



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

ESTIMACIÓN PROBABILÍSTICA DE MAPAS DE INUNDACIÓN: UNA
METODOLOGÍA BASADA EN ENSAMBLES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JUAN PABLO RODRÍGUEZ RINCÓN

TUTOR PRINCIPAL
Dr. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA
COORDINACIÓN DE HIDRÁULICA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. MARZO 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Escalante Sandoval Carlos A.

Secretario: Dr. Domínguez Mora Ramón

Vocal: Dr. Pedrozo Acuña Adrián

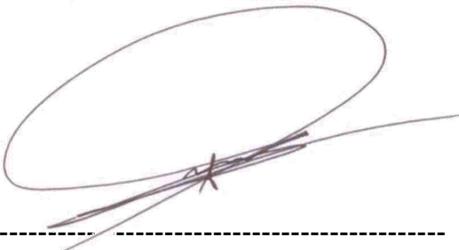
1^{er.} Suplente: Dr. Breña Naranjo José Agustín

2^{do.} Suplente: Dr. Rico Ramírez Miguel Ángel

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: México Distrito Federal, México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Pedrozo Acuña Adrián



FIRMA

Gracias a Dios por permitirme realizar este sueño.

Dedicado con todo mi amor a las personas más importantes de mi vida. Gabriela, Mariana y Samuel. Espero se sientan orgullosos como yo me siento de ustedes.

A Carolina, mi amor, este paso en mi vida es un triunfo de los dos... gracias.

Resumen

En las últimas décadas, las inundaciones han aumentado considerablemente en todo el mundo, poniendo de manifiesto la vulnerabilidad de las sociedades modernas a las fuerzas destructivas de la naturaleza. México, no siendo la excepción, ha experimentado devastadoras y costosas inundaciones en diferentes estados, convirtiéndose en la amenaza natural más importante y costosa. En este sentido, es de gran trascendencia para el país, generar estrategias de mitigación y adaptación ante los eventos extremos y bajo condiciones de un clima cambiante, que integren un mejor conocimiento disponible para el desarrollo de políticas públicas ante este problema.

Compartiendo la visión de las nuevas investigaciones que consisten en mejorar la estimación y la predicción del riesgo de inundación. Esta investigación presenta un marco de trabajo numérico holístico, que consiste en el desarrollo de una metodología integral para la generación de mapas de inundación probabilísticos. La metodología considera el encadenamiento de modelos atmosféricos, hidrológicos e hidrodinámicos, a fin de simular de forma escalonada; la precipitación, la relación lluvia-escorrentía y modelación de los flujos de dos eventos extremos. La modelación escalonada, permite la evaluación de la incertidumbre y sus efectos en la predicción final. De hecho, esta cadena de modelación se fundamenta en el reconocimiento formal de la incertidumbre en el marco de trabajo, de tal manera que considera su cuantificación en todo el desarrollo del trabajo.

Todo el proceso de modelación de inundaciones incluye varias fuentes de información de diferentes modelos que representan la física desde la lluvia hasta los flujos de inundación. Esto genera una gran cantidad de incertidumbre asociada a los diversos forzamientos hidrológicos e hidrodinámicos y a su interpretación física en el uso de modelos numéricos. Para abarcar este problema, el trabajo adopta una metodología basada en ensambles (EPS) para la predicción del tiempo, a fin de generar un conjunto de posibles resultados y convertirlos en una predicción probabilística de las inundaciones. Justamente, de esta forma se incluyen las incertidumbres sobre la base de la escala espacial, y se definen zonas donde la probabilidad de ser inundadas es alta o baja. Esta información es muy importante para la toma de decisiones basadas en el riesgo para la emisión de advertencias de inundaciones.

La aportación principal de este trabajo de investigación radica en mejorar la comunicación del peligro con la utilización de mapas de inundación; para reducir el riesgo a estos eventos. La obtención de los mapas probabilísticos, a través de Sistemas de predicción hidrológica basada en ensambles (HEPS) es muy útil, pues definen áreas de inundación, y mejoran la capacidad de prevención y contingencia asociada a estos fenómenos incorporando la incertidumbre en el pronóstico. Este tipo de metodología para reconocer la incertidumbre y plasmarla en mapas de inundación es nuevo. Y abre la ventana hacia el mejoramiento en la gestión del riesgo, convirtiéndose en el principal insumo para planear decisiones, complementar sistemas de alerta, evaluar daños y diseñar defensas.

Abstract

In recent decades, flooding has increased significantly worldwide, highlighting the vulnerability of modern societies to destructive forces of nature. Mexico is no exception, having experienced devastating floods across several regions, becoming the most important and costly natural hazard countrywide. In this sense, it is of great importance for the country to generate mitigation and adaptation strategies to extreme hydro-meteorological conditions. This should be done by improving the available knowledge used for the development of public policies to tackle those problematic events.

Following recent advances in research to improve flood risk estimation and forecasting, this work presents a comprehensive methodology for generating probabilistic flood maps. The methodology considers the combination of atmospheric, hydrological and hydrodynamic models that simulate in precipitation fields, rainfall-runoff relationships and inundation areal extents for two observed extreme events. This cascade modeling approach allows assessing the uncertainty and its effect on the final prediction. Therefore the quantification of the uncertainty associated with every step modeling process is considered.

The entire process of flood modeling involves several sources of information from different models that represent the physical processes driving precipitation, runoff generation and free-surface hydraulics. This creates significant uncertainty associated with meteorological, hydrological and hydrodynamic forcing datasets and their physical interpretation. In order to overcome these issues, this study adopts a methodology based

on ensembles originating from rainfall forecasting to generate a set of multiple possible results so they can determine a probabilistic prediction of flood risk. The outcome of this methodology allows to issue flood warnings based on probabilistic estimates.

The main contribution of this research is to improve hazard communication with the use of probabilistic flood maps. Obtaining probabilistic maps by using hydrological forecasting systems based on ensembles are useful because it defines possible flood areas, and improves the capacity for prevention and contingency associated with these phenomena incorporating uncertainty in the forecast. This methodology shows to be novel as it paves the way to improve risk management and to become a relevant tool for decision making, warning systems enhancement, damage assessment and flood defenses design.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, por su apoyo generoso y desinteresado durante mis estudios de doctorado. Al Instituto de Ingeniería, lugar donde desarrolle mis estudios, y principalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico durante mis estudios de posgrado.

A mi asesor principal de tesis y amigo Dr. Adrián Pedrozo Acuña, por su colaboración y guía para desarrollar este tema de tesis.

A mis asesores de tesis Dr. Ramón Domínguez Mora, Dr. Carlos A. Escalante, Dr. José Agustín Breña y Dr. Miguel Ángel Rico por su ayuda y consejo en el desarrollo de esta tesis. Asimismo al Dr. Rodolfo Silva y Dr. Edgar Mendoza por acompañarme en el proceso.

Un especial agradecimiento al profesor Paul Bates de la Universidad de Bristol por su asesoría y ayuda en mi estancia académica.

Un agradecimiento especial a mis amigos y compañeros que me apoyan y me acompañan siempre, principalmente en el desarrollo de este trabajo doctoral. Los que se encuentran en Colombia: Andrés Ortiz, Carlos Penagos, Christian Martínez y Eduardo Gómez y en México: Pedro Reinoso y su familia, Cesar Quintana, Héctor Becerril y su familia; mis compañeros de cubículo y especialmente a Diana Fernández por su apoyo y consejo durante tantos años.

Finalmente quiero agradecer a mi familia en Colombia y México por su apoyo; sus palabras de ánimo y cariño me transmiten tranquilidad y felicidad. Mi Madre Ruth, mis hermanos Andrés, Johanna y Paula. Además de Fernando, Brayan, Mary, Ivonne y en general a todos los Rodríguez, Rincón y Betancourt. Principalmente a Carolina Betancourt por el apoyo y consejo, su amor e incondicionalidad son fundamentales en mi vida.

En definitiva a todos:

Muchas Gracias.

Artículos relacionados a este trabajo:

- J. P. Rodríguez-Rincón, A. Pedrozo-Acuña, and J. A. Breña Naranjo, 2015. **Propagation of hydro-meteorological uncertainty in a model cascade framework to inundation prediction**. Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union. Hydrol. Earth Syst. Sci. Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 2981–2998, 2015. www.hydrol-earth-syst-sci.net/19/2981/2015/ doi:10.5194/hess-19-2981-2015.
- Mejía-Estrada, P.I., J. P. Rodríguez-Rincón, A. Pedrozo-Acuña., 2014. **Análisis del evento hidro-meteorológico extremo en Acapulco, Guerrero, 2013. Lecciones aprendidas**. Revista digital Tlálloc. Asociación Mexicana de Hidráulica. Periodo enero-marzo 2015.
- Pedrozo-Acuña, A., Rodríguez-Rincón, J.P., Arganis-Juárez, M., Domínguez-Mora, R., González Villareal, F.J. 2013. **Estimation of probabilistic flood inundation maps for an extreme event: Pánuco River, México**. Journal of Flood Risk Management, doi: 10.1111/jfr3.12067. Wiley and Sons. Factor de impacto: 1.49.
- Pedrozo-Acuña, A., Laverde-Barajas, M.A., Rodríguez-Rincón, J.P., 2014. **On the role of remotely sensed information in flood modelling**. Revista de ingeniería INNOVA, Facultad de Ciencias de Ingeniería y Construcción, Universidad Católica del Norte de Chile.
- Rodríguez-Rincón, J.P., Pedrozo-Acuña, A., Domínguez Mora, R., Reeve, D.E., Cluckie, I. 2013. **Probabilistic estimation of flood maps: An ensemble approach**. Comprehensive, Flood risk management. Research for policy and practice. Klijn & Schweckendiek (eds). Taylor & Francis group, London, Páginas 747-755. ISBN 978-0-415-62144-1.

Participación en congresos

- J. P. Rodríguez-Rincón, P.N. Paredes-Victoria, A. Pedrozo-Acuña, P. D. Bates., 2015. **Multi-model uncertainty quantification in flood extent estimates**. 3rd IMA International Conference on Flood Risk. Swansea University, Wales, UK.
- J. P. Rodríguez-Rincón, A. Pedrozo-Acuña, A. Breña Naranjo, 2014. **Uncertainty propagation in a hydro-meteorological approach: from the cloud to the flood map**. XI International Conference on Hydro-informatics, New York. USA.

- Pedrozo-Acuña., Mejía-Estrada, P.I., J. P. Rodríguez-Rincón, Domínguez Mora, R., González Villareal, F.J. 2014 **Flood risk from extreme events in Mexico**. XI International Conference on Hydroinformatics, New York. USA.
- J. P. Rodríguez-Rincón, A. Pedrozo-Acuña, Domínguez Mora, R., 2014. **Ensemble prediction of flood maps under uncertain conditions**. VI International Conference on Flood Management, Sao Paulo Brazil.
- Mejía-Estrada, P.I., J. P. Rodríguez-Rincón, A. Pedrozo-Acuña., 2014. **Análisis del evento hidrometeorológico extremo en Acapulco**, Guerrero, 2013. Lecciones aprendidas. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica "Desafíos de la Ingeniería Hidráulica 2014". Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Álvarez, I.J., A. Pedrozo-Acuña., J. P. Rodríguez-Rincón., Enríquez, C., Mariño-Tapia., González Villareal, F.J. 2012. **Evaluación de la incertidumbre en la modelación numérica de flujos de inundación**. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica. Editado por Rafael Murillo, ISBN: 978-9968-933-06-3.
- Paredes P.N., A. Pedrozo-Acuña., J. P. Rodríguez-Rincón., Domínguez Mora, R., González Villareal, F.J., 2012. **Estimación de mapas de inundación con una probabilidad de ocurrencia en la cuenca del río Usumacinta, Tabasco**. XXI Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero. México.
- Rodríguez-Rincón, J.P., Pedrozo-Acuña, A., Domínguez Mora, R., Reeve, D.E., Cluckie, I. 2012. **Probabilistic estimation of flood maps: An ensemble approach**. The Second European Conference on FLOODrisk Management, Rotterdam, Holanda.

Índice

Capitulo 1. Introducción y objetivos de investigación	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estructura de la tesis.....	4
Capitulo 2. Contexto de la investigación	7
2.1. Antecedentes	7
2.2. Modelos atmosféricos en la predicción de inundaciones	11
2.3. Los ensambles y la predicción de inundaciones	12
2.4. Modelación escalonada de mapas de inundación	14
2.5. La importancia de la incertidumbre en la generación de mapas de inundación ..	16
Capitulo 3. La incertidumbre y su evaluación.....	21
3.1. Introducción.....	21
3.2. Definición, dimensiones y niveles de la incertidumbre	22
3.2.1. Dimensiones de la incertidumbre.....	24
3.2.2. Ubicación de la incertidumbre.....	25
3.2.3. Niveles de la incertidumbre.....	27
3.2.4. Naturaleza de la incertidumbre	31
3.2.5. La incertidumbre en la evaluación del riesgo.....	32
3.2.6. Evaluación de la incertidumbre en el mapeo de inundaciones	37
3.3. Marco de trabajo para la evaluación de la incertidumbre en el mapeo de inundaciones.....	39
3.3.1. Fuentes de incertidumbre	40
3.3.2. Incertidumbre en las fuentes fluviales de la inundación.....	41
3.3.3. Incertidumbre por los efectos del cambio climático	42

3.3.4.	Incertidumbre en los efectos del cambio en las cuencas.....	43
3.3.5.	Incertidumbre en la estructura del modelo hidrodinámico	44
3.3.6.	Incertidumbre en la extrapolación de la curva gasto-elevaciones	45
3.3.7.	Incertidumbre en los efectos de la infraestructura de la llanura.....	46
3.3.8.	Incertidumbre en el desempeño de las defensas	47
3.3.9.	Incertidumbre en la vulnerabilidad y consecuencias.....	48
3.3.10.	Decisiones en la implementación de un análisis de incertidumbre	49
3.3.11.	Incertidumbre en los datos de campo y observaciones	50
3.4.	Reflexión final sobre la incertidumbre y la modelación de flujos de inundación ..	51
Capítulo 4.	Casos de Estudio	53
4.1.	Caso 1: Inundaciones de 2009, cuenca del río Tonalá	54
4.1.1.	Características fisiográficas	55
4.1.2.	Clima	56
4.1.3.	Edafología y cobertura vegetal	58
4.1.4.	Descripción del evento.....	59
4.2.	Caso 2: Inundaciones del 2013 en las cuencas de los ríos La Sabana y Papagayo.....	62
4.2.1.	Características fisiográficas	64
4.2.2.	Clima	66
4.2.3.	Geología, edafología y uso del suelo.....	68
4.2.4.	Descripción del evento.....	69
Capítulo 5.	Marco de trabajo: modelación en cascada de flujos de inundación.....	73
5.1.	Modelo meteorológico	75
5.1.1.	Descripción del modelo meteorológico	75
5.1.2.	Implementación del modelo	81
5.2.	Modelo hidrológico	84
5.2.1.	Descripción del modelo.....	84

Índice

5.2.2. Implementación del modelo	90
5.3. Modelo hidrodinámico	97
5.3.1. Descripción del modelo.....	98
5.3.2. Implementación del modelo	101
Capítulo 6. Análisis de resultados	103
6.1. Análisis meteorológico	103
6.1.1. Generación de Ensamblajes meteorológicos - EPS	104
6.1.2. Métricas para la evaluación del error	106
6.2. Análisis hidrológico.....	117
6.2.1. Generación del ensamble hidrológico.....	117
6.3. Análisis hidrodinámico.....	124
6.3.1. Métricas para la evaluación del error en mapas de inundación	125
6.4. Propagación y análisis del error	140
Capítulo 7. Conclusiones.....	143
7.1. Trabajo futuro	147
Bibliografía.....	149

Índice de figuras

Figura 2-1 Ciclo hipotético de Riesgo-Gasto ante inundaciones, adaptada de Samuels (2000).	8
Figura 3-1 Dimensiones de la incertidumbre (Walker et al. 2003).	25
Figura 3-2 Esquema de la transición progresiva entre determinismo e ignorancia total (Pedrozo et al 2013)...	28
Figura 3-3 Niveles de incertidumbre. Los tres primeros son jerárquicos, 4 y 5 aplican para todo el proceso de modelación.	29
Figura 3-4 Metodologías para enfrentar las diferentes formas de incertidumbre (basado de Stirling (2007)) ..	36
Figura 3-5 Ubicación de las fuentes de Incertidumbre en el marco de trabajo para la generación de mapas de inundación (Pedrozo Acuña 2012).	41
Figura 4-1 Declaratorias de emergencia por hidro-meteorológica en México 2000-2014.	53
Figura 4-2 Ubicación de la cuenca del río Tonalá (a) y la zona de inundación durante 2009 (b).	54
Figura 4-3 Modelo Digital de Elevaciones (MDE) para la cuenca del río Tonalá.	55
Figura 4-4 Parámetros climatológicos de la cuenca del río Tonalá.	57
Figura 4-5 Edafología y uso del suelo de la cuenca del río Tonalá.	59
Figura 4-6 Evolución del Frente Frio No 9 - 2009.	61
Figura 4-7 Fotografías Satelitales antes y después del evento de inundación. Tonalá -2009.	62
Figura 4-8 Ubicación de las cuencas del río (a) La Sabana (rosa) y Papagayo (Amarillo). (b) Zona de inundación.	64
Figura 4-9 Modelo Digital de Elevaciones (MDE) para las cuencas de los ríos la Sabana y Papagayo.	66
Figura 4-10 Parámetros climatológicos de las cuencas del río la Sabana y Papagayo.	68
Figura 4-11 Edafología y uso del suelo para las cuencas de los ríos la Sabana y Papagayo.	69
Figura 4-12 Evolución de los eventos meteorológicos Ingrid y Manuel sobre el territorio Mexicano. Sep-2013.	71
Figura 4-13 Imagen satelital de la zona de Acapulco (a) antes y después (b) de las inundaciones del 2013. .	72
Figura 5-1 Metodología, modelación de inundación en cascada, para el desarrollo de mapas probabilísticos de inundación.	74
Figura 5-2 Estructura WRF. La zona del recuadro negro es la utilizada en este estudio.	76
Figura 5-3 Resultados de la modelación meteorológica (lluvia acumulada) para los eventos en estudio. Los recuadros superiores representan los dominios anidados de cálculo del modelo.	84
Figura 5-4 Modelo conceptual de Clark para modelos distribuidos. Adaptado de Kull y Feldman, 1998.	90
Figura 5-5 Estaciones de medición en la cuenca del río Tonalá.	92
Figura 5-6 Cuenca del río Tonalá con la definición espacial de la red fluvial y el Número de Curva.	92
Figura 5-7 Gasto histórico del río Tonalá. Estación hidrométrica.	94
Figura 5-8 Estaciones de medición en las cuencas de los ríos Sabana y Papagayo.	95
Figura 5-9 Gastos históricos disponibles en las cuencas del río Papagayo (panel superior) y la Sabana (panel inferior).	95
Figura 5-10 Cuencas de los ríos Sabana y Papagayo. Definición espacial de la red fluvial y el Número de Curva.	96

Índice de Figuras

Figura 5-11 Malla de modelación y condiciones de frontera eventos de inundación. a) Caso 1 Tonalá-2009. b) Acapulco-2013.	102
Figura 6-1 Ensamble inicial WRF multi-física evento del 2009. Comparación de precipitación acumulada estimada contra cada estación meteorológica. En azul los 12 miembros más acertados.	109
Figura 6-2 Campos de precipitación acumulados estimados por el modelo WRF utilizando los 12 miembros seleccionados del conjunto multi-física (octubre 27, 2009 hasta noviembre 12, 2009).	110
Figura 6-3 Ensamble inicial WRF multi-física evento del 2013. Comparación de precipitación acumulada estimada contra cada estación meteorológica. En azul los 12 miembros más acertados.	114
Figura 6-4 Campos de precipitación acumulados estimados por el modelo WRF utilizando los seleccionados 14 miembros del conjunto multi-física (octubre 27, 2009 hasta noviembre 12, 2009).	115
Figura 6-5 (Panel izquierdo) 72 hidrogramas calculados usando el modelo lluvia-escorrentía con seis conjuntos de parámetros y 12 campos de precipitación conjunto WRF como datos de entrada. (Panel derecho) Hidrogramas aceptables definitivos que definen el ensamble hidrológico.	119
Figura 6-6 (Paneles izquierdos) 96 hidrogramas calculados usando el modelo lluvia-escorrentía con seis conjuntos de parámetros y 16 campos de precipitación (ensamble WRF) como datos de entrada. (Paneles derechos) hidrogramas aceptables definitivos que definen el ensamble hidrológico.	122
Figura 6-7 Mapa de inundación probabilístico para el evento de inundación del 2009 en la cuenca baja del río Tonalá (panel izquierdo), comparada con la imagen satelital infrarroja SPOT (panel central), 12 de noviembre de 2009.	128
Figura 6-8 Comparación de máxima zona inundada contra el pico máximo del hidrograma de entrada del ensamble hidro-meteorológico para las 31 simulaciones hidrodinámicas (panel a). Relación de picos de caudal (panel b) y relación de tamaño área inundada.	129
Figura 6-9 Elevaciones calculadas en diferentes sitios de la cuenca baja del río Tonalá. Cada recuadro representa los resultados del ensamble.	132
Figura 6-10 Comparación de máxima zona inundada contra el pico máximo del hidrograma de entrada del ensamble hidro-meteorológico para las 26 simulaciones hidrodinámicas en las dos cuencas del caso Acapulco.	134
Figura 6-11 Comparación de gastos, cuencas La Sabana y Papagayo.	135
Figura 6-12 Mapa de inundación probabilístico para el evento de inundación del 2013 en la ciudad de Acapulco y alrededores (panel izquierdo), comparada con la imagen satelital del día 18 de septiembre(panel central).	136
Figura 6-13 Conjunto de elevaciones calculadas en diferentes sitios de las cuencas baja de los ríos Sabana y Papagayo. En punto rojo elevaciones observadas.	137
Figura 6-14 Propagación del error para cada caso, (panel superior) Tonalá. Panel inferior Sabana y Papagayo.	141

Índice de Tablas

Tabla 3-1 Diferentes métodos para el modelado de inundación en llanuras en orden ascendente de complejidad hidráulica.	45
Tabla 5-1 Clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad.	87
Tabla 5-2 Número de curva según la cobertura del suelo.	88
Tabla 5-3 Eventos históricos de avenidas extraordinarias usadas para la calibración de los parámetros libres del modelo MPE cuenca Tonalá, se incluyen el cálculo del error para cada uno.	94
Tabla 5-4 Parámetros de avenidas extraordinarias usados para la calibración de los parámetros libres del modelo MPE cuencas La Sabana y Papagayo, se incluyen el cálculo del error para cada uno.	97
Tabla 6-1 Tabla parametrizaciones físicas (WRF multi-física) utilizadas para describir condiciones de lluvia para el evento del 2009. Resaltados se encuentran los miembros que cumplen con $NSC > 0,3$ $Cor > 0,8$	108
Tabla 6-2 Tabla general de cálculo de los errores por estación y miembro del ensamble. Evento Tonalá 2009.	111
Tabla 6-3 Tabla parametrizaciones físicas (WRF multi-física) utilizadas para describir condiciones de lluvia para el evento del 2013. Resaltados se encuentran los miembros que cumplen con $NSC < 0,3$ y $Cor > 0,8$	113
Tabla 6-4 Tabla general de cálculo de los errores por estación y miembro del ensamble, caso Acapulco. ...	116
Tabla 6-5 Ensamble hidrológico, resaltados los hidrogramas que cumplen con $NSC > 0,6$ y $Cor > 0,8$	120
Tabla 6-6 Ensamble hidrológico, resaltados los hidrogramas que cumplen con $NSC > 0,6$ y $Cor > 0,8$	123
Tabla 6-7 Tabla de contingencia de inundaciones.	126
Tabla 6-8 Comparación entre de áreas inundadas y modelaciones hidrodinámicas generadas a partir del ensamble hidrometeorológico.	130
Tabla 6-9 Comparación entre las áreas inundadas observadas y las modelaciones hidrodinámicas generadas a partir del ensamble hidrometeorológico.	139

Abreviaturas y Siglas

ADB	:	Asian Development Bank
AFWA	:	Air Force Weather Agency
Am(f)	:	Clima de Köppen; porcentaje de lluvia invernal con respecto a la anual (mayor de 10.2)
Am(w)	:	Clima de Köppen; porcentaje de lluvia invernal con respecto a la anual (menor de 5)
CEM 3.0	:	Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0
CENAPRED	:	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CFE	:	Comisión Federal de Electricidad
CN	:	Curve number
CONAGUA	:	Comisión Nacional del Agua
Cor	:	Coeficiente de correlación
CSI	:	Critical Success Index
DEFRA	:	Department for Environment Food & Rural Affairs
DHI	:	Danish Hydraulic Institute
E	:	Energía del oleaje
ECMWF	:	European Centre for Medium Range Weather Forecasting
EFAS	:	European Flood Awareness System
EPS	:	Ensemble Prediction System
F	:	Parámetro de coriolis
F_a	:	infiltración acumulada
FAA	:	Federal Aviation Administration
FAR	:	False Alarm Ratio
FEMA	:	Federal Emergency Management Agency (FEMA) Flood Risk Map (FRM)
FNL	:	Global Final Analysis

FRMRC	:	Flood Risk Management Research Consortium
f_s	:	Escala de retención potencial
FSL	:	Forecast Systems Laboratory
f_x	:	Factor de olvido
g	:	Aceleración por la gravedad
GIS	:	Geographic information system
GLUE	:	Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
h	:	Profundidad total
H_1	:	Altura de ola
HEPEX	:	Hydrologic Ensemble Prediction Experiment
HEPS	:	Hydrological Ensemble Prediction Systems
Hm	:	Hectómetro
hr	:	Hora
I_a	:	Infiltración inicial
INEGI	:	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	:	Intergovernmental Panel on Climate Change
K	:	Coefficiente de atenuación por almacenamiento
k	:	Número de onda
km	:	Kilometros
LIDAR	:	Light Detection And Ranging
m	:	Metro
MAP D-FASE	:	Mesoscale Alpine Programme, Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of flood Events in the Alps
MDE	:	Modelo Digital de Elevaciones
mm	:	Milímetro
MM5	:	Fifth-Generation Mesoscale Model
MPE	:	Modelo para Pronóstico de Escurrimiento
msnm	:	Metros sobre el nivel del mar
NASA	:	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	:	National Center for Atmospheric Research
NCAR	:	National Center for Atmospheric Research

NCEP	:	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	:	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRL	:	Naval Research Laboratory
NRMSE	:	Error cuadrático medio normalizado
NSC	:	Nash-Sutcliffe coeficiente
NWP	:	Numerical weather prediction
P	:	Presión total
PBL	:	Planetary boundary layer
P_e	:	Precipitación efectiva
PEST	:	Model-Independent Parameter Estimation and Uncertainty Analysis
POD	:	Probability of Detection
POFD	:	Probability of False Detection
Q	:	Gasto
Q_{max}	:	Gasto Máximo
Q_{GMN}	:	Gasto máximo normalizado
Q_{min}	:	Gasto mínimo
Q_p	:	Cada gasto pico
QPF	:	Quantitative Precipitation Forecasts
R	:	Constante de recesión del gasto base
RANS	:	Reynolds averaged Navier Stokes equations
RAPHAEL	:	Runoff and Atmospheric Processes for flood HAZard for Ecasting and control
RASP	:	Risk Assessment for System Planning
RMSE	:	Root-mean-square deviation
S	:	Potencial de retención máxima del suelo
s	:	Segundo
SCS	:	Soil Conservation Service
SINA	:	Sistema Nacional de Información del Agua
SMN	:	Servicio Meteorológico Nacional
SPOT	:	Satellite Pour l'Observation de la Terre/Satellite for observation of Earth
SRTM	:	Shuttle Radar Topography Mission
SST	:	Sea Surface Temperature

SS_{xx}	:	Tensor de radiación en la dirección x
SS_{yy}	:	Tensor de radiación en la dirección y
Std	:	Desviación estándar
T	:	Período del oleaje
t	:	Tiempo
T_c	:	Tiempo de concentración
TSS	:	True Skill Statistic
u	:	Componentes de velocidad en la dirección x
UNAM	:	Universidad Nacional Autónoma de México
UNESCO	:	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USCS	:	Unified Soil Classification System
USDA	:	United States Department of Agriculture
UTC	:	Tiempo universal coordinado
v	:	Componentes de velocidad en la dirección y
w	:	Componentes de velocidad en la dirección z
WRF	:	Weather Research and Forecasting model
WRF-ARW	:	Advanced Reserch WRF
WRF-NMM	:	Nonhydrostatic Mesoscale Model WRF
η	:	Elevación de la superficie
λ	:	Factor de escala de pérdida inicial
ρ_0	:	Densidad de referencia del agua
ρ_a	:	Presión atmosférica
θ	:	Ángulo del vector de onda
ρ	:	Densidad del flujo

Capítulo 1. Introducción y objetivos de investigación

1.1. Introducción

A nivel mundial y México no es la excepción, los eventos hidro-meteorológicos son los que producen las mayores pérdidas económicas (Brito-Castillo and Pedrozo-Acuña 2015). Estos eventos, observados en los países desarrollados y en desarrollo por igual, destacan la necesidad de generar una mejor comprensión de sus causas y cómo podemos mejorar la gestión de sus impactos y reducir el riesgo. La seguridad ante eventos climáticos es una necesidad básica para el desarrollo social y económico de cualquier país, situaciones que no son lo suficientemente seguras, requieren inversiones repetidas y extremadamente altas en reparación e indemnización de daños (Pedrozo-Acuña and Breña-Naranjo 2014). Al distraer recursos para dar frente a una contingencia de esta naturaleza, se impide el desarrollo progresivo de la Nación. Es por ello que uno de los retos más importantes para la comunidad científica internacional, consiste en integrar el mejor conocimiento disponible para el desarrollo de políticas públicas ante este problema.

En este sentido, es de gran trascendencia para México, motivar el desarrollo de una visión holística del problema, que considere una administración más eficiente y sostenible del territorio, con medidas de ordenamiento territorial (ej. cambios en el uso de suelo) y ecológico de áreas proclives a inundación, manejo de los drenajes urbanos, las tierras rurales y la zona costera (Brito-Castillo and Pedrozo-Acuña 2015, Reinoso, Pedrozo-Acuña and Torres 2015). Para la adecuada implementación de estas medidas se necesita la participación de todos los interesados en el proceso de manejo del riesgo de inundaciones, es decir: Gobiernos Estatales y Federales, Cámara de Diputados, Ciudadanos, Académicos y Organizaciones No Gubernamentales.

Esta investigación presenta un marco de trabajo numérico holístico, a través del cual es posible establecer estrategias de mitigación y adaptación ante los eventos extremos y bajo condiciones de un clima que está cambiando. Como premisa fundamental, este estudio tiene como punto de partida el reconocimiento formal de la incertidumbre en el marco de trabajo, de tal manera que se acepta que ambos, modelos y datos, ofrecen

información limitada sobre procesos dominantes. Así, la dentro de las contribuciones más importantes de esta tesis doctoral, se encuentra el diseño de una metodología que considera un enfoque probabilista en todas las escalas espacio-temporales del sistema terrestre (ej. (Rodríguez-Rincon et al. 2012)). Este enfoque considera el encadenamiento de modelos atmosféricos, hidrológicos e hidrodinámicos, a fin de simular de forma escalonada, desde el clima y la generación de la precipitación en la atmósfera, continuando por la transformación de la lluvia en avenidas que fluyen por los ríos, y hasta la identificación de zonas afectadas por su desbordamiento. El encadenamiento de modelos utilizado, permite a su vez la evaluación de la incertidumbre y sus efectos en la predicción final.

En realidad, cada componente de cada modelo posee su propia fuente de incertidumbre (ej. variabilidad espacio-temporal de los parámetros), por lo que se produce una propagación y agregación de errores a lo largo del proceso de modelación. De esta forma, aspectos innovadores de este marco de trabajo son la modelación en cascada (visión holística), y la evaluación de la incertidumbre asociada a cada etapa del pronóstico.

De esta manera, el esfuerzo presentado en este trabajo de investigación es un ejemplo de la evolución que el conocimiento científico formal necesita, para hacer frente a las condiciones no-estacionarias del clima que ya se aprecian (Milly et al. 2008). El marco de trabajo seleccionado, fomenta la capacidad predictiva procurando nuevas herramientas de observación (e.g. usando Modelos Digitales de Elevación de altimetría láser) y de análisis del sistema terrestre como una entidad completa (atmósfera-cuenca-río).

Una fuente de información que cobra mayor relevancia en la predicción de inundaciones, consiste en los mapas de inundación, su importancia es clara ya que permiten planear decisiones, sistemas de alerta, evaluar daños y diseñar defensas. Sin embargo, los modelos que los generan están sujetos a incertidumbre de naturaleza epistémica (limitaciones del conocimiento), además de la asociada a los datos de entrada, los errores de los datos geográficos y la falta de datos para su calibración (ej. (Rauch et al. 2002, Pappenberger and Beven 2006, Korving et al. 2009, Reeve, Horrillo-Caraballo and Pedrozo-Acuña 2011)).

Por otra parte, los mapas de inundación que se generan en México para estimar el riesgo asociado a estos eventos consideran una predicción determinista de los mismos. Es decir, caracterizan una causa y se genera una consecuencia. Sin embargo, esta metodología

carece de una robustez teórica que informe sobre las limitaciones de los modelos utilizados (ej. modelos unidimensionales, caracterización de la rugosidad en la llanura), y no proporciona información sobre el grado de confiabilidad de los pronósticos.

El trabajo que se propone en este proyecto de investigación, representa un procedimiento novedoso para la estimación de mapas probabilistas de inundación y tiene su base en sugerencias y recomendaciones provenientes de los últimos proyectos Europeos abocados al manejo de inundaciones (ej. Flood Risk Management Research Consortium (Demeritt et al. 2013)).

1.2. Objetivos

El objetivo general de esta investigación consiste en el desarrollo de una metodología integral para la generación de mapas de inundación probabilísticos, que provean de información más confiable y útil para el mejoramiento de estrategias en el manejo de riesgos asociados a inundaciones. Adicionalmente, este trabajo busca cuantificar el error en cada etapa de la cascada de modelos, para con ello estudiar su propagación y agregación, desde la etapa inicial en la atmósfera, hasta la elaboración los mapas de peligro de inundación.

Para ello, se proponen los siguientes objetivos particulares:

- Implementar la modelación escalonada (precipitación-hidrograma-flujo-mapa de inundación) de flujos de inundación.
- Adoptar una metodología basada en sistemas de predicción por ensambles - EPS (Ensemble Prediction System) para la predicción del clima, a fin de generar curvas de tipo espagueti para los hidrogramas de avenidas extraordinarias.
- Utilizar los hidrogramas para la modelación probabilística de flujos de inundación.
- Generar mapas de inundación con probabilidad asociada.
- Aplicar la metodología para un evento observado dentro de una zona específica del país.

- Utilizar datos de percepción remota para la correcta representación numérica de la llanura de inundación seleccionada.

1.3. Estructura de la tesis

El trabajo está integrado por siete capítulos estructurados cómo se describe a continuación:

Capítulo 2. Antecedentes

Introduce el estado del arte que antecede a este trabajo de investigación, por medio de una breve descripción de la problemática global y nacional de las inundaciones, así como los elementos más importantes en evaluación del riesgo asociado a estos eventos, y las estrategias de modelización numérica más socorridas para su análisis. Esta sección concluirá con una breve síntesis del uso de ensambles meteorológicos con aplicaciones hidrológicas.

Capítulo 3. Incertidumbre

El objetivo de este capítulo consiste en proveer un marco de trabajo conceptual para el tratamiento sistemático de la incertidumbre, de tal forma que se mejore su gestión en el proceso de toma de decisiones. En la actualidad, diferentes analistas usan diversos términos para los mismos tipos de incertidumbre, y algunos usan el mismo término para referirse a distintos tipos. Esto hace extremadamente difícil su comprensión para aquellos que no participaron en un trabajo dado. Definir la incertidumbre a través de una tipología, permitirá una mejor comunicación entre todos los interesados, ya sea tomadores de decisiones, académicos o la sociedad civil.

Capítulo 4. Zona de Estudio

En esta sección se describen las zonas de estudio donde se aplicó el marco de trabajo desarrollado en esta tesis de investigación. De manera concreta se presentan dos

eventos hidrometeorológicos extremos que generaron inundaciones en Tabasco (2009) y Guerrero (2013).

Capítulo 5. Marco de Trabajo: Modelación en cascada

En esta sección, se describe en detalle la metodología en cascada desarrollada compuesta por tres niveles de modelación del sistema terrestre (atmósfera-cuenca-río/llanura). De esta manera, se introducen las tres herramientas utilizadas, a saber: un modelo meteorológico de mesoescala, un modelo hidrológico distribuido para resolver la relación lluvia-escorrentamiento y un modelo hidrodinámico en dos dimensiones.

Capítulo 6. Resultados

Como su nombre lo indica, este capítulo contiene los resultados de la aplicación de la modelación en cascada a dos eventos extremos registrados en México durante los años 2009 y 2013. Así mismo, se incluye un análisis de la incertidumbre en cada etapa de simulación, a fin de determinar la propagación y agregación de los errores a lo largo de la cadena de modelos durante la reproducción numérica de ambos eventos.

Capítulo 7. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Por último, el séptimo capítulo resume las conclusiones más importantes de este trabajo de investigación, junto con algunas sugerencias respecto a las futuras líneas de investigación que se desprenden de esta tesis.

Capítulo 2. Contexto de la investigación

2.1. Antecedentes

En todo el mundo, el incremento en el desarrollo económico y social de los países, ha generado presión sobre los usos del suelo en zonas cercanas a los ríos, esta influencia incrementa su potencial de daño por inundación (Berz 2000). En tan sólo una década, las pérdidas económicas reportadas por la incidencia de inundaciones se han incrementado de forma alarmante en 200% (Michel-Kerjan 2012). Los conceptos de daño y pérdidas económicas, así como nuestra preocupación por los desastres hidrometeorológicos, surgen debido al desarrollo de la civilización en estas zonas, en contraste al proceso natural del sistema terrestre (Jongman et al. 2014). En la naturaleza, la inundación no es buena ni mala, sino el resultado de procesos hidrogeológicos que determinan la capacidad de procesar los flujos hidrológicos en una región de la Tierra.

En la última década y en diversos países del orbe, los impactos sociales y económicos derivados de la incidencia de inundaciones severas, han propiciado la generación de diversos programas abocados al manejo del riesgo por inundación (ej. Defra (2005) en el Reino Unido; IMEE (2011) en Estados Unidos).

El punto en común de estos programas, consiste en un cambio en el paradigma que define la nueva estrategia para el manejo del riesgo asociado a eventos extremos; la cual considera no solamente la construcción de obras de defensa como bordos, compuertas de derivación y dragado de los ríos; sino también la incorporación de otras medidas de mitigación, que permiten reducir la severidad de los daños asociados a estos fenómenos (ej. cambios en el uso de suelo por medio de un ordenamiento territorial). Este cambio ha permitido evolucionar a la ingeniería de perspectiva de control y defensa contra inundaciones, hacia una de manejo y mitigación de daños (Defra 2005). Lo cual ha permitido hacer énfasis en la reducción de las pérdidas humanas, económicas y ecológicas, y a la vez que se considera un aprovechamiento de los posibles beneficios sociales, económicos y ecológicos que las inundaciones generan (ver UNESCO-IFI: International Flood Initiative – (Di Baldassarre and Uhlenbrook 2012)).

La historia demuestra que la generación y aplicación de técnicas de análisis de riesgo, han sido motivadas por las consecuencias catastróficas de diferentes eventos. A raíz de la

ocurrencia de accidentes, la sociedad a menudo exige nuevos y mejores sistemas de defensa, así como una regulación estricta del riesgo (Reeve 2009). La Figura 2-1 muestra un resumen gráfico del proceso de inversión de un gobierno ante el riesgo por inundación, propuesta por Samuels (2000), quien plantea una duración de entre 20 y 50 años o más. Este ciclo se registró en Holanda, donde a consecuencia de las inundaciones del 1953 se implementaron planes de mitigación de inundaciones. Con el paso del tiempo sin catástrofes, el costo de mantenimiento y refuerzo de diques fue duramente cuestionado por la sociedad (décadas de los 70s y 80s). Hasta que en 1993 se presentó una inundación, lo que terminó con las críticas y facilitó que el parlamento holandés financiara un programa de 15 años para el refuerzo de diques (Hillen and Jorissen 1995).



Figura 2-1 Ciclo hipotético de Riesgo-Gasto ante inundaciones, adaptada de Samuels (2000).

Las medidas que se pueden implementar ante el riesgo por inundación, constituyen acciones que se introducen como parte del proceso de adaptación del sistema. Desde luego, es posible no hacer nada y aceptar el riesgo, pero inclusive bajo esta perspectiva, si una inundación ocurre, será necesario lidiar con sus impactos de alguna manera.

Ante las nuevas condiciones impuestas por el cambio climático, las posibles respuestas ante inundaciones son la mitigación, esto es la reducción de las causas u orígenes del fenómeno (punto clave para los tomadores de decisiones); o la adaptación, que representa el ajuste de los sistemas naturales o humanos a los estímulos climáticos y sus efectos.

Para ello se requiere mejorar el marco de trabajo que se utiliza para la estimación y predicción del riesgo por inundación. En este sentido, diversos investigadores han señalado la importancia de reconocer y reducir la incertidumbre en el marco de trabajo utilizado en la predicción de estos fenómenos (Demeritt et al. 2007, Bao et al. 2011).

La evaluación del riesgo por inundación representa una actividad que se realiza bajo un marco de trabajo lleno de incertidumbre (Hall 2014). Además, los eventos hidrometeorológicos extremos son altamente dinámicos en una variedad de escalas temporales, debido entre otras cosas a la variabilidad climática y los cambios socioeconómicos, lo que incrementa aún más el nivel de incertidumbre en los pronósticos.

Como se verá en el siguiente capítulo, la incertidumbre puede ser dividida en dos tipos: aleatoria y epistémica (Hacking 2006). La primera representa una imprevisibilidad natural e inevitable, mientras que la segunda, refleja la falta de conocimiento o lo inadecuado de los modelos numéricos para representar la realidad.

En el estudio de sistemas hidrológicos, la incertidumbre aparece de diferentes formas por lo que es necesario establecer una terminología clara (Montanari 2007). Dentro de un contexto de simulación hidrológica, Baldassarre and Montanari (2009) resumen las tres fuentes principales de incertidumbre como: a) Incertidumbre en las observaciones; b) Incertidumbre en los parámetros e c) Incertidumbre en la estructura del modelo. Por ejemplo, en el caso de la incertidumbre asociada a las observaciones de campo, se ha reconocido que estos errores se originan debido a la generalización de mediciones puntuales y a la variabilidad espacial de la lluvia (McMillan, Krueger and Freer 2012).

Por el contrario, en el caso de metodologías que integran modelos operando a diversas escalas espaciales y temporales para la predicción de inundaciones, la incertidumbre está asociada a la definición de parámetros y a la estructura de los diferentes modelos, es decir es de naturaleza epistémica.

Por otro lado, una pieza clave de información para la prevención y reducción de daños por inundaciones, consiste en la generación de mapas confiables de inundación que permitan la diseminación del riesgo a ambos, la sociedad y los tomadores de decisión (Pedrozo-Acuña et al. 2013). Para este propósito existe una gran variedad de modelos numéricos los cuales han sido ampliamente documentados por (Horritt and Bates 2002, Horritt 2006a), o en el caso de ambientes urbanos por (Hunter et al. 2008).

Esto se debe a que esta pieza de información permite conocer las zonas afectadas y/o más seguras de una zona durante la incidencia del evento hidrometeorológico. En algunos casos proporcionando información referente a niveles, velocidades, y tiempos de desbordamiento a fin de planificar actividades de rescate y prevenir los impactos negativos asociados al evento.

En las últimas décadas, como resultado del progreso tecnológico y el mejoramiento en el poder de cómputo, hemos observado un desarrollo de sistemas de modelación holísticos. Los cuales a través del encadenamiento o acoplamiento de modelos numéricos de la atmósfera con la cuenca y el río, son capaces de producir pronósticos hidrológicos e hidrodinámicos. Utilizando para ello información proveniente de modelos atmosféricos regionales de suficiente resolución; con lo que se simula de manera numérica al evento hidrometeorológico en diversas escalas del sistema terrestre (Bartholmes and Todini 2005, Demeritt et al. 2010). Dentro de esta línea de acción, se ha presentado el acoplamiento de diferentes modelos numéricos operacionales para la predicción del clima, con información proveniente de radares meteorológicos (Liguori et al. 2012, Liguori and Rico-Ramirez 2012); por otro lado, también se ha considerado el encadenamiento de modelos climáticos con modelos hidrológicos e hidrodinámicos para determinar la extensión de una inundación (Pappenberger et al. 2012, Cloke et al. 2013, Ushiyama et al. 2014).

Esta combinación de herramientas numéricas (atmosféricas, hidrológicas e hidrodinámicas) en conjunto con el uso de modelos geográficos, ofrecen una estimación espacio-temporal muy completa del fenómeno de inundación, proporcionando una presentación más directa a la sociedad respecto a la evolución del fenómeno (Merz, Thielen and Goch 2007, Leedal et al. 2010).

2.2. Modelos atmosféricos en la predicción de inundaciones

El acoplamiento de modelos atmosféricos con aquellos de naturaleza hidrológica, registro sus primeros esfuerzos durante las actividades relacionadas con el proyecto RAPHAEL (Runoff and Atmospheric Processes for flood HAZard for Ecasting and control), el cual se llevó a cabo con apoyo financiero de la Unión Europea en 1993. Este proyecto tuvo como objetivo el estudio de los procesos atmosféricos y de escurrimiento para la predicción de inundaciones en la región de los Alpes (Jasper, Gurtz and Lang 2002). Posteriormente, en el año 1999 se inició el proyecto MAP D-FASE (Mesoscale Alpine Programme, Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of flood Events in the Alps) con duración de diez años, que incorpora un enfoque probabilístico, atmosférico e hidrológico, para la predicción de avenidas asociadas a eventos climáticos extremos en la misma zona (MAP, 2009). Por otro lado, el estudio de la propagación de las incertidumbres en sistemas avanzados hidro-meteorológicos, fue abordado durante el proyecto COST 731 (Concerted Research Action) desde una perspectiva de estimación de las precipitaciones extremas y sus procesos hidrológicos asociados. Con el propósito de determinar la propagación de la incertidumbre en las distintas etapas de modelación y su influencia en la toma de decisiones (Davolio et al. 2008, Zappa et al. 2010, Bruen et al. 2010, Rossa et al. 2010).

Posteriormente, se incorporaron las predicciones numéricas del clima NWP (NWP-numerical weather prediction, por sus siglas en inglés), las cuales involucran la utilización de observaciones meteorológicas en modelos numéricos atmosféricos para determinar la evolución del estado del clima en el futuro (Zappa et al. 2011, Rossa et al. 2011). El uso de los modelos numéricos para la predicción del clima, representa una revolución en la manera de hacer ingeniería hidráulica, ya que por medio de la integración de resultados de modelos meteorológicos se abre la puerta a la implementación de la hidrología en tiempo real. Esta evolución en la manera de hacer ciencia permite cosechar los grandes beneficios de una investigación básica en una mejor toma de decisiones para las autoridades encargadas de las emergencias (Bauer, Thorpe and Brunet 2015).

El único inconveniente al utilizar este tipo de herramientas consiste en la falta de precisión de un pronóstico dado, es por ello que además de la predicción, se reconoce como muy necesaria la cuantificación del grado de confiabilidad de los resultados. La precisión y confiabilidad de los pronósticos climáticos salvan vidas, más aun aquellos asociados a los

caudales en los ríos, pues proveen información importante para la gestión adecuada de la emergencia y permiten una mejor mitigación de los impactos que a su vez previenen las pérdidas económicas asociadas a un fenómeno hidrometeorológico.

2.3. Los ensambles y la predicción de inundaciones

La implementación de técnicas de predicción climática basadas en ensambles EPS (Ensemble Prediction Systems, por sus siglas en inglés), que involucran la generación de n escenarios (o causas) asociados a una condición climática, y a través de las cuales se generan n posibles hidrogramas (o respuestas) asociadas, representan una solución adecuada al problema de la poca confiabilidad de los pronósticos climáticos. Este procedimiento permite la limitación de la incertidumbre asociadas al proceso de predicción de los eventos extremos y sus consecuencias (Cloke and Pappenberger 2009).

Las organizaciones meteorológicas de todo el mundo, utilizan ensambles climáticos en sus predicciones a través de NWP. Por ejemplo, el Centro Europeo para la Predicción del Clima ECMWF por sus siglas en inglés (European Centre for Medium Range Weather Forecasting) proporciona predicciones acertadas con base en resultados de EPSs para precipitaciones de menor intensidad (hp 2mm/h) hasta por 6 días y de precipitación alta (hp entre 2 y 10 mm/h) hasta en 10 días. Si bien estas cifras son inferiores a las tasas de precipitación típica durante los episodios de grandes inundaciones (de hasta 50 mm/h), se ha demostrado que el sistema de predicción por ensambles EPS, proporciona resultados con mayor confiabilidad respecto a la posible ocurrencia de tormentas severas (Buizza et al. 2007). Además, de ser muy superiores a aquellos obtenidos por medio de métodos deterministas (Bao et al. 2011).

Hoy día existen diversos centros meteorológicos que tienen disponibles de forma gratuita los ensambles de re-análisis asociados a pronósticos del clima (ej. National Center for Atmospheric Research en Estados Unidos y el European Centre for Medium Range Weather Forecasting entre los más importantes).

Recientemente y dada su versatilidad, para cuantificar la incertidumbre asociada a una predicción, este tipo de sistemas se han utilizado en la predicción de flujos en ríos, y los académicos han rebautizado el término a: Sistemas de predicción hidrológica basada en

ensambles (HEPS, por sus siglas en inglés)(Cloke et al. 2013). La ventaja de estos sistemas consiste en que se tienen, para el mismo horizonte temporal que las predicciones del clima, resultados asociados a los niveles y gastos en los ríos, proveyendo una evaluación probabilista del caudal en el futuro. Estos resultados permiten definir las consecuencias más probables (representada por la media de las respuestas) y las bandas de confianza asociadas a un pronóstico dado. De esta manera, se considera la influencia de la incertidumbre en un sistema de predicción climático-hidrológico (Dietrich et al. 2008, Cuo, Pagano and Wang 2011).

Este tipo de estrategias de predicción, basadas en los pronósticos cuantitativos de precipitación QPF (Quantitative Precipitation Forecasts, por sus siglas en inglés) y los EPS han permitido realizar predicciones más certeras de hidrogramas en el corto plazo (3-10 días). Por ello, no es sorpresa que este tipo de sistemas constituyan la base del Sistema de alerta de inundaciones de la Comunidad Europea (EFAS - European Flood Awareness System) (Thielen et al. 2009). Existen además otro tipo de estrategias para generar ensambles, entre las que se incluyen aquellas que consideran la incertidumbre asociada a los parámetros del modelo, el cambio en las condiciones iniciales y de frontera, así como metodologías que incorporan resultados de más de un modelo climático para el pronóstico hidrológico, conocidas como multi-modelo.

La última década, ha registrado un incremento considerable en el uso de este tipo pronósticos de avenidas extraordinarias e inundaciones (Wetterhall et al. 2013), dado que se ha demostrado que a través del uso de HEPS se incrementa la ventana de tiempo para emitir la alerta (Pappenberger et al. 2008, He et al. 2009). El esfuerzo multinacional más representativo de este tipo de metodologías, está dado por la iniciativa conocida como Experimento de Predicción Hidrológica con Ensamblados (Hydrologic Ensemble Prediction Experiment – HEPEX, por sus siglas en inglés), la cual desde 2004, agrupa a meteorólogos e hidrólogos interesados en su aplicación (www.hepex.org) (Thielen et al. 2008).

Este tipo de sistemas enfocan su energía en la evaluación y cuantificación de la incertidumbre meteorológica, el post-proceso de los pronósticos y la comunicación de la incertidumbre, en virtud de que el incremento en la precisión de los resultados (en busca de la perfección) no es percibido como la mejor alternativa para hacer frente al problema (Pappenberger and Brown 2013).

Con el incremento en el uso de radares meteorológicos por los diversos Sistemas Meteorológicos del mundo, existen también diversos esfuerzos abocados a la incorporación de esta información para el forzamiento de modelos hidrológicos. Por ejemplo, (Liechti et al. 2013) presentaron una investigación que compara los sistemas de predicción del clima tradicionales con aquellos que utilizan ensambles e información de radar, los resultados demostraron que el desempeño de los diversos métodos, depende en gran medida de las características de la tormenta. Sin embargo, en un análisis de largo plazo (4 años) se verificó un mejor desempeño general de las predicciones que utilizan ensambles. Liguori and Rico Ramirez (2013) evaluaron el desempeño de diferentes predicciones hidrológicas forzadas con pronósticos climáticos híbridos, creados a partir de la combinación de datos de radar con predicciones climáticas, señalando que este tipo de estrategia permite la cuantificación de la incertidumbre que se espera en el pronóstico.

Uno de los retos más significativos en el uso de ensambles para la predicción de inundaciones, es la comunicación de la incertidumbre (Ramos et al. 2010, Demeritt et al. 2013). Esto es particularmente irrefutable en el ámbito de toma de decisiones, tal y como lo demostró Zappa, Fundel and Jaun (2013), quienes a través de una herramienta de visualización comunicaron la capacidad de predicción de flujo considerando para ello, variables como el tiempo al pico del hidrograma y su magnitud, encontrando que en el segundo caso el sistema frecuentemente sobreestimaba el valor medido.

2.4. Modelación escalonada de mapas de inundación

El proyecto de investigación que se presenta en esta tesis doctoral, tiene como objetivo el desarrollo de una metodología escalonada que permita la predicción de mapas de inundación con su incertidumbre asociada. Esta idea, tiene su base en los sistemas de modelación atmósfera-cuenca, que utilizan ensambles meteorológicos (HEPS) para la generación de hidrogramas. Así, lo que se propone consiste en añadir una tercera etapa de modelación que permite estimar el flujo en la llanura a partir de simulaciones en la que se emplean los hidrogramas como insumo para un modelo hidrodinámico bidimensional. Esto permite generar n mapas de inundación para un posible evento de inundación, lo que a su vez facilita la cuantificación de la incertidumbre asociada a este marco de trabajo. Se anticipa que una de las bondades de este tipo de metodologías probabilistas, facilitan la

comunicación social del peligro de inundación y su incertidumbre asociada. Es por ello que entre las ventajas más significativas de este tipo de resultados, se reconoce la posibilidad de salvaguardar el proceso de protección civil ante la generación de falsas alarmas y falsos negativos (Rayner, Lach and Ingram 2005).

Por otro lado, es ampliamente reconocido por la comunidad científica, que la modelización de flujos en llanuras de inundación juega un rol fundamental en la generación de estrategias para la gestión adecuada del riesgo, ya que los mapas resultantes comunican la distribución espacio temporal de una inundación de manera clara (Horritt and Bates 2001, Neal et al. 2012).

