

Analisis de perturbaciones en las condiciones iniciales de almacenamiento en un modelo hidrologico distribuido

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Ambiental

Mario Andrés Cano Echavarría

Director: Carlos David Hoyos Ortiz

Asesor: Nicolás Velásquez Girón

2 de diciembre de 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN

Contenido

1. Introducción	8
2. Objetivos	9
3. Antecedentes	10
4. Marco Conceptual	12
4.1. Parámetros morfométricos	12
4.1.1. Área de la cuenca	12
4.1.2. Longitud de la cuenca	12
4.1.3. Ancho de la cuenca	12
4.1.4. Altura y elevación	12
4.1.5. Pendientes	13
4.1.6. Curva Hipsométrica	13
4.1.7. Longitud del cauce principal	14
4.1.8. Longitud del cauce hasta la divisoria	14
4.1.9. Tiempo de concentración	14
4.1.10. Hidrogramas sintéticos	14
5. Área de estudio	15
6. Metodología	17



7. Resultados	18
8. conclusiones	19
9. Anexos	20
9.1. Gráficas Hidrología	21
9.2. Mapas para preparación del modelo	25
9.3. Eventos seleccionados - 2016	30
9.4. Calibración	39
9.5. Ensayo perturbaciones	42



Índice de Figuras

9.1.	Ubicación del Área de estudio	20
9.2.	Foto de la ubicación del sensor	21
9.3.	Isocronas - Tiempos de viaje	21
9.4.	Altura por encima de la red de drenaje más cercana	22
9.5.	Pendientes	22
9.6.	Tiempos de concentración	23
9.7.	Isocronas - Tiempos de viaje	23
9.8.	Perfil del cauce principal	24
9.9.	Histogramas de pendientes	24
9.10.	Hidrogramas sintéticos	25
9.11.	Profundidad por geomorfología	26
9.12.	Profundidad Capilar	26
9.13.	Almacenamiento gravitacional	27
9.14.	Almacenamiento capilar	27
9.15.	Conductividad Hidráulica	28
9.16.	Coeficiente de Manning	28
9.17.	Velocidad en laderas	29
9.18.	Rain Event - 2016-04-12	30
9.19.	Rain Event - 2016-03-06	31
9.20.	Rain Event - 2016-03-28	31



9.21. Rain Event - 2016-04-01	32
9.22. Rain Event - 2016-04-12	32
9.23. Rain Event - 2016-04-24	33
9.24. Rain Event - 2016-05-01	33
9.25. Rain Event - 2016-05-06	34
9.26. Rain Event - 2016-05-07	34
9.27. Rain Event - 2016-06-03	35
9.28. Rain Event - 2016-09-03	35
9.29. Rain Event - 2016-09-14	36
9.30. Rain Event - 2016-09-22	36
9.31. Rain Event - 2016-10-06	37
9.32. Rain Event - 2016-10-17	37
9.33. Rain Event - 2016-10-18	38
9.34. Rain Event - 2016-10-25	38
9.35. Calibración evento 2016-10-17	39
9.36. Calibración evento 2016-10-24	40
9.37. Calibración evento 2016-05-01	41
9.38. Perturbación evento 2016-10-25 1	42
9.39. Perturbación evento 2016-10-25 5	43
9.40. Perturbación evento 2016-10-25 9	43
9.41. Perturbación evento 2016-10-25 13	44
9.42. Perturbación evento 2016-10-25 17	44
9.43. Perturbación evento 2016-10-25 21	45



9.44. Perturbación evento 2016-10-25 25	45
9.45. Perturbación evento 2016-10-25 29	46
9.46. Perturbación evento 2016-10-25 33	46
9.47. Perturbación evento 2016-10-25 37	47
9.48. Perturbación evento 2016-10-25 41	47
9.49. Perturbación evento 2016-10-25 45	48
9.50. Perturbación evento 2016-10-25 49	48
9.51. Perturbación evento 2016-05-01 1	49
9.52. Perturbación evento 2016-05-01 5	49
9.53. Perturbación evento 2016-05-01 9	50
9.54. Perturbación evento 2016-05-01 13	50
9.55. Perturbación evento 2016-05-01 17	51
9.56. Perturbación evento 2016-05-01 21	51
9.57. Perturbación evento 2016-05-01 25	52
9.58. Perturbación evento 2016-05-01 29	52
9.59. Perturbación evento 2016-05-01 33	53
9.60. Perturbación evento 2016-05-01 37	53
9.61. Perturbación evento 2016-05-01 41	54
9.62. Perturbación evento 2016-05-01 45	54
9.63. Perturbación evento 2016-05-01 49	55
9.64. Perturbación evento 2016-10-17 1	55
9.65. Perturbación evento 2016-10-17 5	56
9.66. Perturbación evento 2016-10-17 9	56



9.67. Perturbación evento 2016-10-17 13	57
9.68. Perturbación evento 2016-10-17 17	57
9.69. Perturbación evento 2016-10-17 21	58
9.70. Perturbación evento 2016-10-17 25	58
9.71. Perturbación evento 2016-10-17 29	59
9.72. Perturbación evento 2016-10-17 33	59
9.73. Perturbación evento 2016-10-17 37	60
9.74. Perturbación evento 2016-10-17 41	60
9.75. Perturbación evento 2016-10-17 45	61
9.76. Perturbación evento 2016-10-17 49	61
9.77. Perturbación evento 2016-10-17 53	62
9.78. Perturbación evento 2016-10-17 57	62
9.79. Perturbación evento 2016-10-17 61	63
9.80. Perturbación evento 2016-10-17 65	63
9.81. Perturbación evento 2016-10-17 69	64
9.82. Perturbación evento 2016-10-17 73	64
9.83. Perturbación evento 2016-10-17 77	65



Índice de Tablas

5.1. Parámetros morfométricos de la cuenca	15
5.2. Tiempos de concentración de la cuenca	15



1 Introducción

El proyecto analiza la respuesta del modelo hidrológico de (Aristizábal et al., 2015) ante perturbaciones en las condiciones iniciales de almacenamiento en eventos de lluvia extremos. El principal objetivo es mejorar la simulación por medio del acoplamiento de datos observados de humedad en el suelo y una herramienta de simulación de datos. El área de estudio es la Cuenca La Chocha del Municipio de Sabaneta - Antioquia que desemboca en el río Aburrá. El análisis Confrontar el modelo con datos reales

En el área metropolitana del Valle de Aburrá se desarrollan proyectos como el Sistema de alerta temprana (SIATA), que tienen la responsabilidad de generar predicción y servicios de alerta mediante herramientas como la modelación hidrológica. La optimización y el mejoramiento de estas es indispensable para avanzar en el conocimiento del sistema hidrológico y generar predicciones de manera más acertada, tiene efecto directo en otros campos diferentes a la prevención de desastres ya que puede aportar información para el análisis de disponibilidad hídrica y variabilidad espacio temporal del agua; es posible su implementación en actividades agrícolas como sistemas de riego, captaciones para extracción de agua subterránea y para cálculo del volumen de agua almacenada en los acuífero para actividades de bombeo (Restrepo Tamayo et al., 2010). Es común la utilización de modelos hidrológicos para fines de administración del recurso hídrico con planes de oferta y demanda hídrica, proyecciones de disponibilidad de agua

y cuantificación de los efectos de las extracciones en el agua superficial o subterránea. Los modelos hidrológicos obtienen buenos estimativos sin embargo, hay incertidumbres asociadas tanto a las observaciones de lluvia, como a las medidas y predicciones de los flujos resultantes (Srikanthan et al., 2007). Algunos fenómenos presentan dificultades tanto en la medición como en la simulación, procesos convectivos o de boyancia no incluidos en el modelo causan errores sistemáticos. La calidad de los datos tomados *in situ* depende de la precisión del instrumento y de su correcta calibración, además, la calidad de la modelación está limitada al número de procesos que pueda o no representar y la discretización espacio temporal implementada. La assimilación hidrológica surge como una herramienta útil para remover y cuantificar estos errores, puede combinar el conocimiento que se tiene del sistema, y los datos que podemos obtener de las observaciones sintetizando la información en un modelo dinámico (Houser et al., 2012)



2 Objetivos

El objetivo principal del estudio es analizar la repuesta del modelo hidrológico de (Aristizábal et al., 2015) ante perturbaciones en las condiciones iniciales de almacenamiento en evento de lluvia extremos para la Cuenca La Chocha del Municipio de Sabaneta - Antioquia, con el fin de mejorar la simulación por medio del acoplamiento de un sistema de asimilación de datos. Para el desarrollo se plantea la realización del estudio morfométrico de la cuenta , un análisis exploratorio de los eventos de lluvia generados a partir del radar meteorológico, la estación limnimétrica y de humedad en el suelo del Sistema de Alerta Temprana del valle de Aburrá y la calibración de ambos parámetros, Nivel y Humedad.



3 Antecedentes

Entender y evaluar la distribución del ciclo del agua es una de las principales propósitos de la hidrología (Pan and Wood, 2006). La modelación hidrológica comprende el estudio de la atmósfera que controla los procesos de evaporación y precipitación y el almacenamiento en el suelo que controla la escorrentía superficial y subsuperficial (Vergara et al., 2016). El mejoramiento de las condiciones de los modelos hidrológicos es de gran utilidad en temas como la agricultura, la ecología, prevención de desastres y administración del recurso.

técnicas en asimilación de datos han sido establecidas principalmente por meteorólogos y oceanógrafos. Estas han sido implementadas de manera satisfactoria para mejorar las predicciones climáticas (Houser et al., 2012). También ha tenido buena aceptación en hidrología por sus buenos resultados. El principal enfoque en la hidrología ha sido la asimilación de las condiciones de humedad. La humedad en el suelo aporta información sobre el fenómeno de infiltración que permite establecer las condiciones de la humedad en el suelo ante la ocurrencia de un evento de lluvia.

- Complementar los datos o filtrarlos
- Comparar datos con predicciones previas

- Confrontar el modelo con datos reales para identificar falencias
- Corregir errores sistemáticos
- Encontrar registros malos por fallas en instrumentos, errores en telecomunicación o mala calibración.
- Llevar registro de la incertidumbre en las simulaciones.

A escala interanual, la predictibilidad de las variables climáticas como la precipitación es dependiente de las condiciones de almacenamiento superficial, los flujos superficiales afectan la evolución de la boyancia vertical en la atmósfera, también el efecto baroclínico en el plano horizontal (pan et al 1995). El desempeño de los modelos hidrológicos están sujetos a la adecuada caracterización de los procesos que se llevan a cabo dentro de la columna de suelo, estos procesos están gobernados por ecuaciones diferenciales no lineales y se presentan en áreas de geometría compleja. Uno de los métodos de asimilación que ha dado buenos resultados en sistemas no lineales de este tipo es el Ensemble Kalman Filter, una adaptación del filtro Kalman propuesta por (Evensen, 2003). El EnKF es un filtro



bayesiano basado en el método Monte Carlo, el filtro estima estadísticamente probables estados de los sistemas basados en información previa basado en el Teorema de Bayes. Aunque sea una aproximación al valor real, en la práctica es una manera de obtener resultados de manera muy precisa sin la necesidad de llevar a cabo ningún tipo de linealización de las ecuaciones, incluso para sistemas caóticos como las ecuaciones de Lorenz el filtro muestra buen desempeño y soluciones consistentes (Evensen, 2003). El kalman filter fue usado por primera vez para describir un acuífero lineal usando observaciones de humedad en el suelo. (Milly, 1986), pero no se desempeñó bien en sistemas no lineales (Houser et al., 2012). (Li et al., 2012) demostró su capacidad del filtro para simular los flujos subterráneos y estimar la conductividad hidráulica y porosidad asimilando la altura piezométrica, por otro, lado (Reichle et al., 2002) logró la reducción del 55 al 80 % del error en la estimación del caudal sin asimilación. Este tipo de estudios han vuelto popular el EnKF en diferentes áreas ya que es ya que es flexible y fácil de usar. (Xie and Zhang, 2010) ha obtenido simulaciones de escorrentía, humedad y evapotranspiración de manera satisfactoria (Burgers et al., 1998). En

la fase inicial de la implementación del EnKF, se genera un número determinado de puntos aleatorios «ensembles» con la misma distribución de probabilidad que las variales de estado involucradas usando un método montecarlo, en general, entre mayor sea el número de ensembles, mejores resultados se obtendrán, es decir que el desempeño computacional del filtro depende de la cantidad de ensembles lo cual es una desventaja. La localización espacial también es una desventaja por la siguiente razón; teniendo en cuenta que se quisiera asimilar datos de humedad con observaciones en un punto específico de la cuenca

(Rasmussen et al., 2015) se evaluó el desempeño del EnKF variando el tamaño de los ensembles y distribución espacial de la humedad observada basada en la distancia para disminuir la correlación entre la humedad observada en puntos alejados, se mostró que métodos de localización sirven para reducir el ensemble size significantemente. de las condiciones del suelo sean muy diferentes, para reducir el número y merojar el rendimiento computacional, en su estudio concluyen que cuando hay pocas observaciones de almacenamiento más ensembles son necesitados



4 Marco Conceptual

4.1. Parámetros morfométricos

El análisis morfométrico se realiza con base en la geomorfología, geología y clima y es clave para describir el comportamiento hidrológico, las características inherentes de la cuenca, además sirve para intuir patrones o antecedentes de la cuenca (Hajam et al., 2013)

4.1.1. Área de la cuenca

Definida como la proyección horizontal de la superficie de drenaje, corresponde a la superficie delimitada por la línea divisoria de aguas. Es un parámetro que aporta error en la modelación pues incide directamente en la cantidad de agua que simula el modelo.

4.1.2. Longitud de la cuenca

Se define como la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca (estación de aforo) hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca

4.1.3. Ancho de la cuenca

Es la relación entre el área y la longitud de la cuenca

4.1.4. Altura y elevación

Es un parámetro que determina el movimiento del agua a lo largo de la cuenca. Está estrechamente relacionado con la cobertura vegetal y las características del suelo.



Cota mayor de la cuenca es la mayor altura a la cual se encuentra la línea divisoria de la cuenca

Cota menor de la cuenca Es la cota sobre la cual la cuenca entrega sus aguas a un cauce superior

Elevación promedia del relieve

Es la elevación promedia de la cuenca referida al nivel del mar

Cota mayor del cauce Elevación del punto más alto del cauce

Histograma de frecuencias altimétricas Es la distribución de frecuencias de las elevaciones obtenidas dentro de la cuenca

4.1.5. Pendientes

Pendiente media de la cuenca es el valor medio del declive del terreno y la inclinación respecto a la horizontal de la cuenca

Histograma de pendientes Es la distribución de frecuencias de las pendientes que se encuentran dentro de la cuenca

Pendiente promedio del cauce Se elabora con base en el perfil altimétrico a lo largo del río, se puede encontrar la pendiente de la recta ajustada a parejas de valores obtenidos en intervalos iguales a lo largo del cauce y luego haciendo regresión de mínimos cuadrados (Ford and Williams, 1989)

4.1.6. Curva Hipsométrica

Es la representación gráfica de la variación altitudinal de una cuenca, por medio de una curva tal, que a cada altura le corresponde un respectivo porcentaje del área ubicada por encima de esa altura.



4.1.7. Longitud del cauce principal

Corresponde a la longitud del cuerpo de agua que le da nombre a la cuenca de estudio, teniendo en cuenta la sinuosidad cauce

4.1.8. Longitud del cauce hasta la divisoria

Es longitud del cauce principal hasta la divisoria sumado a la distancia en línea recta la distancia hasta la intersección con la línea divisoria de aguas.

4.1.9. Tiempo de concentración

Es considerado como el tiempo de viaje de una gota de agua de lluvia que escurre superficialmente desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida. Se calcula utilizando parámetros de la cuenta. Para su estimación se recomienda emplear varias ecuaciones empíricas utilizadas por diferentes autores para excluir las que den valores (Chow et al., 1988)

4.1.10. Hidrogramas sintéticos

El hidrograma de una corriente, es la representación gráfica de las variaciones del caudal con respecto al tiempo, arregladas en orden cronológico en un lugar dado de la corriente.

(Pizarro-Tapia et al., 2014)



5 Área de estudio

El proyecto se desarrolla en el municipio de la estrella, la estación limnimétrica está ubicada en las coordenadas (-75.64749,6.15919), la estación de humedad está ubicada en las coordenadas (-75.64689,6.151675)

Tabla 5.1: Parámetros morfométricos de la cuenca

INFORMACIÓN MORFOMÉTRICA DE LA CUENCA			
Área [km²]	11.249	Centro X	-75.678
Altura máxima del cauce [msnm]	2733	Centro Y	6.147
Altura máxima [msnm]	2857	Altura media [msnm]	2140
Altura mínima [msnm]	1655	Longitud del cauce [km]	6.265
Longitud de la cuenca [km]	5.279	Pendiente del cauce [%]	15.834
Pendiente de la cuenca [%]	41.685	Perímetro [Km]	20.638

Tabla 5.2: Tiempos de concentración de la cuenca

TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN [hora]			
Campo y Múnера	0.609	Dirección de Carreteras España	0.443
Giandotti	0.616	John Stone	1.440
Kiprich	0.498	Temez	0.191
Us Army	0.590	Ventura	0.11

La sección donde se ubica el sensor de nivel se puede observar en la figura 9.2. Presenta un cauce recto con alta pendiente, tamaños de roca entre gravas, arenas, cantos y bloques de hasta

90 cm de diámetro. El perfil del cauce presenta un desarrollo típico de una cuenca pequeña donde se presenta alta producción de sedimentos, se aprecia comportamiento de río de montaña joven con presencia de saltos y pozos. En la Tabla 5.1 se encuentra la información morfométrica de la cuenca donde se tiene que el estudio comprende un área de 11.249 kilómetros, y las altitudes varían entre 1655 a 2857 msnm. El tiempo de concentración medio es 0.49 horas, para su cálculo se descartan los resultados de Ventura y John Stone.



