

PROTOCOLO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

JUAN MANUEL SANTOS CALDERÓN
Presidente de la República de Colombia

LUIS GILBERTO MURILLO
Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

WILLER GUEVARA
Viceministro de Regulación y Normalización

OMAR FRANCO TORRES
Director General
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM

NELSON OMAR VARGAS MARTÍNEZ
Subdirector de Hidrología – IDEAM

PRODUCCIÓN EDITORIAL
Nelson Omar Vargas Martínez
Marinela Valencia Giraldo

AUTORES
NELSON OMAR VARGAS MARTÍNEZ
JUAN CARLOS LOAIZA QUINTERO
JUAN CAMILO ACOSTA BARRAGÁN
JUAN PABLO URREGO ZULUAGA
CRISTIAN PLAZAS ROMERO
MARINELA VALENCIA GIRALDO
OSCAR MARTINEZ SARMIENTO
FABIO BERNAL QUIROGA

DISEÑO PORTADA Y DIAGRAMACIÓN
DIEGO CASTAÑEDA PÁEZ

CÍTESE COMO

IDEAM, 2018. *PROTOCOLO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA*, 59 páginas.
Bogotá, D.C.

ISBN: 978-958-5489-09-7

Todos los derechos reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando la fuente.

Su reproducción total o parcial debe ser autorizada por el IDEAM.

Publicación aprobada por el IDEAM Julio 23 de 2018, Bogotá D.C., Colombia - Distribución Gratuita.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

OMAR FRANCO TORRES
Director General - IDEAM

ADRIANA PORTILLO TRUJILLO
Secretaria General – IDEAM

CONSEJO DIRECTIVO

LUIS GILBERTO MURILLO
Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

GERMAN CARDONA GUTIERREZ
Ministro de Transporte

LUIS FERNANDO MEJIA
Director, Departamento Nacional de Planeación-DNP

MAURICIO PERFFETI DEL CORRAL
Director, Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas-DANE

JUAN PABLO RUIZ SOTO
Delegado, Presidencia de la República

RAMÓN LEAL LEÁL
Director Ejecutivo, Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y de
Desarrollo Sostenible-ASOCARS

CESAR OCAMPO RODRIGUEZ
Directora General, Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e
Innovación - Colciencias

DIRECTIVAS

OMAR FRANCO TORRES
Director General - IDEAM

ADRIANA PORTILLO TRUJILLO
Secretaria General

DIANA MARCELA VARGAS GALVIS
Subdirectora de Estudios Ambientales

MARIA TERESA BECERRA RAMIREZ
Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental

NELSON OMAR VARGAS MARTÍNEZ
Subdirector de Hidrología

JOSÉ FRANKLYN RUIZ
Subdirector (E) de Meteorología

DIANA QUIMBAY VALENCIA
Jefe Oficina Cooperación Internacional

IVONNE MARITZA VARGAS PADILLA
Coordinadora Grupo de Comunicaciones

SANDRA MILENA SANJUAN ACERO
Coordinadora Grupo de Contabilidad

JANNETH ANDREA SABOGAL PORTILLA
Coordinadora Grupo de Presupuesto

CHRISTIAN EUSCÁTEGUI COLLAZOS
Jefe Oficina Pronósticos y Alertas

JUAN CARLOS ARTURO LOBO
Jefe Oficina Asesora de Planeación

LEONARDO CÁRDENAS CHITIVA
Jefe Oficina de Informática

GILBERTO ANTONIO RAMOS SUAREZ
Jefe Oficina Asesora Jurídica

MARÍA EUGENIA PATIÑO JURADO
Jefe Oficina Control Interno

MÓNICA YOLANDA ALAYÓN MADERO
Coordinadora Grupo de Tesorería

TERESITA DE JESÚS PABA LIZARAZO
Coordinadora Grupo de Control Disciplinario Interno

BIBIANA LISSETTE SANDOVAL BÁEZ
Coordinadora Grupo de Atención al Ciudadano

JOSÉ ALBERTO CHAPARRO MARTÍNEZ
Coordinación Grupo de Servicios Administrativos

NUBIA TRASLAVIÑA SAAVEDRA
Coordinadora Grupo de Gestión Documental y Centro de Documentación

COLABORADORES

NELSON OBREGÓN NEIRA
Universidad Javeriana

NELSY VERDUGO
DIEGO CASTAÑEDA
Subdirección de Hidrología

AGRADECIMIENTOS

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Universidad Nacional de Colombia

TABLA DE CONTENIDO

1	OBJETIVOS.....	2
1.1	OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
2	MODELACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO.....	3
3	ASPECTOS BÁSICOS DE LA MODELACIÓN	8
3.1	Modelo.....	8
3.2	Tipos de modelos	9
4	ETAPAS A SEGUIR EN LA MODELACIÓN DE LA DINÁMICA DEL AGUA.....	13
5	MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	20
6	MODELACIÓN HIDRÁULICA	25
7	BIBLIOGRAFÍA.....	33
	ANEXO 1 ESTUDIOS DE CASO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICO EMPLEADOS PARA DIFERENTES FINES	39
	ANEXO 2. ESTUDIOS DE CASO DE MODELACIÓN HIDRÁULICA EMPLEADOS PARA DIFERENTES FINES.	41
	ANEXO 3 FUENTES DE INFORMACIÓN	42
	ANEXO 4 CLASIFICACIÓN DE LA ESCALA ESPACIAL.....	49
	ANEXO 5 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS E INFORMACIÓN.....	50
	ANEXO 6 INCERTIDUMBRE.....	52
	ANEXO 7 PERFIL DE UN MODELADOR.....	54
	ANEXO 8 ERRORES MÁS COMUNES EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA.	55
	ANEXO 9 DOCUMENTO SÍNTESIS DE LA MODELACIÓN.....	57
	ANEXO 10 DOCUMENTOS DE CONSULTA.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de la gestión integral del recurso hídrico.4
Figura 2. *Componentes de un modelo*.8
Figura 3. Escala temporal característica de la modelación de la dinámica del agua para determinados fines.10
Figura 4. Clasificación de modelos hidrológicos según forma, aleatoriedad y variabilidad espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos.12
Figura 5. Etapas de la modelación de la dinámica del agua.13
Figura 6. Características del flujo en 1D, 2D y 3D.27

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fortalezas y debilidades entre los modelos estadísticos y modelos determinísticos.	22
Tabla 2. Aplicaciones de la modelación hidrológica.	24
Tabla 3. Aplicaciones de la modelación hidráulica de acuerdo con las características del flujo.	28
Tabla 4. Diferentes trabajos de hidráulica en diferentes áreas.	30
Tabla 5. Software de modelación hidráulica de esquema de volumen finito.....	31
Tabla 6. Software de modelación hidráulica de esquema de diferencias finitas.	31

INTRODUCCIÓN

Día tras día la modelación con fines de pronóstico alerta o predicción de eventos toma mayor importancia como herramienta para la toma de decisiones haciendo más exigente la preparación tanto de quienes se especializan en estos campos técnico- científicos, como de aquellos que contratan estos servicios.

Muchas veces la falta de conocimientos hace que estas herramientas no se les de la utilidad suficiente y por ello se subvaloran sus potencialidades o simplemente se repiten esfuerzos en la generación de insumos para la modelación o de escenarios de simulación con herramientas estadísticas y matemáticas que requieren esfuerzos de levantamientos de información costosos. Otras veces, es común aplicarse en exhaustivos levantamientos cuando podrían requerirse insumos con resoluciones espaciales o temporales más ligeras. Todas estas situaciones obligan a conocer realmente cuales son los campos de aplicación y dominio de soluciones posibles con artefactos de modelación.

En este sentido, es importante identificar las preguntas que pretenden resolverse con aproximaciones conceptuales soportadas en desarrollos matemáticos que leen la física de los sistemas hidrológicos para generar salidas de simulación con baja incertidumbre. Por ello, el IDEAM, en cumplimiento de sus competencias funcionales y misionales y haciendo uso de la facultad que le confiere la ley como autoridad hidrológica y meteorológica ha decidido elaborar esta guía sobre modelación hidrológica e hidráulica.

El protocolo se elaboró en el Centro Nacional de Modelación de la Subdirección de Hidrología por parte de expertos en temas de modelación que aportan su conocimiento para poner a disposición de técnicos y profesionales un paso a paso útil para quienes contratan o son contratados para desarrollar modelos. Se pretende difundir los conceptos, principios, reglas, métricas de validación y calibración y demás aspectos que son esenciales para el ejercicio de modelación y para la elaboración de términos de referencia o estudios previos.

