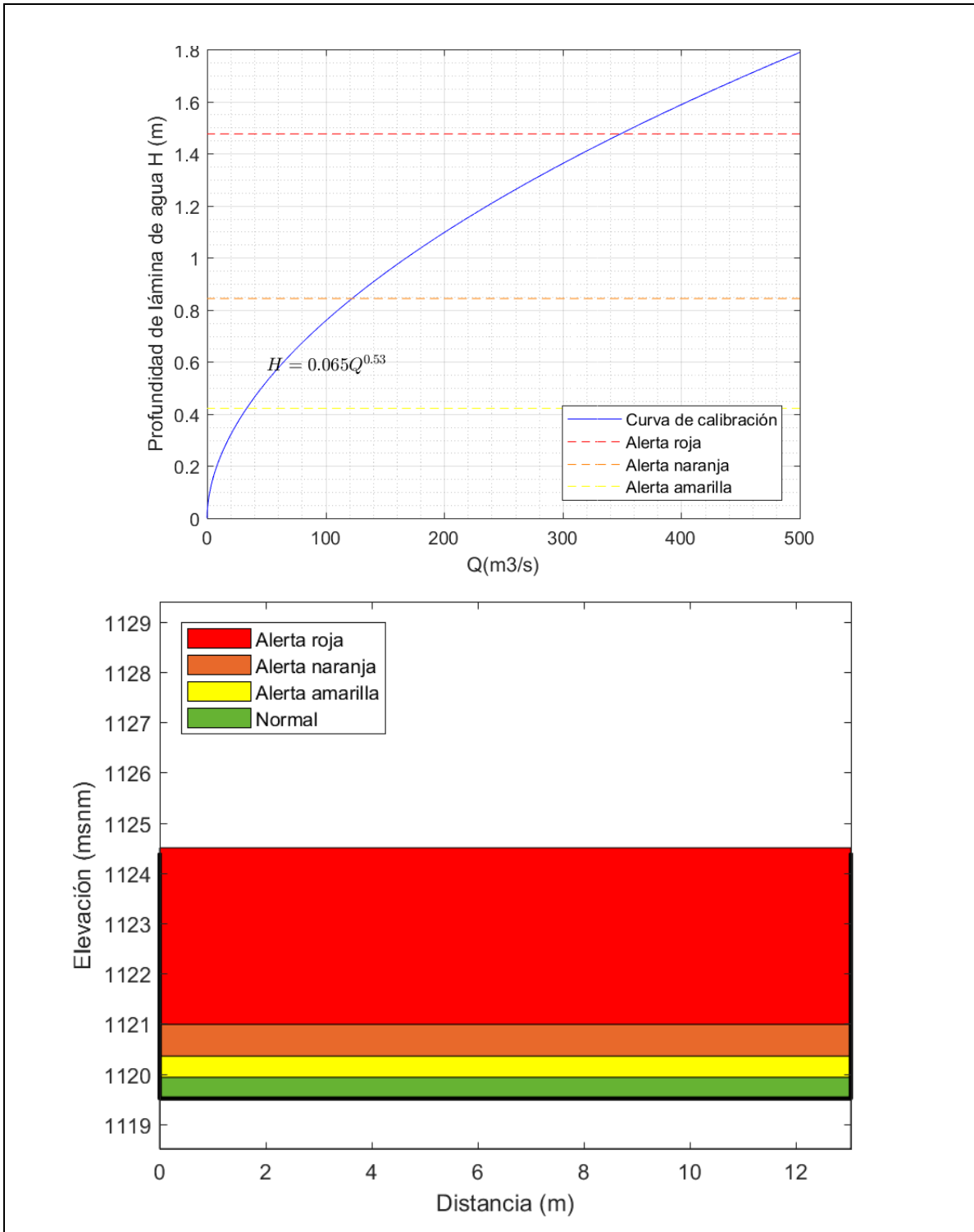


Figura 5-13 Umbrales de nivel para Sensor D. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.

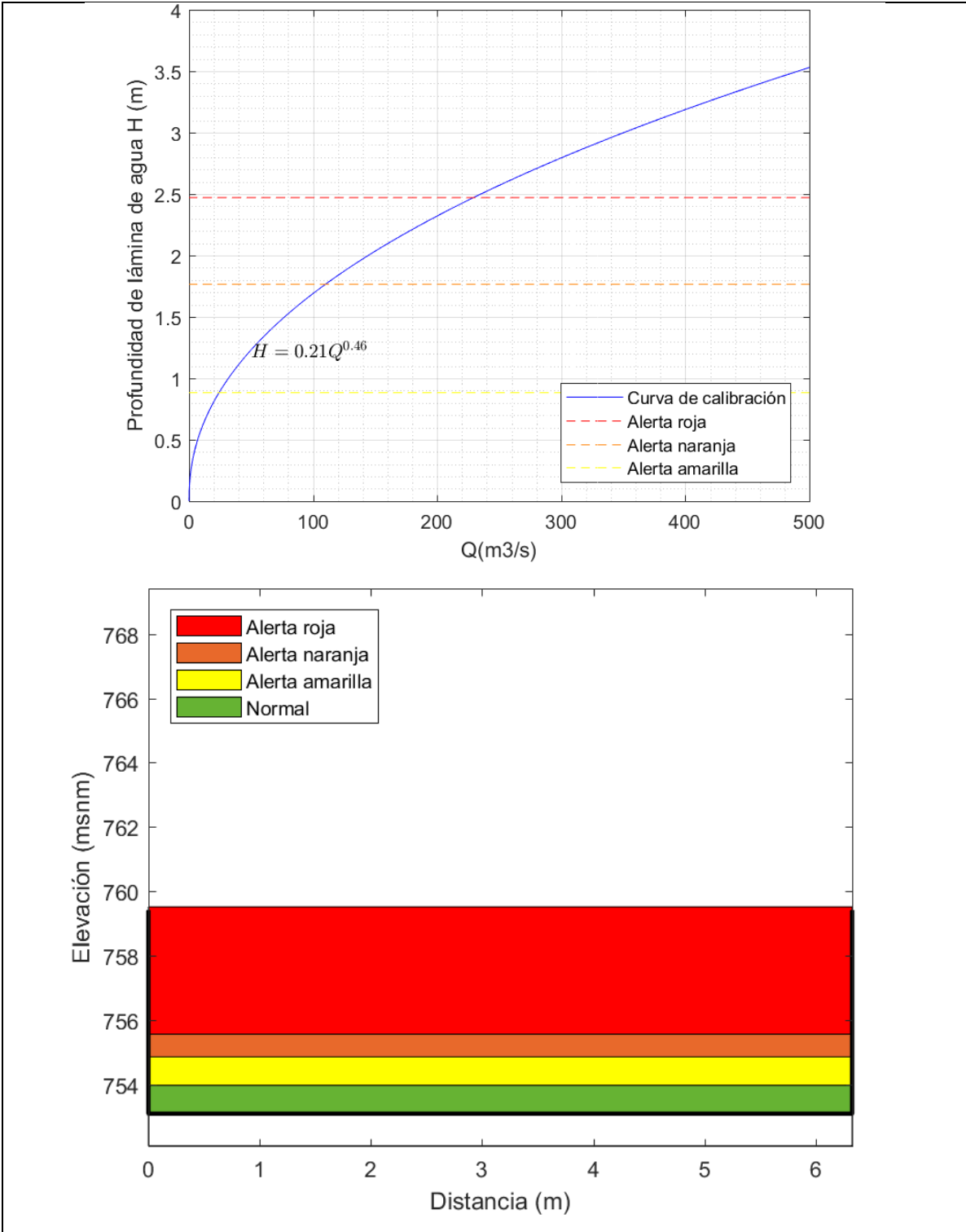


Figura 5-14 Umbrales de nivel para Sensor E. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.

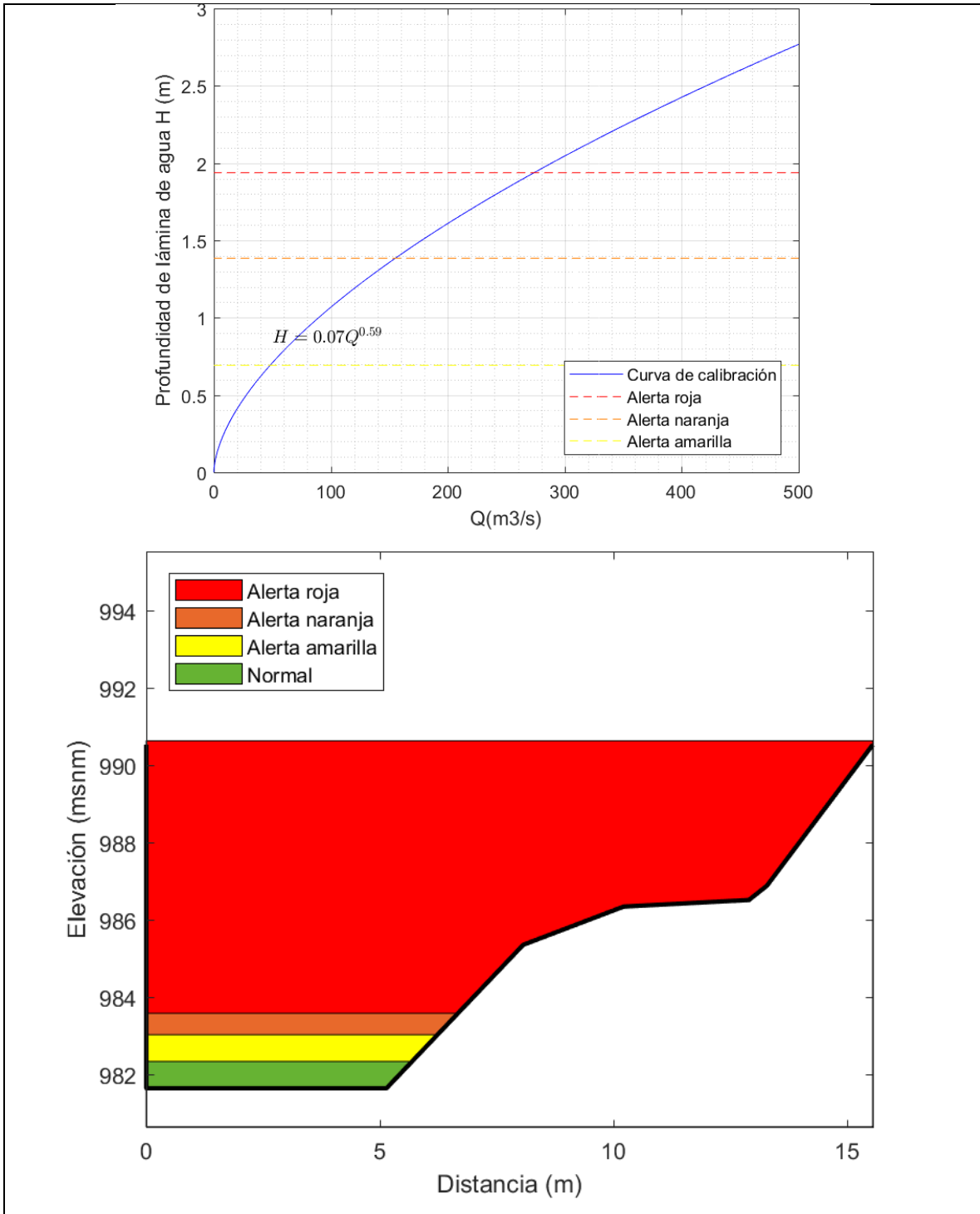


Figura 5-15 Umbrales de nivel para Sensor F. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.