6 Metodología

Para el estudio se utilizaron datos de humedad, nivel y lluvia del radar meteorológico del sistema temprana del Valle de Aburrá en resolución temporal de 5 min y un tamaño de celda de 12.7 m. En la fase inicial se preparan los parámetros físicos del modelo. La evapotranspiración potencial se asume según la ecuación de Turc a escala diaria y se divide para el intervalo de tiempo, en este caso es 5 minutos. Se preparan los parámetros físicos del modelo y se buscan eventos de lluvia superiores a 3 mm que generen respuesta en el sensor de nivel con una hidrógrafa. Se eliminan eventos que presenten inconsistencias o mala calidad en los datos. El siguiente paso comprende la fase de calibración de la humedad y el nivel, en esta fase es importante representar bien la forma de las hidrógrafas y el comportamiento del pulso de la humedad observada. Una vez calibradas la humedad y el nivel, se procede a generar perturbaciones en las condiciones de humedad durante el evento mediante la iteración para diferentes pasos.



7 Resultados

Se logró encontrar una calibración que representara bien datos de humedad y nivel, en la Figura 9.35. La misma calibración funcionó para algunos eventos como el de la Figura 9.36, mientras en otras eventos como el de la Figura 9.37 no se logró capturar bien el comportamiento de las variables involucradas, sin embargo, el comportamiento de los tanques para las tres pruebas fue adecuado. En la mayoría de los eventos se presentó subestimación, incluso sobreparametrizando. Se identificó que la dificultad en la calibración de estos eventos radica en que aguas arriba del sensor de nivel no se registró agua suficiente, por lo tanto el presupuesto de agua que entra al sistema no logró levantar la hidrógrafa simulada, en las figuras . Este inconveniente es una oportunidad para la asimilación, pues en caso de eventos donde la lluvia presente gran incertidumbre con intensidades que no logren satisfacer el almacenamiento de los tanques en el modelo se pueda suplir con la humedad observada. Se continuará la investigación remplazando algunos resultados del modelo para estos eventos con observaciones de humedad, este es el enfoque más simple de la asimilación y es conocido como (Heathman et al., 2003). El análisis de las perturbaciones en las condiciones iniciales de almacenamiento muestran que el modelo genera una respuesta inmediata. Las perturbaciones positivas o que aumentan el nivel de agua almacenada en los tanques son las más sensibles. También es evidente que el modelo tiende a estabilizarse en el tiempo con iguales valores simulados indiferente de la magnitud de la perturbación. La hidrógrafa simulada en 2016-10-25 fue una de las tantas que subestimó el nivel, pero que fue posible levantarla generando perturbaciones en ciertos instantes como en la Figura 9.48