En el documento se contextualiza el papel de la modelación en la gestión integrada del recurso hídrico, aspectos conceptuales básicos sobre los modelos y sus campos de aplicación y procedimientos a seguir para desarrollar la modelación partiendo desde las necesidades del cliente. Adicionalmente, se presentan apartes con énfasis tanto en la modelación hidrológica e hidráulica para ilustrar aplicaciones en la ingeniería, tipos de modelos, insumos e información requerida para los diferentes desarrollos y aplicaciones documentadas con los modelos comerciales más comunes. El protocolo además presenta una amplia bibliografía de consulta.

Se presentan además anexos ilustrativos sobre temas asociados a la modelación que pueden ser útiles a diferentes usuarios.

De esta manera, el IDEAM espera suplir necesidades de información de diferentes usuarios en relación con los beneficios que puedan obtenerse de la modelación hidrológica e hidráulica.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Proveer una guía orientativa sobre los aspectos conceptuales, aplicaciones y consideraciones técnicas que se deben tener en cuenta en el desarrollo de modelos hidrológicos e hidráulicos.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Difundir aspectos conceptuales básicos sobre la modelación hidrológica e hidráulica y sus aplicaciones
- Ilustrar las etapas que deben considerarse para la modelación de la dinámica del agua y las particularidades de cada etapa.
- Brindar a las autoridades ambientales y demás usuarios de la modelación hidrológica e hidráulica una base didáctica sobre aspectos de la modelación, potencialidades y resultados esperados que deben considerarse en sus modelos de contratación.

2. ALCANCE

Este documento se orienta a autoridades ambientales competentes, entes territoriales y a todas aquellas entidades que requieran o llevan a cabo procesos en los que se hace indispensable hacer una evaluación de la dinámica del recurso hídrico a partir de la modelación hidrológica e hidráulica.

En su contenido se hace énfasis en los procedimientos, técnicas, métodos, alcance y aplicaciones de la modelación tanto hidrológica como hidráulica. Adicionalmente, se incluye una amplia bibliografía de consulta para que el lector pueda profundizar en temas específicos relacionados con los aspectos teóricos y desarrollos de modelación.

2 MODELACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

El agua es un factor determinante en el desarrollo económico y social y al mismo tiempo, cumple la función básica de mantener la integridad del entorno natural. A pesar de ello, el agua es sólo uno de los recursos naturales vitales y resulta por ello imperativo que los asuntos relacionados con el agua no sean tratados de forma aislada (UN-Water 2008).

Algunos factores como los cambios demográficos y climáticos y los modelos de aprovechamiento de los recursos, incrementan igualmente la presión sobre los recursos hídricos. El enfoque tradicional de análisis fragmentado ya no resulta válido y se hace esencial un enfoque holístico para la gestión del agua. Éste es entonces el enfoque de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos – GIRH, aceptada internacionalmente como el camino hacia un desarrollo y gestión eficiente, equitativo y sostenible de unos recursos hídricos cada vez más limitados y una demanda cada vez más dinámica (UN-Water 2008). En el enfoque propuesto de la GIRH a nivel internacional se parte de los objetivos y se establecen unos condicionantes que se deben cumplir para una adecuada administración de este recurso.

La GIRH está definida como un proceso que se enmarca dentro de la gestión y el desarrollo coordinado del agua, el suelo y los otros recursos relacionados, con el fin de maximizar los resultados económicos y el bienestar social de forma equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (PNUMA-DHI, 2009). Los tres ejes en torno a los cuales trabaja la GIRH son: aprovechamiento, conservación y la gestión del riesgo asociado al agua (Obregón 2017), cada uno de los cuales se aborda bajo diferentes premisas y requiere de estudios con un nivel de afinamiento particular y, por tanto, de información específica.

La Política Nacional para la GIRH para su desarrollo establece ocho principios y seis objetivos específicos: oferta, demanda, calidad, riesgos, fortalecimiento institucional y gobernabilidad. Para alcanzar dichos objetivos específicos se han definido estrategias en cada uno de ellos y directrices o líneas de acción estratégicas que definen hacia dónde deben apuntar las acciones que desarrollen cada una de las instituciones y de los usuarios que intervienen en la gestión integral del recurso hídrico (MAVDT 2010). Para el caso específico de Colombia se sigue el esquema presentado en la

Figura 1, en la que se resalta que el eje de la Gestión Integral del Recurso Hídrico lo constituye el entendimiento de la dinámica del ciclo del agua.

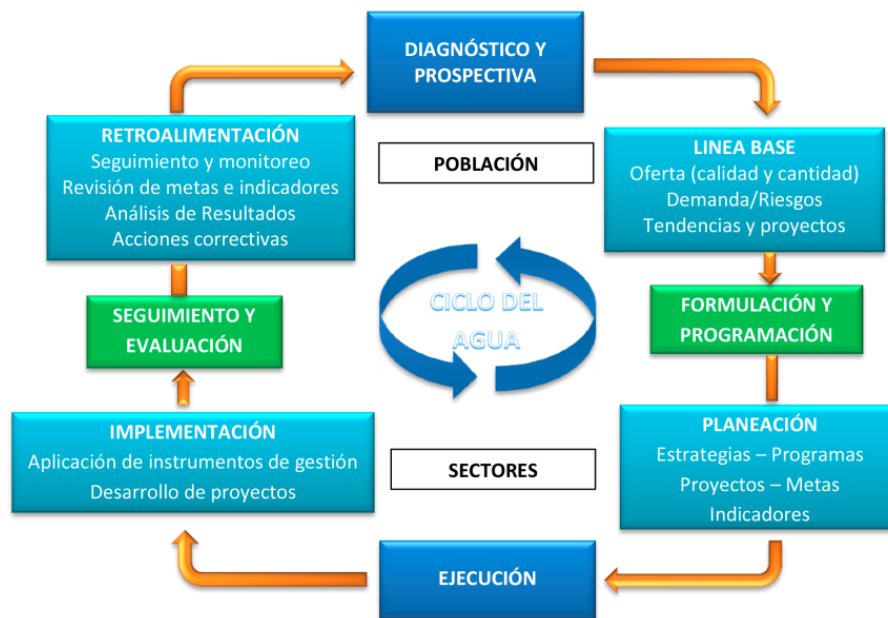


Figura 1. Ciclo de la gestión integral del recurso hídrico.

Fuente: (MAVDT 2010)

La gestión integral del recurso hídrico, dadas las complejas y cambiantes dinámicas hidroclimatológicas, es un tema que cobra cada vez más vigencia y reviste gran importancia a escala global, el cual requiere, entre otros aspectos, entender a cierto nivel los diferentes fenómenos en los que participa el agua en una cuenca. Por tanto urge avanzar en la generación, consolidación e

implementación de diferentes tipos de herramientas para una óptima gestión del agua. Una de las herramientas más importantes en este contexto la constituye la modelación de la dinámica del agua.

La modelación es empleada como un medio para evaluar las cuestiones más amplias de nuestra capacidad de analizar y planificar acciones para hacer frente a los problemas actuales y de largo alcance asociados al agua. Las capacidades técnicas de los modelos varían mucho entre los diferentes temas relacionados con el recurso hídrico, sin embargo, se ha encontrado que los modelos capaces de analizar muchos de los temas relevantes en esta área están actualmente disponibles y tienen un potencial significativo para aumentar la exactitud y la eficacia de la información que se genera para los administradores, tomadores de decisiones y científicos (Friedman 1984).

Si bien los modelos son simplificaciones de la realidad, su uso es cada vez más extendido, gracias a las bondades que ésta ofrece cuando se lleva a cabo de la manera apropiada y se hace una adecuada lectura de los resultados por parte de los tomadores de decisiones; es decir, es una herramienta potente cuando se realiza de manera rigurosa y cuando existe una adecuada comunicación de los resultados entre los modeladores y los administración en sus diferentes niveles.

La GIRH recurre a diferentes tipos de herramientas para el diseño e implementación de los planes, programas y proyectos que contribuyen al cumplimiento de sus objetivos. Una de las herramientas técnicas típicas empleadas es la modelación, que en el caso del recurso hídrico puede ser básicamente: hidrológica, hidrogeológica, hidráulica, sedimentológica y de calidad del agua. Comúnmente se hacen modelaciones de manera separada de cada uno de estos componentes; sin embargo, dependiendo de los requerimientos de cada estudio, algunos de ellos se pueden acoplar y emplear de manera integrada.