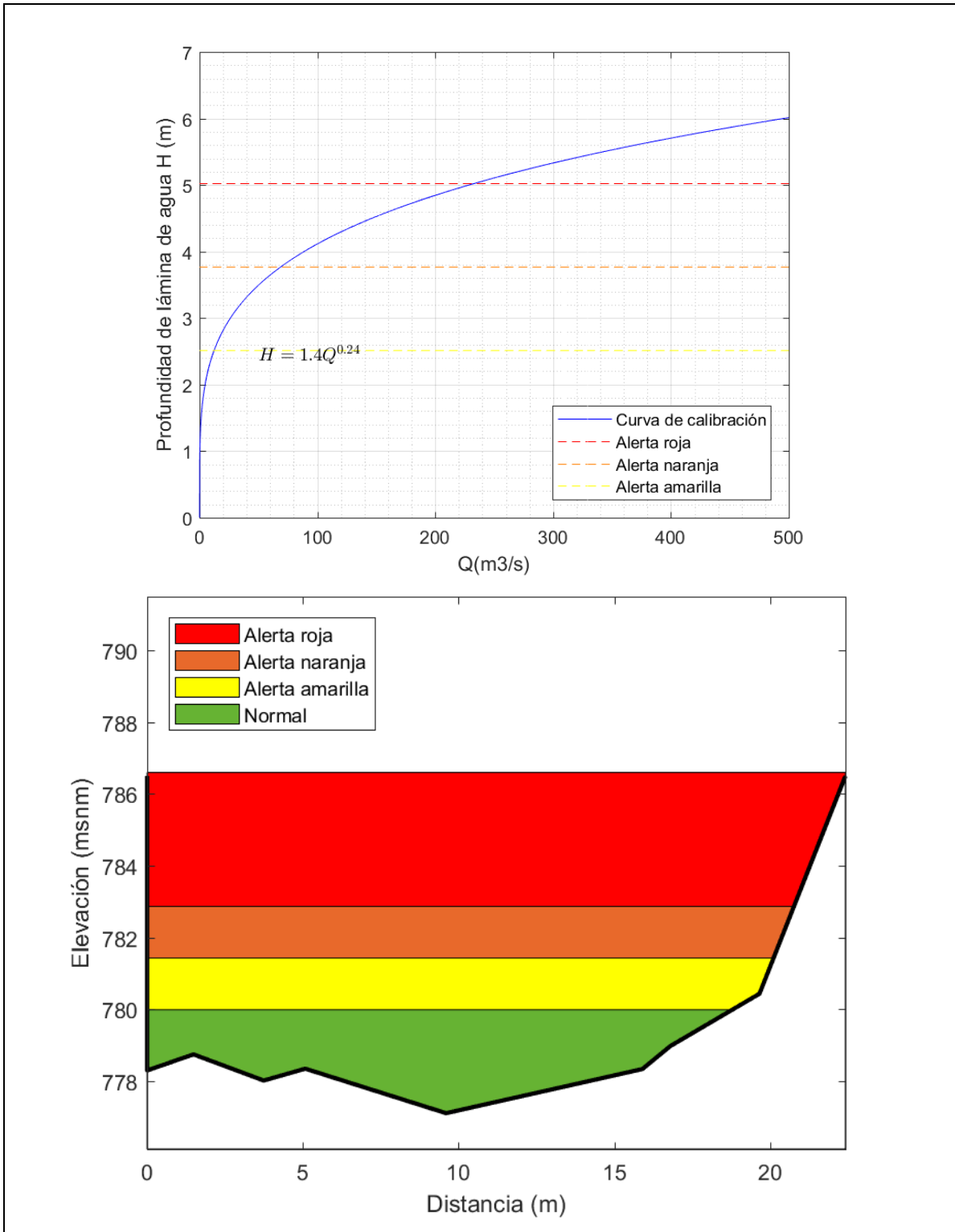


Figura 5-16 Umbrales de nivel para Sensor G. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.

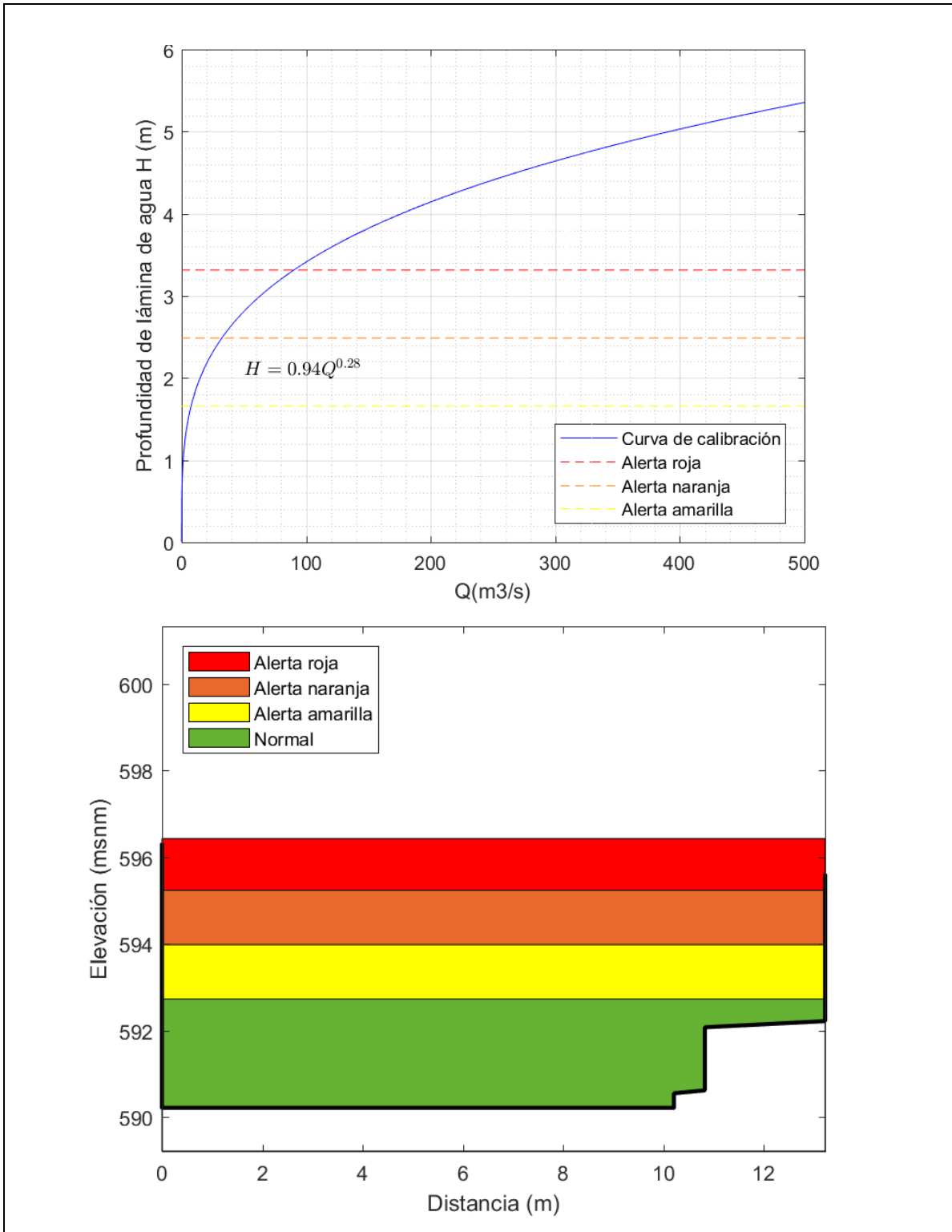


Figura 5-17 Umbrales de nivel para Sensor H. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.

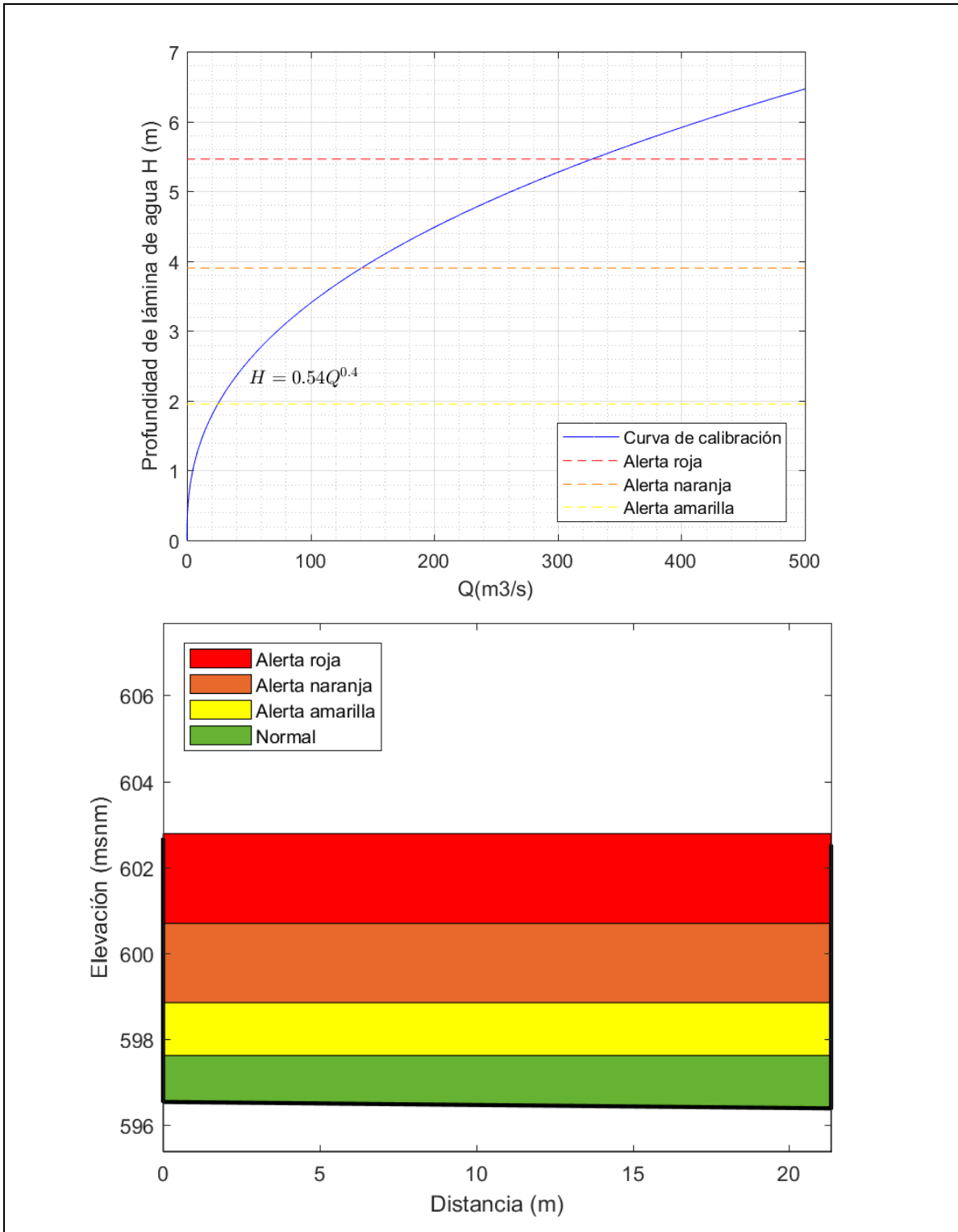


Figura 5-18 Umbrales de nivel para Sensor I. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.

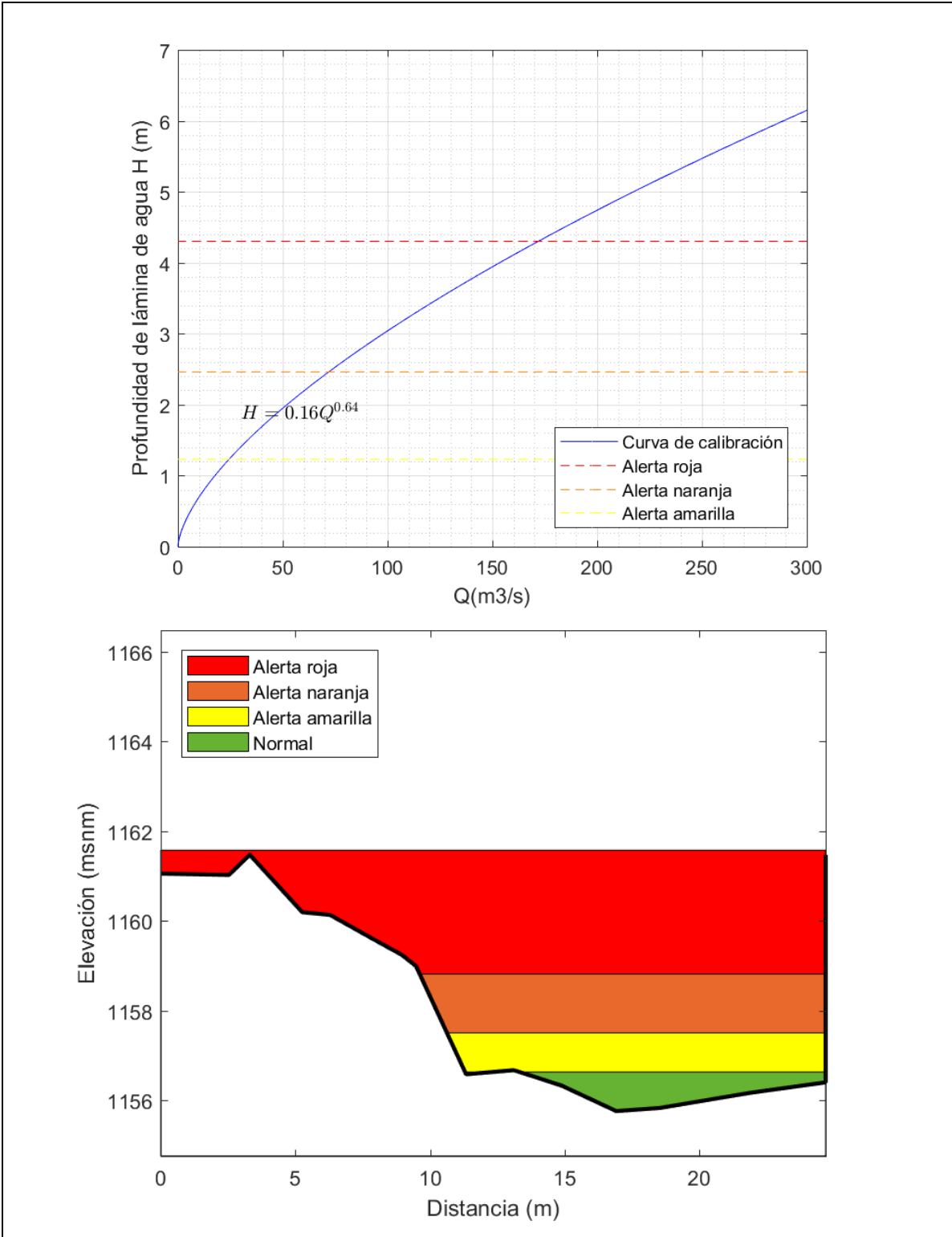


Figura 5-19 Umbrales de nivel para Sensor J. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.