8 conclusiones



9 Anexos



MUNICIPIO: La Estrella **UBICACIÓN DEL SENSOR DE NIVE**

Figura 9.1: Ubicación del Área de estudio

9.1. Gráficas Hidrología

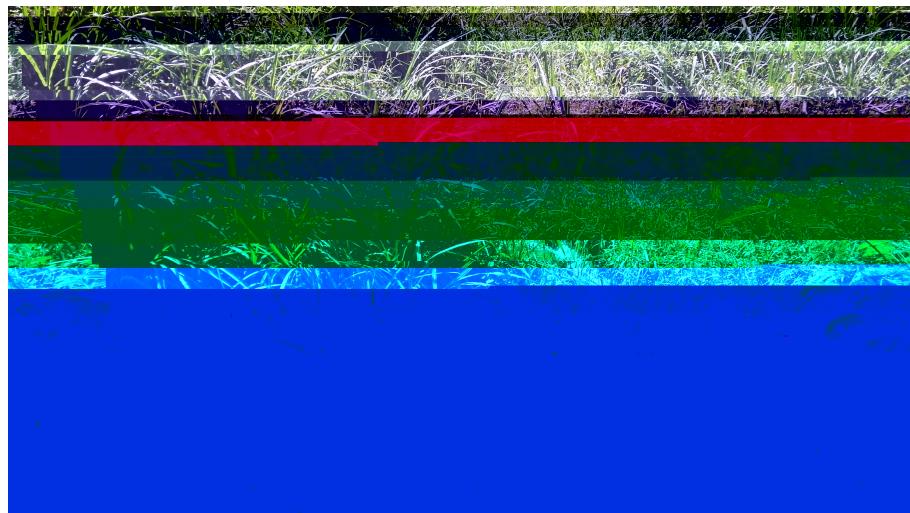


Figura 9.2: Foto de la ubicación del sensor

Fecha: 2016-09-30



Figura 9.3: Isocronas - Tiempos de viaje

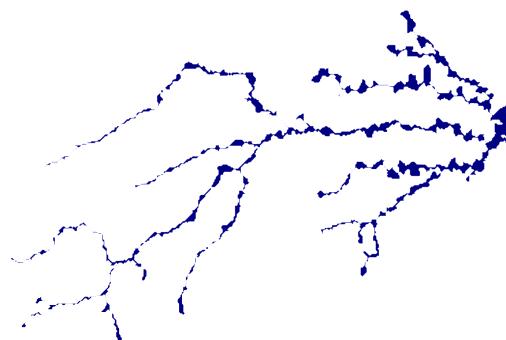


Figura 9.4: Altura por encima de la red de drenaje más cercana

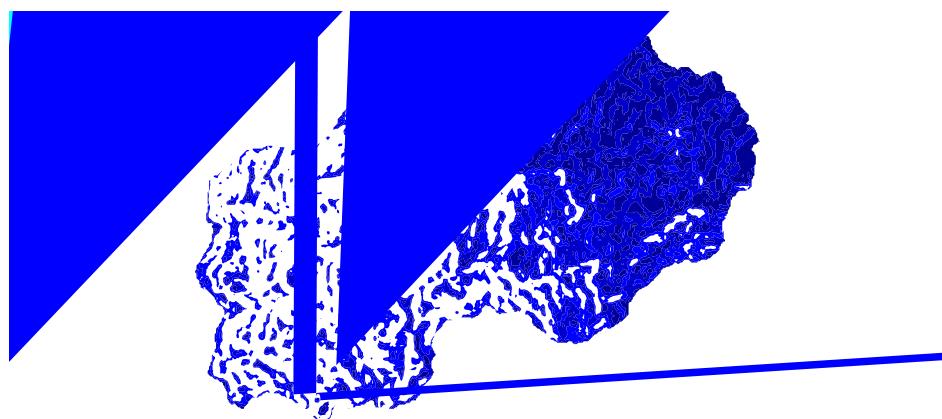


Figura 9.5: Pendientes

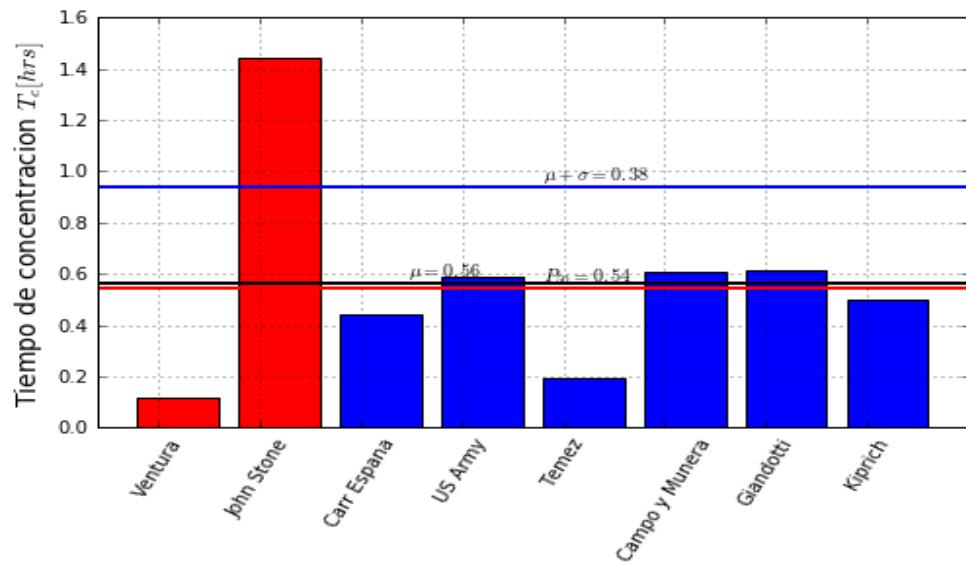


Figura 9.6: Tiempos de concentración

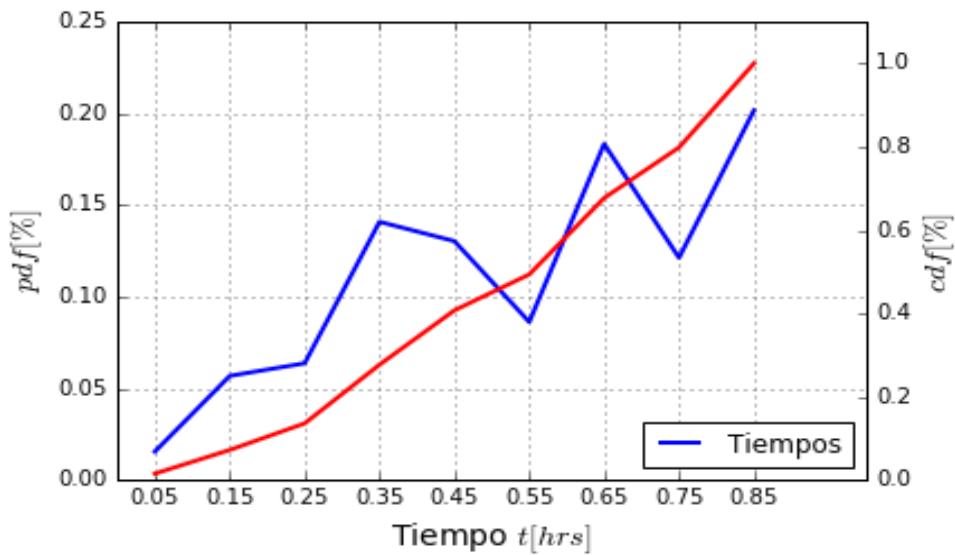


Figura 9.7: Isocronas - Tiempos de viaje

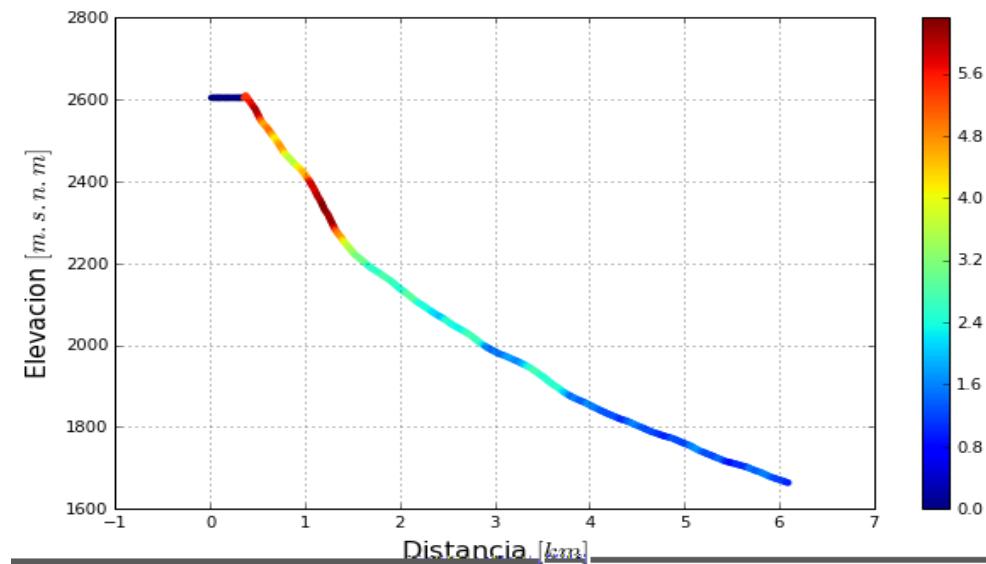


Figura 9.8: Perfil del cauce principal

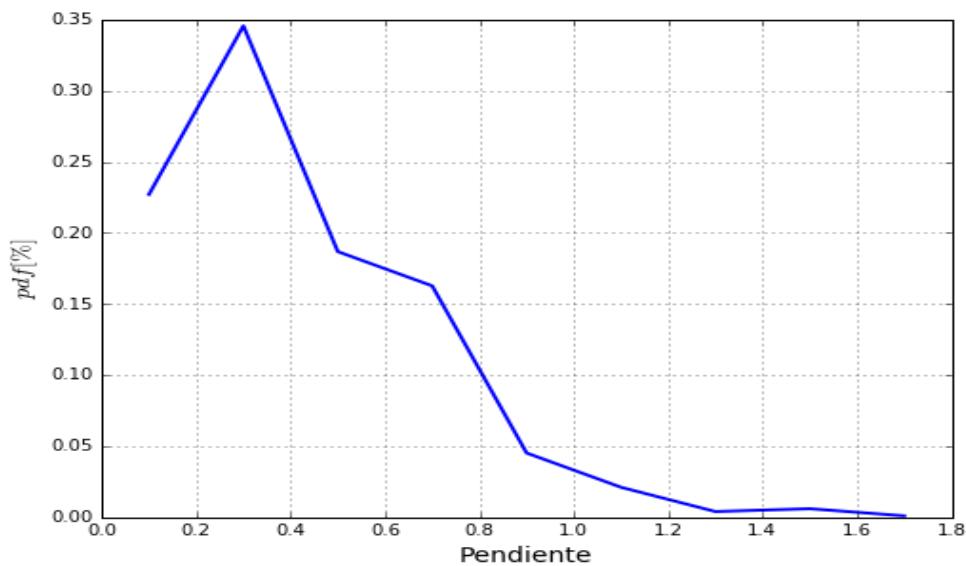


Figura 9.9: Histogramas de pendientes

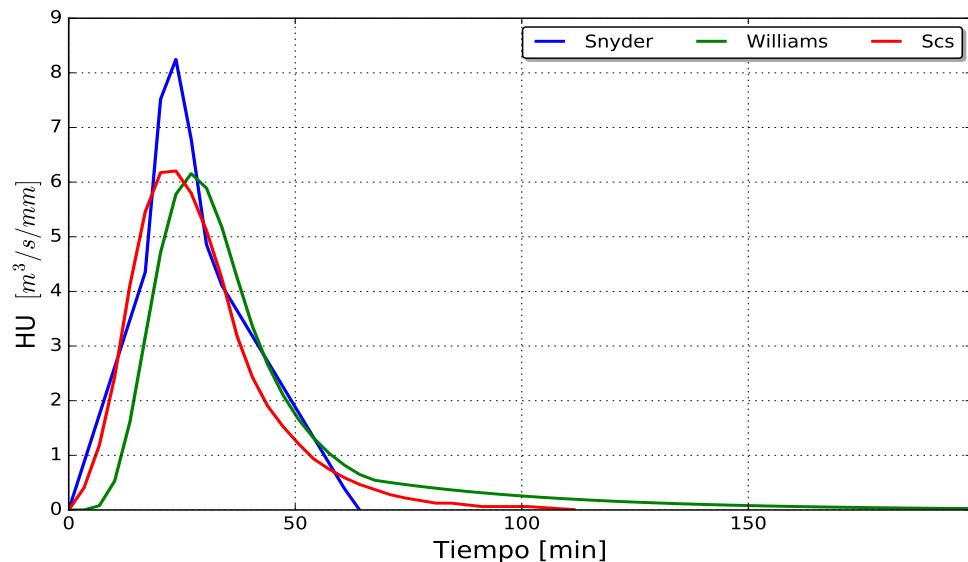


Figura 9.10: Hidrogramas sintéticos

9.2. Mapas para preparación del modelo





UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN



Figura 9.13: Almacenamiento gravitacional

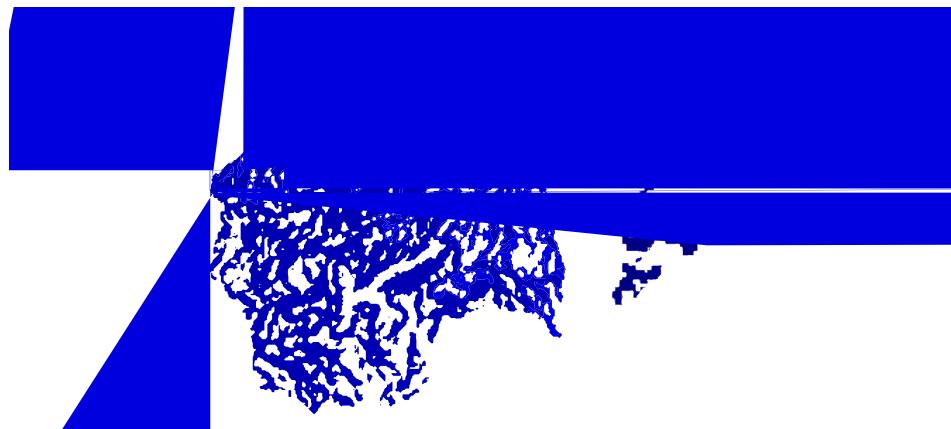


Figura 9.14: Almacenamiento capilar

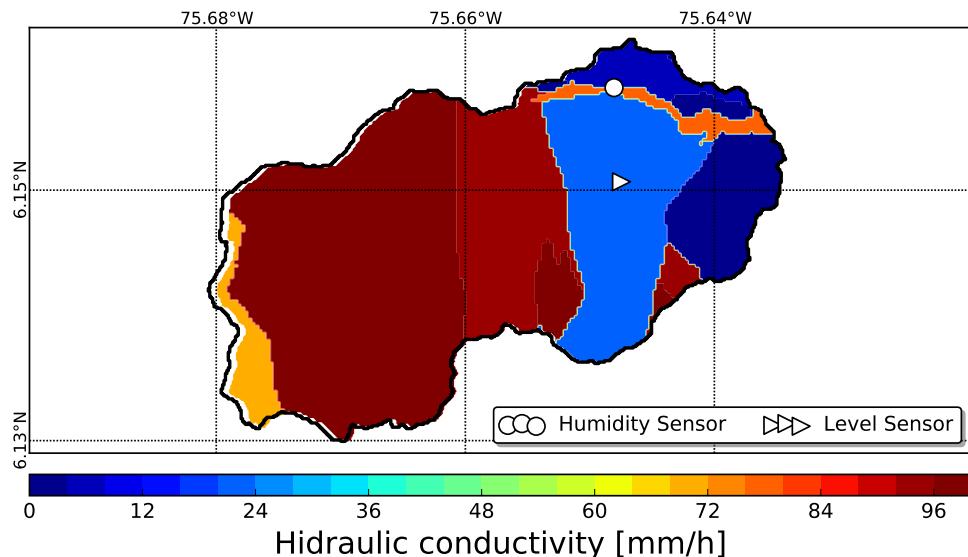


Figura 9.15: Conductividad Hidráulica

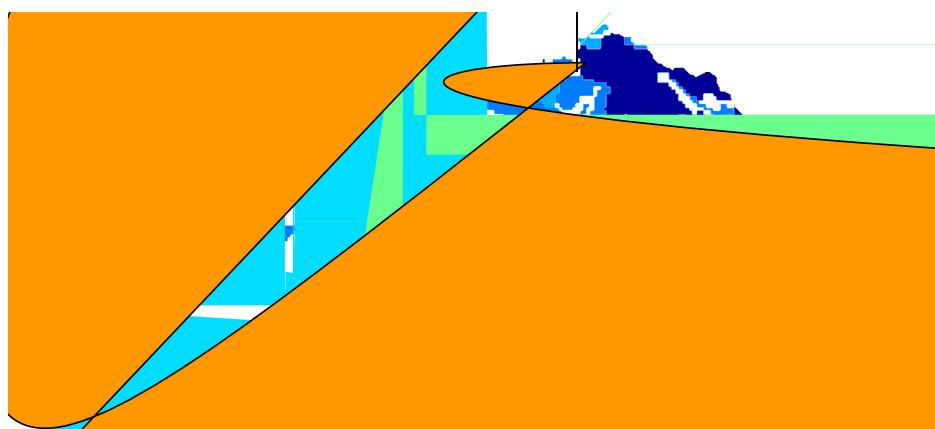


Figura 9.16: Coeficiente de Manning

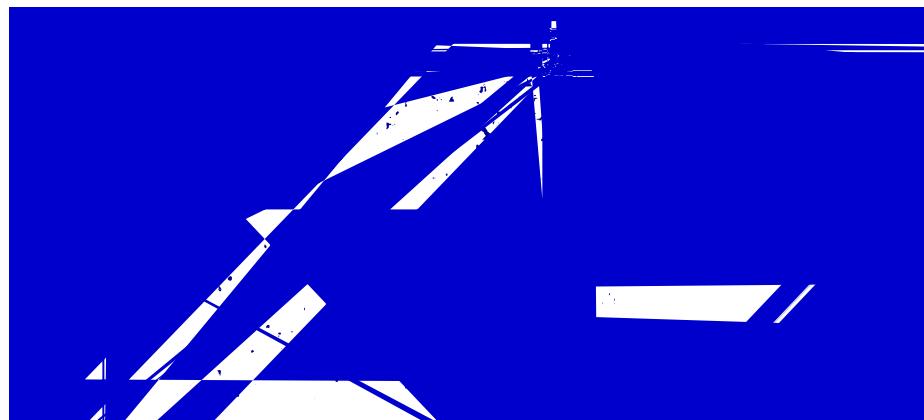