Existen una gran cantidad de casos en los que se requiere llevar a cabo la modelación de la dinámica del agua, la cual no sólo es requerida en el contexto de la Gestión Integral del Recurso Hídrico, si no en la gestión de los demás recursos naturales y sistemas sociales que dependen del agua. A continuación, se relacionan los principales casos en los que se recurre a esta herramienta:

- Reconstruir series de datos.
- Conocer la oferta hídrica de una cuenca o área aferente.
- Conocer el comportamiento de determinados componentes del sistema estudiado.

- Determinar alteración en las componentes del ciclo hidrológico ante cambios en los usos del suelo y/o las coberturas de la tierra.
 - Evaluar diferentes amenazas de origen hidroclimatológico (inundación, avalanchas, flujos torrenciales, crecientes súbitas, sequías, entre otros). Nivel de recurrencia e intensidad.
 - Determinar requerimientos hídricos en agricultura.
 - Predecir las condiciones futuras del área de estudio. Condiciones hidrológicas, hidrogeológicas, hidráulicas, de calidad del agua, entre otros.
 - Evaluar los impactos del cambio en la dinámica climática.
 - Estudiar la dinámica del agua subterránea.
 - Determinar la necesidad y/o el impacto de estructuras hidráulicas.
 - Estudiar la dinámica sedimentológica de una cuenca.
 - Evaluar la calidad del agua (física, química, biológicas).
 - Evaluar el impacto de una represa sobre la dinámica propia del agua en una cuenca.
 - Predecir las afluencias de caudales a los embalses.
- Entre otros.

3 ASPECTOS BÁSICOS DE LA MODELACIÓN

3.1 MODELO

Un modelo es una abstracción de la realidad, en la que se establecen relaciones para tratar de entender el comportamiento de un fenómeno. La representación de un sistema real a través de un modelo parte de ciertas inferencias y emplea información a diferentes escalas para entender el comportamiento del fenómeno de interés. El nivel de resolución de los datos y la información requerida, así como el grado de complejidad del modelo a emplear, depende básicamente de los objetivos del estudio (Fondo Adaptación 2015). Existen varias maneras de llevar a cabo la evaluación del recurso hídrico de una cuenca hidrográfica o de una determinada zona; la escogencia de una en particular está condicionada por las necesidades de cada estudio. Una representación simplificada de un modelo se presenta en la Figura 2.

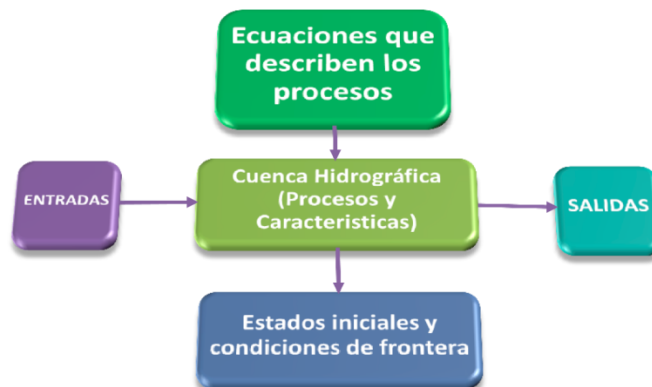


Figura 2. Componentes de un modelo.

Fuente: (Siingh 1995)

Los modelos son también una representación simplificada de un proceso o un sistema, bajo una forma diferente en relación con el sistema mismo. El comportamiento hidrológico, hidráulico, hidrogeológico, sedimentológico y de calidad puede ser muy complejo y un modelo suministra una vista simplificada, permitiendo reducir esta complejidad y resolver problemas específicos. El desacople y análisis de un sistema complejo por componentes y procesos facilitan el desarrollo de un modelo (Ministère du Développement durable 2014). Un buen modelo debe tener en cuenta las

relaciones entre los diferentes procesos involucrados en el fenómeno estudiado, además de caracterizar y asimilar la incertidumbre y de permitir hacer una adecuada interpretación de los resultados.

Existe generalmente un grado de complejidad óptima para diferentes problemas y puede considerarse como una buena práctica recurrir al modelo más simple posible, pero que suministre respuestas suficientemente precisas para satisfacer las necesidades (Ministère du Développement durable 2014). Aumentar el nivel de complejidad tiene implicaciones en cuanto al nivel de incertidumbre asociado al modelo y a los requerimientos de datos e información que no están necesariamente disponibles y, en ocasiones, requiere además una mayor capacidad de cálculo.

3.2 TIPOS DE MODELOS

Actualmente existen múltiples formas de clasificar los modelos bajo diferentes criterios; una clasificación general de ellos sería (Vélez 2008):

- Descriptivos
- Gráficos
- Experimental (modelos de juicio)
- Analógicos
- A escala o modelos físicos
- Matemáticos

Desde el punto de vista temporal, otra clasificación es:

- Modelos de eventos: la duración puede variar de horas a pocos días y hacen referencia básicamente a modelación hidrológica de aguaceros.
- Modelos continuos: concebidos para modelar periodos largos (meses, años). Son bastante útiles en un contexto de gestión del recurso hídrico.

En la Figura 3 se presentan algunos ejemplos de las resoluciones temporales características de la modelación de la dinámica del agua para determinados fines.



Figura 3. Escala temporal característica de la modelación de la dinámica del agua para determinados fines.

Fuente: Propia

Una manera de analizar la dinámica de una cuenca hidrográfica es a través del análisis de las series hidroclimatológicas; a continuación, se presenta una clasificación general de los principales métodos para tales fines:

- Métodos probabilistas: se caracterizan por describir el comportamiento de una variable a través de una función de densidad de probabilidad empírica o teórica, paramétrica o no paramétrica.
- Algoritmos genéticos: como su nombre lo indica, son programas, algoritmos concebidos bajo el esquema de funcionamiento de las redes neuronales, su principio es el aprendizaje.
- Filtros: concebidos en el área de la econometría y de la ingeniería electrónica, recurren a lo que ocurrió en el pasado para estimar valores presentes y futuros, empleados típicamente en asimilación de la incertidumbre.
- Autorregresivos y de Media Móvil: también llamados Modelos Box-Jenkins, que permiten caracterizar la autocorrelación.
- Funciones de transferencia: trabajan en el dominio de Laplace y relacionan la salida con la entrada.
- Lógica difusa: es la que se recurre a expresiones que no están en la categoría de verdad absoluta o falsedad total.

Existen modelos con diferentes grados de complejidad, algunos de ellos no son más que simplificaciones del ciclo hidrológico; a continuación, se presenta otra clasificación de éste tipo de modelos (Valencia 2008):

- Modelos empíricos: son los que recurren a fórmulas, lineales o no, para relacionar una o más variables independientes con la o las variables dependientes que se quieren simular.
- Modelos conceptuales: son los que, a través fórmulas y algoritmos, representan los procesos físicos que se producen en la naturaleza, desde el momento en que se inicia la precipitación sobre la cuenca hidrográfica de estudio.
- Modelos estocásticos: en los cuales está involucrada la componente aleatoria del fenómeno bajo un determinado enfoque.
- Modelos deterministas: hacen referencia a aquellos que tienen una única salida.
- Modelos físicamente basados: utilizan el principio de conservación de masas, momentum y ecuaciones de energía que representan en forma detallada los procesos hidrológicos.

Los modelos matemáticos pueden clasificarse en (Vélez 2008):

- Empíricos: emplean datos físicos reales.
- Conceptuales: emplean teorías sin coeficientes empíricos.
- Lineales: Utilizan relaciones matemáticas lineales y es aplicable el principio de superposición.
- No – lineales: contrarios a los lineales.
- Distribuidos: se emplea una caracterización espacial de las características físicas.
- Agregados: contrarios a los distribuidos.
- Estacionarios: cuando las relaciones entrada - salida no dependen del tiempo.
- Estacionarios transitorios: contrarios a los estacionarios.

Otra clasificación de los modelos, según el problema que pretenden resolver, sería:

Modelos de simulación, predicción, optimización (según la técnica empleada), descriptivos o de identificación.

Y según las ecuaciones matemáticas sería:

Modelos de ecuaciones diferenciales ordinarias, derivadas parciales, estadísticos, etc.