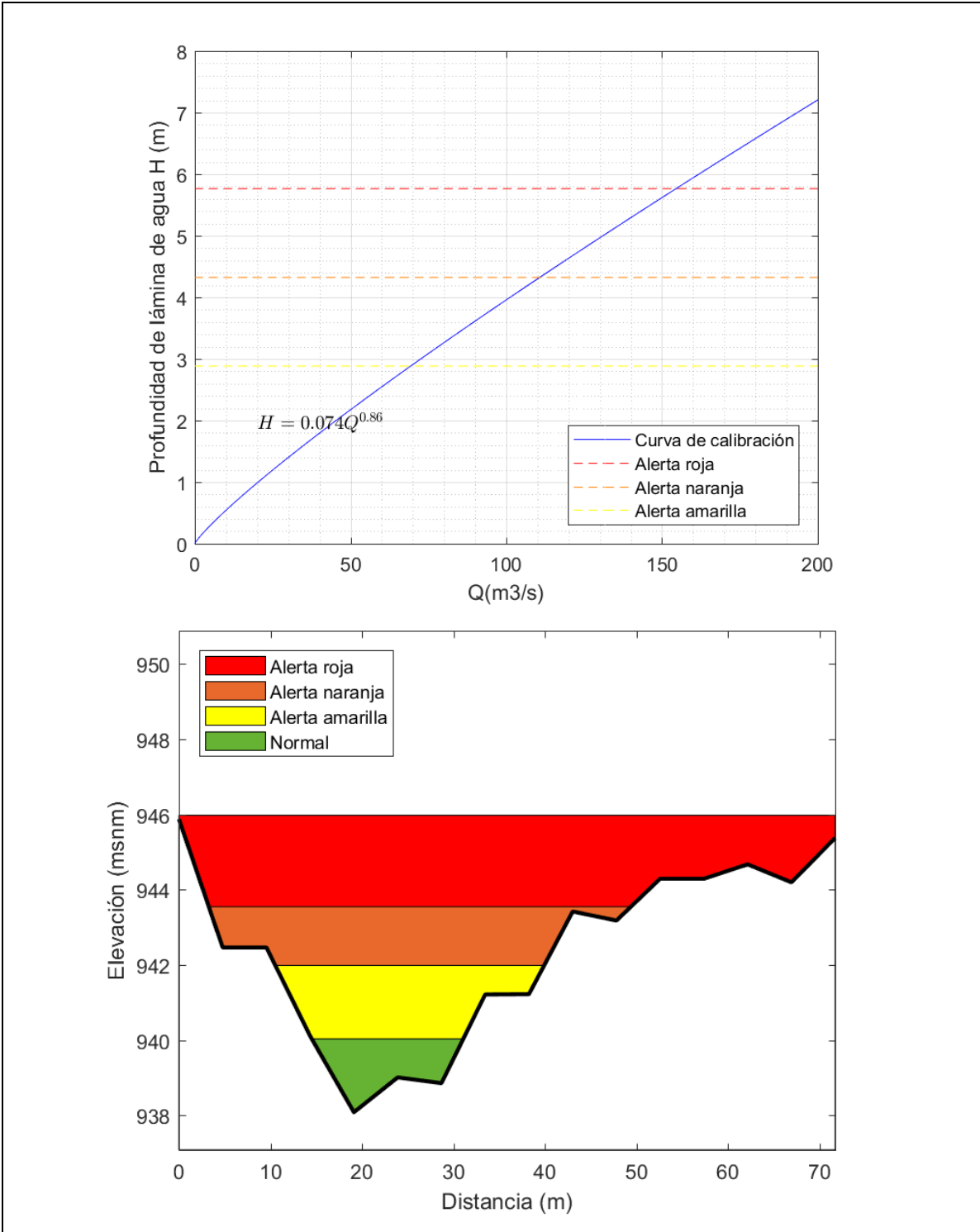


Figura 5-20 Umbrales de nivel para Sensor K. Curva de calibración (arriba) y sección transversal (abajo). Fuente: elaboración propia.

	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
--	---	--

5.4 Reglas de operación del SAT

Dado que se determinaron umbrales en función de diferentes variables que influyen en la generación de flujo de detritos, se obtuvieron niveles de alerta para precipitación del aguacero, para intensidad-duración del aguacero, para precipitación acumulada de 4 días antecedentes al aguacero y caudal-nivel en los cauces. Con lo anterior, en este apartado se proponen las reglas de operación del sistema de alerta temprana que involucran todos los niveles de alerta propuestos (ver Figura 5-21).

5.4.1 Paso 1

De acuerdo con la propuesta del diseño del sistema de alerta temprana, en la parte alta, media y baja de la cuenca se cuenta con 4 estaciones meteorológicas en total que entregan información de precipitación. A partir de esta información se utiliza la Figura 5-1 para conocer el nivel de alerta que representa la precipitación del aguacero.

5.4.2 Paso 2.

En este paso se deben utilizar los umbrales de lluvia propuestos para la generación de deslizamientos en función de dos variables influyentes, teniendo en cuenta que los deslizamientos en la parte alta de las quebradas Taruca y Taruquita aportaron parte de los sedimentos que generaron las concentraciones volumétricas del flujo de detritos ocurrido el pasado 31 de marzo de 2017.

A partir del registro de precipitación del aguacero se calcula la intensidad y duración del mismo y por medio de la Figura 5-5 se encuentra el nivel de alerta que representa el valor de la intensidad de la lluvia de acuerdo con su duración.

5.4.3 Paso 3.

Se revisa el registro de la lluvia acumulada de 4 días antecedentes al aguacero, información con la cual se ingresa a la Figura 5-8 y se obtiene el nivel de alerta que representa la precipitación acumulada.

5.4.4 Paso 4.

Una vez se tiene el nivel de alerta correspondiente a la intensidad-duración de la lluvia registrada y el nivel de alerta que representa la precipitación acumulada, se utiliza la Figura 5-22 para determinar el nivel de alerta de deslizamientos.

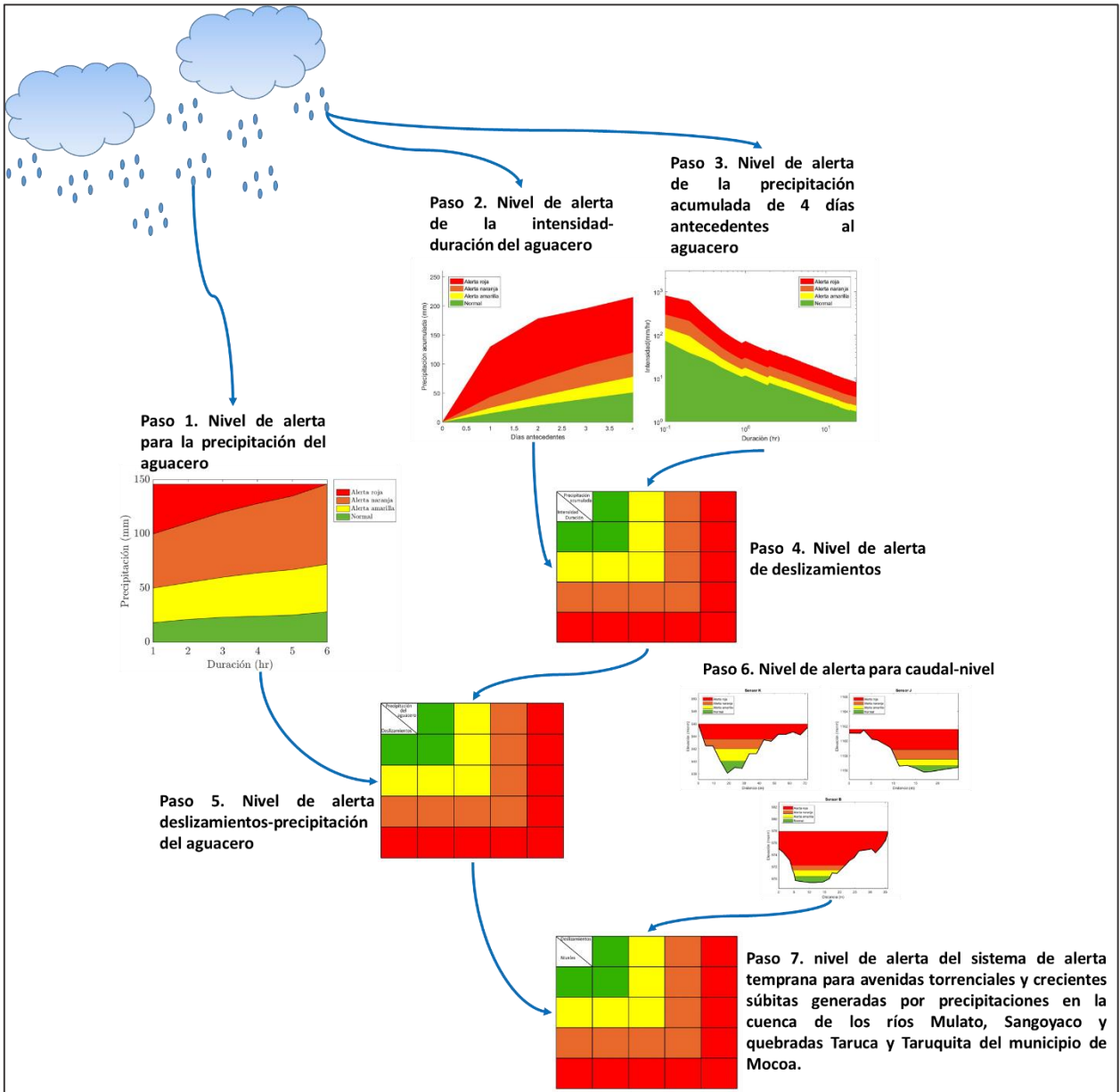


Figura 5-21. Esquema de reglas de operación del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones en la cuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco y quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa. Fuente: elaboración propia.