Figura 9.17: Velocidad en laderas



9.3. Eventos seleccionados - 2016

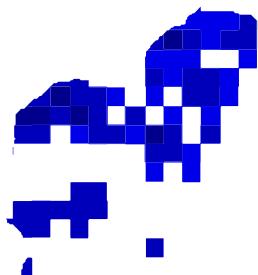


Figura 9.18: Rain Event - 2016-04-12



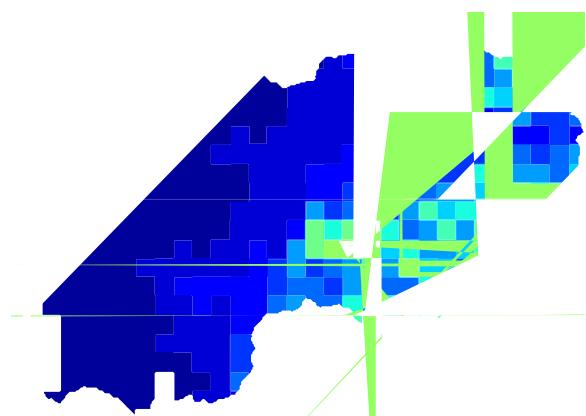


Figura 9.19: Rain Event - 2016-03-06

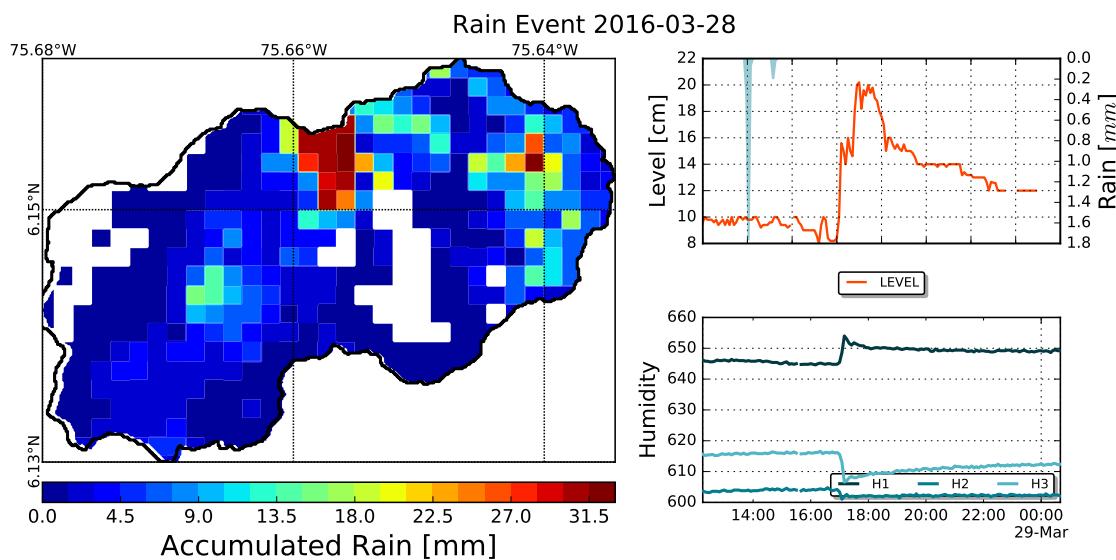


Figura 9.20: Rain Event - 2016-03-28



Figura 9.21: Rain Event - 2016-04-01



Figura 9.22: Rain Event - 2016-04-12

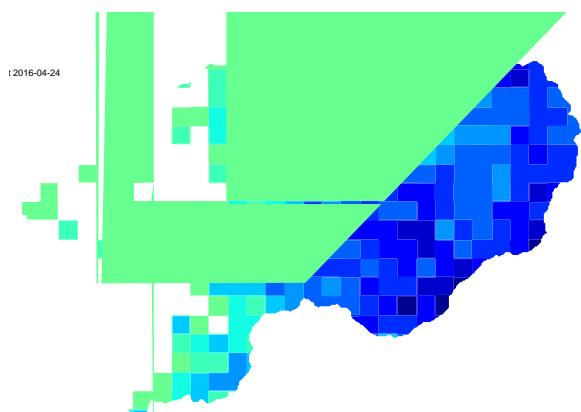


Figura 9.23: Rain Event - 2016-04-24

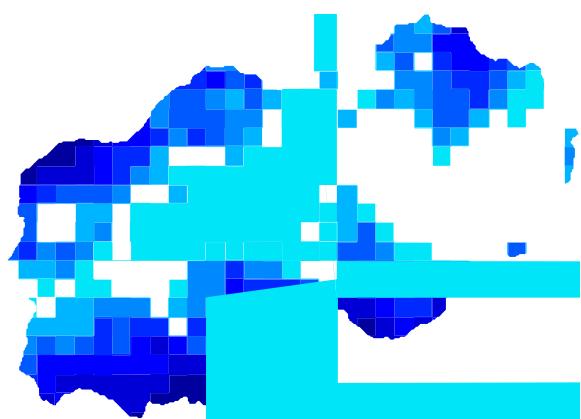


Figura 9.24: Rain Event - 2016-05-01

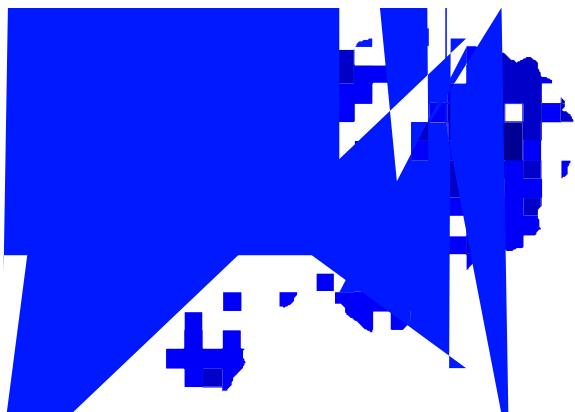


Figura 9.25: Rain Event - 2016-05-06

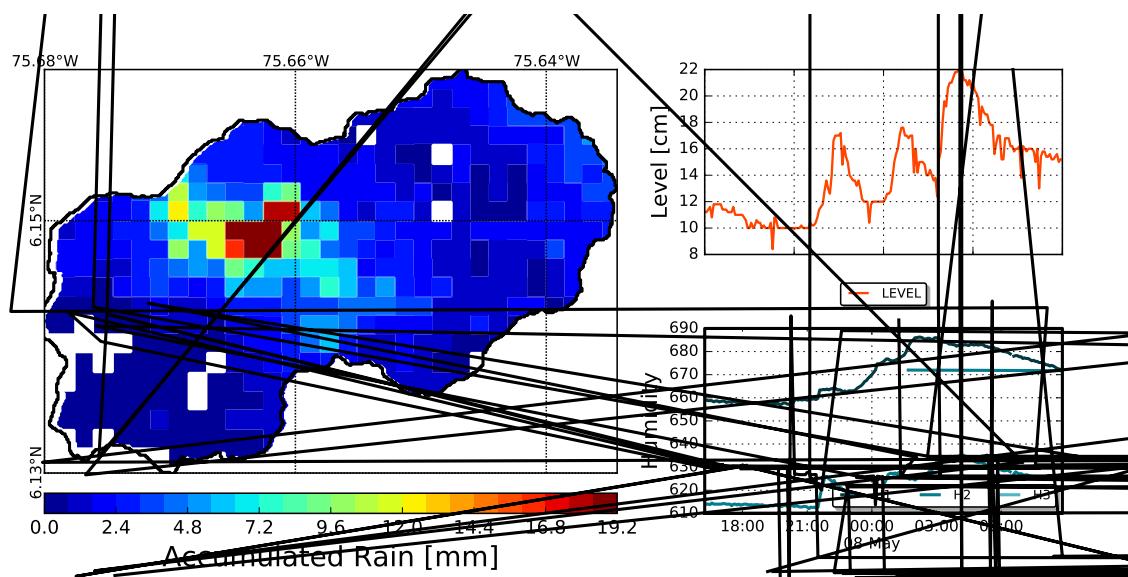


Figura 9.26: Rain Event - 2016-05-07

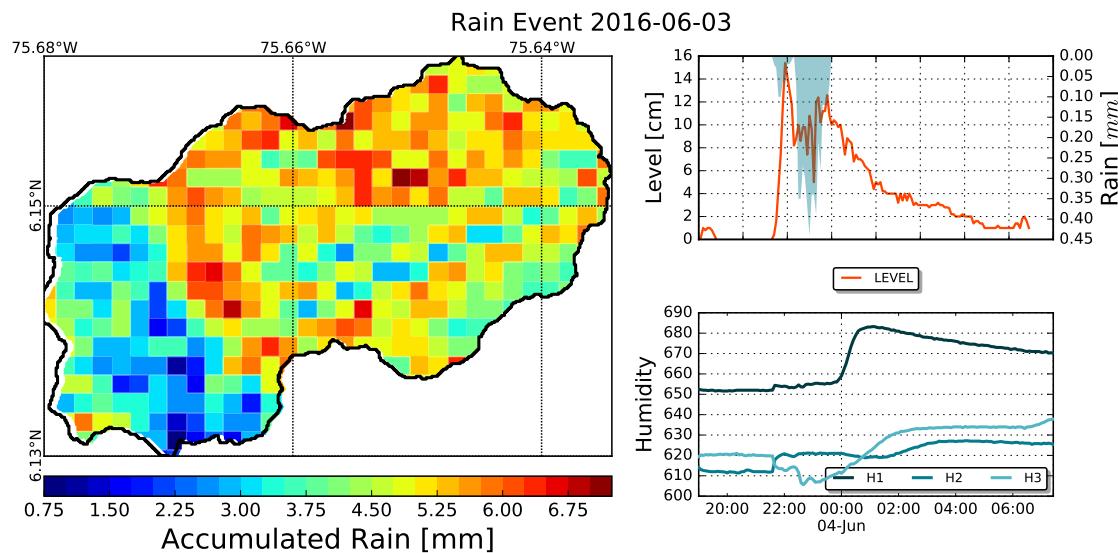


Figura 9.27: Rain Event - 2016-06-03

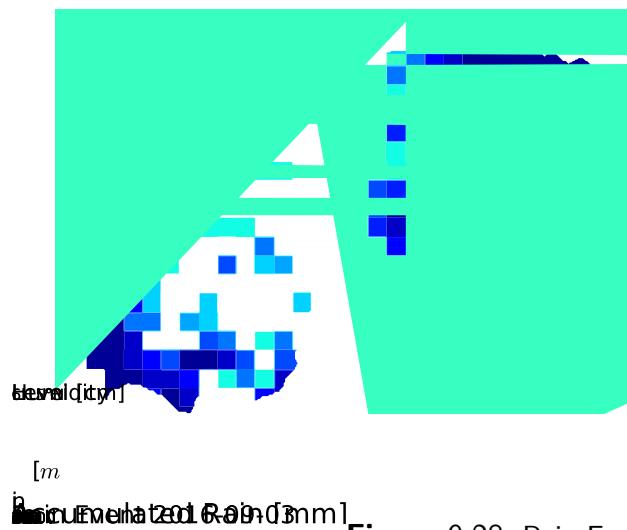


Figura 9.28: Rain Event - 2016-09-03

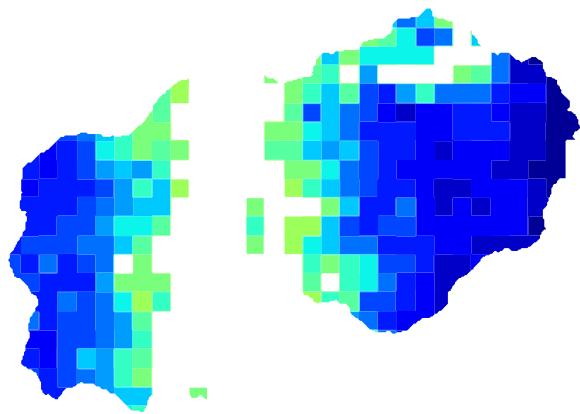


Figura 9.29: Rain Event - 2016-09-14

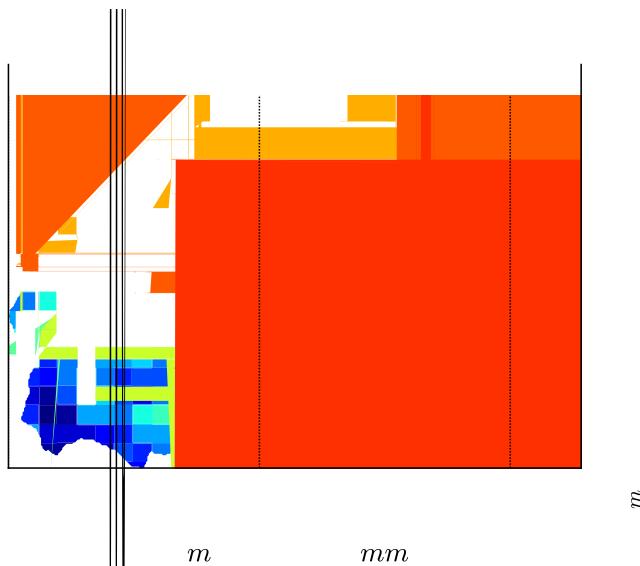


Figura 9.30: Rain Event - 2016-09-22

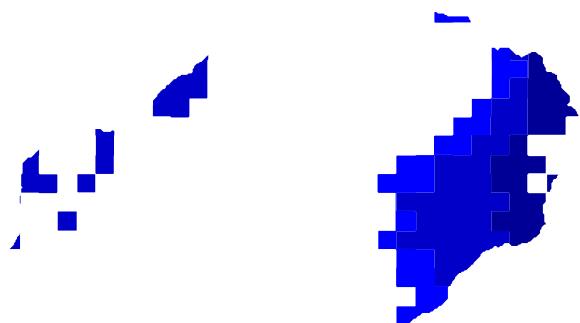


Figura 9.31: Rain Event - 2016-10-06

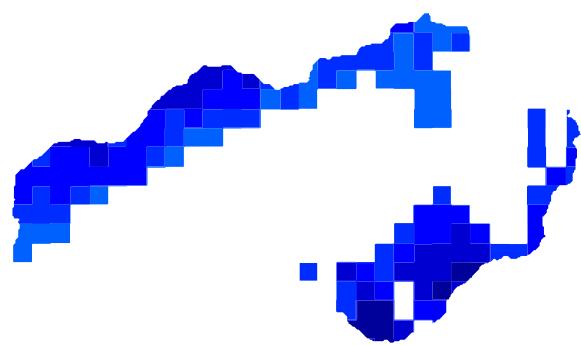
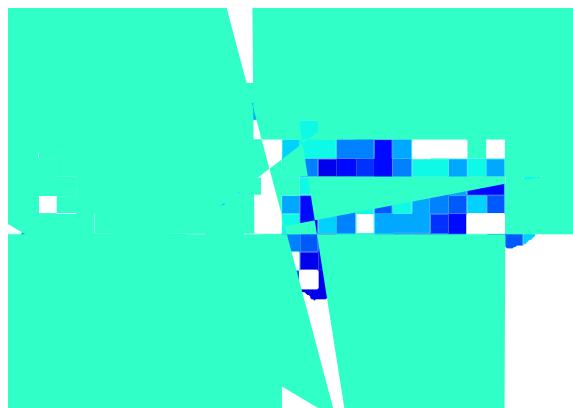


Figura 9.32: Rain Event - 2016-10-17



Hourly Rain [mm]
Accumulated Rain [mm]