Sin embargo, la simulación numérica de flujos en llanuras de inundación es compleja y requiere no solo de modelos numéricos de alto coste computacional, sino también una adecuada representación de los procesos fluviales y los flujos hidrológicos (Stewart et al. 1999). De hecho, el incorporar un modelo hidrodinámico para la estimación, se introducen nuevas fuentes de incertidumbre asociadas a la definición de parámetros del modelo como la rugosidad (Hall et al. 2005). Romanowicz and Beven (2003) demostraron que esta incertidumbre en modelos hidrodinámicos induce desviaciones considerables en la predicción de inundaciones. De esta manera, se generan imprecisiones asociadas a diferentes orígenes, desde la inadecuada representación geométrica de la cuenca, hasta una mala representación del hidrograma de entrada, sin mencionar los errores numéricos asociados al esquema de solución de las ecuaciones fundamentales de flujo.

La mayor parte de las investigaciones que reportan la simulación de flujos en llanuras de inundación, consideran la estimación de la incertidumbre asociada a los resultados, tomando como base la metodología propuesta por (Beven and Binley 1992), conocida como Estimación Generalizada de la Probabilidad de Incertidumbre o GLUE por sus siglas en inglés (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) ej.(Romanowicz, Beven and Tawn 1996, Romanowicz and Beven 1998, Romanowicz and Beven 2003, Aronica, Hankin and Beven 1998, Aronica, Bates and Horritt 2002, Bates, Marks and Horritt 2003, Bates et al. 2004, Werner, Blazkova and Petr 2005, Horritt 2006b, Pappenberger et al. 2007b, Pappenberger et al. 2007a, Schumann et al. 2008, Baldassarre and Montanari 2009, Pedrozo-Acuña et al. 2013). Estos estudios consideran alguno o varios tipos de incertidumbre asociada al proceso de modelado, y a la estructura del modelo seleccionado (Apel et al. 2004).

La importancia de la evaluación de la incertidumbre en la generación de mapas de inundación, es reconocida por el gran número de trabajos que la incorporan. En este sentido, existe en la literatura, una clara necesidad por incorporar no sólo su evaluación sino también una estimación de la confiabilidad de los resultados (Stephens and Bates 2015). Tal y como lo señalan (Di Baldassarre et al. 2010b), aquellos mapas de inundación que incorporen información sobre la incertidumbre asociada a un resultado, tendrán menos posibilidad de estar equivocados y serán de gran ayuda para el mejoramiento del manejo del riesgo asociado a estos eventos. Tal y como se observó después del evento de gran impacto observado a raíz de las inundaciones de Pakistán en el año 2010 (Webster, Toma and Kim 2011). A raíz de lo anterior, comienzan a ser cada vez más comunes las investigaciones abocadas al uso de simulaciones hidrológicas para la definición de forzamientos en modelos de llanuras de inundación. Un ejemplo de lo anterior se presenta en el trabajo de Sayama et al. (2012), quienes para el mismo caso de las inundaciones de Pakistán, utilizaron mediciones satelitales de la precipitación para generar hidrogramas y mapas de inundación asociados para este evento.

La simulación escalonada atmósfera-cuenca-inundación tiene grandes ventajas, sobre todo cuando las inundaciones ocurren en distintos puntos dentro de una cuenca o cuando la separación del proceso lluvia-escurrimiento y los flujos de inundación son complicados (Sayama et al. 2012, Rodríguez-Rincón, Breña-Naranjo and Pedrozo-Acuña 2014, Pedrozo-Acuña et al. 2014b). Los mapas de peligro que resultan de este encadenamiento de modelos, permiten la adecuada planeación de la ayuda durante la emergencia y el mejoramiento en la estimación de daños a la infraestructura (Neal et al. 2013).

2.5. La importancia de la incertidumbre en la generación de mapas de inundación

En las últimas décadas con el incremento en el poder de cómputo, hemos visto la proliferación de modelos hidrodinámicos en una y dos dimensiones, incluso se registra la disponibilidad de algunos códigos de dinámica de fluidos computacional en tres dimensiones, los cuales son utilizados para la reproducción de problemas locales en estructuras hidráulicas. Por otra parte, existen también un sinnúmero de modelos hidrológicos de parámetros distribuidos que utilizan diversas simplificaciones del método

propuesto por Freeze and Harlan (1969). Por lo que se observa una tendencia que sugiere el incremento en la frecuencia del uso de modelos de orden superior. Todas estas herramientas, tienen su base en las ecuaciones que poseen (más o menos) una justificación física y permiten una representación espacial más detallada de los procesos, parámetros y variables predichas.

Sin embargo, existen también desventajas asociadas a este desarrollo; modelos de orden superior requieren mayor tiempo de cómputo para arribar a la solución numérica, lo que a su vez es importante si estamos interesados en la estimación de la incertidumbre asociada a los modelos. Estos modelos, necesitan la definición de condiciones iniciales y de frontera en espacio y tiempo, a un nivel de detalle que no existe, o su información no está disponible, incluso en estudios de investigación. Usualmente, requieren la definición de un gran número de valores de parámetros para cada elemento espacial en la discretización; y a su vez, pueden tener problemas del tipo numérico asociados a la difusión numérica y estabilidad de los esquemas de solución.

Por otro lado, no existe ninguna garantía de que en algunos casos, las ecuaciones con base física sobre las que se basan estos modelos produzcan una representación adecuada de los complejos procesos de flujo que se encuentran en la realidad. Lo anterior es particularmente cierto en la generación del escurrimiento sub-superficial, aunque también juega un rol importante en la representación de procesos de flujo y transporte superficiales (ver por ejemplo, (Beven 2001, Beven 2002, Beven 2006b)). Es posible interpretar todas estas desventajas como fuentes de incertidumbre asociadas al proceso de modelado.

La aplicación exitosa de modelos, se debe en gran medida, a un proceso adecuado para el control de estas fuentes de incertidumbre por medio de una cuidadosa selección de estructuras del modelo y sus parámetros, y un adecuado tratamiento de los datos que se emplean para la definición de las condiciones iniciales y de frontera. A pesar de ello, cabe señalar que es poco probable que en cualquier aplicación real se eliminen de manera completa todas estas incertidumbres.

El riesgo por inundación se define de forma general como la suma de los productos de la probabilidad de un evento por las consecuencias que éste genera. Es evidente, que ambas componentes del riesgo están afectadas por una múltiple variedad de incertidumbres, sin embargo es conveniente diferenciarlas entre aquellas que están

relacionadas con la amenaza y su probabilidad de ocurrencia y las relacionadas con la evaluación de la vulnerabilidad. De hecho, ambas componentes pueden ser representadas espacialmente a través de mapas que en el caso de la amenaza se conocen como mapas de inundación.

Los mapas de inundación que definen de forma espacial la extensión de un área inundada, son la base de cualquier evaluación de riesgo por inundación. Hasta hace algunos años, la práctica internacional consideraba la generación de estos mapas de inundación para periodos de retorno con probabilidades anuales de excedencia de 0.01 y 0.001, sin considerar en ningún momento la estimación de la incertidumbre asociada a los modelos hidráulicos. En realidad, tal y como lo señalan Beven, Leedal and McCarthy (2010), todavía se puede considerar como nuevas a aquellas metodologías que consideran la evaluación de la incertidumbre asociada a los mapas de inundación.

Existen diversas fuentes de incertidumbre asociadas a la generación de mapas de inundación, entre las que se encuentran la estimación de la avenida para la probabilidad de excedencia seleccionada, la definición de la topografía de la planicie y las secciones transversales del río, la selección de coeficientes de rugosidad adecuados, el modelo hidráulico utilizado, el tratamiento y representación de la infraestructura hidráulica en el sistema, la consideración del desempeño de las obras de defensa (ej. bordos, compuertas, presas etc.) y la no-estacionariedad derivada de la variabilidad y los cambios en el clima y las condiciones físicas de la cuenca.

Es evidente que errores en la definición de las zonas afectadas a través de los mapas de inundación, tendrán un impacto directo no solo en la mala o adecuada planeación de las zonas urbanas del futuro; sino también en la planeación de emergencias y maniobras de rescate. En particular, para la identificación de rutas de evacuación durante emergencias. Por ello, la incertidumbre tiene un impacto negativo no solo en la exactitud de los resultados generados sino también en la comunicación del riesgo a la sociedad.

El uso de modelos en la gestión del riesgo por inundación involucra así, múltiples fuentes de incertidumbre que involucran al conocimiento y a los errores estadísticos. Diferentes fuentes de incertidumbre interactúan en formas complejas, en el proceso de calibración y validación de un modelo numérico. Por lo tanto, la caracterización del impacto de las diferentes fuentes de incertidumbre sobre un resultado es compleja y requiere inevitablemente de algunos juicios subjetivos. Una forma de evitar lo anterior, es a través

de la generación de guías de buenas prácticas bajo diferentes etapas de la gestión del riesgo por inundación, las cuales permitan dentro de la marco de trabajo seleccionado una mejor toma de decisiones en un ambiente altamente incierto.

Precisamente, en los últimos años, el tema de la incertidumbre ha recibido considerable atención (Apel et al. 2004, Baveye 2009, Beven 2014, Wang 2015). De hecho se han desarrollado varias técnicas para abordarla precisamente para el desarrollo de los mapas de inundación, entre ellas se incluye un sistema de pronóstico bayesiano (Krzysztofowicz 2002, Biondi and De Luca 2012), la estimación generalizada de la probabilidad de incertidumbre (GLUE) (Blazkova and Beven 2002, Beven 2006a, Jung and Merwade 2011)), estimación de parámetros (PEST, parameter estimation (Liu et al. 2005)), metodologías utilizando el principio de extensión de lógica difusa (Maskey, Guinot and Price 2004), entre otras.

En consecuencia, la gestión del riesgo de inundaciones a través de mapas que identifican las áreas afectadas durante un evento presenta algunos problemas a la práctica profesional, pues se consideran a menudo como una herramienta de información de fidelidad desconocida, en lugar de una herramienta de comunicación (Neal et al. 2013).

Es por ello, que el tema de la incertidumbre involucrada en el proceso de generación de mapas de inundación debe ser cuidadosamente analizado, ya que un resultado no adecuado o su mala interpretación pueden conducir a una apreciación errónea de peligro de inundación. En este sentido, el siguiente capítulo presenta una tipología de la incertidumbre y su relación en la generación de mapas de inundación de manera más detallada.

Capítulo 3. La incertidumbre y su evaluación

3.1. Introducción

Una vía natural para hacer frente a los grandes problemas en ingeniería, es a través de la aplicación del principio de precaución, en el que la acción preventiva se realiza sin esperar los resultados concretos de la evidencia científica (Stirling 2007). Es decir, la prevención toma un rol decisivo durante ambos procesos, el de evaluación y manejo del riesgo. De hecho, en los últimos años, una de las metas más importantes dentro de la toma de decisiones en materias ambiental y tecnológica, ha sido la evolución hacia un énfasis la prevención. Esta mutación implica que ambos, científicos y tomadores de decisiones, aceptan las limitaciones inherentes del conocimiento anticipatorio, sobre el que se basan las decisiones para el manejo y adaptación del medio ambiente.

Los cambios naturales y antropogénicos que se observan en el mundo, están ocurriendo de forma rápida. El futuro es incierto, incluso nuestro entendimiento de los sistemas naturales, económicos y sociales requieren que el trabajo tenga como base la premisa de que todos tienen asociados complejidades y están llenos de interacciones y no linealidades. Nuestra comprensión de la naturaleza, y nuestra habilidad para predecir su comportamiento presente y futuro, están limitadas. Dentro del campo de la ingeniería, es necesaria la cuantificación transparente del riesgo e incertidumbre, con el propósito de definir entre diversas opciones de mitigación y alivio para reducir los riesgos asociados a estos cambios.

De tal forma que las decisiones se tomen a partir de una base sólida, a pesar de nuestro conocimiento limitado del sistema (Rougier et al. 2013). El reconocimiento de la existencia de la incertidumbre está generalmente aceptado por los tomadores de decisiones y los científicos e ingenieros. Sin embargo, existe poca apreciación del hecho de que existen diferentes dimensiones, tipos y niveles de incertidumbre, por lo que existe una falta de comprensión sobre sus características, magnitudes relativas y medios disponibles para contenerlas.

Es necesario entonces reconocer que el conocimiento científico formal, está construido sobre hipótesis y juicios; y que éste tiene asociada una gran cantidad de incertidumbre, la

cual no es posible expresar por medio de un análisis de sensibilidad o bandas de confianza.

En un futuro cada vez más próximo, tal y como lo señalan Obersteiner et al. (2001), la sociedad tendrá que hacer frente a las interacciones no lineales que se presentan entre los ecosistemas y un clima que está cambiando. Aunado a lo anterior, se suma la complejidad del crecimiento poblacional. En caso de no ser atendidas, estas interacciones darán lugar a malestares sociales aún mayores; sobre todo, en aquellas regiones del mundo en donde las sociedades no hayan fomentado su capacidad para afrontar riesgos climáticos adicionales.

El objetivo de este capítulo consiste en proveer un marco de trabajo conceptual para el tratamiento sistemático de la incertidumbre, de tal forma que se mejore su gestión en el proceso de toma de decisiones. El desarrollo de una tipología de la incertidumbre nivelará el terreno al proveer los conceptos comunes para una mejor comunicación entre analistas, ingenieros y tomadores de decisiones. En la actualidad, diferentes analistas usan diversos términos para los mismos tipos de incertidumbre, y algunos usan el mismo término para referirse a distintos tipos. Esto hace extremadamente difícil su comprensión para aquellos que no participaron en un trabajo dado. Por lo que definir a la incertidumbre a través de una tipología, permitirá una mejor comunicación entre todos los interesados. Esto permitirá, delinear una metodología para su evaluación y una mejor toma de decisiones (Leung et al. 2015).

3.2. Definición, dimensiones y niveles de la incertidumbre

El concepto de incertidumbre va más allá de la ausencia de conocimiento. Por ejemplo, Funtowicz and Ravetz (1990) describen la incertidumbre como una situación de información inadecuada, la cual puede ser de tres diferentes tipos: inexactitud, inconfiabilidad, e ignorancia. Sin embargo, cabe resaltar que la incertidumbre prevalece, incluso en situaciones en las que existe una gran cantidad de información disponible. Adicionalmente, nueva información puede disminuir o aumentar la incertidumbre. Es posible que nuevos conocimientos sobre procesos complejos, revelen la presencia de incertidumbre que previamente no se conocía. De esta manera, el incremento en el

conocimiento ilustra que nuestra comprensión está más limitada, o que los procesos son más complejos de lo que se había pensado (Sluijs 1997).

Dentro del contexto de manejo del riesgo por inundaciones, el problema radica en cómo evaluar y cuantificar la incertidumbre. La falta de un conocimiento absoluto sobre el funcionamiento de los sistemas naturales complejos, y las incertidumbres asociadas con el comportamiento humano, las organizaciones y los sistemas sociales, hacen extremadamente complicada la predicción de la vulnerabilidad ante inundaciones.

De forma tradicional, se ha buscado incluir de manera implícita a la incertidumbre en el riesgo. La protección estructural contra inundaciones, está basada en el conocimiento acumulado con base en eventos anteriores, en los que el cambio climático estaba conceptualizado como un proceso cuasi-estacionario, donde el pasado es capaz de mostrar el futuro. En la actualidad, muchas definiciones de incertidumbre coexisten. El matemático francés Laplace (1749-1827) argumentaba que el mundo era completamente determinista: en otras palabras, que la incertidumbre es resultado de un conocimiento incompleto. La doctrina de determinismo científico, permaneció como la hipótesis estándar por más de 100 años hasta principios del siglo XX, cuando una serie de descubrimientos de la física probaron que la ciencia solamente puede reducir la incertidumbre de forma parcial. Posteriormente, el economista norteamericano Knight (1921), definió la incertidumbre como un concepto claramente diferente al de riesgo, donde incertidumbre representa la aleatoriedad del sistema con probabilidades desconocidas y el riesgo es la aleatoriedad con probabilidades conocidas. En 1983, el Consejo Norteamericano para los Recursos Hídricos, definió riesgo e incertidumbre en relación con la habilidad para describir resultados potenciales en términos probabilistas. Dentro de este marco, el Consejo estableció que las situaciones de riesgo, se definen como aquellas en las que el resultado potencial puede ser descrito razonablemente con funciones de distribución de probabilidad conocidas (ej. probabilidad de avenidas); mientras que las situaciones de incertidumbre, se definen como aquellas en las que el resultado potencial no puede ser descrito de una forma objetiva con funciones de distribución de probabilidad conocidas.

Existen en la literatura diferentes tipologías de la incertidumbre que han sido desarrolladas con diversos propósitos, la que se presenta en este trabajo está en línea con la mayoría de ellas. Las diferencias radican en que las otras son más generales o no están orientadas de manera específica al apoyo en la toma de decisiones (Rowe 1994), o

aplican a un contexto específico como el de calidad del agua (Beck 1987). Por otro lado, clasificaciones orientadas hacia el uso de modelos se enfocan más en descripción de una sola dimensión de la incertidumbre, como su ubicación (Alcamo and Bartnicki 1987) o su reducción hacia el error, o no discriminan de forma explícita entre nivel y naturaleza de la misma (Morgan and Henrion 1990).

La incertidumbre está contenida en distintos componentes, tales como las variaciones estadísticas, la medición de los errores, la ignorancia y la indeterminación. Es evidente que la incertidumbre reduce la confianza en la estimación dentro de la cadena causa-efecto, además, si no es posible explicar la complejidad por medio de métodos científicos, ésta aumenta. Inclusive relaciones simples pueden estar asociadas con altos grados de incertidumbre, si el conocimiento que les da sustento está incompleto.

El Glosario de Inundaciones Riesgo e Incertidumbre del Consorcio de Gestión del Riesgo de Inundación (FRMRC) define la incertidumbre como “un concepto general que refleja nuestra falta de certeza acerca de alguien o algo, que van desde poco menos de seguridad completa a una casi completa falta de convicción acerca de un resultado” (Pappenberger and Beven 2006).

Desde esta perspectiva, la incertidumbre es medible e identificable, por lo que se recomienda su análisis y evaluación a través de representaciones probabilistas de los posibles resultados (ADB 2002).

3.2.1. Dimensiones de la incertidumbre

De acuerdo con (Walker et al. 2003), ver Figura 3-1, dentro del marco de trabajo para la toma de decisiones, existen tres diferentes dimensiones de incertidumbre, a saber:

1. Su **ubicación**: donde la incertidumbre se manifiesta en sí misma dentro de la complejidad del modelo;
2. Su **nivel**: en el que la incertidumbre se manifiesta en sí misma a lo largo de un espectro entre el conocimiento determinista y la ignorancia total (precisión del conocimiento);

3. Su **naturaleza**: donde la incertidumbre se debe a la imperfección del conocimiento o se debe a la variabilidad inherente de los fenómenos que se describen (clasificada en epistémica o aleatoria).

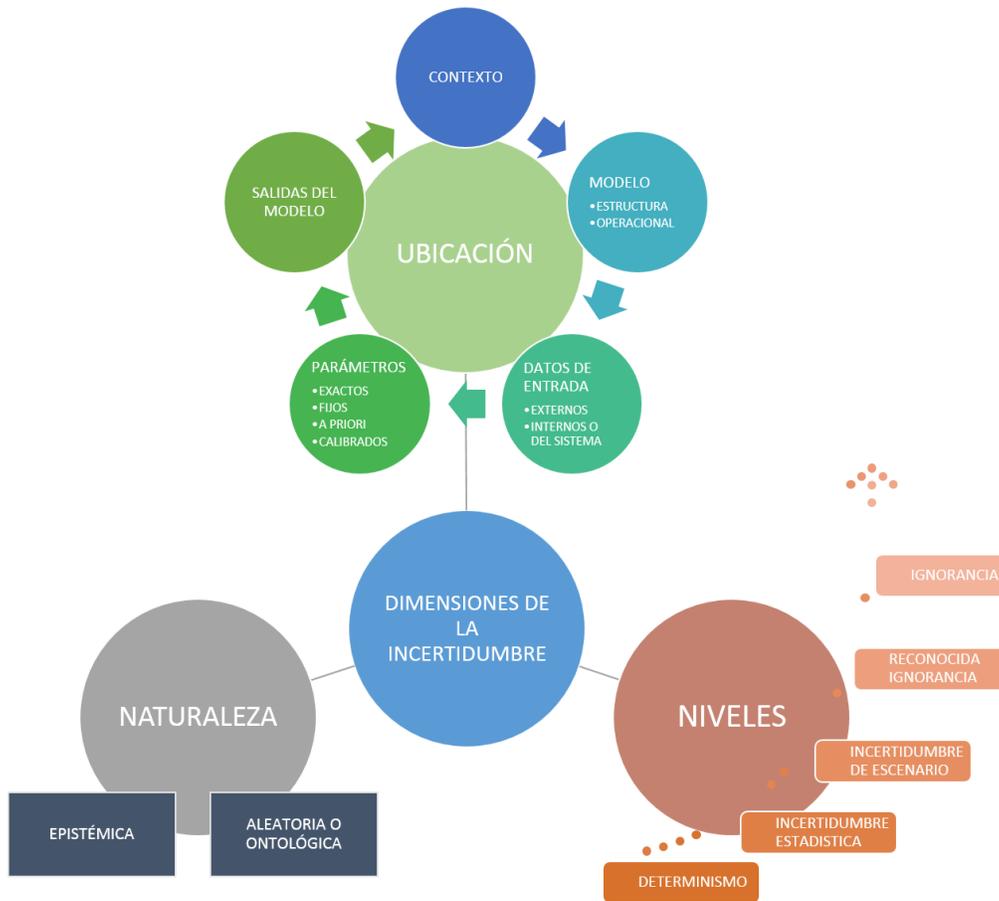


Figura 3-1 Dimensiones de la incertidumbre (Walker et al. 2003).

A continuación, las secciones siguientes describen cada una de estas dimensiones en mayor detalle.

3.2.2. Ubicación de la incertidumbre

Esta dimensión se refiere a la lógica estructural de un modelo genérico del sistema, dentro del cual, es posible ubicar las diversas fuentes de incertidumbre dentro de la estimación de las consecuencias de interés.

Idealmente, la ubicación se deberá caracterizar en una forma que sea operacionalmente benéfica y que permita identificar en qué lugar del modelo se genera la incertidumbre asociada con el resultado. Dentro de esta dimensión se tienen las siguientes formas en las que puede existir:

Incertidumbre de contexto: está relacionada con la ambigüedad en la definición de las condiciones de frontera del modelo. Es decir, con su adecuada representación dentro del modelo, se refieren a las circunstancias que determinan la selección de una frontera de modelo. En un marco más general, esta incluye aquella incertidumbre relacionada con las situaciones económica, ambiental, política, social y tecnológica que conforman el contexto de problema en estudio (Dunn 2001).

Incertidumbre de modelo: Se refiere a la incertidumbre en ambos, el modelo conceptual (ej. variables y las interrelaciones seleccionadas para describir el sistema, ubicadas dentro de sus fronteras) y errores técnicos de cómputo. En este sentido, la incertidumbre del modelo puede dividirse en dos partes: **del modelo estructural**, que se da como resultado de la forma del modelo en sí misma, es decir, por la falta de conocimiento para entender o representar de una forma adecuada al sistema. Esta forma de incertidumbre involucra las relaciones entre los datos de entrada, las variables, y entre variables-resultado, dentro de la frontera del sistema, su forma funcional, la definición de variables y parámetros, las ecuaciones e hipótesis y los algoritmos matemáticos. Por otro lado, **incertidumbre técnica del modelo**, se presenta a raíz errores en el hardware ej. fallas de fábrica en los equipos de medición o errores tipográficos en el código fuente de los programas (Sluijs 1997).

Incertidumbre en los valores de entrada: se asocian a la descripción del sistema de referencia en su estado actual, y con los forzamientos externos que inciden sobre el sistema, su referencia, funcionamiento y respuesta.

Incertidumbre de parámetros: está asociada con los datos y métodos utilizados para calibrar los parámetros del modelo. En otras palabras, las constantes del modelo, supuestamente invariantes dentro de cada contexto y escenario establecido. Existen parámetros exactos tales como el valor de las constantes universales π y e . Parámetros fijos que están muy bien definidos por investigaciones previas y pueden ser considerados exactos, como el valor de la gravedad en un punto particular de la tierra. Además hay parámetros seleccionados *a priori*, los cuales son difíciles de identificar por medio de un

proceso de calibración, y se eligen fijos en un valor considerado constante. Los parámetros calibrados, representan incógnitas que no pueden ser transferidas de otras investigaciones, debido por ejemplo, a diferencias en las condiciones iniciales. Éstos se deben definir, por medio de un proceso de calibración que se lleva a cabo a través de la comparación de resultados del modelo con registros históricos.

Incertidumbre en el resultado del modelo: es la incertidumbre acumulada generada por las incertidumbres en todas las ubicaciones anteriores (contexto, modelo, valores de entrada y parámetros), que se propagan a través del modelo hasta el resultado de interés. También conocido como error en la predicción, ya que representa la discrepancia entre el valor verdadero de un resultado y el valor determinado por el modelo. Si los valores verdaderos son conocidos (lo que es raro incluso para modelos científicos), es posible realizar un ejercicio de validación para comparar los valores predicho y verdadero, que permitan establecer el error en la predicción.

3.2.3. Niveles de la incertidumbre

Cada etapa del proceso de pronóstico induce errores, por ejemplo, puede haber problemas en la adquisición de datos en campo o limitaciones en el conocimiento que redundarán en una reducción de la capacidad de los modelos para representar la realidad de forma fidedigna. Contrario a lo que se piensa de forma general, existe un espectro completo de niveles de conocimiento, que abarcan desde el ideal inalcanzable de un conocimiento determinista completo, en un extremo de la escala, hasta la ignorancia total en el otro. En muchos casos, es necesario tomar decisiones cuando existe una falta de certeza en la situación futura o sus consecuencias, o cuando algunos de los posibles cambios en sí mismos son desconocidos. Es justamente esta zona gris, entre lo enteramente conocido y lo desconocido, que el grado de incertidumbre e ignorancia deben ser considerados en la toma de decisiones. La meta última en la toma de decisiones con incertidumbre, debe ser la reducción de los impactos no deseados y la eliminación de sorpresas (ej. impactos no esperados), en lugar de hacer énfasis en su eliminación completa (Dewar 2002).

Diversos autores, han señalado la necesidad de clasificar la incertidumbre en diferentes niveles (Wynne 1992, Van Asselt and Rotmans 2002, Leung et al. 2015, Walsh et al.

2015). Esencialmente, se argumenta que las evaluaciones numéricas del riesgo están condicionadas a las hipótesis de los modelos, por lo que se requieren diferentes tipos de incertidumbre para justificar su validez. La Figura 3-2 presenta un diagrama de la terminología necesaria para la identificación de los niveles de incertidumbre. Por ejemplo, la indeterminación se presenta cuando existe la duda abierta sobre la posibilidad de adaptar un conocimiento dado (ej. modelo) a un problema práctico específico. Mientras que la ignorancia total, representa todo aquello que desconocemos de lo que todavía no sabemos, y que por definición no podemos identificar.

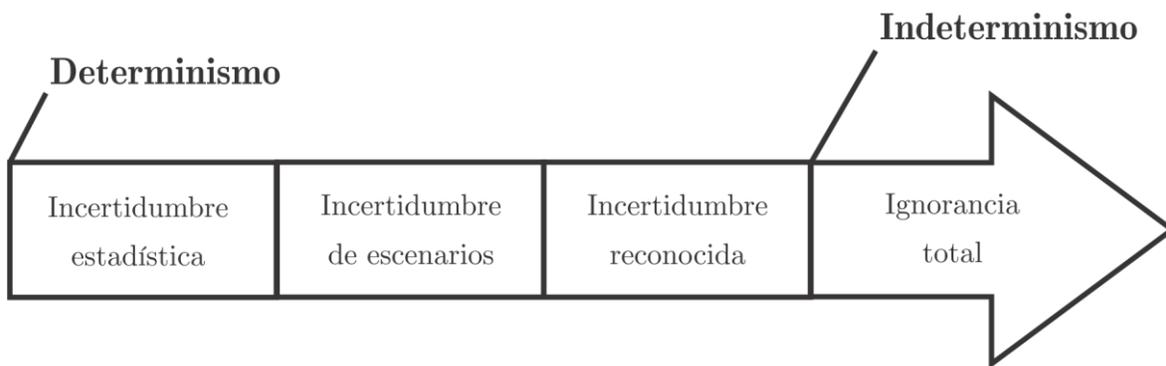


Figura 3-2 Esquema de la transición progresiva entre determinismo e ignorancia total (Pedrozo et al 2013).

Siguiendo el marco de trabajo propuesto por (Wynne 1992) y modificado por (Spiegelhalter and Riesch 2011), se acepta que existen 5 niveles de incertidumbre tal y como se presenta en la Figura 3-3. Los tres primeros niveles reflejan las medidas estadísticas de la incertidumbre que son tradicionales, las cuales están sujetas a hipótesis explícitas o implícitas. Los dos niveles restantes crean premisas incondicionales o implícitas, sobre la pertinencia del modelo en el contexto de análisis, donde los niveles 4 y 5 corresponden a la *indeterminación* e *ignorancia* propuestos por Wynne.

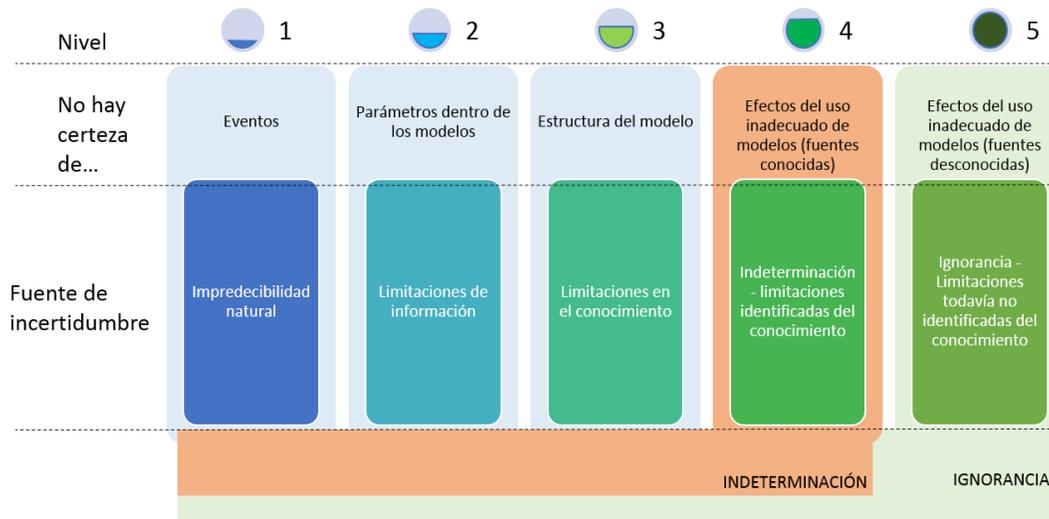


Figura 3-3 Niveles de incertidumbre. Los tres primeros son jerárquicos, 4 y 5 aplican para todo el proceso de modelación.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de los niveles identificados.

Nivel 1. La incertidumbre sobre una lista de eventos posibles

Es una impredecibilidad esencial que se genera por la aleatoriedad, errores en la medición, o por asumir que el proceso es determinista pero caótico, tal y como se hace en la predicción del clima. En estos casos, es natural el deseo de utilizar distribuciones de probabilidad completas para expresar la incertidumbre de los eventos; y en la ausencia de otras incertidumbres, esta puede suponerse conocida en función del modelo matemático utilizado. Desde luego, en la práctica, la hipótesis de que podemos enlistar todos los posibles eventos futuros es una simplificación, y las dudas sobre ésta se expresan en los niveles 4 y 5, ya sea de manera informal o cuantitativa por medio de funciones de distribución que retienen alguna probabilidad para eventos sin especificar.

Nivel 2. Incertidumbre en los parámetros del modelo:

Este nivel refiere a que cualquier modelo que sea base de un análisis de riesgo, y se suponga correcto, contiene parámetros que intentarán representar estados idealizados de

la naturaleza. Por ejemplo, la relación lluvia-escorrentía para una cuenca. También, están incluidas en este aspecto variables de entrada como los forzamientos de los modelos climáticos. La incertidumbre en estos parámetros da como resultado un incremento en la incertidumbre de las probabilidades de eventos futuros, y se debe esencialmente, a las limitaciones de la información, en particular a la falta de datos de calidad.

Nivel 3. Incertidumbre sobre cuál modelo es el mejor

Los modelos matemáticos del riesgo, representan idealizaciones de cómo funciona el mundo, e intentan capturar las características esenciales de la amenaza en estudio. En algunos casos especiales, es posible expresar la incertidumbre en los diferentes modelos y sus estructuras, por medio de la teoría Bayesiana de probabilidades (Hoeting et al. 1999). Sin embargo, se considera apropiada una exploración determinista de su sensibilidad, por medio de un análisis cualitativo de la relativa plausibilidad de los modelos/escenarios.

Nivel 4. Incertidumbre sobre las inadecuaciones conocidas del mejor modelo:

Incluso el mejor modelo imaginable tiene limitaciones, que pueden ser importantes para la correcta estimación del riesgo que se desea caracterizar. Existen un rango de formas para expresar este tipo de incertidumbre, en especial, podemos denominarlas como "sorpresas imaginables", esas son cosas que suponemos pueden ocurrir, pero que por limitaciones del conocimiento no es posible incluir en el modelo.

Nivel 5. Incertidumbre sobre las inadecuaciones desconocidas de todos los modelos:

Este nivel comprende las dudas sobre el proceso de modelado en su conjunto. Es posible expresarla en función de nuestra confianza en el entendimiento básico, la calidad de la evidencia que da soporte al análisis o nuestra ignorancia. Es decir, esta incertidumbre se encuentra donde hay falta de voluntad para expresar las razones de esas dudas. Desde

luego, es importante hacer distinción entre la ignorancia reconocida o consciente, en donde tenemos identificado lo que no sabemos y la meta-ignorancia donde ni siquiera se considera la posibilidad del error (Bammer and Smithson 2012).

3.2.4. Naturaleza de la incertidumbre

La tercera dimensión de la incertidumbre, corresponde como su nombre lo indica a su naturaleza. Un rasgo importante de ésta consiste en la distinción entre dos extremos:

- **Incertidumbre epistémica o epistemológica:** Es la que se debe a la imperfección de nuestro conocimiento, y que es posible reducir por medio de más investigación y esfuerzos empíricos/experimentales. Por ejemplo, datos incompletos o imprecisos, errores de medición, conocimiento limitado e incompleto, modelos imperfectos, juicios subjetivos, ambigüedades, etc.

- **Incertidumbre aleatoria u ontológica:** Está asociada a la variabilidad inherente, y es especialmente aplicable a los sistemas naturales y humanos por lo que concierne a los desarrollos sociales, económicos y tecnológicos. Como resultado de la naturaleza del fenómeno en estudio, muchas variables empíricas (propiedades medibles del mundo real que se simulan) varían en espacio y tiempo, de una forma que está fuera de nuestro control. Esta variación se asocia a los datos y funciones de entrada, los parámetros, y la estructura del modelo. Es posible distinguir tres distintas fuentes de incertidumbre aleatoria, la primera como resultado del caos o variabilidad natural de los procesos (Schön and Rein 1995), la segunda debida a la variabilidad en el comportamiento social o humano, esto es, el comportamiento irracional y la tercera la variabilidad social que se genera por la impredecibilidad de los procesos sociales que inciden en la dinámica social, económica y cultural (Marchi 1995).

Esta distinción, nos permite entender mejor cómo se pueden manejar las incertidumbres específicas. En el caso de la incertidumbre epistémica, estudios adicionales permiten incrementar la calidad de nuestro conocimiento y por lo tanto, la calidad de nuestro

resultado. Sin embargo, en el caso de la incertidumbre aleatoria, la investigación adicional puede no resultar en un mejoramiento de la calidad del resultado. La revisión de estos conceptos, presentada por Baecher and Christian (2000) representa un buen punto de partida para su consideración en los procesos de análisis de riesgo. Un error muy común, consiste en la dificultad para distinguir entre la naturaleza de la incertidumbre, aleatoria vs. Epistémica. Por ejemplo, en la variación estacional de la precipitación extrema que da lugar a las inundaciones (Mikkelsen et al. 2005).

3.2.5. La incertidumbre en la evaluación del riesgo

Cada etapa del proceso de pronóstico induce errores, por ejemplo, fallas en las observaciones y en la habilidad de los modelos para representar la realidad; los modelos representan idealizaciones de procesos naturales generalmente más complejos. Como se ha mencionado, los modelos que generan pronósticos están sujetos a incertidumbres de naturaleza epistémica (limitaciones del conocimiento), además de las asociadas a los datos de entrada, los errores de los datos geográficos y la falta de datos de campo para su correcta calibración ej. (Rauch et al. 2002, Korving et al. 2009, Reeve et al. 2011).

Con las herramientas numéricas disponibles para la predicción de amenazas en el medio ambiente, se hace necesaria la incorporación explícita de las limitaciones en los modelos para representar la realidad. El proceso de estimación de la incertidumbre presenta un marco de trabajo útil para estructurar esta discusión. De hecho, Faulkner et al. (2007) sugieren la necesidad de desarrollar, con la opinión de los interesados, códigos de mejores prácticas en diferentes áreas de aplicación.

En situaciones de riesgo, gran parte de las decisiones se realizan sobre condiciones de incertidumbre (Merz, Kreibich and Apel 2008, Paté-Cornell 1996). Por ejemplo, la puesta en marcha de un plan de emergencia, la planeación de una obra de protección o el análisis técnico de un evento caótico, requieren que los mecanismos de evaluación y análisis de riesgo se soporten sobre bases confiables para la toma de decisiones. Sin embargo, como se ha mencionado en la sección anterior, existen diferentes tipos de incertidumbre que impiden un resultado preciso en la evaluación del riesgo, sean estas controlables (epistémica) o no controlables (aleatoria). De acuerdo con (Merz et al. 2010), se puede afirmar que la incertidumbre en el riesgo responde a las siguientes condiciones:

- *El riesgo es una entidad dinámica:* la cual va cambiando en magnitud y frecuencia conforme al aumento en la complejidad de los elementos que la componen.
- *La contribución de los diferentes actores involucrados en el riesgo es desconocida:* No se sabe a ciencia cierta la contribución individual de los sistemas económicos, sociales, ambientales, políticos y tecnológicos en la construcción del riesgo, y como estos pueden ser modificados por los efectos del cambio climático.
- *Los sistemas de predicción del riesgo son inciertos:* Los sistemas de predicción aun presentan incertidumbres estocásticas, producto del desconocimiento de los procesos físicos que representan. Además de ello, estos modelos se encuentran basados en parámetros estacionarios y no permiten recrear el dinamismo de los sistemas afectables.

Dentro del contexto de inundaciones e hidrología, el proceso de control del riesgo está compuesto por tres componentes principales (Plate 2002): a)El análisis del riesgo; b)Las medidas de mitigación, y c)Las actividades relacionadas con la preparación ante una contingencia. La primera de ellas considera el estudio de los orígenes de la amenaza, la probabilidad de los eventos no deseados y los daños y consecuencias fruto de su incidencia. En general, considera la caracterización de la amenaza, el análisis de vulnerabilidad, y la determinación del nivel de riesgo. Las medidas de mitigación comprenden todas aquellas actividades de mejoramiento y mantenimiento de los sistemas expuestos con el fin de reducir el riesgo. Estas pueden ser estructurales como la construcción física de bordos o diques, o no estructurales como soluciones o prácticas basadas en el conocimiento (e.g. planes de desarrollo urbano; ordenamiento territorial, etc.). Por último, la preparación contiene todas las acciones no estructurales encaminadas a la preparación ante el desastre como son, el alertamiento temprano, la planeación de operaciones de auxilio y la evacuación de la población.

Los modelos numéricos forman parte fundamental en el marco de trabajo dentro del proceso de toma de decisiones. De hecho, generalmente es el caso que una agencia o compañía responsable en tomar decisiones, comisionará un estudio de modelización de tal suerte que pueda llevar a cabo su tarea correspondiente, en el sentido de que resultados científicos le permitan justificar una decisión dada. Tal es el caso de la definición de zonas proclives a inundación para efectos de planeación urbana y ordenamiento territorial a través de técnicas de modelización conocidas.

Naturalmente, la evaluación y cuantificación de la incertidumbre en los resultados es indispensable para una adecuada comunicación del riesgo hacia la sociedad y los tomadores de decisiones. Sin embargo, esta actividad puede resultar complicada e incluso algunas veces confusa. A pesar de ello, esta actividad es crítica para todos los elementos que comprenden la evaluación del riesgo, ya que lo transforma en un proceso flexible que permite ser rediseñado de acuerdo con la complejidad del sistema evaluado y en función de la disponibilidad de nuevo conocimiento (Abt et al. 2010).

La incertidumbre en la predicción implica un riesgo de error en la evaluación de la respuesta ante un cambio o una estrategia de gestión. En situaciones donde una decisión deba tomarse, el riesgo de una equivocación puede implicar serias consecuencias económicas. La pregunta más importante consiste en responder si la consideración de la incertidumbre afecta la naturaleza de la decisión. La respuesta a esta interrogante es definitivamente sí. Por ejemplo, durante los últimos treinta años, la industria nuclear ha demostrado que es necesaria la inclusión de la incertidumbre en los sistemas de apoyo a la decisión (Reinert and Apostolakis 2006). La forma en la que la incertidumbre afecta una decisión dependerá del contexto en el que esta se toma. En problemas de modelización del medio ambiente, como el cambio climático global o las inundaciones, el contexto de la decisión debe ser ampliado de tal forma que incluya los efectos de la incertidumbre epistémica a una amplia gama de interesados.

La evaluación del riesgo para diferentes opciones de decisión requiere la estimación de dos componentes principales: la probabilidad de ocurrencia del evento y la estimación de sus consecuencias (Kaplan and Garrick 1981). La determinación cuantitativa del riesgo, requiere que ambos componentes sean expresados en términos numéricos. Dentro de un análisis probabilista del riesgo, la posibilidad de ocurrencia de un evento se expresa en función de su probabilidad, de tal forma que la suma de las probabilidades sobre todos los posibles eventos es igual a la unidad (ver por ejemplo, (Bedford and Cooke 2001)). Las consecuencias de un evento se expresan de forma general en relación al costo (ej. daños esperados) pero también puede expresarse en función de la pérdida de esperanza de vida u otra medida de severidad.

De acuerdo con el marco de trabajo presentado por (Stirling 2003), la Figura 3-4 provee una vista general de las respuestas metodológicas frente a diferentes grados de certeza en ambos, las consecuencias y las probabilidades. La manera más sencilla de trabajar con incertidumbre es por medio del análisis de sensibilidad de las variables. Esta

herramienta se utiliza para conocer y entender el comportamiento del modelo por medio de la sensibilidad de los resultados a alteraciones en las variables de entrada y sus parámetros, los cuales no pueden ser conocidos con entera certeza. Otra metodología, más demandante, es aquella que se denomina propagación de la incertidumbre en los modelos. Esta concierne a la estimación del riesgo asociado a la salida y la distribución de probabilidad de las variables resultantes, dada una incertidumbre en los parámetros y variables de entrada. La implementación más simple de la propagación de la incertidumbre, involucra la definición de una distribución conjunta en parámetros seleccionados, para posteriormente propagar su incertidumbre hasta el resultado del modelo. Otra implementación más compleja comprende el modelado de ciertas variables de interés como procesos estocásticos. Para propósitos computacionales, la propagación de la incertidumbre involucra el muestreo de una distribución conjunta por medio de un método de tipo Monte-Carlo o - si este es demasiado demandante- una simulación Monte-Carlo reducida, por ejemplo usando el muestreo Latin Hypercube (Houska et al. 2014).

Recientemente, dentro del campo de gestión de recursos hídricos, se ha comenzado con la introducción de nuevas metodologías para enfrentar la incertidumbre del futuro. Por ejemplo, el desarrollo de planes de aseguramiento contra inundaciones, mapas de riesgo por inundación, y metodologías que consideran al manejo integral del riesgo han recibido particular atención.

El análisis de escenarios es una metodología que tiene como propósito entender los efectos de la incertidumbre en el resultado del modelo, este se lleva a cabo a través de la simulación de diversos escenarios posibles, cada uno de los cuales es definido en función de hipótesis consistentes sobre los forzamientos y las relaciones entre las variables clave dentro del problema. En este caso, los escenarios no representan predicciones del futuro, sino simplemente visiones sencillas y lógicas en el largo plazo.



Figura 3-4 Metodologías para enfrentar las diferentes formas de incertidumbre (basado de Stirling (2007)) .

En el caso de hacer frente a condiciones de ignorancia, esta tiene dos componentes principales, por un lado la imperfección del conocimiento científico y por otro, la impredecibilidad natural de los sistemas. La incertidumbre epistémica, implica que en principio el conocimiento base puede ser mejorado a través de más investigación, monitoreo o adquisición de datos. En este extremo, el método científico puede trabajar de manera gradual hacia la reducción de la incertidumbre en un problema dado, o al menos a su tratamiento específico. En este contexto, métodos para la evaluación y cuantificación de los efectos de la incertidumbre en los modelos son muy útiles.

A pesar del interés filosófico en el conocimiento, la ignorancia pone de manifiesto un sinnúmero de problemas en relación con lo no esperado, por ejemplo: ¿Hasta qué punto la ignorancia es perdonada como inocencia?, ¿Cuándo la ignorancia se transforma en incompetencia?, ¿Cuál es la respuesta apropiada ante la ignorancia irreductible? éstas no son preguntas exclusivamente filosóficas, sino que tienen asociadas una gran cantidad de implicaciones prácticas en el diseño ingenieril de las obras; y sobre todo en la evaluación de las responsabilidades judiciales cuando la falla ocurre. Es evidente que estos problemas no son solamente científicos, sino que poseen un contexto sociológico. La ignorancia se puede evaluar en el contexto de un grupo social en particular o de un individuo. Necesariamente, cambiará con el tiempo y la dinámica del grupo en interacción con otros grupos. La ignorancia, como un complemento del conocimiento, es como el

conocimiento mismo un constructo social. La parte interesante de la ignorancia en el contexto de modelación del medio ambiente, consiste en que estamos satisfechos con un marco de trabajo cuantitativo para enfrentar la incertidumbre pero somos ignorantes cuando se trata de hipótesis específicas sobre la naturaleza de esas incertidumbres.

Desde luego, este no es un problema nuevo, es tan viejo como la historia de las herramientas de diseño, máquinas y estructuras; en el sentido de que existe alguna experiencia en el pasado que documenta su éxito y falla, pero se desconoce a qué fuerzas estará expuesta en el futuro. Esto mismo ocurre con los modelos hidrológicos e hidrodinámicos, tenemos cierta experiencia de éxito y fracaso en la calibración de los mismos, pero no estamos seguros de las condiciones de frontera y los cambios que puedan ocurrir en un futuro.

En el contexto de diseño ingenieril, una forma de manejar la ignorancia de condiciones futuras ha sido a través del desarrollo del concepto de *Factor de Seguridad*. Para una estructura, el factor de seguridad se define como la proporción entre el esfuerzo actuante sobre la estructura y el esfuerzo crítico de falla para un diseño particular. Es entonces un problema de estándares negociados respecto al factor de seguridad aceptable para un tipo de aplicación dada. Pueden haber diversas fuentes de esfuerzos e incertidumbre relacionadas con la especificación de los esfuerzos y el diseño, que a su vez vuelven una enorme tarea la evaluación de factores de seguridad apropiados, sobre todo en problemas de diseño complejos. Eso es lo que ahora se conoce como análisis de confiabilidad (ej. (Blockley 1992)). Estas incertidumbres quieren decir que los diseños necesitan cierto grado de robustez. Al mismo tiempo de que existe la posibilidad de ahorro en la optimización del diseño, también existe el riesgo de falla como resultado del desprecio de la incertidumbre. Un ejemplo interesante es el uso del bordo libre como factor de seguridad en el diseño de bordos contra inundaciones, tal y como lo discute Hine (2007).

3.2.6. Evaluación de la incertidumbre en el mapeo de inundaciones

Existe una gran variedad de fuentes de incertidumbre que surgen en la producción de mapas de inundación. Algunas de estas están relacionadas con la variabilidad natural en

la ocurrencia de los eventos y otras están más asociadas a las limitaciones del conocimiento sobre la naturaleza de la avenida y su propagación, incluyendo la geometría del cauce y la infraestructura en la planicie de inundación.

Diversos estudios han confirmado que existe una gran cantidad de incertidumbre involucrada en la predicción de zonas inundadas utilizando modelos hidráulicos (ver por ejemplo, (Aronica et al. 2002, Aronica et al. 1998, Bates et al. 2004, Pappenberger et al. 2007b, Pappenberger et al. 2007a, Pappenberger et al. 2006, Pappenberger et al. 2005, Romanowicz and Beven 2003).

En una discusión reciente publicada en “Water Resources Research” en 2006, (Pappenberger and Beven 2006) presentaron siete razones para no utilizar el análisis de incertidumbre. Las razones esbozadas fueron las siguientes:

1. El análisis de incertidumbre no necesariamente resulta en modelos físicamente reales.
2. El análisis de incertidumbre no sirve para aumentar el conocimiento.
3. Las distribuciones de incertidumbre son incomprensibles para tomadores de decisiones y público en general.
4. El análisis de incertidumbre no puede ser incorporado al proceso de toma de decisiones.
5. El análisis de incertidumbre es muy subjetivo.
6. El análisis de incertidumbre es muy difícil de realizar.
7. La incertidumbre no importa en la decisión final.

Tal y como lo mostraron en su discusión, cada una de las siete razones anteriores carecen de validez en muchas aplicaciones (ver también (Beven 2009), más aún, en aquellas donde la estimación de la incertidumbre no está limitada por condiciones de cómputo.

El mapeo de inundaciones se utiliza para diferentes propósitos incluyendo el diseño de defensas, la planeación de emergencias, y el análisis de daños por inundación para una variedad de necesidades, entre las que destacan las de la industria aseguradora. La

planeación de emergencias y los análisis de daño dependen también del mapeo de las profundidades (y velocidades) de inundación.

Por lo tanto, se propone que un análisis de incertidumbre estará siempre justificado como una forma de expresar el nivel de confianza en las predicciones de un modelo, pero es importante que el esfuerzo requerido en la realización de este análisis sea proporcional al costo y los beneficios potenciales. Esto ha sido reconocido, por ejemplo, en los procedimientos implementados en Holanda por la Agencia de Evaluación Ambiental, que provee una metodología en etapas que consideran desde un análisis cualitativo de la incertidumbre hasta un análisis cuantitativo y detallado en algunas aplicaciones que así se justifiquen (Van der Sluijs et al. 2008).

Un análisis minucioso de la incertidumbre, que represente el nivel de confianza en las predicciones de un modelo, será de mayor importancia cuando por ejemplo, sus resultados modifiquen una decisión (y si la decisión está asociada a la mitigación de amenazas a la vida humana, o al daño anual esperado). Esto depende de manera crítica de la no-linealidad de cualquier consecuencia o función de vulnerabilidad en la predicción de las velocidades y profundidades de flujo.

Existe además otro aspecto importante sobre la proporcionalidad que necesita ser considerado dentro del marco de trabajo. Se debe reconocer también, que cualquier evaluación de la incertidumbre está condicionada a la información disponible. Mayor cantidad de información puede reducir la incertidumbre e incrementar el nivel de confianza en los modelos, y se debe reconocer que algunas piezas de información pueden ser mucho más efectivas en la limitación de la incertidumbre que otras.

3.3. Marco de trabajo para la evaluación de la incertidumbre en el mapeo de inundaciones

El marco de trabajo que permite la evaluación de la incertidumbre en la elaboración de mapas de inundación, está contenido en la metodología fuente-ruta-receptor que ha sido ampliamente utilizado en evaluaciones de riesgo. En este caso la teoría de probabilidades provee una metodología formal para lidiar con la incertidumbre (ver por ejemplo, (Goldstein and Rougier 2009), pero no todas las incertidumbres son fácilmente evaluadas

como probabilidades. En particular es necesario diferenciar entre incertidumbres que se derivan por la variabilidad natural de aquellas de origen epistémico, cuando un análisis de sensibilidad o escenarios es más apropiado.

3.3.1. Fuentes de incertidumbre

La elaboración de mapas de inundación incorpora una gran variedad de fuentes de incertidumbre dentro del sistema fuente-ruta-receptor, sin embargo este marco de trabajo permite la cuantificación de los efectos de diferentes fuentes de incertidumbre en el mapa de inundación (Beven et al. 2011). En este esquema, las fuentes de incertidumbre pueden resumirse como sigue:

- **Incertidumbre en las fuentes fluviales de la inundación**
 - En la magnitud de la avenida de diseño
 - En la evaluación de los efectos del cambio climático
 - En la evaluación de los efectos de cambios futuros en la cuenca.
- **Incertidumbre en las rutas**
 - En la estructura del modelo hidrodinámico
 - En la extrapolación de la curva gasto-elevaciones
 - En los efectos sobre la infraestructura de la llanura
 - En el desempeño de las estructuras de defensa (ej. bordos, compuertas)
- **Incertidumbre en los receptores**
 - En la vulnerabilidad y las consecuencias.
- **Decisiones para la implementación de un análisis de incertidumbre**
 - Definición de interacciones entre diferentes fuentes de incertidumbre
 - Definición del proceso de propagación de la incertidumbre (incluyendo un análisis de sensibilidad)
- **Decisiones en el condicionamiento de la incertidumbre por medio de datos medidos**
 - Incertidumbre en los datos medidos
 - Definición del proceso de condicionamiento.

Cabe resaltar, que dependiendo del caso de aplicación de este marco de trabajo, las incertidumbres aquí mencionadas serán más o menos relevantes, y se acepta que un análisis cuantitativo detallado de la incertidumbre será proporcional a la importancia de las decisiones asociadas con el resultado. A pesar de ello, el marco de trabajo aquí presentado es lo suficientemente universal para utilizarlo sin importar el nivel de análisis a realizar.

La Figura 3-5 presenta una representación gráfica las fuentes de incertidumbre descritas y su ubicación dentro del marco de trabajo para la generación de mapas de inundación.