A continuación, se presenta en la

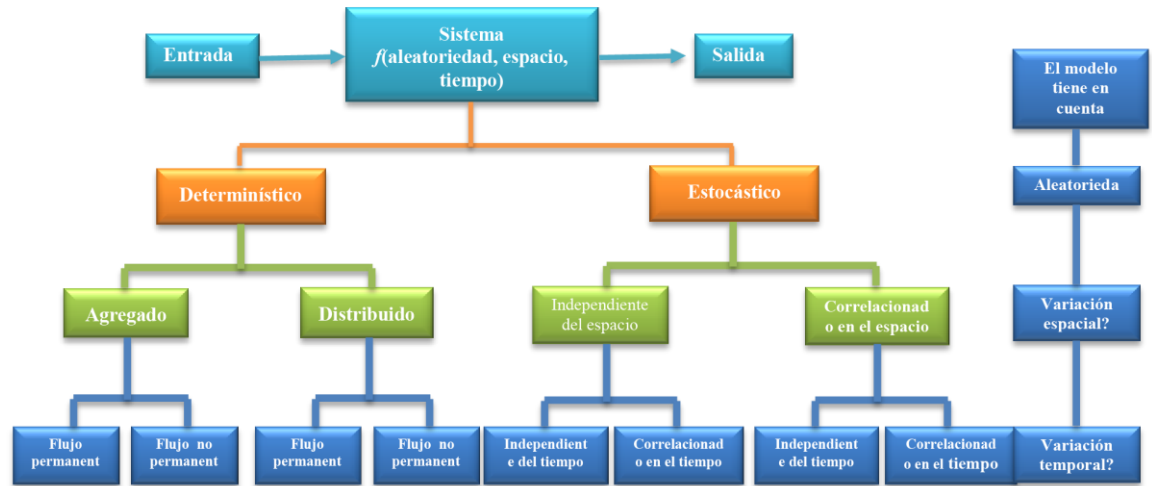


Figura 4 un resumen de las clasificaciones de los modelos hidrológicos.

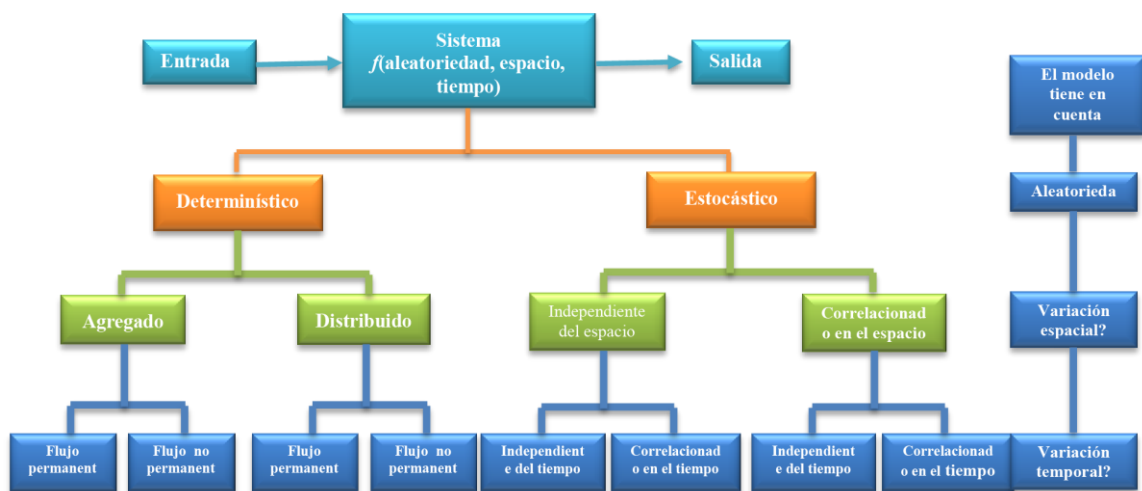


Figura 4. Clasificación de modelos hidrológicos según forma, aleatoriedad y variabilidad espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos.

Fuente: (Chow 1994)

En el anexo 1 y en el anexo 2 se presenta una relación de los modelos más empleados en hidrología e hidráulica respectivamente y, aunque no es exhaustiva, muestra un panorama general de aquellos más comúnmente utilizados para diferentes objetivos.

4 ETAPAS A SEGUIR EN LA MODELACIÓN DE LA DINÁMICA DEL AGUA

Se presentan en este capítulo las consideraciones a tener en cuenta en un contexto de modelación. En la Figura 5 se detallan las etapas de la modelación.



Figura 5. Etapas de la modelación de la dinámica del agua.

Fuente: Propia

Definición de los objetivos de la modelación. El primer paso para llevar a cabo una modelación es definir sus objetivos, su alcance y el nivel de detalle que se requiere, ya que es muy diferente por ejemplo, hacer modelación de crecientes súbitas con fines de pronóstico que modelar la oferta de agua o la respuesta ante escenarios de cambio climático; en los tres contextos, los requerimientos de información y el modelo a emplear son significativamente diferentes. Aquí se establecen unos objetivos razonables que deben tener presente las implicaciones de no contar en ocasiones con la suficiente información para resolver con un alto grado de certeza la pregunta formulada. En este punto es clave identificar el tipo de salidas que se requiere, gráficas, mapas, valores puntuales, valores distribuidos, agregados, a nivel de cuenca, de área aferente, entre otros.

Datos e información para la modelación. Aquí se parte de la identificación del tipo y cantidad de datos e información disponibles de la zona de estudio y de conocer el nivel de representatividad de los datos y la información (escalas y resoluciones); frecuentemente, de debe recurrir a estimaciones (el caso más frecuente es el de los parámetros), interpolaciones y/o regionalizaciones, cuando no se dispone de la información necesaria para llevar a cabo la modelación. Existen muchos trabajos que establecen valores de referencia, valores característicos de determinados parámetros empleados en la modelación de la dinámica del agua, y se recurre a ellos cuando no se cuenta con medidas de éstos.

Para el caso de los modelos estadísticos se requieren series de tiempo largas para poder inferir el comportamiento de la variable de interés, por ejemplo, precipitación o caudal. En el caso de los modelos que involucran la física del fenómeno (desde los más complejos hasta aquellos que hacen grandes simplificaciones) se requiere de dos tipos de información, espacial y temporal, y las especificidades de cada una de éstas depende del modelo a emplear.

En el anexo 3 se presenta una relación general de las entidades y sitios web donde se pueden encontrar los datos e información típicamente empleados en la modelación de la dinámica del agua.

Definición de escalas características. Escala hace referencia a la longitud o tiempo característico de un proceso, observación o modelo (Bloschl 1995). Así, la dimensión escalar hace referencia al rango de longitudes o tiempos característicos del proceso o medio analizado (Puricelli 2003). Un tema relevante en la modelación de los fenómenos geofísicos son las escalas características de los procesos de la dinámica del agua, los cuales se presentan de manera general

junto con una clasificación de la escala espacial aplicable de acuerdo con el tamaño de la cuenca en el anexo 4.

La generación de escurrimiento superficial es un fenómeno donde elementos tales como suelos, topografía y precipitación están caracterizados, cada uno de ellos, por su propia dimensión escalar (Wood 1988). Todos los procesos que se dan en el ciclo hidrológico se dan en una gama de escalas. Existen fenómenos observables de diferentes magnitudes que van desde, por ejemplo, un metro cuadrado o incluso en resoluciones inferiores (el flujo en suelos no saturados), hasta inundaciones en los sistemas fluviales de cientos de kilómetros cuadrados. En relación con el tiempo, puede haber crecidas repentinas de una duración de varios minutos o la observación del flujo en los acuíferos forjados durante cientos de años (Del río San José 2010).

En términos de la escala, los procesos, eventos y entidades se rigen por el principio de correspondencia espacio temporal, según el cual los eventos de pequeña extensión son frecuentes y rápidos mientras que los eventos de gran extensión son lentos y poco frecuentes (Del río San José 2010).

Análisis de la calidad de los datos y la información. Una vez recopilados los datos y la información, se hace un análisis de calidad; en esta etapa, se busca reducir en la medida de lo posible el error y la incertidumbre asociada a los datos y la información del modelo, lo cual contribuye al proceso de calibración y a la obtención de resultados con una mayor certidumbre. Los datos e información disponibles (es decir, aquellos que superan la etapa de análisis de cantidad y calidad) constituyen uno de los mayores condicionantes en la selección del modelo a emplear.

Es muy importante realizar esta etapa antes de ingresar los datos e información al modelo, ya que reduce las fuentes de error e incertidumbre y, por tanto, contribuye en gran medida a las etapas de calibración, validación y simulación.

Los datos deben someterse a un procesamiento mínimo que garantice una calidad óptima antes de su utilización. El mismo procedimiento debe seguirse para la información.

En el anexo 5 se presenta un listado general de los pasos mínimos requeridos en el análisis de los datos y la información.