Figura 9.33: Rain Event - 2016-10-18

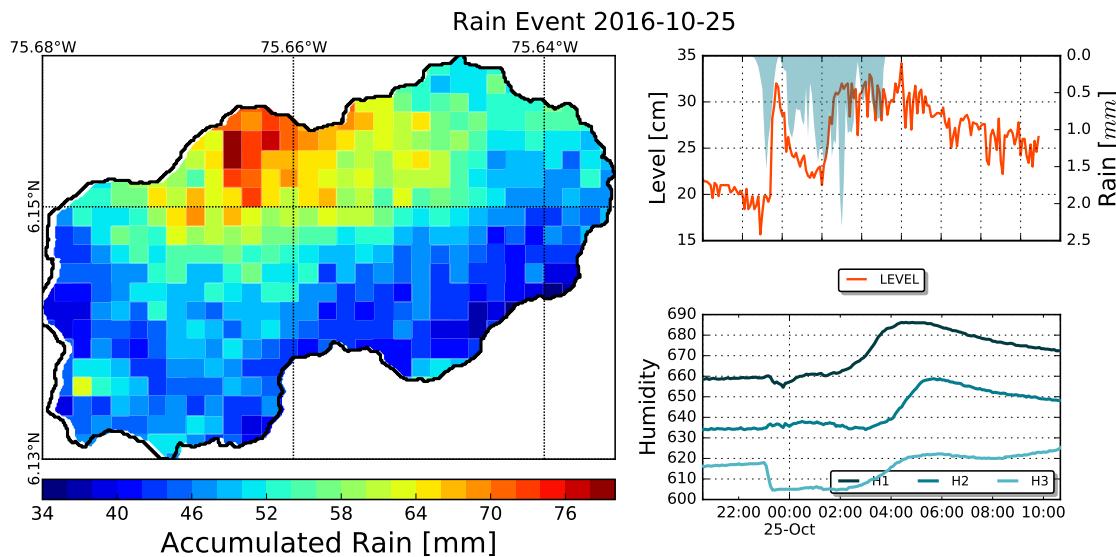


Figura 9.34: Rain Event - 2016-10-25

9.4. Calibración

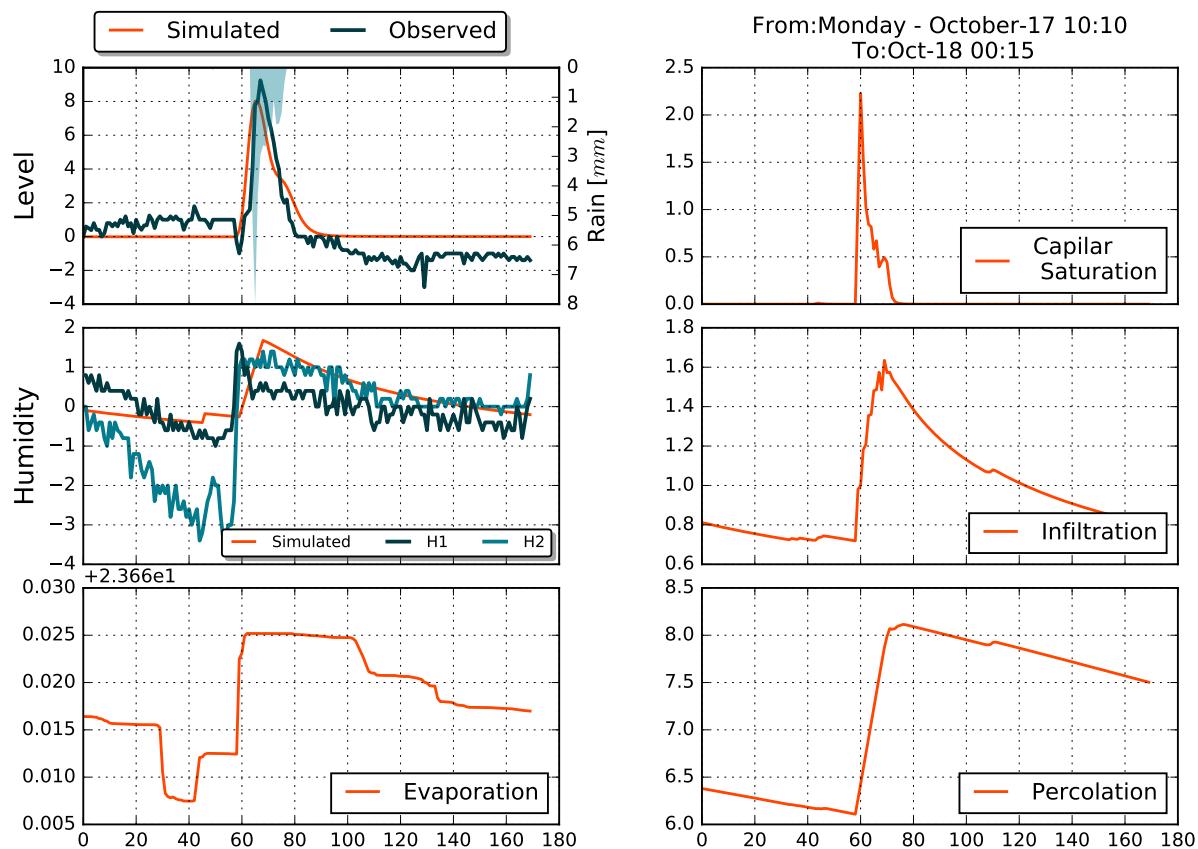


Figura 9.35: Calibración evento 2016-10-17

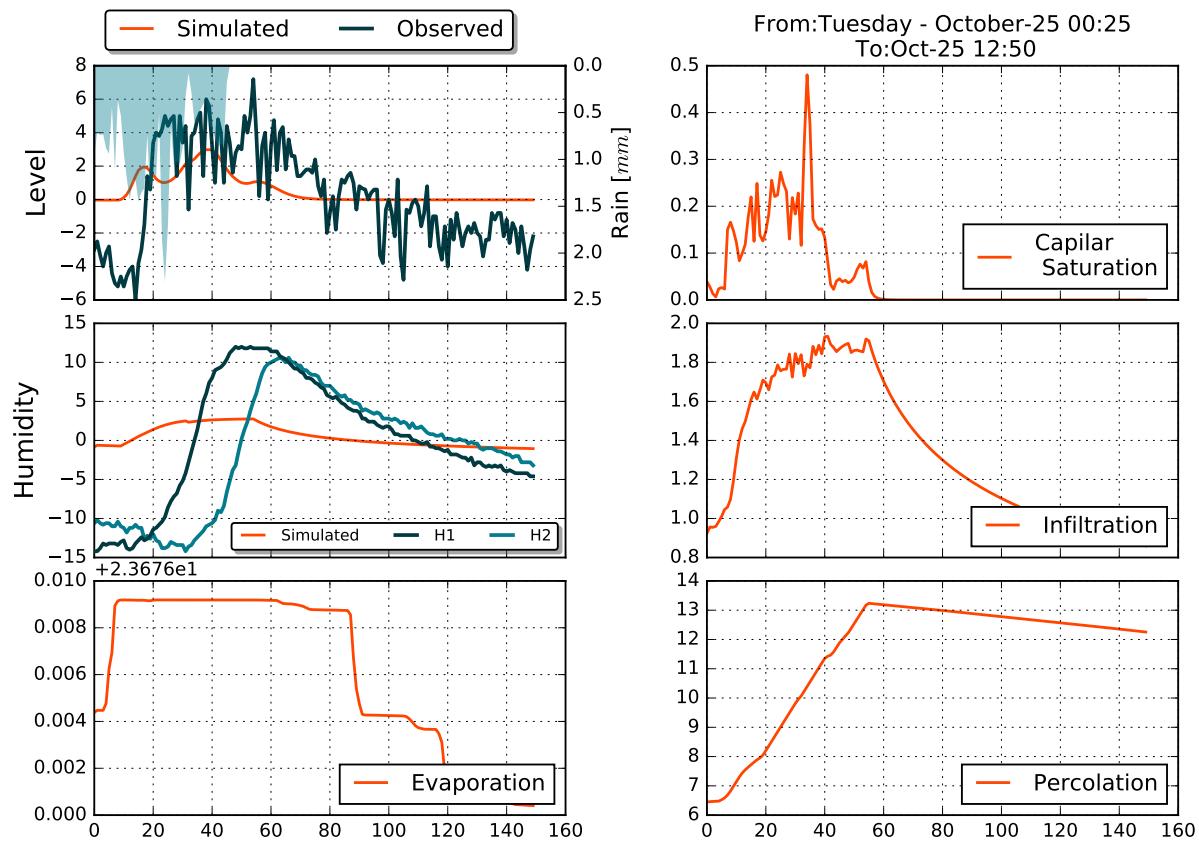


Figura 9.36: Calibración evento 2016-10-24

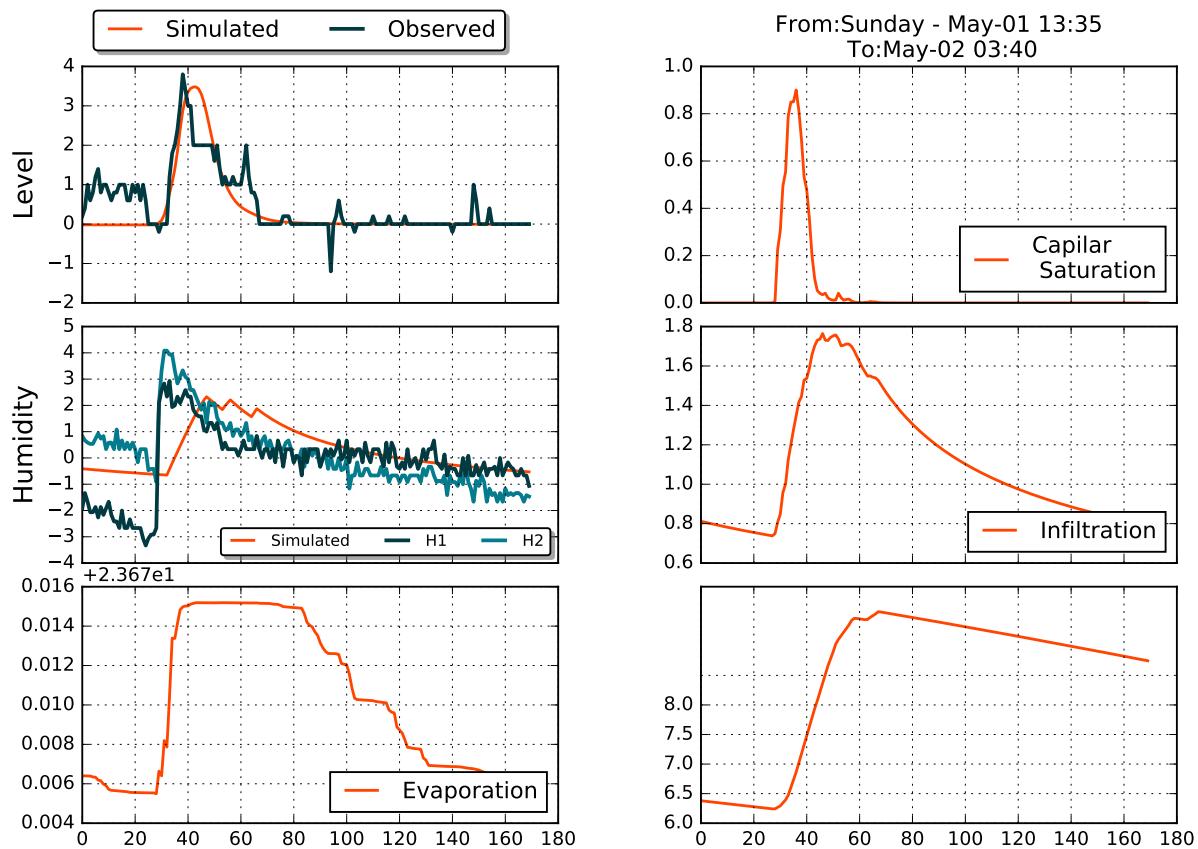


Figura 9.37: Calibración evento 2016-05-01

9.5. Ensayo perturbaciones

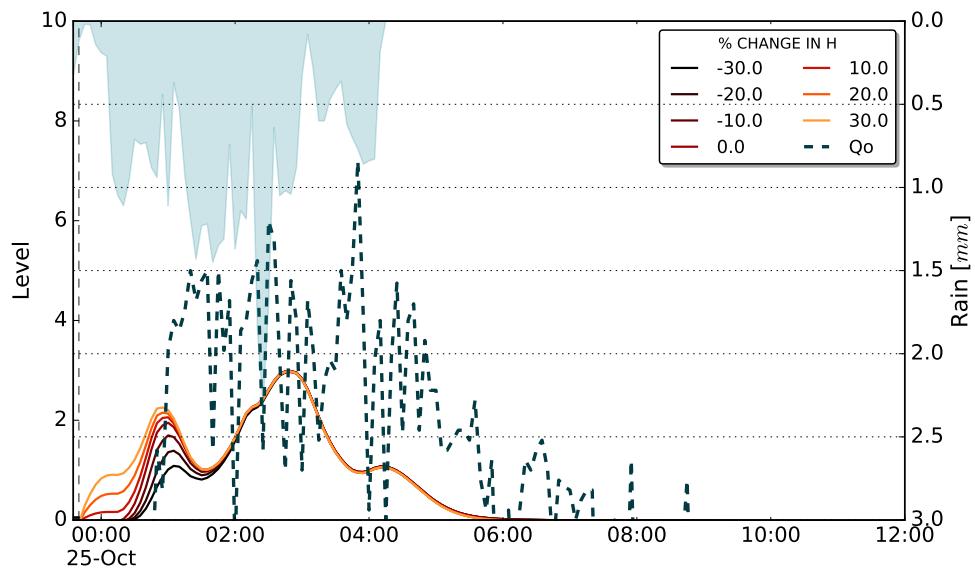


Figura 9.38: Perturbación evento 2016-10-25 1

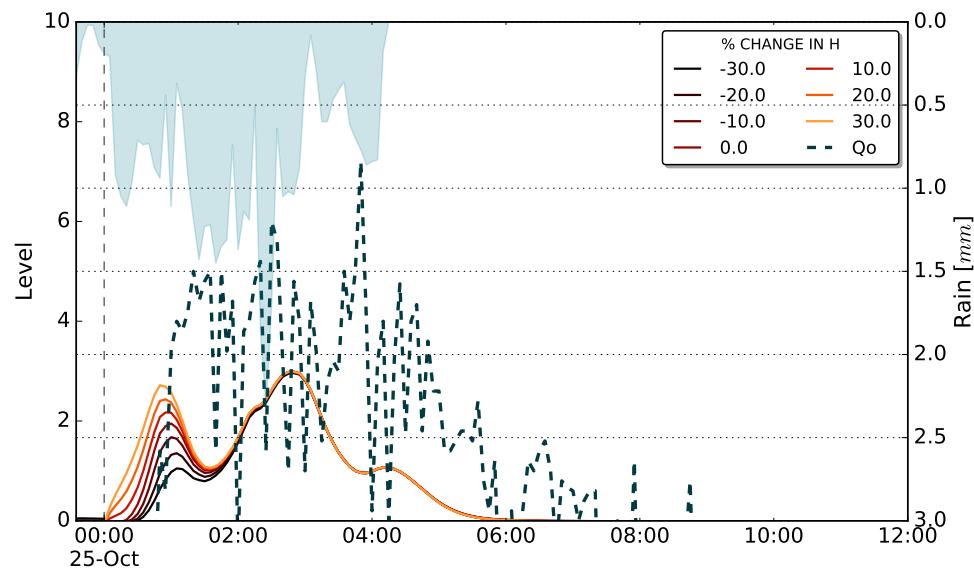


Figura 9.39: Perturbación evento 2016-10-25 5

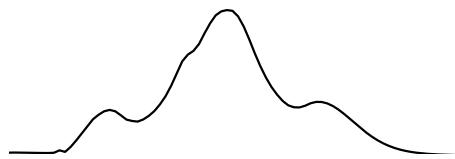


Figura 9.40: Perturbación evento 2016-10-25 9

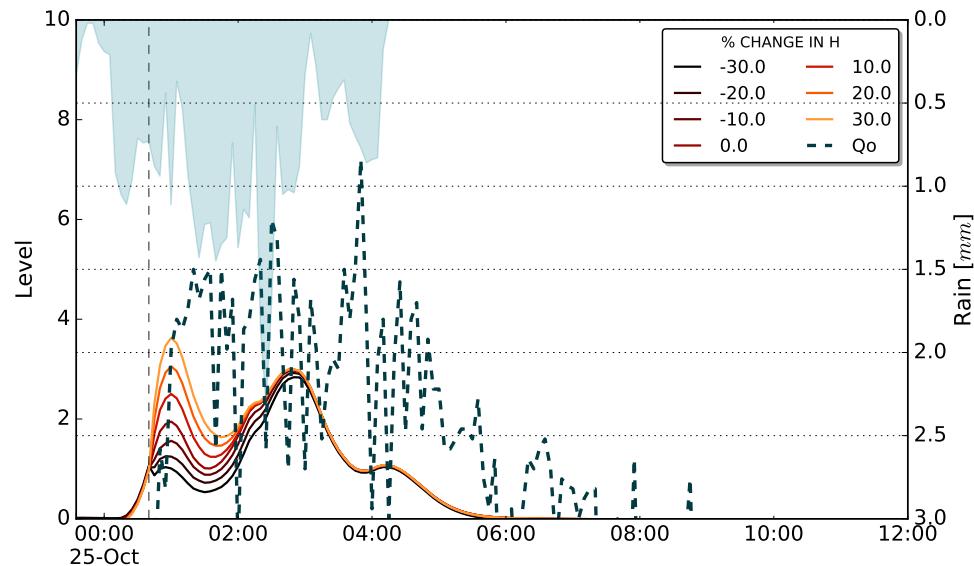


Figura 9.41: Perturbación evento 2016-10-25 13



Figura 9.42: Perturbación evento 2016-10-25 17

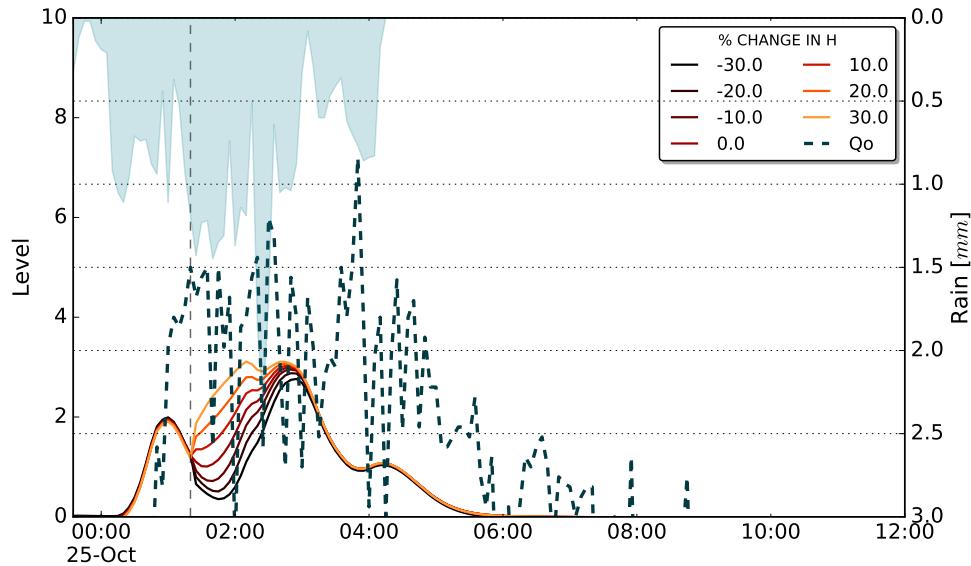


Figura 9.43: Perturbación evento 2016-10-25 21

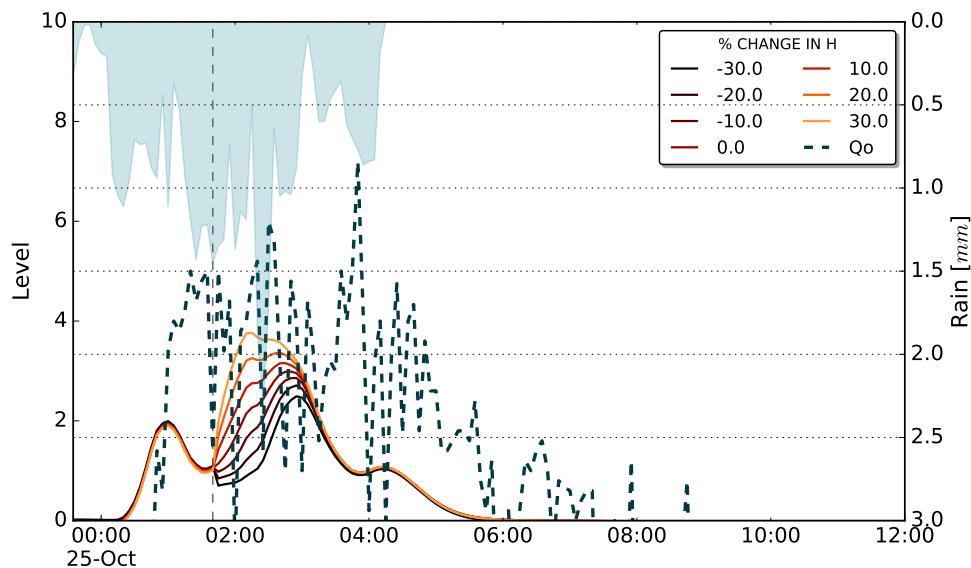