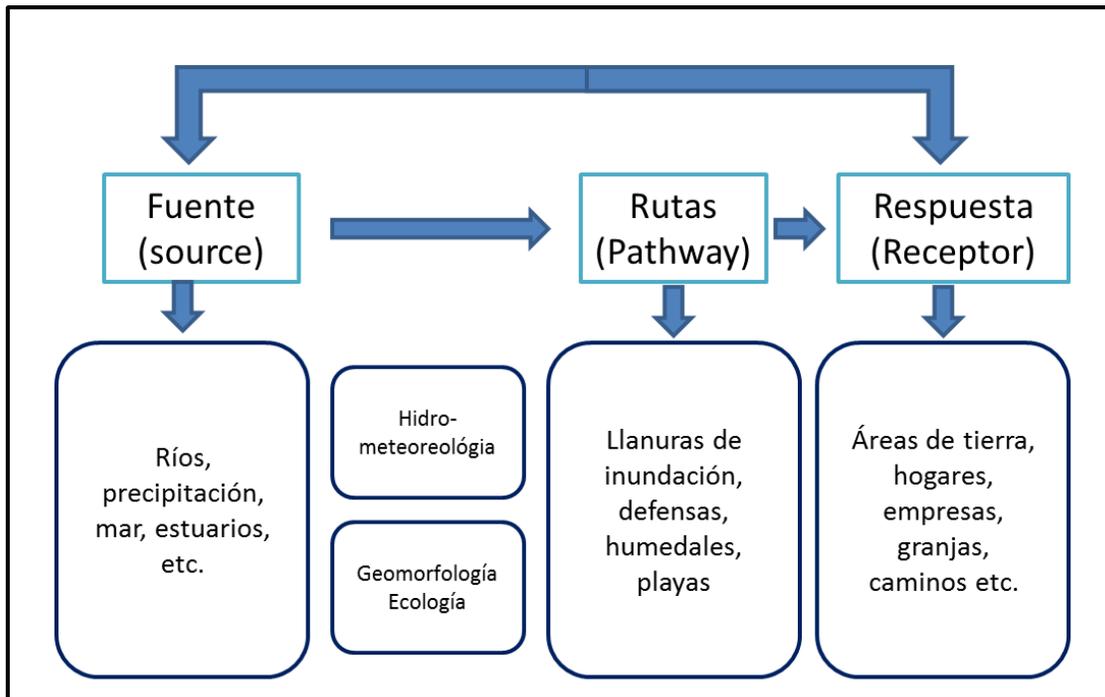


Figura 3-5 Ubicación de las fuentes de Incertidumbre en el marco de trabajo para la generación de mapas de inundación (Pedrozo Acuña 2012).

3.3.2. Incertidumbre en las fuentes fluviales de la inundación

Por lo general, se considera a la incertidumbre asociada por la determinación de la magnitud de la avenida de diseño, como un problema estadístico que depende de la selección de la distribución de probabilidad de excedencia. Tal y como ocurre en cualquier ajuste estadístico de una distribución a un conjunto de datos, la estimación de la incertidumbre resultante refleja los errores debidos a la variabilidad del muestreo bajo la

hipótesis de que la distribución elegida representa de manera adecuada los datos. Esto es muy importante en el caso de los valores extremos, ya que las características de distribuciones de probabilidad distintas tendrán su máxima variación en el comportamiento de las colas de la distribución.

Por otro lado, es por lo general una incertidumbre que es frecuentemente ignorada u obviada es la que corresponde a la correcta medición de los caudales máximos durante las inundaciones. Estos caudales, frecuentemente involucran el desbordamiento de los ríos de su cauce lo que constituye un problema mayor para su adecuado monitoreo. Las primeras estimaciones tienen su base en curvas gasto-elevación del sitio, lo que redundo en imprecisiones muy grandes para los casos más extremos. De hecho, eventos analizados en campañas de campo posteriores al mismo han dado pie a modificaciones severas en la estimación del gasto pico durante una inundación. Tal y como ocurrió en Reino Unido, en el evento que azotó la ciudad de Carlisle en enero de 2005, cuando un análisis post-inundación indicó que el gasto pico fue 60% mayor al inicialmente estimado (Beven et al. 2011). En Estados Unidos, discrepancias similares han sido reportadas por (Costa and Jarrett 2008), mientras que en México también se observaron diferencias para el gasto pico estimado durante el evento de inundación que azotó la zona de Acapulco Diamante en septiembre de 2013 (Pedrozo-Acuña, Breña-Naranjo and Domínguez-Mora 2014a). Se anticipa, que esta incertidumbre será más importante en aquellos casos en los que no haya información suficiente o que no se encuentren monitoreados.

En el caso de cuencas no instrumentadas, existen una amplia variedad de métodos para la realización del análisis de frecuencias. Estos incluyen métodos de escala, de cuencas donadoras de datos y de regresión de características físicas de la cuenca (ej. (Kjeldsen 2007)).

3.3.3. Incertidumbre por los efectos del cambio climático

El análisis clásico de frecuencia de los caudales tiene su base en la hipótesis de estacionariedad de la cuenca. En virtud de que el reciente reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, concluye que es altamente probable que los cambios recientes en el clima global, se deben a impactos antropogénicos sobre el sistema terrestre (IPCC 2013) es difícil sostener la hipótesis de estacionariedad futura en

la frecuencia de las inundaciones (Milly et al. 2008). La naturaleza del cambio climático del futuro y cómo éste modificará la frecuencia de los eventos extremos, permanece como una gran incertidumbre.

Por ejemplo, en el Reino Unido, este efecto se representa de manera metodológica aumentando un 20% la magnitud del caudal para representar de una manera gruesa el impacto potencial del cambio climático. Este porcentaje tiene su base en el análisis del cambio promedio observado en la magnitud del valor con probabilidad de excedencia de 0.01 en estudios de simulación propuestos para diversas cuencas (Reynard, Prudhomme and Crooks 2001).

La pregunta clave consiste en cómo incorporar los cambios futuros en el clima en el análisis de la frecuencia de inundaciones. La mayoría de los estudios involucran los siguientes tres pasos:

1. Calibrar un modelo lluvia-escurrimiento para una cuenca utilizando información histórica.
2. Modificar las entradas al modelo (precipitación) utilizando los factores de cambio definidos en las predicciones de clima.
3. Modelar estos nuevos escenarios con el modelo lluvia-escurrimiento para producir los gastos bajo estas condiciones de cambio.

A pesar de la gran cantidad de estudios que utilizan estos pasos, son pocos los que han considerado una evaluación de la incertidumbre en el modelo lluvia-escurrimiento. Con excepciones presentadas por (Cameron, Beven and Naden 2000, Lamb and Kay 2004, Wilby and Harris 2006). Sin embargo, cabe mencionar que en estas predicciones hay una gran cantidad de incertidumbre epistémica involucrada. Quizás las decisiones más importantes para lidiar con los efectos del cambio climático sobre las avenidas, consiste en la selección del método a elegir de manera precautoria y el rango en el que los posibles gastos modificados deberán recaer para ser considerados en el análisis.

3.3.4. Incertidumbre en los efectos del cambio en las cuencas

Otro aspecto importante es aquél que tiene que ver con las alteraciones en las cuencas que tienen que ver con los cambios en el uso de suelo y el manejo de la tierra. La

intensificación de las actividades agrícolas, la urbanización y la deforestación son fenómenos que tienen un efecto sobre la magnitud del escurrimiento en ambos, pasado y futuro. A pesar de ello y salvo en cuencas pequeñas, en donde el cambio en cobertura vegetal o la urbanización han afectado considerablemente una gran área de la cuenca, en el caso de cuencas grandes esta conclusión ha sido difícil probar (ej. (O'Connell et al. 2005, Beven et al. 2008)). Lo anterior no significa que no exista este efecto en cuencas grandes, sino que más bien este no es detectable dadas las grandes incertidumbres involucradas en las observaciones hidrológicas.

3.3.5. Incertidumbre en la estructura del modelo hidrodinámico

Los modelos numéricos utilizados para resolver problemas de inundación en la hidráulica fluvial y la hidrología, cubren un amplio espectro de metodologías. De manera más común, se utilizan modelos unidimensionales con secciones transversales, modelos bidimensionales con diferentes grados de aproximación a las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento (simplificados y completos). La Tabla 1 presenta un resumen de los diferentes métodos para el modelado hidrodinámico de inundaciones en orden descendente de complejidad hidráulica, junto con alguna referencia de aplicación.

De hecho, cada modelo proveerá diferentes predicciones de la inundación además de que cada uno, provee distintas maneras de implementar y manejar condiciones de frontera y estructuras hidráulicas dentro del dominio de estudio. Por lo que, tal y como lo reportan (Néelz and Pender 2010) diferentes implementaciones del mismo modelo proveerán diferentes predicciones de la inundación.

Adicionalmente, (Kirby and Ash 2000) reconocen una variedad de factores que pueden afectar una inundación y que pueden no estar consideradas en estudios de modelación numérica, estos son: los efectos de asentamientos del terreno, la sedimentación de los cauces y la sobreelevación del agua en los meandros que producen el desbordamiento del río sobre las defensas.

Tabla 3-1 Diferentes métodos para el modelado de inundación en llanuras en orden ascendente de complejidad hidráulica.

Método	Descripción	Código (ejemplos)	Aplicaciones
Superficie libre del agua	Se define una superficie libre del agua (plana) a través de los valores de nivel obtenidos de estaciones hidrométricas en los ríos. Esta superficie se superpone a un MDE para obtener la inundación.	Ninguno	(Priestnall, Jaafar and Duncan 2000)
Celda de almacenamiento (grande)	El río y la llanura se modelan de forma independiente, la llanura se discretiza como celdas de inundación y el flujo en el río se describe a través de ecuaciones basadas en el flujo uniforme (ej. Manning).		(Cunge 1975, De Jonge, Kok and Hogeweg 1996, Cruickshank 1992)
Celda de almacenamiento (pequeña)	Similar a la anterior, pero en lugar de discretizar la llanura en celdas asignadas, éstas se determinan en función del MDE. El río es modelado de forma unidimensional.	FLOODSIM, LISFLOOD-FP	(Bechteler, Hartmaan and Otto 1994); (Bates and De Roo 2000)
Modelos hidrodinámicos de una dimensión (1D)	Resuelven las ecuaciones de Saint-Venant (1D) por medio de una serie de secciones transversales del río y llanura de inundación, perpendiculares al flujo del río. Los niveles de agua resultantes en puntos 1D, pueden ser dibujados en 2D por medio de una interpolación espacial de los resultados.	HEC-RAS, ISIS, MIKE11, SOBEK	(Tate and Maidment 1999) (Penning-Rowell and Tunstall 1996) (Gourbesville 1998) (Werner 2001)
Modelos hidrodinámicos de dos dimensiones (2D)	Resuelven las ecuaciones de aguas someras en 2D, en algunos casos con modelos de cierre de turbulencia. Es posible discretizar la llanura de inundación por medio de mallas regulares (rectángulos) o adaptables (triángulos).	TELEMAC-2D, MIKE21, DELFT-FLS, DELFT3D, TUFLOW, DIVAST, TRENT	(Hervouet 2000) (McCowan and Collins 2001) McCowan y Collins (1999); (Beffa and Connell 2001) (Stelling and Duinmeijer 2003); Stelling y Duinmeijer (2003)

3.3.6. Incertidumbre en la extrapolación de la curva gasto-elevaciones

La incertidumbre en la definición de la curva gasto-elevaciones suele agruparse con aquella proveniente de la definición de la rugosidad en el cauce y la llanura de inundación,

debido a que están intrínsecamente relacionadas en la implementación de modelos hidráulicos. La serie temporal del gasto o los niveles en el río, no representan una condición de frontera suficiente, por lo que éste debe relacionarse con la profundidad del cauce o su velocidad. Esto es justamente lo que hace la curva gasto-elevaciones. Sin embargo, la extrapolación de valores fuera del rango limitado de mediciones, puede ser incierta y requiere ser evaluada con cuidado. Se recomienda que las fronteras de entrada y salida del modelo, sean colocadas lo suficientemente alejadas de tal suerte de que su influencia en el resultado final sea menor. Recientemente, (Knight et al. 2009) publicaron un método de evaluación de la incertidumbre que considera la interacción entre el río y la llanura de inundación en modelos unidimensionales. En el caso de modelos bidimensionales el problema es aún mayor y la práctica común aconseja variar los valores de rugosidad en la llanura en función del tipo de vegetación y explorar la sensibilidad de los resultados a estas variaciones.

Por lo tanto, es evidente que la incertidumbre epistémica asociada a esta fuente es importante en la predicción de profundidades y mapas de inundación. Cuando sea posible, se aconseja que esta incertidumbre sea limitada respecto a valores observados de profundidad y área inundada. Sin embargo, esto no garantiza la fiabilidad de las predicciones para ese mismo río (ej. (Pappenberger et al. 2007a, Pappenberger et al. 2007b)).

3.3.7. Incertidumbre en los efectos de la infraestructura de la llanura

Existe una gran variedad de infraestructura localizada en el cauce y la llanura de inundación que pueden afectar las predicciones de inundación. Estas incluyen vertedores, puentes, bordos, caminos, vías del tren, edificios, paredes, cercas y alcantarillas. En sí no toda la infraestructura que puede afectar los patrones de la inundación es siempre detectable desde los modelos digitales de elevación, ni es de fácil representación en los modelos hidráulicos. Mientras que sus efectos son dinámicos durante eventos particulares, por ejemplo, debido a la obstrucción por flujo de debris que se observa en puentes y alcantarillas. En algunos casos, puede ser necesario representar los efectos de manera implícita en el modelo en lugar de hacerlo de forma explícita (por ejemplo

considerando la presencia de un muro o una cerca con cambios en el coeficiente de rugosidad). Otra vez, existen incertidumbres de conocimiento sobre la representación de esta infraestructura que dificultan su representación, y cualquier evaluación de la incertidumbre en la predicción de inundaciones estará condicionada por la forma en la que ésta fue considerada.

A este respecto, existen dos maneras en las que esta incertidumbre puede afectar las predicciones. La primera es revisar si es posible identificar los efectos de la infraestructura en la predicción de la inundación, para lo que es común examinar la sensibilidad de las predicciones al uso de datos topográficos provenientes de altimetría láser (ej. LiDAR) filtrados o inalterados. La segunda consiste en cómo esta infraestructura puede ser representada en el modelo numérico. Por ejemplo, algunos modelos consideran el cálculo de las pérdidas por la presencia de puentes, en este sentido un estudio realizado por la Agencia del Medio Ambiente del Reino Unido, concluyó que la consideración de la presencia de puentes y alcantarillas es muy importante para la adecuada predicción de inundaciones en llanuras (Benn 2004).

3.3.8. Incertidumbre en el desempeño de las defensas

Para la evaluación del desempeño de las defensas durante la incidencia de un evento extremo, es necesario enlistar todos los efectos potenciales que esta infraestructura tiene sobre los niveles de inundación, incluyendo sus fallas potenciales. La infraestructura de defensa considera bordos de protección, compuertas de control y estaciones de bombeo.

Su falla es generalmente tratada desde una perspectiva probabilista, con el cambio en la probabilidad de falla en función de la magnitud de la inundación, representada como una curva de fragilidad. Existen una variedad de métodos para evaluar la fragilidad como aquella publicada en el proyecto RASP (Risk Assessment for System Planning) publicada por (Sayers and Meadowcroft 2005).

En virtud de que rara vez existen datos disponibles de manera local para definir los valores de falla de cada parámetro, éstos se estiman como resultado de un análisis de incertidumbre hacia adelante, que tiene su base en la definición de parámetros y modos de falla con base en el régimen de inspección y mantenimiento de la infraestructura. Para

ello, se utilizan diferentes valores de entrada y modos de falla en las funciones de probabilidad, que sirven para estimar las probabilidades de falla en diferentes secciones de la defensa.

3.3.9. Incertidumbre en la vulnerabilidad y consecuencias

Para la determinación del riesgo por inundación en función de los daños potenciales debidos a un evento extremo o secuencia de eventos, es necesario estimar ambos las probabilidades de la amenaza y sus consecuencias económicas. Este marco de trabajo, excluye consecuencias intangibles como aquellas que se dan en el bienestar físico y emocional de la población.

A manera de ejemplo, en el Reino Unido se utiliza lo que se conoce como el Manual Multi-Color desarrollado por el Centro de Investigación sobre Amenazas de Inundación localizado en la Universidad de Middlesex (Penning-RowSELL et al. 2005). El cual genera una estimación determinista de los daños potenciales, en el área definida por el mapa de inundación resultante del modelo numérico.

Más allá de las incertidumbres asociadas a los mapas de inundación que se han discutido, los cálculos de daño son propensos a la incertidumbre epistémica asociada a los datos de referencia que dan lugar a los cálculos de la profundidad de daño. Básicamente, estas tienen tres fuentes principales, a saber:

1. La ubicación y tipo de la propiedad proveen información sobre los bienes inmuebles ubicados dentro de la zona afectada, así como su exposición a las profundidades de inundación. Esta información puede no estar correctamente definida para los bienes construidos, sus usos, la elevación del pie de la puerta, la presencia de sótanos, y barreras al flujo dentro de las propiedades (ej. muros y bardas).
2. Valor de los inventarios. Estos son los daños posibles contra los diferentes tipos de propiedades. Cabe mencionar que los valores utilizados pueden no reflejar los

valores del mercado y las posesiones y enseres dentro de una propiedad indistintamente de su tipo.

3. Curvas daño – profundidad. La relación entre la extensión de la inundación, las propiedades afectadas y los costos de las pérdidas calculadas, dan como resultado que la curva puede no reflejar las características de la inundación para toda su extensión, donde las velocidades y la duración son variables que tienen un impacto directo en los impactos.
4. El Manual Multi-Color resalta la importancia de tales incertidumbres en función de su posible impacto.

3.3.10. Decisiones en la implementación de un análisis de incertidumbre

Además de las fuentes de incertidumbre asociadas al marco de trabajo Fuente-Estado-Receptor, existe una fuente adicional a la decisión de implementación del análisis de incertidumbre en sí mismo. Dos aspectos importantes de esta implementación consisten en la evaluación de las interacciones y agregaciones de errores originados por diversas fuentes de incertidumbre, y la selección del método para propagar las hipótesis en las fuentes de incertidumbre hasta el resultado final (ej. mapa de inundación).

En el pasado, las hipótesis asociadas a distintas fuentes de incertidumbre, se resolvían de manera implícita en el diseño de obras de protección por medio del concepto de bordo libre (Kirby and Ash 2000). Por otro lado, una práctica común más reciente, consiste en la realización de un análisis de sensibilidad de los mapas de inundación a variaciones en las hipótesis por medio de la ejecución de diversas corridas del modelo numérico con un arreglo diferente (ej. resolución, rugosidad, infiltración).

Existen dos formas de hipótesis que se pueden asumir en relación con la interacción de diferentes fuentes de incertidumbre: la explícita y la de escenarios. El primer caso, se utiliza cuando las variables tienen interacciones obvias y se recomienda el uso de técnicas como las transformaciones de cópulas para especificar las interacciones entre variables de distribuciones arbitrarias (ej. (Beven 2009, Kurowicka and Cooke 2006, Fu and Butler 2014, Huang et al. 2014, Durocher, Chebana and Ouarda 2016, Keef, Svensson and Tawn 2009)).

Sin embargo, existirán otros casos en los que sea más complicada la especificación *a priori* de las interacciones entre variables. Por lo que es necesario establecer hipótesis con base en escenarios que sirvan para especificar condiciones particulares en un análisis de riesgo por inundación. Como es el caso de la interacción entre las rugosidades definidas para el cauce principal y la planicie de inundación. La generación de escenarios es apropiada cuando es poco claro como especificar la interacción entre diversas fuentes de incertidumbre debido a falta de conocimiento.

3.3.11. Incertidumbre en los datos de campo y observaciones

Existen una amplia variedad de tipos de datos y observaciones que pueden utilizarse durante el proceso de puesta a punto de un modelo numérico. En particular, los registros de variación del nivel del agua en el tiempo (cuando no se les utiliza para definir las condiciones de frontera en sí mismas) proveen información local que condiciona y permite la calibración del modelo. Más información espacialmente distribuida se obtiene de campañas de campo post-evento, que proveen datos sobre la extensión máxima de la inundación y su profundidad, así como las imágenes de radar que permiten la definición más puntual de la extensión de la inundación por medio de satélites (ej (Leedal et al. 2010, Bates et al. 2004)). Sin embargo, esta información está sujeta a incertidumbres de naturaleza epistémica y aleatoria. Los efectos aleatorios pueden darse como resultado de las fluctuaciones en el nivel del agua o la precisión con la que se define al límite de la inundación. La incertidumbre epistémica se genera cuando se relaciona una medición de nivel máximo en un punto medido en campo, con el promedio de la elevación determinada por un modelo numérico en espacio y tiempo. Adicionalmente, la experiencia sugiere que también puede haber problemas asociados a errores en las mediciones que pueden dar lugar a valores inconsistentes o anómalos de los niveles de inundación. A pesar de estos errores, las observaciones directas en espacio y tiempo, de los niveles de inundación durante un evento siguen representando una fuente de información muy importante para la calibración y puesta a punto del modelo numérico.

3.4. Reflexión final sobre la incertidumbre y la modelación de flujos de inundación

Como se ha visto en este capítulo, la generación de resultados confiables sobre la extensión de una inundación depende en gran medida de controlar las diversas fuentes de incertidumbre involucradas en este proceso. Es poco probable, sin embargo, que en aplicaciones reales éstas sean completamente eliminadas. Además como se ha visto, los métodos para su evaluación involucran por lo general, juicios subjetivos que requieren de la claridad y transparencia de los modeladores.

Como se ha visto, cada etapa del proceso de pronóstico induce errores, por ejemplo, fallas en las observaciones y en la habilidad de los modelos para representar la realidad, los modelos representan idealizaciones de procesos naturales generalmente más complejos.

En este sentido es clara la importancia de implementar una estrategia metodológica para el análisis de la incertidumbre en la generación de mapas de inundación. El esfuerzo abocado a este ejercicio deberá ser siempre proporcional a los costos y beneficios esperados de una aplicación particular. Así el grado de detalle puede variar desde un juicio experto a nivel cualitativo, pasando por un análisis de sensibilidad, hasta un análisis detallado que involucre la simulación de un gran número de corridas con un modelo numérico. Así diferentes proyectos requerirán diferentes estrategias, de igual manera un proyecto puede involucrar más de una estrategia de análisis de incertidumbre.

El reconocimiento de la incertidumbre en la simulación numérica de flujos de inundación es una actividad relativamente nueva en el mundo. Artículos recientes sugieren que las incertidumbres involucradas en el resultado final pueden ser muy importantes. Es por ello, que este trabajo de investigación representa el primer esfuerzo reportado en México, para estimar la incertidumbre asociada al pronóstico de inundaciones.

Este tiene su base en el reconocimiento de que el conocimiento científico formal, está construido sobre hipótesis y juicios. Es por ello que la metodología propuesta considera un enfoque probabilista en todas las escalas espacio-temporales del sistema terrestre (atmósfera-cuenca-río). Este enfoque considera el encadenamiento de modelos atmosféricos, hidrológicos e hidrodinámicos, de tal manera que dentro del marco de

trabajo, es posible evaluar la incertidumbre y sus efectos en la predicción. En realidad, cada componente de cada modelo posee su propia fuente de incertidumbre (ej. variabilidad espacio-temporal de los parámetros), por lo que se produce una propagación y agregación de los errores a lo largo del proceso de modelación. De esta forma, aspectos innovadores de este marco de trabajo son: el reconocimiento del riesgo como una variable dinámica, la modelación en cascada (visión holística), y la evaluación de la incertidumbre asociada a cada etapa del pronóstico.

Capítulo 4. Casos de Estudio

Los casos de estudio seleccionados para la prueba del marco teórico desarrollado en esta tesis doctoral corresponden a dos eventos extremos recientes, registrados en la República Mexicana. El primero de ellos, producido en el año de 2009 asociado al desbordamiento del río Tonalá que se localiza en los límites geográficos de los estados de Tabasco y Veracruz. Esta región se vio gravemente afectada como resultado de las lluvias extraordinarias generadas por la presencia del frente frío No. 9. El segundo caso de estudio, comprende al evento extremo registrado en 2013 en el estado de Guerrero, específicamente en las cuencas de los ríos Sabana y Papagayo, cuyo desbordamiento generó afectaciones severas en la zona turística de Acapulco-Diamante. De manera notable, este evento resultó de las lluvias producidas por la incidencia simultánea de los huracanes, Ingrid y Manuel, en territorio mexicano. La magnitud de las avenidas registradas en este caso, dejó inhabilitadas varias de las estaciones hidrométricas instaladas por la CONAGUA y la CFE en ambos ríos. Por lo que se requirió la reconstrucción meteorológica e hidrológica de este evento. Tal y como se observa en la Figura 4-1, producida con datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), los dos casos de estudio se encuentran ubicados en regiones del país que históricamente se han visto afectadas por inundaciones (CENAPRED 2015).

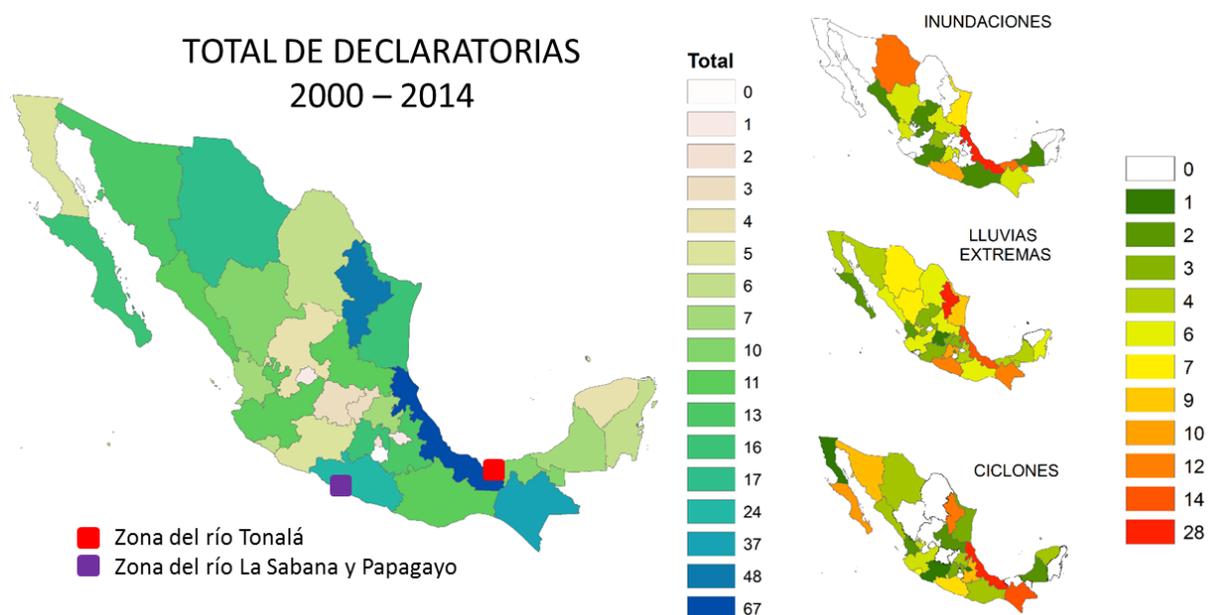


Figura 4-1 Declaratorias de emergencia por hidro-meteorológica en México 2000-2014.

4.1. Caso 1: Inundaciones de 2009, cuenca del río Tonalá

La primera zona considerada en este estudio es la llanura de inundación de la cuenca baja del río Tonalá, que comprende una albufera al este de la desembocadura, con la presencia del arroyo Chicozapote, amplias zonas de manglares y llanuras de inundación. En el recorrido de su cauce principal pasa cerca de zonas urbanas en los estados de Veracruz y Tabasco. En el primer caso corresponden a Tonalá, Agua dulce y la población de Gavilán norte. Mientras que en Tabasco se encuentran Cuauhtemoczin y la Venta. Esta última población ubicada sobre la planicie costera, fue la que sufrió inundaciones importantes durante el evento registrado en el año de 2009. El problema de las inundaciones en Tabasco es de preocupación nacional, pues han sido varios años consecutivos (2007, 2008, 2009 y 2010) en los que se inunda gran parte de su territorio.

La Figura 4-2 ilustra la localización geográfica de la zona de estudio y la cuenca del río Tonalá, así como la región más afectada durante el evento del año 2009.

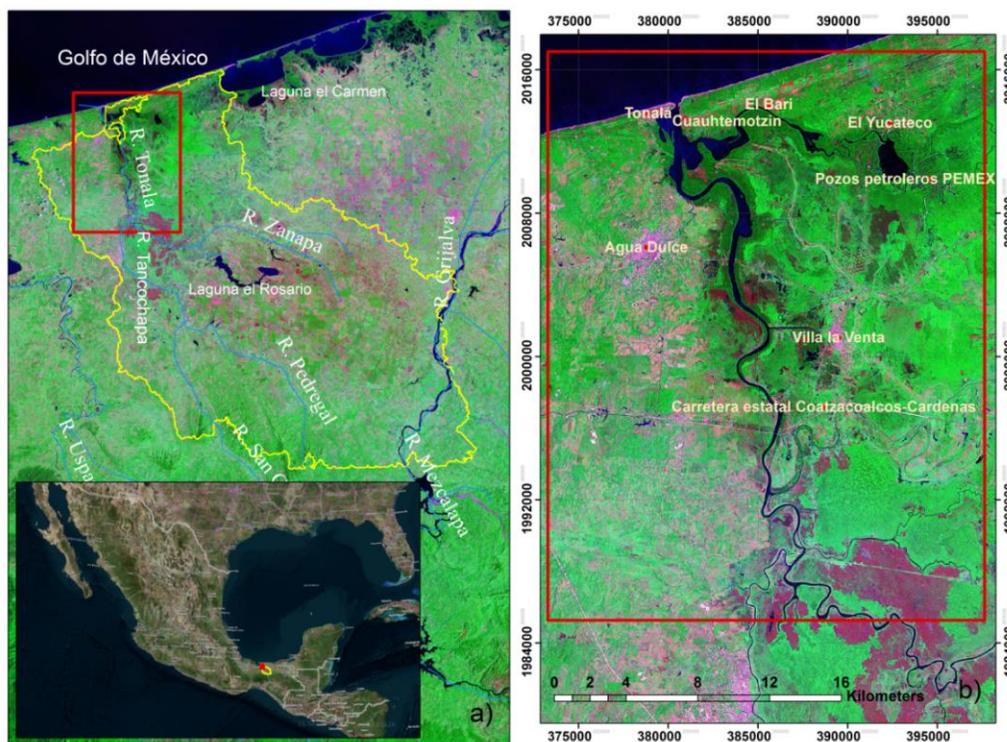


Figura 4-2 Ubicación de la cuenca del río Tonalá (a) y la zona de inundación durante 2009 (b).

4.1.1. Características fisiográficas

La cuenca hidrográfica del río Tonalá se encuentra en los 18° 13' y 17° 23' de latitud norte y 94° 08' y 93° 45'; de longitud oeste. De acuerdo a la Carta Hidrológica de Aguas Superficiales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) la cuenca se encuentra ubicada en la región hidrológica 29, de nombre Coatzacoalcos, donde también se encuentran las regiones de Laguna del Carmen Machona, Río Santa Ana, Río Cocajapa, Río Tancochapa bajo y Río Pozacrispín, todo este sistema tiene un escurrimiento natural medio superficial interno de 39.482 hm³/año. El río se forma por la confluencia del río Tancochapa y del río Zanapa, tomando su nombre por desembocar en la barra inmediata al poblado de Tonalá en Veracruz, cerca en la laguna del Yucateco.

La Figura 4-3 presenta los límites de la cuenca en estudio, para lo cual se utilizó el modelo digital de elevaciones disponible de la agencia norteamericana espacial conocido como SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (NASA 2014), con resolución espacial de 30 m, así como el Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) del INEGI (INEGI 2008).

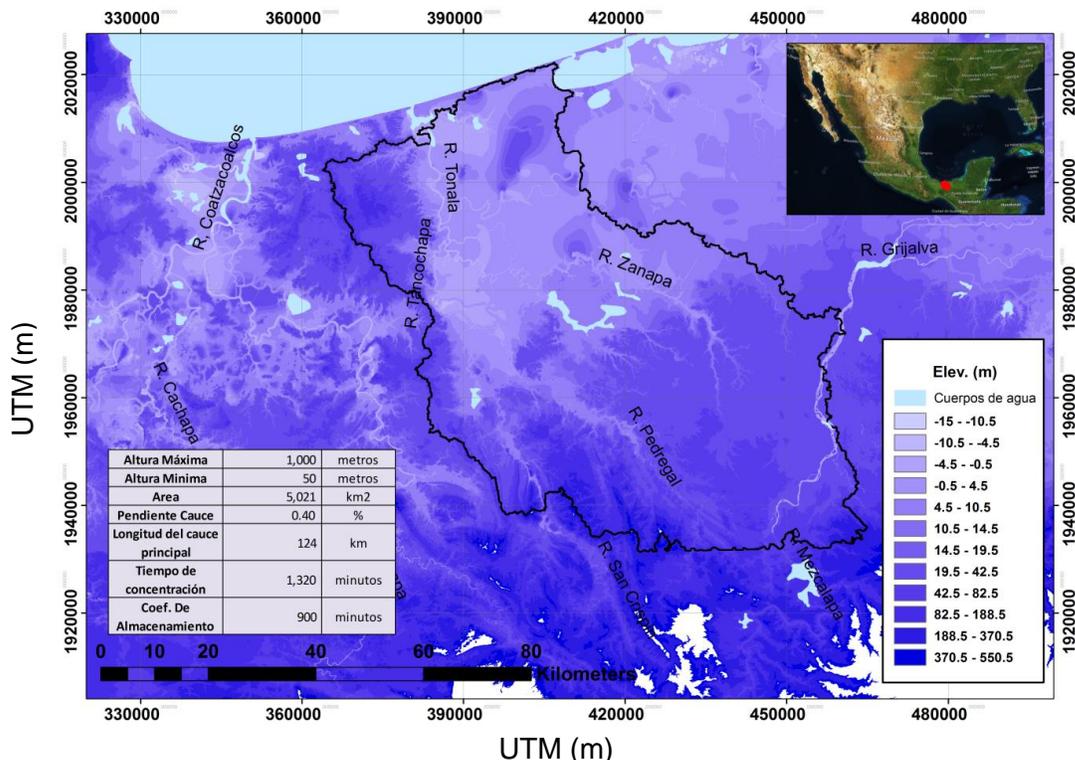


Figura 4-3 Modelo Digital de Elevaciones (MDE) para la cuenca del río Tonalá.

El río Tonalá drena más de 11,389 hm³/año hacia el golfo de México (INEGI 2015). El área total calculada de la cuenca es de 5,020.83 km² y su cauce cuenta con una longitud total de 124 km. Inicia en la sierra de Chiapas, aproximadamente a 1,000 m de altitud; aunque en gran parte de su trayecto, alrededor de 110 km, el río se encuentra por debajo de los 200 m de altitud, lo que da lugar a un tramo sinuoso y con algunas lagunas, sobre en la zona cercana a su desembocadura al mar. Los tributarios de la margen izquierda, de aguas arriba hacia aguas abajo, son el río Playas o Xocoapan (nace en el cerro del Mono Pelado, tiene dirección general hacia el noreste, pasa por Pueblo Viejo y San Pedro), se conecta al Tancochapa, Chuclapa, El Pesquero y Agua Dulce.

4.1.2. Clima

En general el clima de la cuenca es cálido húmedo y presenta lluvias durante la mayor parte del año, con una concentración durante los meses de Junio-Septiembre. La temperatura media anual oscila entre los 24 y los 28°C.

En el mes de estiaje más seco, la precipitación es menor a los 60 mm; la precipitación media anual en la cuenca oscila entre 2,000-3,500 mm (ver Figura 4-4) con la particularidad de tener lluvia casi todo el año. En general el clima de la zona pertenece a los cálido-húmedos de los tipos Am(f) y Am(w), que corresponden al patrón climático de la región Golfo de México, el cual está determinado por dos sistemas de vientos predominantes, en el verano y otoño los Alisios, las Ondas del este y los ciclones tropicales; y en el invierno los Nortes (Kottek et al. 2006). El régimen térmico se considera tipo Ganges; es decir, la temperatura más alta se presenta antes del solsticio de verano. La Figura 4-4 presenta la distribución espacial dentro de la cuenca de los tipos de clima y la precipitación predominante media anual de la zona. Estos mapas, se construyeron utilizando los datos de temperatura media y precipitación total de aproximadamente 4000 estaciones meteorológicas existentes en el país por medio de la conversión de información diseñada por el INEGI (INEGI 2014).



Figura 4-4 Parámetros climatológicos de la cuenca del río Tonalá.

La temporada de lluvias comprende aproximadamente ocho meses del año (julio a marzo). Por su localización geográfica, de julio a noviembre la zona es afectada por ciclones tropicales y, de diciembre a marzo por frentes fríos que producen lluvias anuales del orden de 2,750 mm en la zona costera y hasta 4,000 mm en la zona montañosa. El período con mayor precipitación comprende los meses de julio a noviembre, lapso en el cual se concentra cerca del 72% de la lluvia total anual.

Históricamente los eventos hidrometeorológicos diversos como son: frentes fríos; disturbios, ondas y tormentas tropicales y por supuesto los huracanes, constituyen las principales amenazas para el conocido riesgo por inundación de la entidad, en virtud de que ocurren un promedio de 15 eventos ciclónicos al año y algunos causan severos daños.

4.1.3. Edafología y cobertura vegetal

El material detrítico en esta zona es de tipo palustre y aluvial; la presencia de dunas, barras y esteros en las costas de la zona donde se encuentra la cuenca del río Tonalá se ve favorecida en gran parte por el tipo de desembocaduras de los ríos, las albuferas que integran estos sistemas lagunares deben su origen a fenómenos de regresión marina y a procesos dinámicos de sedimentación fluvio-terrestre que se desarrollan por efecto de las mareas, corrientes marinas y el oleaje, mismos que actúan conjuntamente sobre los sedimentos aportados por los ríos, acumulando y distribuyendo el material en forma paralela al perfil litoral.

En la zona de estudio afloran tres unidades de tipos de rocas bien diferenciadas, las cuales corresponden a tres ambientes distintos que se agrupan por su edad y origen. De esta manera, de la unidad más reciente a la más antigua, se identifican ambientes de depósitos fluviales junto con los depósitos eólicos de ambiente costero del Cuaternario (q) y, con una posición crono-estratigráfica. Respecto a la unidades del suelo dominantes en esta área, ordenados de mayor a menor extensión se tienen los siguientes: luvisoles, acrisoles, cambisoles, y Gleysoles, (Figura 4-5); los primeros tres son arcillas en grandes cantidades que son casi impermeables (Tipo hidrológico del suelo D), lo que ayuda al que el escurrimiento sea máximo en la mayoría del área de la cuenca.

En la zona de nacimiento de los ríos Zanapa y Tancochapan el tipo de vegetación dominante es de pastizal y pastizal cultivado y matorrales con vegetación secundaria. En la unión de estas dos corrientes principales existe agricultura de temporal, mientras que en los regadíos de una y otra margen aguas abajo abunda el manglar. A la altura de la unión del río san Crispín con el Tancochapan hay pastizales abundantes y algunas zonas de selvas. La zona baja de la cuenca se extiende a lo largo de terrenos planos, lo que da lugar a la formación de numerosos meandros, lagunetas y esteros hacia la desembocadura, en los que se encuentran algunas zonas selváticas. En la Figura 4-5, se muestra el tipo de uso del suelo donde se resalta la heterogeneidad del uso de suelo en la cuenca, desde planicies de inundación y pastizales principalmente.



Figura 4-5 Edafología y uso del suelo de la cuenca del río Tonalá.

4.1.4. Descripción del evento

El evento de análisis seleccionado para este trabajo de investigación corresponde a las inundaciones registradas en el año 2009 por la presencia del frente frío No. 9 sobre México, el cual produjo lluvias extraordinarias, en el estado de Tabasco con repercusiones en la cuenca del río Tonalá que delimita la frontera con el estado de Veracruz. Este evento registró daños menores a aquellos observados durante la gran inundación de 2007. Sin embargo, fue también cuantiosa pues la suma de los daños derivados de este evento en Veracruz y Tabasco ascendió a los 4,377 millones de pesos, con una diferencia estimada en 2,465 millones de pesos respecto a 2007. El daño total acumulado en el trienio de 2006-2009 fue de 38,930 millones de pesos, el cual representa una cifra significativa y que demuestra la necesidad de promover estudios para la disminución del riesgo por inundación en la zona (CENAPRED et al. 2010).

Las condiciones meteorológicas generadas por el frente frío No. 9 que penetró por el noreste del país y se desplazó rápidamente al sureste, dieron lugar a la primera tormenta invernal de la temporada. Una característica importante de este meteoro consistió en su persistencia durante cuatro días en la región. Situación que ocasionó un marcado descenso de temperaturas y provocó lluvias constantes por ese periodo de tiempo, además de vientos variables de 30 a 50 km/h con picos de 70 km/h. El Servicio Meteorológico Nacional, informó en su momento que el frente frío en el Golfo de México estuvo acompañado por una onda tropical en Centroamérica y una baja presión en el Istmo de Tehuantepec, situación que pudo haber intensificado la intensidad del fenómeno.

Las lluvias intensas entre los días 31 de octubre y 3 de noviembre, afectaron principalmente la zona oeste del estado de Tabasco y sur de Veracruz, acumulando agua dentro de la cuenca del río Tonalá y la laguna del Carmen.

La Figura 4-6 presenta un mosaico de imágenes de satélite del 30 de Octubre al 11 de noviembre de 2009, en la que se aprecia el recorrido del frente frío de norte a sur, desde el día 28 de octubre hasta el día 7 de noviembre. De manera particular, se aprecia una acumulación de nubosidad durante el día 3 de noviembre con una influencia del meteoro sobre el istmo de Tehuantepec y el estado de Chiapas.

Este fenómeno hidrometeorológico produjo precipitaciones máximas diarias superiores a los 250 mm. Por ejemplo, en la estación San José del Carmen, Veracruz, al interior de la cuenca del río Tonalá se registró una lluvia acumulada de 270.50 mm para el periodo de tiempo definido entre las 8:00 a.m. del 2 de noviembre a las 8:00 a.m. del 3 de noviembre. Por otro lado, la precipitación registrada acumulada en los municipios de Huimanguillo y Cárdenas, del 31 de octubre al 2 de noviembre de 2009 fue de 800 mm, en 72 horas. De acuerdo a estos registros, y en comparación con mediciones históricas para el mes de noviembre en el estado de Tabasco, la lluvia registrada en tres días correspondientes a este evento representa aproximadamente cuatro veces la media de precipitación en todo el mes de noviembre en los registros históricos. Lo que evidencia lo extremo del evento en cuestión.

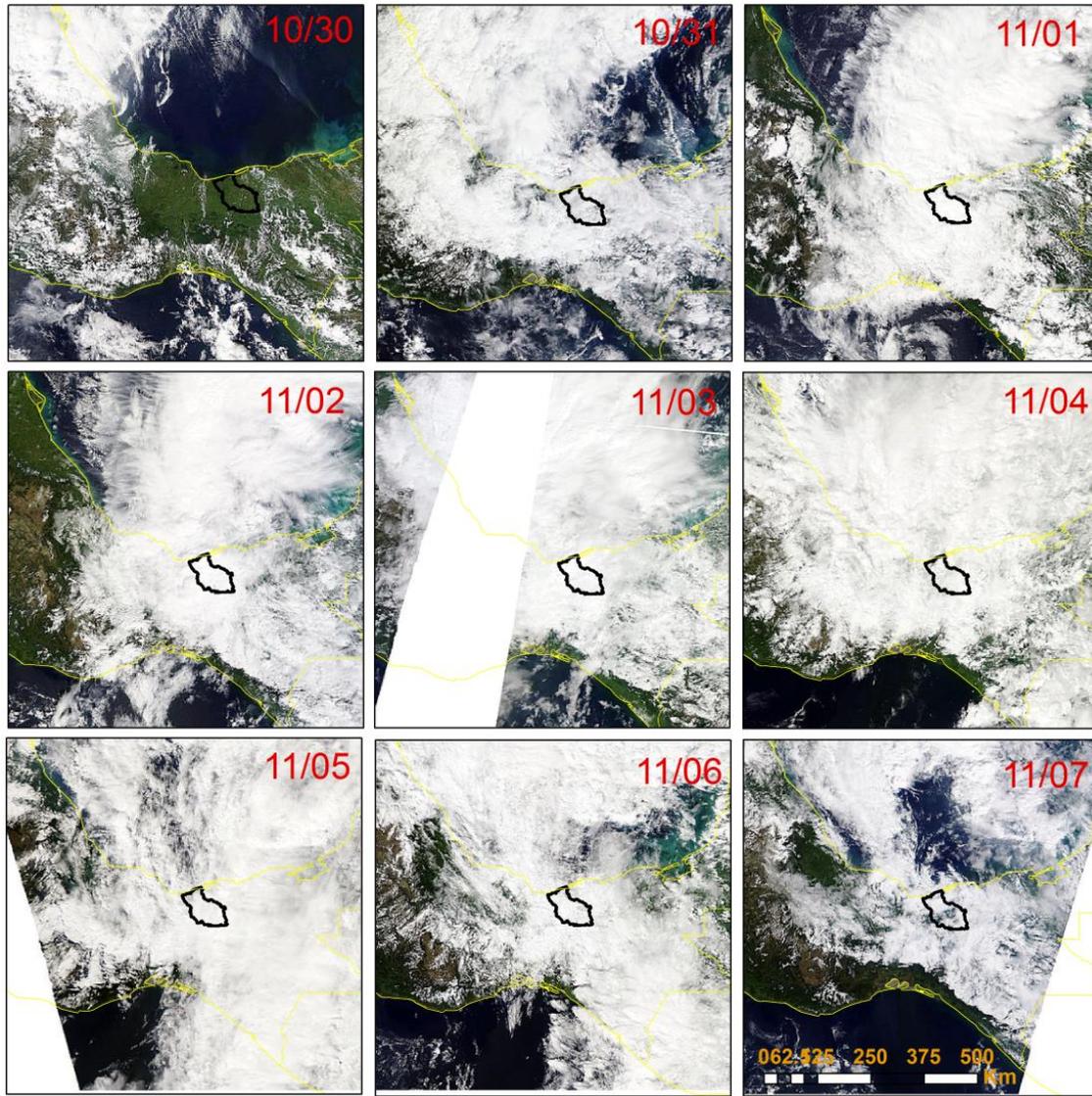


Figura 4-6 Evolución del Frente Frio No 9 - 2009.

Dentro de los municipios que fueron sometidos a los perjuicios por las inundaciones se encuentran Cárdenas, La Venta, Agua Dulce, Huimanguillo, y Paraíso. De hecho se resalta la destrucción de palapas, y el módulo de información turística, en La Venta, límite Tabasco – Veracruz, (ubicado al lado de una tienda de consumo Oxxo). En la Figura 4-7 se relacionan una secuencia de imágenes adquiridas por el satélite Aqua de la Agencia Espacial Estadounidense, antes durante y después de la incidencia del evento meteorológico. Las imágenes corresponden al periodo de tiempo definido por el 26 de octubre hasta el 13 de noviembre de 2009. En este mosaico, es posible apreciar la zona

inundada en las imágenes correspondientes a los días 8 y 13 de noviembre. De igual manera, los paneles inferiores presentan la evidencia fotográfica de los impactos registrados dentro de la cuenca, como resultado de este evento (Tyc et al. 2005).

La magnitud de ambos, el evento meteorológico y los impactos económicos y sociales en la región, hacen de este evento un excelente caso de estudio para este trabajo de investigación.

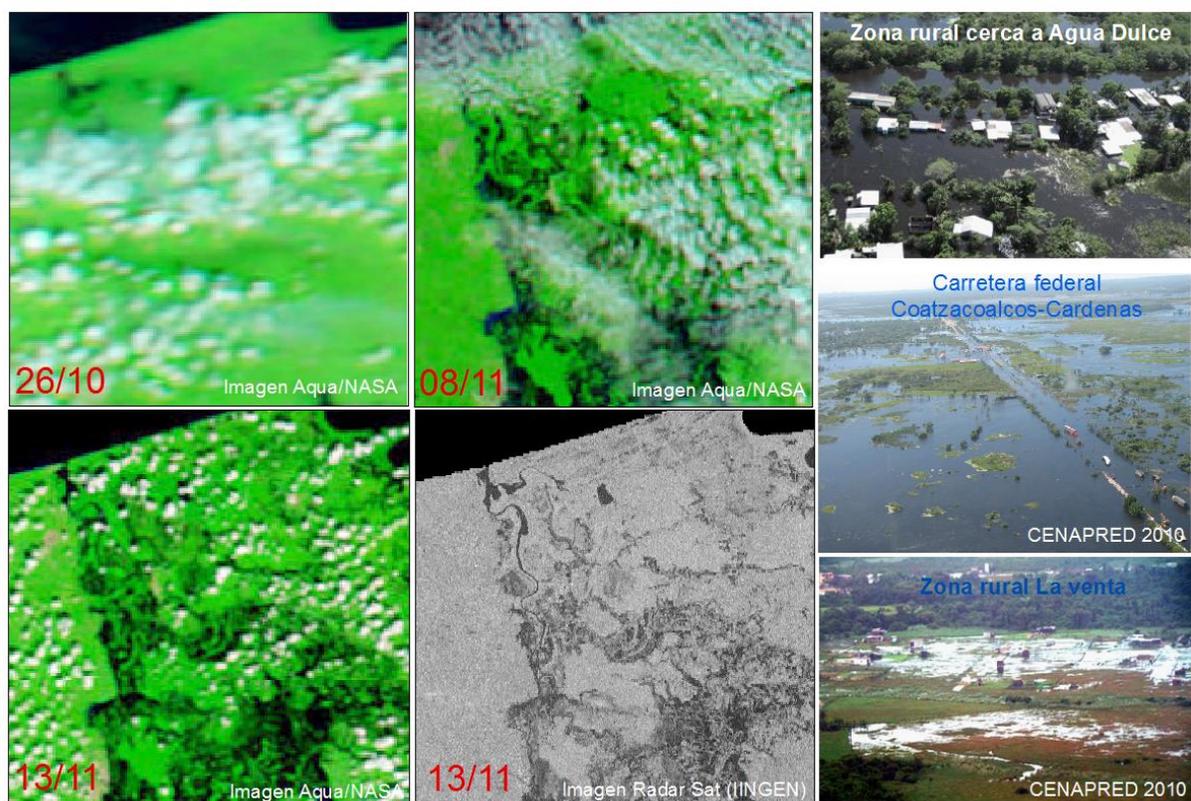


Figura 4-7 Fotografías Satelitales antes y después del evento de inundación. Tonalá -2009.

4.2. Caso 2: Inundaciones del 2013 en las cuencas de los ríos La Sabana y Papagayo

El segundo caso de estudio seleccionado para este trabajo de investigación corresponde al evento registrado en septiembre de 2013, como resultado de la incidencia simultánea de los huracanes categoría 1 Ingrid y Manuel sobre el territorio mexicano; el primero de ellos generado en la vertiente del Golfo de México y el segundo en la costa del Océano

Pacífico. Esta condición meteorológica atípica, resultó en lluvias torrenciales que afectaron gran parte del territorio nacional. En particular, se destacaron las afectaciones registradas por el desbordamiento de ríos en el estado de Guerrero con afectaciones a centros de población como Chilpancingo y Tixtla; de igual manera en la zona cercana a la costa el complejo turístico de Acapulco Diamante, registró severos daños y anegamientos que duraron varios días y afectaron a la economía de la región (Pedrozo-Acuña et al. 2014).

Este evento afectó 77% del territorio nacional, generando deslizamientos de tierra e inundaciones a lo largo de muchos de los ríos del país; en consecuencia, más de 45,000 viviendas fueron dañadas o destruidas y 192 personas perdieron la vida (Aon-Benfield 2013). Además de generar pérdidas económicas que alcanzaron un valor de US \$ 5700 millones. Cabe señalar que la última vez que dos ciclones llegaron por ambas costas del país fue en 1958, cuando el huracán Alma, por el Golfo de México, y la Tormenta Tropical Número 2 en el Pacífico se conjuntaron a mediados de junio de ese año.

Debido a la rareza del fenómeno y los impactos registrados en una zona de alto valor económico, este trabajo de tesis incorporó la aplicación de la metodología propuesta a las cuencas de los ríos Sabana y Papagayo, en el Estado de Guerrero, México, en la región de Acapulco Diamante que resultó gravemente afectada por las inundaciones de ese año.

Las cuencas de estudio se encuentran entre los 16° 40' y 17° 36' latitud norte y los 100° 04' y 98°35' longitud oeste, en el estado de Guerrero. Mientras que la zona de análisis de inundación cubre parte del complejo turístico de Acapulco Diamante, lo que comprende un porcentaje de la cuenca baja de ambas cuencas. La zona de estudio incorpora la laguna de Tres palos, ubicada en la vecindad del Aeropuerto Internacional de Acapulco, tal y como se aprecia en la Figura 4-8 donde es posible identificar los ríos La Sabana y Papagayo y el manglar de Laguna Negra.

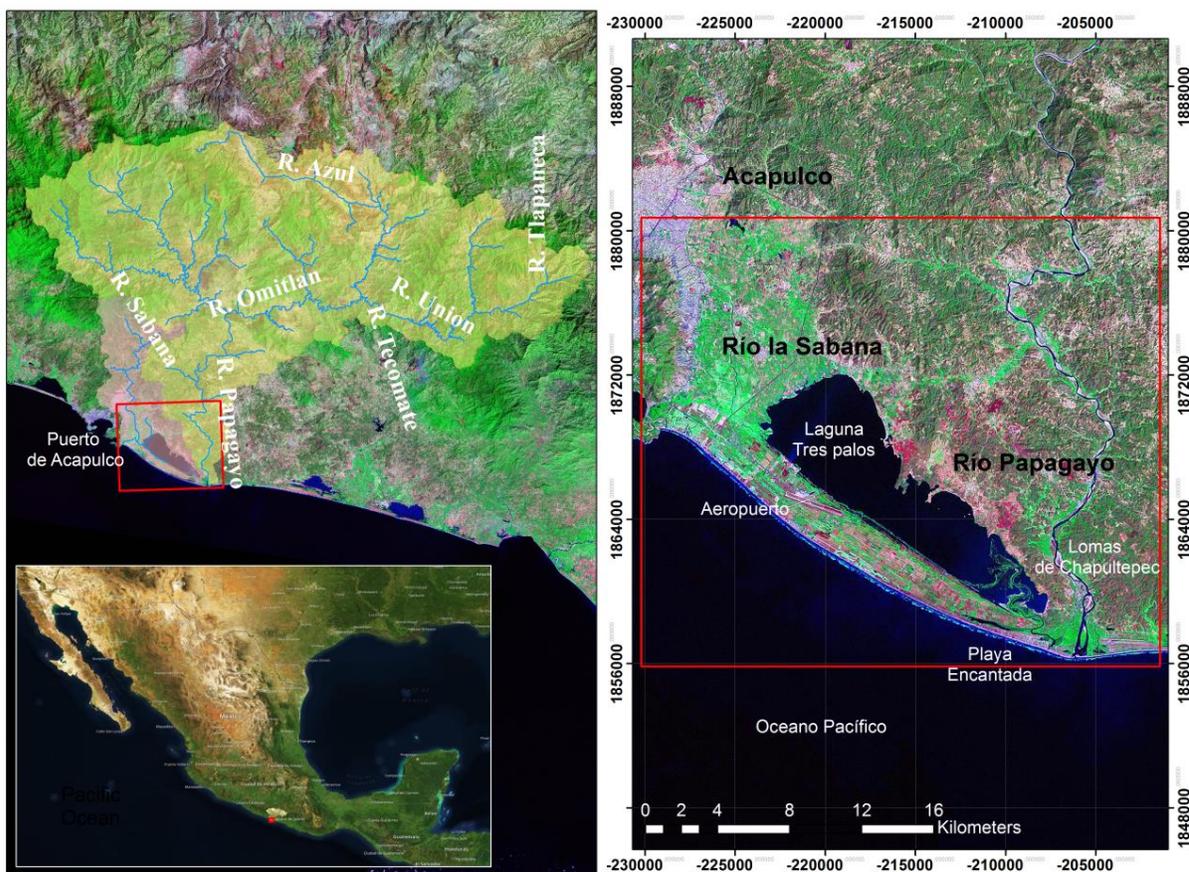


Figura 4-8 Ubicación de las cuencas del río (a) La Sabana (rosa) y Papagayo (Amarillo). (b) Zona de inundación.