Evaluación de incertidumbre. Abordar el tema de la incertidumbre es fundamental, ya que los resultados de las modelaciones se emplean en la toma de decisiones y por tanto éstos deben ir acompañados de su respectiva incertidumbre asociada; es igualmente importante documentar todo

el proceso, en especial el tratamiento de los datos e información (en términos de verificación, tratamiento, análisis de calidad y cantidad, todo tipo de procesamiento, entre otros), así como de las estimaciones, inferencias y los supuestos adoptados.

Es necesario tener presente que la calidad de los resultados depende de una gran cantidad de factores, entre ellos la cantidad y calidad de los datos e información, el modelo seleccionado, una adecuada calibración y la evaluación y asimilación de la incertidumbre.

Caracterizar, reportar e incorporar la incertidumbre es indispensable en toda la modelación ya que no sólo mejora la calidad de los resultados sino que permite además informar a los tomadores de decisión cuál es el nivel de certidumbre sobre los resultados, sobre los que basan sus decisiones.

En el anexo 6 se presenta de manera sucinta el tema de la incertidumbre en la modelación.

Construcción del modelo conceptual. En este punto es clave formular las preguntas adecuadas y se parte básicamente de los objetivos trazados y de los datos y la información disponible. En esta etapa se define cuál es el área de estudio (cuena, subcuena, área aferente, municipio, el sector de una población, cuerpo de agua, entre otros), las condiciones límite, las condiciones iniciales, los procesos del fenómeno estudiado sobre los cuales se debe hacer énfasis, los flujos de información, los datos e información requerida, cómo resolver el problema de la falta de datos e información, si es pertinente recurrir a estimaciones, entre otros aspectos. La construcción topológica del modelo es parte de esta etapa, en la cual se hace una representación esquemática de los componentes del sistema estudiado que incluye, entre otros, las entradas, las salidas y las condiciones de frontera.

Selección del modelo. Teniendo en cuenta que existe una variedad de procesos según el tipo de modelo, la selección depende de la escala espacial y temporal de la modelación. En cuanto a la escala temporal, entre más grande sea el paso de tiempo es más sencilla la descripción de los procesos hidrológicos. Al contrario, la modelación de los procesos a un paso de tiempo corto, necesita una descripción de los procesos más complejos (Gnouma 2006). La selección del modelo está condicionada principalmente a los objetivos del estudio y a la disponibilidad de la información. Otros criterios que inciden en la selección del modelo son: los recursos económicos, técnicos, computacionales y el tiempo disponible para llevar a cabo el estudio.

A la hora de seleccionar el modelo es importante (Vélez 2008):

- Conocer la estructura del modelo.
- Conocer las condiciones para las cuales fue creado.
- Datos de entrada requeridos.
- Parámetros requeridos.
- Rango de aplicabilidad.
- Incertidumbre.

Análisis de sensibilidad. Previo a la calibración del modelo, se hace un análisis de sensibilidad que consiste en identificar los parámetros más sensibles ante cambios pequeños en sus valores; con esto se logra ser más eficiente en la calibración. En esta etapa se busca encontrar los parámetros que tienen mayor peso o relevancia en la calibración del modelo.

Selección de los criterios de desempeño. Los criterios de desempeño no son más que relaciones que muestran la capacidad del modelo para representar adecuadamente la realidad; se emplean en un contexto de calibración, validación, optimización y evaluación de incertidumbre. Existe una gran gama de estas métricas, algunas ampliamente conocidas como el RMSE y el índice NASH; sin embargo, debe tenerse precaución al seleccionarlas ya que no se deben emplear los mismos indicadores de desempeño, por ejemplo, en inundaciones lentas que en crecientes súbitas, dadas las implicaciones que tienen pequeñas diferencias en las magnitudes en ambos contextos (Obregón 2017). Las evaluaciones gráficas también son ampliamente empleadas y comprenden, entre otras, inspección de los hidrogramas, curvas de duración de caudales y comparación de las series de datos observados – simulados.

Existen, incluso, métricas de desempeño para evaluar la incertidumbre en la que se privilegian aspectos como la fiabilidad y la precisión.

Calibración del modelo. En esta etapa se evalúa la capacidad del modelo para representar el o los fenómenos de interés; para esto, se emplean los datos históricos y la información previamente procesada. En esta tarea se recurre a los criterios anteriormente mencionados con el objeto de evaluar el desempeño del modelo comparando valores observados y simulados. Una opción adicional es emplear optimizadores, con los que se hace esta última tarea de manera automática.

Validación del modelo. El término validación no necesariamente denota el establecimiento de la verdad. Preferiblemente denota el establecimiento de legitimidad típicamente dada en términos de argumentos, métodos y convenciones (Merriam 1963). La validación permite corroborar el

desempeño del modelo en un contexto espacio – temporal diferente al de la calibración; ésta puede ser espacial (en un punto diferente de donde se calibró), temporal (empleando series con un periodo de tiempo diferente al calibrado) y espacio – temporal (en un punto y en un periodo diferente a los empleados en la calibración); en todos los casos anteriores, se corre el modelo ya calibrado.

Simulación. Una vez se comprueba que las etapas de calibración y validación han sido superadas satisfactoriamente, se procede a realizar la simulación que, como se mencionó en capítulos anteriores, se puede emplear para diferentes fines.

Presentación y análisis de los resultados. Las salidas del modelo típicamente constan de los valores arrojados por métricas de desempeño y sus salidas (que dependen del modelo empleado), los cuales pueden comprender, datos, estadísticos, gráficos, mapas, índices; éstos deben ser revisados preferiblemente por un experto. Es conveniente tener los resultados tabulados, graficados y acompañados de índices. El grado de pos procesamiento de los resultados arrojados por el modelo depende de los objetivos de la modelación, ya que debe haber coherencia entre los requerimientos (finalidad de la modelación) y las salidas del modelo que son en últimas empleadas para la toma de decisiones.

El análisis de resultados reviste gran importancia, ya que no sólo logra identificar su nivel de consistencia sino que también permite llegar a conclusiones acerca de la bondad del modelo (capacidad de representar los diferentes procesos estudiados) y contribuye al análisis de incertidumbre y a generar conclusiones respecto de los escenarios modelados.

Actualización del modelo. Cuando se emplea un modelo para determinados objetivos, por ejemplo, evaluación de amenaza por inundación, se requiere hacer la actualización del modelo cuando se tienen nuevos datos, información reciente y/o cuando ha cambiado la topología del modelo, asociado, por ejemplo, a la presencia de nuevas estructuras hidráulicas.

En el anexo 7 se presenta una descripción general del perfil de un modelador, formación, experiencia profesional, entre otros.

En el anexo 8 se presentan los errores típicos en la modelación hidrológica e hidráulica y algunas sugerencias para solucionarlos.

En el anexo 9 se propone la estructura del documento que sintetiza el proceso de modelación.

En el anexo 10 se presenta una relación de documentos en los que el lector podrá ahondar en temas clave de la modelación.

5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Definición.

La modelación hidrológica hace referencia a la representación de las componentes del ciclo hidrológico o de algunas de ellas, en este documento se hace referencia de manera expresa a relaciones matemáticas de tales componentes para la evaluación de la dinámica del agua superficial.

Dos de las ecuaciones básicas que describen la física del ciclo hidrológico son también pertinentes para describir los sistemas utilizados con el fin de medir sus propiedades en movimiento: las ecuaciones de continuidad de masa y la ecuación de continuidad de la energía (OMM, Guía de Practicas Hidrológicas 2008).

Esta ecuación suele servir como punto de partida para determinar el caudal en una corriente de agua o canal. Otro ejemplo de la ecuación de continuidad de la masa puede inferirse observando la evaporación del agua en un cuerpo de agua (OMM, Guía de Practicas Hidrológicas 2008). El tipo de componentes del ciclo hidrológico que involucra un modelo, depende en gran medida de su naturaleza.

Existen diferentes contextos en los cuales es imprescindible conocer en detalle el comportamiento de un cuerpo de agua bajo diferentes circunstancias, uno de ellos es cuando la dinámica de un cuerpo de agua puede representar una amenaza para poblaciones ribereñas, infraestructura, cultivos, entre otros. Las características que debe tener el modelo a emplear dependen mucho del fenómeno estudiado.

En cada uno de los escenarios en los que puede ser empleada la modelación hidrológica, es necesario tener muy claro el objetivo para el cual ésta es requerida, ya sea para construcción de infraestructura, generación de alertas tempranas, generación de distritos de riego, entre otras, pues existen diferencias significativas, en los requerimientos en relación a entradas y parámetros, en el software y en las salidas.