Figura 9.44: Perturbación evento 2016-10-25 25

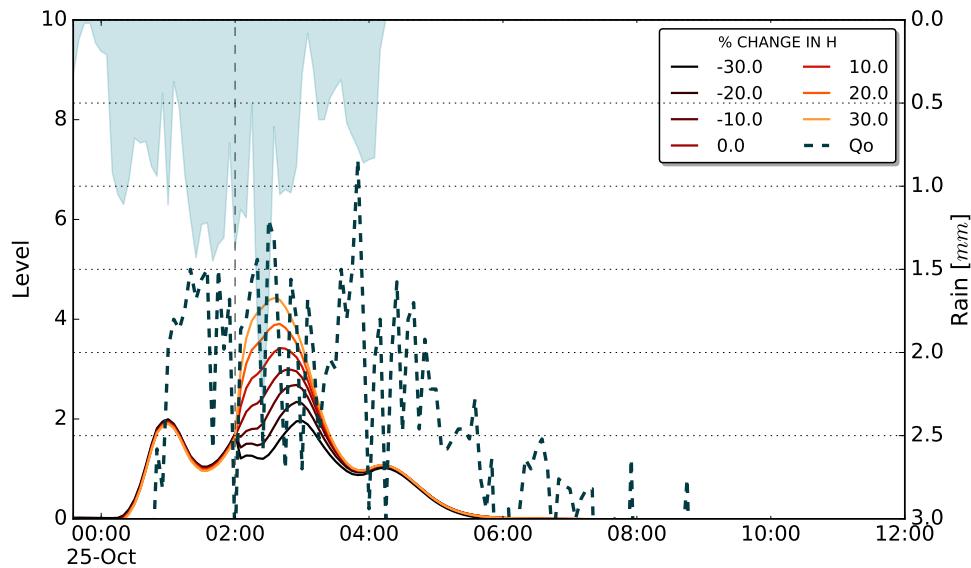


Figura 9.45: Perturbación evento 2016-10-25 29

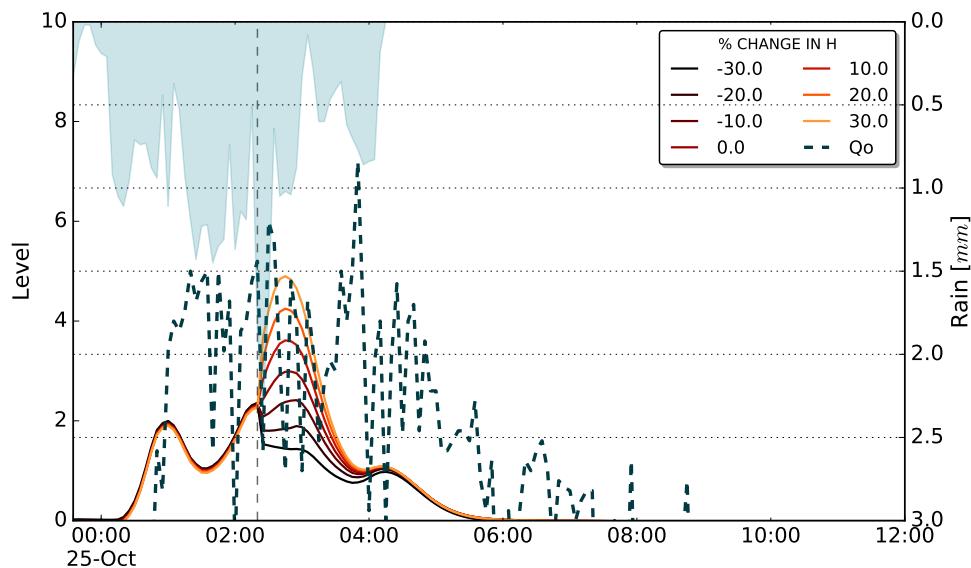


Figura 9.46: Perturbación evento 2016-10-25 33

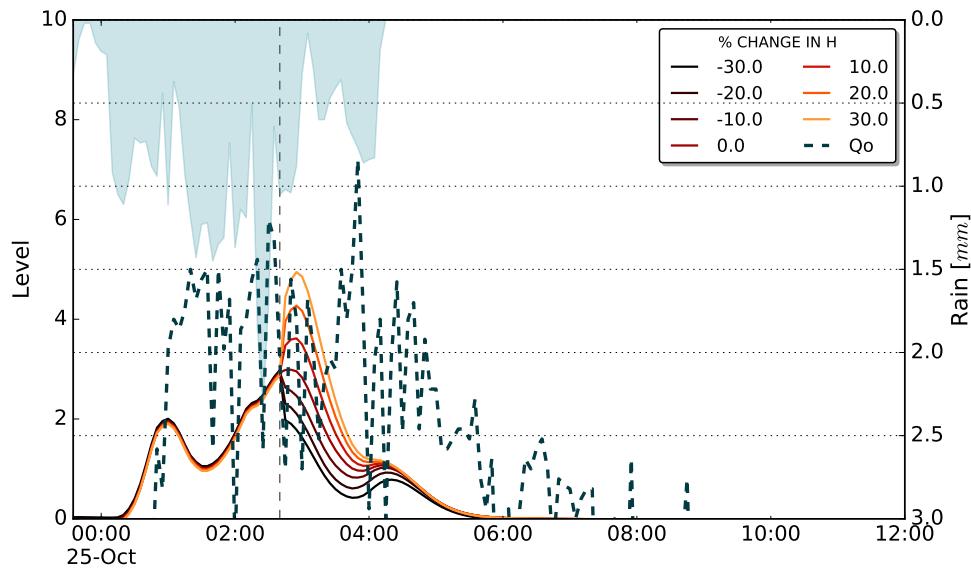


Figura 9.47: Perturbación evento 2016-10-25 37

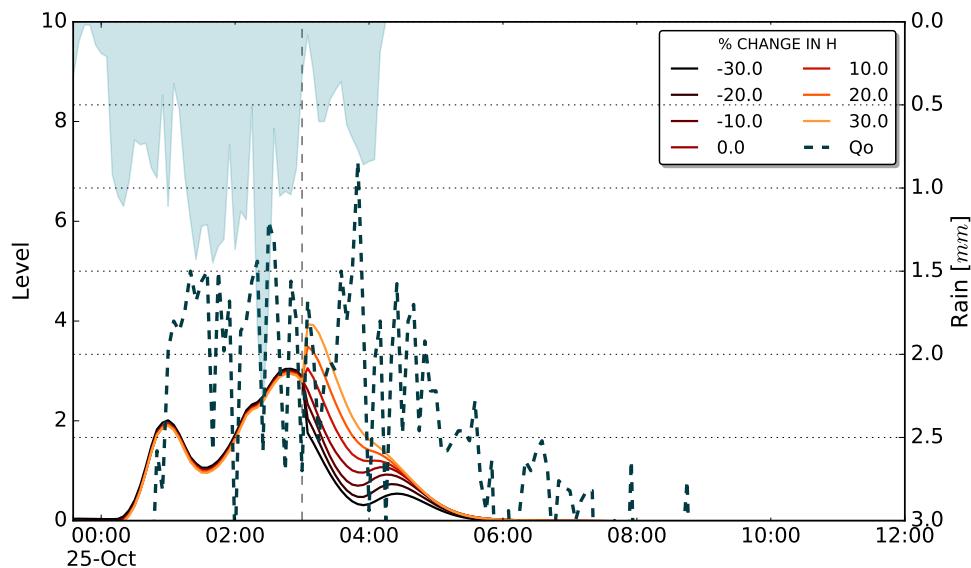


Figura 9.48: Perturbación evento 2016-10-25 41

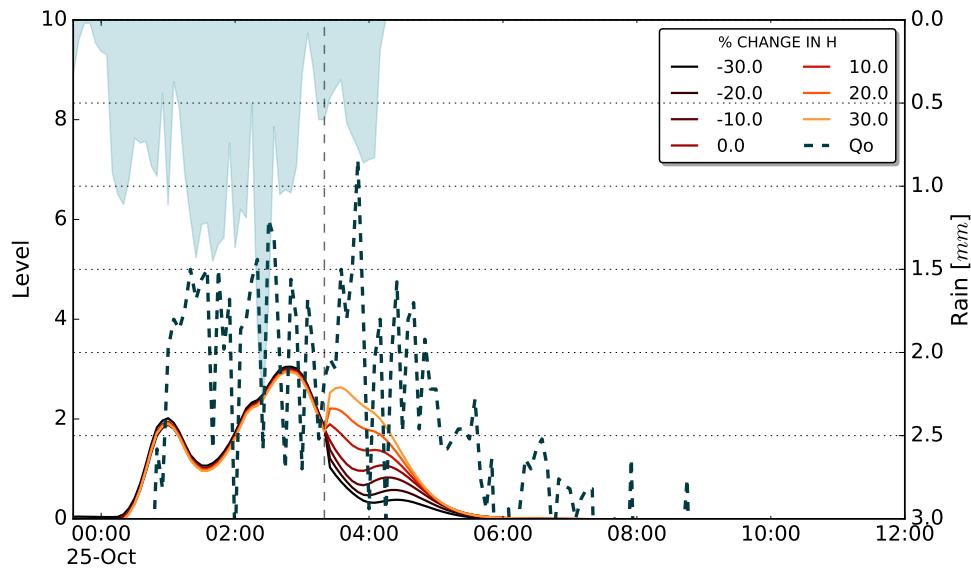


Figura 9.49: Perturbación evento 2016-10-25 45

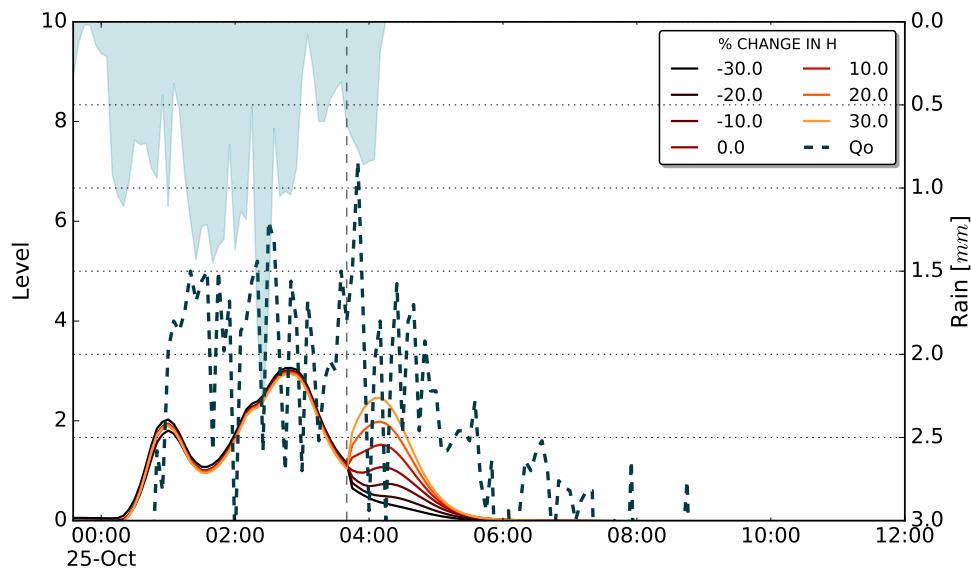


Figura 9.50: Perturbación evento 2016-10-25 49

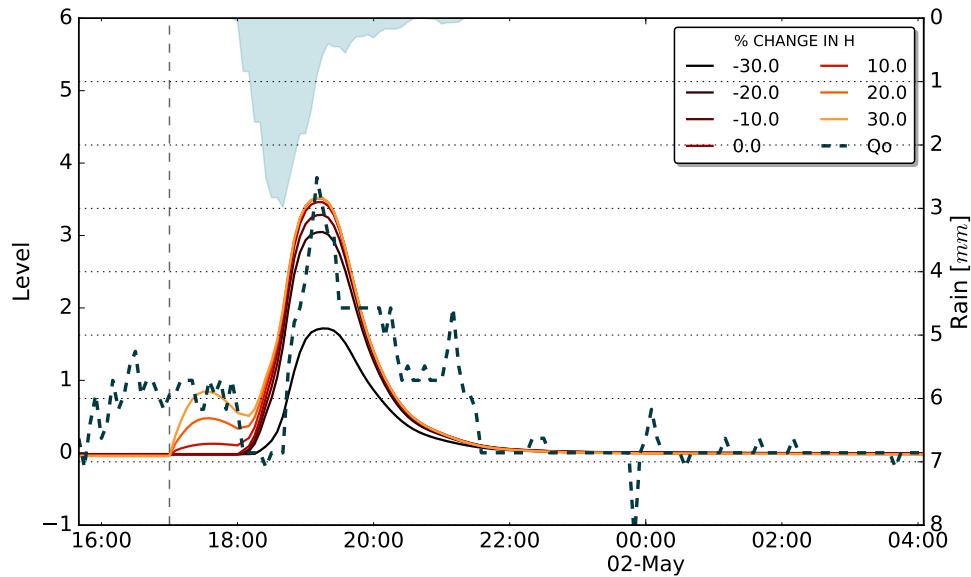


Figura 9.51: Perturbación evento 2016-05-01 1

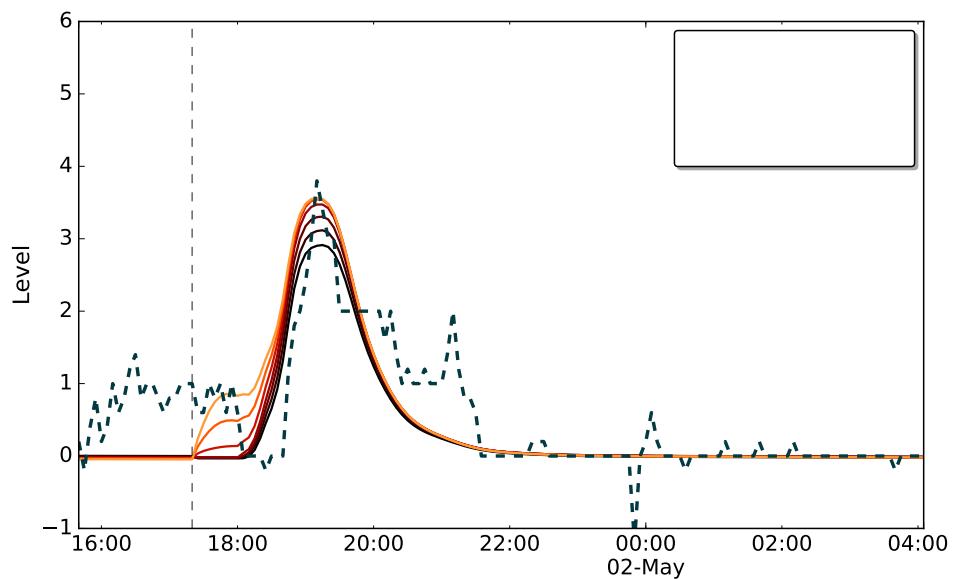


Figura 9.52: Perturbación evento 2016-05-01 5

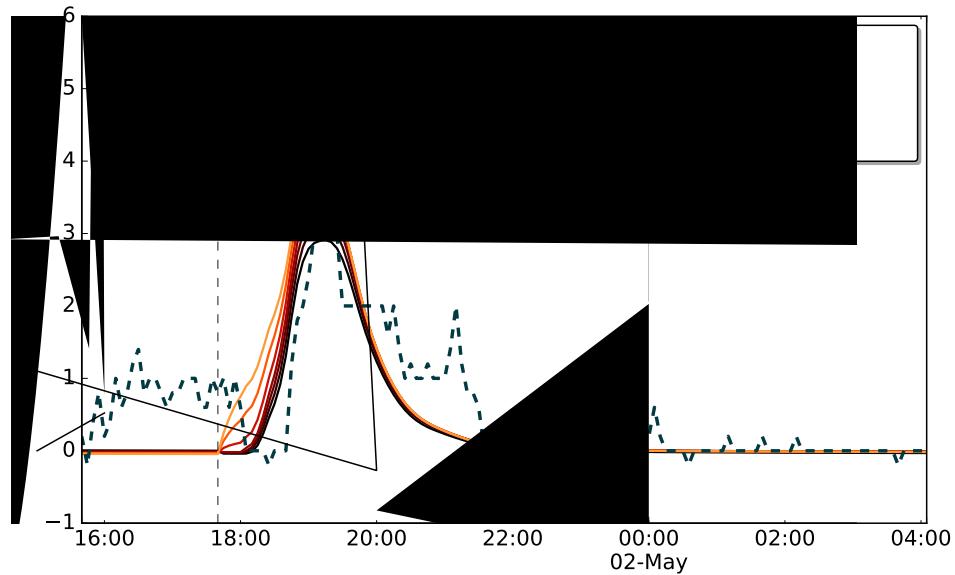


Figura 9.53: Perturbación evento 2016-05-01 9

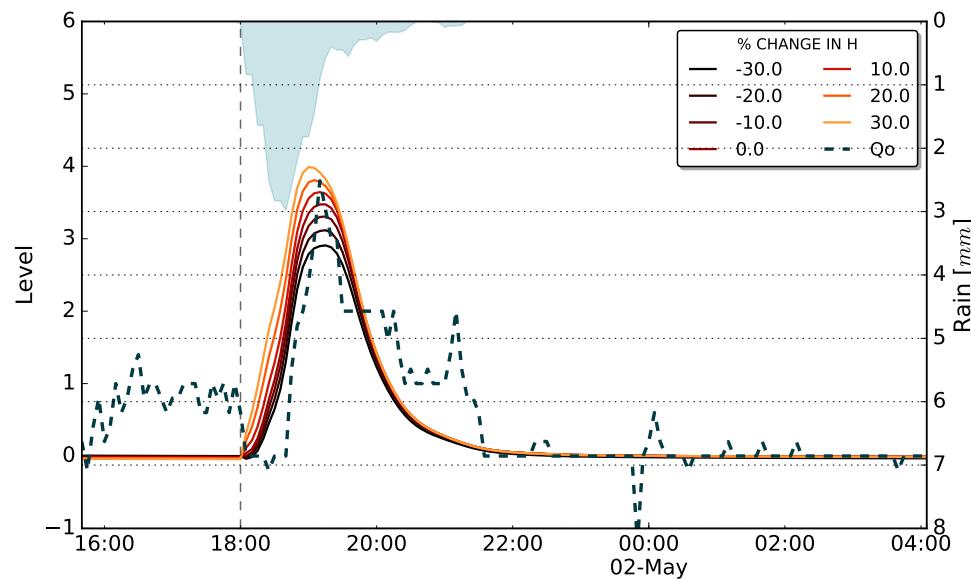


Figura 9.54: Perturbación evento 2016-05-01 13