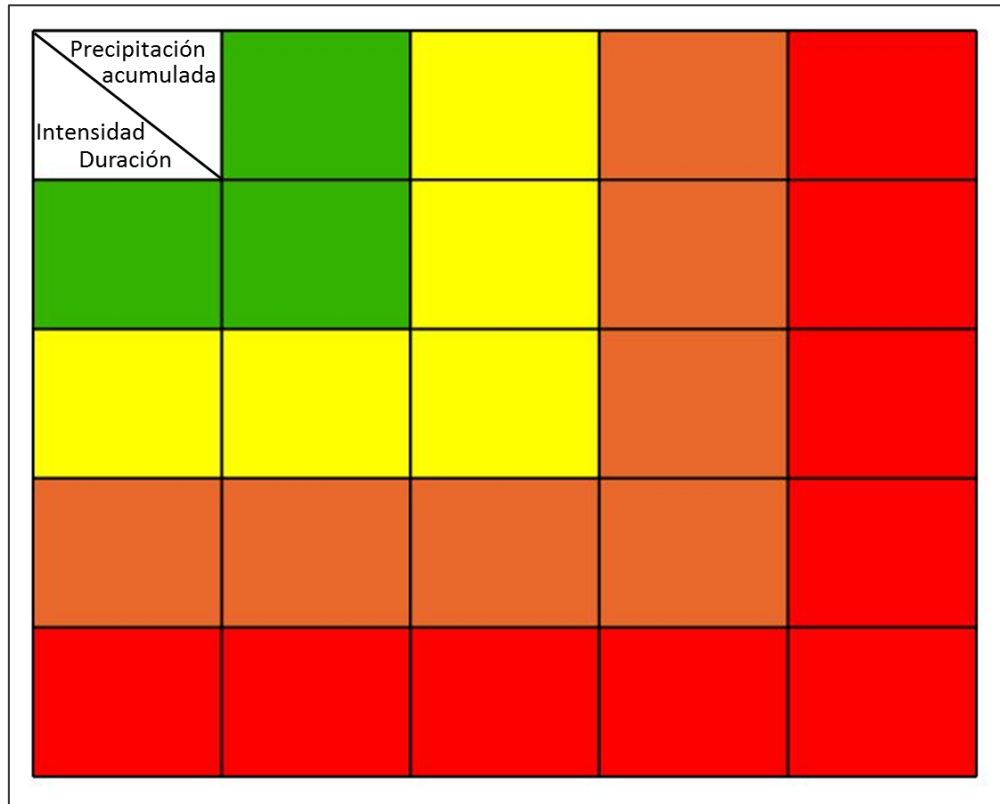


Figura 5-22. Reglas de operación para la obtención del nivel de alerta de deslizamientos. Fuente: elaboración propia.

5.4.5 Paso 5.

Dado que se tiene el nivel de alerta de precipitación del aguacero determinado en el paso 1 y el nivel de alerta de deslizamientos determinado en el paso 4, se utiliza la Figura 5-23 para determinar el nivel de alerta de deslizamientos-precipitación del aguacero.

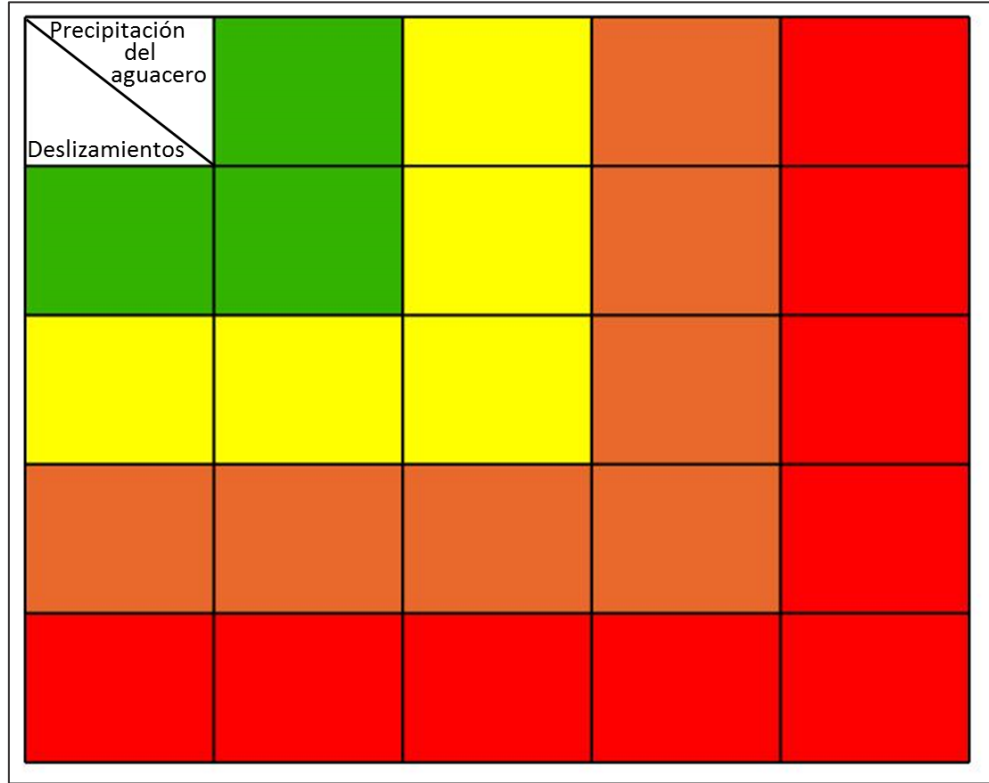


Figura 5-23. Reglas de operación para la obtención del nivel de alerta de deslizamientos-precipitación del aguacero. Fuente: elaboración propia.

5.4.6 Paso 6.

Paralelamente al procedimiento descrito, se revisan los registros de niveles en todos los sensores propuestos para el SAT y de acuerdo con los niveles de alerta propuestos en el numeral 5.3 se selecciona el nivel de alerta más crítico registrado en los 11 sensores. De este paso se obtiene entonces el nivel de alerta correspondiente a caudal-nivel.

5.4.7 Paso 7.

Utilizando el nivel de alerta obtenido en el paso 5 referente a la combinación de deslizamientos con precipitación del aguacero y el nivel de alerta de caudal-nivel obtenido en el paso 6, se utiliza la Figura 5-24 para determinar el nivel de alerta del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones en la cuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco y quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.

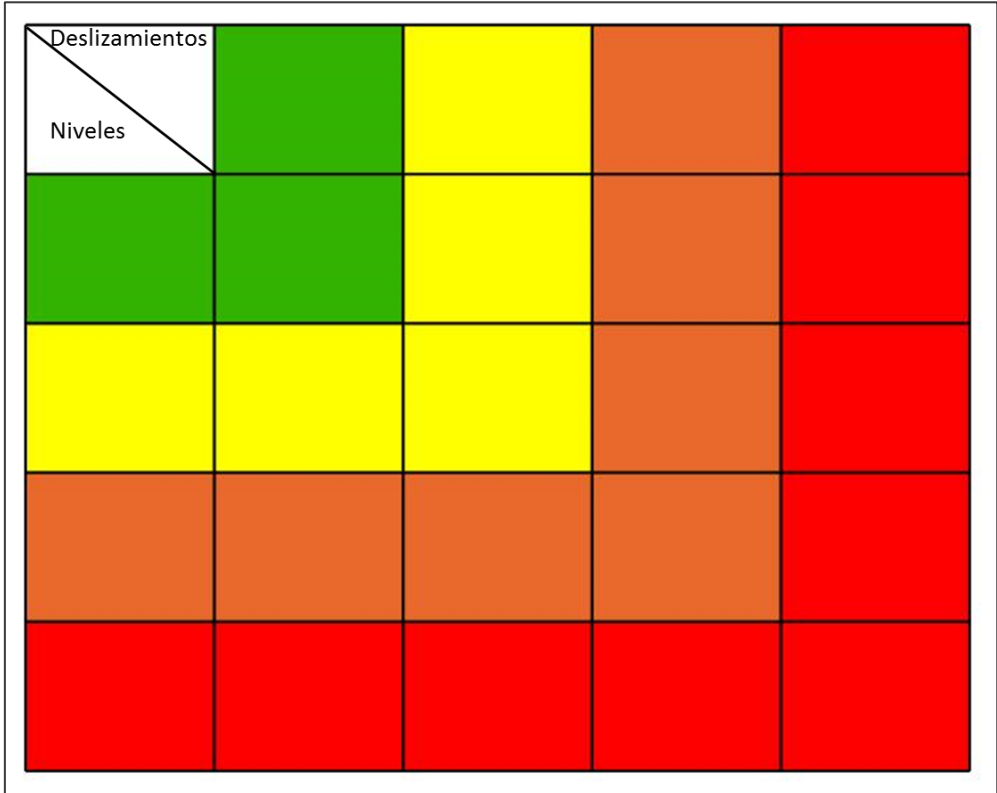




Figura 5-24. Reglas de operación para la obtención del nivel de alerta del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones en la cuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco y quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa. Fuente: elaboración propia.

5.5 Recomendaciones para la instrumentación de niveles de los cauces de los ríos Mulato, Sangoyaco y quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.

Con relación a los sensores de nivel, se puede decir que los resultados de los niveles de alerta del sensor E (Figura 5.14) deben ser tomados con mayor precaución debido a que el modelo de elevación digital usado para análisis no refleja en su totalidad el detalle de la geometría en planta del cauce en el tramo que está ubicado.

A la fecha de generación del presente documento, la sección del río Sangoyaco parte alta (Figura 5.15) no tenía instalado sensor, por lo tanto se levantó la sección de acuerdo con la ubicación entregada por Federman y se propusieron concordantemente niveles umbrales. Sin embargo, una vez se instale el sensor, se debe recalcular los niveles umbrales que refleje la geometría específica del cauce donde se emplace la instrumentación.

	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

5.6 Recomendaciones para el acoplamiento de los pronósticos del IDEAM para la zona con el SAT propuesto

Dado que el SAT propuesto fue diseñado a escala espacial 1:25000 en la zona rural, a escala espacial 1:2000 en la zona urbana y a escala temporal horaria, en el momento en el que el IDEAM genere pronóstico a escalas geográficas en las que se diferencie espacialmente el comportamiento de las precipitaciones en la cuenca de Mocoa y a escalas temporales horarias, los datos del pronóstico se pueden incorporar de forma natural al SAT y este funcionará correctamente.



6 POTENCIAL APLICACIÓN DEL HEPS EN EL SAT

En referencia, al HEPS se presentan resultados de lo que se denomina el pronóstico determinista, es decir, aquel donde el pronóstico se resume a un solo escenario, en contraposición al pronóstico probabilista que presenta un abanico de posibilidades de eventos.

Al respecto, vale la pena destacar que los sistemas operacionales alrededor del mundo generalmente evalúan la incertidumbre hidrometeorológica a partir de los modelos meteorológicos probabilistas y distintas configuraciones de modelos hidrológicos. No obstante, es posible recurrir a otras fuentes de incertidumbre tales como:

- Inclusión de la incertidumbre paramétrica de los modelos hidrológicos (He *et al.*, 2009).
- Estimación de la incertidumbre estructural de los modelos hidrológicos (Velázquez *et al.*, 2011).
- Evaluación de técnicas de preprocesamiento de la información meteorológica (Schaake *et al.*, 2009; Gaborit *et al.*, 2013).
- Comparación de distintas resoluciones de los modelos meteorológicos (Marty, Zin and Obled, 2013).
- Implicación de radares (Parkes *et al.*, 2013).
- Aplicación de distintas técnicas de asimilación (Liu *et al.*, 2012).

Cloke y Pappenberger (2009) han resaltado la alta demanda computacional para acoplar un sistema meteorológico de pronóstico probabilista (MEPS por sus siglas en inglés) a un modelo hidrológico. Sin embargo, He et al. (2009) y Bao y Zhao (2012) han demostrado que la combinación de la información proveniente de varios MEPS mejora la calidad de los sistemas de alerta de crecientes.

	<p align="center">Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

En este capítulo, se presentan los resultados del HEPS conformado por los pronósticos meteorológicos, tanto deterministas como probabilistas del WRF, y varias parametrizaciones de los tres modelos hidrológicos seleccionados para análisis.

Debido a la complejidad de la generación de los pronósticos del WRF, limitada principalmente por los requerimientos computacionales y la configuración propia del modelo, los resultados se restringen al período comprendido entre el 19 de noviembre del 2016 y el 25 de enero del 2017. La selección del periodo de simulación del HEPS está basada en la presencia de múltiples eventos máximos. Adicionalmente del periodo correspondiente al evento crítico, es decir, entre el 28 de marzo y el primero de abril de 2017.

Los resultados de este capítulo deben ser tomados como indicios de la potencialidad del sistema de pronóstico del WRF en la evaluación del SAT, puesto que un análisis concluyente debe estar basado en períodos más largos de evaluación que comprendan al menos un ciclo hidrológico y la configuración operacional del sistema con un cluster computacional o en su defecto la articulación del SAT con computación en la nube, lo cual está fuera del alcance del presente proyecto y puede ser visualizado como una segunda fase de complementación.