Aplicaciones en ingeniería. La modelación hidrológica puede ser utilizada en múltiples aplicaciones en ingeniería, a continuación, se mencionan y destacan algunas de ellas (OMM, Guía de Practicas Hidrológicas 2008):

- Abastecimiento de agua
- Riego

- Abastecimiento de agua industrial
- Gestión de aguas subterráneas
- Generación de energía
- Gestión de crecidas
- Navegación
- Recreación, estética y tradición
- Control de salinidad y de sedimentos
- Disminución de la contaminación
- Conservación de los peces, de la flora y fauna
- Otras consideraciones medio ambientales

Tipos de modelaciones hidrológicas

Existen diferentes tipos de modelos hidrológicos, los cuales han sido concebidos en diferentes contextos. La selección del tipo de modelo hidrológico a emplear en cada estudio está condicionada principalmente por la disponibilidad de datos e información para su implementación; de igual manera el nivel de instrumentación de la cuenca hidrográfica o área aferente estudiada, limita en gran medida su escogencia.

En términos generales y en relación con los modelos hidrológicos más comúnmente usados se tienen los modelos deterministas y los modelos estocásticos o también denominados probabilistas; dentro de los primeros se encuentran típicamente la ecuación de balance hídrico y el Hidrograma Unitario, que son denominados deterministas cuando dan un único resultado, por el contrario los métodos estocásticos principalmente, aunque no exclusivamente, se asocian a modelos estadísticos.

La gran gama de modelos hidrológicos abarcan desde ecuaciones sencillas, como el balance hídrico general, el método racional, pasando por modelos conceptuales, físicamente basados, hasta los modelos ensamblados que modelan más en detalle ciertos componentes del ciclo hidrológico, y otros que integran al ensamble la componente atmosférica.

Dentro de las diversas clasificaciones de modelos hidrológicos más frecuentemente utilizados están los modelos estadísticos empleados básicamente en el diseño de estructuras hidráulicas y en casos específicos de evaluación de la amenaza asociada al agua, en tanto que los modelos lluvia

escorrentía que normalmente involucran diferentes componentes del ciclo hidrológico a diferentes escalas y resoluciones tienen un campo de aplicación más amplio.

Modelos Lluvia Escorrentía. Este tipo de modelos son usados principalmente para representar el ciclo hidrológico, los cuales pueden ser agregados o distribuidos, y además pueden modelar bajo el régimen de flujo permanente o flujo no permanente. Estos han sido desarrollados para una gran variedad de propósitos desde el diseño de estructuras para ingeniería y sistemas de abastecimiento de agua hasta modelos modernos en tiempo real utilizados continuamente en esquemas de regulación fluvial, también son valiosos para estimar por ejemplo, los impactos potenciales de los cambios en el uso de la tierra o el clima.

Los resultados pueden variar desde las predicciones de caudales máximos o los volúmenes totales de inundación, a la especificación completa de la distribución del agua en el tiempo, ya sea para eventos de tormentas individuales en modelos de eventos o para secuencias continuas de flujos en modelos continuos o secuenciales.

Todos los modelos hidrológicos lluvia - Escorrentía incluyen información relevante de las fases del ciclo hidrológico y estos a su vez están compuestos por una o más técnicas para cada fase (Water Environment Federation 2014).

Modelos Estadísticos. Son modelos de gran utilidad, especialmente cuando se quiere tomar una decisión en cuanto a los diseños de infraestructura o cuando se requiere tomar de decisiones de planeación (P. Vijay P. Singh 2017). Su uso ha sido ampliamente extendido gracias a la facilidad de su aplicación y al corto tiempo de implementación.

Los modelos estadísticos se han utilizado para hacer predicciones sobre la frecuencia de ocurrencia de ciertos eventos extremos de interés en diferentes áreas. Por otro lado, también pueden ser usado para la investigación de la idoneidad de las reglas operativas propuestas para las descargas de agua de sistemas complejos de embalses interconectados mediante el uso de secuencias generadas como entradas al sistema de depósito (Xu 2002).

Fortalezas y debilidades. Tanto los modelos estadísticos como los modelos determinísticos, presentan ciertas fortalezas y debilidades según el criterio que se desee evaluar. Algunos de ellos son: paso de tiempo típico de ejecución, número de parámetros más usados, necesidad de alta resolución espacial, entre otros. En la siguiente tabla se evalúan algunos de estos criterios.

Tabla 1. Fortalezas y debilidades entre los modelos estadísticos y modelos determinísticos.

Criterio	Modelo Estadístico	Modelo Determinístico
Pasos de tiempo típicos de ejecución	Diario u horario dependiendo de la disponibilidad de información	Diario u horario dependiendo de la disponibilidad de información
Numero de parámetros típicos	de 1 a 5	de 4 a 20
Riesgo de sobre parametrización	Bajo	Alto
Necesidad de alta resolución espacial	Baja a moderada	Moderada a alta
Habilidad para implementar múltiples corridas para calibración automática	Típicamente no es requerido, los parámetros óptimos pueden ser calibrados por regresión de mínimos cuadrados, lo que no requiere múltiple corridas.	Dependiendo el modelo utilizado, puede requerirse realizarse una calibración automática para modelos simplificados, sin embargo para modelos completamente distribuidos pueden requerir de gran cantidad de tiempo computacional entre corrida y corrida.
Desempeño típico en regionalización	Moderado en pasos de tiempo anuales, y muy pobre en pasos de tiempo inferiores	Moderado en pasos de tiempo diario.

Fuente: (Vaze 2012)

A pesar de que en la tabla anterior sólo se nombran algunas fortalezas y debilidades, cada una de ellas puede tener una respuesta diferente dependiendo del software y los datos y la información empleada para un estudio determinado. Resulta clave conocer las características, debilidades y fortalezas del modelo a usar previa a la modelación para definir su potencial de uso.

Los modelos estadísticos están clasificados dentro de los modelos estocásticos, pero los modelos deterministas también pueden llegar a ser modelos estocásticos cuando se trabaja, por ejemplo, en modelación de conjunto.

Modelos comerciales más empleados.

En la actualidad existe una gran cantidad de software que ayuda a realizar modelación hidrológica continua y/o de eventos, así mismo es importante tener en cuenta que cada uno de ellos tiene una aplicación (para una gama de casos determinada), lo cual debe ser tenido en cuenta antes de su selección. A continuación, se relacionan algunos de los más usados dentro del proceso de modelación hidrológica.

Información básica requerida para Modelación Hidrológica.

Las características de los datos y la información requerida para modelación hidrológica se pueden discriminar de manera muy general, dependiendo del tipo de modelo, así:

Los modelos estadísticos requieren de series históricas de la variable de interés (por ejemplo, niveles o caudales).

Los modelos lluvia escorrentía requieren, dependiendo del software, información y datos espaciales y temporales, cuya resolución y escala la define cada tipo de modelo, así por ejemplo algunos modelos hidrológicos que tienen una gran cantidad de parámetros, requieren un mayor número de datos e información.

En el anexo 3 se relacionan los diferentes tipos de datos e información que puede requerir un modelo hidrológico y además menciona las principales fuentes donde éstos se pueden encontrar.

Tabla 2. Aplicaciones de la modelación hidrológica.

Nombre	Desarrollador	Tipo de Licencia	Algunas Aplicaciones Típicas
HEC HMS	Armada USA	Libre	Disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronóstico de inundaciones, impactos urbanísticos, diseño de preseas, reducción de impactos en rompimiento de presas, regulación de llanuras de inundación, hidrología en humedales (T.Brauer 2016)
SOBEK	DELTARES	Comercial	Pronóstico de inundaciones, optimización de sistemas de drenaje, sistemas de control de irrigación, desbordamiento de alcantarillado, morfología de ríos, intrusión salina, calidad superficial del agua. (Deltares 2016)
MIKE SHE	DHI	Comercial	Uso combinado de manejo de aguas superficiales y subterráneas, riego y sequía, Manejo y restauración de humedales, caudal ambiental en ríos, gestión de llanuras aluviales, inundación por aguas subterráneas, uso del suelo e impactos de cambio climático en aguas subterráneas y superficiales, manejo y destino de nutrientes, gestión integrada de agua en minas. (DHI 2016)
SWMM	US EPA	Libre	Control de inundaciones, calidad de agua, Llanuras de inundación, control de escorrentía utilizando practicas LID, desbordamiento de alcantarillado sanitario (Rossman 2015)
MODFLOW	Barrow Paul	Libre	Sistemas integrados de Aguas subterráneas y aguas superficiales, transporte de solutos, intrusión salina, compactación de acuíferos, hundimiento de tierra, estimación de parámetro y gestión de aguas subterráneas (Hughes 20147).
HBV	Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología	Depende el caso puede ser libre o comercial	Predicción hidrológica, la simulación de la descarga, los cómputos de crecidas para proyectos, y estudios sobre cambio climático y calidad de agua. ((SMHI) 1992)
WEAP	Stockholm Environment Institute's U.S. Center.	Depende el caso puede ser libre o comercial	Cambio climático, estimación de demanda y oferta hídrica, calidad de agua, pérdida de glaciares, generación de energía, sequías, (David Purkey 2015)
TETIS	U. Valencia	Libre	Regulación de llanuras de inundación y erosión (Universidad de Valencia 2013).