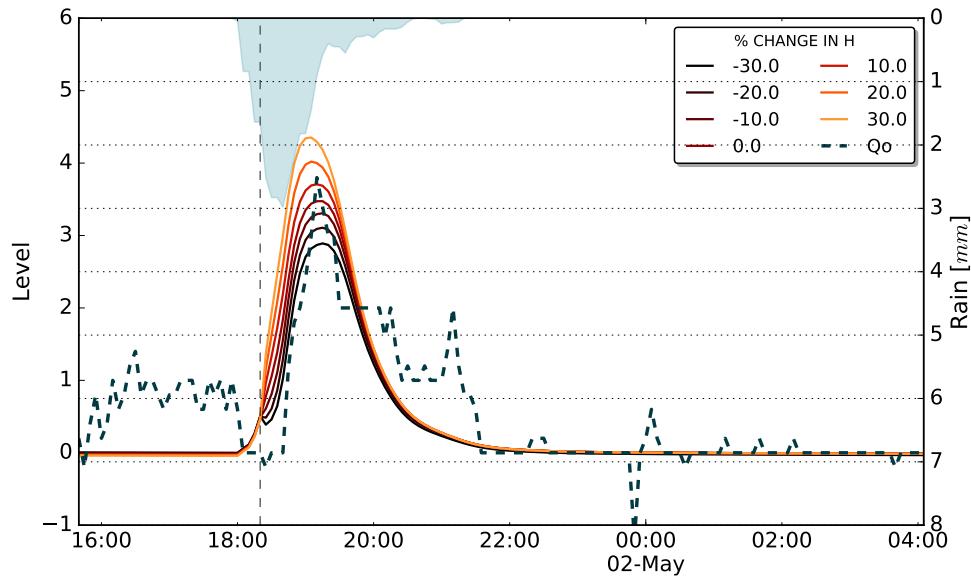


Figura 9.55: Perturbación evento 2016-05-01 17

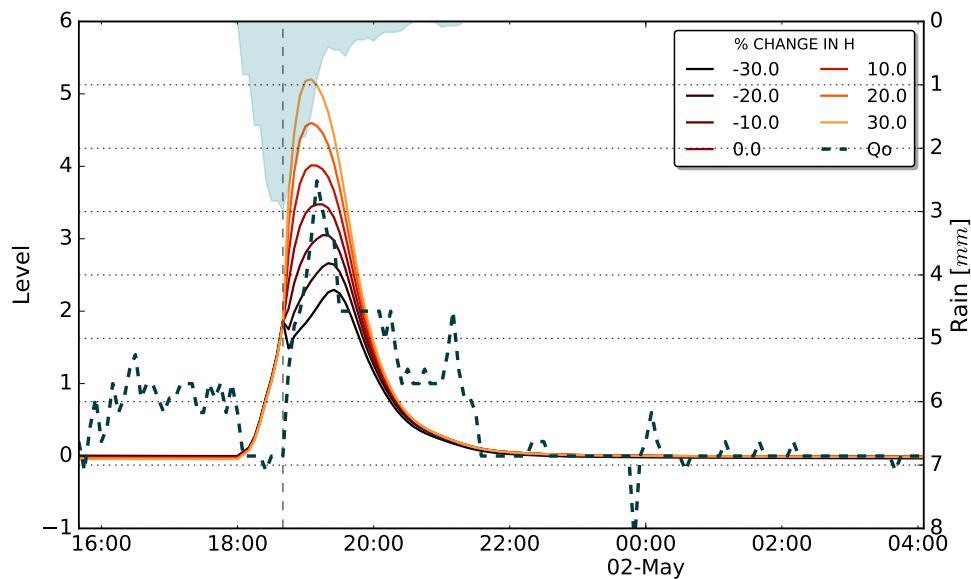


Figura 9.56: Perturbación evento 2016-05-01 21

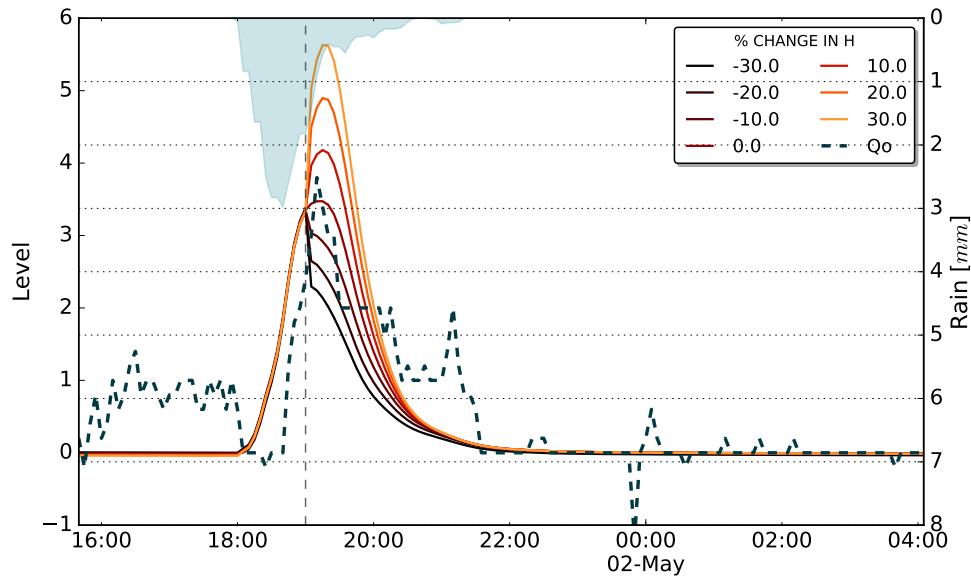


Figura 9.57: Perturbación evento 2016-05-01 25

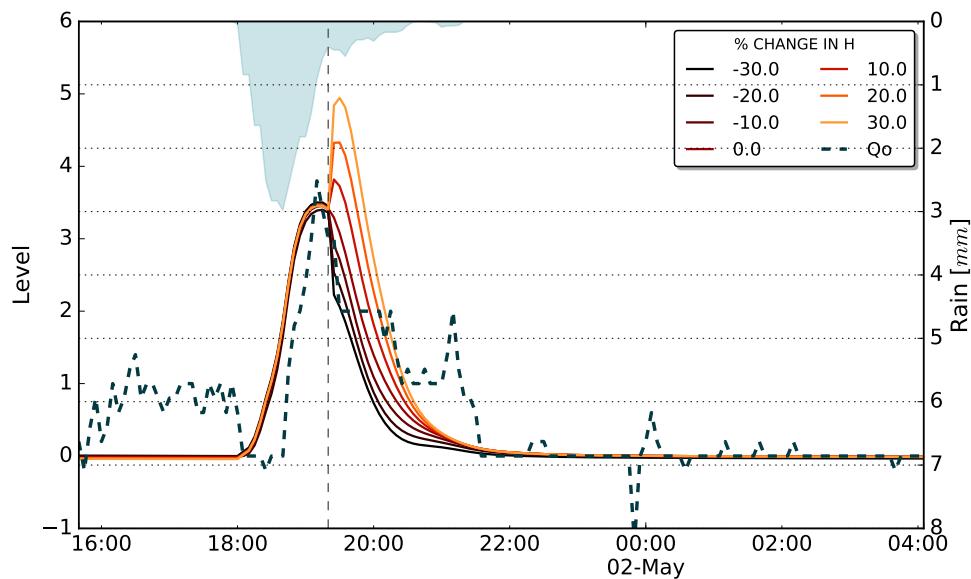


Figura 9.58: Perturbación evento 2016-05-01 29

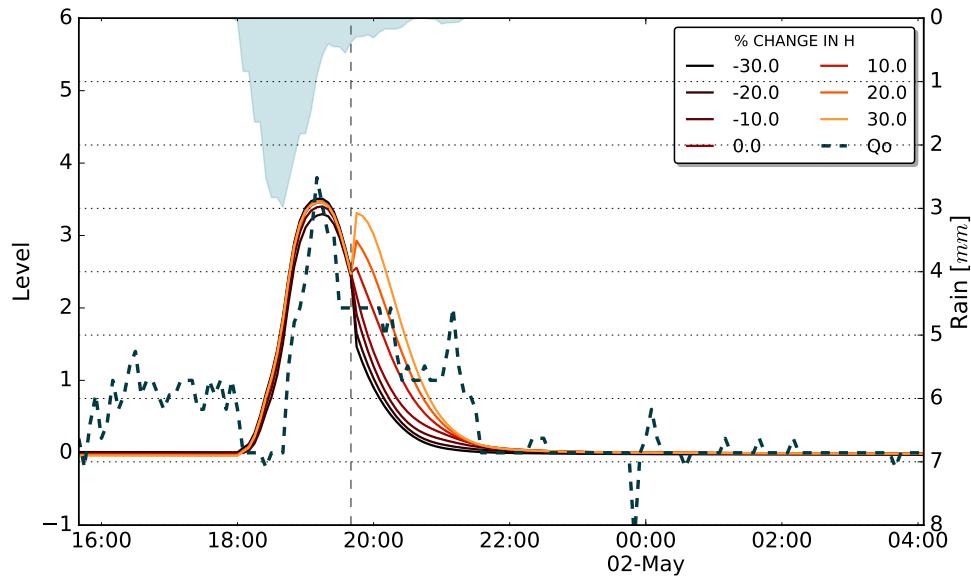


Figura 9.59: Perturbación evento 2016-05-01 33

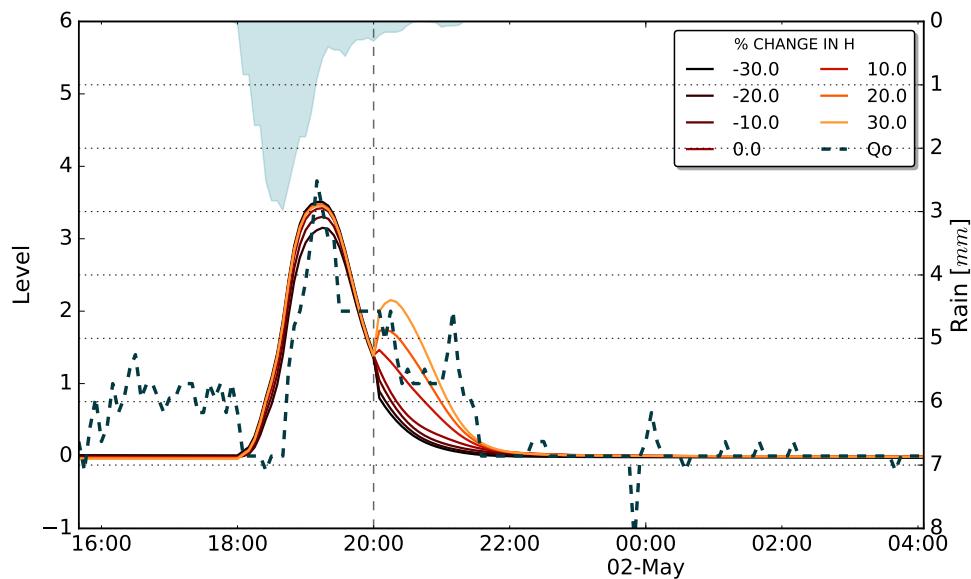


Figura 9.60: Perturbación evento 2016-05-01 37

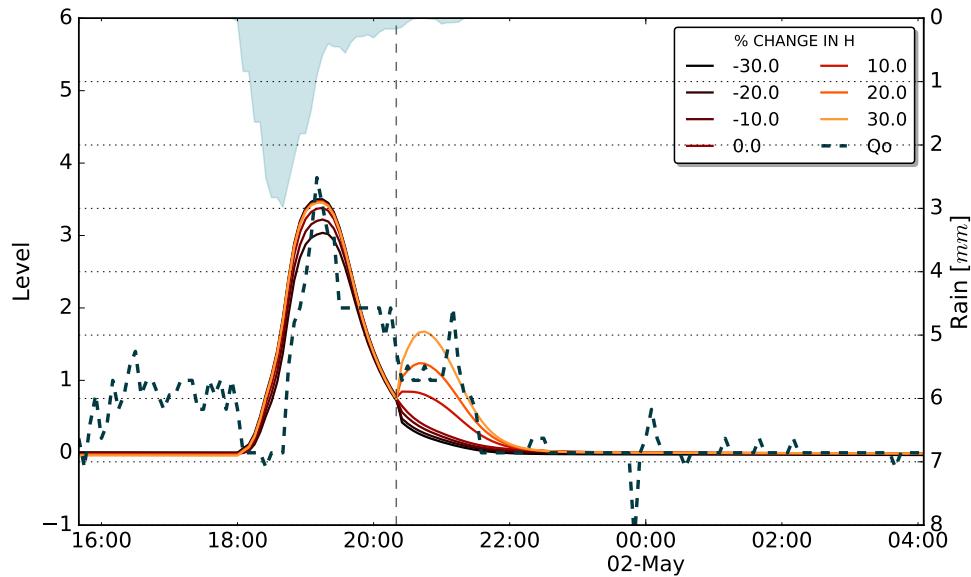


Figura 9.61: Perturbación evento 2016-05-01 41

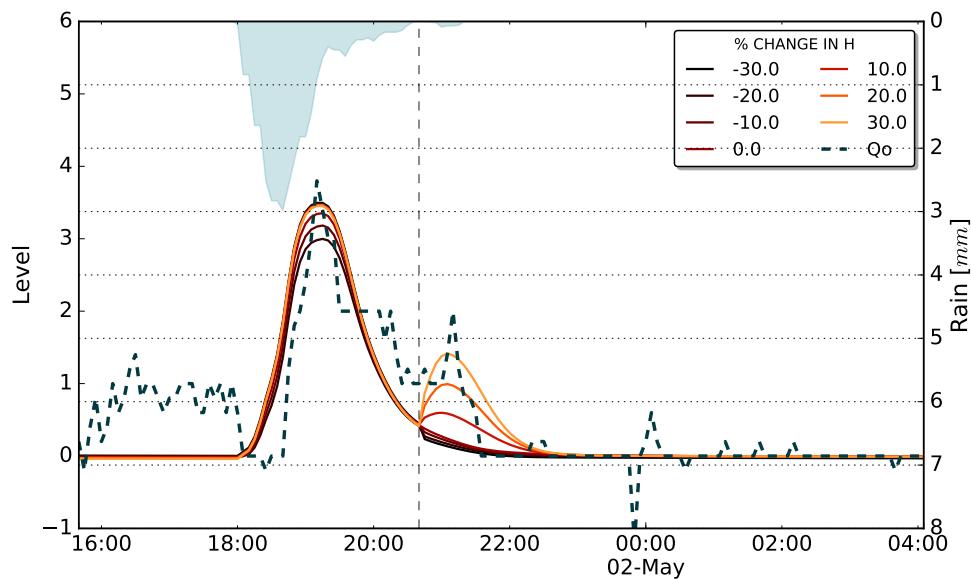


Figura 9.62: Perturbación evento 2016-05-01 45

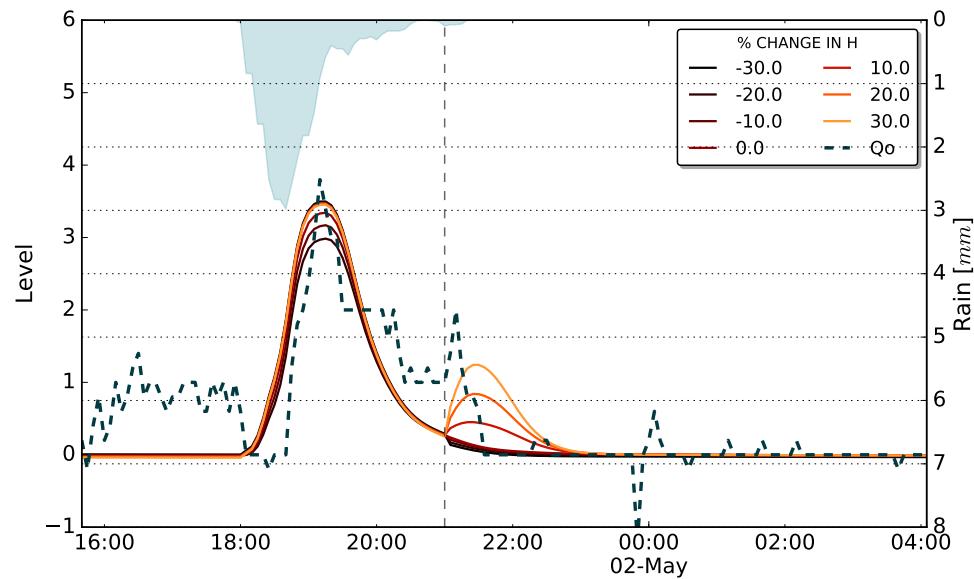


Figura 9.63: Perturbación evento 2016-05-01 49

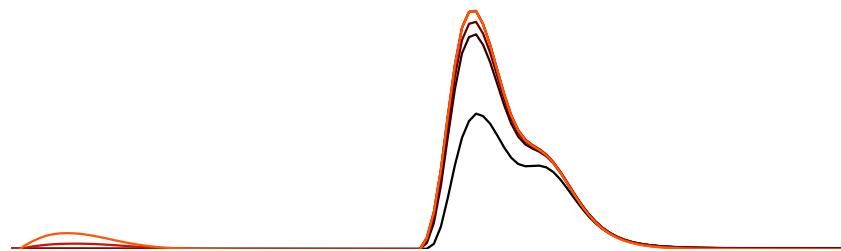
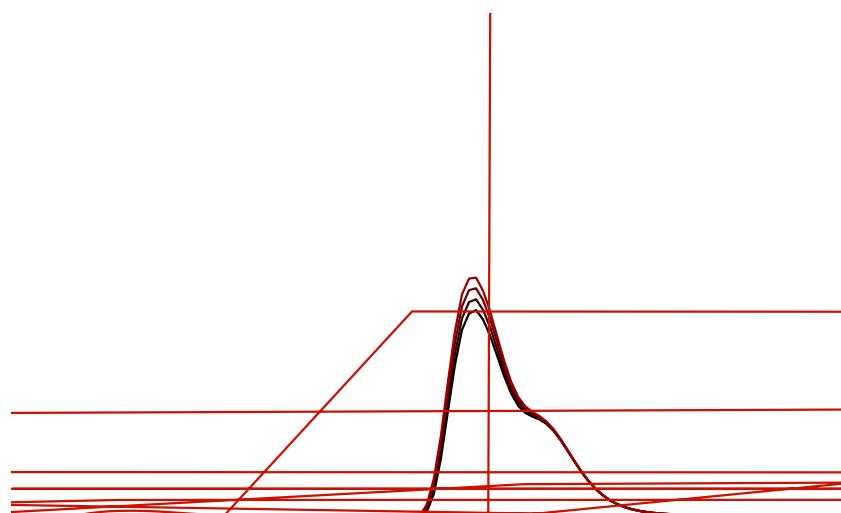
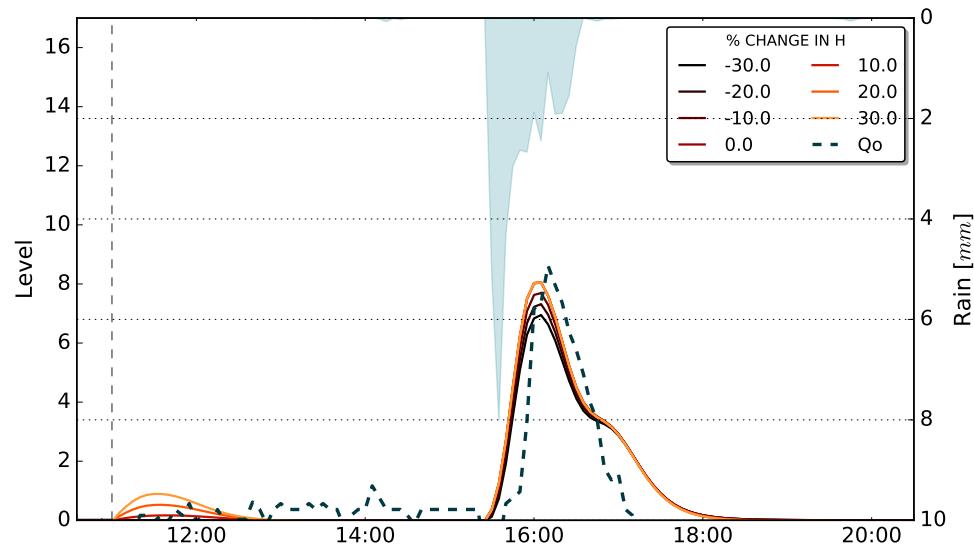