Vale la pena destacar que actualmente el IDEAM opera el modelo WRF en modo determinista junto a dos otros modelos: el modelo global GFS (Global Forecast System) y el modelo MM5 (Micro and Mesoscale V5) (IDEAM, 2018). No obstante la resolución operativa es de 6km, lo cual puede resultar restrictivo en el caso de aplicación de pequeñas cuencas, como es el caso del presente proyecto, de tal forma en este caso se optó por modelar el WRF con un *downscaling* (disminución de escala) para obtener una malla de modelación de 1.33 km.

De otra parte, en este proyecto se propone la evaluación del WRF en modo probabilista, es decir teniendo en cuenta el pronóstico de control y diez perturbaciones adicionales que configuran diez escenarios probabilistas para la precipitación. El modelo se complementa con tres modelos hidrológicos con distintas configuraciones paramétricas, resultando en 23 posibles inferencias hidrológicas, de lo cual resultan 253 escenarios probables en cada paso de tiempo evaluado (11 escenarios meteorológicos x 23 configuraciones hidrológicas).

Antes de pasar al análisis del HEPS vale la pena aclarar que la diferencia entre un pronóstico determinista y uno probabilista se centra especialmente en la forma en la que se presenta el pronóstico final, pues si bien el pronóstico puede presentar cientos de escenarios pero se decide concentrar la respuesta hidrológica en el escenario promedio, u otro tipo de medida simplificadora, el pronóstico debe ser visualizado como determinista dado que se

perde el rastro probabilista de la ocurrencia de los eventos. En cambio, si el pronóstico se presenta como un grupo de escenarios probables y su posibilidad de asociación al riesgo, el producto ya es naturalmente probabilista.

Las herramientas para la evaluación del pronóstico determinista son las conocidas métricas de error tales como el error absoluto medio (MAE), el error medio cuadrático (MSE) y otras. Mientras en el caso probabilista es necesario utilizar otro tipo de métricas denominadas *scores*. A continuación, se presentan dos *scores* ampliamente utilizados para evaluar este tipo de pronósticos.

6.1 Scores para evaluar el pronóstico probabilista

6.1.1 Continuous Ranked Probability Score (CRPS)

El CRPS se define como el error al cuadrado entre la función de distribución acumulada (CDF) del conjunto $F(y^t)$, y la CDF “ficticia” de la observación en cada paso de tiempo t . Este último se describe mediante la función Heaviside, que es igual a cero cuando las predicciones son menores que la observación, $H(y_i < o^t) = 0$ e igual a uno de lo contrario, $H(y_i \geq o^t) = 1$ (Ver Figura 6-1).

$$CRPS(y^t, o^t) = \int_{-\infty}^{+\infty} (F(y^t) - H(y^t, o^t))^2 dy$$

Ecuación 6-1

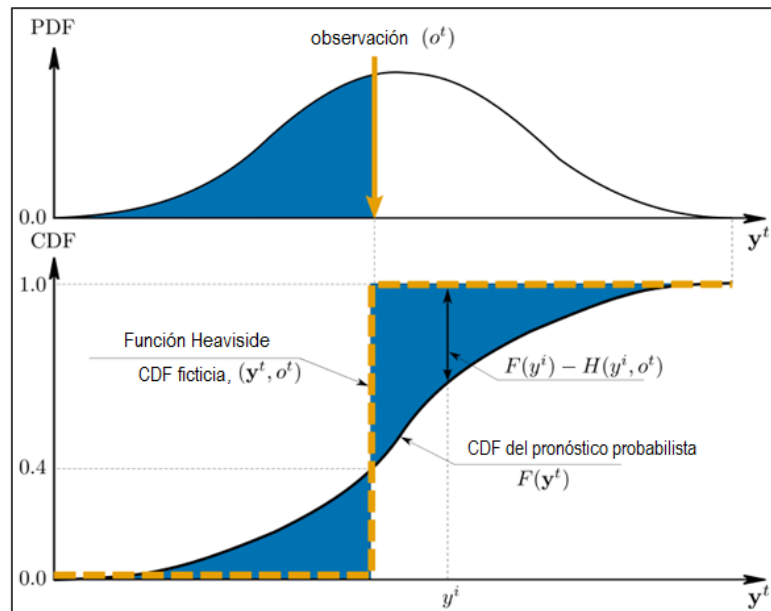


Figura 6-1 Evaluación continua del puntaje de probabilidad clasificado. Fuente: elaboración propia.

Se busca la minimización del CRPS. El CRPS medio es equivalente al error absoluto medio (MAE) para un pronóstico determinista, es decir, cuando la función se aplica tanto al pronóstico individual como a la observación,

por tal razón esta medida es usualmente utilizada para comparar el rendimiento de un pronóstico probabilista con respecto a uno determinista. El CRPS evalúa simultáneamente la fiabilidad, resolución e incertidumbre del pronóstico probabilista. Suponiendo que los conjuntos de pronóstico y^t están distribuidos normalmente, el CRPS en el momento t se define por:

$$CRPS(F(y^t), o^t) = o^t \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} - 2\phi\left(\frac{o^t - \mu^t}{\sigma^t}\right) - \left(\frac{o^t - \mu^t}{\sigma^t}\right) \left(2\Phi\left(\frac{o^t - \mu^t}{\sigma^t}\right) - 1\right) \right] \quad \text{Ecuación 6-2}$$

Donde ϕ y Φ indican las variables normalizadas para la PDF y CDF de la distribución gaussiana estándar, o^t es la observación, μ^t el pronóstico promedio y σ^t la desviación estándar.

6.1.2 El diagrama de confiabilidad (RD)

El diagrama de confiabilidad (RD) es una representación gráfica de la distribución conjunta de los pronósticos y observaciones, para pronósticos de probabilidad de un predictor binario. Para su definición, se definen M umbrales de probabilidad, a menudo deciles, luego se determina la frecuencia observada para cada uno de estos M umbrales. Finalmente, se calcula la relación entre las probabilidades pronosticadas y la frecuencia observada.

En un sistema confiable \bar{o}_m será igual a m , es decir, la distancia entre la línea 1:1 y los pares calculados (m, \bar{o}_m) será muy pequeña (panel izquierdo de la Figura 6-2). En consecuencia, se puede evaluar la fiabilidad del sistema mediante el MAE evaluado a partir de las diferencias entre las frecuencias observadas y los umbrales de probabilidad evaluados en el RD (RD_{MAE}):

$$RD_{MAE}(Y, o) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |\bar{o}_{mi} - m_i| \quad \text{Donde: } m_i \in [0, 1] \quad \text{Ecuación 6-3}$$

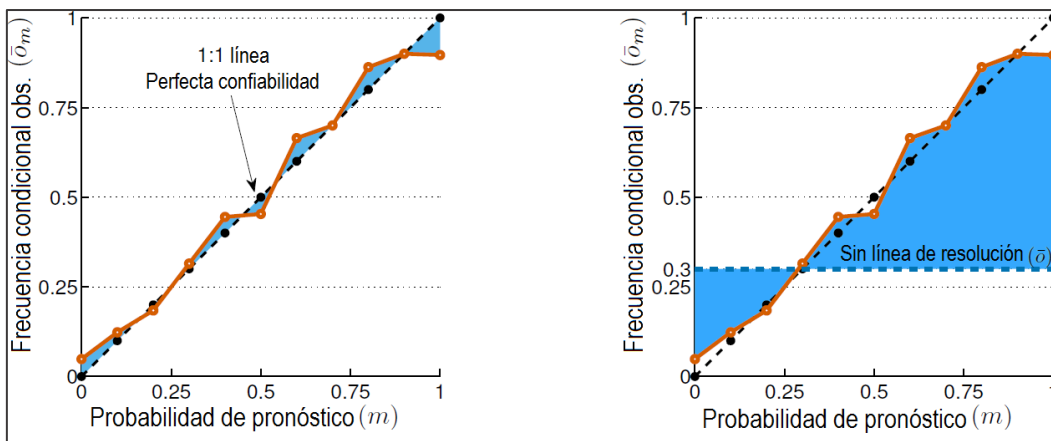




Figura 6-2 Diagrama de confiabilidad. Fuente: elaboración propia

	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

Para maximizar la confiabilidad se busca minimizar la ecuación anterior. El diagrama de confiabilidad propone una evaluación directa de la confiabilidad y resolución de un pronóstico de probabilidad. Con respecto a la resolución (habilidad del pronóstico para distinguir situaciones con frecuencias de ocurrencia claramente diferentes), su medida viene dada por la diferencia entre cada probabilidad observada condicional \bar{o}_m y la observación media condicional general (ver línea sin resolución en el lado derecho de la figura). Finalmente, un diagnóstico de diagrama de confiabilidad conduce a determinar sobre estimación o sub-estimación del pronóstico probabilista. Por ejemplo, si la curva está por debajo de la línea 1: 1, eso indica que el pronóstico promedio es mayor que la observación promedio (sobre estimación). Pero, si la curva está por encima de la línea 1: 1 (sub-estimación), el pronóstico promedio es menor que la observación promedio.

6.2 Análisis del pronóstico meteorológico con el WRF

Dada la poca variabilidad espacial de la precipitación generada con el WRF para cada URH (Ver numeral 2.5.2.1), se tomaron los pronósticos de precipitación en el centro de masa de la cuenca como representativos de toda la cuenca. Al respecto es importante destacar que el perfeccionamiento del SAT con las estaciones pluviográficas a instalar dará la posibilidad de mejorar la modelación hidrológica, teniendo en cuenta la variabilidad espacial observada en la zona y por tanto se tendrán herramientas para forzar la variabilidad de los pronósticos a la fina resolución espacial que el área del proyecto amerita.

Para evaluar la incertidumbre asociada a la precipitación, en cuanto a la evaluación del escenario de control y los diez escenarios probabilistas, un primer indicio de lo informativo que pueden ser los múltiples escenarios se basa en el filtrado de las series con un análisis PCA, recordando que cuando la varianza de un espacio multidimensional es capturada con pocas dimensiones en el análisis PCA esto indica redundancia en la información final transmitida.

Así, la Figura 6-3, muestra las dimensiones correspondientes al miembro de control del pronóstico y los diez escenarios probabilistas en el espacio PCA definido por sus tres componentes principales para el evento crítico del 31 de marzo del 2017. Al contrario de lo observado en el análisis PCA aplicado en el espacio multidimensional conformado por las series de precipitación en cada URH (Ver numeral 2.5.2.1), en esta figura se presenta una variabilidad importante en los escenarios respaldada por una varianza retenida de apenas el 53.6% con las tres primeras componentes. La primera componente, la cual retiene, refleja cerca del 42% representa en mayor medida el miembro de control del pronóstico, mientras las otras dimensiones representan la información del pronóstico probabilista. La importancia de los escenarios probabilistas se puede también destacar con el aporte de cada

miembro a la varianza total retenida en el PCA, dónde son necesarias nueve dimensiones para representar el 90% de la varianza del problema.

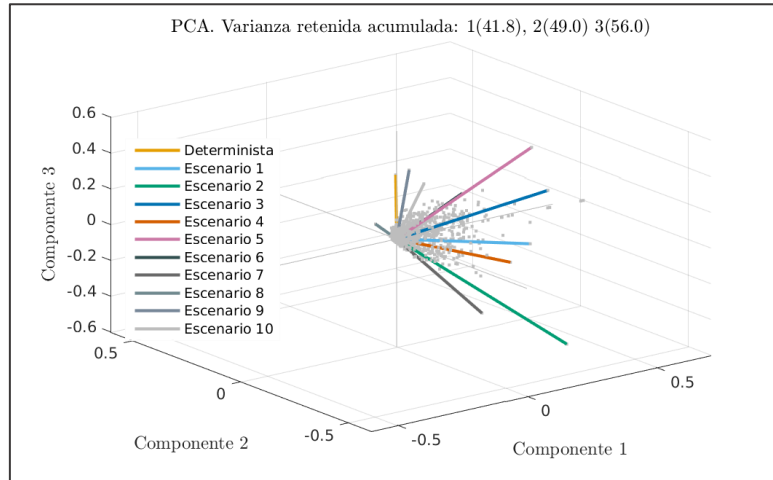


Figura 6-3 PCA de los escenarios de precipitación media generados con el WRF para el período comprendido entre el 19 de noviembre de 2016 y el 25 de enero de 2017. Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la Figura 6-5, se presentan los pronósticos deterministas simulados con el WRF a una resolución espacial de 1.33 km y con una resolución temporal de 10 minutos. Es importante observar que el WRF era capaz de representar los picos críticos del 30 y 31 de marzo de 2017, aunque aparece el desfase del evento del 29 de marzo que podría minar la confianza del operador del SAT, no obstante una característica importante es que a medida que disminuía el horizonte de pronóstico la magnitud y ocurrencia de los eventos críticos era más precisa.