4.2.1. Características fisiográficas

Cuenca del río Papagayo

El río Papagayo nace en la sierra de Jalisco (o Sierra de Igualatlaco), en proximidades de la ciudad de Chilpancingo de Bravo. La extensión del cauce principal es de unos 120 km, antes de ser regulado por la Presa Hidroeléctrica La Venta (la cual fue sobrepasada en el evento del 2013), para después de esta recorrer unos 70 km hasta desembocar en océano pacífico. El río desemboca en el océano Pacífico en la playa Encantada, en una zona con tres lagunas costeras, Tres Palos (o Papagayo) con una superficie de 50 km², Tacamate (o San Marcos) con 21 km² y Chautengo 34 km² (o Nexpa). El área total de la cuenca es de 7,457 km².

La región hidrológica a la que pertenece es la 20, según la identificación del INEGI, conocida con el nombre de Costa Chica de Guerrero y desde febrero del 2010, pertenece al área natural protegida con carácter de Reserva Estatal, “los Olivos”. El escurrimiento natural medio superficial interno de toda la región es de 18,714 hm³/año, donde el río Papagayo tiene su aportación de 4,237 millones de m³/año. Entre los afluentes más importantes se encuentra el río Omitlán el cual aporta agua de la suma de los ríos Unión y Azul. La Figura 4-9 presenta la delimitación de las cuenca resultante de acuerdo al análisis hecho con herramientas GIS. En esta figura es posible apreciar la red de afluentes del río Papagayo y las características principales de sus subcuencas. Todos sus tributarios, se reúnen poco al Sur de la población Tierra Colorada hasta desembocar en el Océano Pacífico, a unos 30 km al Sureste del Puerto de Acapulco.

Cuenca del río La Sabana

Respecto al río la Sabana, este se ubica en la región hidrológica “Costa Grande de Guerrero” con designación de clave RH19 según la caracterización del INEGI, correspondiéndole a La Sabana el RH19Aa y el RH19Ab. La primera va desde su nacimiento hasta la estación hidrométrica Km 21+000 y la segunda desde esta estación hasta su desembocadura en la laguna de tres palos y el océano Pacífico. Para esta investigación se calculó como una sola, teniendo presente que el escurrimiento total fue el generador de las inundaciones en el año 2013. En la Figura 4-9 es posible ver la ubicación y las elevaciones en las cuencas y los parámetros físicos, incluido las de la cuenca del río la Sabana.

La cuenca tiene un área de 723 km² y de los 2,250 msnm que tiene de altura máxima, en el área de estudio, la elevación mayor del cauce es de 10.46 msnm. El río de la Sabana tiene una velocidad media de 0.32 m/s, nace en la Sierra Madre del Sur, a una altitud de 1,600 msnm., tiene una longitud aproximada de 57 km hasta la laguna Tres Palos, y pasa por los poblados La Sabana y Tres Palos. El río desde su nacimiento sigue un curso sinuoso, no recibe aportaciones importantes hasta desembocar en la Laguna de Tres Palos.

El escurrimiento natural medio superficial interno de toda la región es de 155.95 hm³/año, siendo muy reducido en comparación con aquél registrado para la cuenca vecina del

Papagayo. A pesar de ello, y como se vio en el evento de 2013, los impactos generados por una avenida extraordinaria son mucho más severas, debido a la proximidad del cauce con desarrollos urbanos recientes en la proximidad de la zona conocida como Acapulco Diamante.

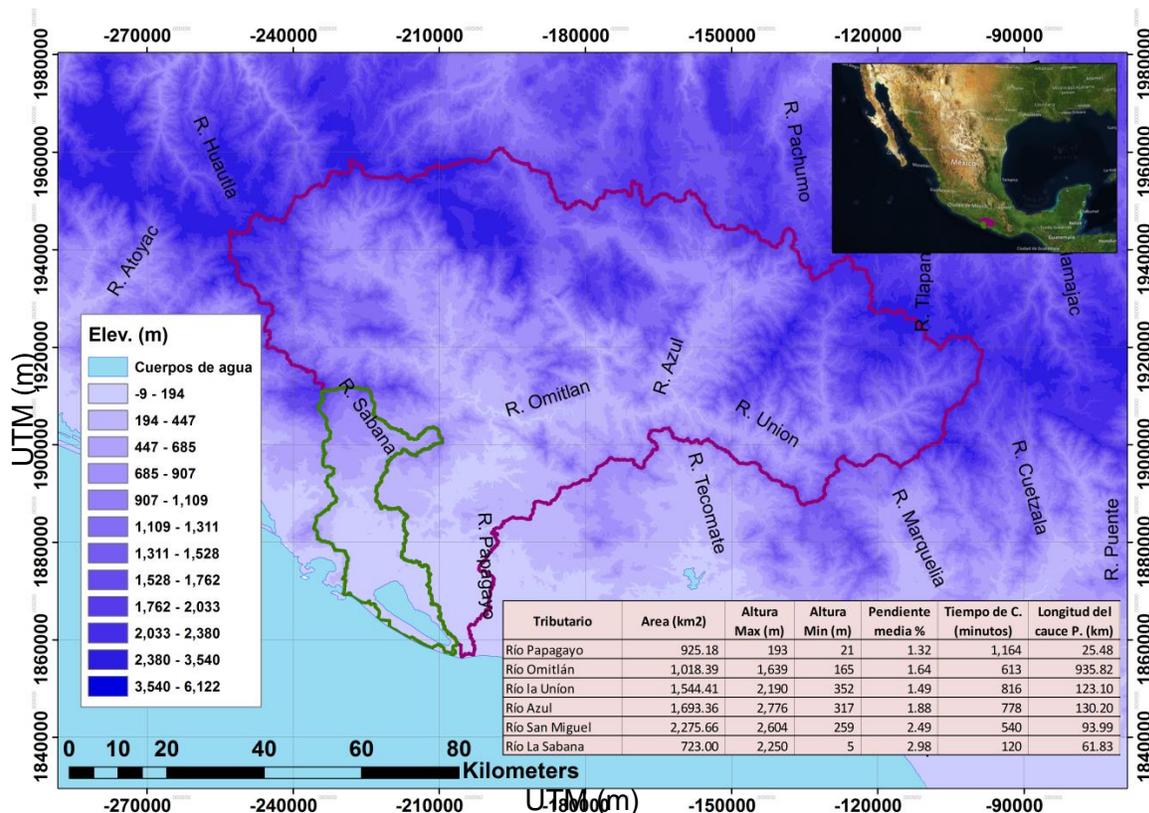


Figura 4-9 Modelo Digital de Elevaciones (MDE) para las cuencas de los ríos La Sabana y Papagayo.

4.2.2. Clima

El clima de la zona de estudio es predominantemente cálido subhúmedo tiene un índice de Lang (precipitación total anual entre temperatura media anual) de 43.2, lo que sugiere una precipitación anual de 1,200 mm. La cual puede incrementarse considerablemente en las partes altas de la cuenca del Papagayo. Por otro lado, cabe resaltar que las dos cuencas se localizan en la costa del Pacífico mexicano, la cual tiene una gran influencia de huracanes, de hecho, se registró una mayor cantidad de huracanes que la vertiente del Atlántico de 1970 a 2011 (SINA 2012), provocando mayor incidencia de precipitación en la zona.

Debido al tamaño de la cuenca del Papagayo, respecto al de la cuenca del río la Sabana, se presenta el clima en dos secciones diferentes. La Figura 4-10, se describe el clima promedio anual en la zona donde se encuentran las dos cuencas.

Clima Cuenca del río Papagayo

La mayoría de las zonas de la cuenca del río Papagayo son del tipo clima de cálido subhúmedo con lluvias en verano, excepto algunas regiones al norte y oriente del territorio donde el clima es templado subhúmedo, aunque también con lluvias en verano. La temperatura media anual se encuentra entre los 22 y 28 °C.

Respecto a la precipitación la zona norte de la cuenca es la más lluviosa con un promedio de 2,000 mm por año, mientras que es 500 mm más bajo el promedio en el centro de la cuenca. En la costa la precipitación media es de 1,200 mm, aunque se ve influenciada de manera importante por tormentas tropicales.

Clima Cuenca del río La Sabana

El clima de la cuenca de la Sabana corresponde a un clima caliente, subhúmedo, con lluvias en verano, con presencia de una pequeña sequía intraestival o de medio verano. La temperatura principalmente varía por la altitud y la topografía. Es decir, la temperatura media en las costas con elevaciones bajas es superior a los 27°C.

El viento dominante de la región es de dirección oeste a lo largo del año, registrándose la máxima con dirección Sur-SW para el mes de mayo. Aunque estos cambian severamente por los fenómenos meteorológicos severos que pueden presentarse durante los meses de agosto a octubre, principalmente tormentas tropicales.

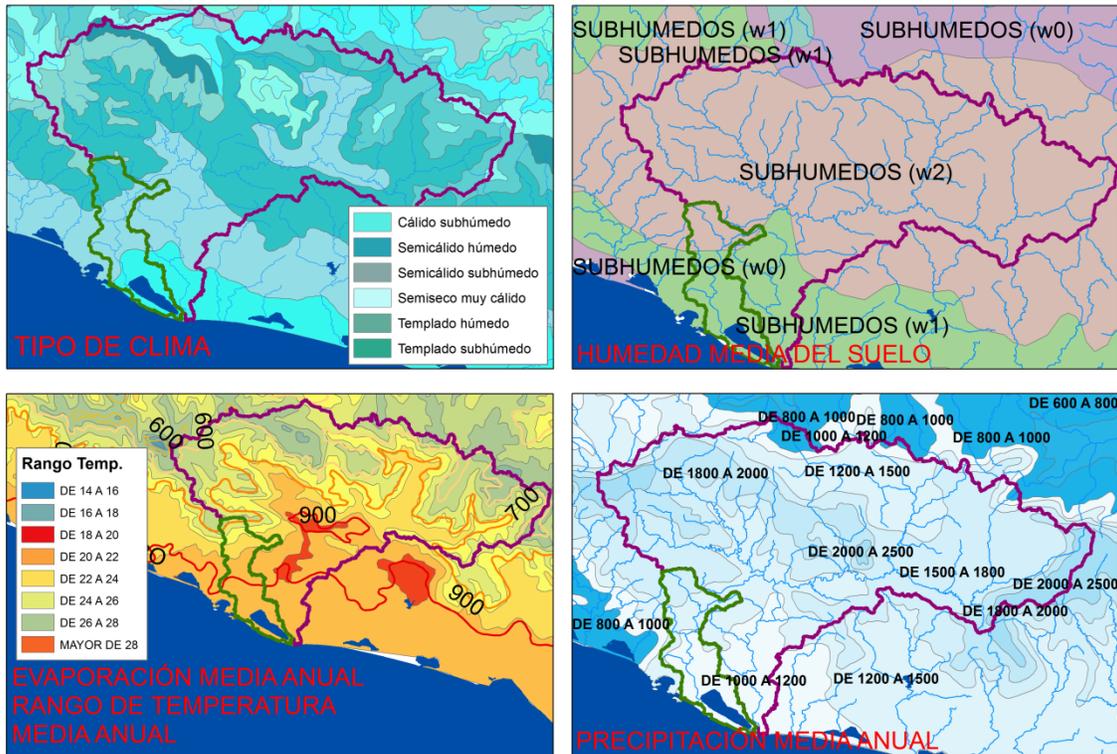


Figura 4-10 Parámetros climáticos de las cuencas del río la Sabana y Papagayo.

4.2.3. Geología, edafología y uso del suelo

La zona de estudio se ubica en una zona catalogada como formación de manglar, aunque principalmente la cuenca de la Sabana actualmente el uso de suelo es de zona urbana y asentamiento urbano (Figura 4-11). Es de resaltar que la planicie de inundación del río La Sabana ha sido cubierta casi por completo por asentamientos urbanos de nivel socio-económico medio-bajo en las regiones más al norte, mientras que la plusvalía de las propiedades aumenta conforme su ubicación es más cercana a la playa.

Respecto a la geología, por parte de la cuenca de la Sabana en su mayor parte, se compone por aluvión cuaternario de arenas y arcillas así como depósitos arenosos litorales del cuaternario. El primer conjunto se ubica en la cuenca del río La Sabana, en el canal de salida de la Laguna de Tres Palos y a ambos lados del cauce del río Papagayo y en su desembocadura. Los depósitos arenosos se ubican en toda la barra costera de la Zona Diamante. Por su parte, al norte de la Laguna de Tres Palos hay rocas metamórficas

y en la zona montañosa, rocas graníticas mesozoicas (Hernández Santana and Ortiz Pérez 2005). Los límites de la zona son un saliente rocoso conocido como Punta diamante al sur, y la costa secundaria de depositación marina perteneciente a la provincia fisiográfica Sierra Madre del sur y a la Sub-provincia Costas del Sur.

La cuenca del Papagayo predominan los lomeríos y planicies aluviales en la boca del río, así como rocas metamórficas en parte de su cauce. Los suelos en su mayorías son someros poco desarrollados, con promedio de Regosol, Cambisol y Feozem.



Figura 4-11 Edafología y uso del suelo para las cuencas de los ríos la Sabana y Papagayo.

4.2.4. Descripción del evento

Como se ha dicho, el evento extremo correspondiente fue resultado de la presencia simultánea de las tormentas tropicales, Manuel en el Pacífico Mexicano e Ingrid en el Golfo de México, que produjeron lluvias torrenciales que derivaron en situaciones de emergencia para la población. En particular, los daños registrados en el estado de Guerrero, atrajeron la atención de la sociedad civil, ya que el desbordamiento de diversos ríos en la zona alta produjo inundaciones en poblaciones como Chilpancingo y Tixtla. Por otro lado, en la zona costera del estado registró una inundación considerable en diversos desarrollos urbanos y hoteles localizados en la zona la turística Acapulco-Diamante, que se localiza entre la laguna Negra al oeste y la laguna de Tres Palos al este. El impacto en esta última región, fue de tal magnitud que quedó completamente incomunicada por tierra y aire durante unas horas dejando a un gran número de turistas varados en la zona hotelera.

Como resultado del evento, al menos se reportaron a 192 personas muertas, y el gobierno estimó pérdidas económicas totales de ambas tormentas en MXN75 millones (USD5.7 millones de dólares). Por otro lado, la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros estimó pérdidas aseguradas en al menos MXN12 billones (USD915 millones) (Aon-Benfield 2013).

Las lluvias provocadas principalmente por la tormenta tropical Manuel los días 15 y 16 de septiembre, afectaron severamente al país, el estado de Guerrero declaró emergencia en 59 de los 81 municipios que lo conforman. Debido a que algunos centros de población y cabeceras municipales quedaron incomunicados por bloqueos causados por deslaves e inundaciones. Entre los daños registrados por la incidencia de la tormenta se encuentran el desbordamiento de la presa la “La venta”, las inundaciones en diferentes municipios del estado, así como en diferentes colonias de la ciudad de Acapulco, especialmente en la zona Diamante y el aeropuerto.

El evento meteorológico denominado Manuel alcanzó la categoría de huracán 1 (en la escala Saffir-Simpson de Huracanes escala de viento), sin embargo su alcance al estado de Guerrero fue como tormenta tropical. Sin embargo, días después de su paso por Guerrero, se reconstruyó y siguió su curso hacia el norte del país rumbo al Golfo de California donde hizo una segunda entrada a tierra como huracán. De esta manera, Manuel produjo fuertes lluvias en todo el territorio nacional entre los días 12 y 20 de septiembre de 2013. La Figura 4-12 ilustra por medio de un mosaico de imágenes de satélite el paso de este fenómeno por el territorio Mexicano; la línea negra al sur de México indica los parteaguas de las cuencas de los ríos Sabana y Papagayo en el estado de Guerrero.

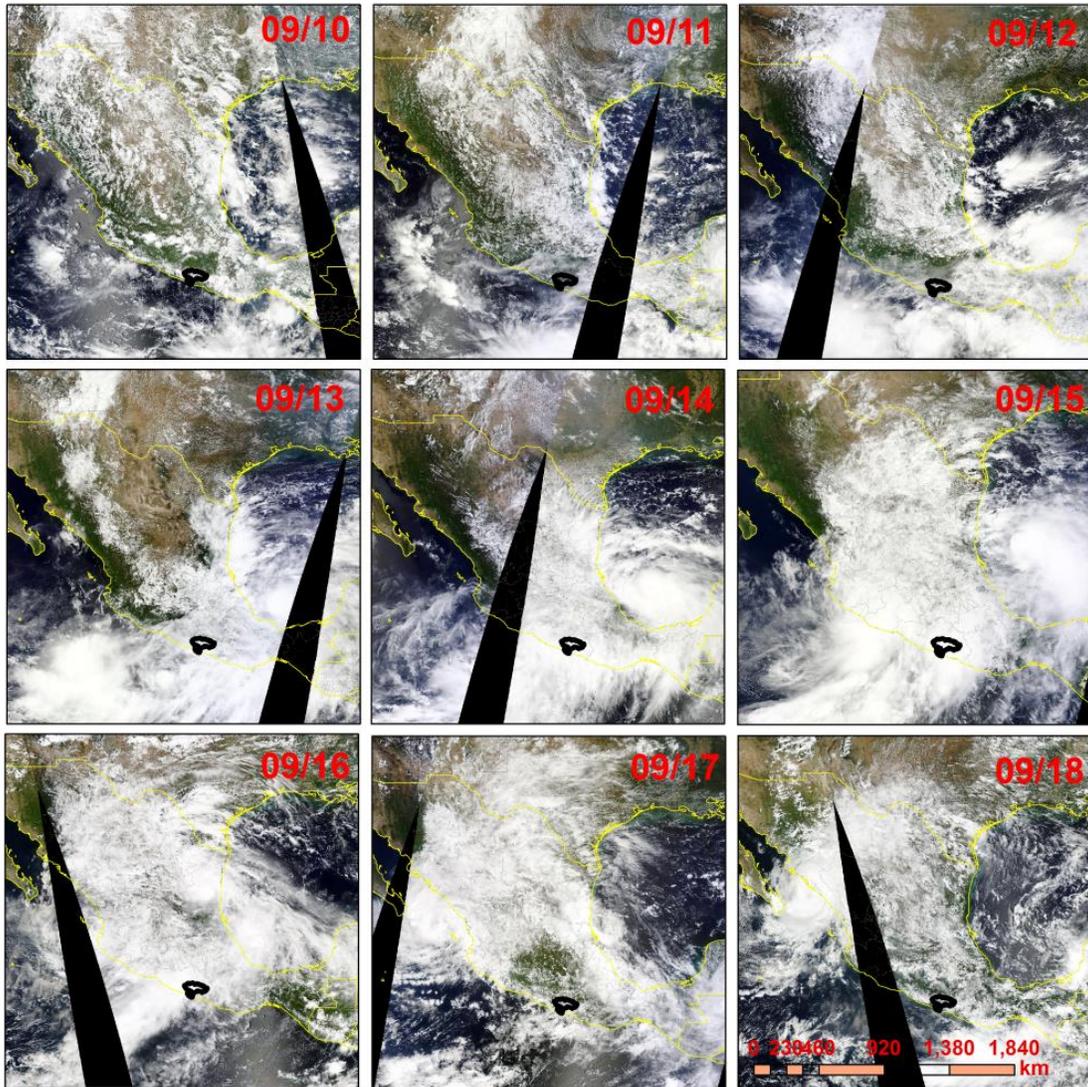


Figura 4-12 Evolución de los eventos meteorológicos Ingrid y Manuel sobre el territorio Mexicano. Sep-2013.

De acuerdo con un análisis hidrometeorológico del evento, publicado por Pedrozo-Acuña et al. (2014), el promedio de precipitación en todas las estaciones de la región, registró un valor de precipitación acumulada para este evento que representa cerca del 52% del valor medio anual. Es decir las intensas precipitaciones generadas por este meteoro superaron los 700 mm en 48 horas a lo largo de la costa del sur del océano Pacífico. De hecho, los registros de lluvias de algunas estaciones cerca al Pacífico sur de México, muestran que precipitación asociada con el evento de septiembre 2013 podría estar cerca de un período de retorno de entre 25 y 40 años.

Por último, la Figura 4-13 presenta una comparación de imágenes de satélite antes y después de la inundación, en donde se aprecian claramente las zonas más afectadas por el meteoro en la región. La imagen de después del evento (panel derecho) fue tomada el 18 de Septiembre de 2013, tal y como se ve, la zona de afectación incluyó desarrollos urbanos cercanos al importante centro turístico Acapulco Diamante, así como al Aeropuerto Internacional de Acapulco.



Figura 4-13 Imagen satelital de la zona de Acapulco (a) antes y después (b) de las inundaciones del 2013.

Capítulo 5. Marco de trabajo: modelación en cascada de flujos de inundación

La metodología propuesta en esta tesis doctoral, está diseñada de tal manera que sea posible evaluar la incertidumbre en cada una de las etapas que conforman el proceso de predicción de inundaciones. Por lo que se obliga al modelador a reconocer que el conocimiento científico formal, está construido sobre hipótesis y juicios, considerando un enfoque probabilista en todas las escalas espacio-temporales del sistema terrestre (atmósfera-cuenca-río). Este enfoque, considera el encadenamiento de modelos atmosféricos, hidrológicos e hidrodinámicos, de tal manera que dentro del marco de trabajo, es posible evaluar la incertidumbre y sus efectos en la predicción. En realidad, cada componente de cada modelo posee su propia fuente de incertidumbre (ej. variabilidad espacio-temporal de los parámetros), por lo que se produce una propagación y agregación de los errores a lo largo del proceso de modelación. De esta forma, aspectos innovadores de este marco de trabajo son: el reconocimiento del riesgo como una variable dinámica, la modelación en cascada (visión holística), y la evaluación de la incertidumbre asociada a cada etapa del pronóstico.

Este encadenamiento de modelos, comprende la simulación numérica en cascada a través de tres niveles diferentes de modelación. Desde una escala regional, implementada en el modelo meteorológico de mesoescala, pasando por el hidrológico a través de un modelo de parámetros distribuidos y terminando con la simulación de los flujos de inundación en el río y la llanura utilizando para ello un modelo hidrodinámico en dos dimensiones. La puesta a punto y verificación de esta cascada de simulación, se lleva a cabo a través del uso de datos pluviométricos observados in situ, imágenes de satélite, y estaciones hidrométricas.

La Figura 5-1 presenta un resumen gráfico de dicha metodología, en donde se observan las tres diferentes etapas de simulación desde la atmósfera hasta la inundación. En su primera etapa, la simulación meteorológica se considera la utilización de un ensamble generado a través de la modificación de los parámetros del modelo que controlan la física de la precipitación. Estas modificaciones permiten la generación de diversos escenarios

(n_{meteo}), que serán propagados hacia los otros dos modelos para producir un mapa de inundación probabilista. En este sentido, se determina la incertidumbre asociada a la simulación de la precipitación de un modelo meteorológico, para evaluar sus efectos en el resultado final. Así mismo, se realiza el mismo ejercicio de generación de escenarios con algunos conjuntos de parámetros del modelo hidrológico (definidos por $n_{hidrología}$). Así, el número de simulaciones o hidrogramas a propagarse hasta el modelo hidrodinámico está definido por $n_{meteo} \times n_{hidrología}$. Como se verá en este capítulo, la última etapa de esta cadena de simulación, considera la puesta a punto del modelo hidrodinámico, para ello se produce un solo arreglo numérico definido lo más cercano a la realidad con información de gran precisión y detalle (ej. datos de elevación provenientes de altimetría láser), el cual sirve para propagar los hidrogramas resultantes hasta el mapa de inundación asociado al evento.

El procedimiento propuesto, permite la evaluación rigurosa de diversas fuentes de incertidumbre epistémica, a lo largo de una cascada de modelos que representa la producción de eventos hidrometeorológicos en el sistema terrestre, desde la atmósfera y hasta el río. Los resultados obtenidos permitirán determinar el efecto de la incertidumbre en el resultado final, representado por el mapa de inundación del evento. El objetivo de este capítulo consiste en presentar para cada caso de estudio, cada uno de los modelos utilizados (atmosféricos, hidrológicos e hidrodinámicos), así como su puesta a punto con la información disponible.

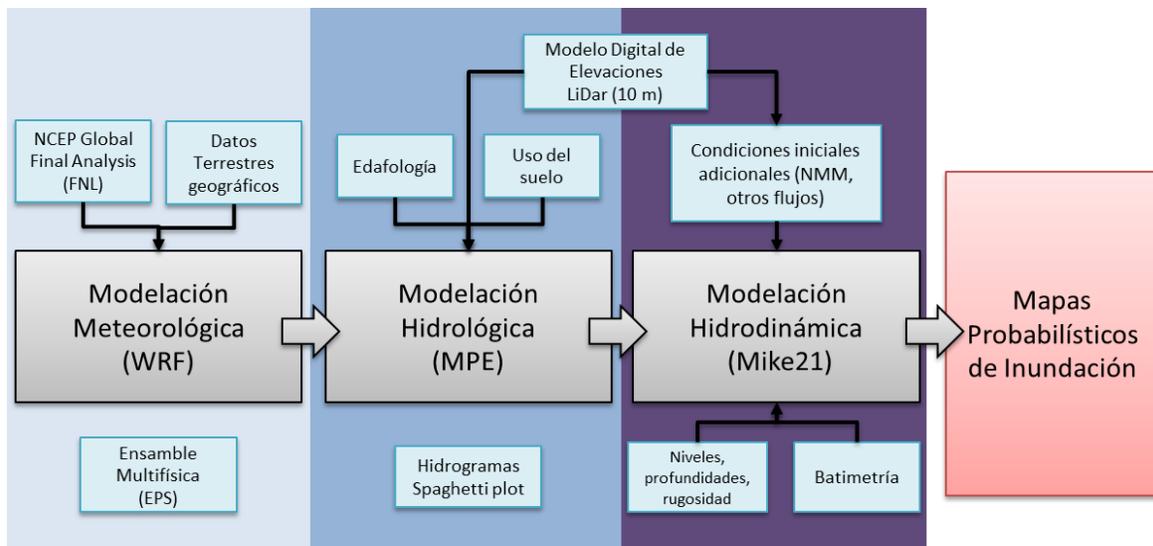


Figura 5-1 Metodología, modelación de inundación en cascada, para el desarrollo de mapas probabilísticos de inundación.

5.1. Modelo meteorológico

El desarrollo acelerado de las herramientas computacionales y de medición ha dado paso al acoplamiento de modelos en cascada para generar pronósticos hidrológicos. Estos sistemas hacen uso de las predicciones de la lluvia producidas por modelos climáticos regionales, de resolución adecuada a fin de predecir avenidas asociadas a eventos meteorológicos extremos (Bartholmes and Todini 2005, Demeritt et al. 2010). Sin embargo, menos frecuente ha sido la incorporación a este acoplamiento de modelos hidrodinámicos a que permiten estimar las zonas afectadas por la inundación., por este motivo, la incorporación de la parte hidrodinámica en este tipo de metodologías ha sido recientemente reportadas en la literatura (Pappenberger et al. 2013, Demeritt et al. 2013, Rodríguez-Rincón, Pedrozo-Acuña and Breña-Naranjo 2015).

5.1.1. Descripción del modelo meteorológico

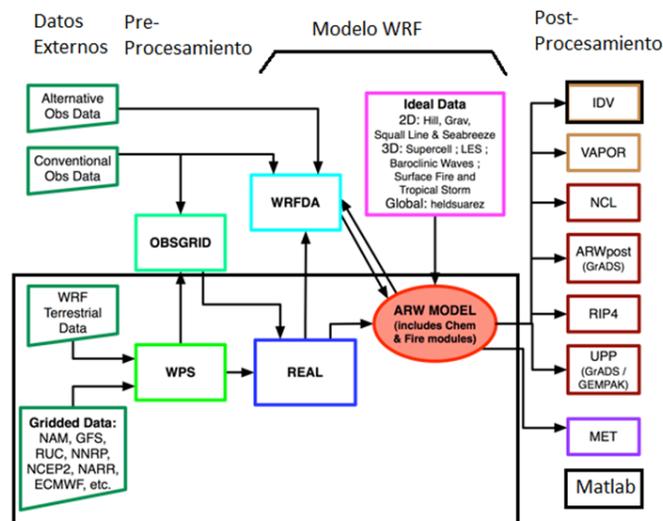
El modelo numérico utilizado a nivel atmosférico, corresponde al WRF (Weather Research and Forecasting model) (Skamarock et al. 2008); que es una herramienta de mesoescala para la predicción numérica de las condiciones meteorológicas de la atmósfera.

Esta herramienta numérica es sucesora del modelo MM5 y es resultado del esfuerzo de varias agencias meteorológicas abocadas a avanzar en la comprensión y la predicción del tiempo. Dentro de los principales desarrolladores están el National Center for Atmospheric Research (NCAR), la National Oceanic and Atmospheric Administration, los National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y el Forecast Systems Laboratory (FSL), la Air Force Weather Agency (AFWA), la Naval Research Laboratory, Oklahoma University, y la Federal Aviation Administration (FAA) entre otros; además de contar con la participación de grupos de investigación universitarios.

El modelo está disponible libremente en Internet (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>), y está preparado para funcionar sobre una amplia variedad de plataformas, adaptado tanto en supercomputadoras en paralelo como en computadoras portátiles de última generación. Esto le da versatilidad para diferentes tipos de investigación, por ejemplo,

simulaciones ideales, simulaciones reales, modelación de calidad del aire, estudios de eventos extremos etc. La versión utilizada en este trabajo de tesis corresponde a la 3.4.1.

El principal componente de la estructura del Software WRF (WSF-WRF Software Framework) son los dos solucionadores disponibles que se adaptan a la dinámica de paquetes de física atmosférica, además de componerse de un módulo de pre-procesamiento o programas para la inicialización, el WRF-Var (paquete de asimilación de datos o sistema de asimilación de datos variacional) y WRF-Chem (acoplamiento de análisis químico). Los núcleos o módulos que ofrece este modelo (solucionadores) para el cálculo de las ecuaciones que gobiernan la atmósfera son el WRF-ARW (Advanced Reserch WRF) desarrollado por la NCAR (Skamarock et al. 2008) y el WRF-NMM o No hidrostático modelo de mesoescala (Nonhydrostatic Mesoscale Model) desarrollado por la NCEP (Janjic et al. 2005). El primero de ellos, utilizado en esta tesis, utiliza ajustes dinámicos y de la parametrizaciones físicas mucho más complejas que las opciones muy limitadas del NMM. Cabe señalar, que los paquetes de la física son ampliamente compartidos por tanto el ARW como el NMM, aunque la compatibilidad específica varía en función de los esquemas considerados. A manera de resumen, la Figura 5-3 presenta la estructura de funcionamiento del modelo WRF completo, mientras que el recuadro negro identifica aquellas componentes utilizadas en este trabajo de investigación, en el que se utilizará la herramienta para la producción de distintos escenarios de precipitación.



Basado en el Manual WRF (Skamarock et al, 2008)

Figura 5-2 Estructura WRF. La zona del recuadro negro es la utilizada en este estudio.

Ecuaciones de gobierno del modelo

El módulo ARW (Advanced Research WRF) resuelve numéricamente las ecuaciones que gobiernan el flujo atmosférico. Así, utiliza las ecuaciones de Euler no hidrostáticas compresibles (Laprise 1992), utilizando variables de flujo que tienen propiedades de conservación, siguiendo la filosofía de (Ooyama 1990). El modelo representa el estado de la atmósfera en una retícula o red tridimensional (Malla escalonada Arakawa C) que sigue la topografía en términos de 6 variables fundamentales (3 componentes de viento, la temperatura, presión y humedad). Dada una condición inicial y de frontera, estas ecuaciones se integran numéricamente para avanzar en la predicción del estado del tiempo. Las ecuaciones son formuladas utilizando una presión hidrostática de seguimiento del terreno como coordenada vertical denotada por η que se define como:

$$\eta = \frac{(p_h - p_{ht})}{\mu} \quad \text{donde } \mu = p_{hs} - p_{ht} \quad (1)$$

El p_h es el componente de la presión, y p_{hs} y p_{ht} representan los valores límites a lo largo de la superficie y la parte superior, respectivamente. Esta coordenada vertical (η) también se llama coordenada vertical de masas (Laprise 1992).

Las ecuaciones de Euler de flujo para el modelo (Skamarock et al. 2008) se pueden escribir como :

$$\partial_t U + (\nabla * V_u) - \partial_x(p\partial_\eta\phi) + \partial_\eta(p\partial_x\phi) = F_U \quad (2)$$

$$\partial_t V + (\nabla * V_v) - \partial_y(p\partial_\eta\phi) + \partial_\eta(p\partial_y\phi) = F_V \quad (3)$$

$$\partial_t W + (\nabla * V_w) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (4)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla * V_\theta) = F_\Theta \quad (5)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla * V) = 0 \quad (6)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1}[(V * \nabla\phi) - gW] = 0 \quad (7)$$

Donde $\mu(x,y)$ representa la masa por unidad de área dentro de la columna en el dominio del modelo en (x, y) , las variables apropiadas de la forma del flujo son:

$$V = \mu v = (UVW), \theta = \mu\theta, v = (u, v, w), \quad \Omega = \mu\dot{\eta} \quad (8)$$

Los valores de v son velocidades covariantes en las dos direcciones horizontales y verticales y $w = \dot{\eta}$ es la velocidad contravariante vertical. θ es el potencial de temperatura. También aparece en las ecuaciones de gobierno las variables no conservativas $\Phi = gz$ (el geopotencial), p (la presión), y $\alpha = 1/\rho$ (la inversa de la densidad). Además, es posible encontrar en estos términos la relación de diagnóstico para la densidad inversa:

$$\partial_t \phi = -\alpha \mu \quad (9)$$

Y la ecuación de estado:

$$p = p_0 \left(\frac{R_d \theta}{p_0 \alpha} \right)^\gamma \quad (10)$$

En los términos de velocidad en las ecuaciones (2) y (3) se diferencia x , y y η como:

$$\nabla * V_a = \partial_x(Ua) + \partial_y(Va) + \partial_\eta(\Omega a) \quad (11)$$

$$\nabla * V_a = U\partial_x a + V\partial_y a + \Omega\partial_\eta a \quad (12)$$

El término α es representa la variable genérica. La relación $\gamma = C_p/C_u = 1.4$, es la relación de las capacidades de calor para aire seco, R_d es la constante de gas para el aire seco, y p_0 es una presión de referencia (típicamente 10^5 Pascales). Los términos a la derecha de igual F_U , F_V , F_W , y F_Θ representan los términos de forzamiento derivados de la física del modelo, la mezcla turbulenta, las proyecciones esféricas, y la rotación de la Tierra. Para una explicación más detallada de estas ecuaciones se refiere al lector a los documentos de (Skamarock et al. 2008) y (Kalnay 2003), donde es posible ver la inclusión de la humedad, el término de Coriolis, las proyecciones espaciales y el tratamiento para el cálculo de las ecuaciones en el modelo, incluyendo una explicación de las discretización en el tiempo.

Física del modelo

Las ecuaciones de gobierno que fundamentan la atmosfera son las misma sin distinguir la escala, sea global, mesoescalar, o local. Los procesos críticos para la meteorología regional y de escalas mayores se fundamentan en mecanismos de escala molecular y microescala, que hacen que la discretización de la ecuación de gobierno este limitada por

la resolución del modelo. Esto tiene implicaciones en la resolución espacial máxima a la que se puede resolver la física atmosférica, considerando como límite una resolución de 2km y tomando celdas de 10-20km de resolución de forma típica. Sin embargo, la física atmosférica tiene asociados procesos de microescala que pueden resultar importantes, y que generan transferencia de momento a escalas más grandes. Un ejemplo muy claro de lo anterior, es el fenómeno de turbulencia que tiene el potencial de generar remolinos desde escalas microscópicas por procesos de condensación y evaporación, a escalas que van de unos pocos centímetros hasta remolinos que poseen el tamaño de la resolución de la malla del modelo (ej. turbulencia en la capa límite planetaria) o mayores (ej huracanes).

Por esta razón, se denominan modelos regionales de mesoescala, debido a la manera en la que se representan los procesos físicos en escalas espaciales más pequeñas a través de parametrizaciones físicas. Así, una parametrización representa una aproximación empírica de un término desconocido a partir de uno o más factores conocidos, estas expresiones se utilizan para resolver procesos no entendidos por completo en función de las variables que el modelo si resuelve. Incorporando de esta manera el efecto del proceso (por ejemplo, un cambio en el perfil de temperatura debido a la turbulencia) en todos los campos y variables que si se representan en el modelo. Las parametrizaciones físicas de menor escala, pueden también tomar la forma de sub-modelos dentro de dominios anidados a uno principal, lo que se conoce como mesoescala. (Arakawa 2004), presentó un resumen en el que se indica de manera esquemática los procesos resueltos por el modelo, a lo que denomina como la "dinámica del modelo", en conjunto con los procesos que se deben parametrizar "el modelo de la física". De hecho, señala que algunos procesos a escalas menores a los de la malla de solución pueden ser interpretados como procesos de ajuste. Por ejemplo, la atmósfera debe ajustarse a las condiciones de la superficie a través de los procesos de la capa límite, que suelen ser muy eficientes si la capa límite planetaria es inestable. Otro ejemplo son los flujos radiativos, que ocurren porque la temperatura tiende a ajustarse hacia unas condiciones de equilibrio radiativo. Los procesos convectivos se producen en la presencia de una estratificación inestable y se debe ajustar el campo hacia un estado más neutralmente estable (Kalnay 2003).

Las opciones físicas del modelo WRF están divididas en 5 categorías, las cuales pueden ser elegidas y modificadas. WRF ofrece múltiples opciones de la física que se pueden combinar de cualquier manera. Las opciones se extienden típicamente desde la simple y

eficiente, a sofisticada y más computacionalmente costosa, y de los esquemas desarrollados recientemente, a los regímenes de probada eficacia, tales como aquellos en los modelos operativos actuales. Las opciones varían con cada versión del WRF, a continuación se esboza las más importantes que están disponibles en el WRF Versión 3.

Microfísica (mp_physics): Las nubes están formadas por gotas de agua o cristales de hielo microscópicos. En las nubes la denominación de los procesos de condensación en diferentes fases, y de formación de los distintos tipos de precipitación (lluvia, nieve, granizo, etc.) se denominan microfísica. Este campo tiene una gran complejidad, y da lugar a parametrizaciones con un gran número de parámetros difícilmente medibles. El WRF tiene esquemas tipo *bulk* que van desde la física simplificada adecuada para estudios idealizados o apropiados para modelación de mesoescala; a la física de fase mixta sofisticada adecuada para modelación explícita de nubes.

Parametrización de cúmulos (cu_physics, shcu_physics): La convección de los cúmulos es imprescindible para simular correctamente la circulación global, por ejemplo las células de Walker y de Hadley (Hourdin et al. 2006). El WRF contiene esquemas de flujo masa y ajuste para modelación de mesoescala.

Física de superficie (sf_sfclay_physics, sf_surface_physics): Las parametrizaciones de suelo y superficie (Land-Surface) introducen en el modelo las interacciones entre el suelo, la superficie, la vegetación y la atmósfera. Deben cumplir la importante tarea de cerrar los balances de energía y humedad en superficie. WRF contiene varios modelos de multicapas de superficie que van desde modelos complejos de humedad, vegetación y suelo, incluyendo la capa de nieve y el hielo marino. Estas parametrizaciones ayudan a calcular las velocidades de fricción y coeficientes de intercambio que permiten el cálculo de calor superficial y flujos de humedad por el modelo de superficie terrestre y la tensión superficial en el esquema de la capa límite planetaria.

Física de capa límite (bl_pbl_physics): Conocida como PBL-(Planetary boundary layer physics), su función es determinar la importancia de ciertas características del terreno desde el punto de vista del balance energético en la superficie y su influencia sobre la interacción aire-suelo en las capas bajas de la atmósfera. Los principales generadores de turbulencia en la capa límite planetaria (PBL) son las térmicas (pequeñas corrientes

convectivas de poca altura), la convección diurna y la cizalladura del viento (Kalnay 2003). Durante el día el sol calienta el suelo, que cede calor sensible al aire, inestabilizando el perfil vertical por la base. Este fenómeno da lugar a las térmicas, que generan turbulencia provocando que la PBL se desarrolle y gane altura.

Física de radiación atmosférica (ra_lw_physics, ra_sw_physics): Los esquemas de radiación proporcionan el calentamiento de la atmósfera debido a la divergencia del flujo radiactivo y la radiación de onda larga en la superficie y la radiación de onda corta para el balance de calor del suelo. Precisamente el modelo, como muchos otros, suele tratarse por separado la radiación de onda corta (emitida por el sol) y la radiación de onda larga (emitida por la tierra y su atmosfera), con múltiples esquemas de bandas espectrales y un esquema simple de onda corta, adaptado para aplicaciones de clima y del tiempo.

5.1.2. Implementación del modelo

Para representar adecuadamente los dos eventos completos de precipitación, se utilizaron dos dominios numéricos anidados de diferente resolución: el Dominio 1 con un tamaño de malla de 20 km, y el Dominio 2 con tamaño de malla de 4 km. En la Figura 5-3, se muestra los dos dominios anidados de cálculo para los dos casos. El dominio espacial 1 comprende todo México, así como una parte de América Central, y el dominio dos se resalta la zona de las cuencas en estudio para cada caso de modelación (Eventos del 2009 y 2013). Los datos terrestres de entrada son obtenidos de la NCAR, datos geográficos que están disponibles en todas las resoluciones (30", 2', 5'y 10'). Las coordenadas utilizadas para el enmallado son en proyección mercator, mientras que la coordenada vertical utilizada es sigma (siguiendo el terreno) con 28 niveles. Como datos atmosféricos de entrada, se utilizaron los datos del Análisis Final Global (Global Final Analysis, FNL) a intervalos de 6 horas, suministrados por el Centro Norteamericano para Predicción del Medio Ambiente (National Center for Environmental Prediction, NCEP).

Cada uno de los modelos de simulación se reinicializa cada 2 días a las 12:00 UTC, considerando un periodo que incluyeran la precipitación generada en su totalidad, para el evento del 2013 del 12 al 20 de septiembre, y para el evento del 2009 a partir de 27 de octubre hasta el 13 de noviembre.

Respecto a la configuración del modelo se realizaron unas primeras modelaciones en función de diferentes parametrizaciones físicas y cuatro tamaños de malla de cálculo (900

metros, 3.7 km, 9.25 km y 18.52 km). Estas últimas 4 alternativas se realizaron para ver la sensibilidad del modelo, tomando como objetivo inicial del trabajo, el de evaluar el comportamiento de los pronósticos del WRF en función de la microfísica de nubes, manteniendo fijas las parametrizaciones de la radiación, capa superficial, subsuelo y capa límite. Así mismo, se variaron algunos esquemas en las parametrizaciones físicas del modelo siguiendo algunas recomendaciones encontradas en la literatura, para otras zonas del mundo (Mercader et al. 2010, Efstathiou et al. 2013, Cintineo et al. 2014) y para México (López-Espinoza, Zavala-Hidalgo and Gómez-Ramos 2012). Los esquemas principales utilizados en la física del modelo, se presentan a continuación:

- **Microfísica: WSM5-WRF Single-Moment 5-class.** Esta parametrización corresponde a una versión ligeramente más sofisticada de un esquema simple (WRF Single-Moment 3-class scheme), eficiente con los procesos de hielo y nieve adecuado para tamaños de la malla de mesoescala, que permite simular procesos de fase mixta y agua (Hong, Dudhia and Chen 2004). Y **Thompson**; que considera en la la concentración de lluvia un nuevo esquema con los procesos de hielo, nieve y granizo blando adecuados para simulaciones de alta resolución (Thompson, Rasmussen and Manning 2004).
- **Radiación de onda larga y corta: CAM.** Es una parametrización resultado del modelo climático CAM-3 creado por la NCAR. El cual permite aerosoles y gases traza (Collins et al. 2004).
- **Física de capa superficial: Monin-Obukhov.** Estas parametrizaciones ayudan a calcular las velocidades de fricción y coeficientes de intercambio, que permiten el cálculo de calor superficial y flujos de humedad a través del modelo de superficie terrestre y la tensión superficial, dentro del esquema de la capa límite planetaria (Beljaars 1995).
- **Física del suelo: 5-layer thermal diffusion.** Esquema de temperatura única del suelo, usando cinco capas. Es el mismo esquema del modelo MM5 (Dudhia 1996). Y esquema **Noah**, que consiste en un esquema generado por el NCEP/NCAR/AFWA, con un modelo de temperatura y humedad del suelo en cuatro capas (Tewari et al. 2004).

- Física de capa límite (PBL): **Yonsei University YSU**. Esquema no-local-K con la capa de arrastre explícita y perfil parabólico K en la capa de mezcla inestable (Hong, Noh and Dudhia 2006).
- Cúmulos: **Kain-Fritsch**. Esquema de sub-cuadrícula de convección profunda y superficial utilizando un enfoque de flujo de masa (Kain 2004). Y el esquema **Betts-Miller-Janjic**. También conocido como Eta operacional, que considera un modelo hidrostático que emplea la coordenada vertical eta (Ma and Tan 2009).

La Figura 5-3 presenta la adecuación de la malla numérica utilizada en ambos casos de estudio seleccionados en esta tesis. Como se ve en la figura, en ambos casos se utilizan dominios anidados de diferente resolución a fin de poder llevar la escala espacial del modelo atmosférico a una escala relevante para los procesos hidrológicos asociados. Dado que los eventos seleccionados, representan fenómenos físicos de mesoescala (ej. frentes fríos y tormenta tropical), se utiliza en ambos casos, una resolución más fina de 4km, con lo cual se considera suficiente para la representación de la lluvia producida por ambos fenómenos atmosféricos. A manera de ejemplo, los paneles inferiores de esta figura, presentan los resultados tipo obtenidos para la lluvia acumulada durante los dos eventos estudiados en este trabajo de investigación.

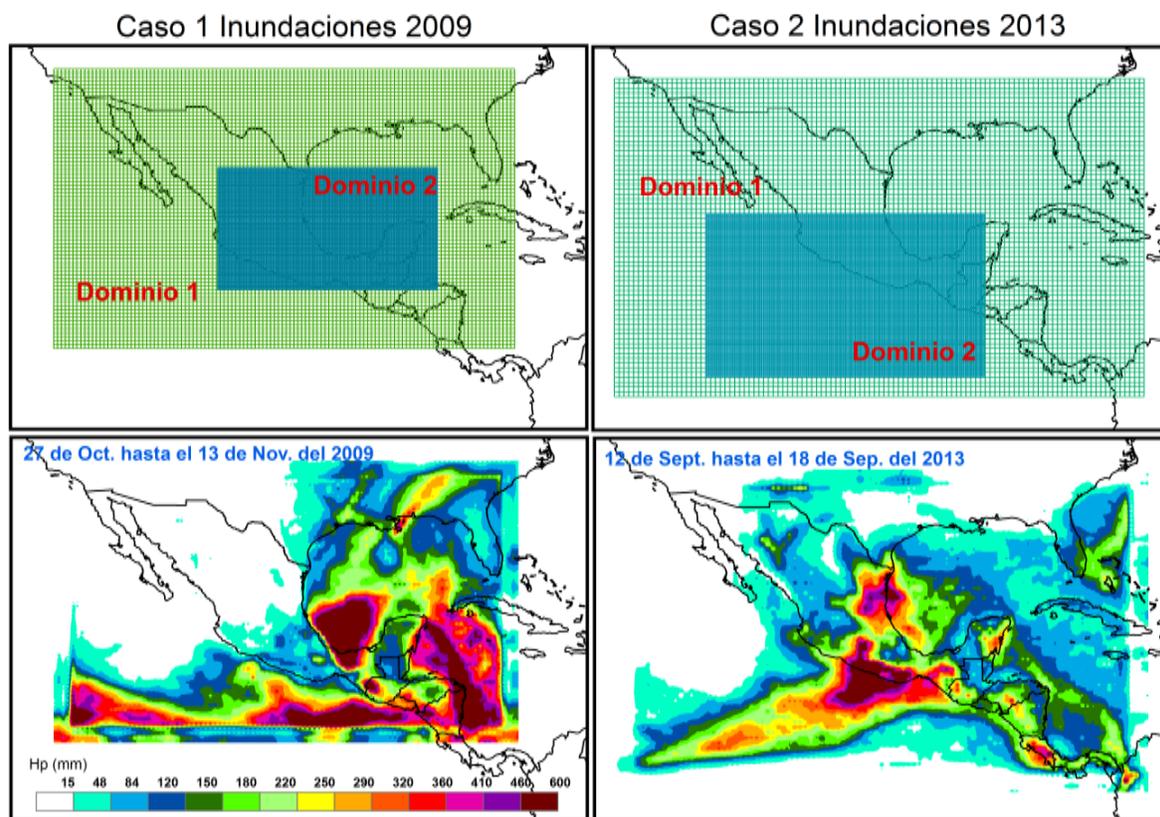


Figura 5-3 Resultados de la modelación meteorológica (lluvia acumulada) para los eventos en estudio. Los recuadros superiores representan los dominios anidados de cálculo del modelo.

5.2. Modelo hidrológico

Para el análisis de la escorrentía debida a las lluvias definidas por el modelo atmosférico, se utiliza un modelo hidrológico distribuido, que representa una de las herramientas numéricas más comúnmente utilizadas en hidrología para los pronósticos de inundaciones. Esto se debe a su capacidad de representar la cuenca por medio de una discretización espacial a resoluciones de 1km. Esta sección incorpora una descripción de las ecuaciones de gobierno del modelo hidrológico seleccionado y su configuración para la reconstrucción de los dos casos de estudio definidos.

5.2.1. Descripción del modelo

El modelo hidrológico seleccionado en esta metodología corresponde al Modelo para Pronóstico de Escurrimiento (MPE) desarrollado por investigadores de la Coordinación de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual pronostica los escurrimientos de una cuenca mediante un modelo de parámetros distribuidos (Domínguez et al. 2008). Esta herramienta se utilizó con el objetivo de definir los caudales asociados a ambos eventos extraordinarios el de río Tonalá en el año de 2009 y los ríos Papagayo y Sabana para el caso de inundación de Acapulco Diamante en 2013.

El MPE está basado en el método del Número de Curva del Soil Conservation Service (SCS-CN) (USDA 1985), con una modificación que permite considerar el secado progresivo del suelo después de la ocurrencia de una tormenta. La transferencia del escurrimiento se hace con el método de Clark modificado (Clark 1945, Che, Nangare and Mays 2014). El modelo trabaja con la información de una red de estaciones pluviométricas instaladas en la cuenca, en donde la información es interpolada de manera espacial junto con los parámetros hidrológicos de la cuenca. El modelo es capaz de obtener: la precipitación media, el hietograma, la lluvia en exceso, las pérdidas y el hidrograma a la salida de la cuenca.

Antes de simular la hidrología, se requiere de un pre-procesamiento de la información geoespacial a través del cual se determinan las propiedades físicas de la cuenca. Para este procesamiento se utilizó un Modelo Digital de Elevaciones proveniente de datos de altimetría láser con resolución espacial de 10 m. A través del cual se genera la red de corrientes y los parteaguas de las sub-cuencas útiles para representar la respuesta de la cuenca a la precipitación. Este pre-procesamiento permite discretizar la cuenca por medio de elementos rectangulares que conforman la malla de cálculo (celdas cuadradas o pixeles), en la que cada elemento de la misma requiere la definición de las características específicas del suelo, su pendiente y la trayectoria del flujo.

Ecuaciones de gobierno

El Método de curva del Soil Conservation Service (SCS-CN), tiene su base en la ecuación de balance hídrico y en dos hipótesis fundamentales: la primera establece que la razón entre el volumen de escurrimiento directo y el escurrimiento potencial máximo, es igual a la razón entre la infiltración real y la infiltración potencial máxima; mientras que la segunda

establece que la infiltración inicial, es una fracción de la retención potencial. La ecuaciones que definen el balance hídrico y las hipótesis son, respectivamente:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (13)$$

$$\frac{P_e}{P - I_a} = \frac{F_a}{S} \quad (14)$$

$$I_a = \lambda S \quad (15)$$

Donde P es la precipitación total, I_a es la infiltración inicial, F_a infiltración acumulada, P_e la precipitación efectiva y S es la infiltración potencial máxima. Para el manual del programa, la versión actual del método supone que $I_a = 0.2S$ para aplicaciones prácticas. El valor de λ (factor de escala de pérdida inicial) relaciona la infiltración potencial inicial de infiltración máxima. Al combinar las ecuaciones se obtiene:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}; I_a \leq P \quad (16)$$

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (17)$$

El valor de S en centímetros se calcula con:

$$S = \frac{2450 - (25.4 * CN)}{CN} \quad (18)$$

Otro factor importante que se incluye en las ecuaciones es el factor de escala de retención potencial (f_s). Este varía o modifica la retención potencial del suelo y, por tanto, el valor del número de curva. El cual permite modular la permeabilidad para ajustar la infiltración potencial máxima.

$$S_{\text{final}} = S * f_s \quad (19)$$

donde S es infiltración potencial máxima (cm).

Donde el CN es el Número de curva. Este último parámetro es el más generalizado y fácil de adaptar a cualquier región. Fue desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos en 1972 (USCS 1972). Este método se basa en la estimación directa de

la escorrentía superficial de una lluvia aislada a partir de características del suelo, uso del mismo y de su cubierta vegetal. En las tablas 5-1 y 5-2 se muestra la clasificación del uso del suelo y la relación del uso del suelo con el número de curva. Como se observa en la Tabla 5-1, el valor del parámetro número de curva para condiciones medias de humedad en el suelo depende del uso del suelo, las características hidrológicas, la pendiente del terreno y el tipo de suelo.

Tabla 5-1 Clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad.