Fuente: Elaboración propia

6 MODELACIÓN HIDRÁULICA

Definición. En términos generales, la modelación hidráulica consiste en un procedimiento técnico que busca reproducir un fenómeno natural (mundo real) que, para el caso de interés, se enfoca en determinar el movimiento o dinámica del agua, utilizando modelos (simplificación) físicos y/o matemáticos. El presente documento se refiere, particularmente, a los modelos matemáticos.

Diferenciación entre modelación hidrológica e hidráulica. Para enmarcar el contexto de la modelación de interés, se acostumbra hablar de modelación hidrológica e hidráulica (hidrodinámica), para lo cual, es importante distinguir para cada una de ellas su objetivo y alcance; para el caso de la modelación hidrológica, se tiene como objetivo principal estimar la cantidad (volumen) de agua que puede ingresar al sistema que se está estudiando, mientras que la modelación hidráulica busca determinar o representar cómo es el movimiento de la misma dentro del sistema; luego, toma importancia en esta segunda, tener control sobre las variables relevantes como lo son el nivel (altura o profundidad de agua), velocidad (o caudal) y, para algunas aplicaciones específicas, temperatura del agua, concentración de sustancias especiales y fuerzas hidrostáticas o hidrodinámicas. La modelación hidráulica (en términos hidrodinámicos) tiene como característica principal, que permite determinar estas variables en diversos puntos de interés de forma espacial y temporal, luego, por ejemplo, a lo largo de un río, es posible conocer las variaciones de nivel a medida que se transita una onda o un evento de interés, desde su entrada hasta su salida en el sistema.

Es relevante mencionar que existen herramientas que permiten integrar o acoplar modelaciones hidrológicas e hidráulicas de forma simultánea, o en esquemas tipo serie o paralelo.

Aplicaciones en ingeniería. La modelación hidrodinámica puede ser utilizada en múltiples aplicaciones en ingeniería. A continuación, se mencionan y destacan algunas de ellas:

- Determinación de la demanda y distribución de agua (abastecimiento y riego).
- Diseño de estructuras hidráulicas (protecciones, regulación, drenaje rural y urbano).
- Inundaciones (crecientes súbitas y lentas, estimación de impactos por fenómenos de inundación, mapas de amenaza, obras de protección y/o mitigación, planes de ordenamiento, pronóstico y prevención).

- Manejo, planeación y mantenimiento de cuencas (evaluación de infraestructura, escenarios futuros, cambio climático).
- Operación (regulación de caudales, tránsito de ondas a las salidas de embalses o reservorios).
- Estudios de navegabilidad (análisis de niveles mínimos).
- Calidad de agua (transporte de sedimentos, salinidad, procesos de advección - difusión de contaminantes, cambios en la temperatura, eutrofización).
- Geomorfología y dinámica fluvial (procesos de erosión, sedimentación, socavación).
- Verificación para el análisis y consistencia de datos hidrométricos y de calidad de agua.

Tipos de modelaciones hidráulicas. Ya que la modelación hidráulica busca realizar una simplificación de un fenómeno natural, se acostumbra tipificar su desarrollo en términos de la particularidad del flujo, para lo cual, se utilizan como referencia las dimensiones o direcciones características que describen el movimiento del agua en el sistema de interés.

Para dar una claridad en cuanto al significado e implicaciones a tener en cuenta en cada una de las características del flujo, se presenta la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Donde, utilizando como ejemplo un canal rectangular, es posible identificar las diferencias fundamentales que se pueden presentar en situaciones con características de flujo uni- o multidimensionales. En el caso de un canal continuo, sin ninguna estructura construida en su interior, es posible observar que el flujo puede ser de tipo unidimensional, ya que todas las líneas de corriente en el área de descarga son paralelas a la línea central de la corriente y, por ende, la corriente fluye principalmente en una dirección; las velocidades del flujo que se presentan transversalmente a esta dirección del flujo principal son significativamente más pequeñas, por lo que se acostumbran a descartar o a no tener en cuenta.

Si en el mismo canal se incluyen algunos elementos o estructuras como tabiques o pantallas que no permiten el desbordamiento o flujo por encima de ellos, se presentaría una situación donde se observarían claramente efectos por el flujo transversal como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** lo cual haría necesaria la realización de un análisis bidimensional. Las líneas de flujo tendrían una curvatura horizontal. En este caso, los componentes de flujo vertical pueden ser despreciados.

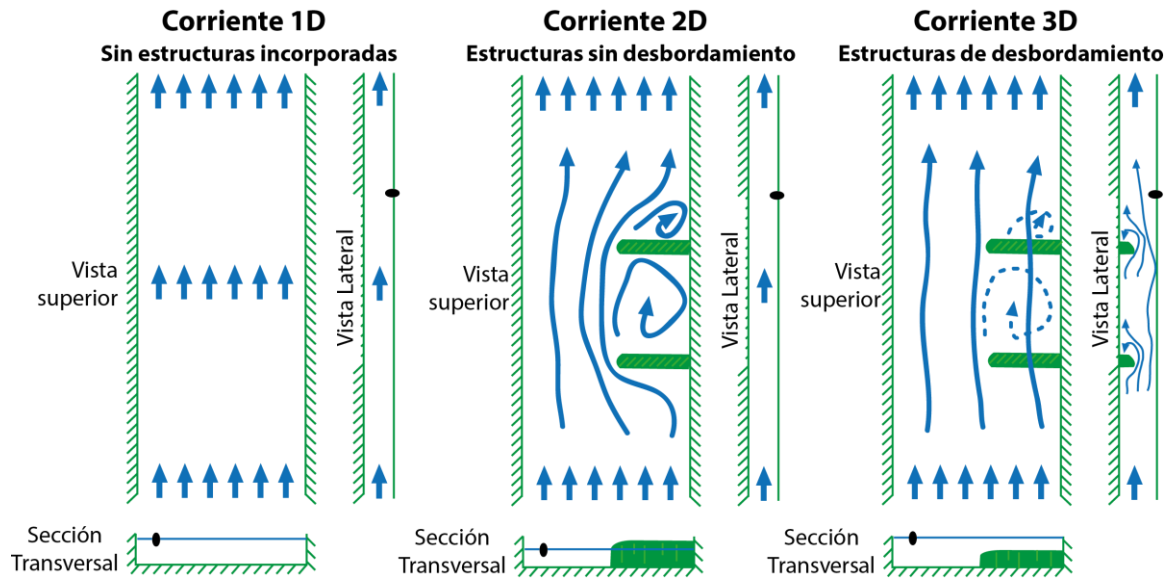


Figura 6. Características del flujo en 1D, 2D y 3D.

Fuente:

Si, adicionalmente, se produce un desbordamiento adicional sobre los elementos o estructuras (tabiques u obstáculos bajos), el flujo sería completamente irregular (presentando líneas de corriente curvas, donde se combina el flujo horizontal y vertical), lo que requeriría de un análisis de tipo tridimensional.

En el análisis de flujos en la naturaleza, es importante tener en cuenta que los fenómenos de flujo multidimensional previamente descritos demuestran a menudo aspectos locales y que, dependiendo del objetivo requerido para la modelación (por ejemplo, si es sólo requerido determinar el nivel de agua) y basados en criterios de observación, estos aspectos locales pierden importancia y no requieren ser analizados. Sin embargo, su influencia sobre la corriente principal, en términos de pérdida de energía, debe tenerse en cuenta.

El flujo de agua en la naturaleza, en una observación detallada, es de tipo tridimensional y transitoria; sin embargo, en una observación a gran escala es evidente que, por lo general, exista un flujo o corriente principal que cuenta con una dirección claramente definida. Por lo tanto, puede ser descrito en algunos casos utilizando enfoques de análisis de una o dos dimensiones. En la siguiente tabla se caracterizan algunas aplicaciones que pueden ser desarrolladas en los diversos enfoques de característica principal del flujo; sin embargo, es relevante mencionar que cada caso de estudio debe evaluarse intrínsecamente para acertar de la mejor manera con la aproximación de las condiciones de flujo existente.