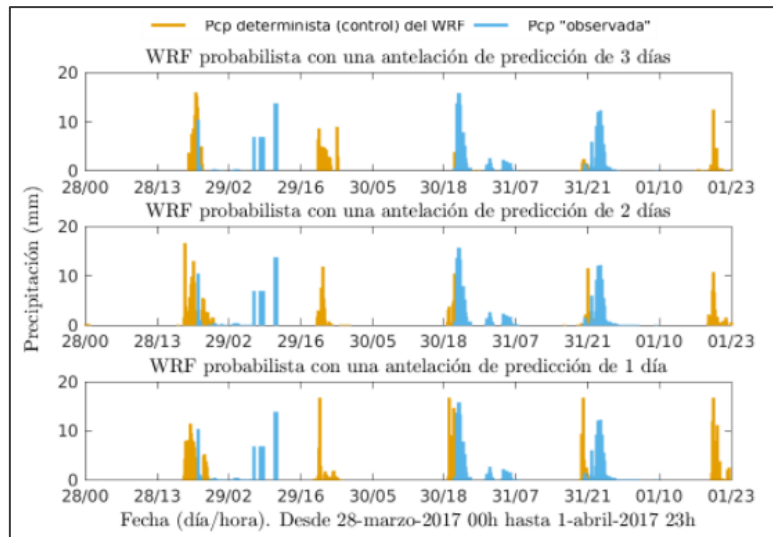


Figura 6-4. Comportamiento del escenario determinista de precipitación, días antes del evento crítico de marzo 31 de 2017. Cada gráfica corresponde a un horizonte de pronóstico diferente, desde 3 días en la parte superior, hasta un día en la parte inferior. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-4 se presentan los pronósticos probabilistas simulados con el WRF a una resolución espacial de 1.33 km y con una resolución temporal de 10 minutos. En el panel superior se muestra que desde el 29 de marzo de 2017 se tenían escenarios de precipitación con intensidades y ocurrencias muy similares a los dos eventos críticos observados: el del 30 de marzo alrededor de las 10 pm (evento de saturación de la cuenca) y el evento detonante del 31 de marzo a la media noche.

Como es una característica del pronóstico probabilista del WRF los escenarios probabilistas siguen la huella de los escenarios deterministas Figura 6-4. Especial atención requiere el panel central que refleja el pronóstico con dos días de antelación donde se muestra que el evento observado el 29 de marzo alrededor del mediodía es pronosticado por los miembros probabilistas con diferente hora de ocurrencia.

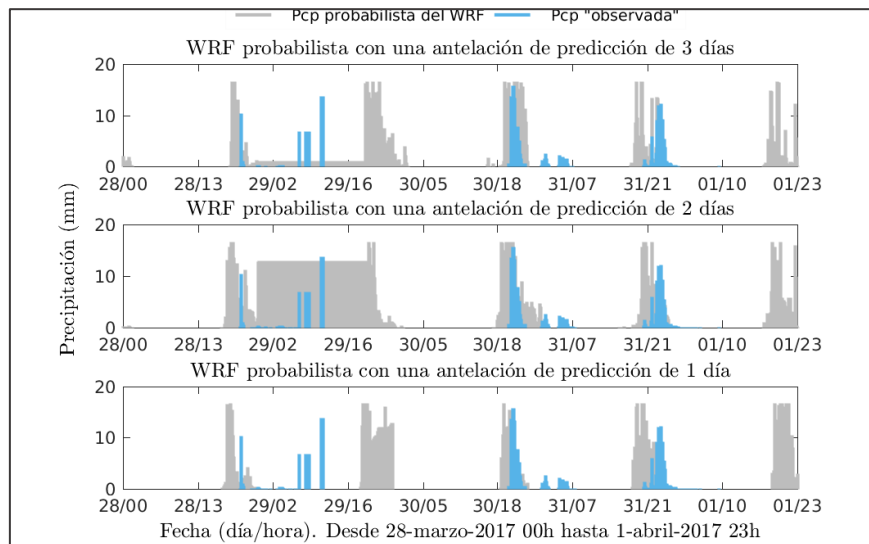




Figura 6-5 Comportamiento de los escenarios probabilistas de precipitación días antes del evento crítico de marzo 31 de 2017. Cada gráfica corresponde a un horizonte de pronóstico diferente, desde 3 días en la parte superior hasta un día en la parte inferior. Fuente: Elaboración propia

Es importante notar que las barras grises representan los diez escenarios probabilistas superpuestos, de tal forma no se debe interpretar el pronóstico probabilista para el día 29 de marzo como un pronóstico de lluvia intensa de 14 horas de duración sino como un evento donde cada escenario presentaba un cierto desfase con respecto a los escenarios restantes, lo cual es una condición frecuente en este tipo de pronósticos.

Con respecto a los eventos de mayor interés, el de saturación y el de detonación, este horizonte de predicción (FTH por sus siglas en inglés, Forecast Time Horizon) mantiene las observaciones que se presentaban en el

	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

horizonte de pronóstico de tres días, lo cual en un contexto operacional debe reforzar la necesidad de toma de decisiones, dados los pronósticos que rectifican observaciones de pronósticos anteriores.

Finalmente, el panel inferior, correspondiente al pronóstico de eventos con un día de antelación, continuaba mostrando la ocurrencia de los eventos claves previos a la catástrofe del 31 de marzo, con una acertada magnitud y duración, lo cual es clave en el funcionamiento del SAT.

Con el fin de tener una idea sobre la calidad general del sistema probabilista de pronóstico meteorológico (MEPS por sus siglas en inglés, Meteorological Ensemble Prediction System) en el periodo evaluado, desde el 19 de noviembre de 2016 hasta el 25 de enero de 2017, la Tabla 6-1 presenta los resultados deterministas y probabilistas del MEPS. A título comparativo la Tabla 6-1 muestra el MAE para el mejor modo determinista del HEPS y el CRPS para las distintas configuraciones del sistema probabilista. Tal evaluación se centra en el periodo de análisis comprendido entre el noviembre de 2016 y enero del 2017.



Tabla 6-1 Función objetivo y scores del MEPS para el período comprendido entre el 19 de noviembre de 2016 y el 25 de enero de 2017.

FTH	MAE miembro de control	MAE promedio del pronóstico probabilista	CRPS	MAE-RD
1	0.42	0.40	0.20	10.18
2	0.46	0.44	0.23	8.91
3	0.44	0.45	0.24	8.62

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6-1, se muestran los resultados de los pronósticos vistos desde el punto de vista determinista y probabilista. La segunda y tercera columna presentan los resultados deterministas, es decir cuando una sola estimación representa el pronóstico, en este caso el miembro de control o determinista del ensamble o el promedio de los once escenarios que incluyen el determinista y el conjunto probabilista. Los resultados muestran que es ligeramente más ventajoso utilizar el promedio del conjunto de estimaciones y que además el rendimiento cae ligeramente a medida que el horizonte de pronóstico se extiende, lo cual es usualmente el caso en este tipo de sistemas.

En cuanto al pronóstico probabilista, los resultados del CRPS dejan ver la superioridad del pronóstico probabilista sobre el determinista puesto que el resultado del CRPS es menor al MAE obtenido con los dos escenarios deterministas.

	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

Finalmente, en cuanto a la fiabilidad del MEPS, los resultados muestran un error aceptable del orden del 9% en promedio, no obstante esta medida debe ser confrontada con un *score* que se centre especialmente en el sesgo del sistema puesto que ambas medidas se encuentran frecuentemente en contraposición. Aunque el CRPS evalúa simultáneamente el sesgo y la fiabilidad, no se tiene el control sobre cuál aspecto tiene mayor relevancia en la evaluación interna de este *score*, pero como se acotó inicialmente un periodo más largo es necesario para buscar optimizar la calidad del MEPS.

6.3 Incertidumbre estructural

Con el fin de incluir la incertidumbre estructural de los modelos hidrológicos en el HEPS, el sistema consta de tres modelos a saber: GR4J, HBV y Sacramento. La idea detrás de la exploración de los tres modelos está en la exploración de las bondades de cada uno, pues aunque estos modelos son de tipo conceptual las suposiciones de cada modelo incentivan diferentes resultados en la modelación hidrológica.

6.4 Incertidumbre paramétrica



Con el fin de explorar la incertidumbre paramétrica de cada modelo hidrológico se evaluaron varias configuraciones paramétricas. Tal evaluación siguió la misma ruta de establecimiento de modelo hidrológico descrito en la sección 2.5.3, caracterizada principalmente por la optimización de los modelos en la cuenca vecina llamada Piedra Lisa y la utilización de series estocásticas de precipitación a resolución de 10 minutos. Para evaluar la incertidumbre paramétrica se generaron cien series estocásticas de precipitación con la metodología descrita en la 2.2.6 y la configuración dada en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2 Configuración del algoritmo de downscaling temporal para la generación de series de precipitación a resolución de 10 minutos.

Serie de precipitación diaria	Media ponderada de la cuenca Piedra Lisa II calculada con las estaciones Patoyaco, Minchoy y Campucana.
Serie de precipitación minutal de base	Serie procesada de la estación Acueducto Mocoa.
Periodo de simulación estocástica	Entre el 1/julio/2009 y el 15/agosto/2011
Número de eventos a considerar en la selección de padres	9
Probabilidad de cruce	57%
Probabilidad de mutación	1%
Condiciones especiales	Preservación de la propiedad de variación gradual
Número de simulaciones estocásticas	100

Fuente: Elaboración propia

Posterior a la obtención de los cien conjuntos paramétricos por la optimización con el algoritmo DDS en cada modelo hidrológico, el espacio paramétrico resultante se exploró con el algoritmo de agrupamiento *k-means*, y con

	Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.	
	Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana	

la ayuda de la función *silhouette* se determinó el número óptimo de clusters (Martinez Alvarez *et al.*, 2011). En consecuencia los centros de los clusters fueron considerados los conjuntos paramétricos más diversos a utilizar en el HEPS.

La Tabla 6-3, presenta los resultados de los cinco conjuntos paramétricos encontrados en el modelo hidrológico GR4J. Asimismo la Tabla 6-4 presenta los resultados de los conjuntos paramétricos del HBV, mientras en la Tabla 6-5, se muestran los resultados de las parametrizaciones para el modelo Sacramento.

Tabla 6-3 Conjuntos paramétricos para el modelo GR4J explorados en el HEPS.

Conjunto	X1	X2	X3	X4
1	566.6	0.01	82.2	4.04
2	555.7	0.09	85.7	2.77
3	521.1	-0.07	103.9	1.88
4	611.9	0.00	70.1	2.25
5	631.0	0.02	62.2	3.85

Fuente: Elaboración propia



Tabla 6-4 Conjuntos paramétricos para el modelo GR4J explorados en el HEPS.

Conjunto	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
1	814.4	1419.3	102.4	472.6	41.0	4.1	335.5	735.8	102.5
2	587.4	1218.2	124.3	626.6	39.6	4.3	342.5	345.7	57.0
3	796.3	1197.0	121.4	444.5	66.4	6.9	73.9	619.1	55.1
4	906.1	1203.2	90.2	598.8	44.2	5.6	119.9	446.2	143.6
5	709.1	302.4	157.8	926.6	81.7	32.3	79.5	857.0	97.7
6	1317.1	615.0	110.1	451.3	47.8	64.2	1.7	473.9	68.8
7	732.1	754.2	35.6	472.6	25.4	4.6	217.8	253.8	107.9
8	580.0	1369.4	90.1	479.6	72.1	4.2	274.3	313.6	127.5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-5 Conjuntos paramétricos para el modelo Sacramento explorados en el HEPS.

Conjunto	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
1	57.5	664.6	579.8	294.9	764.1	113.1	47.6	1.12	28.9
2	47.4	725.5	542.7	365.9	183.2	225.2	39.3	1.05	22.0
3	21.2	472.5	542.5	253.4	708.7	272.9	64.4	1.04	12.1
4	66.4	259.7	996.5	420.8	226.6	156.7	53.6	1.06	42.2
5	41.8	420.9	574.2	152.9	400.2	221.4	48.6	1.12	12.4
6	24.3	607.5	700.1	225.6	399.2	154.9	61.8	1.02	37.5
7	70.1	429.1	616.8	424.7	548.0	389.7	44.1	1.04	27.2

	<i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i>						
	Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana						

8	72.5	362.9	644.4	157.7	429.6	219.7	41.7	1.03	25.3
9	24.2	723.9	626.8	200.0	692.1	353.0	23.0	1.05	30.0
10	67.4	726.3	859.1	146.2	618.0	361.7	67.9	1.03	19.6

Fuente: Elaboración propia

6.5 Establecimiento del modelo determinista de pronóstico hidrológico

Al igual que el MEPS, el modelo determinista de pronóstico hidrológico puede ser concebido a partir de la considerada mejor configuración de la modelación hidrológica o alguna simplificación que resuma el pronóstico hidrológico a una sola estimación.