Figura 9.64: Perturbación evento 2016-10-17 1



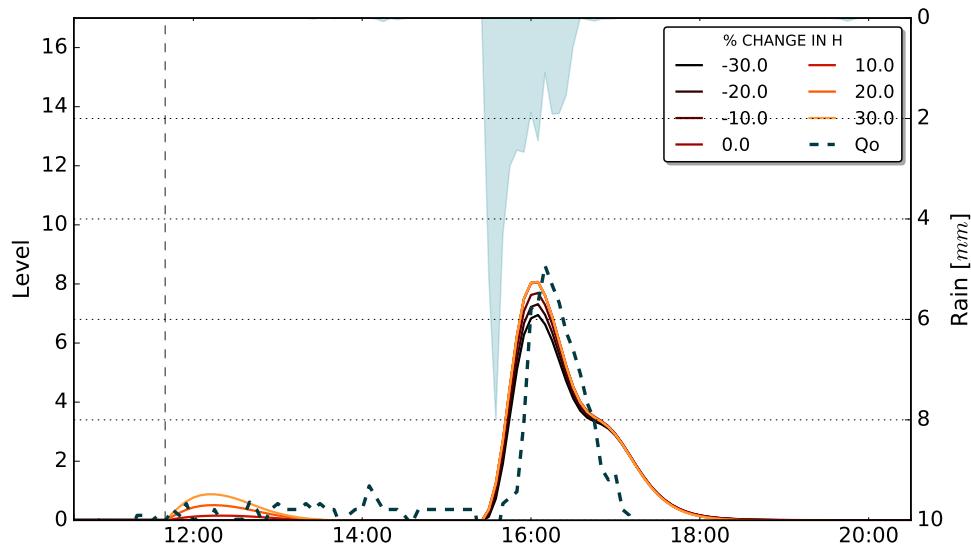


Figura 9.67: Perturbación evento 2016-10-17 13

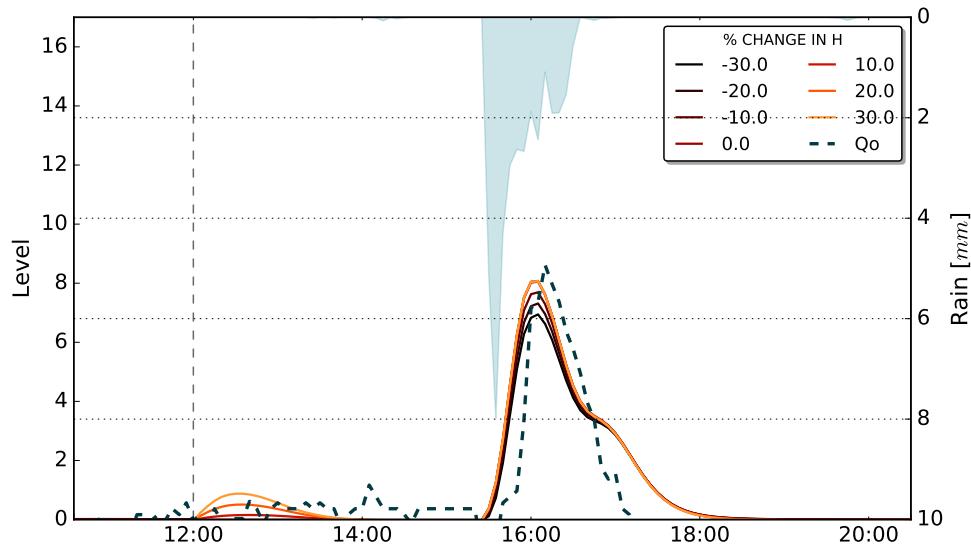


Figura 9.68: Perturbación evento 2016-10-17 17

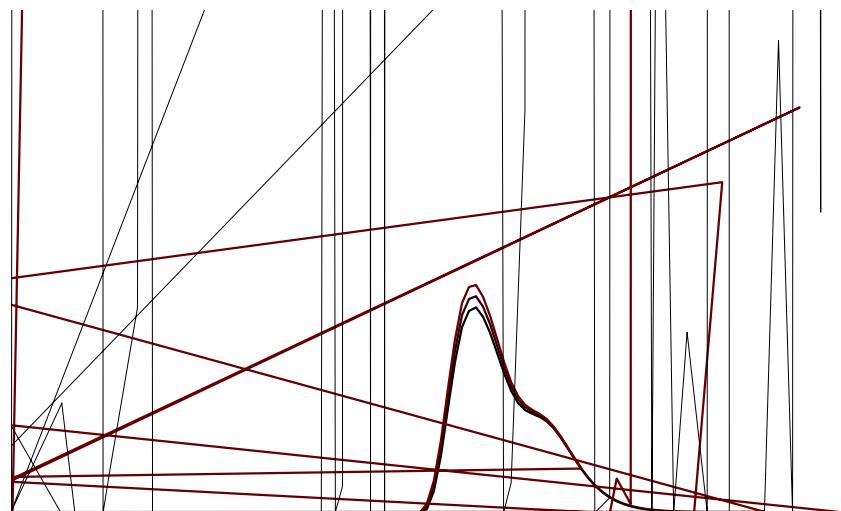


Figura 9.69: Perturbación evento 2016-10-17 21

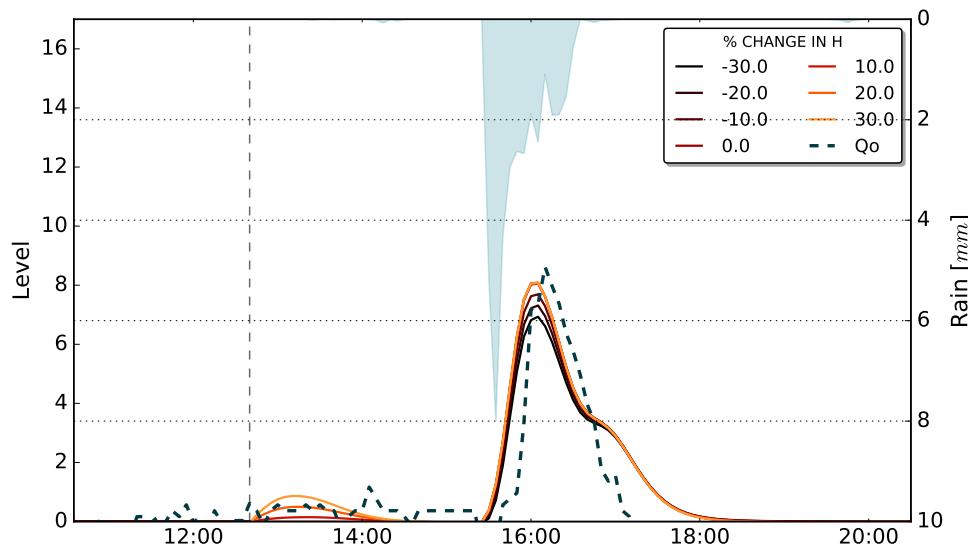


Figura 9.70: Perturbación evento 2016-10-17 25

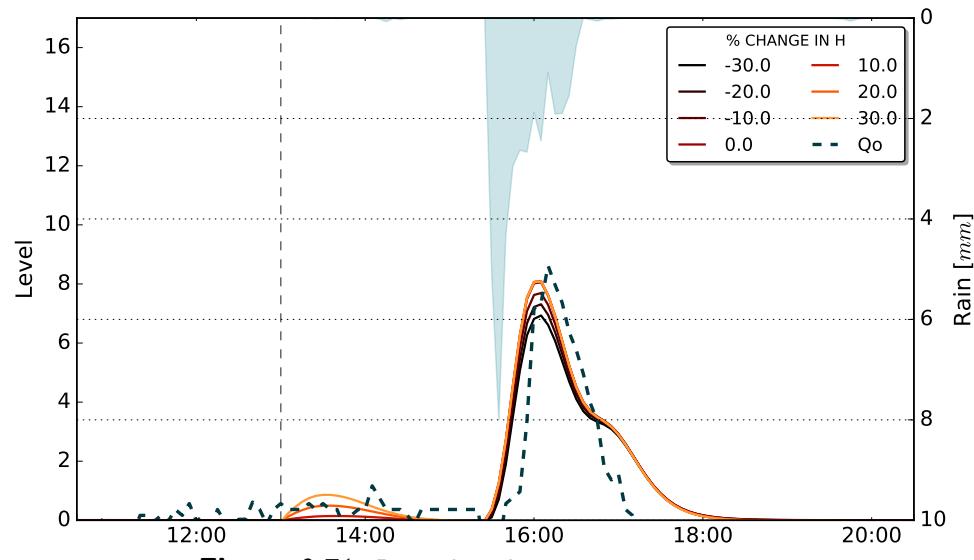


Figura 9.71: Perturbación evento 2016-10-17 29

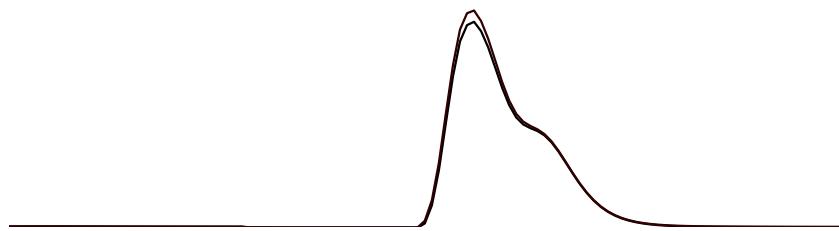


Figura 9.72: Perturbación evento 2016-10-17 33

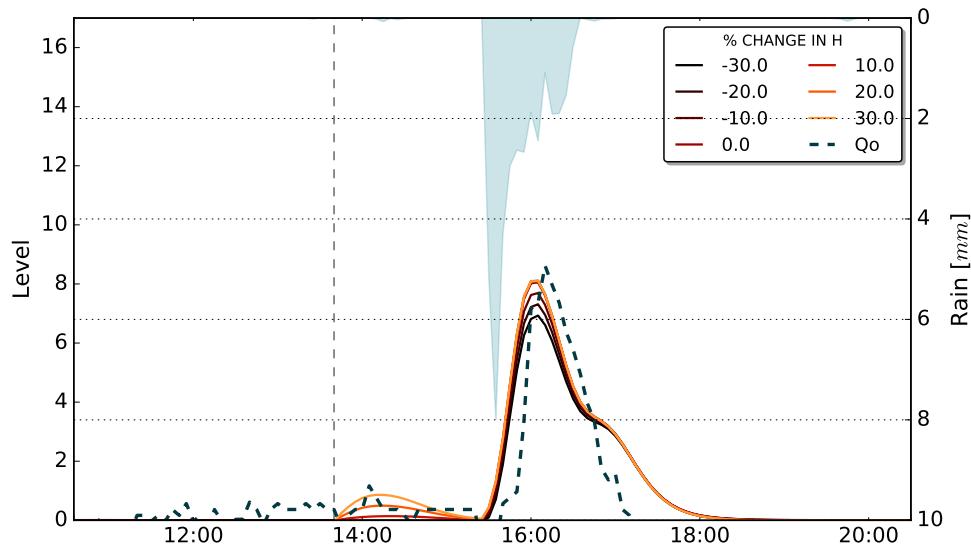


Figura 9.73: Perturbación evento 2016-10-17 37

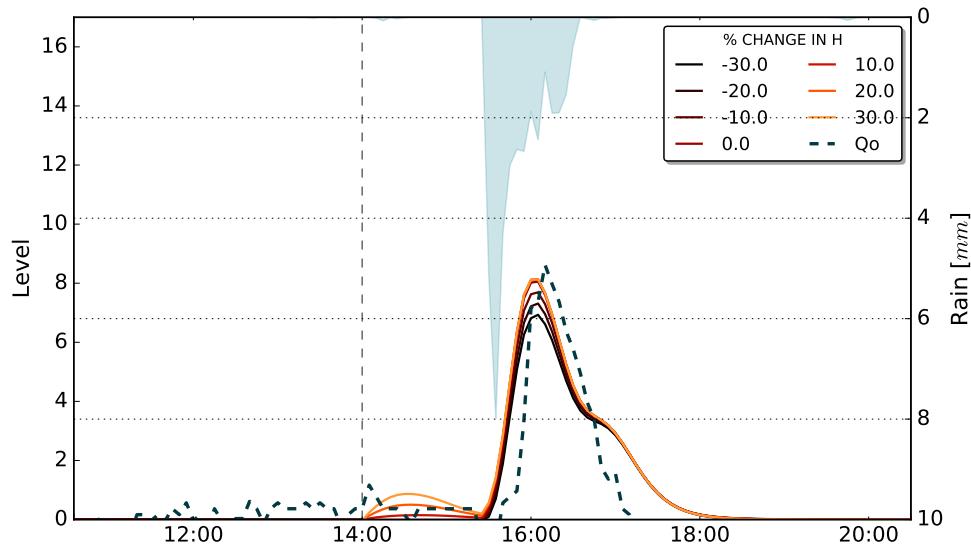
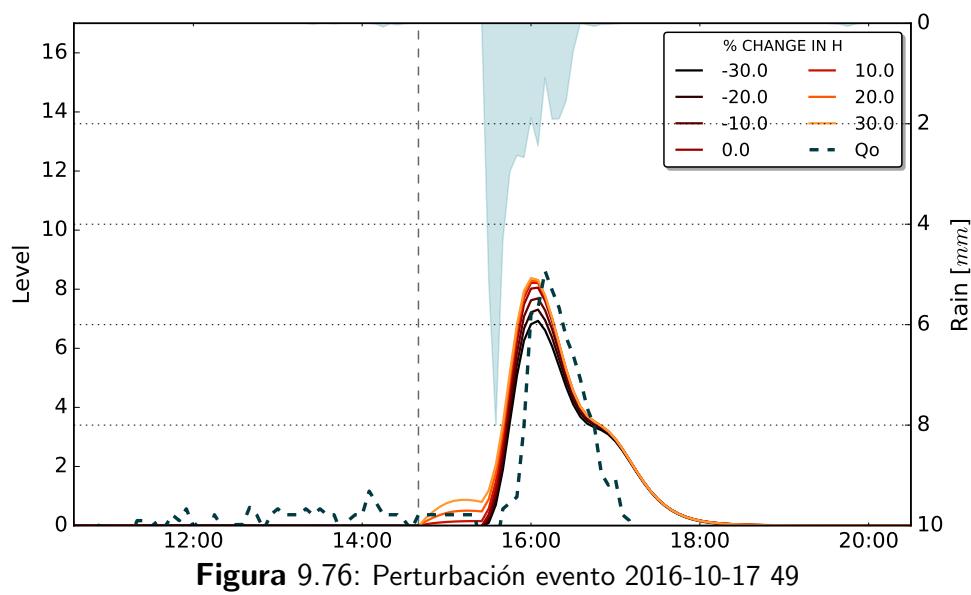
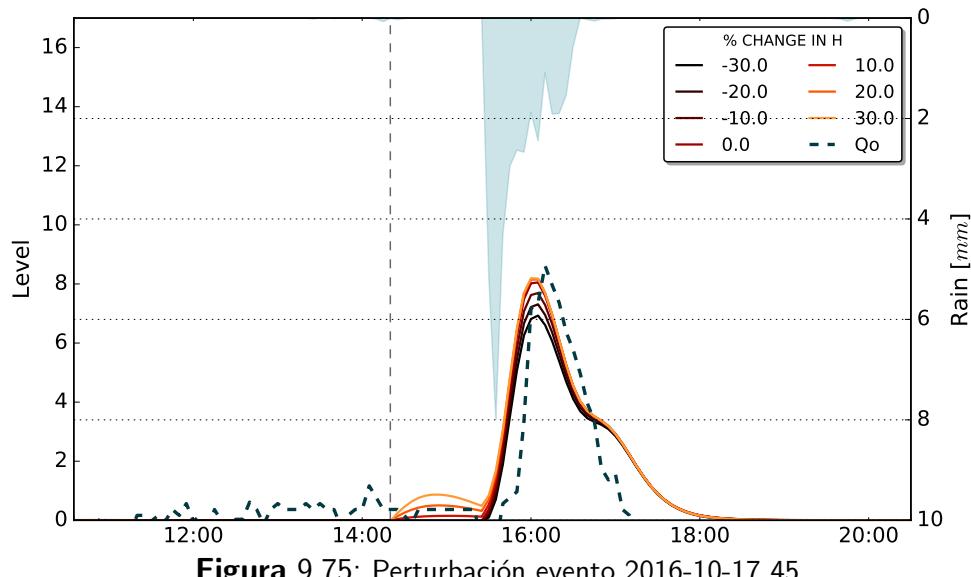


Figura 9.74: Perturbación evento 2016-10-17 41



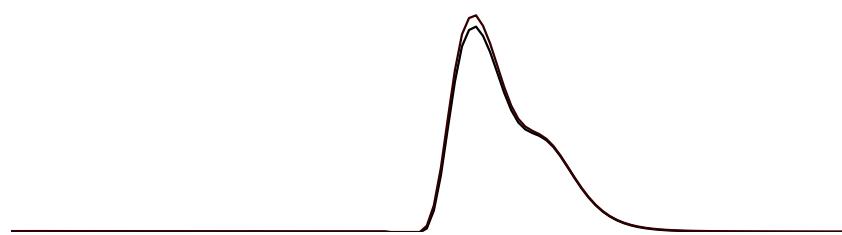


Figura 9.77: Perturbación evento 2016-10-17 53

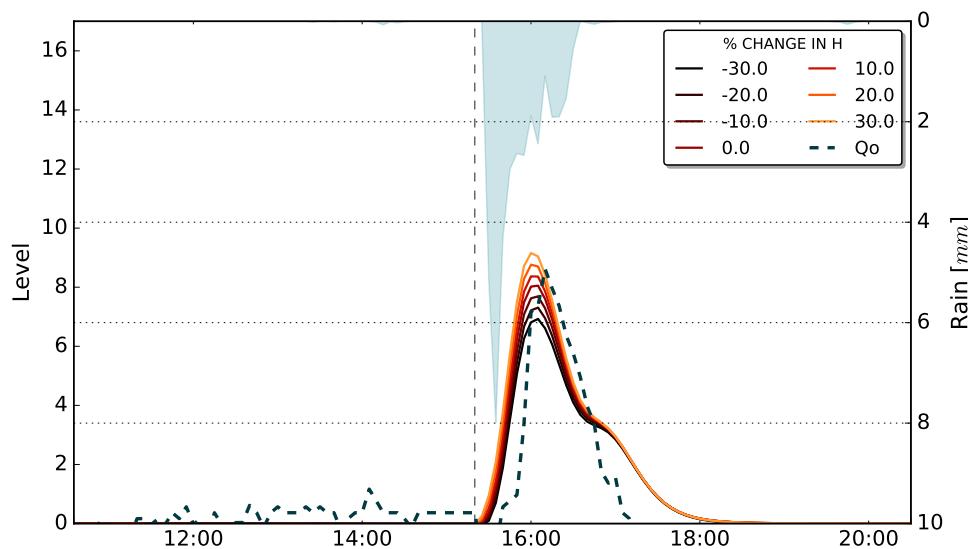


Figura 9.78: Perturbación evento 2016-10-17 57

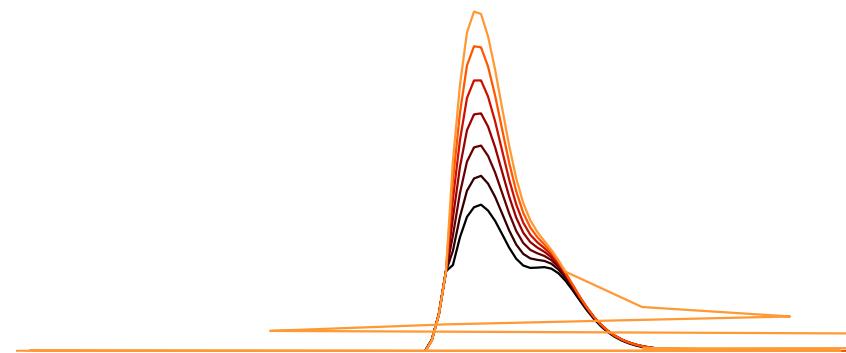


Figura 9.79: Perturbación evento 2016-10-17 61

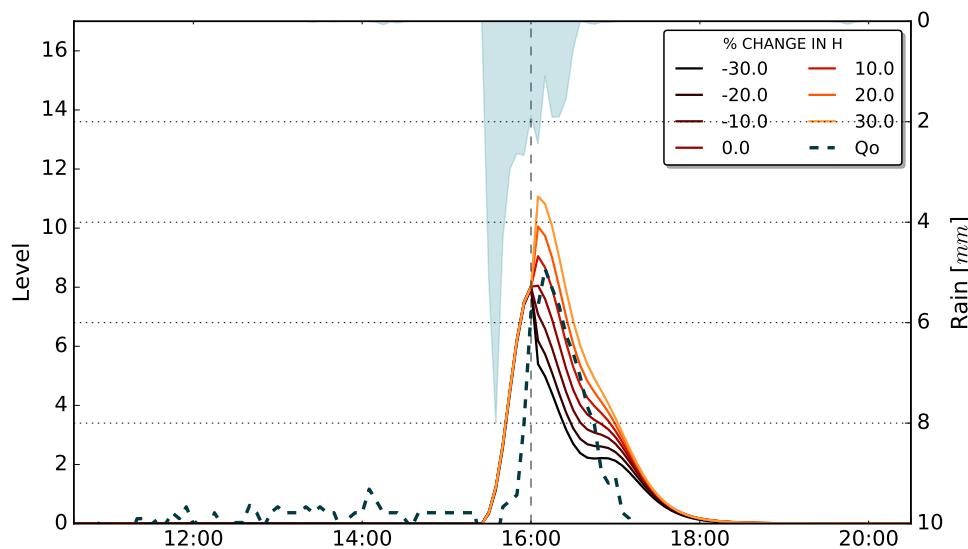


Figura 9.80: Perturbación evento 2016-10-17 65

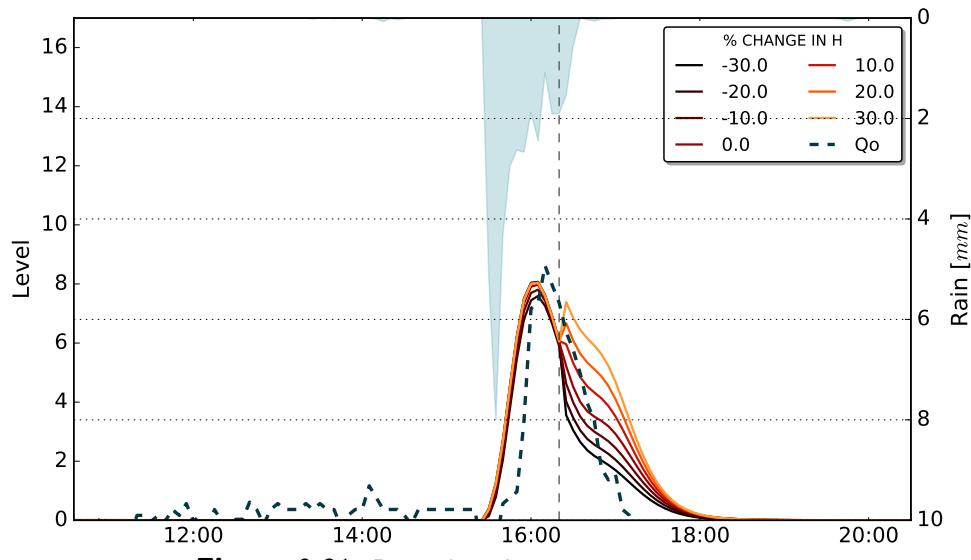


Figura 9.81: Perturbación evento 2016-10-17 69

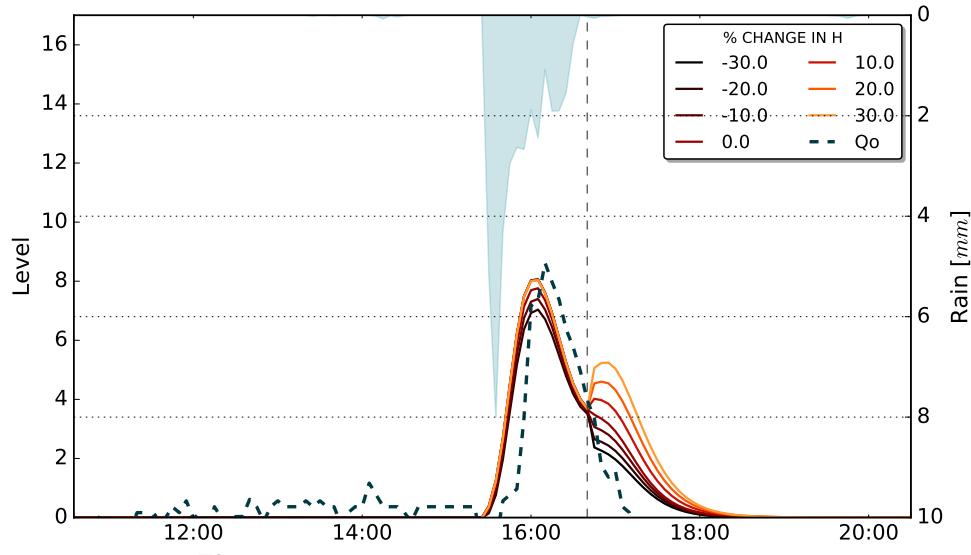


Figura 9.82: Perturbación evento 2016-10-17 73

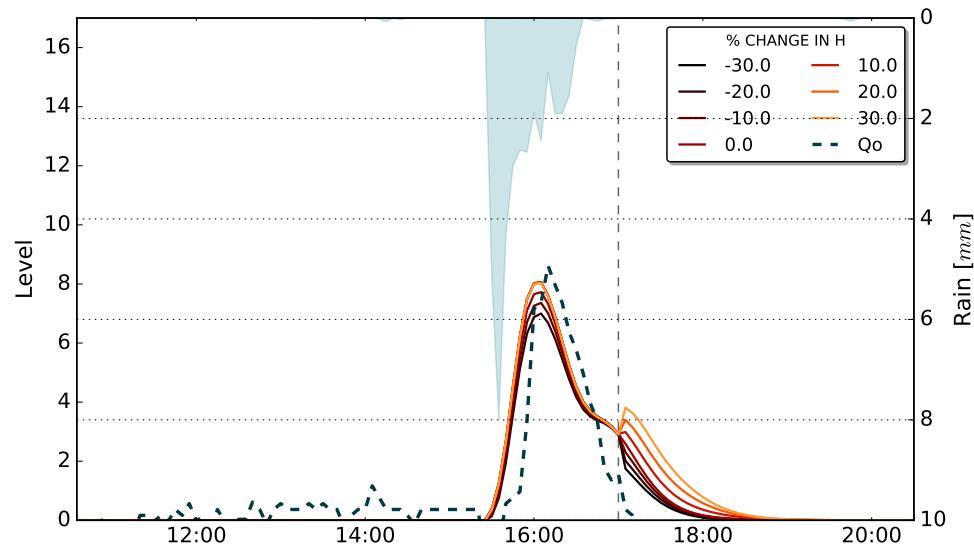


Figura 9.83: Perturbación evento 2016-10-17 77

Referencias

- Edier Aristizábal, Jaime Ignacio Vélez, Hernán Eduardo Martínez, and Michel Jaboyedoff. Shia_landslide: a distributed conceptual and physically based model to forecast the temporal and spatial occurrence of shallow landslides triggered by rainfall in tropical and mountainous basins. *Landslides*, pages 1–21, 2015.
- Gerrit Burgers, Peter Jan van Leeuwen, and Geir Evensen. Analysis scheme in the ensemble kalman filter. *Monthly weather review*, 126(6):1719–1724, 1998.
- Ven T Chow, David R Maidment, and Larry W Mays. *Applied hydrology*. 1988.
- Geir Evensen. The ensemble kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation. *Ocean dynamics*, 53(4):343–367, 2003.
- Derek C Ford and Paul W Williams. *Karst geomorphology and hydrology*, volume 601. Unwin Hyman London, 1989.
- Rafiq Ahmad Hajam, Aadil Hamid, and SamiUllah Bhat. Application of morphometric analysis for geo-hydrological studies using geo-spatial technology-a case study of vishav drainage basin. *Hydrology: Current Research*, 2013, 2013.
- Gary C Heathman, Patrick J Starks, Lajpat R Ahuja, and Thomas J Jackson. Assimilation of surface soil moisture to estimate profile soil water content. *Journal of Hydrology*, 279(1):1–17, 2003.
- Paul R Houser, Gabriëlle JM De Lannoy, and Jeffrey P Walker. Hydrologic data assimilation. *APPROACHES TO MANAGING DISASTER-ASSESSING HAZARDS, EMERGENCIES AND DISASTER IMPACTS*, page 41, 2012.
- Liangping Li, Haiyan Zhou, J Jaime Gómez-Hernández, and Harrie-Jan Hendricks Franssen. Jointly mapping hydraulic conductivity and porosity by assimilating concentration data via ensemble kalman filter. *Journal of hydrology*, 428:152–169, 2012.
- PCD Milly. Integrated remote sensing modeling of soil moisture: sampling frequency, response time, and accuracy of estimates. *IAHS-AISH publication*, (158):201–211, 1986.



Ming Pan and Eric F Wood. Data assimilation for estimating the terrestrial water budget using a constrained ensemble kalman filter. *Journal of Hydrometeorology*, 7(3):534–547, 2006.

Roberto Pizarro-Tapia, Francisco Balocchi-Contreras, Fernando Andrade-Vilaró, Claudia Sangüesa-Pool, José Vargas-Baecheler, Carolina Morales-Calderón, Mauricio Vera-Camiroaga, Rodrigo Valdés-Pineda, Carlos Vallejos-Carrera, Romina Mendoza-Mendoza, et al. Análisis comparativo de tres hidrogramas unitarios sintéticos en dos cuencas mediterráneas de chile, región del maule. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 20(1):05–20, 2014.

Jørn Rasmussen, H Madsen, Karsten Høgh Jensen, and Jens C Refsgaard. Data assimilation in integrated hydrological modeling using ensemble kalman filtering: evaluating the effect of ensemble size and localization on filter performance. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(7):2999–3013, 2015.

Rolf H Reichle, Dennis B McLaughlin, and Dara Entekhabi. Hydrologic data assimilation with the ensemble kalman filter. *Monthly Weather Review*, 130(1):103–114, 2002.

Carlos Augusto Restrepo Tamayo, Oscar David Álvarez Villa, Jaime Ignacio Vélez Upegui, Manuel Pulido Velásquez, Nicolás Velásquez Girón, et al. Un modelo hidrológico distribuido acoplado a un modelo de flujo subterráneo para la gestión del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. 2010.

R Srikanthan, GE Amirthanathan, and G Kuczera. Real-time flood forecasting using ensemble kalman filter. In *MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*, pages 1789–1795. Citeseer, 2007.

Humberto Vergara, Yang Hong, and Jonathan Gourley. Improving flood forecasting skill with the ensemble kalman filter. *Revista de Tecnología*, 13(1), 2016.

Xianhong Xie and Dongxiao Zhang. Data assimilation for distributed hydrological catchment modeling via ensemble kalman filter. *Advances in Water Resources*, 33(6):678–690, 2010.