Clave de clasificación FAO	Suelos	Tipo hidrológico de suelo	Permeabilidad	Propiedades
T	Andosoles			
Q	Arenosoles			
J	Fluvisoles	A	Muy alta	Arenas con poco limo y arcilla (escurrimiento mínimo)
O	Histosoles			
U	Ranker			
X, Y	Calcisoles (antes xerosol y yermosol)			
I, E	Leptosoles (antes litosoles y rendizinas)	B	Buena	Arenas finas y limos
Z	Solonchaks			
D	Podzoles			
F	Ferralsoles			
R	Regosoles			
H	Feozems			
K	Kastanozems	C	Media	Arenas muy finas, limos y bastante arcilla
N	Nitrosiles			
C	Chernozems			
-	Alisoles			
A	Acrisoles			
B	Cambisoles			
G	Gleysoles			
L	Luvisoles			
V	Vertisoles	D	Baja	Arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo)
W	Planosoles			
S	Solonetz			
D	Podzoluisoles			

Tabla 5-2 Número de curva según la cobertura del suelo.

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (INEGI)		GRUPO HIDROLÓGICO			
		A	B	C	D
AGRICULTURA (de humedad, de riego, de temporal)	Condición hidrológica mala	72	81	88	91
	Condición hidrológica regular	67	76	83	86
	Condición hidrológica buena	62	71	78	81
ÁREA SIN VEGETACIÓN APARENTE		77	86	91	94
ASENTAMIENTO HUMANO	Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc	82	88	91	93
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
	Residencial 50 % ó más área impermeable	77	85	90	92
	Residencial 50 % ó menos área impermeable	61	75	83	87
	Áreas comerciales de negocios (85 % impermeables)	89	92	94	95
	Distritos industriales (72 % impermeables)	81	88	91	93
	Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc	98	98	98	98
	Calles y carreteras (pavimentados con cunetas y alcantarillas)	98	98	98	98
	Calles y carreteras de grava	76	85	89	91
	Calles y carreteras de tierra	72	82	87	89
BOSQUE (cultivado, de encino, encino-pino, oyamel, pino, tascate, mesófilo de montaña)	Condición hidrológica mala	45	66	77	83
	Condición hidrológica regular	36	60	73	79
	Condición hidrológica buena	25	55	70	77
CARDONAL		54	71	80	89
CHAPARRAL (ARBUSTOS)		20	48	65	73
CUERPO DE AGUA		100	100	100	100

Por otro lado, a fin de considerar el secado del suelo después de una lluvia, el modelo posee un parámetro que hace que las aportaciones de las lluvias antecedentes vayan disminuyendo conforme pasa el tiempo. Este parámetro se denomina *factor de olvido* (f_x), y considera las pérdidas por evapotranspiración que se presentan durante el intervalo de tiempo de una tormenta a otra. Esto evita que al presentarse un segundo evento de lluvia,

el suelo se encuentre saturado y permita el escurrimiento directo de todo lo que llueve, muy útil para cuando se quiere calibrar eventos de varios días.

La transferencia del escurrimiento desde cualquier punto de la malla hasta el punto de salida del modelo, se resuelve por medio de un hidrograma unitario distribuido. El método utilizado es el hidrograma unitario distribuido de Clark modificado, que consiste en trasladar el escurrimiento producido en cada celda, hasta la salida de la cuenca después de transcurrido un intervalo de tiempo igual al tiempo de viaje desde la celda hasta la salida. Para ello, se combina un mapa de isócronas (curvas de igual tiempo de viaje) con la regulación en un embalse lineal (Straub, Melching and Kocher 2000). El modelo conceptual de este método, para modelos distribuidos, se muestra en la Figura 5-4. Este método, requiere la estimación de tres parámetros, además del gasto base, para la determinación del hidrograma de la cuenca: el tiempo de concentración T_c ; el coeficiente de atenuación por almacenamiento K ; y la constante de recesión del gasto base R . El tiempo de concentración T_c , se define como el tiempo que le toma a la precipitación excedente alcanzar la salida de la cuenca desde su punto hidráulicamente más remoto. Es una medida de retraso puro, sin tomar en cuenta el efecto de almacenamiento. El coeficiente de atenuación por almacenamiento, K , es una medida de retraso provocado por el efecto del almacenamiento natural.

La interpolación espacial de la información pluviométrica se lleva a cabo por medio del método de Shepard, que consiste en obtener una media pesada de los valores registrados en diferentes sitios próximos al punto de interpolación, utilizando como peso el inverso de la distancia del punto por interpolar a los puntos dato que le rodean.

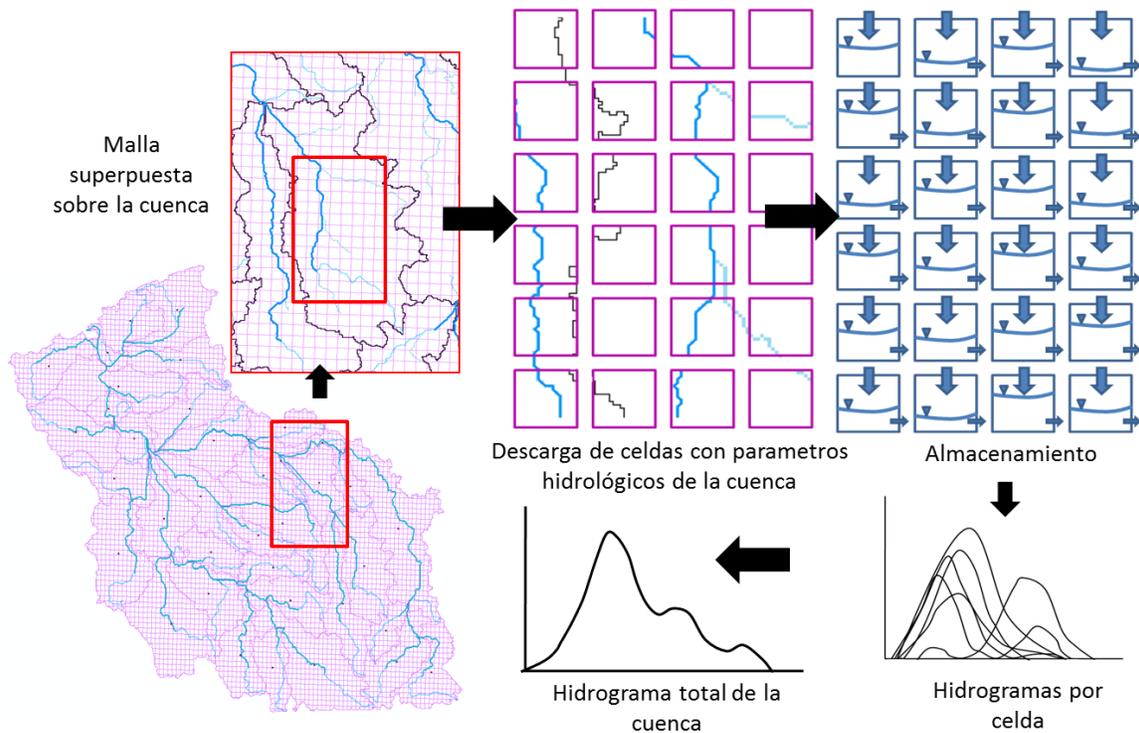


Figura 5-4 Modelo conceptual de Clark para modelos distribuidos. Adaptado de Kull y Feldman, 1998.

El modelo presenta parámetros de calibración para calcular el escurrimiento, estos factores se representan en parámetros de pérdidas y de forma. Los parámetros de pérdidas estiman el potencial de retención máxima del suelo (S) y la variación en el número de curva (CN), ya que no es absolutamente claro debido a la variabilidad en el uso de la tierra a través del tiempo. Es decir, se estima qué parte de la lluvia no se transforma en escurrimiento. Para cada cuenca en particular será necesario calibrar los parámetros I_a , S y f_x (parámetros de pérdidas) y los parámetros T_c , k (llamados parámetros de forma), y comparar los resultados obtenidos de la simulación con datos observados.

5.2.2. Implementación del modelo

La implementación del modelo hidrológico en ambos casos de estudio, requiere acciones particulares respecto al uso de la información disponible en cada caso y la definición de

las cuencas y las variables de entrada. En este sentido, se presenta por separado la definición de las cuencas en cada caso de estudio.

Cuenca del río Tonalá

Para el caso de la cuenca del río Tonalá, la configuración se realiza obteniendo los parámetros hidrológicos de la cuenca en forma de malla. En cada celda, los datos de lluvia son obtenidos de estaciones climáticas instaladas por la Comisión Nacional del Agua, que es el organismo oficial que tiene a su cargo la operación y conservación de la información climatológica del país. La Figura 5-5 presenta la ubicación geográfica de aquellas estaciones (automáticas, climáticas e hidrométricas) que se encuentran dentro del área de influencia de la cuenca. Para cada estación se relaciona el intervalo de tiempo de los periodos disponibles de información diaria de precipitación por año y la ubicación geográfica en grados de cada estación climatológica. Esto permitió la identificación de 4 estaciones climatológicas útiles, de las 12 estaciones encontradas, que tienen registros simultáneos para en el análisis de precipitación de la zona del río Tonalá. En todos los casos, los datos suministrados por estas estaciones tienen una resolución temporal de un día.

Los parámetros que son necesarios para la definición del número de curva de escorrentía en la cuenca son el grupo hidrológico de suelo, uso del suelo, la edafología y la red de drenaje del río. La Figura 5-6 muestra la cuenca del río Tonalá con la definición espacial de la red fluvial y el número de curva resultante. De igual forma, se presenta la malla de cálculo ($Dx= 1\text{km}$) utilizada por el modelo hidrológico para cada cuenca.

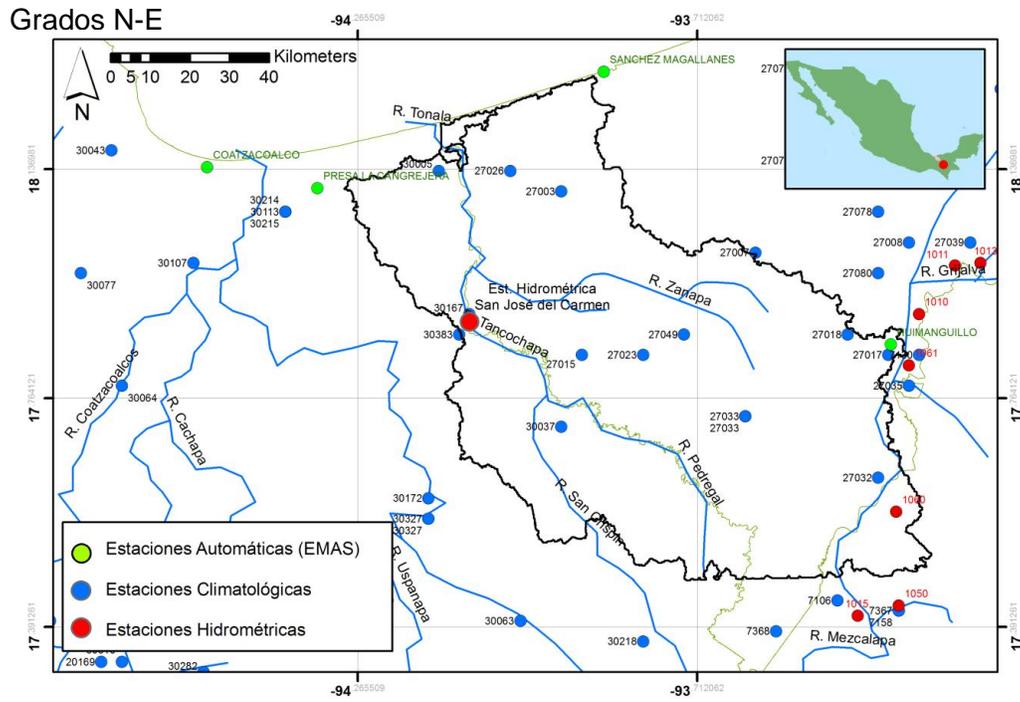


Figura 5-5 Estaciones de medición en la cuenca del río Tonalá.

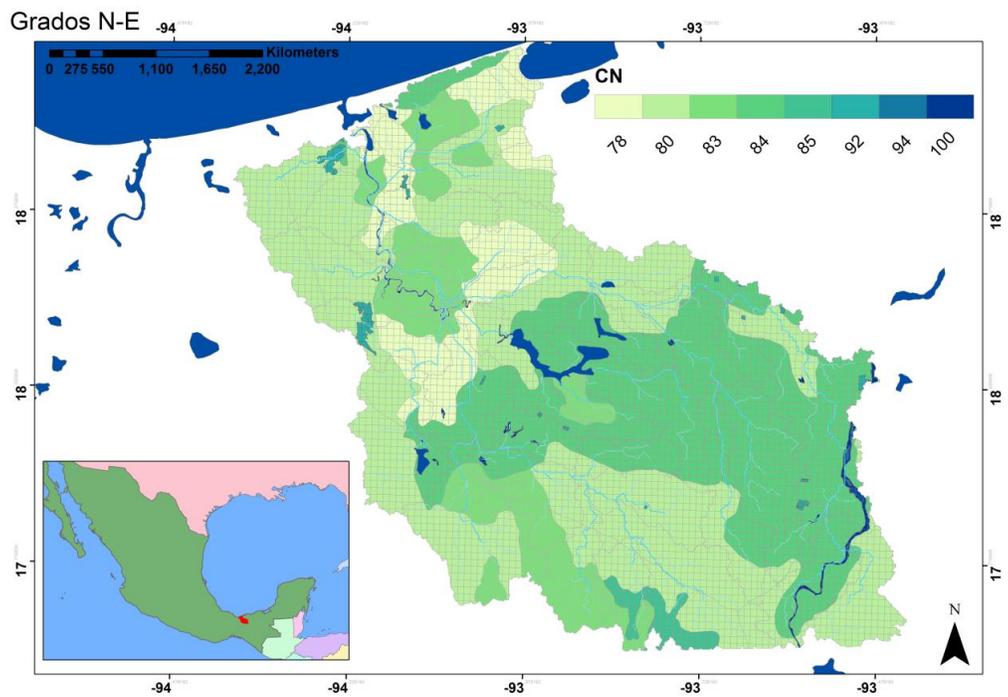


Figura 5-6 Cuenca del río Tonalá con la definición espacial de la red fluvial y el Número de Curva.

Para el análisis de incertidumbre en el nivel hidrológico, se recurre a la definición de conjuntos de parámetros válidos a ser utilizados en esta cuenca. Para ello se modifican los valores de dos de los parámetros libres del modelo a través de un proceso de calibración tradicional. Para ello, se utilizan los hidrogramas de eventos de inundación históricos que aparecen en el registro de la estación hidrométrica San José del Carmen, que monitorea los gastos sobre el río Tonalá. Para estos eventos, se definen los coeficientes de mejor ajuste y se establece una variedad de conjunto de parámetros que son capaces de representar la relación lluvia-escorrentía en la cuenca.

De manera complementaria, la Figura 5.7, presenta la serie temporal de los datos de gasto disponibles en la estación hidrométrica, en donde claramente se aprecia que el evento en estudio (año 2009), corresponde al de mayor magnitud dentro del registro. Los eventos extremos seleccionados para la definición de los parámetros libres son los de los años: 1999, 2001, 2005, 2007, 2008, 2009, 2010 y 2011. A partir del análisis de métricas del error, como son el coeficiente de correlación (Cor) y el de Nash-Sutcliffe (NSC), se determinaron seis conjuntos de parámetros libres que son lo suficientemente aceptables para representar la relación lluvia-escorrentía en esta cuenca.

A manera de resumen, estos conjuntos se ilustran en la Tabla 5-3, en donde para mayor información también se reportan el coeficiente de correlación y NSC para cada uno de los años seleccionados. De este ejercicio, se observa que el criterio de selección para los conjuntos de parámetros libres se dio en función de los valores de los coeficientes de correlación siempre que $Cor > 0.7$, y el coeficiente de Nash-Sutcliffe condicionándolo a un valor positivo (exactitud). Aquellos conjuntos de parámetros para los que no se cumplió esta doble condición fueron dejados fuera del análisis y se muestran en rojo dentro de la tabla.

En este sentido, los seis conjuntos de parámetros aceptados serán empleados para implementar un análisis de incertidumbre dentro del modelo hidrológico, con base en los eventos observados dentro de la información histórica.

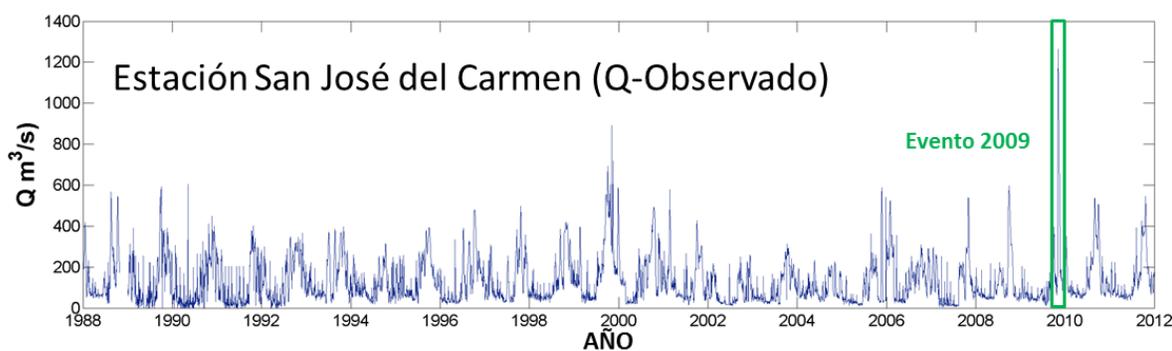


Figura 5-7 Gasto histórico del río Tonalá. Estación hidrométrica.

Tabla 5-3 Eventos históricos de avenidas extraordinarias usadas para la calibración de los parámetros libres del modelo MPE cuenca Tonalá, se incluyen el cálculo del error para cada uno.

Event	Max Q (m ³ /s) Obs.	λ	Fs	Fo	Max Q (m ³ /s) Calc.	NSC	Cor	Bias
1999	889.99	0.1	0.1	1	847.721	-3.642	0.054	1.032
2001	577.98	0.2	0.1	0.9	584.793	0.529	0.764	1.112
2005	589.25	0.4	0.6	0.9	609.87	0.812	0.907	1.043
2007	538.50	0.2	1.8	0.9	543.87	0.483	0.780	0.902
2008	597.35	0.4	1.8	0.9	823.036	0.155	0.861	0.983
2009	1262.57	0.8	1.8	0.9	1424.563	0.910	0.962	0.942
2010	536.01	0.2	0.8	0.9	678.389	-0.916	0.755	1.009
2011	545.40	0.9	1.6	0.9	597.075	0.413	0.721	1.051

Cuencas de los ríos la Sabana y Papagayo

Dado que el evento extraordinario del 2013, afectó a dos cuencas vecinas que claramente tienen interacción a través de la laguna de Tres Palos, se consideró necesario hacer el ajuste del modelo hidrológico para ambas.

En la Figura 5-8, se muestra la ubicación geográfica de las estaciones climáticas, hidrométricas y automáticas instaladas en la zona. De manera notable, a diferencia del caso de la cuenca del río Tonalá, en este caso los datos hidrométricos no están disponibles para ninguna de las dos cuencas. A pesar de ello, diversos estudios posteriores al evento estiman que el gasto máximo estimado del río para este evento fue en el río Papagayo de cerca 15,500 m³/s (Marengo Mogollón et al. 2014) y en el río la Sabana de 1,300 m³/s (Mejía Estrada, Rodríguez-Rincón and Pedrozo-Acuña 2014, Pedrozo-Acuña et al. 2014a).

A pesar de esta falta de información, existen datos históricos de las estaciones hidrométricas que permiten realizar una calibración tradicional del modelo tal y como se hizo para el caso del río Tonalá previamente descrito. La Figura 5-9 presenta los datos hidrométricos disponibles para ambas cuencas, registrados por las estaciones Km-21 y Tuncingo dentro de la cuenca del río La Sabana, y la estación La Parota dentro de la cuenca del río Papagayo. En ambas figuras, la línea horizontal discontinua reporta el umbral del gasto estimado para el evento de septiembre de 2013.



Figura 5-8 Estaciones de medición en las cuencas de los ríos Sabana y Papagayo.

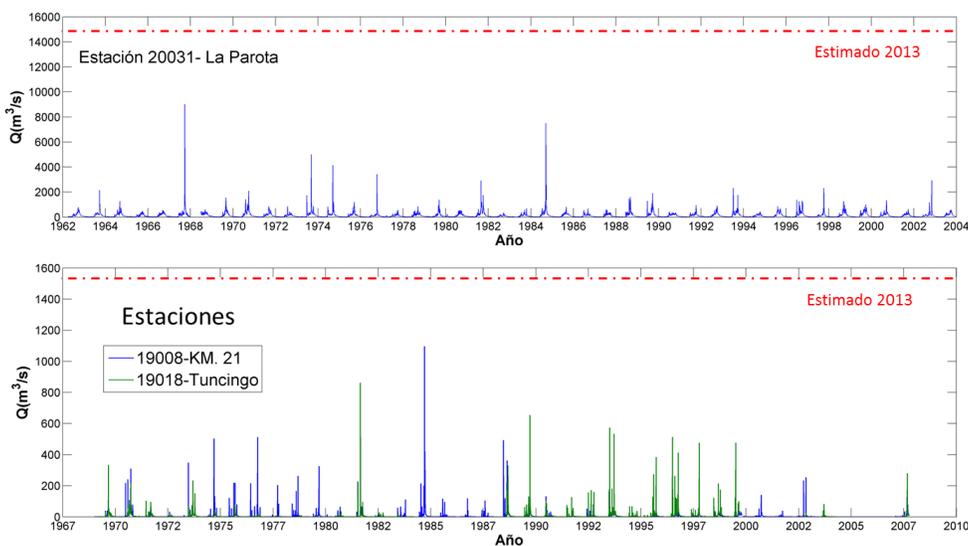


Figura 5-9 Gastos históricos disponibles en las cuencas del río Papagayo (panel superior) y la Sabana

(panel inferior).

La Figura 5-10 muestra la discretización de las cuencas de los ríos Sabana y Papagayo con una resolución espacial de 1km, en conjunto con la red fluvial y el número de curva resultante.

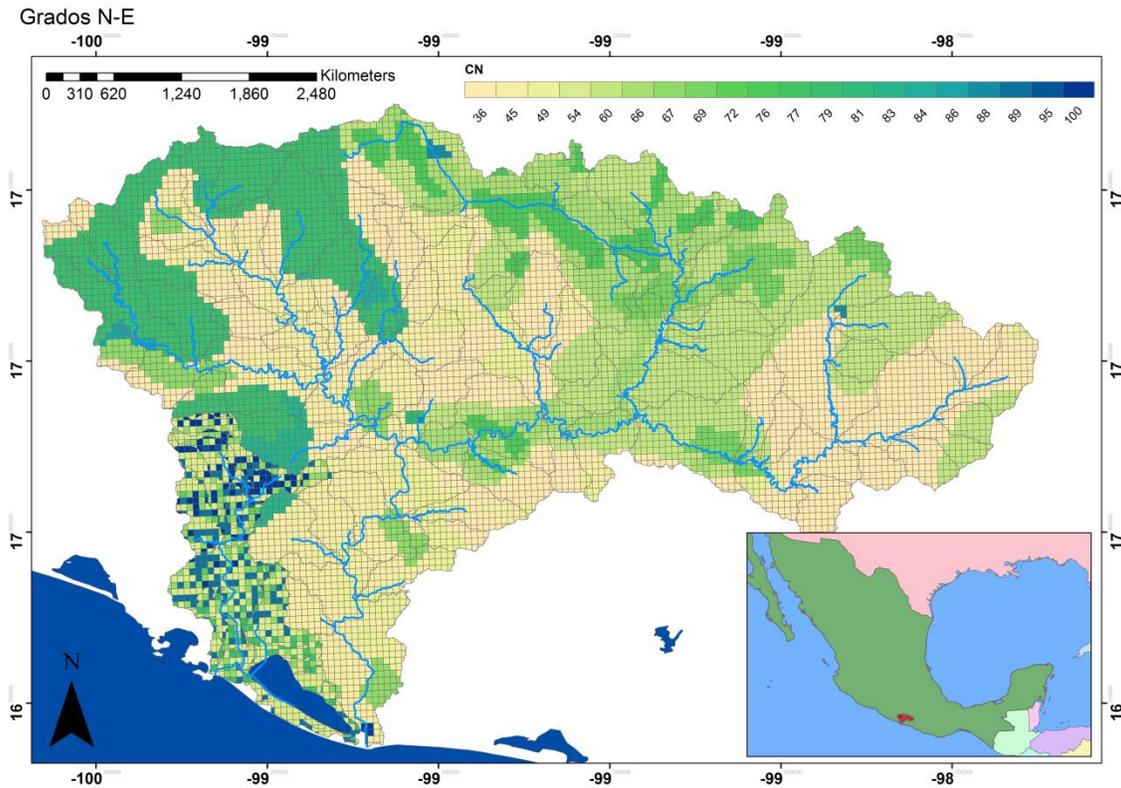


Figura 5-10 Cuencas de los ríos Sabana y Papagayo. Definición espacial de la red fluvial y el Número de Curva.

Al igual que en el caso anterior, se lleva a cabo la variación de conjuntos de parámetros libres en función de la información hidrométrica histórica. De esta manera, se definen aquellos parámetros que mejor representan la relación lluvia-escorrentía en cada cuenca. A manera de resumen, la Tabla 5-4 presenta los eventos extremos seleccionados para este análisis en las cuencas de los ríos Sabana y Papagayo. En donde se reportan los eventos extremos de los años 1984, 1989, 1993, 1997, 1998, 1999, sus correspondientes coeficientes de correlación y Nash-Sutcliffe a fin de descartar y seleccionar solo aquellos con $Cor > 0.7$ y NSC positivo.

Tabla 5-4 Parametros de avenidas extraordinarias usados para la calibración de los parametros libres del modelo MPE cuencas La Sabana y Papagayo, se incluyen el cálculo del error para cada uno.

Cuenca río Papagayo								
Evento	Max Q (m3/s) Obs.	λ	Fs	Fo	Max Q (m3/s) Calc.	NSC	Cor	Bias
1984	7,492.00	0.6	0.2	1	5,835.13	0.281	0.716	0.600
1989	1,910.00	1	0.8	0.99	2,958.72	0.465	0.708	1.071
1993	2,326.00	0.2	0.8	1	2,328.58	0.163	0.521	0.746
1997	2,300.00	0.6	0.9	0.99	2,507.21	0.375	0.625	0.868
1998	1,267.00	0.6	0.9	1	1,351.09	-0.267	0.333	0.859
1999	997.00	0.8	0.9	0.99	1,005.29	0.092	0.495	1.169
2002	2,937.00	0.6	0.2	1	2,780.49	0.717	0.847	0.956
2013	ND	0.4	0.2	1	15,173.67	-	-	-
Cuenca río La Sabana								
Evento	Max Q (m3/s) Obs.	λ	Fs	Fo	Max Q (m3/s) Calc.	NSC	Cor	Bias
1984	1,096.56	0.2	0.6	1	1,096.56	0.369	0.677	0.590
1989	654.20	0.8	1.2	0.99	647.13	0.516	0.741	0.681
1993	573.08	0.2	0.8	1	573.08	0.727	0.886	0.608
1997	475.14	0.6	0.8	1	536.71	0.517	0.817	0.415
1998	214.12	0.6	0.8	0.99	258.81	-0.322	0.208	0.423
1999	477.38	0.6	1.2	1	477.38	0.518	0.799	0.507
2002	254.81	0.2	0.4	1	254.81	0.310	0.661	0.593
2013	-	0.2	0.4	1	1,517.76	-	-	-

5.3. Modelo hidrodinámico

La última etapa de simulación en este marco de trabajo, corresponde al modelo hidrodinámico bidimensional que permite la simulación de los flujos en el cauce y en la llanura de inundación del río. Diversos estudios reconocen en estas herramientas una poderosa vía para otorgar una impresión más directa y más fuerte de los impactos que las inundaciones tienen sobre la sociedad (Merz et al. 2007, Leedal et al. 2010).

Estos modelos numéricos resuelven las ecuaciones fundamentales de conservación de masa y cantidad de movimiento, expresadas a través de en un sistema de ecuaciones diferenciales parciales.

La modelación hidrodinámica en este trabajo de investigación, permitirá propagar la incertidumbre hasta el resultado final (mapa de inundación), permitiendo además su visualización a través de probabilidades. En esta sección, se presenta una A una

descripción del modelo numérico seleccionado, así como la puesta a punto para ambos casos de estudio.

5.3.1. Descripción del modelo

En este trabajo de investigación, se utiliza el modelo numérico bidimensional conocido como MIKE21, desarrollado por el DHI (Danish Hydraulic Institute). Este modelo utiliza un mallado flexible y resuelve las ecuaciones verticalmente integradas para la conservación de masa y cantidad de movimiento. De esta forma, el modelo tiene su base en la solución de las ecuaciones incompresibles promediadas de Reynolds (RANS - Reynolds averaged Navier-Stokes equations), sujetas a aproximaciones de Boussinesq y de presión hidrostática. Las aproximaciones de Boussinesq sugieren que se pueden despreciar las variaciones de densidad en el fluido excepto en el término de gravedad donde aparece el producto densidad y la gravedad (manual DHI, 2014).

Respecto a la suposición de presión hidrostática, el cálculo en el dominio es predominantemente horizontal lo que supone que las aceleraciones verticales son despreciables frente a la aceleración de la gravedad.

Ecuaciones de gobierno del modelo

Las ecuaciones que utiliza el modelo son las de continuidad de masa y cantidad de movimiento. Si se integran estas ecuaciones en la profundidad ($\mathbf{h} = \boldsymbol{\eta} + \mathbf{d}$) y se promedian en un período de tiempo en un sistema de coordenadas localizado en el nivel medio del mar, se obtienen las siguientes ecuaciones de continuidad de masa (1) y cantidad de movimiento (2) y (3):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hSP \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} \\
 & = F\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial x} + \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial x} + \frac{\tau_{xx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{xy}}{\rho_0} - \frac{I}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_x S
 \end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial x} \\
 & = F\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial y} + \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial y} + \frac{\tau_{xx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{xy}}{\rho_0} - \frac{I}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_x S
 \end{aligned} \tag{22}$$

Donde t es el tiempo, x , y y z son las coordenadas cartesianas; η es la elevación de la superficie; h es la profundidad total; u , v y w son las componentes de velocidad en la dirección x , y y z . F , es el parámetro de coriolis; g es la aceleración por la gravedad, ρ_a es la presión atmosférica; ρ_0 es la densidad de referencia del agua S es la magnitud de la descarga. La barra superior indica un valor promediado en la vertical, en efecto, \bar{u} y \bar{v} son las velocidades promediadas en la vertical definidas por:

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \tag{23}$$

$$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \tag{24}$$

La determinación de las variables:

$$H = \eta + h \tag{25}$$

$$S_{xx} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} (\rho u^2 + p) dz dt - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 p_0 dz dt \tag{26}$$

$$S_{yy} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} (\rho v^2 + p) dz dt - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 p_0 dz dt \tag{27}$$

$$S_{xy} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 \rho u v dz dt \quad (28)$$

$$\eta = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \eta(x, y, t) dt \quad (29)$$

$$U = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} u(x, y, z, t) dt \quad (30)$$

$$V = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} v(x, y, z, t) dt \quad (31)$$

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad (32)$$

$$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (33)$$

Aplicando la teoría lineal de ondas, se obtiene las expresiones para los tensores de radiación de 2° orden:

$$S_{xx} = E(n \cos^2 \theta + n - \frac{1}{2}) \quad (34)$$

$$S_{yy} = E(n \sin^2 \theta + n - \frac{1}{2}) \quad (35)$$

$$S_{xy} = E \sin \theta + \cos \theta \quad (36)$$

dónde:

$$E = \frac{\rho g H_1^2}{8}, \quad n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \quad k = \frac{2\pi}{L}$$

Con lo cual los tensores de radiación en cada punto del dominio dependen de $(\mathbf{H}_1, \mathbf{T}, \theta, \mathbf{h})$. Las variables dependientes son $\eta, \mathbf{U}, \mathbf{V}$, que representan la elevación de la superficie libre sobre el nivel de referencia y las corrientes promediadas en la vertical en un período de tiempo en las direcciones \mathbf{x} e \mathbf{y} , respectivamente.

Otras variables descritas son: T período del oleaje, SS_{xx} tensor de radiación en la dirección x , SS_{yy} tensor de radiación en la dirección y , E energía del oleaje, k número de onda, θ es el ángulo del vector de onda con el eje x , P presión total, H_1 altura de ola, g aceleración de la gravedad, y ρ densidad del flujo.

5.3.2. Implementación del modelo

El primer paso en la puesta a punto del modelo numérico consiste en la asimilación de la información topo-batimétrica, a fin de obtener una malla numérica lo suficientemente detallada y estable para la correcta simulación de flujos de inundación dentro del sistema en estudio. Esta malla comprende la discretización numérica de la información de elevaciones y profundidades para la región seleccionada.

Para cada caso de estudio, se definió una malla computacional lo suficientemente detallada, siguiendo las buenas prácticas de la simulación de flujos de inundación, por medio de elementos triangulares de resolución variable. La Figura 5-11 presenta ambas mallas de cómputo utilizadas para los casos del río Tonalá (panel izquierdo) y Sabána y Papagayo (panel derecho), respectivamente. En ambos casos, se muestran los niveles de elevación y profundidad de la topografía y batimetría a través de la escala de colores. Adicionalmente, se indican las entradas o condiciones de frontera para el forzamiento del modelo para los dos eventos de análisis.

En ambos casos, las mallas de las llanuras de inundación fueron construidas con diferentes subdominios de resolución variable, a fin de resolver de manera eficiente el problema hidrodinámico en cuestión al menor coste computacional.

En el caso del río Tonalá (panel izquierdo), la malla numérica considera condiciones contorno de entradas y salidas, en el punto en el que el hidrograma del modelo lluvia-escorrentía se establece como forzamiento (punto azul). El segundo punto azul dentro del dominio de cálculo corresponde al flujo del río Agua Dulcita que para propósitos de este estudio se definió como constante de $100\text{m}^3/\text{s}$, valor que se definió con un estudio de sensibilidad al calibrar el modelo en condiciones extremas. Las condiciones normales del río fueron valoradas en una campaña de campo intensa, donde se pudieron calibrar los valores del flujo del río (Alvarez Celso 2011).

En ambos casos, las condiciones de salida del flujo se indican con el punto rojo, en este caso se utilizaron para su definición la predicción teórica de la marea astronómica esperada para los días del evento.

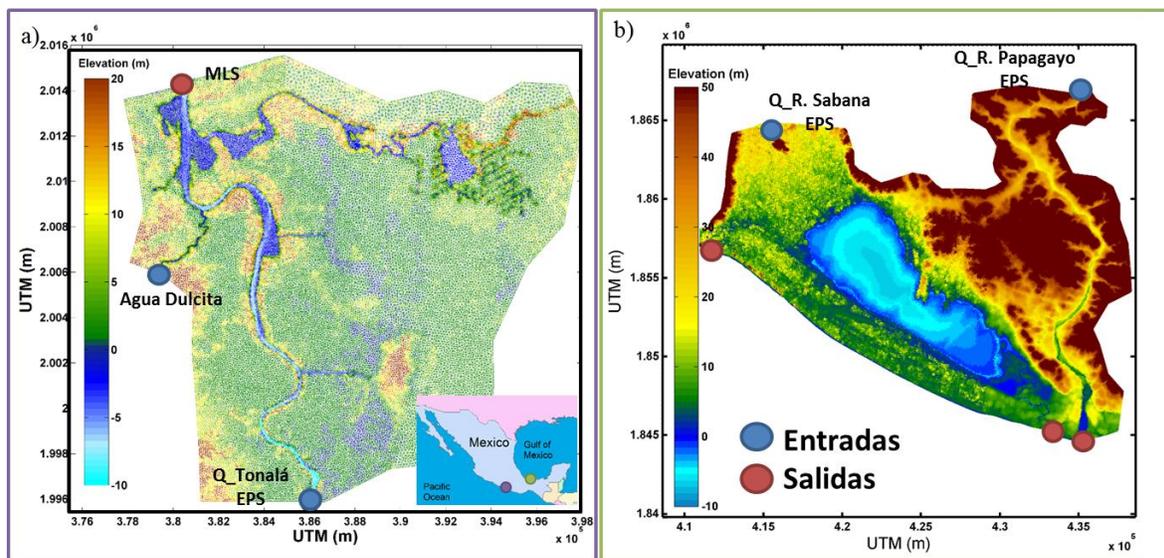


Figura 5-11 Malla de modelación y condiciones de frontera eventos de inundación. a) Caso 1 Tonalá-2009. b) Acapulco-2013.

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) utilizados en ambos casos, corresponden a información de elevación proveniente de datos de altimetría láser LIDAR en inglés, provenientes del INEGI (2015) con una resolución espacial de 10m y una precisión vertical de 0.05 m, la cual se considera una de excelente calidad para la determinación de los flujos de inundación. La elección de la resolución de 10 m para este MDE se basa en las recomendaciones formuladas por el Comité de Asignación de llanuras de inundación Technologies, NRC (2007) y Prinos et al. (2008). La rugosidad hidráulica en la llanura de inundación se supone uniforme y diferente del canal principal del río, en este sentido dos valores para el número de Manning se utilizan, uno para el canal principal del río ($M = 32\text{m}^{1/2}/\text{s}$) y otro para la llanura de inundación ($M = 28\text{m}^{1/2}/\text{s}$).

Capítulo 6. Análisis de resultados

En este capítulo, se presentan los resultados de la aplicación de la metodología descrita a los dos casos de estudio seleccionados: el del río Tonalá en el estado de Tabasco y el de las cuencas de los ríos La Sabana y Papagayo en el estado de Guerrero. Esta metodología, pionera tanto en su desarrollo como en su utilización en México, considera un enfoque probabilista en todas las escalas espacio-temporales del sistema terrestre, simulando de forma escalonada al fenómeno de inundación.

De manera notable, la incorporación del análisis y evaluación de la incertidumbre en cada etapa del pronóstico, permite la generación de mejores estrategias de gestión del riesgo debido a eventos extremos, pues considera al pronóstico como un proceso altamente no lineal en el que errores en diversas etapas de simulación se agregan para afectar el resultado final o mapa de inundación.

En este sentido, el análisis de resultados comienza con la cuantificación de la incertidumbre epistémica en el modelo meteorológico, debida a la parametrización utilizada para la estimación de la lluvia. Los diferentes escenarios de precipitación generados, son utilizados como condiciones de forzamiento para un modelo hidrológico que resuelve para cada cuenca la relación lluvia-escurrimiento. A su vez, estos caudales se utilizan para la generación de N mapas de inundación que permiten en cada caso, la creación de un mapa probabilista de la inundación asociada al fenómeno meteorológico en cuestión. De acuerdo con la naturaleza de propagación del fenómeno dentro del sistema terrestre, los resultados se presentan desde la atmósfera, pasando por los resultados a nivel cuenca (gasto en los ríos) y terminando con la comparación de resultados en función de la capacidad de la metodología para identificar de manera acertada las zonas afectadas por la inundación.

6.1. Análisis meteorológico

Con el propósito de limitar la incertidumbre asociada en la determinación de las avenidas extraordinarias, este trabajo de investigación tiene su base en el enfoque de ensambles

meteorológicos – EPS. Este forma el primer paso de la modelación en cascada, y se logra con el modelo WRF generando un ensamble multi-física, a través de sus diferentes opciones en la parametrización de la física del modelo que determina la precipitación. Este procedimiento, se lleva a cabo en dos casos emblemáticos que dejaron graves consecuencias a su paso y que fueron producidos por eventos climáticos disímboles. Por un lado, la presencia de un frente frío sobre el estado de Tabasco (río Tonalá en 2009) y por otro, la incidencia de dos tormentas tropicales sobre el territorio mexicano y más específicamente en la costa de Guerrero (ríos La Sabana y Papagayo en 2013).

El empleo de una metodología escalonada para la predicción de mapas de inundación, tiene su base en los sistemas de modelación atmósfera-cuenca, que utilizan ensambles meteorológicos (HEPS) para la generación de hidrogramas. La implementación de técnicas de predicción climática basadas en ensambles EPS (Ensemble Prediction Systems, por sus siglas en inglés), involucran la generación de n escenarios (o causas) asociados a una condición climática en el caso de este trabajo generados a través del empleo de diversos parámetros de multi-física en el modelo. Las diferentes representaciones de las condiciones atmosféricas así obtenidas, permiten la definición de límites de confiabilidad o incertidumbre asociada al proceso de predicción de la lluvia (Cloke and Pappenberger 2009).

En la siguiente sección, se presenta una descripción detallada de este procedimiento para ambos casos de estudio.

6.1.1. Generación de Ensambls meteorológicos - EPS

La producción de diferentes simulaciones para un mismo evento puede generarse de tres formas distintas, por medio de: a) El uso de condiciones iniciales ligeramente diferentes (Molteni y Palmer 1993); b) El empleo de parámetros diferentes (e.g. Murphy et al., 2004) y c) El uso de diferentes modelos que permiten simular numéricamente al mismo fenómeno. A este último grupo se le conoce como super-ensambles. En los tres casos, las diferentes simulaciones están diseñadas para tener un estimado de la incertidumbre epistémica asociada al modelo meteorológico.

En esta tesis se considera la generación de diversos escenarios de precipitación para un mismo evento, considerando variaciones en en la definición de los parámetros que controlan la multi-física de la precipitación, esto se hace siguiendo el procedimiento descrito por Bukovsky and Karoly (2009). Los esquemas de multi-física dentro del modelo meteorológico varían en su grado de sofisticación y complejidad, de hecho, se ha reportado que algunos de los esquemas no funcionan correctamente en altas resoluciones (por ejemplo, la parametrización de nubes tipo cumulus nimbus), (Chen and Dudhia 2000).

En los casos que nos atañen, las diferentes configuraciones seleccionadas para en el modelo se construyen por medio del cambio en la parametrización de fenómenos de convección y en los esquemas de capa superficial.

Adicionalmente, se emplean otras dos opciones para la evaluación de diferentes respuestas del modelo numérico. La primera de ellas corresponde al encendido del **feedback** o retroalimentación, que relaciona los cálculos con el dominio principal y el subdominio de más resolución. Esta opción, como su nombre lo indica, permite que haya una retroalimentación de dos vías entre los cálculos realizados en el anidamiento y el dominio principal. Cuando se activa, los valores del dominio principal son sobrescritos por los valores del promedio en las celdas del subdominio y viceversa. Este procedimiento mejora la eficiencia de cálculo en los resultados, sin embargo hace que el modelo utilice más recursos computacionales y de tiempo. Cuando la retroalimentación está apagada significa que la ejecución se hace en un solo sentido hacia la anidación del dominio de menor al de mayor resolución.

La segunda opción corresponde a los datos de temperatura superficial del mar (**sst_update**), la que implica una actualización de los datos en la fracción de vegetación, albedo y el hielo marino, con promedios mensuales preestablecidos. Esta opción se activa para permitir el acceso a los campos de las variables de SST (Sea Surface Temperature) y el hielo marino en el tiempo en doce valores mensuales que están disponibles en el programa en su archivo de entrada de geo-información.

Así, los sistemas de predicción en ensamble, están compuestos por diversas salidas con ligeras o grandes diferencias en la precipitación estimada para un mismo fenómeno, cada una de esas salidas recibe el nombre de miembro del ensamble. Las diferencias entre las predicciones de cada miembro proporcionan información sobre la incertidumbre

epistémica asociada al modelo numérico, además cada uno de los resultados numéricos puede compararse con mediciones provenientes de sensores en campo, en el caso de la lluvia de estaciones meteorológicas automáticas.

6.1.2. Métricas para la evaluación del error

El ejercicio de comparar los resultados provenientes de un modelo numérico contra aquellas mediciones provenientes de estaciones pluviométricas ubicadas en campo permite evaluar la confiabilidad de un resultado y su apego a la realidad. Para ello, es necesario definir métricas del error con validez estadística, de tal suerte que sea posible diferenciar la bondad de cada uno de los resultados provenientes de un ensamble meteorológico, observando por ejemplo cuál de ellas se relaciona mejor con las mediciones del evento.

En el caso de este trabajo doctoral y para dejar la subjetividad de la apreciación visual de los resultados, se calculan las siguientes métricas del error: el error cuadrático medio normalizado (NRMSE), BIAS (sesgo), coeficiente de correlación (Cor), y el coeficiente Nash-Sutcliffe (NSC).

Las ecuaciones de estas diferentes métricas del error son:

$$Cor = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F}) * (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (1)$$

$$BIAS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (3)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}}{O_{max} - O_{min}} \quad (4)$$

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (O_0^t - F_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (O_0^t - \bar{O}_0)^2} \quad (5)$$

Donde F es el valor pronosticado y O el valor observado en un tiempo t . Std es la desviación estándar. La definición particular de cada métrica es como sigue:

- El **coeficiente de correlación lineal** es una función que indica la relación y proporcionalidad que existe entre dos variables cuantitativas. Así el coeficiente evalúa si el comportamiento de ambas variables es similar (, un valor de 1 en este coeficiente indica una correlación positiva perfecta (ambas variables crecen y disminuyen con la misma velocidad), por el contrario si el valor es 0 indica que no existe relación lineal. Por otro lado, si la correlación es igual a -1, existe una correlación negativa perfecta, lo que señala que cuando una de las variables aumenta, la otra disminuye en igual proporción.
- El **BIAS** o sesgo es la diferencia entre la esperanza matemática del valor pronosticado y el valor observado del parámetro que estima. Un estimador cuyo sesgo es nulo se llama insesgado o centrado.
- El **coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSC)** es frecuentemente utilizado para cuantificar la precisión de las pronósticos hidrológicos. Si $NSC = 0$ entonces el pronóstico del modelo no es más preciso que la media de las observaciones; si $E < 0$, entonces la media del valor observado es un predictor más preciso que el modelo.

CASO 1: INUNDACIONES DE 2009, CUENCA DEL RÍO TONALÁ

En el primer caso de estudio, se reproducirá con el modelo atmosférico las condiciones climáticas que dieron pie al frente frío número 9 en noviembre de 2009, que dio lugar a la inundación del río Tonalá en el estado de Tabasco. La generación de los ensambles climáticos, se lleva a cabo por medio de un método de modificación de parámetros de multi-física, siguiendo las recomendaciones propuestas por Bukovsky and Karoly (2009). De esta manera se producen 23 diferentes combinaciones de parámetros y por lo tanto miembros del ensamble.

La Tabla 6-1 presenta las diferentes parametrizaciones utilizadas, donde se resaltan los 12 esquemas más acertados en describir el fenómeno (a través de las estimaciones del

error). En este caso, es evidente que las opciones de Thompson, para la micro-física, 5-Layer TDM para la superficie y Kain-Fritsch Eta para la física de cúmulos representan las parametrizaciones con menor error.

Tabla 6-1 Tabla parametrizaciones físicas (WRF multi-física) utilizadas para describir condiciones de lluvia para el evento del 2009. Resaltados se encuentran los miembros que cumplen con NSC > 0,3 Cor > 0,8.

Miembro Ensemble	Micro-Física	Capa Superficial	Cúmulos	Feedback/sst_update	RMSE	NSC	Cor	Bias
1	WSM5	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	off/off	445.233	-0.247	0.943	0.441
2	WSM5	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	off/on	262.730	0.436	0.969	0.978
3	WSM5	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	on/off	250.510	0.487	0.968	1.013
4	WSM5	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	on/on	257.346	0.432	0.972	1.046
5	WSM5	5-Layer TDM	Betts-Miller-Janjic	off/on	502.474	-0.650	0.969	0.282
6	WSM5	5-Layer TDM	Betts-Miller-Janjic	on/on	520.576	-0.768	0.974	0.248
7	WSM5	Noah	Kain-Fritsch Eta	off/off	233.042	0.416	0.959	1.177
8	WSM5	Noah	Kain-Fritsch Eta	off/on	236.142	0.328	0.961	1.236
9	WSM5	Noah	Kain-Fritsch Eta	on/off	359.111	0.174	0.900	0.560
10	WSM5	Noah	Kain-Fritsch Eta	on/on	245.311	0.412	0.965	1.115
11	WSM5	Noah	Betts-Miller-Janjic	off/off	486.258	-0.489	0.977	0.333
12	WSM5	Noah	Betts-Miller-Janjic	off/on	486.022	-0.485	0.969	0.336
13	WSM5	Noah	Betts-Miller-Janjic	on/off	535.000	-0.823	0.965	0.234
14	WSM5	Noah	Betts-Miller-Janjic	on/on	543.781	-0.872	0.964	0.231
15	Thompson	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	off/off	216.700	0.599	0.966	1.095
16	Thompson	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	off/on	236.642	0.505	0.965	1.150
17	Thompson	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	on/off	238.888	0.574	0.959	0.968
18	Thompson	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	on/on	275.237	0.495	0.958	0.894
19	Thompson	5-Layer TDM	Betts-Miller-Janjic	off/on	571.488	-1.152	0.962	0.158
20	Thompson	5-Layer TDM	Betts-Miller-Janjic	on/off	572.267	-1.136	0.952	0.163
21	Thompson	5-Layer TDM	Betts-Miller-Janjic	on/on	502.474	-0.650	0.969	0.282
22	Thompson	Noah	Kain-Fritsch Eta	off/off	238.059	0.382	0.962	1.253
23	Thompson	Noah	Kain-Fritsch Eta	off/on	234.032	0.480	0.965	1.128

De manera complementaria, la Figura 6-1 muestra las curvas de precipitación acumulada calculadas para cada uno de los 23 miembros del ensamble generado con los parámetros de multi-física, para los puntos correspondientes con las cuatro estaciones climáticas localizadas al interior de la cuenca del río Tonalá. Con el propósito de reducir el coste computacional de la propagación del error hacia al modelo hidrológico, se hizo una selección de miembros dentro del ensamble climático, para ello se utilizó el criterio definido por (NSC > 0,3 y Cor > 0,8). Esta restricción permitió reducir a 12 el número de miembros utilizados, ilustrados en la figura por las líneas continuas de color azul. Las líneas continuas de color gris, indican los miembros que fueron rechazados por esta condición y cuyas predicciones están muy por debajo de lo observado en la realidad.

Adicionalmente, la dispersión de los resultados en cada uno de los puntos de prueba indica las evidentes diferencias en la distribución espacial y en la intensidad de la precipitación simulada.

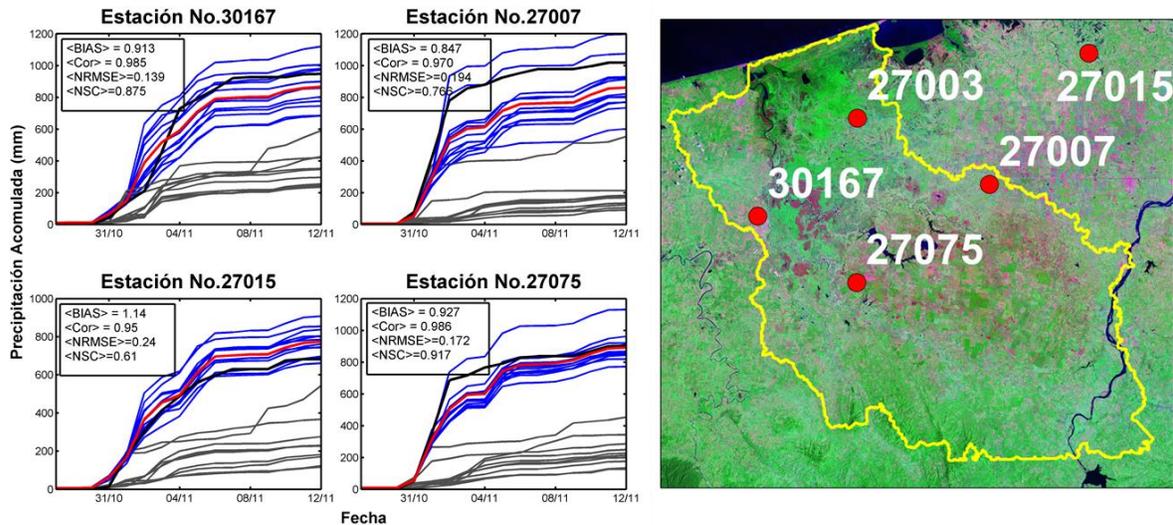


Figura 6-1 Ensamble inicial WRF multi-física evento del 2009. Comparación de precipitación acumulada estimada contra cada estación meteorológica. En azul los 12 miembros más acertados.

Por otro lado, la Figura 6-2 presenta los resultados de los campos de precipitación acumulada para los 12 miembros seleccionados del ensamble de parámetros de multi-física. Estos mapas presentan la lluvia registrada entre el 27 de octubre y el 12 de noviembre de 2009, en donde se advierten diferencias tanto en la distribución espacial generada como en la precipitación acumulada para el evento en cuestión.

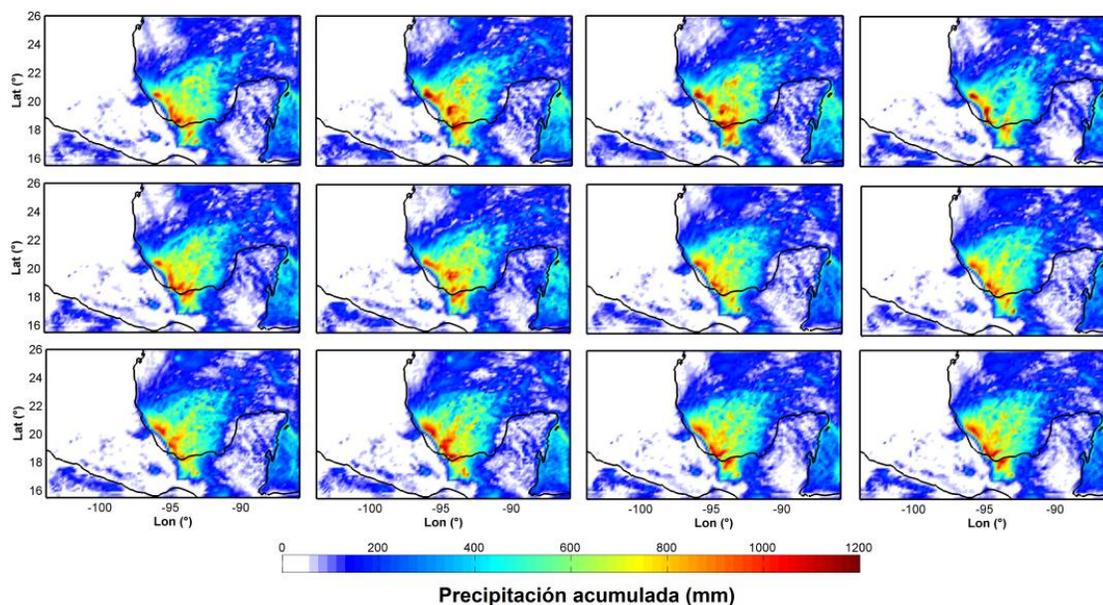


Figura 6-2 Campos de precipitación acumulados estimados por el modelo WRF utilizando los 12 miembros seleccionados del conjunto multi-física (octubre 27, 2009 hasta noviembre 12, 2009).