En este caso las Figuras: Figura 6-6, Figura 6-7 y Figura 6-8, presentan la propagación del miembro de control del MEPS en los tres modelos hidrológicos y para los tres horizontes de pronóstico evaluados. El modelo de referencia (curva azul), que representa la condición cuasi real está configurado con la mejor configuración del modelo más robusto, en este caso el modelo GR4J, y la precipitación procesada en la estación pluviográfica a resolución de 10 minutos (Mocoa Acueducto).

Adicionalmente como alternativas del sistema determinista se presentan hidrogramas medios para las siguientes configuraciones:

- GR4J con el miembro de control y las distintas configuraciones paramétricas (curva naranja sólida).
- HBV con el miembro de control y las distintas configuraciones paramétricas (curva azul claro sólida).
- Sacramento con el miembro de control y las distintas configuraciones paramétricas (curva verde sólida).
- El conjunto de los tres modelos anteriores (curva roja sólida).
- GR4J con todos los escenarios del WRF y las distintas configuraciones paramétricas (curva naranja punteada).
- HBV con todos los escenarios del WRF y las distintas configuraciones paramétricas (curva azul claro punteada).
- Sacramento con todos los escenarios del WRF y las distintas configuraciones paramétricas (curva verde punteada).
- El conjunto de los tres modelos anteriores (curva roja punteada).

En la Figura 6-6 se muestra el pronóstico determinista del HEPS con una antelación de 3 días, allí se puede observar que el evento de saturación de la cuenca (30 de marzo a las 10 pm) se pronosticaba correctamente, no

obstante se mostraban dos picos anteriores que no coinciden con la modelación hidrológica de las observaciones pluviográficas, lo cual restaría credibilidad al pronóstico.

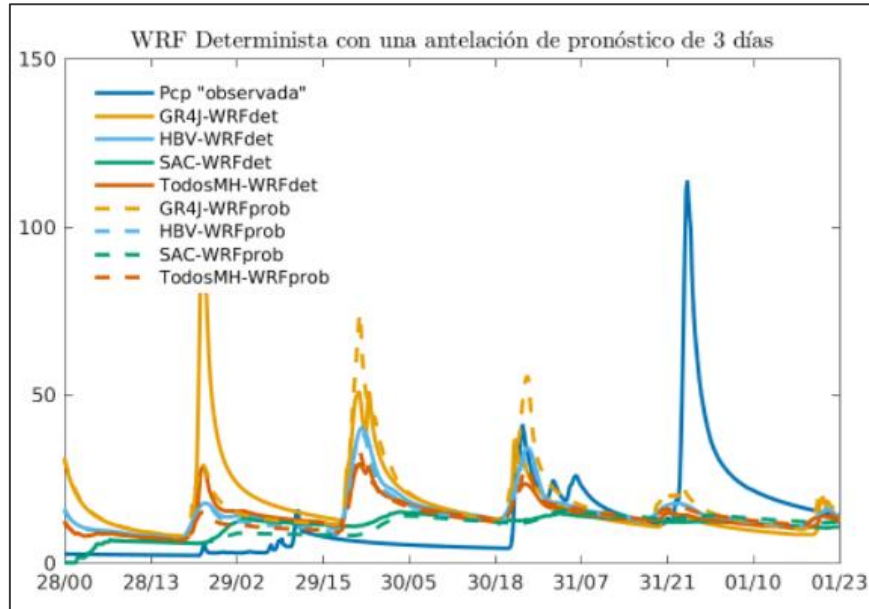


Figura 6-6. Comportamiento de los distintos escenarios deterministas del HEPS, tres días antes del evento crítico de marzo 31 de 2017.
Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, en la Figura 6-7 se evidencia que el día 29 de marzo los pronósticos deterministas presentaban mucha disparidad para los eventos de ese día pero convergían en el evento de saturación de la cuenca a excepción de las simulaciones con el modelo Sacramento, lo cual hubiese permitido estar alerta a la ocurrencia del evento para definir el estado de saturación de la cuenca.

Finalmente, en la Figura 6-8 se puede observar que con un día de antelación se tiene representado un pico de alrededor de 50 m³/s el 31 de marzo a las 9 pm, lo cual dada las condiciones de saturación observadas por el evento del 30 de marzo hubiese sido suficiente para activar el SAT.

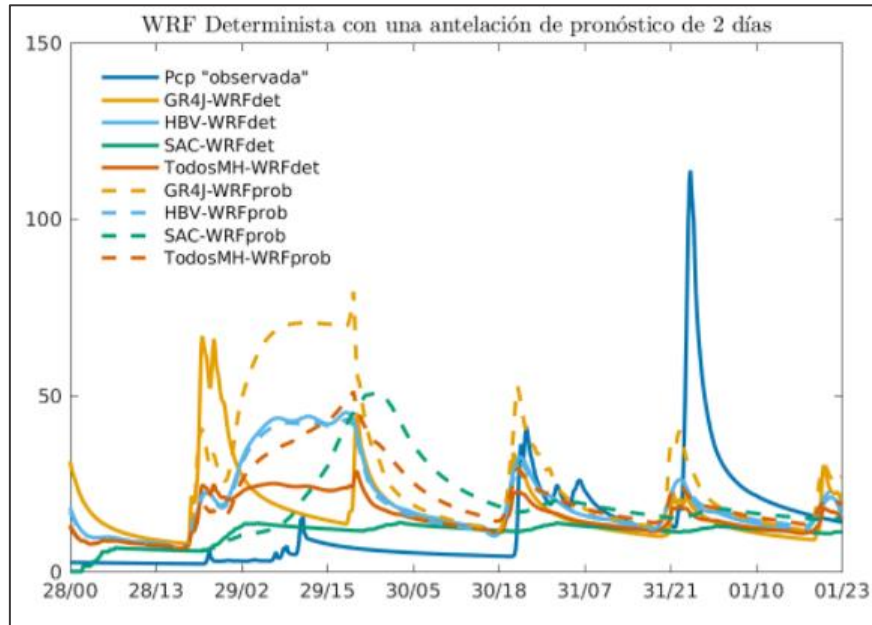


Figura 6-7. Comportamiento de los distintos escenarios deterministas del HEPS, dos días antes del evento crítico de marzo 31 de 2017.
Fuente: Elaboración propia

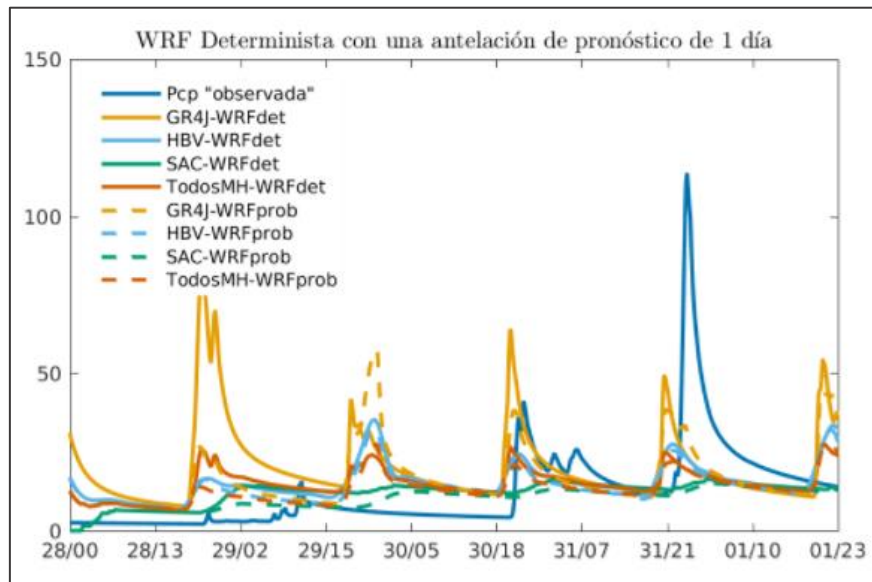




Figura 6-8. Comportamiento de los distintos escenarios deterministas del HEPS, un día antes del evento crítico de marzo 31 de 2017.
Fuente: Elaboración propia

Otro aspecto que es recurrente en los resultados del HEPS en modo determinista es el pronóstico de un pico el primero de abril a la medianoche, lo cual no sigue la huella de la simulación hidrológica con la precipitación

	<i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i>	
	Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana	

procesada en la estación Acueducto. En síntesis, las Figuras del HEPS en modo determinista para la simulación del día antes del evento muestran básicamente los siguientes aspectos:

- Simulación de picos notablemente más alta en el modelo GR4J que en los demás modelos.
- Un caudal medio elevado en la simulación con todos los modelos con respecto al observado.
- Una deficiente simulación del modelo Sacramento.
- La sucesión de picos no observados, problema heredado del pronóstico de lluvia, lo cual puede minar la confianza de la operación del SAT debido a las continuas falsas alarmas que se producirían.

Para definir el HEPS en modo determinista, es necesario evaluar un periodo más largo que incluya como mínimo un ciclo hidrológico completo, e igualmente pertinente sería incluir varios eventos máximos en el análisis para evaluar cuantitativamente la fiabilidad del sistema. En esta línea, en la Tabla 6-6, se presentan los resultados de rendimiento de los esquemas deterministas analizados en las anteriores gráficas pero en el periodo extendido entre el 19 de noviembre de 2016 y el 25 de enero de 2017.



Tabla 6-6. MAE evaluado para las configuraciones del pronóstico determinista basado en la simplificación de varios esquemas multiescenario en los tres horizontes de pronóstico para el periodo comprendido entre noviembre de 2016 y enero de 2017.

FTH	GR4J-WRF det	HBV- WRFdet	SAC- WRFdet	MHs- WRFdet	GR4J- WRFprb	HBV- WRFprb	SAC- WRFprb	MHs- WRFprb
1	10.04	17.11	8.28	11.57	9.31	11.22	7.59	9.53
2	11.24	15.35	9.17	10.05	10.67	10.89	8.74	9.20
3	10.86	14.85	8.80	9.15	10.57	9.76	8.58	8.80

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6-6, se visualiza que a medida que se extiende el horizonte de pronóstico, el error MAE tiende a disminuir, asimismo se muestra que el modelo Sacramento para este periodo de análisis obtiene los mejores resultados seguido por el GR4J y el HBV. Adicionalmente, se observa una ganancia al utilizar los escenarios probabilistas del HEPS como base para calcular el hidrograma promedio (últimas 4 columnas de la Tabla 6-6) con respecto a las simulaciones basadas únicamente en el escenario determinista del WRF (miembro de control).

En cuanto a los resultados deterministas provenientes de promediar los resultados de todos los modelos hidrológicos (MHs, columnas 5 y 9), los resultados no evidencian una ganancia al utilizar tal esquema, lo cual podría estar influenciado por el pobre rendimiento del modelo HBV.

	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

Al respecto, Brochero *et al.*, (2011) ha propuesto una metodología de sobreproducción de escenarios para posteriormente seleccionar los que más se complementan en función de minimizar alguna función objetivo específica. Con esta metodología sería posible buscar mejores resultados en el escenario futuro donde se haga un análisis de un período más extendido para el HEPS.

6.6 Establecimiento del modelo probabilista de pronóstico hidrológico (HEPS)

En esta sección se presentan los resultados de los pronósticos probabilistas meteorológicos (MEPS) propagados en las diferentes configuraciones (Tabla 6-3, Tabla 6-4, Tabla 6-5) de los tres modelos evaluados en esta consultoría para generar el HEPS.

En las Figuras: Figura 6-9, Figura 6-10 y Figura 6-11, se muestran los resultados de distintas configuraciones para el HEPS y distintos horizontes de pronóstico en los días previos al evento crítico del 31 de marzo de 2017. Las configuraciones estudiadas propagan los once escenarios del WRF de la siguiente manera:

- Modelo GR4J con 5 parametrizaciones para un total de 55 escenarios (Figura superior izquierda).
- Modelo HBV con 8 parametrizaciones para un total de 88 escenarios (Figura superior derecha).
- Modelo Sacramento con 10 parametrizaciones para un total de 110 escenarios (Figura inferior izquierda).
- Un conjunto que agrupa las anteriores configuraciones un total de 253 escenarios (Figura inferior derecha).