Por último, la Tabla 6-2 presenta un resumen de las métricas del error calculadas para los datos diarios en cada una de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro del dominio de cálculo del WRF; en donde se incluyen estaciones localizadas dentro y fuera de la cuenca del río Tonalá. Las columnas muestran el valor de cada coeficiente estimado para la simulación proveniente del miembro determinado del ensamble (M1,..., M12). La información de las estaciones climáticas localizadas al interior de la cuenca se resaltan en negrillas. Adicionalmente, con el propósito de revisar a detalle el desempeño de cada una de las simulaciones realizadas, se calculan los valores medios del error para todas las estaciones y para aquellas localizadas dentro de la cuenca. La media del conjunto de estas métricas de error se introduce en la última columna y se denota con los corchetes <>.

El error que interesa analizar dentro de la cascada de modelos utilizados en esta metodología, corresponde a aquél estimado al interior de la cuenca del río Tonalá. Esto se debe a que estos datos corresponden al forzamiento que será utilizado en el modelo hidrológico. La determinación de estos errores en cada paso metodológico permitirá estudiar la propagación de los errores a lo largo de la cascada de simulación y hasta el resultado final.

Tabla 6-2 Tabla general de cálculo de los errores por estación y miembro del ensamble. Evento Tonalá 2009.

Estación	Miembros del ensamble multi-física												<Nor. RMSE> %
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	
	Error cuadrático medio normalizado												
30167	210.263	96.565	144.618	104.415	106.839	76.308	160.479	129.881	101.027	210.947	164.850	86.803	13.965
27003	544.336	578.186	564.457	474.813	427.302	516.946	458.248	484.052	568.198	572.295	385.165	479.467	35.129
27007	234.903	245.999	198.010	135.268	129.433	207.926	126.506	197.321	246.904	328.284	132.093	191.806	19.437
27015	96.678	129.892	151.022	194.328	235.759	179.695	152.062	152.596	118.967	116.868	260.493	188.202	24.011
27074	173.368	211.865	191.223	197.459	78.937	148.878	174.921	247.649	187.975	207.389	123.087	157.210	17.187
27073	227.470	201.909	228.624	256.387	281.378	245.681	186.205	219.358	159.343	147.791	247.695	223.880	46.456
27075	87.038	119.259	104.100	100.821	151.165	64.922	76.451	147.300	85.755	105.678	52.137	68.667	10.724
27076	140.527	160.279	141.947	124.034	108.333	130.532	191.750	162.589	226.041	236.091	129.781	150.840	17.142
27077	89.097	113.418	83.603	225.479	252.237	207.730	254.197	282.400	110.766	83.932	203.014	192.856	30.565
27039	333.500	204.355	197.483	295.839	302.193	261.392	264.082	321.664	172.856	152.145	257.592	430.629	73.278
27054	123.175	30.767	45.283	113.157	119.181	77.408	106.839	112.681	118.832	127.429	110.063	106.672	34.753
27060	70.687	56.225	59.513	33.424	40.125	30.040	78.066	93.798	88.461	80.360	56.730	66.315	19.877
27024	160.326	137.809	140.760	120.575	127.544	73.569	148.270	136.468	145.119	167.793	153.258	151.865	85.039
27064	68.717	71.324	54.584	53.562	106.935	65.649	61.064	72.311	61.456	62.963	50.135	50.919	19.024
7365	172.908	117.440	103.021	252.033	139.791	163.487	301.522	216.383	179.666	129.706	271.878	210.112	24.516
27011	143.703	162.773	143.607	107.817	77.550	86.155	128.026	143.687	106.586	116.488	86.811	81.268	106.826
27036	81.461	60.691	27.361	61.688	19.141	35.638	23.584	45.889	22.126	40.235	39.217	55.552	12.039
27008	158.849	72.817	74.960	131.343	134.945	100.161	102.821	149.973	66.672	79.364	97.871	254.329	19.681
	Media Estaciones en la cuenca												19.814
	Media Todas las estaciones												33.869
	BIAS												<BIAS>
30167	0.708	0.896	0.810	1.072	1.124	0.994	0.796	0.850	0.911	0.714	1.229	1.063	0.931
27003	0.514	0.482	0.496	0.579	0.620	0.540	0.593	0.570	0.493	0.491	0.660	0.576	0.551
27007	0.725	0.712	0.786	0.907	0.912	0.782	1.130	1.257	0.726	0.615	0.901	0.803	0.855
27015	1.209	1.320	1.397	1.500	1.612	1.465	1.369	1.374	1.236	1.211	1.681	1.479	1.404
27074	0.821	0.760	0.790	0.783	1.077	0.861	0.809	0.712	0.797	0.769	0.881	0.833	0.825
27073	1.737	1.652	1.740	1.829	1.913	1.795	1.584	1.697	1.473	1.438	1.795	1.721	1.698
27075	0.918	0.850	0.883	0.876	1.204	0.962	0.905	0.796	0.891	0.860	0.984	0.931	0.922
27076	0.862	0.820	0.863	0.907	0.949	0.891	0.786	0.842	0.731	0.713	0.891	0.854	0.842
27077	1.123	1.168	1.097	1.475	1.540	1.444	1.543	1.602	1.204	1.137	1.419	1.400	1.346
27039	2.410	1.875	1.841	2.261	2.295	2.111	2.127	2.361	1.733	1.638	2.093	2.836	2.132
27054	1.889	1.079	1.241	1.822	1.870	1.544	1.762	1.810	1.839	1.909	1.788	1.769	1.694
27060	1.419	1.326	0.722	1.076	1.196	1.047	1.466	1.573	1.536	1.488	1.318	1.386	1.296
27024	3.338	2.957	3.030	2.764	2.884	2.071	3.160	2.976	3.107	3.445	3.175	3.168	3.006
27084	1.324	1.351	1.166	1.228	1.610	0.783	1.267	1.360	1.273	1.288	1.071	1.007	1.227
7365	1.433	1.205	1.090	1.629	1.317	0.724	1.777	1.549	1.426	1.258	1.682	1.508	1.383
27011	3.566	3.905	3.548	2.928	2.329	2.494	3.334	3.580	2.908	3.085	2.555	2.451	3.057
27036	1.362	1.254	1.090	1.275	0.970	1.150	0.951	1.196	1.057	1.159	1.151	1.243	1.155
27008	1.375	1.069	1.050	1.290	1.309	1.204	1.213	1.347	0.989	0.934	1.194	1.618	1.216
	Media Estaciones en la cuenca												0.815
	Media Todas las estaciones												1.419
	Coefficiente Nash-Sutcliffe												<NSC>
30167	0.719	0.941	0.867	0.931	0.927	0.963	0.836	0.893	0.935	0.717	0.827	0.952	0.876
27003	0.156	0.047	0.092	0.358	0.480	0.239	0.402	0.332	0.080	0.067	0.577	0.345	0.265
27007	0.696	0.667	0.784	0.899	0.908	0.762	0.912	0.786	0.665	0.407	0.904	0.798	0.766
27015	0.877	0.778	0.699	0.502	0.267	0.574	0.695	0.693	0.813	0.820	0.105	0.533	0.613
27074	0.839	0.759	0.804	0.791	0.967	0.881	0.836	0.671	0.810	0.769	0.919	0.867	0.826
27073	-0.269	0.000	-0.282	-0.612	-0.942	-0.480	0.150	-0.180	0.377	0.464	-0.505	-0.229	-0.209
27075	0.939	0.886	0.913	0.919	0.817	0.966	0.953	0.826	0.941	0.911	0.978	0.962	0.938
27076	0.866	0.825	0.863	0.895	0.920	0.884	0.750	0.820	0.652	0.621	0.885	0.845	0.819
27077	0.818	0.704	0.839	-0.168	-0.462	0.009	-0.484	-0.832	0.718	0.838	0.053	0.146	0.182
27039	-4.408	-1.031	-0.896	-3.255	-3.440	-2.322	-2.391	-4.031	-0.453	-0.126	-2.226	-8.017	-2.716
27054	-0.456	0.909	0.803	-0.229	-0.364	0.425	-0.096	-0.219	-0.356	-0.559	-0.163	-0.092	-0.033
27060	0.598	0.746	0.715	0.910	0.871	0.927	0.510	0.293	0.371	0.481	0.741	0.647	0.651
27024	-7.985	-5.639	-5.926	-4.082	-4.687	-0.927	-6.685	-5.510	-6.362	-8.842	-7.211	-7.062	-5.907
27084	0.668	0.642	0.790	0.798	0.195	0.697	0.738	0.632	0.734	0.721	0.823	0.818	0.688
7365	0.495	0.767	0.821	-0.073	0.670	0.549	-0.535	0.209	0.455	0.716	-0.248	0.255	0.340
27011	-16.741	-21.763	-16.718	-8.987	-4.167	-5.377	-13.082	-16.738	-8.760	-10.658	-5.474	-4.674	-11.095
27036	0.611	0.784	0.956	0.777	0.979	0.926	0.967	0.877	0.971	0.905	0.910	0.819	0.874
27008	0.598	0.915	0.910	0.725	0.710	0.840	0.831	0.641	0.929	0.900	0.847	-0.031	0.735
	Media Estaciones en la cuenca												0.706
	Media Todas las estaciones												-0.634
	Coefficiente de correlación												<Cor>
30167	0.994	0.991	0.994	0.970	0.979	0.985	0.991	0.989	0.985	0.991	0.972	0.980	0.985
27003	0.954	0.965	0.972	0.967	0.983	0.977	0.995	0.993	0.989	0.991	0.993	0.992	0.981
27007	0.975	0.968	0.971	0.973	0.974	0.968	0.974	0.973	0.966	0.951	0.977	0.973	0.970
27015	0.968	0.961	0.969	0.943	0.930	0.950	0.945	0.947	0.944	0.939	0.928	0.939	0.947
27074	0.976	0.978	0.978	0.979	0.990	0.979	0.987	0.981	0.983	0.982	0.987	0.986	0.982
27073	0.953	0.955	0.951	0.941	0.940	0.942	0.924	0.925	0.911	0.917	0.941	0.941	0.937
27075	0.979	0.979	0.977	0.984	0.994	0.985	0.992	0.986	0.991	0.989	0.990	0.988	0.986
27076	0.976	0.977	0.973	0.973	0.975	0.975	0.965	0.965	0.955	0.956	0.973	0.971	0.969
27077	0.960	0.947	0.957	0.955	0.953	0.964	0.950	0.945	0.968	0.971	0.955	0.957	0.957
27039	0.947	0.947	0.941	0.929	0.938	0.937	0.940	0.939	0.953	0.947	0.941	0.928	0.941
27054	0.915	0.961	0.942	0.927	0.931	0.937	0.910	0.919	0.906	0.902	0.933	0.932	0.926
27060	0.958	0.965	0.969	0.960	0.967	0.970	0.952	0.953	0.956	0.962	0.966	0.961	0.962
27024	0.906	0.927	0.922	0.896	0.906	0.947	0.886	0.905	0.895	0.886	0.944	0.942	0.914
27084	0.911	0.914	0.916	0.937	0.920	0.950	0.921	0.913	0.922	0.921	0.931	0.934	0.924
7365	0.931	0.925	0.935	0.922	0.937	0.968	0.911	0.917	0.911	0.920	0.914	0.915	0.926
27011	0.942	0.942	0.951	0.926	0.948	0.960	0.893	0.928</					

CASO 2: INUNDACIONES DEL 2013 EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS LA SABANA Y PAPAGAYO

Al igual que el caso de Tonalá, se generó un ensamble de simulaciones atmosféricas con diversos escenarios de lluvia para el evento de septiembre de 2013. Para ello, se utilizó la misma metodología de Bukovsky y Karoly (2009) que tiene su base en la sensibilidad de los parámetros de multi-física en el modelo meteorológico. En este caso, dado que la precipitación es generada por un huracán (Manuel), se utilizaron de manera adicional las opciones del modelo que permiten simular la lluvia asociada a tormentas y huracanes tropicales ($Sf_ocean_physics = 2$, $Isftcflx=2$), siguiendo las recomendaciones descritas por la NCAR (Wang et al. 2010).

La Tabla 6-3, presenta un resumen con los resultados obtenidos de la aplicación de esta metodología. Como se ve, en esta ocasión se produjeron 28 simulaciones diferentes para las que se reportan los coeficientes de correlación, sesgo y Nash–Sutcliffe. En la tabla aparecen sombreados los renglones correspondientes a las simulaciones que satisfacen el criterio de aceptación, descartándose los 12 miembros de peor desempeño en la reproducción del evento, respecto a las mediciones provenientes de las estaciones meteorológicas automáticas ($dt=1hr$) distribuidas en la zona de estudio.

Tabla 6-3 Tabla parametrizaciones físicas (WRF multi-física) utilizadas para describir condiciones de lluvia para el evento del 2013. Resaltados se encuentran los miembros que cumplen con NSC<0.3 y Cor>0.8.

Miembro Ensamble	Micro-Física	Capa Superficial	Cómulus	Feedback/ sst_update	RMSE	NSC	Cor	Bias
1	WSM5	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	off/off	87.109	0.638	0.972	1.112
2	WSM5	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	off/on	96.266	0.595	0.973	1.134
3	WSM5	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	on/off	77.448	0.689	0.976	1.065
4	WSM5	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	on/on	116.906	0.163	0.974	1.189
5	WSM5	5-Layer TDM	Betts-Miller-Janjic	off/off	130.976	0.408	0.974	0.711
6	WSM5	5-Layer TDM	Betts-Miller-Janjic	off/on	125.598	0.183	0.974	0.728
7	WSM5	5-Layer TDM	Betts-Miller-Janjic	on/off	134.131	0.310	0.967	0.764
8	WSM5	5-Layer TDM	Betts-Miller-Janjic	on/on	132.889	0.161	0.966	0.827
9	WSM5	Noah	Kain-Fritsch Eta	off/off	84.631	-0.046	0.975	1.106
10	WSM5	Noah	Kain-Fritsch Eta	off/on	83.063	0.219	0.973	1.087
11	WSM5	Noah	Kain-Fritsch Eta	on/off	124.533	0.266	0.973	1.216
12	WSM5	Noah	Kain-Fritsch Eta	on/on	134.900	0.163	0.974	1.233
13	WSM5	Noah	Betts-Miller-Janjic	off/off	144.994	0.089	0.977	0.682
14	WSM5	Noah	Betts-Miller-Janjic	off/on	132.597	0.041	0.967	0.812
15	WSM5	Noah	Betts-Miller-Janjic	on/off	139.028	0.221	0.969	0.784
16	WSM5	Noah	Betts-Miller-Janjic	on/on	126.949	0.099	0.975	0.829
17	Thompson	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	off/off	97.267	0.497	0.980	1.060
18	Thompson	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	off/on	98.161	0.425	0.979	1.079
19	Thompson	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	on/off	95.620	0.533	0.977	1.125
20	Thompson	5-Layer TDM	Kain-Fritsch Eta	on/on	97.166	0.498	0.978	1.071
21	Thompson	5-Layer TDM	Betts-Miller-Janjic	off/off	145.366	0.251	0.975	0.645
22	Thompson	Noah	Kain-Fritsch Eta	off/off	79.837	0.685	0.974	1.086
23	Thompson	Noah	Kain-Fritsch Eta	off/on	103.243	0.497	0.976	1.049
24	Thompson	Noah	Kain-Fritsch Eta	on/off	101.964	0.466	0.977	1.045
25	Thompson	Noah	Kain-Fritsch Eta	on/on	146.556	0.053	0.970	0.575
26	Thompson	Noah	Betts-Miller-Janjic	on/off	142.177	0.115	0.972	0.688
27	Thompson	Noah	Betts-Miller-Janjic	on/off	166.409	0.609	0.971	0.593
28	Thompson	Noah	Betts-Miller-Janjic	on/on	143.812	0.668	0.971	0.620

De manera complementaria a esta tabla, la Figura 6-3 muestra la precipitación acumulada para los días del evento, estimada por cada uno de los miembros del ensamble de multi-física en contraste con las mediciones realizadas por las estaciones meteorológicas automáticas de la zona. Las líneas continuas de color azul representan las 14 simulaciones seleccionadas con el mejor desempeño en este evento; en color gris se ilustran aquellas simulaciones descartadas para el análisis.

La comparación de los resultados en cada uno de estos puntos, reflejan un mejor desempeño de todos los escenarios generados con el modelo en las zonas montañosas (estaciones Chilpancingo y Petaquillas), mientras que para las estaciones localizadas en zonas cercanas a la costa, se aprecia una mayor dispersión en los resultados entre los miembros del ensamble.

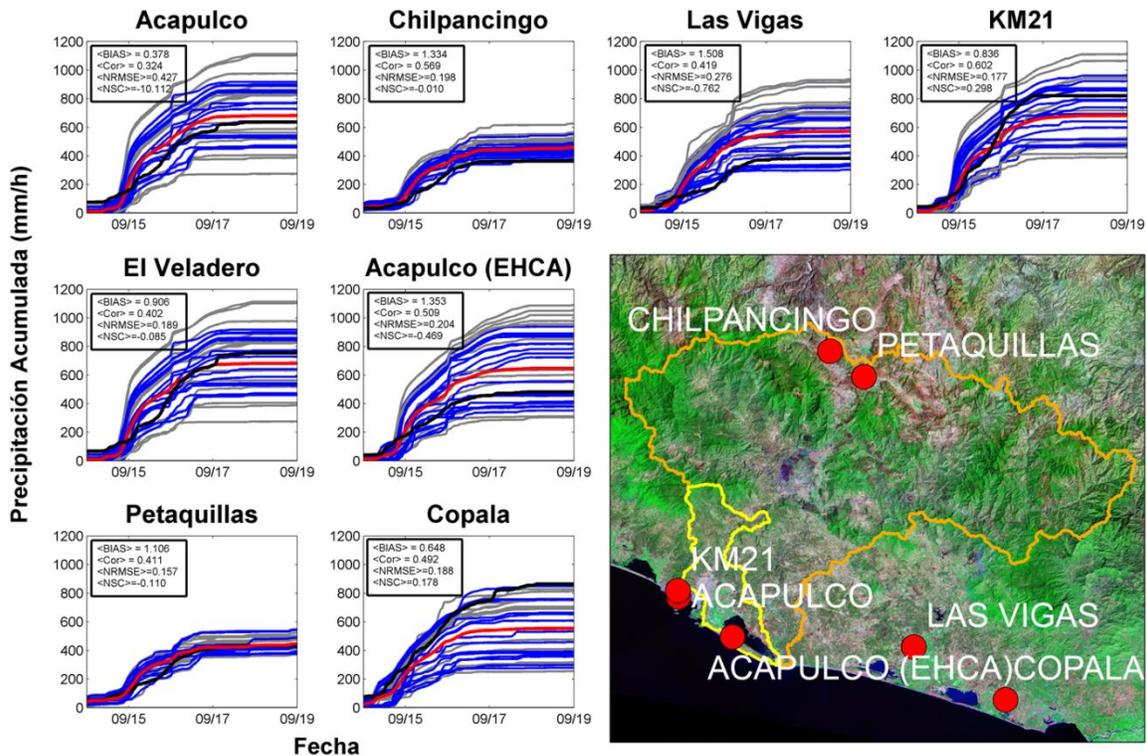


Figura 6-3 Ensamble inicial WRF multi-física evento del 2013. Comparación de precipitación acumulada estimada contra cada estación meteorológica. En azul los 12 miembros más acertados.

Con el propósito de reportar las diferencias espaciales de la lluvia generada con los 14 miembros seleccionados, la Figura 6-4 presenta la lluvia acumulada obtenida, considerando todo el evento (08/09/13-19/09/13). Por otro lado, la Tabla 6-4 presenta un resumen de los indicadores de error calculados en cada estación meteorológica y para cada miembro del ensamble. Los valores promedio de las métricas de error considerando todo el ensamble se muestran en la última columna y se describen con los corchetes <>. Los renglones cuyo texto aparece en negritas, representan las estaciones ubicadas al interior de alguna de las cuencas de estudio y que serán utilizadas para la modelación de la relación lluvia-escorrentía en la siguiente etapa metodológica con el modelo hidrológico de parámetros distribuidos.

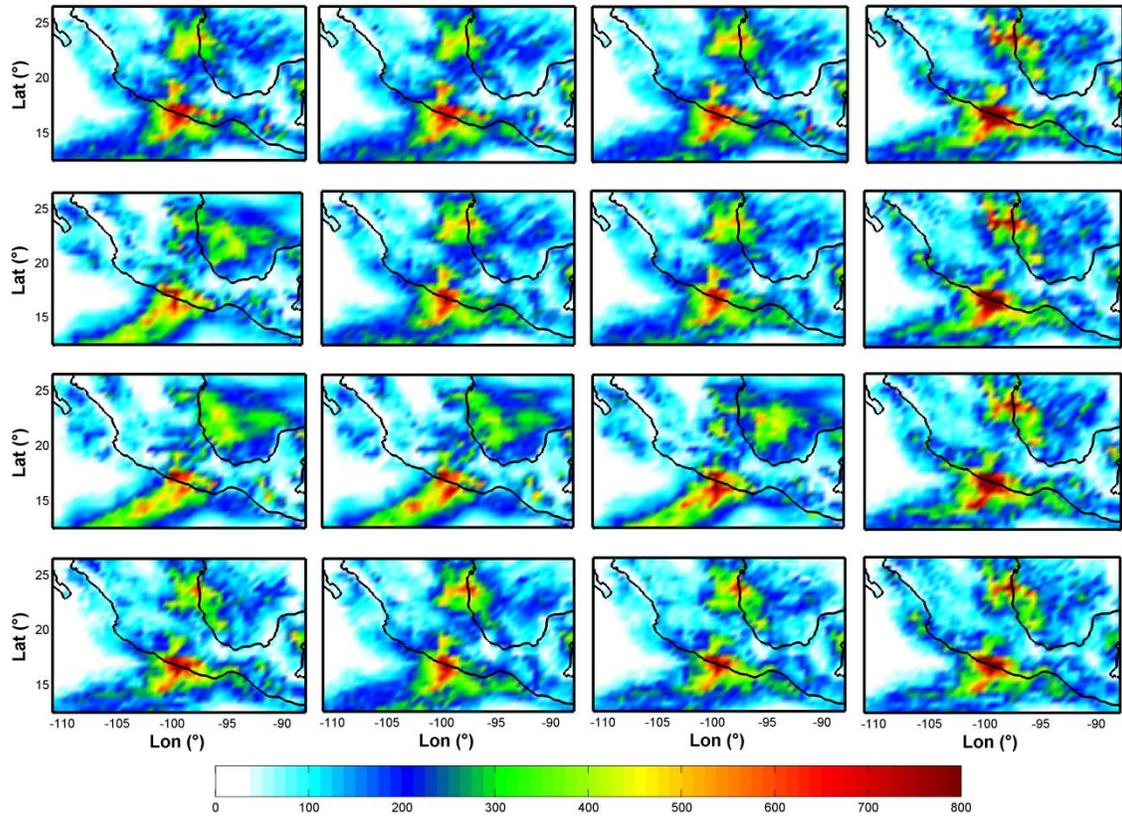


Figura 6-4 Campos de precipitación acumulados estimados por el modelo WRF utilizando los seleccionados 14 miembros del conjunto multi-física (octubre 27, 2009 hasta noviembre 12, 2009).

Estimación probabilística de mapas de inundación:
Una metodología basada en ensambles

Tabla 6-4 Tabla general de cálculo de los errores por estación y miembro del ensamble, caso Acapulco.

Estación	Miembros del ensamble multi-física														<Nor_RMSE >%>
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	
	Error cuadrático medio normalizado														
CAIMANERA	42.621	83.233	98.849	46.705	42.961	66.820	115.448	38.258	53.145	47.039	48.722	30.407	67.152	35.670	58.359
PANCHES	50.443	46.438	52.149	134.475	156.921	110.062	115.724	53.365	112.730	45.148	102.185	97.474	149.802	147.864	98.199
PASTORIA	50.349	46.482	37.131	147.818	151.520	90.679	99.913	44.366	97.154	29.649	95.577	90.819	143.035	143.264	90.554
PINZANES	35.477	74.885	74.027	127.780	41.332	62.967	83.767	84.222	81.407	133.666	47.397	24.537	130.272	88.217	77.854
INFIERNILLO	68.047	73.400	67.438	141.272	127.054	118.616	122.252	102.696	121.526	34.702	113.937	117.346	152.225	136.046	106.897
VILLITA	87.856	86.893	58.163	151.219	146.150	21.316	24.490	90.059	23.686	75.323	11.204	12.015	146.981	142.451	76.986
URLAPAN	81.898	79.474	67.951	121.484	94.338	27.384	20.051	45.644	18.141	58.171	20.517	20.903	129.191	104.928	63.577
VILLA MADERO	41.126	34.312	54.258	50.424	44.368	35.132	35.793	53.704	35.028	82.994	50.329	59.879	84.320	49.650	50.808
ARTEAGA	73.323	74.674	78.192	148.236	108.770	105.335	109.359	75.900	102.093	73.987	109.320	105.899	145.411	147.642	104.153
MEZCALA	27.188	21.753	37.773	90.338	146.656	27.338	30.916	46.376	29.978	40.025	36.776	34.484	57.667	61.055	49.166
SAN JUAN TELECIENGO	32.183	35.133	48.653	115.664	157.753	43.906	69.170	48.552	58.257	47.049	33.243	46.623	89.515	56.436	63.010
ACAPULCO	77.030	99.211	38.455	35.832	48.006	78.531	87.582	79.248	75.406	48.885	91.195	78.037	103.527	50.691	70.831
CHIAPANCO	47.440	52.995	33.996	56.832	52.711	55.632	58.261	62.088	70.480	43.398	53.148	61.923	182.244	37.517	50.310
OSBER DE CHIAPANCO	25.153	26.928	20.951	20.037	19.000	24.752	25.873	27.715	35.687	25.156	31.844	33.770	25.297	13.493	25.475
AYUTLA	30.963	27.724	22.779	23.702	32.853	24.389	22.803	27.146	37.860	16.345	48.092	45.783	18.494	57.888	31.201
COPALA	21.711	38.326	40.187	94.531	66.594	23.048	23.576	29.171	24.765	48.445	22.335	18.967	119.996	116.828	49.177
LAGUNA DE COYUCA	37.008	57.106	22.292	30.272	42.255	51.217	32.492	27.332	34.235	28.544	38.401	26.617	116.270	42.824	41.919
OMETEPEC	23.219	22.878	28.766	70.641	51.323	25.243	23.295	26.105	24.307	42.999	20.307	45.270	36.348	66.713	36.244
REV MEXICANA	130.852	124.321	80.493	52.205	89.295	151.790	149.050	100.821	142.466	44.041	125.303	163.380	109.069	43.922	107.643
ZIHUATANEJO	8.038	9.110	5.341	107.665	111.942	24.717	17.866	6.950	17.049	24.287	26.922	23.158	120.171	107.754	43.641
PETAQUILLAS	30.308	29.021	28.520	46.987	22.345	31.657	31.418	29.624	31.842	30.477	36.399	33.717	18.655	25.190	30.397
TERRA COLORADA	31.404	31.832	44.796	37.188	58.827	30.802	28.642	36.382	31.604	49.644	31.622	32.132	62.768	66.067	40.979
KM21	30.059	28.766	14.914	61.770	70.609	23.601	21.640	35.035	27.794	20.167	44.366	35.486	82.514	88.515	41.803
EL VELADERO, GRO.	22.082	39.635	16.489	62.995	76.428	23.696	30.897	25.472	21.406	10.064	33.361	22.881	121.827	74.403	41.831
ACAPULCO (EHCA)	147.881	132.536	128.881	33.410	59.188	160.467	157.362	203.327	151.170	112.774	179.984	184.760	49.987	58.538	125.412
RMSE	50.134	55.083	48.058	80.379	80.768	57.564	61.546	55.981	58.369	48.499	58.099	57.850	91.826	78.542	
	Media estaciones en la cuenca														60.097
	Media Todas las estaciones														62.057
	Coeficiente Nash-Sutdiff														<NSC>
CAIMANERA	0.818	0.307	0.023	0.893	0.815	0.554	-0.333	0.854	0.718	0.779	0.763	0.908	-0.106	0.377	0.354
PANCHES	0.746	0.784	0.728	0.730	-0.462	-0.211	-0.339	0.715	-0.271	0.796	-0.044	0.050	0.818	0.792	-0.298
PASTORIA	0.746	0.784	0.862	0.556	-1.296	0.178	0.002	0.803	0.056	0.912	0.086	0.175	0.752	0.802	-0.294
PINZANES	0.874	0.439	0.452	0.930	0.829	0.604	0.298	0.291	0.337	-0.787	0.775	0.940	0.242	0.769	0.440
INFIERNILLO	0.537	0.461	0.545	0.124	-0.614	-0.407	-0.495	-0.055	-0.477	0.880	-0.298	-0.377	0.110	0.307	-0.405
VILLITA	0.228	0.245	0.662	0.463	-1.136	0.955	0.940	0.189	0.944	0.433	0.987	0.986	0.400	0.163	-0.145
URLAPAN	0.329	0.368	0.538	0.546	0.110	0.925	0.960	0.792	0.967	0.662	0.958	0.956	0.333	0.217	-0.289
VILLA MADERO	0.831	0.822	0.706	0.857	0.893	0.877	0.872	0.712	0.877	0.311	0.747	0.641	0.737	0.862	0.641
ARTEAGA	0.462	0.442	0.389	0.426	-0.183	-0.110	-0.196	0.424	-0.042	0.453	-0.195	-0.121	0.284	0.425	-0.344
MEZCALA	0.926	0.953	0.857	0.799	0.400	0.925	0.904	0.785	0.910	0.840	0.865	0.881	0.932	0.903	0.303
SAN JUAN TELECIENGO	0.896	0.877	0.763	-0.411	-0.489	0.807	0.522	0.764	0.661	0.779	0.889	0.783	0.878	0.803	0.209
ACAPULCO	0.407	0.016	0.852	-0.253	0.770	0.383	0.233	0.372	0.431	0.761	0.168	0.391	0.607	0.553	0.429
CHIAPANCO	0.778	0.719	0.884	0.283	0.722	0.691	0.661	0.615	0.503	0.812	0.718	0.617	0.888	0.866	0.619
OSBER DE CHIAPANCO	0.937	0.927	0.956	0.766	0.964	0.939	0.928	0.923	0.873	0.937	0.899	0.886	0.919	0.928	0.857
AYUTLA	0.904	0.923	0.948	0.675	0.892	0.941	0.948	0.926	0.877	0.933	0.769	0.790	0.823	0.923	0.851
COPALA	0.953	0.853	0.839	0.957	0.557	0.947	0.944	0.915	0.939	0.765	0.950	0.964	0.909	0.893	0.476
LAGUNA DE COYUCA	0.863	0.674	0.950	0.724	0.851	0.738	0.894	0.925	0.883	0.919	0.853	0.929	0.897	0.818	0.773
OMETEPEC	0.946	0.948	0.917	0.961	0.837	0.936	0.946	0.932	0.941	0.815	0.959	0.795	0.947	0.948	0.714
REV MEXICANA	-0.712	-0.546	0.352	-1.249	0.203	-1.304	-1.222	-0.016	-1.030	0.806	-0.570	-1.669	-0.910	-0.572	-0.099
ZIHUATANEJO	0.994	0.992	0.997	0.986	-0.253	0.939	0.968	0.995	0.971	0.941	0.928	0.946	0.991	0.998	0.418
PETAQUILLAS	0.908	0.916	0.917	0.790	0.950	0.900	0.901	0.912	0.899	0.907	0.868	0.886	0.907	0.896	0.867
TERRA COLORADA	0.901	0.899	0.799	0.693	0.654	0.995	0.918	0.928	0.900	0.754	0.950	0.907	0.904	0.886	0.827
KM21	0.910	0.917	0.978	0.870	0.501	0.944	0.953	0.877	0.923	0.959	0.803	0.874	0.969	0.958	0.742
EL VELADERO, GRO.	0.951	0.843	0.973	0.744	0.416	0.944	0.905	0.935	0.954	0.990	0.889	0.948	0.986	0.979	0.659
ACAPULCO (EHCA)	-1.187	-0.757	-0.661	-2.656	0.650	-1.575	-1.476	-1.134	-1.285	-0.261	-2.239	-2.414	0.007	0.215	-0.599
	Media estaciones en la cuenca														0.436
	Media Todas las estaciones														0.328
	Coeficiente de Correlación														<Cor>
CAIMANERA	0.958	0.952	0.960	0.955	0.966	0.962	0.950	0.965	0.954	0.961	0.959	0.960	0.951	0.955	0.957
PANCHES	0.934	0.944	0.984	0.929	0.929	0.991	0.994	0.984	0.996	0.986	0.990	0.992	0.970	0.967	0.971
PASTORIA	0.938	0.956	0.977	0.939	0.912	0.985	0.981	0.973	0.982	0.975	0.986	0.984	0.990	0.975	0.966
PINZANES	0.975	0.978	0.976	0.977	0.960	0.975	0.972	0.977	0.972	0.973	0.972	0.977	0.976	0.975	0.971
INFIERNILLO	1.000	1.000	0.994	1.000	1.000	0.998	1.000	0.984	1.000	0.990	0.996	0.996	0.994	0.994	0.986
VILLITA	0.987	0.988	0.993	0.988	0.978	0.994	0.994	0.990	0.995	0.991	0.996	0.997	0.993	0.990	0.983
URLAPAN	0.968	0.978	0.989	0.969	0.954	0.988	0.989	0.991	0.989	0.988	0.991	0.992	0.977	0.972	0.968
VILLA MADERO	0.966	0.960	0.941	0.967	0.923	0.944	0.949	0.933	0.946	0.909	0.946	0.953	0.932	0.941	0.937
ARTEAGA	0.944	0.952	0.988	0.960	0.953	0.989	0.981	0.981	0.983	0.992	0.993	0.990	0.972	0.969	0.963
MEZCALA	0.979	0.983	0.924	0.992	0.940	0.963	0.959	0.933	0.962	0.947	0.955	0.946	0.971	0.956	0.958
SAN JUAN TELECIENGO	0.953	0.943	0.913	0.989	0.903	0.962	0.970	0.941	0.955	0.910	0.955	0.941	0.956	0.929	0.947
ACAPULCO	0.961	0.963	0.983	0.971	0.991	0.972	0.973	0.980	0.969	0.984	0.971	0.972	0.982	0.978	0.980
CHIAPANCO	0.974	0.974	0.980	0.959	0.992	0.982	0.981	0.984	0.975	0.974	0.963	0.967	0.968	0.971	0.982
OSBER DE CHIAPANCO	0.974	0.975	0.981	0.958	0.991	0.983	0.982	0.984	0.975	0.975	0.962	0.966	0.968	0.971	0.982
AYUTLA	0.972	0.973	0.992	0.983	0.967	0.984	0.994	0.995	0.991	0.988	0.984	0.990	0.968	0.970	0.983
COPALA	0.992	0.983	0.991	0.989	0.977	0.979	0.976	0.990	0.973	0.983	0.980	0.985	0.987	0.981	0.979
LAGUNA DE COYUCA	0.964	0.960	0.975	0.973	0.981	0.972	0.975	0.979	0.975	0.975	0.977	0.977	0.970	0.968	0.979
OMETEPEC	0.994														

6.2. Análisis hidrológico

Como se introdujo en el capítulo anterior, la segunda etapa de la cascada de modelos, corresponde a la simulación hidrológica de las cuencas en cuestión. Para ello, se emplea un modelo de parámetros distribuidos desarrollado por personal académico del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Domínguez et al. 2008). Esta herramienta, resuelve la relación lluvia-escorrentía por medio de la discretización espacial de la cuenca, en una malla rectangular con resolución de 1km, y a través de la parametrización de procesos como la infiltración y la evapotranspiración. En esta etapa, las simulaciones meteorológicas seleccionadas de la etapa anterior, son empleadas como condiciones de forzamiento del modelo hidrológico. Esto permite evaluar la propagación del error originado en una etapa metodológica anterior sobre el hidrograma calculado. Por otro lado, siguiendo las recomendaciones de trabajos que reconocen la equifinalidad de los modelos hidrológicos (Beven 2006a), se incluye en esta segunda etapa, un análisis de sensibilidad de parámetros dentro del modelo hidrológico a fin de evaluar la agregación de errores de un modelo a otro. La equifinalidad representa la posibilidad latente comprobada en este tipo de modelo para generar una solución aceptable a través del uso de diferentes combinaciones de parámetros.

6.2.1. Generación del ensamble hidrológico

En esta metodología, el encadenamiento de tres tipos diferentes de modelo introduce preguntas de investigación que es necesario mencionar. Así por ejemplo, ¿qué sucede con la propagación de errores originados en la escala meteorológica hacia el resultado final?; ¿Existe algún tipo de agregación de errores de los diferentes modelos?; ¿Cuál es el error más significativo en la predicción de mapas de inundación?; ¿Es necesario hacer un análisis de sensibilidad en cada una de las tres etapas metodológicas de la cascada de modelos?

Es evidente que el comportamiento de los errores a lo largo de la cascada de modelos es completamente desconocido. Es por ello que, a lo largo de la metodología, es importante considerar los errores inducidos en cada modelo. La forma más socorrida para evaluar la

incertidumbre hidrológica es a través del análisis de sensibilidad de parámetros mejor conocido como GLUE, por sus siglas en inglés, propuesto por Beven and Binley (1992).

En este trabajo y para ambos casos de estudio, se incorpora el análisis de incertidumbre del modelo hidrológico, por medio de la selección de parámetros válidos para eventos de inundación anteriores al evento en cuestión. El uso de estos diferentes conjuntos de parámetros, permite evaluar la incertidumbre generada por el modelo hidrológico, así como su interacción con los errores de las simulaciones meteorológicas, dando lugar a un gráfica de tipo espagueti (ej. varios hidrogramas) que representa a los diferentes escenarios de caudal para un mismo evento.

CASO 1: INUNDACIONES DE 2009, CUENCA DEL RÍO TONALÁ

Por lo que respecta al primer caso de estudio, se tienen 12 simulaciones numéricas con campos de precipitación que resultan del WRF (ensamble multi-física), la combinación de estos escenarios con los 6 diferentes conjuntos de parámetros hidrológicos dan como resultado la generación de 72 hidrogramas que representan el caudal generado por el evento de 2009. Estos parámetros son resultado de calibración e implementación del modelo para diferentes eventos extremos seleccionados, marcados en la Tabla 5-3.

La Figura 6-5 presenta de forma gráfica en su panel a), los 72 hidrogramas producidos en comparación con la medición de caudal (línea azul discontinua), registrado en el río Tonalá para este evento (estación San José del Carmen). Tal y como se aprecia en la figura, existe una gran dispersión de caudales para este evento considerando la agregación de errores de ambos modelos empleados hasta el momento (meteorológico e hidrológico). A pesar de ello, es posible observar que la mayoría de los hidrogramas identifican al gasto pico del evento por encima de los 1500 m³/s y solo una pequeña parte de éstos identifican gastos pico menores a los 1000 m³/s. La extensión de los límites mínimo y máximo de los resultados hidrológicos, indican la poca confianza que existe en este pronóstico, cuando se considera la incertidumbre en ambos modelos. En virtud de que este trabajo pretende estudiar la propagación del error meteorológico hacia la identificación de un área inundada, se reduce el número de hidrogramas en esta gráfica, por medio de la aplicación de límites a los coeficientes de Nash-Sutcliffe y correlación, tal que solo se retienen las simulaciones que cumplen con NSC > 0.6 y Cor > 0.8.

La Figura 6-5b, presenta los 31 hidrogramas seleccionados de la aplicación de este criterio, mostrando una evidente reducción de los límites de incertidumbre de este pronóstico. De forma complementaria, la Tabla 6-5 presenta la relación de los diferentes hidrogramas obtenidos de la combinación de miembros del ensamble meteorológico con las simulaciones de los 6 conjuntos de parámetros del modelo hidrológico. En negritas se resaltan aquellos renglones identificados con el criterio de retención, que permitió la reducción a 31 los hidrogramas para utilizarse como condición de forzamiento en el modelo hidrodinámico.

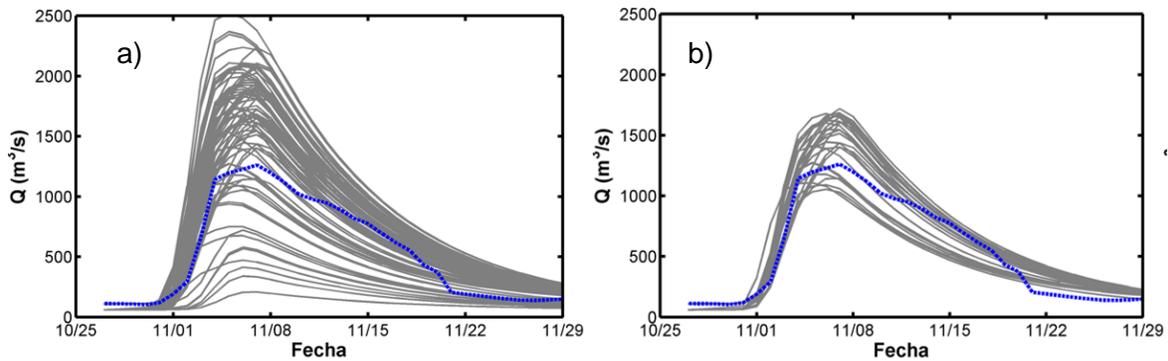


Figura 6-5 (Panel Izquierdo) 72 hidrogramas calculados usando el modelo lluvia-escorrentía con seis conjuntos de parámetros y 12 campos de precipitación conjunto WRF como datos de entrada. (Panel derecho) Hidrogramas aceptables definitivos que definen el ensamble hidrológico.

Tabla 6-5 Ensamble hidrológico, resaltados los hidrogramas que cumplen con NSC > 0.6 y Cor > 0.8.

Miembro Hidrológico (MPE)	Miembro NWP (WRF)	λ	Fs	Fo	NSC	Cor	Bias
1	1	0.2	0.1	0.9	0.733	0.884	0.852
2	2	0.2	0.1	0.9	0.074	0.973	1.529
3	3	0.2	0.1	0.9	-0.035	0.974	1.564
4	4	0.2	0.1	0.9	-0.511	0.975	1.686
5	5	0.2	0.1	0.9	-0.638	0.441	1.485
6	6	0.2	0.1	0.9	-0.223	0.961	1.593
7	7	0.2	0.1	0.9	-0.192	0.961	1.579
8	8	0.2	0.1	0.9	-0.043	0.959	1.537
9	9	0.2	0.1	0.9	0.064	0.958	1.504
10	10	0.2	0.1	0.9	0.245	0.971	0.525
11	11	0.2	0.1	0.9	-1.503	0.944	1.832
12	12	0.2	0.1	0.9	-0.752	0.954	1.710
13	1	0.4	0.6	0.9	0.639	0.901	0.742
14	2	0.4	0.6	0.9	0.404	0.977	1.414
15	3	0.4	0.6	0.9	0.318	0.978	1.449
16	4	0.4	0.6	0.9	-0.077	0.977	1.569
17	5	0.4	0.6	0.9	-0.545	0.366	1.368
18	6	0.4	0.6	0.9	0.181	0.968	1.478
19	7	0.4	0.6	0.9	0.200	0.968	1.465
20	8	0.4	0.6	0.9	0.321	0.966	1.422
21	9	0.4	0.6	0.9	0.408	0.966	1.389
22	10	0.4	0.6	0.9	-0.081	0.960	0.426
23	11	0.4	0.6	0.9	-0.909	0.951	1.717
24	12	0.4	0.6	0.9	-0.264	0.961	1.595
25	1	0.2	1.8	0.9	0.376	0.914	0.601
26	2	0.2	1.8	0.9	0.761	0.978	1.244
27	3	0.2	1.8	0.9	0.711	0.979	1.278
28	4	0.2	1.8	0.9	0.444	0.976	1.395
29	5	0.2	1.8	0.9	-0.440	0.261	1.191
30	6	0.2	1.8	0.9	0.633	0.974	1.306
31	7	0.2	1.8	0.9	0.647	0.974	1.293
32	8	0.2	1.8	0.9	0.722	0.973	1.251
33	9	0.2	1.8	0.9	0.771	0.972	1.219
34	10	0.2	1.8	0.9	-0.508	0.952	0.322
35	11	0.2	1.8	0.9	-0.129	0.959	1.539
36	12	0.2	1.8	0.9	0.340	0.969	1.420
37	1	0.4	1.8	0.9	0.240	0.922	0.547
38	2	0.4	1.8	0.9	0.837	0.978	1.186
39	3	0.4	1.8	0.9	0.797	0.978	1.220
40	4	0.4	1.8	0.9	0.570	0.974	1.337
41	5	0.4	1.8	0.9	-0.479	0.209	1.132
42	6	0.4	1.8	0.9	0.741	0.976	1.248
43	7	0.4	1.8	0.9	0.753	0.976	1.235
44	8	0.4	1.8	0.9	0.813	0.975	1.194
45	9	0.4	1.8	0.9	0.851	0.975	1.161
46	10	0.4	1.8	0.9	-0.720	0.945	0.276
47	11	0.4	1.8	0.9	0.079	0.962	1.481
48	12	0.4	1.8	0.9	0.495	0.972	1.361
49	1	0.8	1.8	0.9	-0.036	0.838	0.494
50	2	0.8	1.8	0.9	0.819	0.978	0.882
51	3	0.8	1.8	0.9	0.899	0.977	0.907
52	4	0.8	1.8	0.9	0.649	0.963	1.286
53	5	0.8	1.8	0.9	0.060	0.811	0.580
54	6	0.8	1.8	0.9	0.839	0.959	0.849
55	7	0.8	1.8	0.9	0.883	0.959	0.890
56	8	0.8	1.8	0.9	0.896	0.954	0.929
57	9	0.8	1.8	0.9	0.890	0.950	0.928
58	10	0.8	1.8	0.9	-1.233	0.972	0.209
59	11	0.8	1.8	0.9	0.638	0.938	1.236
60	12	0.8	1.8	0.9	0.885	0.946	1.042
61	1	0.9	1.6	0.9	-0.247	0.949	0.396
62	2	0.9	1.6	0.9	0.938	0.970	1.019
63	3	0.9	1.6	0.9	0.930	0.971	1.052
64	4	0.9	1.6	0.9	0.819	0.964	1.168
65	5	0.9	1.6	0.9	-0.662	0.055	0.955
66	6	0.9	1.6	0.9	0.890	0.978	1.133
67	7	0.9	1.6	0.9	0.899	0.979	1.120
68	8	0.9	1.6	0.9	0.931	0.979	1.079
69	9	0.9	1.6	0.9	0.945	0.978	1.047
70	10	0.9	1.6	0.9	-1.136	0.931	0.195
71	11	0.9	1.6	0.9	0.433	0.967	1.364
72	12	0.9	1.6	0.9	0.738	0.976	1.246
Media seleccionados					0.803	0.965	1.105
Media total ensamble					0.261	0.911	1.151

CASO 2: INUNDACIONES DEL 2013 EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS LA SABANA Y PAPAGAYO

En el caso de las inundaciones en las cuencas de los ríos Papagayo y Sabana, se tienen diferentes campos de precipitación posibles derivados de la simulación meteorológica con el modelo WRF. La combinación de estas condiciones con los seis posibles conjuntos de parámetros del modelo hidrológico, da como resultado los 96 hidrogramas posibles que representan la respuesta de cada cuenca durante el evento de 2013. La variación de conjuntos de parámetros libres se encuentran en función de la información hidrométrica histórica (Tabla 5.4).

Tal y como sucedió en el caso del río Tonalá, los 96 hidrogramas resultantes en los casos de los ríos Papagayo y Sabana, confirman una alta variabilidad en la respuesta de cada cuenca. Dado que en ninguno de los ríos estudiados existen mediciones hidrométricas para este evento, se utiliza la mejor parametrización del modelo hidrológico para la generación de un hidrograma de referencia, el cual se produce con la lluvia medida por las estaciones climáticas de campo. Esto permite establecer una referencia a la realidad del caudal producido por la lluvia durante el evento.

Los paneles izquierdos de la Figura 6-6, presentan la comparación de los 96 hidrogramas generados con la metodología, con aquél estimado con el uso de las estaciones climáticas en ambas cuencas (identificado en los paneles por la línea continua de color azul). Tal y como se aprecia en ambos casos, hay una alta variabilidad en las posibles respuestas de las cuencas definidas para ambos ríos. Las hidrogramas estimados para la cuenca del río la Sabana muestran el gasto máximo entre magnitudes de 1,500 m³/s y 2,500 m³/s. Mientras que para la cuenca del río Papagayo, en la estimación de gasto es máxima entre los límites de 12,000 y 18,000 m³/s. Por ello, es necesario establecer un criterio que permita la reducción de los hidrogramas generados, por lo que se utiliza un criterio de desempeño para este propósito.

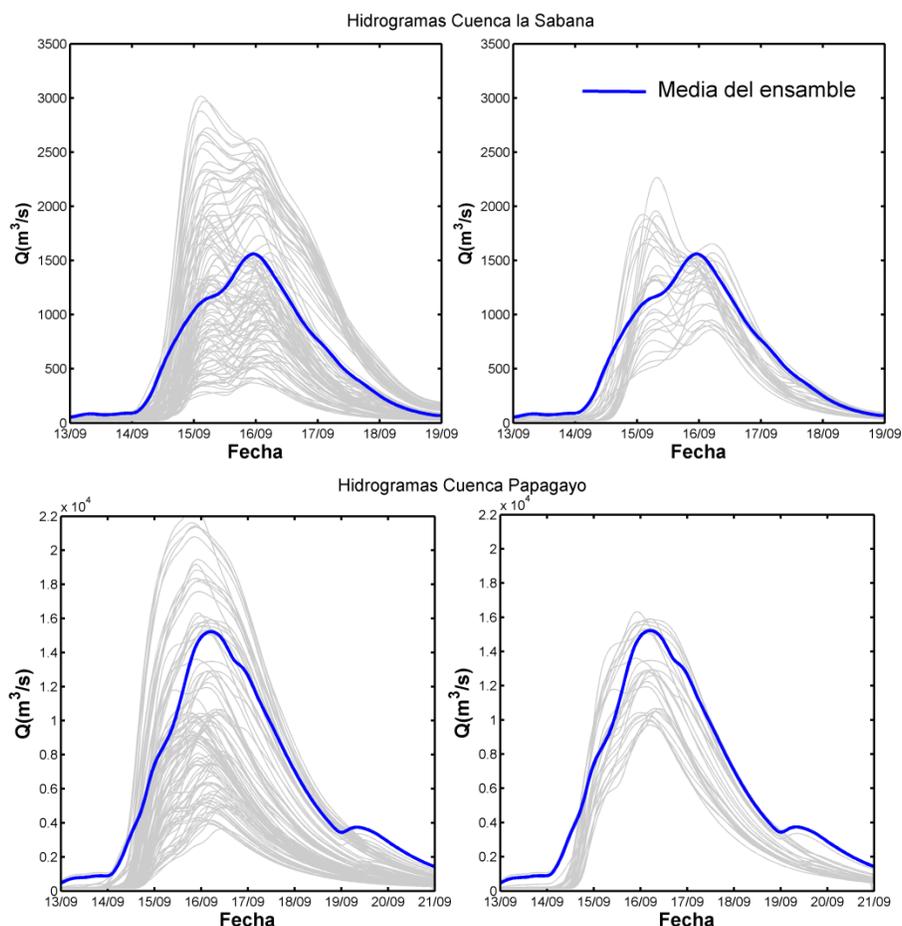


Figura 6-6 (Paneles izquierdos) 96 hidrogramas calculados usando el modelo lluvia-escorrentía con seis conjuntos de parámetros y 16 campos de precipitación (ensamble WRF) como datos de entrada. (Paneles derechos) hidrogramas aceptables definitivos que definen el ensamble hidrológico.

De forma complementaria, la Tabla 6-6, presenta los resultados de la combinación de los ensambles meteorológicos con los seis conjuntos de parámetros del modelo hidrológico, que dieron como resultado las 96 simulaciones. Adicionalmente, se presenta el desempeño de cada simulación por medio de la evaluación de las métricas del error introducidas con anterioridad. Los renglones sombreados de la tabla, señalan los miembros de este ensamble que son seleccionados para su empleo como condiciones de forzamiento en el modelo hidrodinámico (26 hidrogramas), de acuerdo al criterio definido por ($NSC \geq 0.6$ $Cor > 0.8$).

Tabla 6-6 Ensamble hidrológico, resultados los hidrogramas que cumplen con NSC > 0.6 y Cor > 0.8.