En la Figura 6-9, se puede observar que con una antelación de tres días el modelo hidrológico GR4J mostraba la posibilidad de experimentar varios picos a una frecuencia aproximadamente diaria. No obstante, el hidrograma “observado” muestra solamente que solamente ocurrieron los eventos máximos de saturación de la cuenca y el de detonación del evento crítico.

Sin embargo, tanto el modelo HBV como el Sacramento no mostraron tales intensidades de eventos en los múltiples escenarios modelados, sin embargo la frecuencia de ocurrencia si es similar dada las condiciones impuestas por el MEPS.

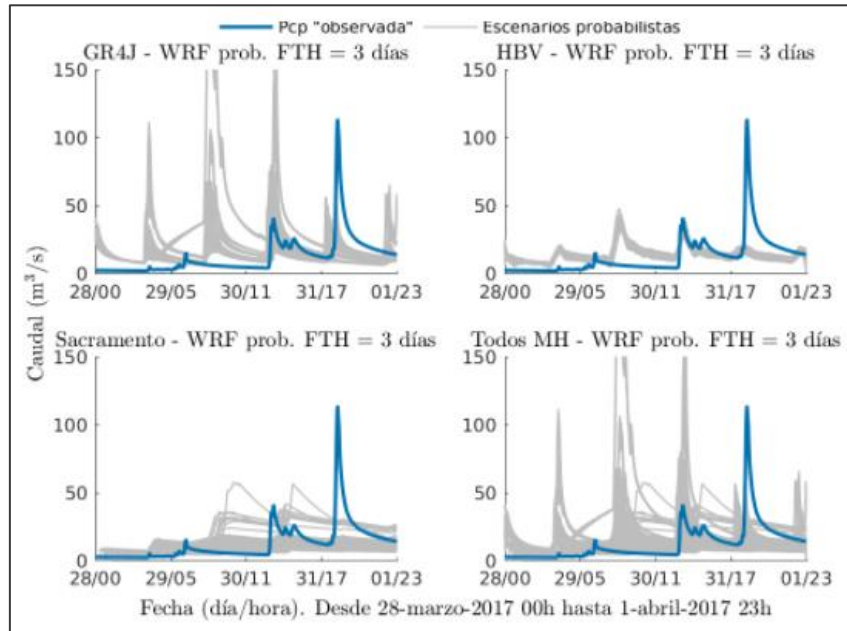


Figura 6-9. Comportamiento de los distintos escenarios probabilistas del HEPS, tres días antes del evento crítico de marzo 31 de 2017. Fuente: Elaboración propia

Es importante destacar que solamente el GR4J se aproxima a la simulación del evento crítico pero posterior a la sobre-estimación de múltiples picos antecedentes, lo cual como se anotó anteriormente juega un papel negativo en la toma de decisiones.

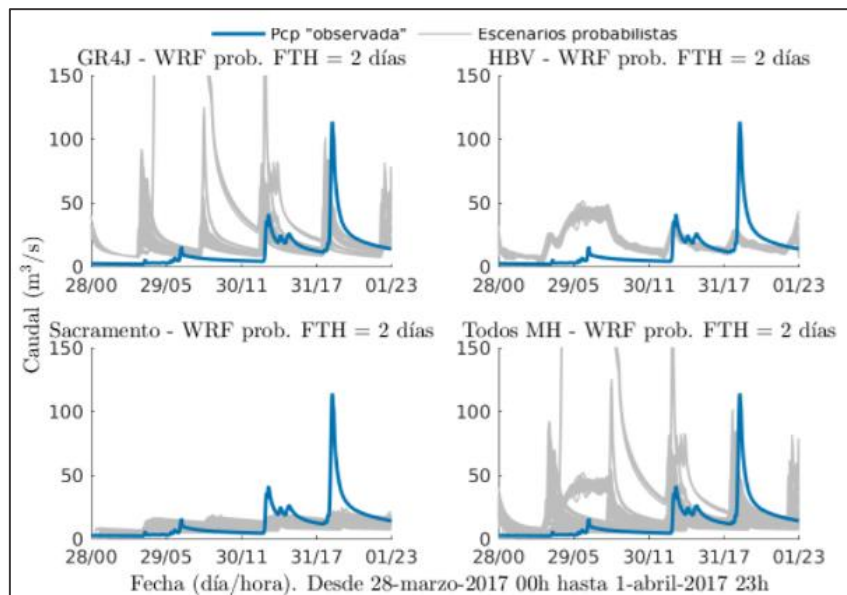


Figura 6-10. Comportamiento de los distintos escenarios probabilistas del HEPS, dos días antes del evento crítico de marzo 31 de 2017. Fuente: Elaboración propia

En referencia a la Figura 6-10, se evidencian varios aspectos en los hidrogramas modelados con dos días de antelación:

1. Por primera vez se muestra una familia de hidrogramas que con un adecuado tiempo y magnitud alcanza a simular acertadamente el evento crítico, esto en el caso del GR4J. No obstante, las deficiencias en la sobre-estimación de los picos antecedentes se mantienen.
2. El modelo HBV logra simular adecuadamente el evento de saturación luego de pasar de una larga meseta de transición de caudales altos.
3. El modelo Sacramento se limita a una franja de caudales bajos sin mostrar la influencia de los picos de precipitación simulados con el WRF.

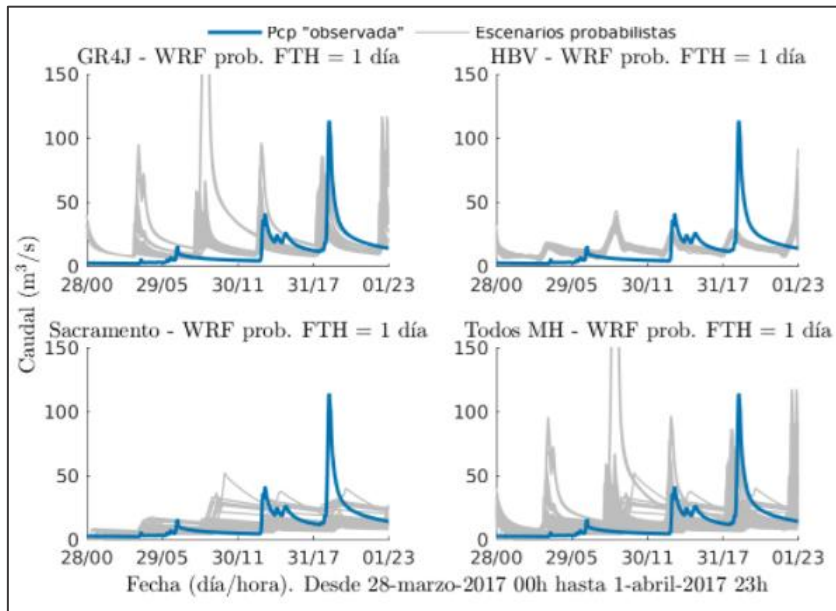




Figura 6-11. Comportamiento de los distintos escenarios probabilistas del HEPS, un día antes del evento crítico de marzo 31 de 2017. Fuente: Elaboración propia

La Figura 6-11, representa los escenarios de caudal con un día de antelación y confirma la posibilidad del evento de saturación y detonación en la cuenca, especialmente en el caso de la modelación con el GR4J. Nuevamente el evento de saturación es correctamente mapeado por el modelo HBV.

Con los resultados se concluye, que en general el pronóstico probabilista presenta mayor rendimiento que la mejor configuración determinista del HEPS (columna 2), puesto que el CRPS medio es menor al MAE. Asimismo se evidencia que tanto el MAE como el CRPS, mejoran con relación al horizonte de pronóstico. Es importante también destacar, que aunque el mejor HEPS basado en un modelo individual es el Sacramento, la combinación de este con los otros dos modelos logra disminuir ligeramente el CRPS del HEPS.

	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---



Finalmente en la Tabla 6-7, se presenta la evaluación de la fiabilidad del sistema en función de las distintas configuraciones del HEPS.

Tabla 6-7. Fiabilidad de las distintas configuraciones probabilistas del HEPS.

FTH	GR4J-WRFprb	HBV-WRFprb	SAC-WRFprb	Todos-WRFprb
1	26.84	24.59	26.65	21.90
2	29.34	23.74	24.93	20.44
3	28.02	22.82	26.82	21.91

Fuente: Elaboración propia

Aquí se puede ver que el error en fiabilidad es significativo, alrededor del 25%, por lo cual se debe prever una optimización del HEPS para aumenta la fiabilidad del sistema. Adicionalmente se muestra que la fiabilidad mejora levemente cuando se configura el HEPS como la concatenación de escenarios de todos los modelos hidrológicos evaluados.

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p> <p>Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

7 BIBLIOGRAFÍA

Bao, H. and Zhao, L. (2012) 'Development and application of an atmospheric-hydrologic-hydraulic flood forecasting model driven by TIGGE ensemble forecasts', *Acta Meteorologica Sinica* 26.1, pp. 93–102.

Bonta, J. V. (2004) Development and utility of Huff curves for disaggregating precipitation amounts, *Applied Engineering in Agriculture*. doi: 10.13031/2013.17467.

Brochero, D., Anttil, F. and Gagné, C. (2011) 'Simplifying a hydrological ensemble prediction system with a backward greedy selection of members - Part 2: Generalization in time and space', *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(11), pp. 3327–3341. doi: 10.5194/hess-15-3327-2011.

Cloke, H. L. and Pappenberger, F. (2009) 'Ensemble flood forecasting: A review', *J. Hydrol.* 375.3-4, pp. 613–626.
 Gaborit, E. et al. (2013) 'On the reliability of spatially disaggregated global ensemble rainfall forecasts', *Hydrol. Processes* 27.1, pp. 45–56.

He, Y. et al. (2009) 'Tracking the uncertainty in flood alerts driven by grand ensemble weather predictions', *Meteorol. Appl.* 16.1, pp. 91–101.

Liu, Y. et al. (2012) 'Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities', *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16.10, pp. 3863–3887.

Luna Vera, J. A. (2013) Predicción y pronóstico de tormentas en regiones de Montaña - Aplicación en la cuenca del río La Paz, Bolivia, Universidad Nacional Autónoma de México.



Martinez Alvarez, F. et al. (2011) "Energy Time Series Forecasting Based on Pattern Sequence Similarity", *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* 23.8, pp. 1230–1243.

Marty, R., Zin, I. and Obled, C. (2013) 'Sensitivity of hydrological ensemble forecasts to different sources and temporal resolutions of probabilistic quantitative precipitation forecasts: flash flood case studies in the Cévennes-Vivarais region (Southern France)', *Hydrol. Processes* 27.1, pp. 33–44.

NOAA (2010) Flash flood early warning system reference guide. Available at: http://www.meted.ucar.edu/communities/hazwarnsys/ffewsrsg/FF_EWS.pdf.

Parkes, B. L. et al. (2013) 'Assessment of a 1 hour gridded precipitation dataset to drive a hydrological model: a case study of the summer 2007 floods in the Upper Severn', *UK. Hydrol. Res.* 44.1, pp. 89–105.

Ramos, A., Trujillo, M., and Prada, L. (2015) Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá. *Obras y proyectos*, (18), 63-75.

	<p align="center">Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</p> <p align="center">Documento – Definición de umbrales de lluvia y niveles de agua en las corrientes en estudio para el sistema de alerta temprana</p>	
---	---	---

Rogelis, M. C. (2007) 'Sistema de alerta temprana de inundaciones de la quebrada limas localidad ciudad bolívar', 1, p. 117.

Schaake, J. et al. (2009) 'Summary of recommendations of the first workshop on Postprocessing and Downscaling Atmospheric Forecasts for Hydrologic Applications held at Météo-France, Toulouse, France, 15–18 June 2009', Atmos. Sci. Lett. 11.2, pp. 59–63.

SGC, 2017b. Zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa de las subcuencas de las quebradas Taruca, Taruquita, San Antonio, El Carmen y los ríos mulato y Sangoyaco del municipio de Mocoa – Putumayo". Con relativos Mapas Anexos a Escala 1:25,000. En ajuste. Septiembre de 2017

Velázquez, J. A. et al. (2011) 'Can a multi-model approach improve hydrological ensemble forecasting? A study on 29 French catchments using 16 hydrological model structures', Adv. Geosci. 29, pp. 33–42.