Miembro	Sabana						Papagayo					
	λ	Fs	Fo	NSC	Cor	Bias	λ	Fs	Fo	NSC	Cor	Bias
1	0.8	1.2	0.99	0.779	0.934	0.663	1.0	0.8	1.0	0.517	0.925	0.494
2	0.8	1.2	0.99	0.785	0.992	0.605	1.0	0.8	1.0	0.335	0.966	0.391
3	0.8	1.2	0.99	0.211	0.894	0.323	1.0	0.8	1.0	-0.153	0.941	0.231
4	0.8	1.2	0.99	0.424	0.921	0.417	1.0	0.8	1.0	0.019	0.954	0.284
5	0.8	1.2	0.99	0.033	0.960	0.254	1.0	0.8	1.0	0.134	0.975	0.326
6	0.8	1.2	0.99	0.025	0.939	0.259	1.0	0.8	1.0	-0.234	0.977	0.204
7	0.8	1.2	0.99	0.272	0.943	0.345	1.0	0.8	1.0	0.107	0.994	0.311
8	0.8	1.2	0.99	0.121	0.992	0.306	1.0	0.8	1.0	0.051	0.992	0.305
9	0.8	1.2	0.99	0.832	0.966	0.676	1.0	0.8	1.0	0.485	0.940	0.473
10	0.8	1.2	0.99	0.808	0.962	0.656	1.0	0.8	1.0	0.453	0.938	0.461
11	0.8	1.2	0.99	0.704	0.995	0.550	1.0	0.8	1.0	0.285	0.964	0.372
12	0.8	1.2	0.99	0.813	0.937	0.716	1.0	0.8	1.0	0.500	0.926	0.491
13	0.8	1.2	0.99	0.860	0.962	0.727	1.0	0.8	1.0	0.519	0.941	0.494
14	0.8	1.2	0.99	-0.077	0.996	0.226	1.0	0.8	1.0	-0.047	0.943	0.283
15	0.8	1.2	0.99	0.052	0.919	0.263	1.0	0.8	1.0	0.045	0.977	0.291
16	0.8	1.2	0.99	-0.032	0.979	0.237	1.0	0.8	1.0	-0.040	0.971	0.272
17	0.2	0.8	1	0.057	0.959	1.492	0.2	0.8	1.0	0.795	0.964	1.095
18	0.2	0.8	1	0.345	0.977	1.445	0.2	0.8	1.0	0.959	0.991	0.973
19	0.2	0.8	1	0.834	0.942	0.755	0.2	0.8	1.0	0.661	0.955	0.561
20	0.2	0.8	1	0.826	0.947	0.946	0.2	0.8	1.0	0.831	0.973	0.687
21	0.2	0.8	1	0.738	0.946	0.612	0.2	0.8	1.0	0.610	0.997	0.522
22	0.2	0.8	1	0.798	0.960	0.679	0.2	0.8	1.0	0.625	0.995	0.532
23	0.2	0.8	1	0.897	0.959	0.844	0.2	0.8	1.0	0.879	0.997	0.719
24	0.2	0.8	1	0.948	0.991	0.863	0.2	0.8	1.0	0.924	0.994	0.809
25	0.2	0.8	1	-0.025	0.994	1.598	0.2	0.8	1.0	0.828	0.979	1.117
26	0.2	0.8	1	0.058	0.991	1.559	0.2	0.8	1.0	0.848	0.977	1.100
27	0.2	0.8	1	0.520	0.970	1.397	0.2	0.8	1.0	0.969	0.991	0.965
28	0.2	0.8	1	-0.349	0.971	1.698	0.2	0.8	1.0	0.773	0.973	1.172
29	0.2	0.8	1	-0.319	0.979	1.719	0.2	0.8	1.0	0.787	0.978	1.178
30	0.2	0.8	1	0.671	0.970	0.574	0.2	0.8	1.0	0.463	0.995	0.470
31	0.2	0.8	1	0.751	0.947	0.617	0.2	0.8	1.0	0.186	0.974	0.339
32	0.2	0.8	1	0.768	0.990	0.607	0.2	0.8	1.0	0.465	0.992	0.455
33	0.6	0.8	1	0.424	0.968	1.370	0.6	0.9	1.0	0.611	0.913	0.563
34	0.6	0.8	1	0.574	0.970	1.324	0.6	0.9	1.0	0.480	0.960	0.456
35	0.6	0.8	1	0.794	0.953	0.645	0.6	0.9	1.0	0.003	0.936	0.280
36	0.6	0.8	1	0.876	0.951	0.832	0.6	0.9	1.0	0.184	0.949	0.340
37	0.6	0.8	1	0.565	0.922	0.508	0.6	0.9	1.0	-0.081	0.979	0.248
38	0.6	0.8	1	0.646	0.954	0.572	0.6	0.9	1.0	0.692	0.996	0.570
39	0.6	0.8	1	0.848	0.957	0.732	0.6	0.9	1.0	0.275	0.992	0.371
40	0.6	0.8	1	0.840	0.973	0.750	0.6	0.9	1.0	0.224	0.997	0.366
41	0.6	0.8	1	0.303	0.994	1.476	0.6	0.9	1.0	0.592	0.928	0.541
42	0.6	0.8	1	0.390	0.993	1.437	0.6	0.9	1.0	0.564	0.924	0.529
43	0.6	0.8	1	0.682	0.957	1.277	0.6	0.9	1.0	0.434	0.958	0.436
44	0.6	0.8	1	0.070	0.977	1.576	0.6	0.9	1.0	0.596	0.912	0.560
45	0.6	0.8	1	0.075	0.992	1.597	0.6	0.9	1.0	0.618	0.927	0.563
46	0.6	0.8	1	0.466	0.951	0.472	0.6	0.9	1.0	-0.266	0.976	0.200
47	0.6	0.8	1	0.607	0.952	0.512	0.6	0.9	1.0	-0.094	0.978	0.248
48	0.6	0.8	1	0.587	0.991	0.503	0.6	0.9	1.0	0.766	0.997	0.626
49	0.6	0.8	0.99	0.742	0.917	0.877	0.6	0.9	1.0	0.937	0.979	0.932
50	0.6	0.8	0.99	0.921	0.977	0.811	0.6	0.9	1.0	0.945	0.991	0.813
51	0.6	0.8	0.99	0.525	0.909	0.467	0.6	0.9	1.0	0.407	0.972	0.423
52	0.6	0.8	0.99	0.701	0.924	0.592	0.6	0.9	1.0	0.640	0.994	0.540
53	0.6	0.8	0.99	0.314	0.944	0.361	0.6	0.9	1.0	0.303	0.980	0.386
54	0.6	0.8	0.99	0.316	0.954	0.368	0.6	0.9	1.0	0.323	0.992	0.396
55	0.6	0.8	0.99	0.604	0.953	0.500	0.6	0.9	1.0	0.782	0.943	0.683
56	0.6	0.8	0.99	0.457	0.994	0.443	0.6	0.9	1.0	0.739	0.970	0.656
57	0.6	0.8	0.99	0.856	0.950	0.891	0.6	0.9	1.0	0.957	0.999	0.953
58	0.6	0.8	0.99	0.848	0.945	0.869	0.6	0.9	1.0	0.964	1.000	0.937
59	0.6	0.8	0.99	0.911	0.992	0.747	0.6	0.9	1.0	0.935	1.000	0.805
60	0.6	0.8	0.99	0.738	0.916	0.936	0.6	0.9	1.0	0.944	0.997	1.007
61	0.6	0.8	0.99	0.817	0.942	0.948	0.6	0.9	1.0	0.951	1.000	1.012
62	0.6	0.8	0.99	0.167	0.990	0.311	0.6	0.9	1.0	0.120	0.955	0.340
63	0.6	0.8	0.99	0.350	0.937	0.375	0.6	0.9	1.0	0.079	0.977	0.302
64	0.6	0.8	0.99	0.239	0.997	0.330	0.6	0.9	1.0	0.403	0.964	0.432
65	0.6	1.2	1	0.760	0.974	1.201	0.8	0.9	1.0	0.534	0.922	0.505
66	0.6	1.2	1	0.790	0.960	1.157	0.8	0.9	1.0	0.363	0.965	0.403
67	0.6	1.2	1	0.648	0.957	0.525	0.8	0.9	1.0	-0.127	0.940	0.239
68	0.6	1.2	1	0.820	0.952	0.694	0.8	0.9	1.0	0.050	0.954	0.294
69	0.6	1.2	1	0.376	0.931	0.405	0.8	0.9	1.0	-0.209	0.978	0.212
70	0.6	1.2	1	0.443	0.950	0.461	0.8	0.9	1.0	0.414	0.993	0.449
71	0.6	1.2	1	0.709	0.953	0.603	0.8	0.9	1.0	0.138	0.994	0.322
72	0.6	1.2	1	0.670	0.964	0.620	0.8	0.9	1.0	0.999	1.000	1.013
73	0.6	1.2	1	0.659	0.992	1.302	0.8	0.9	1.0	0.505	0.937	0.484
74	0.6	1.2	1	0.716	0.991	1.266	0.8	0.9	1.0	0.474	0.935	0.472
75	0.6	1.2	1	0.825	0.943	1.112	0.8	0.9	1.0	0.313	0.963	0.384
76	0.6	1.2	1	0.518	0.979	1.399	0.8	0.9	1.0	0.518	0.923	0.502
77	0.6	1.2	1	0.507	0.991	1.419	0.8	0.9	1.0	0.537	0.938	0.506
78	0.6	1.2	1	0.256	0.958	0.374	0.8	0.9	1.0	0.414	0.993	0.449
79	0.6	1.2	1	0.403	0.953	0.409	0.8	0.9	1.0	0.277	0.973	0.372
80	0.6	1.2	1	0.371	0.992	0.401	0.8	0.9	1.0	-0.010	0.972	0.281
81	0.2	0.4	1	-0.467	0.951	1.633	0.4	0.2	1.0	0.409	0.945	1.298
82	0.2	0.4	1	-0.020	0.990	1.586	0.4	0.2	1.0	0.786	0.992	1.170
83	0.2	0.4	1	0.795	0.934	0.871	0.4	0.2	1.0	0.804	0.937	0.729
84	0.2	0.4	1	0.680	0.942	1.071	0.4	0.2	1.0	0.884	0.958	0.866
85	0.2	0.4	1	0.854	0.960	0.719	0.4	0.2	1.0	0.839	0.991	0.685
86	0.2	0.4	1	0.882	0.959	0.790	0.4	0.2	1.0	0.844	0.977	0.697
87	0.2	0.4	1	0.865	0.957	0.964	0.4	0.2	1.0	0.930	0.977	0.901
88	0.2	0.4	1	0.994	0.997	0.994	0.4	0.2	1.0	1.000	1.000	0.997
89	0.2	0.4	1	-0.500	0.991	1.742	0.4	0.2	1.0	0.471	0.962	1.321
90	0.2	0.4	1	-0.430	0.976	1.702	0.4	0.2	1.0	0.504	0.959	1.303
91	0.2	0.4	1	0.236	0.976	1.537	0.4	0.2	1.0	0.823	0.993	1.161
92	0.2	0.4	1	-0.935	0.965	1.844	0.4	0.2	1.0	0.363	0.954	1.378
93	0.2	0.4	1	-0.878	0.975	1.866	0.4	0.2	1.0	0.386	0.960	1.384
94	0.2	0.4	1	0.819	0.980	0.678	0.4	0.2	1.0	0.756	0.993	0.627
95	0.2	0.4	1	0.828	0.943	0.723	0.4	0.2	1.0	0.514	0.962	0.478
96	0.2	0.4	1	0.890	0.992	0.713	0.4	0.2	1.0	0.747	0.999	0.610
Media seleccionados				0.802	0.957	0.783				0.840	0.986	0.763
Media total ensamble				0.484	0.963	0.863				0.488	0.969	0.608

Las diferencias observadas en los hidrogramas presentados en esta sección para ambos casos de estudio, representan los efectos de la incertidumbre epistémica en el modelo meteorológico en la definición de un hidrograma asociado. Además, se demuestra que en ambos casos existe una influencia grande e innegable de la falta de conocimiento, sobre la precisión de la estimación del gasto asociado. Más aún, se detecta una compleja agregación de los errores meteorológicos e hidrológicos, lo que da pie en algunos casos a compensaciones de error entre ambas etapas metodológicas. Este resultado indica la necesidad clara de implementar análisis de incertidumbre en los modelos de pronóstico de inundaciones.

En la siguiente etapa metodológica de este trabajo de investigación, se propone la utilización de los hidrogramas seleccionados, como condición de forzamiento de un modelo hidrodinámico en dos dimensiones. Esto permitirá la propagación de los errores identificados hacia el resultado final (ej. mapa de inundación), con lo que será posible revisar su efecto e importancia en la determinación de zonas afectadas por el evento extremo. Cabe señalar que este ejercicio, representa la primera vez que en México se realiza este tipo de análisis de incertidumbre.

6.3. Análisis hidrodinámico

La última etapa de modelación considerada en esta metodología, está comprendida por la simulación bidimensional del flujo en los ríos y su respectiva llanura de inundación, de tal manera que es posible determinar las zonas de afectación para cada evento estudiado. Para ello, se utilizan los hidrogramas seleccionados en la etapa anterior como condiciones de forzamiento del modelo hidrodinámico, el cual se construye con información de alta precisión (minimizando los errores asociados a la discretización numérica del problema). De esta manera, no se considera un análisis de incertidumbre en la simulación hidrodinámica de los flujos y se construye un arreglo numérico que represente de manera fidedigna las condiciones reales. Esto se hace siguiendo las recomendaciones de Beven et al. (2011), para la construcción de mapas de inundación probabilistas.

La capacidad de generar N escenarios de hidrogramas para un evento dado, abre la posibilidad de producir mapas de inundación con una probabilidad asociada al número total de escenarios simulados. Lo que a su vez permite tener un producto que ilustra de manera gráfica, la influencia de la incertidumbre epistémica en el resultado final de esta cascada de modelos.

En esta última etapa, los resultados obtenidos respecto a las áreas inundadas se comparan con lo registrado por una imagen de satélite, tomada el 18 de septiembre de 2013. Se utiliza la información de las diferentes bandas de esta imagen para clasificar los píxeles y determinar las áreas inundadas que se identifican en la imagen. Una vez hecho lo anterior, se utilizan métricas comunes para evaluar el desempeño de cada una de las simulaciones hidrodinámicas (ej. (Di Baldassarre et al. 2010a). En este caso, las métricas son diferentes a las utilizadas con anterioridad, ya que involucran la comparación de una superficie definida por el mapa de inundación de cada simulación bidimensional.

6.3.1. Métricas para la evaluación del error en mapas de inundación

Las métricas empleadas para la verificación del desempeño de los resultados bidimensionales, son ampliamente utilizadas en el campo de la meteorología (Mason 1982). Éstos son: el BIAS o sesgo, la Relación de falsas alarmas (FAR - False Alarm Ratio), la Probabilidad de Detección (POD- Probability of Detection), la probabilidad de falsa detección (POFD - Probability of False Detection), y el Índice crítico de éxito (CSI - Critical Success Index). Cada uno de estos parámetros, proporciona información útil que permiten diferenciar, "sí, un evento ocurrirá", o "no", utilizando como referencia lo que se conoce como tabla de contingencia (Tabla 6-7).

Tabla 6-7 Tabla de contingencia de inundaciones.

		Observaciones		Total
		Si	No	
Pronostico	Si	<i>Acierto</i>	<i>Falsa Alarma</i>	<i>Si - Pronostico</i>
	No	<i>Desacuerdo</i>	<i>Correcto negativo</i>	<i>No - Pronostico</i>
Total		<i>Si - Observado</i>	<i>No - Observado</i>	<i>TOTAL</i>

De acuerdo con esta tabla de contingencia, los índices de desempeño descritos se calculan por medio de las siguientes expresiones:

$$Bias (sesgo) = \frac{Aciertos + Falsas Alarmas}{Aciertos + desaciertos} \quad (37)$$

$$POD (Probabilidad de detección) = \frac{Aciertos}{Aciertos + desaciertos} \quad (38)$$

$$FAR (Proporción de falsas alarmas) = \frac{Falsas Alarmas}{Aciertos + Falsas Alarmas} \quad (39)$$

$$POFD (Probabilidad de falsa detección) = \frac{Falsas Alarmas}{Correctos Negativos + Falsas Alarmas} \quad (40)$$

$$CSI o TSS (Indice crítico de exito) = \frac{Aciertos}{Aciertos + Desaciertos + Falsas Alarmas} \quad (41)$$

El Bias o sesgo determina la relación entre el número de aciertos más falsas alarmas con los aciertos y errores del modelo numérico, con lo que se tiene un primer indicador de la bondad de los resultados numéricos, proporcionando una expresión cuantitativa de la veracidad: diferencia entre el resultado esperado para el test y el valor aceptado como verdadero.

El POD o probabilidad de detección, indica que fracción de aciertos son correctamente pronosticados, siendo el valor de 100% identificado como el óptimo. Este parámetro es muy sensible a la cantidad de aciertos, pero ignora las falsas alarmas. Por este motivo debe ser utilizado de manera conjunta con la relación de falsas alarmas (FAR).

El FAR o proporción de falsas alarmas, es un porcentaje que informa que proporción de falsas alarmas (ej. pixeles inundados en la simulación, pero no en la realidad) respecto al total de pixeles inundados (correctos y no) identificados por el modelo numérico.

El POFD o Probabilidad de falsa detección responde que fracción de zonas no inundadas que se pronosticaron incorrectamente como "sí" inundadas.

El CSI, índice crítico de éxito o índice de amenaza, indica que tan bien los pronósticos de "si inundado" corresponden en la realidad a los que "si se inundaron". Es decir mide la fracción de los observados sobre los pronosticados que aparecen como inundados.

TSS, o Coeficiente de desempeño, se interpreta como (precisión para eventos) + (precisión para los no-eventos) – 1. Su rango se encuentra entre -1 a 1, donde 0 indica que no hay habilidad, siendo la puntuación perfecta el 1.

La definición y el cálculo de estos parámetros permiten entonces verificar y evaluar la calidad de un pronóstico bidimensional. Con lo que es posible investigar, la propagación de errores hasta el final de la cadena de simulación propuesta en esta tesis doctoral.

CASO 1: INUNDACIONES DE 2009, CUENCA DEL RÍO TONALÁ

En este caso, se emplean los 31 miembros del ensamble hidrológico como condición de frontera en el caudal del río Tonalá. El mapa resultante se construye por medio de la superposición de cada uno de los mapas de inundación generados para cada miembro del ensamble hidrológico. Las capas de inundación generadas se procesan a fin de determinar una probabilidad de inundación de los pixeles inundados en la imagen, con lo que se construye un mapa probabilista de la inundación asociada a la condición meteorológica que produjo la inundación.

La Figura 6-7 presenta este resultado compuesto para el caso del río Tonalá, donde se presenta la probabilidad de inundación en toda la zona de estudio. La zona afectada por la inundación se compara con una imagen de satélite tipo SPOT (con resolución espacial de 124m) infrarroja correspondiente al 12 de noviembre de 2009.

En este resultado, el área azul identifica la región del dominio con mayor probabilidad de resultar inundada (90%), tal y como se observa en la imagen de satélite, la metodología

demuestra un buen desempeño en la identificación de zonas inundadas durante el evento en cuestión. De hecho, una gran parte del dominio numérico aparece con una alta probabilidad de inundación (color azul), concentrándose regiones de diferentes probabilidades de inundación en dos zonas particulares del dominio, ilustradas con mayor detalle en los paneles a) y b) de la Figura.

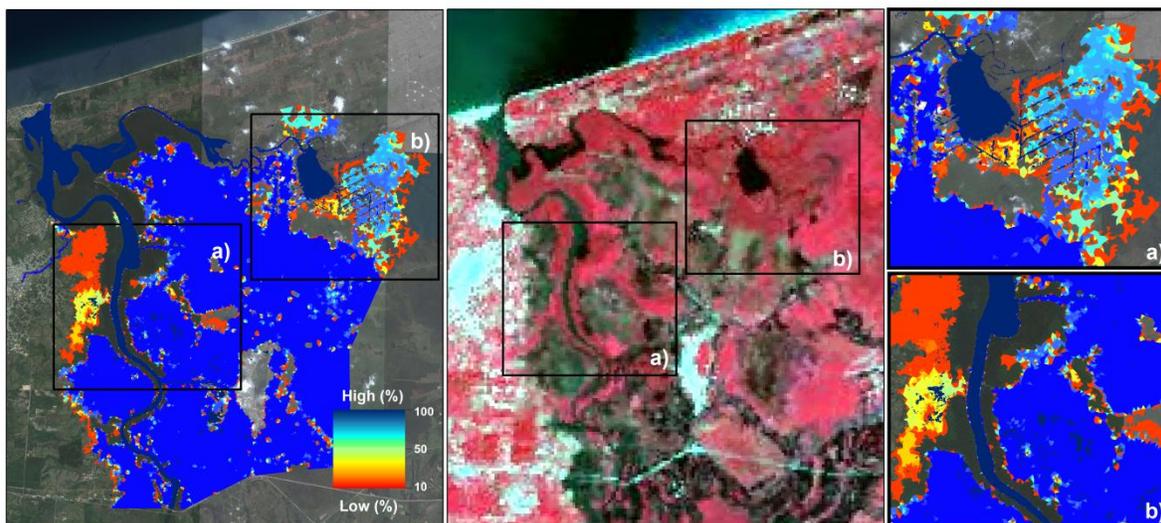


Figura 6-7 Mapa de inundación probabilístico para el evento de inundación del 2009 en la cuenca baja del río Tonalá (panel izquierdo), comparada con la imagen satelital infrarroja SPOT (panel central), 12 de noviembre de 2009.

A pesar de la incertidumbre identificada en los distintos hidrogramas para el evento, los resultados de inundación muestran las mismas zonas afectadas en todas las realizaciones. Las pequeñas diferencias se encuentran al noreste del dominio y al oriente del río a la altura de la población de Agua Dulce, así mismo en la zona central del dominio donde se encuentra la población de La Venta. El alto porcentaje de zonas con una alta probabilidad de inundación, responde a la morfología del valle, el cual indistintamente del hidrograma utilizado presenta un mismo comportamiento respecto al área inundada.

Para apreciar de mejor manera la relación entre las áreas de inundación estimadas con los hidrogramas, se presenta en la Figura 6-8, una gráfica de área de inundación vs. Gasto pico del hidrograma, donde cada punto representa una de las simulaciones realizadas. En esta figura, es posible identificar que hay una concentración de gastos pico entre los 1400 y los 1800 m³/s con áreas de inundación entre 130 y 150 km². Este

resultado confirma la poca variabilidad en el área de inundación numérica, que por otro lado es muy cercana al valor real estimado de 138.94 km².

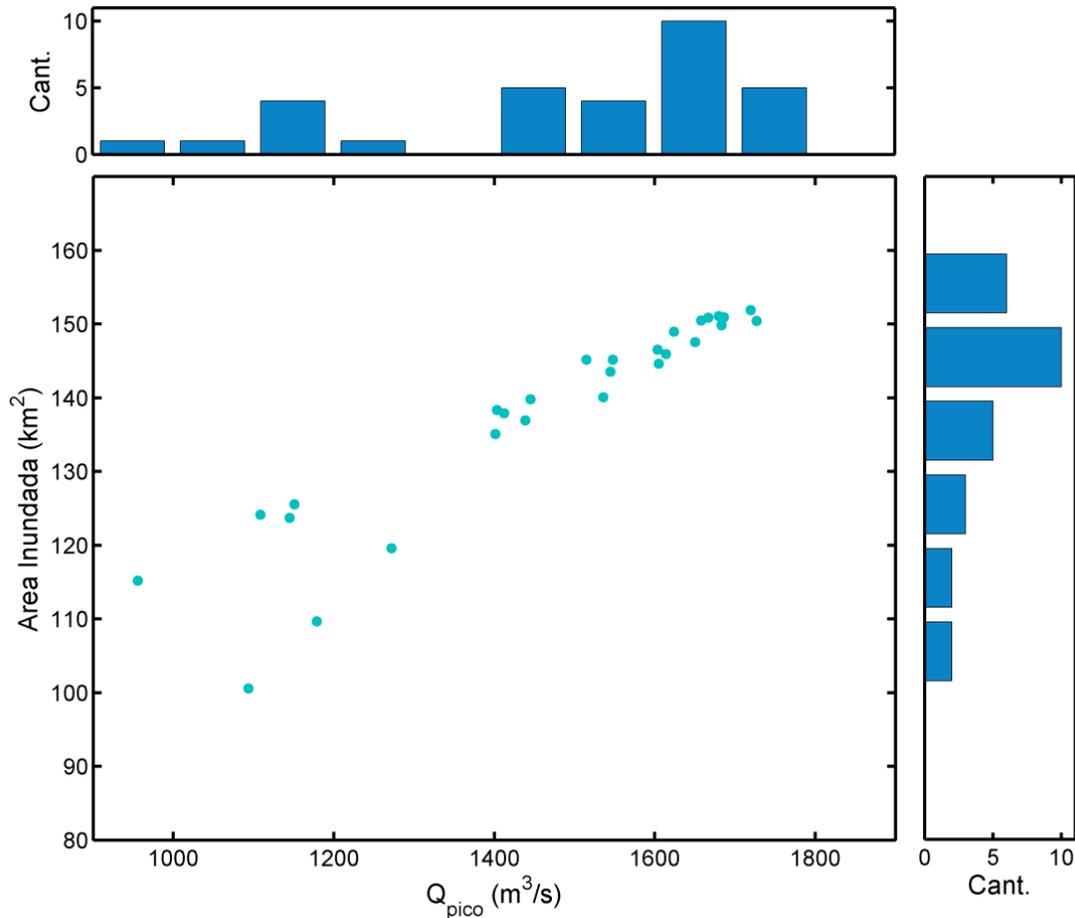


Figura 6-8 Comparación de máxima zona inundada contra el pico máximo del hidrograma de entrada del ensamble hidro-meteorológico para las 31 simulaciones hidrodinámicas (panel a). Relación de picos de caudal (panel b) y relación de tamaño área inundada.

Por otro lado, la Tabla 6-8 presenta el resumen de las métricas de error estimadas para cada simulación. De manera complementaria se presenta el valor promedio de estas métricas para todas las simulaciones, en donde Bias = 1.013, FAR = 0.189, POD = 0.819, POFD = 0.180; CSI = 0.686 y TSS = 0.639. Estos resultados confirman lo observado en el mapa de inundación, en donde se reportó una adecuada capacidad de la cascada de modelos, para identificar de manera correcta la zona inundada durante este evento.

Tabla 6-8 Comparación entre de áreas inundadas y modelaciones hidrodinámicas generadas a partir del ensamble hidrometeorológico.

Error	MIEMBRO DEL ENSAMBLE																						<Media Ensamble>									
	M1	M13	M26	M27	M30	M31	M32	M33	M38	M39	M42	M43	M44	M45	M50	M51	M52	M54	M55	M56	M57	M59		M60	M62	M63	M64	M66	M67	M68	M69	M72
BIAS	0.903	0.838	1.084	1.099	1.119	1.120	1.094	1.078	1.056	1.021	1.092	1.089	1.096	1.051	0.902	0.915	0.891	0.820	1.020	0.982	0.872	1.056	1.004	0.982	0.995	1.047	1.040	1.028	1.016	1.005	1.092	1.013
FAR	0.148	0.120	0.215	0.217	0.283	0.210	0.216	0.212	0.209	0.217	0.216	0.215	0.152	0.207	0.148	0.154	0.139	0.137	0.193	0.155	0.133	0.206	0.187	0.178	0.182	0.204	0.201	0.225	0.192	0.187	0.216	0.189
POD	0.770	0.737	0.851	0.861	0.849	0.849	0.858	0.849	0.836	0.751	0.857	0.854	0.848	0.833	0.769	0.775	0.751	0.810	0.823	0.845	0.756	0.847	0.816	0.807	0.814	0.833	0.831	0.821	0.821	0.818	0.857	0.819
POFD	0.124	0.094	0.217	0.222	0.187	0.187	0.220	0.214	0.205	0.186	0.220	0.219	0.186	0.203	0.124	0.131	0.185	0.185	0.184	0.066	0.108	0.266	0.175	0.163	0.168	0.199	0.195	0.186	0.182	0.175	0.220	0.180
CSI	0.679	0.670	0.690	0.695	0.711	0.711	0.694	0.691	0.685	0.709	0.693	0.692	0.710	0.685	0.679	0.679	0.706	0.654	0.687	0.708	0.677	0.620	0.687	0.687	0.690	0.686	0.687	0.619	0.688	0.688	0.693	0.686
TSS	0.645	0.643	0.634	0.639	0.621	0.662	0.638	0.636	0.631	0.660	0.637	0.636	0.651	0.631	0.645	0.643	0.615	0.601	0.639	0.659	0.648	0.660	0.641	0.644	0.640	0.634	0.636	0.610	0.640	0.642	0.637	0.639

Cabe señalar que es probable que la semejanza de los resultados puede ser resultado de la hidrodinámica inducida por un evento de inundación en un valle, dado que ésta determinada por una extensión similar en una zona de baja pendiente. Razón por la que todos los hidrogramas generados con el modelo hidrológico muestran áreas de inundación similares. Cuando esto ocurre, existen autores que argumentan que la evaluación del modelo a través de la extensión de la inundación no es la más adecuada (Hunter et al. 2005); por lo que se recomienda para la evaluación del desempeño del modelo una revisión de los niveles de inundación alcanzados en cada simulación, respecto a lo registrado en el evento. Desafortunadamente, para el estudio de caso, la información de las profundidades de inundación no estaba disponible. A pesar de lo anterior, se seleccionaron 10 puntos distribuidos en la zona inundada dentro del dominio numérico, para una revisión de la variabilidad de los resultados en la vertical. Este análisis se presenta en la Figura 6-9, que muestran los valores de la profundidad del agua, su valor medio y los cuartiles 25% y 75% de las 31 simulaciones revisadas. Tal y como se reporta en la figura, en todos los puntos examinados al interior del dominio numérico, existe una alta variabilidad en los valores de profundidad simulados en cada miembro, con valores de tirante de agua entre 1.5 y 3 m. Este resultado, confirma que a pesar de no registrarse grandes diferencias en el área afectada calculada, sí existen diferencias en la profundidad del agua acumulada por cada simulación. De esta manera, la variabilidad en las profundidades de inundación estimadas, tiene un impacto directo en la cuantificación de daños en esta región, ya que todas las curvas de fragilidad que existen en la literatura se definen en función de la profundidad máxima alcanzada durante el evento.

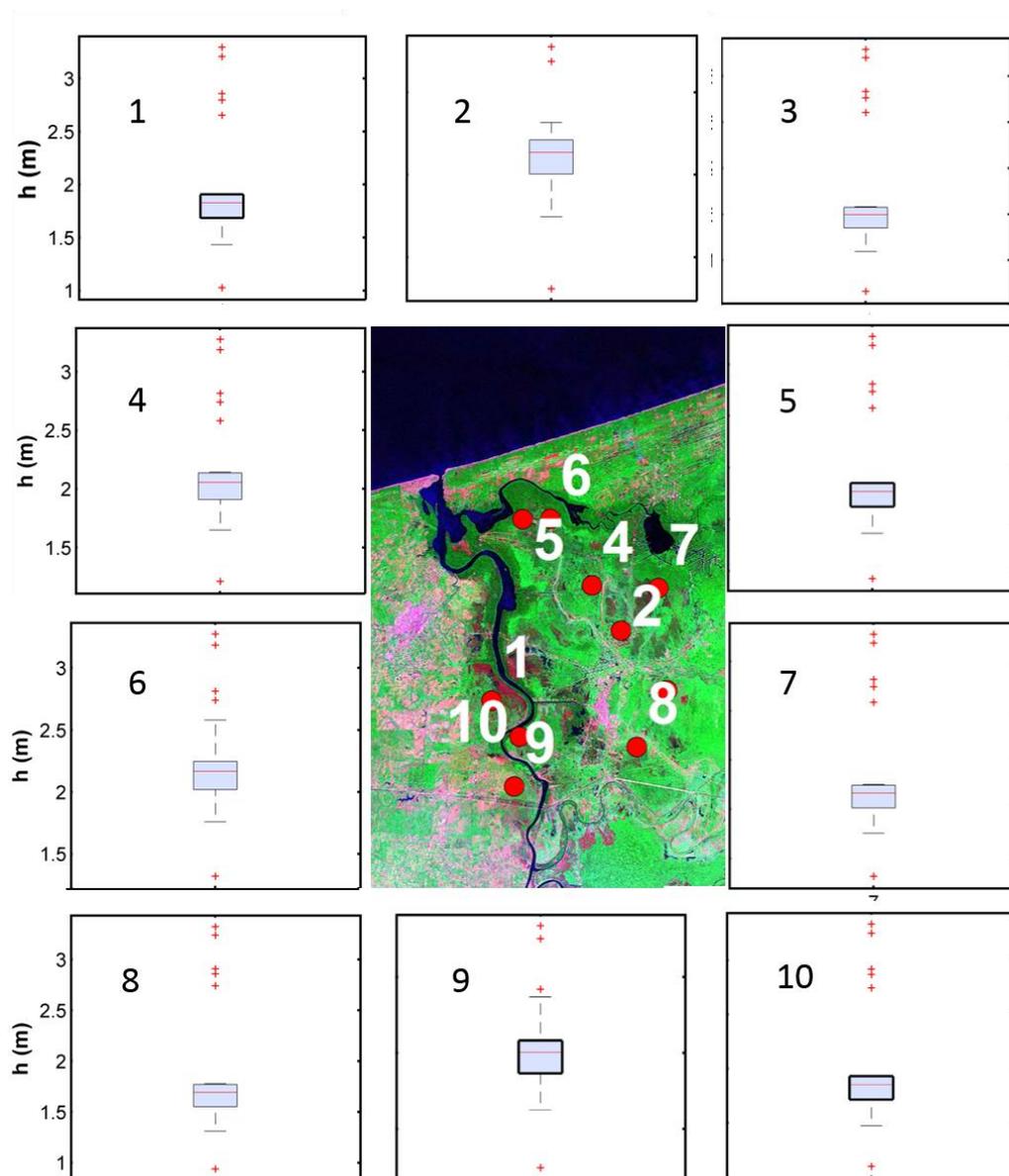


Figura 6-9 Elevaciones calculadas en diferentes sitios de la cuenca baja del río Tonalá. Cada recuadro representa los resultados del ensamble.

CASO 2: INUNDACIONES DEL 2013 EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS LA SABANA Y PAPAGAYO

Por lo que respecta al segundo caso de estudio, se utilizaron los 26 hidrogramas seleccionados para la generación de estos mapas de inundación probabilistas.

El proceso de verificación de cada salida del modelo se realiza con la ayuda de dos imágenes ráster multibanda obtenidas de dos imágenes satelitales RapidEye de

resolución de 5m (Tyc et al. 2005). Una imagen representa el estado del terreno anterior al evento de inundación, y sin influencia de precipitación reciente (3 de mayo del 2013); y la otra representa el evento de inundación (18 de Septiembre del 2013). De estas imágenes se obtiene un aproximado del área mojada debido al evento hidrometeorológico del 2013, que se compara con cada realización. El proceso de obtención de las zonas inundadas se realiza con el ordenamiento u organización de píxeles de las imágenes en clases. De esta forma se genera un mapa binario donde el valor positivo (1) representa la zona mojada y el valor negativo (0) una zona seca.

Es importante aclarar que existen limitaciones geomáticas en el tratamiento de datos de percepción remota, ya que puede ocurrir problemas de confusión de píxeles de zonas de inundadas por otras diferentes (ver (Smith 1997)). Convirtiéndose en una fuente de error en el momento de validación del modelo.

Cada escenario hidrodinámico obtenido, representan una solución adecuada. Aunque existen diferencias, los diversos escenarios resuelven el problema de la poca confiabilidad de los pronósticos hidrometeorológicos. Estas diferencias son debidas principalmente a una evidente variabilidad en el caudal máximo estimado en cada río, principalmente en el gasto del río La Sabana, lo que se refleja en las áreas resultantes en cada realización. Esto es posible observarlo en los resultados mostrados en la Figura 6-10, donde la relación entre gasto máximo normalizado (GMN) de los 26 hidrogramas para cada río, se representa en función del tamaño de la zona de máxima inundada. Cada gasto pico (Q_p) es normalizado utilizando el máximo (Q_{max}) y el mínimo (Q_{min}) valor de gasto histórico mediante la ecuación (28). Este procedimiento se hace necesario para poder comparar los resultados entre dos cuencas diferentes.

$$Q_{GMN} = \frac{(Q_{max} - Q_p)}{(Q_{max} - Q_{min})} \quad (42)$$

La distribución de los puntos de este gráfico indica claramente que existe una probabilidad del 70% a que el área inundada se encuentre entre los 10 y 30 m², ligeramente inferior a la encontrada en la imagen satelital (34.2 m²). Además, es posible observar que no existe una distribución uniforme que demuestre que mediante el incremento del gasto de cada río se incremente el área inundada. Estas discrepancias, son reflejo principal de la

variabilidad del gasto, al no existir una relación lineal entre los valores de cada río. Es decir que la principal incertidumbre se debe a los pronósticos cuantitativos de la precipitación, representados en la caracterización del impacto de los diferentes miembros del ensamble hidrometeorológico.

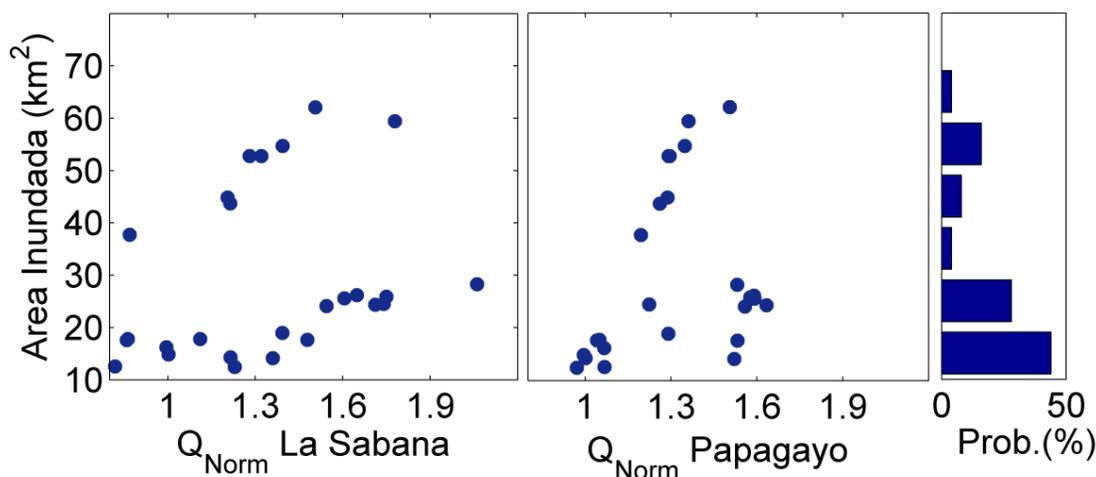


Figura 6-10 Comparación de máxima zona inundada contra el pico máximo del hidrograma de entrada del ensamble hidro-meteorológico para las 26 simulaciones hidrodinámicas en las dos cuencas del caso Acapulco.

Las áreas inundadas resultantes están influenciadas por dos ríos que tienen un área de captación que responde diferente a los estímulos de cada miembro del ensamble. Esto infiere que los resultados están regidos por el tamaño de la cuenca y la variabilidad espacial de los datos de precipitación. Las diferencias espaciales de los datos meteorológicos, generan que los gastos máximos en las dos cuencas no sean simultáneos en el mismo miembro del ensamble. La Figura 6-11 muestra la relación de los gastos máximos normalizados resultado de cada modelación, donde es posible observar la correlación entre las diferentes respuestas de las cuencas; representada por la línea de tendencia. Aunque existe una relación lineal en la mayoría de los datos, la dispersión de algunos puntos indica que existen diferencias en la respuesta de cada cuenca.

Precisamente las cuencas de menor tamaño, como la Sabana, la respuesta de captación está dominada por la variabilidad de las precipitaciones, y las cuencas de mayor tamaño, como la del Papagayo, son influenciadas principalmente por el volumen de las precipitaciones, la red fluvial y la dinámica de flujo (Robinson and Sivapalan 1997). Esto

ha sido ampliamente valorado y asociado al coeficiente de variación en cuencas (Blöschl and Sivapalan 1997).

Los resultados muestran el efecto de la dispersión de la lluvia sobre cuencas de diferentes tamaños. El efecto de la variabilidad de las precipitaciones se reduce para las cuencas de mayor tamaño pues suaviza la variabilidad de la lluvia. Esto es cualitativamente consistente con Smith (1992), quienes encontraron que los caudales máximos en las cuencas más grandes que 26 km² se comportan de manera diferente a las de las cuencas más pequeñas (en términos del coeficiente de variación).

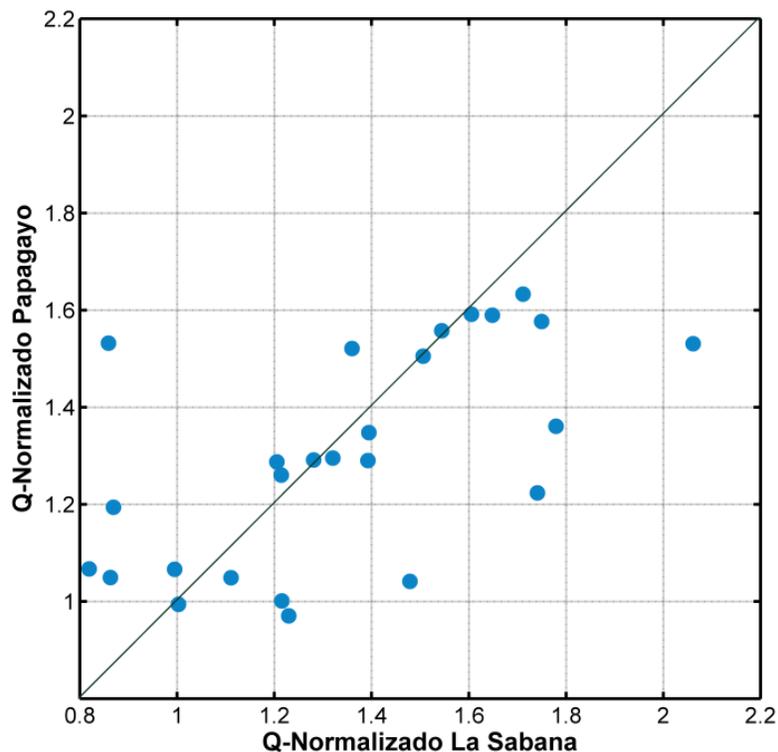


Figura 6-11 Comparacion de gastos, cuencas La Sabana y Papagayo.

Le interacción de los flujos, resultado de la interacción de las cuencas de los ríos de La Sabana y Papagayo, es posible verlo en la Figura 6-12. Esta figura representa la caracterización hidro-meteorológica en un mapa probabilístico de inundación. Los resultados comunican la distribución espacial del evento de inundación con su incertidumbre asociada de manera clara en una distribución de colores. Las zonas representadas por colores azules son altamente propensas a inundarse, y las zonas

menos vulnerables se encuentran en tonos rojos. Por ejemplo, la zona de la ciudad de Acapulco al nor-oeste de la laguna de Tres Palos y el aeropuerto al sur de la laguna, son altamente sensibles, y se identifican en el dominio con mayor probabilidad a ser inundadas (90%).

El mapa probabilístico de inundación es comparado con la imagen satelital posterior al paso del huracán en la zona. En la Figura 6-12 es posible observar la zona inundada obtenida con la imagen satelital y asociarla con el mapa probabilístico de inundación, además de observar la distribución probabilística de los resultados con más detalle en dos zonas diferentes. Los resultados definen las zonas inundables más probables, asociadas a un evento extremo de las magnitudes del 2013, y son representadas con la media de las respuestas y las bandas de confianza asociadas a un pronóstico dado. Existe una indicación clara de las consecuencias observadas en el mapa, es decir las zonas inundables son muy representativas a las obtenidas por el modelo. Esta comparación cualitativa inicial señala que existe una buena habilidad de la cadena de modelación para reproducción el evento de inundación del 2013.

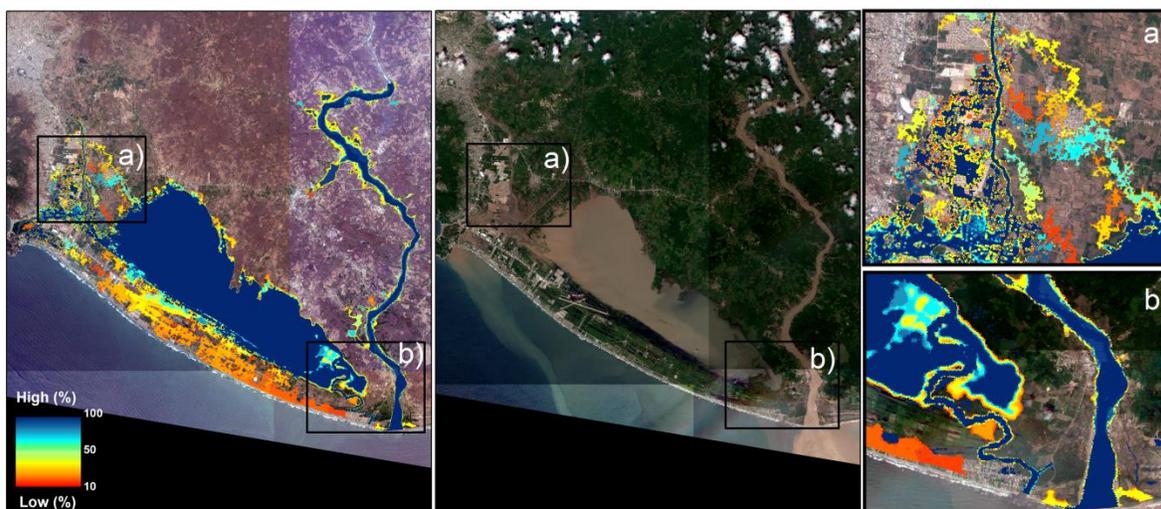


Figura 6-12 Mapa de inundación probabilístico para el evento de inundación del 2013 en la ciudad de Acapulco y alrededores (panel izquierdo), comparada con la imagen satelital del día 18 de septiembre(panel central).

Otra validación del modelo numérico se realizó utilizando información de los tirantes máximos alcanzados durante la inundación, información que fue recabada en una visita

de campo pos-evento (puntos rojos Figura 6-13), realizada por el instituto de ingeniería de la UNAM (Mejía Estrada et al. 2014). La comparación de niveles medidos con los calculados se presenta en la Figura 6-13, en donde se puede apreciar que, la gran mayoría de los puntos presenta un error relativo de menos del 27% frente a la media del ensamble, lo que implica la correspondencia entre el tirante alcanzado por el agua durante el evento y los determinados numéricamente. Además, las diferencias de dispersión en el ensamble no superan, en la mayoría de los casos el metro de altura dentro de los percentiles 0.25 y 0.75. Aunque la dispersión total de los resultados indican su alta sensibilidad vertical a las condiciones de lluvia encontradas.

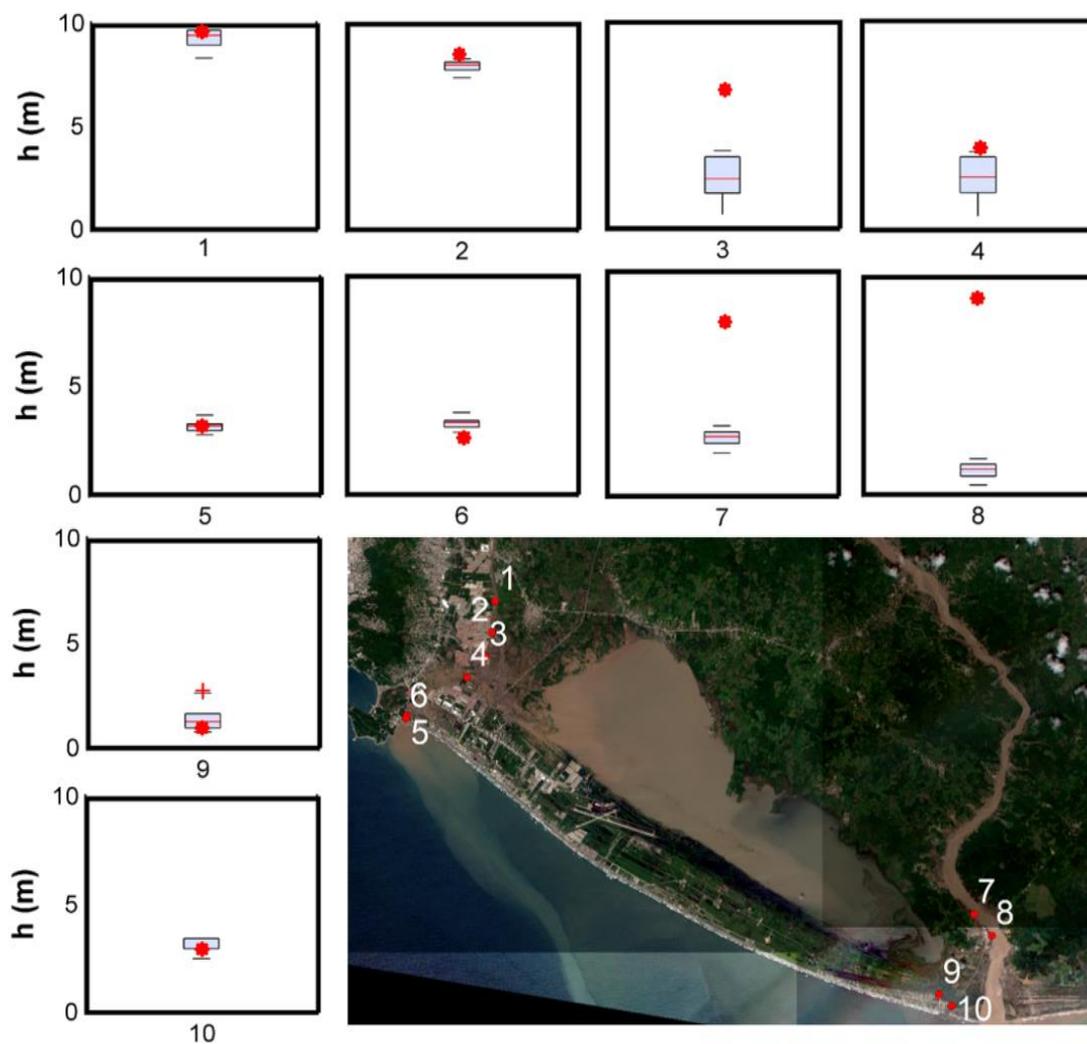


Figura 6-13 Conjunto de elevaciones calculadas en diferentes sitios de las cuencas baja de los ríos Sabana y Papagayo. En punto rojo elevaciones observadas.

Un resumen de la comparación de los distintos miembros del ensamble es posible verlo en la Tabla 6-9, en ella es posible encontrar las diferentes métricas del error, resultado de la comparación de la imagen satelital con cada mapa de inundación. En esta tabla se indica que el modelo numérico pudo ser capaz de reproducir la zona afectada con cierta confiabilidad. Esto se comprueba a través de métodos binarios de verificación de un pronóstico (pronóstico dicotómico), en donde se diferencia, "sí, un evento ocurrirá", o "no, el evento no va a suceder", utilizando como referencia la tabla de contingencia (Tabla 6-7). Esto se realiza convirtiendo los mapas de extensión de la inundación en binarios, es decir, dependiendo del número de píxeles correctamente predichos como húmedo o seco, con la ayuda de GIS. El promedio del ensamble para estos índices también se relacionan en la última columna de la tabla, donde Bias = 0.953, FAR = 0,165, POD = 0,795, POFD = 0,065; CSI = 0,688 y TSS = 0,730. Estos resultados indican un buen acercamiento del ensamble generado en la cadena de modelación para la reproducción de la extensión del área de inundación, debido a la incidencia de este evento extremo.

Tabla 6-9 Comparación entre las áreas inundadas observadas y las modelaciones hidrodinámicas generadas a partir del ensamble hidrometeorológico.

Error	MIEMBRO DEL ENSAMBLE																								<Media Ensamble>	
	M19	M20	M21	M22	M23	M24	M38	M48	M49	M50	M52	M55	M57	M58	M59	M60	M61	M72	M83	M84	M85	M86	M87	M88		M94
BIAS	0.841	0.907	0.809	0.814	1.178	1.091	0.843	0.792	0.905	1.197	0.791	1.034	0.903	1.267	1.179	0.920	0.923	0.840	1.242	0.943	0.853	1.102	0.917	0.807	0.827	0.842
FAR	0.106	0.130	0.091	0.091	0.255	0.214	0.104	0.088	0.138	0.265	0.086	0.185	0.134	0.295	0.256	0.141	0.141	0.109	0.285	0.148	0.111	0.218	0.135	0.094	0.097	0.104
POD	0.752	0.789	0.735	0.740	0.877	0.857	0.755	0.723	0.780	0.880	0.723	0.842	0.782	0.893	0.877	0.791	0.793	0.749	0.888	0.803	0.759	0.862	0.793	0.731	0.747	0.754
POFD	0.037	0.049	0.031	0.031	0.124	0.097	0.036	0.029	0.052	0.131	0.028	0.079	0.050	0.155	0.124	0.053	0.054	0.038	0.146	0.058	0.039	0.099	0.051	0.031	0.033	0.036
CSI	0.691	0.706	0.684	0.689	0.674	0.695	0.694	0.676	0.694	0.668	0.677	0.707	0.697	0.650	0.673	0.700	0.702	0.686	0.656	0.705	0.693	0.695	0.705	0.680	0.691	0.693
TSS	0.715	0.740	0.704	0.709	0.753	0.761	0.719	0.694	0.729	0.749	0.695	0.763	0.732	0.739	0.753	0.737	0.739	0.711	0.742	0.745	0.719	0.763	0.742	0.700	0.714	0.718

6.4. Propagación y análisis del error

El propósito de la investigación es generar mapas probabilísticos de inundación donde se evalué la propagación de la incertidumbre en una cascada de modelos. La evaluación de la incertidumbre se realiza en la determinación de la propagación y agregación de los errores a lo largo de la cadena de modelos durante la reproducción numérica de ambos eventos. La cuantificación de la incertidumbre se lleva a cabo en los niveles meteorológico e hidrológico de la cadena de modelación; en donde se extraen los miembros más acertados del ensamble basados en el ajuste con los datos observados.

Por lo tanto, el marco numérico contiene varias fuentes de incertidumbre en todos los niveles del modelo de cascada (meteorológica, hidrológica e hidrodinámica). Conceptualmente no es fácil disgregar las diferentes fuentes de incertidumbre en la modelación en cascada. Esto hace necesario hacer suposiciones acerca de cómo representarla. Por lo tanto, la evaluación del desempeño de los modelos hidrometeorológicos en los tres niveles se lleva a cabo a través de la estimación de las métricas del error. La Figura 6-14 muestra la propagación de las dos métricas de error conocidos, Bías (panel superior) y NSC/TSS (panel inferior), para los dos eventos. Estas métricas se seleccionaron, ya que permiten una comparación directa de sus valores en cada una de las etapas dentro del modelo de cascada. En ambos indicadores, la evolución de los límites de confianza se ilustra por el tamaño de las barras en un diagrama de caja.

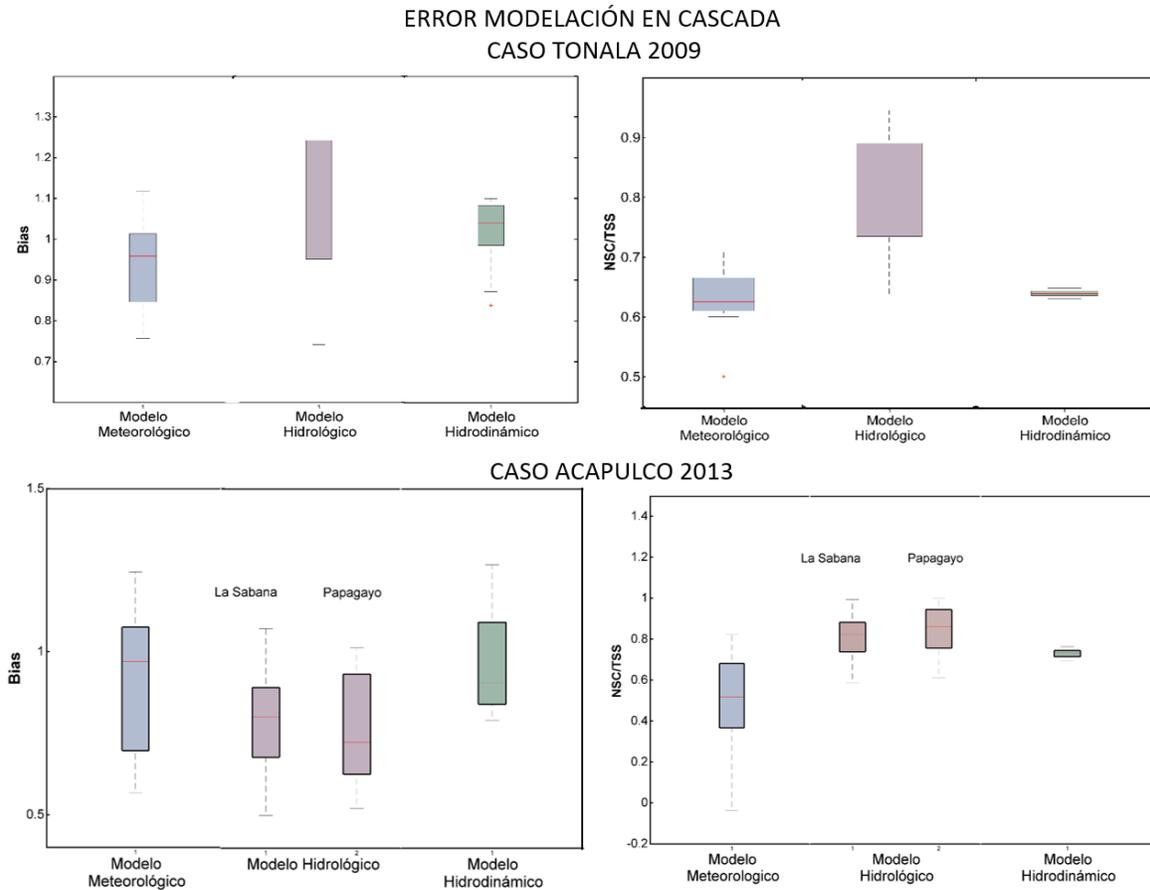


Figura 6-14 Propagación del error para cada caso, (panel superior) Tonalá. Panel inferior Sabana y Papagayo.

Es notable que para, el error cuantificado y el sesgo (Bias) en la predicción meteorológica, se reduce claramente en la etapa de modelado hidrológico para el caso de Tonalá 2009, a diferencia de la comparación de la métrica en las dos cuencas asociadas al caso de Acapulco 2013. Para los dos casos, su evolución desde el modelo meteorológico hasta el modelo hidrológico muestra una agregación de incertidumbres meteorológicas con las que se originó a partir del modelo lluvia-escorrentía. Sin embargo, la habilidad se mejora considerablemente, por ejemplo en el caso del río Tonalá, de un valor medio de 0,65 en el modelo meteorológico a 0.793 en el modelo hidrológico. En la última etapa de la cadena de modelo (modelo hidrodinámico), los límites de confianza de los resultados muestran una aparente mejoría en la habilidad del modelo. Por ejemplo, el valor medio del índice crítico se reduce a TSS = 0,639 para el caso Tonalá y a TSS=0.766 para el caso Acapulco. Para este último caso, este valor asociado a la modelación hidrodinámica, es el

mismo, debido a que se toma una sola área de inundación que es el resultado de la interacción de las dos cuencas de evaluadas en este caso (Sabana y Papagayo).

Aunque el BIAS y el NSC/TSS revelan discrepancias entre observaciones y simulaciones en todo el modelo de cascada. Los resultados proporcionan una forma útil para evaluar la propagación de la incertidumbre hidrometeorológica dentro del sistema de modelado en cascada. Por ejemplo, los límites de incertidumbre en el modelo hidrológico implican una alta sensibilidad en los hidrogramas desde el modelo meteorológico y su configuración numérica con parámetros libres (amplificando la incertidumbre), pero son altamente reducidos en la modelación hidrodinámica. Esto se observa en una amplia dispersión de la banda en el diagrama espagueti, donde se identificaron grandes límites de incertidumbre. De todas maneras, para los dos casos los resultados relativos a las predicciones reflejadas en la media del ensamble indican una buena habilidad de la modelación para determinar la extensión o mancha de inundación.

Capítulo 7. Conclusiones

El trabajo de investigación consistió en el desarrollo de una metodología integral para la generación de mapas de inundación probabilísticos, a través de modelación numérica. Con el objetivo que provean de información más confiable y útil para el mejoramiento de estrategias en el manejo de riesgos asociados a inundaciones. Todo el proceso de modelación de inundaciones incluye varias fuentes de información de diferentes modelos que representan la física desde la lluvia hasta los flujos de inundación, formando una metodología que compone tres niveles (meteorología-hidrología-hidrodinámica).

La metodología utilizada se compone de un modelo de predicción numérica del tiempo de mesoescala, un modelo lluvia-escorrentía distribuido y un modelo hidrodinámico 2-D. Y se aplica para representar dos eventos hidro-meteorológicos extremos que generaron inundaciones en dos estados de la república mexicana: Tabasco-2009 (cuenca del río Tonalá) y Guerrero-2013 (cuencas del río La Sabana y Papagayo). Esto ofrece la oportunidad de evaluar inundaciones provocadas por dos forzamientos meteorológicos diferentes a gran escala (frente frío y ciclón), y en dos zonas distintas. La utilización de modelación meteorológica a meso-escala permite tener una visión amplia para poder utilizar eficazmente los resultados dinámicos y posteriormente escalarlos localmente; además de desarrollar el evento meteorológico en su totalidad. De hecho, es posible afirmar que la metodología propuesta es útil para reproducir las condiciones observadas durante un fenómeno extremo en campo. Esto es posible afirmarlo ya que las áreas afectadas identificadas con imágenes de satélite estaban en conformidad con los resultados obtenidos con este enfoque. Por lo tanto, se destaca su utilidad, extendiendo sus beneficios a cuencas pobremente aforadas.

En esta investigación se traduce un conjunto posibles resultados a una predicción probabilística de las inundaciones, donde se incluye las incertidumbres sobre la base de la escala espacial. Justamente este planteamiento define zonas donde la probabilidad es alta para ser inundadas y zonas de donde la probabilidad de una inundación es baja. Esta información es muy importante para la toma de decisiones basadas en el riesgo para la emisión de advertencias de inundaciones.

Hay muchas fuentes de incertidumbre que se presentan en la producción de mapas de riesgo de inundaciones fluviales. Algunas de estas tienen que ver con la variabilidad natural en la ocurrencia de inundaciones; el escaso conocimiento disponible sobre la naturaleza de la cuenca y el río en estudio y la propagación de ondas de inundación incluyendo la geometría y la infraestructura de las llanuras de inundación. Podrían resumirse en dos tipos epistémica y aleatoria. Este trabajo reconoce en su marco de trabajo, que las diferentes fuentes de incertidumbre influyen en la comunicación y el buen manejo del riesgo por inundaciones, principalmente la relacionada en los modelos y datos involucrados. Por esto se enfoca en el diseño de una metodología que considera un enfoque probabilista, que busca el control de estas fuentes de incertidumbre por medio de una cuidadosa selección de estructuras del modelo y sus parámetros, y un adecuado tratamiento de los datos que se emplean para la definición de las condiciones iniciales y de frontera. En consecuencia, el encadenamiento de modelos atmosféricos, hidrológicos e hidrodinámicos, permitió la evaluación de la incertidumbre y sus efectos en la predicción final de mapas de inundación.

A nivel meteorológico, una técnica de ensamble multi-física se utilizó para evaluar la generación de incertidumbres epistémicas asociadas a la precipitación. Mientras que en el modelo hidrológico una validación multi-respuesta se implementa por medio de la definición de seis conjuntos de parámetros plausibles, que representan la incertidumbre de los parámetros libres de pérdidas (infiltración y evapotranspiración) de la escorrentía en el modelo; utilizando un análisis temporal amplio en las cuencas de estudio. Finalmente a nivel hidrodinámico, el modelo numérico fue instalado de forma determinista realizando una buena representación de cada caso en la resolución espacial, condiciones de contorno y valores de rugosidad; con el fin de reducir las incertidumbres posibles. Esto permitió la evaluación de la incertidumbre y su propagación, a partir de un evento de lluvia modelado a un área inundada. En consecuencia, los mapas probabilísticos de inundación se realizan sobre la base de probabilidades impulsadas por los sistemas hidro-meteorológicos de predicción por ensambles EPS (Ensemble Prediction Systems).

La evaluación del rendimiento de hidro-meteorológico en los tres niveles se lleva a cabo a través de la estimación de los índices de acierto. Estas suposiciones acerca de cómo representar la incertidumbre, se realizan para comparar y definir como se propaga el error en cada paso de la modelación en cascada. Por lo tanto, se seleccionaron métricas que permiten una comparación directa de sus valores en cada una de las etapas generando

unos límites de confianza, que determinan la mejor aceptación del fenómeno. Con el fin de reducir los errores de la interacción de las incertidumbres procedentes de la modelación meteorológica e hidrológica, estos límites se redujeron con la selección de hidrogramas que cumplieran con un determinado valor de Cor, Bias y NSC para cada caso.

El Bias y la métrica de error NSC/TSS, fueron utilizados para la evaluación de la modelación en cascada. Estas métricas revelaron discrepancias entre observaciones y simulaciones en todo el modelo en cascada para los dos casos. Respecto a Tonalá-2009, los resultados muestran que la evolución de los errores desde el modelo meteorológico para el modelo hidrológico se incrementan o existe una agregación de incertidumbres meteorológicas con las originadas a partir del modelo lluvia-escorrentía. Por ejemplo, un aumento en el NSC de la lluvia para el hidrograma de crecida implica que el modelo hidrológico es más sensible (barras de incertidumbre más amplios) a su entrada principal (precipitación) que el modelo WRF es al ensamble NWP. Mientras que para el caso Acapulco 2013, los límites se reducen drásticamente, mostrando más sensibilidad en los resultados de lluvia que los hidrológicos. Aunque es evidente que en los dos casos, la última etapa de la cadena de modelo (modelo hidrodinámico), los márgenes de fiabilidad de los resultados muestran una mejora evidente en la capacidad de la modelación.

Conjuntamente, observando los diferentes resultados (miembros del ensamble) en cada proceso, es posible determinar que en algunos casos el error en la meteorología es compensado por el error hidrológico y viceversa. Es decir, que el cambio en los valores de la NSC y Bias indica que los resultados del modelo meteorológico regional se pueden mejorar o debilitar por el rendimiento del modelo hidrológico. A esto debe agregarse que las variaciones inducidas en el modelo hidrológico se centraron principalmente en el nivel de infiltración y la clasificación de uso del suelo dentro de la cuenca, factores que causaron variaciones significativas en la descarga total estimada para cada evento. Finalmente, los resultados obtenidos son lo suficientemente satisfactorios para realizar otros diagnósticos de operación del sistema, tanto en condiciones normales como en condiciones extremas.

Asimismo, los resultados relativos a las predicciones de las zonas probables inundables indican una buena habilidad aparente de la cadena de modelo en la reproducción de la extensión de la inundación, y es evidente en la reducción de notable de la dispersión del error en cada miembro del ensamble hidro-meteorológico. No obstante, la propagación de

la incertidumbre y error del modelo hidrológico a la zona de inundación reveló que es necesario evaluar el rendimiento del modelo respecto a las alturas del agua y no sólo para los propósitos de extensión de inundación. Debido a que las estimaciones de las profundidades de inundación tienen una mayor variabilidad. De hecho pueden existir errores de datos que están directamente relacionados con la elevación y datos de altura del agua que al utilizarlos definen áreas con inundaciones asignadas que no tienen el mismo nivel de confianza que otras áreas. Esta última etapa de modelado es muy importante teniendo en cuenta las consecuencias para la emisión de avisos de alerta a la población en riesgo.

La incertidumbre asociada a cada procedimiento individual de la modelación en cascada afecta a todo el sistema. De hecho, cada componente del modelo posee su propia fuente de incertidumbre, por lo que se genera una propagación de los errores a lo largo del proceso de modelación que involucra el paso de las condiciones atmosféricas a las predicciones de lluvia, de la lluvia a la predicción de la escorrentía y de la escorrentía a los flujos de inundación. Sin embargo, la metodología propuesta está diseñada para reducirlas y limitarlas, a través de un marco de trabajo estocástico.

La principal herramienta para transferir la información probabilística es el uso de EPS atmosféricos en los modelos hidrológicos. Las EPSs son operacionalmente usadas para cuantificar la incertidumbre implicada en la predicción del tiempo, que incluye la distribución en el espacio y tiempo de la precipitación (Molteni et al. 1996, Schaake et al. 2007, Marty, Zin and Obled 2013). El pronóstico de inundaciones por ensamble de precipitación fue realizado específicamente para capturar la incertidumbre, por lo que representa un conjunto de posibles estados futuros de la atmósfera. En consecuencia, la utilización incertidumbre de la predicción de los modelos de predicción numérica del tiempo supone que representa la mayor fuente de incertidumbre en la previsión de inundaciones. Sin embargo, en realidad, hay muchas fuentes de incertidumbre en los pronósticos de inundaciones, que también podrían ser importantes, pero que son principalmente establecidas en la modelación hidrológica e hidrométrica.

Este tipo de metodología para reconocer la incertidumbre y plasmarla en mapas de inundación es nuevo. Y abre la ventana hacia el mejoramiento de las herramientas de comunicación de inundaciones. Además, este trabajo sugiere que las incertidumbres pueden ser significativas, pero ha dado una orientación limitada acerca de la importancia de las diferentes fuentes de incertidumbre. Sin embargo, es un acercamiento para el

mejoramiento en la modelación de inundaciones. De hecho La utilización de EPS hace que el trabajo sea una contribución a los recientes avances en la medición y pronóstico del tiempo, que genera oportunidades para mejorar las los pronósticos de gasto para el manejo de inundaciones. Además la combinación de alta resolución, con los EPS directamente en los sistemas de caudal para encontrar zonas probables de inundación, representa un esfuerzo inicial que considera el acoplamiento de modelos Meteorológicos-hidrológicos-hidrodinámicos, a través de los cuales se puedan definir estrategias para el manejo de inundaciones más sustentables.

7.1. Trabajo futuro

La metodología desarrollada en esta investigación es el comienzo para el mejoramiento de herramientas que provean a los tomadores de decisiones con información útil para el manejo y prevención de inundaciones. De igual forma, representa el inicio del estudio de las incertidumbres, he implica que en el camino a recorrer en el futuro se exploren más fuentes de incertidumbre, diferentes formas de acoplamiento de modelos y se investigue la posibilidad de disminuir de los plazos de entrega de los resultados.

Principalmente la modelación en cascada abre la puerta al desarrollar de sistemas de predicción de inundaciones más confiables. Efectivamente, los sistemas que integran la hidrológica con modelación atmosférica ya están en funcionamiento en muchas áreas. Los organismos operacionales para la prevención y control de inundaciones e investigación operativa de sistemas de predicción en todo el mundo se inclinan cada vez más hacia el uso de conjuntos de NWP, en los sistemas de predicción por ensambles EPS, en lugar de pronósticos deterministas simples, para impulsar sus sistemas de predicción de crecidas.

Por otro lado este estudio se limitó a dos sistemas de cuenca con tamaño y características similares (extensión grande y pendiente suave), lo que podría limitar los resultados a este tipo de cuencas. Valdría la pena realizar mapas probabilísticos para diferentes zonas. Esto para evaluar la respuesta de los pronósticos hidrometeorológicos a diferentes tipos de cuenca.

Respecto a la modelación meteorológica, es de importancia analizar con más detalle el origen de la dispersión en los conjuntos multi-física, produciendo conjuntos de mayor número de miembros, para generar un ensamble más eficiente a los examinados. De igual forma poder extender estas simulaciones a escenarios de cambio climático para comprobar cómo influyen los resultados en las demás etapas de la modelación en cascada a través de periodos de tiempo mucho más extensos y no limitar el análisis a eventos significativos de inundación.

Bibliografía

- Abt, E., J. V. Rodricks, J. I. Levy, L. Zeise & T. A. Burke (2010) Science and decisions: Advancing risk assessment. *Risk analysis*, 30, 1028-1036.
- ADB. 2002. *The Handbook provides guidance on integration of risk analysis in the design and analysis of projects.*: Published by the Asian Development Bank.
- Alcamo, J. & J. Bartnicki (1987) A framework for error analysis of a long-range transport model with emphasis on parameter uncertainty. *Atmospheric Environment (1967)*, 21, 2121-2131.
- Alvarez Celso, I. J. 2011. Evaluación de la incertidumbre en la modelación numerica de flujos de inundación en ríos. In *Facultad de ingeniería civil*. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Aon-Benfield (2013) Impact forecasting, September 2013 Global Catastrophe.
- Apel, H., A. H. Thieken, B. Merz & G. Blöschl (2004) Flood risk assessment and associated uncertainty. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4, 295-308.
- Arakawa, A. (2004) The cumulus parameterization problem: Past, present, and future. *Journal of Climate*, 17, 2493-2525.
- Aronica, G., P. Bates & M. Horritt (2002) Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE. *Hydrological Processes*, 16, 2001-2016.
- Aronica, G., B. Hankin & K. Beven (1998) Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data. *Advances in Water Resources*, 22, 349-365.
- Baecher, G. B. & J. Christian (2000) Natural variation, limited knowledge, and the nature of uncertainty in risk analysis. *Risk-based Decisionmaking in Water Resources IX*.
- Baldassarre, G. D. & A. Montanari (2009) Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 913-921.
- Bammer, G. & M. Smithson. 2012. *Uncertainty and risk: multidisciplinary perspectives*. Routledge.
- Bao, H.-J., L.-N. Zhao, Y. He, Z.-J. Li, F. Wetterhall, H. Cloke, F. Pappenberger & D. Manful (2011) Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinanjia model for flood forecast. *Advances in Geosciences*, 29, 61-67.
- Bartholmes, J. & E. Todini (2005) Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9, 333-346.
- Bates, P., K. Marks & M. Horritt (2003) Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models. *Hydrological Processes*, 17, 537-557.
- Bates, P. D. & A. De Roo (2000) A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236, 54-77.

- Bates, P. D., M. S. Horritt, G. Aronica & K. Beven (2004) Bayesian updating of flood inundation likelihoods conditioned on flood extent data. *Hydrological Processes*, 18, 3347-3370.
- Bauer, P., A. Thorpe & G. Brunet (2015) The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 525, 47-55.
- Baveye, P. 2009. *Uncertainties in environmental modelling and consequences for policy making*. Springer Science & Business Media.
- Bechteler, W., S. Hartmaan & A. Otto. 1994. Coupling of 2D and 1D models and integration into Geographic Information Systems (GIS). In *2nd International Conference on River Flood Hydraulics*, 166. Wiley, Chichester, UK.
- Beck, M. B. (1987) Water quality modeling: a review of the analysis of uncertainty. *Water Resources Research*, 23, 1393-1442.
- Bedford, T. & R. Cooke. 2001. *Probabilistic Risk Analysis; Foundations and Methods*. UK.
- Beffa, C. & R. J. Connell (2001) Two-dimensional flood plain flow. I: Model description. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6, 397-405.
- Beljaars, A. (1995) The parametrization of surface fluxes in large-scale models under free convection. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121, 255-270.
- Benn, J. R. 2004. *Scoping study into hydraulic performance of bridges and other structures, including effects of blockages, at high flows*. Bristol: Environment Agency.
- Berz, G. 2000. Flood disasters: lessons from the past—worries for the future. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water and Maritime Engineering*, 3-8. Thomas Telford Ltd.
- Beven, K. (2001) How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 5, 1-12.
- Beven, K. (2002) Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system. *Hydrological Processes*, 16, 189-206.
- Beven, K. (2006a) A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320, 18-36.
- Beven, K. (2006b) Searching for the Holy Grail of scientific hydrology: $Q_t = (S, R, \Delta; t)A$ as closure. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 609-618.
- Beven, K. & A. Binley (1992) The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6, 279-298.
- Beven, K., D. Leedal & S. McCarthy (2010) Guidelines for Assessing Uncertainty in Flood Risk Mapping. *Flood Risk Management Research Consortium User Report*.
- Beven, K., D. Leedal, S. McCarthy, R. Lamb, N. Hunter, C. Keef, P. Bates, J. Neal & J. Wicks (2011) Framework for assessing uncertainty in fluvial flood risk mapping. *Flood Risk Management Research Consortium Research Report (available from www.floodrisk.org.uk)*.
- Beven, K., P. Young, R. Romanowicz, E. O'Connell, J. Ewen, G. O'Donnell, I. Homan, H. Posthumus, J. Morris & J. Hollis (2008) Analysis of historical data sets to look for impacts of land use and management change on flood generation. *Defra R&D Final Report FD2120*. Defra, London.

- Beven, K. H., Jim. 2014. *APPLIED UNCERTAINTY ANALYSIS FOR FLOOD RISK MANAGEMENT*. London WC2H 9HE.
- Beven, K. J. 2009. *Environmental modelling : an uncertain future? : an introduction to techniques for uncertainty estimation in environmental prediction*. London ; New York: Routledge.
- Biondi, D. & D. De Luca (2012) A Bayesian approach for real-time flood forecasting. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 42, 91-97.
- Blazkova, S. & K. Beven (2002) Flood frequency estimation by continuous simulation for a catchment treated as ungauged (with uncertainty). *Water Resources Research*, 38, 14-1-14-14.
- Blockley, D. I. 1992. *Engineering safety*. McGraw-Hill.
- Blöschl, G. & M. Sivapalan (1997) Process controls on regional flood frequency: coefficient of variation and basin scale. *Water Resources Research*, 33, 2967-2980.
- Brito-Castillo, L. & A. Pedrozo-Acuña. 2015. *Inundaciones, heladas e incendios forestales. Conviviendo con la naturaleza, El Problema de los Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos en México*. . CONACYT.
- Bruen, M., P. Krahe, M. Zappa, J. Olsson, B. Vehvilainen, K. Kok & K. Daamen (2010) Visualizing flood forecasting uncertainty: some current European EPS platforms—COST731 working group 3. *Atmospheric Science Letters*, 11, 92-99.
- Buizza, R., J. R. Bidlot, N. Wedi, M. Fuentes, M. Hamrud, G. Holt & F. Vitart (2007) The new ECMWF VAREPS (variable resolution ensemble prediction system). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133, 681-695.
- Bukovsky, M. S. & D. J. Karoly (2009) Precipitation simulations using WRF as a nested regional climate model. *Journal of applied Meteorology and Climatology*, 48, 2152-2159.
- Cameron, D., K. Beven & P. Naden (2000) Flood frequency estimation by continuous simulation under climate change (with uncertainty). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4, 393-405.
- CENAPRED. 2015. Declaratorias de desastre natural publicadas en el Diario Oficial de la Federación y número de municipios señalados por entidad federativa y tipo de fenómeno. In *Declaratorias de Emergencia, Mexico 2000-2014*.
- CENAPRED, N. García Arróliga, R. Marín Cambranis & K. Méndez Estrada (2010) Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2009.
- Che, D., M. Nangare & L. Mays (2014) Determination of Clark's Unit Hydrograph Parameters for Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19, 384-387.
- Chen, S. & J. Dudhia (2000) Annual report: WRF physics. *Air Force Weather Agency*.
- Cintineo, R., J. A. Otkin, M. Xue & F. Kong (2014) Evaluating the performance of planetary boundary layer and cloud microphysical parameterization

- schemes in convection-permitting ensemble forecasts using synthetic GOES-13 satellite observations. *Monthly Weather Review*, 142, 163-182.
- Clark, C. (1945) Storage and the unit hydrograph. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 110, 1419-1446.
- Cloke, H. & F. Pappenberger (2009) Ensemble flood forecasting: a review. *Journal of Hydrology*, 375, 613-626.
- Cloke, H. L., F. Wetterhall, Y. He, J. E. Freer & F. Pappenberger (2013) Modelling climate impact on floods with ensemble climate projections. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139, 282-297.
- Collins, W. D., P. J. Rasch, B. A. Boville, J. J. Hack, J. R. McCaa, D. L. Williamson, J. T. Kiehl, B. Briegleb, C. Bitz & S. Lin. 2004. Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 3.0). Technical Note TN-464+ STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.
- Costa, J. E. & R. D. Jarrett. 2008. An evaluation of selected extraordinary floods in the United States Reported by the US Geological Survey and implications for future advancement of flood science.
- Cruickshank, V. (1992) Relación entre las aguas superficiales y subterráneas en una cuenca. *Ingeniería Hidráulica en México*, 7, 53-63.
- Cunge, J. A. (1975) Two dimensional modeling of flood plains. *Unsteady flow in open channels*, 2, 705-762.
- Cuo, L., T. C. Pagano & Q. Wang (2011) A review of quantitative precipitation forecasts and their use in short-to medium-range streamflow forecasting. *Journal of Hydrometeorology*, 12, 713-728.
- Davolio, S., M. Miglietta, T. Diomede, C. Marsigli, A. Morgillo & A. Moscatello (2008) A meteo-hydrological prediction system based on a multi-model approach for precipitation forecasting. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8, 143-159.
- De Jonge, T., M. Kok & M. Hogeweg (1996) Modelling floods and damage assessment using GIS. *IAHS PUBLICATION*, 299-306.
- Defra, A. (2005) Making Space for Water: Taking Forward a New Government Strategy for Flood and Coastal Erosion Risk Management. *Delivery Plan*. Defra, London.
- Demeritt, D., H. Cloke, F. Pappenberger, J. Thielen, J. Bartholmes & M.-H. Ramos (2007) Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting. *Environmental Hazards*, 7, 115-127.
- Demeritt, D., S. Nobert, H. Cloke & F. Pappenberger (2010) Challenges in communicating and using ensembles in operational flood forecasting. *Meteorological Applications*, 17, 209-222.
- Demeritt, D., S. Nobert, H. L. Cloke & F. Pappenberger (2013) The European Flood Alert System and the communication, perception, and use of ensemble predictions for operational flood risk management. *Hydrological Processes*, 27, 147-157.
- Dewar, J. A. 2002. *Assumption-based planning: A tool for reducing avoidable surprises*. Cambridge University Press.
- Di Baldassarre, G., A. Montanari, H. Lins, D. Koutsoyiannis, L. Brandimarte & G. Blöschl (2010a) Flood fatalities in Africa: from diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters*, 37.

- Di Baldassarre, G., G. Schumann, P. D. Bates, J. E. Freer & K. J. Beven (2010b) Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, 55, 364-376.
- Di Baldassarre, G. & S. Uhlenbrook (2012) Is the current flood of data enough? A treatise on research needs for the improvement of flood modelling. *Hydrological Processes*, 26, 153-158.
- Dietrich, J., S. Trepte, Y. Wang, A. Schumann, F. Voß, F. Hesser & M. Denhard (2008) Combination of different types of ensembles for the adaptive simulation of probabilistic flood forecasts: hindcasts for the Mulde 2002 extreme event. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 15.
- Domínguez, M., G. Esquivel, M. Baldemar, R. Mendoza & J. Argenis (2008) Manual del Modelo para Pronostico de Escurrimiento. *Serie Manuales, Instituto de Ingeniería, UNAM*.
- Dudhia, J. 1996. A multi-layer soil temperature model for MM5. In *Preprints, The Sixth PSU/NCAR mesoscale model users' workshop*, 22-24.
- Dunn, W. N. (2001) Using the method of context validation to mitigate Type III errors in environmental policy analysis. *Knowledge, power and participation in environmental policy analysis*, 417-436.
- Durocher, M., F. Chebana & T. B. Ouarda (2016) On the prediction of extreme flood quantiles at ungauged locations with spatial copula. *Journal of Hydrology*, 533, 523-532.
- Efstathiou, G., N. Zoumakis, D. Melas, C. Lolis & P. Kassomenos (2013) Sensitivity of WRF to Boundary Layer Parameterizations in Simulating a Heavy Rainfall Event using Different Microphysical Schemes. Effect on Large-Scale Processes. *Atmospheric Research*.
- Faulkner, H., D. Parker, C. Green & K. Beven (2007) Developing a translational discourse to communicate uncertainty in flood risk between science and the practitioner. *AMBIO: a Journal of the Human Environment*, 36, 692-704.
- Freeze, R. A. & R. Harlan (1969) Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. *Journal of Hydrology*, 9, 237-258.
- Fu, G. & D. Butler (2014) Copula-based frequency analysis of overflow and flooding in urban drainage systems. *Journal of Hydrology*, 510, 49-58.
- Funtowicz, S. O. & J. R. Ravetz. 1990. *Uncertainty and quality in science for policy*. Springer Science & Business Media.
- Goldstein, M. & J. Rougier (2009) Reified Bayesian modelling and inference for physical systems. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 139, 1221-1239.
- Gourbesville, P. 1998. MIKE 11 GIS: interest of GIS technology for conception of flood protection systems. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Hydroinformatics*, 1365-1373. Balkema: Rotterdam.
- Hacking, I. 2006. *The emergence of probability: A philosophical study of early ideas about probability, induction and statistical inference*. Cambridge University Press.
- Hall, J., S. Tarantola, P. Bates & M. Horritt (2005) Distributed sensitivity analysis of flood inundation model calibration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131, 117-126.

- Hall, J. W. (2014) Flood Risk Management: Decision Making Under Uncertainty. *Applied Uncertainty Analysis for Flood Risk Management*, 3-24.
- He, Y., F. Wetterhall, H. Cloke, F. Pappenberger, M. Wilson, J. Freer & G. McGregor (2009) Tracking the uncertainty in flood alerts driven by grand ensemble weather predictions. *Meteorological Applications*, 16, 91-101.
- Hernández Santana, J. R. & M. A. Ortiz Pérez (2005) Análisis morfoestructural de las cuencas hidrográficas de los ríos Sabana y Papagayo (tercio medio-inferior), estado de Guerrero, México. *Investigaciones geográficas*, 7-25.
- Hervouet, J. M. (2000) TELEMAC modelling system: an overview. *Hydrological Processes*, 14, 2209-2210.
- Hillen, R. & R. Jorissen (1995) Major Floods Events in the Netherlands, 30th Conf. *Of River & Coastal Engineers*.
- Hine, D. J. 2007. Robust flood risk management decisions: an information-gap approach. University of Newcastle upon Tyne.
- Hoeting, J. A., D. Madigan, A. E. Raftery & C. T. Volinsky (1999) Bayesian model averaging: a tutorial. *Statistical science*, 382-401.
- Hong, S.-Y., J. Dudhia & S.-H. Chen (2004) A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 132, 103-120.
- Hong, S.-Y., Y. Noh & J. Dudhia (2006) A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134, 2318-2341.
- Horritt, M. (2006a) A methodology for the validation of uncertain flood inundation models. *Journal of Hydrology*, 326, 153-165.
- Horritt, M. & P. Bates (2001) Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrological Processes*, 15, 825-842.
- Horritt, M. S. (2006b) A methodology for the validation of uncertain flood inundation models. *Journal of Hydrology*, 326, 153-165.
- Horritt, M. S. & P. D. Bates (2002) Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268, 87-99.
- Hourdin, F., I. Musat, S. Bony, P. Braconnot, F. Codron, J.-L. Dufresne, L. Fairhead, M.-A. Filiberti, P. Friedlingstein & J.-Y. Grandpeix (2006) The LMDZ4 general circulation model: climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Climate Dynamics*, 27, 787-813.
- Houska, T., S. Multsch, P. Kraft, H.-G. Frede & L. Breuer (2014) Monte Carlo-based calibration and uncertainty analysis of a coupled plant growth and hydrological model. *Biogeosciences*, 11, 2069-2082.
- Huang, S., B. Hou, J. Chang, Q. Huang & Y. Chen (2014) Copulas-based probabilistic characterization of the combination of dry and wet conditions in the Guanzhong Plain, China. *Journal of Hydrology*, 519, 3204-3213.
- Hunter, N., P. Bates, S. Neelz, G. Pender, I. Villanueva, N. Wright, D. Liang, R. A. Falconer, B. Lin & S. Waller. 2008. Benchmarking 2D hydraulic models for urban flood simulations. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 13-30. Thomas Telford (ICE publishing).

- Hunter, N. M., P. D. Bates, M. S. Horritt, A. De Roo & M. G. Werner (2005) Utility of different data types for calibrating flood inundation models within a GLUE framework. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9, 412-430.
- IMEE. 2011. Infrastructure Management and Extreme Events In *National Science Foundation*, ed. M. a. M. I. Division of Civil.
- INEGI. 2008. Nube de Puntos LIDAR ajustada al Terreno, Bloque conformado por las cartas 1:50,000: E15A75, E15A76, E15A85, E15A86 del Instituto Nacional de Estadística. In *Geografía e Informática*.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Janjic, Z., T. Black, M. Pyle, E. Rogers, H. Chuang & G. DiMego. 2005. High resolution applications of the WRF NMM. In *Preprints, 21st Conf. on Weather Analysis and Forecasting/17th Conf. on Numerical Weather Prediction, Washington, DC, Amer. Meteor. Soc. A*.
- Jasper, K., J. Gurtz & H. Lang (2002) Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, 267, 40-52.
- Jongman, B., S. Hochrainer-Stigler, L. Feyen, J. C. Aerts, R. Mechler, W. W. Botzen, L. M. Bouwer, G. Pflug, R. Rojas & P. J. Ward (2014) Increasing stress on disaster-risk finance due to large floods. *Nature Climate Change*, 4, 264-268.
- Jung, Y. & V. Merwade (2011) Uncertainty Quantification in Flood Inundation Mapping Using Generalized Likelihood Uncertainty Estimate and Sensitivity Analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17, 507-520.
- Kain, J. S. (2004) The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 170-181.
- Kalnay, E. 2003. *Atmospheric modeling, data assimilation, and predictability*. Cambridge university press.
- Kaplan, S. & B. J. Garrick (1981) On the quantitative definition of risk. *Risk analysis*, 1, 11-27.
- Keef, C., C. Svensson & J. A. Tawn (2009) Spatial dependence in extreme river flows and precipitation for Great Britain. *Journal of Hydrology*, 378, 240-252.
- Kirby, A. & J. Ash. 2000. *Fluvial freeboard guidance note*. Environment Agency.
- Kjeldsen, T. R. (2007) The revitalised FSR/FEH rainfall-runoff method.
- Knight, D. W., C. McGahey, R. Lamb & P. Samuels. 2009. *Practical channel hydraulics: Roughness, conveyance and afflux*. CRC Press.
- Knight, F. H. 1921. *Risk, uncertainty and profit*. Courier Corporation.
- Korving, H., J. M. Van Noordwijk, P. H. Van Gelder & F. H. Clemens (2009) Risk-based design of sewer system rehabilitation. *Structure and Infrastructure Engineering*, 5, 215-227.
- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf & F. Rubel (2006) World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259-263.
- Krzysztofowicz, R. (2002) Probabilistic flood forecast: bounds and approximations. *Journal of Hydrology*, 268, 41-55.

- Kurowicka, D. & R. M. Cooke. 2006. *Uncertainty analysis with high dimensional dependence modelling*. John Wiley & Sons.
- Lamb, R. & A. L. Kay (2004) Confidence intervals for a spatially generalized, continuous simulation flood frequency model for Great Britain. *Water Resources Research*, 40.
- Laprise, R. (1992) The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Monthly Weather Review*, 120, 197-207.
- Leedal, D., J. Neal, K. Beven, P. Young & P. Bates (2010) Visualization approaches for communicating real-time flood forecasting level and inundation information. *Journal of Flood Risk Management*, 3, 140-150.
- Leung, W., B. Noble, J. Gunn & J. A. G. Jaeger (2015) A review of uncertainty research in impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 50, 116-123.
- Liechti, K., M. Zappa, F. Fundel & U. Germann (2013) Probabilistic evaluation of ensemble discharge nowcasts in two nested Alpine basins prone to flash floods. *Hydrological Processes*, 27, 5-17.
- Liguori, S., M. Rico-Ramirez, A. Schellart & A. Saul (2012) Using probabilistic radar rainfall nowcasts and NWP forecasts for flow prediction in urban catchments. *Atmospheric Research*, 103, 80-95.
- Liguori, S. & M. A. Rico-Ramirez (2012) Quantitative assessment of short-term rainfall forecasts from radar nowcasts and MM5 forecasts. *Hydrological Processes*, 26, 3842-3857.
- Liguori, S. & M. A. Rico Ramirez (2013) A practical approach to the assessment of probabilistic flow predictions. *Hydrological Processes*, 27, 18-32.
- Liu, Y., O. Batelaan, F. De Smedt, J. Poórová & L. Velická (2005) Automated calibration applied to a GIS-based flood simulation model using PEST. *Floods, from defence to management*, 317-326.
- López-Espinoza, E., J. Zavala-Hidalgo & O. Gómez-Ramos (2012) Weather forecast sensitivity to changes in urban land covers using the WRF model for central Mexico. *Atmósfera*, 25, 127-154.
- Ma, L.-M. & Z.-M. Tan (2009) Improving the behavior of the cumulus parameterization for tropical cyclone prediction: Convection trigger. *Atmospheric Research*, 92, 190-211.
- Marchi, B. (1995) Uncertainty in environmental emergencies: a diagnostic tool. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 3, 103-112.
- Marengo Mogollón, H., H. L. Ruíz Silva, R. A. Becerra Soriano, P. Gallardo Almanza & R. Velasco Zenteno. 2014. Simulación hidrodinámica del río Papagayo para la estimación del gasto máximo provocado por el huracán Manuel. In *XXIII CONGRESO NACIONAL DE HIDRÁULICA*, ed. A. Asociación Mexicana de Hidráulica. PUERTO VALLARTA, JALISCO, MÉXICO.
- Marty, R., I. Zin & C. Obled (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). *Hydrological Processes*, 27, 33-44.

- Maskey, S., V. Guinot & R. K. Price (2004) Treatment of precipitation uncertainty in rainfall-runoff modelling: a fuzzy set approach. *Advances in Water Resources*, 27, 889-898.
- Mason, I. (1982) A model for assessment of weather forecasts. *Aust. Meteor. Mag.*, 30, 291-303.
- McCowan, A. & N. Collins. 2001. The use of Mike 21 for full two-dimensional flood impact assessment. In *Proceedings of the 3rd DHI Software Conference & DHI Software Courses, Helsingør, Denmark*.
- McMillan, H., T. Krueger & J. Freer (2012) Benchmarking observational uncertainties for hydrology: rainfall, river discharge and water quality. *Hydrological Processes*, 26, 4078-4111.
- Mejía Estrada, I. P., J. P. Rodríguez-Rincón & A. Pedrozo-Acuña (2014) ANÁLISIS DEL EVENTO HIDROMETEOROLÓGICO EXTREMO EN ACAPULCO, GUERRERO, 2013: LECCIONES APRENDIDAS. *Revista Tláloc*, N° 66, enero-marzo de 2015, 1-6.
- Mercader, J., B. Codina, A. Sairouni & J. Cunillera (2010) Results of the meteorological model WRF-ARW over Catalonia, using different parameterizations of convection and cloud microphysics. *Journal of Weather and Climate of the Western Mediterranean*, 75-86.
- Merz, B., J. Hall, M. Disse & A. Schumann (2010) Fluvial flood risk management in a changing world. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10, 509-527.
- Merz, B., H. Kreibich & H. Apel (2008) Flood risk analysis: uncertainties and validation. *Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft*, 60, 89-94.
- Merz, B., A. Thielen & M. Goch. 2007. Flood risk mapping at the local scale: concepts and challenges. In *Flood risk management in Europe*, 231-251. Springer.
- Michel-Kerjan, E. (2012) How resilient is your country? *Nature*, 491, 497-497.
- Mikkelsen, P. S., H. Madsen, K. Arnbjerg-Nielsen, D. Rosbjerg & P. Harremoës (2005) Selection of regional historical rainfall time series as input to urban drainage simulations at ungauged locations. *Atmospheric Research*, 77, 4-17.
- Milly, P., B. Julio, F. Malin, M. Robert, W. Zbigniew, P. Dennis & J. Ronald (2008) Stationarity is dead. *Ground Water News & Views*, 4, 6-8.
- Molteni, F., R. Buizza, T. N. Palmer & T. Petroliajgis (1996) The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122, 73-119.
- Montanari, A. (2007) What do we mean by 'uncertainty'? The need for a consistent wording about uncertainty assessment in hydrology. *Hydrological Processes*, 21, 841-845.
- Morgan, M. G. & M. Henrion (1990) Uncertainty: a Guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis Cambridge University Press. *New York, New York, USA*.
- NASA. 2014. NASA's Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) In *Jet Propulsion Laboratory*, ed. R. G. 45.
- Neal, J., C. Keef, P. Bates, K. Beven & D. Leedal (2013) Probabilistic flood risk mapping including spatial dependence. *Hydrological Processes*, 27, 1349-1363.

- Neal, J., I. Villanueva, N. Wright, T. Willis, T. Fewtrell & P. Bates (2012) How much physical complexity is needed to model flood inundation? *Hydrological Processes*, 26, 2264-2282.
- Néelz, S. & G. Pender. 2010. *Benchmarking of 2D hydraulic modelling packages*. Bristol: Environment Agency.
- O'Connell, P., K. Beven, J. Carney, R. Clements, J. Ewen, H. Fowler, G. Harris, J. Hollis, J. Morris & G. O'Donnell. 2005. *Review of impacts of rural land use and management on flood generation: Impact study report*. Defra.
- Obersteiner, M., C. Azar, P. Kauppi, K. Möllersten, J. Moreira, S. Nilsson, P. Read, K. Riahi, B. Schlamadinger & Y. Yamagata (2001) Managing climate risk. *Science*, 294, 786-787.
- Ooyama, K. V. (1990) A thermodynamic foundation for modeling the moist atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47, 2580-2593.
- Pappenberger, F., J. Bartholmes, J. Thielen, H. L. Cloke, R. Buizza & A. de Roo (2008) New dimensions in early flood warning across the globe using grand-ensemble weather predictions. *Geophysical Research Letters*, 35.
- Pappenberger, F., K. Beven, K. Frodsham, R. Romanowicz & P. Matgen (2007a) Grasping the unavoidable subjectivity in calibration of flood inundation models: A vulnerability weighted approach. *Journal of Hydrology*, 333, 275-287.
- Pappenberger, F., K. Beven, N. Hunter, P. Bates, B. Gouweleeuw, J. Thielen & A. d. Roo (2005) Cascading model uncertainty from medium range weather forecasts (10 days) through a rainfall-runoff model to flood inundation predictions within the European Flood Forecasting System (EFFS). *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 381-393.
- Pappenberger, F. & K. J. Beven (2006) Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis. *Water Resources Research*, 42.
- Pappenberger, F. & J. D. Brown (2013) HP today: on the pursuit of (im)perfection in flood forecasting. *Hydrological Processes*, 27, 162-163.
- Pappenberger, F., E. Dutra, F. Wetterhall & H. L. Cloke (2012) Deriving global flood hazard maps of fluvial floods through a physical model cascade. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 4143-4156.
- Pappenberger, F., K. Frodsham, K. Beven, R. Romanowicz & P. Matgen (2007b) Fuzzy set approach to calibrating distributed flood inundation models using remote sensing observations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11, 739-752.
- Pappenberger, F., P. Matgen, K. J. Beven, J.-B. Henry, L. Pfister & P. Fraipont (2006) Influence of uncertain boundary conditions and model structure on flood inundation predictions. *Advances in Water Resources*, 29, 1430-1449.
- Pappenberger, F., E. Stephens, J. Thielen, P. Salamon, D. Demeritt, S. J. van Andel, F. Wetterhall & L. Alfieri (2013) Visualizing probabilistic flood forecast information: expert preferences and perceptions of best practice in uncertainty communication. *Hydrological Processes*, 27, 132-146.
- Paté-Cornell, M. E. (1996) Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment. *Reliability Engineering & System Safety*, 54, 95-111.
- Pedrozo-Acuña, A. & J. Breña-Naranjo. 2014. Respuestas ante el incremento del riesgo por inundación en México. In *Revista H2O*.

- Pedrozo-Acuña, A., J. A. Breña-Naranjo & R. Domínguez-Mora (2014a) The hydrological setting of the 2013 floods in Mexico. *Weather*, 69, 295-302.
- Pedrozo-Acuña, A., P. I. Mejía-Estrada, J. P. Rodríguez-Rincón, R. Domínguez Mora & F. J. González-Villareal (2014b) Flood Risk From Extreme Events in Mexico.
- Pedrozo-Acuña, A., J. P. Rodríguez-Rincón, M. Arganis-Juárez, R. Domínguez-Mora & F. J. González Villareal (2013) Estimation of probabilistic flood inundation maps for an extreme event: Pánuco River, México. *Journal of Flood Risk Management*, n/a-n/a.
- Pedrozo Acuña, A. (2012) Notas de Clase: Evaluación de flujos de inundación, Riesgo e incertidumbre. *Programa de maestría y doctorado en Ingeniería. UNAM.*
- Penning-Rowsell, E., C. Johnson, S. Tunstall, S. Tapsell, J. Morris & J. Chatterton (2005) The benefits of flood and coastal risk management-a manual of assessment techniques, edited by:(FHRC). *FHR C., Defra, London.*
- Penning-Rowsell, E. & S. Tunstall (1996) Risks and resources: defining and managing the floodplain. *Floodplain processes*, 493-533.
- Plate, E. J. (2002) Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*, 267, 2-11.
- Priestnall, G., J. Jaafar & A. Duncan (2000) Extracting urban features from LiDAR digital surface models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, 65-78.
- Ramos, M. H., T. Mathevet, J. Thielen & F. Pappenberger (2010) Communicating uncertainty in hydro-meteorological forecasts: mission impossible? *Meteorological Applications*, 17, 223-235.
- Rauch, W., J. Bertrand-Krajewski, P. Krebs, O. Mark, W. Schilling, M. Schutze & P. Vanrolleghem (2002) Deterministic modelling of integrated urban drainage systems. *Water Science & Technology*, 45, 81-94.
- Rayner, S., D. Lach & H. Ingram (2005) Weather forecasts are for wimps: why water resource managers do not use climate forecasts. *Climatic Change*, 69, 197-227.
- Reeve, D. 2009. *Risk and reliability: Coastal and hydraulic engineering*. CRC Press.
- Reeve, D. E., J. Horrillo-Caraballo & A. Pedrozo-Acuña (2011) 16 Handling Uncertainty in Coastal Modelling.
- Reinert, J. M. & G. E. Apostolakis (2006) Including model uncertainty in risk-informed decision making. *Annals of nuclear energy*, 33, 354-369.
- Reinoso, E., A. Pedrozo-Acuña & M. Torres. 2015. Riesgo por Inundación. En: La Ciudad de México en el Siglo XXI. Principales Transformaciones y Tendencias. In *SECITI-GDF*. México: Coordinado por A. Aguilar.
- Reynard, N. S., C. Prudhomme & S. M. Crooks (2001) The flood characteristics of large UK rivers: potential effects of changing climate and land use. *Climatic Change*, 48, 343-359.
- Robinson, J. S. & M. Sivapalan (1997) An investigation into the physical causes of scaling and heterogeneity of regional flood frequency. *Water Resources Research*, 33, 1045-1059.

- Rodríguez-Rincón, J., A. Pedrozo-Acuña & J. Breña-Naranjo (2015) Propagation of hydro-meteorological uncertainty in a model cascade framework to inundation prediction. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 2981-2998.
- Rodríguez-Rincón, J. P., J. A. Breña-Naranjo & A. Pedrozo-Acuña (2014) Uncertainty Propagation In A Hydro-Meteorological Approach: From The Cloud To The Flood Map.
- Rodriguez-Rincon, J. P., A. Pedrozo-Acuña, R. Dominguez-Mora, D. Reeve & I. Cluckie (2012) Probabilistic estimation of flood maps: An ensemble approach. *Comprehensive Flood Risk Management: Research for Policy and Practice*, 183.
- Romanowicz, R. & K. Beven (1998) Dynamic real-time prediction of flood inundation probabilities. *Hydrological Sciences Journal*, 43, 181-196.
- (2003) Estimation of flood inundation probabilities as conditioned on event inundation maps. *Water Resources Research*, 39.
- Romanowicz, R., K. Beven & J. Tawn (1996) 10 Bayesian Calibration of Flood Inundation Models.
- Rossa, A., G. Haase, C. Keil, P. Alberoni, S. Ballard, J. Bech, U. Germann, M. Pfeifer & K. Salonen (2010) Propagation of uncertainty from observing systems into NWP: COST-731 Working Group 1. *Atmospheric Science Letters*, 11, 145-152.
- Rossa, A., K. Liechti, M. Zappa, M. Bruen, U. Germann, G. Haase, C. Keil & P. Krahe (2011) The COST 731 Action: A review on uncertainty propagation in advanced hydro-meteorological forecast systems. *Atmospheric Research*, 100, 150-167.
- Rougier, J., L. J. Hill, S. Sparks & R. S. J. Sparks. 2013. *Risk and uncertainty assessment for natural hazards*. Cambridge University Press.
- Rowe, W. D. (1994) Understanding uncertainty. *Risk analysis*, 14, 743-750.
- Samuels, P. (2000) An overview of flood estimation and flood prevention. *Kassel Reports of Hydraulic Engineering*, 9, G1-G11.
- Sayama, T., G. Ozawa, T. Kawakami, S. Nabesaka & K. Fukami (2012) Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin. *Hydrological Sciences Journal*, 57, 298-312.
- Sayers, P. & I. Meadowcroft (2005) RASP-A hierarchy of risk-based methods and their application.
- Schaake, J. C., T. M. Hamill, R. Buizza & M. Clark (2007) HEPEX: the hydrological ensemble prediction experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1541-1547.
- Schön, D. A. & M. Rein. 1995. *Frame reflection: Toward the resolution of intractable policy controversies*. Basic Books.
- Schumann, G., M. Cutler, A. Black, P. Matgen, L. Pfister, L. Hoffmann & F. Pappenberger (2008) Evaluating uncertain flood inundation predictions with uncertain remotely sensed water stages. *International Journal of River Basin Management*, 6, 187-199.
- SINA (2012) Atlas Digital del Agua México. *Sistema Nacional de Información del Agua*, <http://www.conagua.gob.mx/atlas/instructivo.html>.

- Skamarock, W., J. Klemp, J. Dudhia, D. Gill, D. Barker, M. Duda, X. Huang, W. Wang & J. Powers. 2008. A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical note-475+ STR, 113 pp.
- Sluijs, J. 1997. *Anchoring amid uncertainty: on the management of uncertainties in risk assessment of anthropogenic climate change= Houvast zoeken in onzekerheid: over het omgaan met onzekerheden in risicoanalyse van klimaatverandering door menselijk handelen.*
- Smith, L. C. (1997) Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review. *Hydrological Processes*, 11, 1427-1439.
- Spiegelhalter, D. J. & H. Riesch (2011) Don't know, can't know: embracing deeper uncertainties when analysing risks. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369, 4730-4750.
- Stelling, G. & S. Duinmeijer (2003) A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows. *International journal for numerical methods in fluids*, 43, 1329-1354.
- Stephens, E. & P. Bates (2015) Assessing the reliability of probabilistic flood inundation model predictions. *Hydrological Processes*, 29, 4264-4283.
- Stewart, M., P. Bates, M. Anderson, D. Price & T. Burt (1999) Modelling floods in hydrologically complex lowland river reaches. *Journal of Hydrology*, 223, 85-106.
- Stirling, A. (2003) Risk, uncertainty and precaution: some instrumental implications from the social sciences. *Negotiating change*, 33-76.
- Stirling, A. (2007) Risk, precaution and science: towards a more constructive policy debate. *EMBO Rep*, 8, 309-315.
- Straub, T. D., C. S. Melching & K. E. Kocher. 2000. Equations for estimating Clark unit-hydrograph parameters for small rural watersheds in Illinois. US Dept. of the Interior, US Geological Survey; Branch of Information Services [distributor].
- Tate, E. C. & D. R. Maidment. 1999. Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcView GIS. University of Texas at Austin.
- Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel & R. Cuenca. 2004. Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. In *20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction*, 11-15.
- Thielen, J., J. Bartholmes, M.-H. Ramos & A. d. Roo (2009) The European flood alert system—Part 1: concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 125-140.
- Thielen, J., J. Schaake, R. Hartman & R. Buizza (2008) Aims, challenges and progress of the Hydrological Ensemble Prediction Experiment (HEPEX) following the third HEPEX workshop held in Stresa 27 to 29 June 2007. *Atmospheric Science Letters*, 9, 29-35.
- Thompson, G., R. M. Rasmussen & K. Manning (2004) Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Monthly Weather Review*, 132, 519-542.

- Tyc, G., J. Tulip, D. Schulten, M. Krischke & M. Oxfort (2005) The RapidEye mission design. *Acta Astronautica*, 56, 213-219.
- USCS. 1972. *United States Soil Conservation Service, SCS national engineering handbook, section 4: hydrology*. The Service.
- USDA, S. (1985) National engineering handbook, supplement A, section 4. *US Department of Agriculture, Washington, DC*.
- Ushiyama, T., T. Sayama, Y. Tatebe, S. Fujioka & K. Fukami (2014) Numerical simulation of 2010 Pakistan flood in the Kabul River Basin by using lagged ensemble rainfall forecasting. *Journal of Hydrometeorology*, 15, 193-211.
- Van Asselt, M. A. & J. Rotmans (2002) Uncertainty in Integrated Assessment Modelling. *Climatic Change*, 54, 75-105.
- Van der Sluijs, J. P., A. C. Petersen, P. H. Janssen, J. S. Risbey & J. R. Ravetz (2008) Exploring the quality of evidence for complex and contested policy decisions. *Environmental research letters*, 3, 024008.
- Walker, W. E., P. Harremoës, J. Rotmans, J. P. van der Sluijs, M. B. van Asselt, P. Janssen & M. P. Kraayer von Krauss (2003) Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated assessment*, 4, 5-17.
- Walsh, C., S. Blenkinsop, H. Fowler, A. Burton, R. Dawson, V. Glenis, L. Manning & C. Kilsby (2015) Adaptation of water resource systems to an uncertain future.
- Wang, L. 2015. *Climate Change Impacts on River Floods: Uncertainty and Adaptation*. TU Delft, Delft University of Technology.
- Wang, W., C. Bruyere, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, H. Lin, J. Michalakes, S. Rizvi, X. Zhang & J. Beezley (2010) ARW version 3 modeling system user's guide. Mesoscale & Microscale Meteorology Division. *National Center for Atmospheric Research (July 2010)*, http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf.
- Webster, P. J., V. E. Toma & H. M. Kim (2011) Were the 2010 Pakistan floods predictable? *Geophysical Research Letters*, 38.
- Werner, M. (2001) Impact of grid size in GIS based flood extent mapping using a 1D flow model. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26, 517-522.
- Werner, M., S. Blazkova & J. Petr (2005) Spatially distributed observations in constraining inundation modelling uncertainties. *Hydrological Processes*, 19, 3081-3096.
- Wetterhall, F., F. Pappenberger, H. L. Cloke, J. Thielen-del Pozo, S. Balabanova, J. Daňhelka, A. Vogelbacher, P. Salamon, I. Carrasco & A. Cabrera-Tordera (2013) Forecasters priorities for improving probabilistic flood forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10, 2215-2242.
- Wilby, R. L. & I. Harris (2006) A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*, 42.
- Wynne, B. (1992) Uncertainty and environmental learning: reconceiving science and policy in the preventive paradigm. *Global environmental change*, 2, 111-127.

- Zappa, M., K. J. Beven, M. Bruen, A. S. Cofino, K. Kok, E. Martin, P. Nurmi, B. Orfila, E. Roulin & K. Schröter (2010) Propagation of uncertainty from observing systems and NWP into hydrological models: COST-731 Working Group 2. *Atmospheric Science Letters*, 11, 83-91.
- Zappa, M., F. Fundel & S. Jaun (2013) A 'Peak-Box' approach for supporting interpretation and verification of operational ensemble peak-flow forecasts. *Hydrological Processes*, 27, 117-131.
- Zappa, M., S. Jaun, U. Germann, A. Walser & F. Fundel (2011) Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains. *Atmospheric Research*, 100, 246-262.