Tabla 3. Aplicaciones de la modelación hidráulica de acuerdo con las características del flujo.

Característica del flujo	Aplicación en ingeniería
1D	<p>Pronóstico (tránsito de niveles y cotas de inundación), en tiempo real.</p> <p>Demanda y distribución de agua (abastecimiento, Riego).</p> <p>Operación y regulación (regulación de caudales, tránsito de ondas en salidas de embalses).</p> <p>Calidad de agua (transporte de sedimentos, salinidad, procesos de advección-difusión de contaminantes, eutrofización).</p> <p>Manejo, planeación y mantenimiento de cuencas (evaluación de infraestructura, escenarios futuros, cambio climático).</p> <p>Diseño de estructuras hidráulicas y protecciones de inundación.</p> <p>Estudios de navegabilidad.</p>
2D	<p>Mapas de Amenaza por inundación.</p> <p>Reconstrucción de inundaciones anteriores.</p> <p>Geomorfología y dinámica fluvial (erosión - sedimentación).</p> <p>Flujo y calidad de agua en lagos, ciénagas y casos especiales de estuarios.</p>
3D	<p>Flujo y calidad de agua Estuarios, y algunos casos especiales en lagos.</p> <p>Diseño de estructuras hidráulicas especiales como bifurcaciones o derivación. en obras de regulación de caudales.</p> <p>Geomorfología y dinámica fluvial (erosión - sedimentación).</p>

Fuente: Elaboración propia

Evidentemente, la implementación de un modelo hidrodinámico es cada vez más compleja a medida que se incrementa el número de dimensiones características del flujo a tener en cuenta, lo cual impacta significativamente el requerimiento de cantidad de información, recursos computacionales y, por ende, el incremento en los tiempos de ejecución o computo necesarios para su buen desarrollo, lo que indica que modelaciones de sistemas complejos en una dimensión pueden tardar del orden de minutos en su ejecución, mientras que para el caso de modelaciones bidimensionales pueden tardar del orden de horas o días y, para el caso tridimensional, días o semanas.

Existen también esquemas de modelación que buscan ser más eficientes (en términos matemáticos y por ende, computacionalmente) mediante la implementación de modelos híbridos (1D/2D) que permiten utilizar las ventajas o beneficios de cada uno de ellos, donde se adelanta la modelación de los cauces en un esquema 1D y el tránsito en zonas o áreas inundables en un esquema bidimensional, generando un enlace o link entre las dos modelaciones; estas metodologías

son ampliamente utilizadas en la determinación de la amenaza por inundación y el análisis simplificado de algunos lagos y estuarios.

Adicionalmente, es posible incluir parámetros a las ecuaciones que permiten evaluar otros aspectos como son: transporte de sedimentos, erosión-sedimentación (geomorfología), calidad de agua, entre otros.

En términos generales, los modelos matemáticos, en el área de la hidráulica, buscan desarrollar soluciones eficientes a las ecuaciones de Saint Venant, las cuales, describen el comportamiento del flujo basados en términos de principios de continuidad (balance de masa) e impulso (balance de energía, donde se tiene en cuenta la segunda ley de Newton), todo lo anterior, teniendo en cuenta algunas suposiciones y simplificaciones que permiten su aplicación en diversas áreas de la ingeniería, para encontrar más detalle sobre este aspecto, se incluye en la sección de bibliografía algunas referencias técnicas.

Tabla 4. Diferentes trabajos de hidráulica en diferentes áreas.

Autor	Nombre	Año	Editorial/Referencia	Tópico
G. A. Schultz	RIVER FLOW MODELLING AND FORECASTING	1986	D. REIDEL PUBLISHING COMPANY	Modelación hidráulica aplicada
R.H. van Waveren, S. Groot, H. Scholten, F.C. van Geer, J.H.M. Wösten	Good Modelling Practice – Handbook	1999	GMP PROJECT	Modelación hidráulica aplicada
Nicolas G. Adrien	Computational Hydraulics and Hydrology - An Illustrated Dictionary	2003	CRC Press	Modelación hidráulica
Paul D. Bates, Stuart N. Lane, Robert I. Ferguson	Computational Fluid Dynamics - Applications in Environmental Hydraulics	2005	Wiley	Modelación hidráulica aplicada
Pavel Novak, Vincent Guinot, Alan Jeffrey, Dominic E. Reeve	Hydraulic Modelling - An Introduction Principles, Methods and Applications	2010	Spon Press	Matemática de Modelación hidráulica General
Ioana Popescu	Computational Hydraulics & Numerical Methods and Modelling	2014	IWA Publishing	Matemática de Modelación hidráulica
Professor Dr. Cornelis B. Vreugdenhil	Computational Hydraulics - An Introduction	1989	Springer-Verlag Berlin Heidelberg	Matemática de Modelación hidráulica
UK Environment Agency	Benchmarking 2D hydraulic models	2013	Report - SC120002	Comparacion modelos hidraulicos 2D
EWRI / ASCE	Hydraulic Modeling - Concepts and Practice	2000	ASCE manuals and reports on engineering practice	Modelación hidráulica
Xavier Litrico, Vincent Fromion	Modeling and Control of Hydrosystems	2009	Springer	Matemática de Modelación hidráulica

Fuente: Elaboración propia

Modelos comerciales más empleados. Existe una gran variedad de modelos hidráulicos empleados, muchos de ellos desarrollados desde diversos esquemas, desarrollos y simplificaciones matemáticas, siendo los más comúnmente utilizados de tipo de volumen finito y diferencias finitas. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, presentan algunos de los software utilizados en cada uno de estos esquemas, en modelación hidráulica.

Tabla 5. Software de modelación hidráulica de esquema de volumen finito.

Nombre	Física	Desarrollador	Estado
TELEMAC 2D	SWE	EDF	Comercial
MIKE 21 FM	SWE	DHI	Comercial
MIKE FLOOD	SWE	DHI	Comercial
Infoworks - RS	SWE	Software Wal'ford	Comercial
Infoworks - CS	SWE	Software Wal'ford	Comercial
HEMAT	SWE	Iran. Wat. Res. Center y Cardiff	Investigación
BreZo	SWE	Universidad de California	Investigación
TRENT	SWE	Universidad de Nottingham	Investigación

Fuente: (Néelz 2009)

Tabla 6. Software de modelación hidráulica de esquema de diferencias finitas.

Nombre	Física	Desarrollador	Estado
TUFLOW	SWE	BMT - WBM	Comercial
DIVAST	SWE	Universidad de Cardiff	Investigación
DIVAST - TVD	SWE	Universidad de Cardiff	Investigación
ISIS 2D	SWE	Halcrow	Comercial
MIKE 21	SWE	DHI	Comercial
MIKE FLOOD	SWE	DHI	Comercial
SIPSON/UIM	SWE	Universidad de Exeter	Investigación
SOBEK	SWE	DELTARES	Comercial
JFLOW	Onda Difusiva	JBA	Interno
HEC - RAS	SWE	US Army Corps of Engineers	Comercial

Fuente: (Néelz 2009)

Información básica requerida para Modelación Hidráulica.

Para llevar a cabo una modelación Hidráulica o hidrodinámica se requiere de la siguiente información:

Secciones transversales completas (batimetría). Esto es que incluya no sólo la parte húmeda del río, si no la topografía de la parte seca, mínimo hasta los taludes u “hombros” y unos 50 m a ambos lados de cada sección. Si las distancias a modelar son más de unos 50 kms se requeriría levantar secciones cada 2 o 3 kms de distanciamiento entre ellas. Si lo que se pretende modelar son unos pocos kilómetros, el distanciamiento entre secciones transversales levantadas en campo serían de 200 o 250 m.

Se requiere de información histórica de series de niveles y caudales. Se debe disponer de datos de niveles y caudales tanto en la entrada, como en la salida del trayecto a modelar que sirvan de frontera para la modelación. Si el trayecto a modelar es muy largo o hay afluentes aportantes al sistema se requeriría de otras estaciones intermedias. Es aconsejable que todas estas estaciones se encuentren geo-referenciadas sobre un mismo nivel de referencia planimétrico y altimétrico, esto es, que la cota cero de las miras se encuentre referenciadas a la red Geodésica del IGAC (Magna-Sirgas)

Contar con la cartografía más detallada posible en el trayecto que se está modelando. En el caso de zonas de inundación, donde se requiere de un modelo 2D, se necesita una cartografía que cuente con curvas de nivel por debajo a 1 m, cartografía que es originada con imágenes de LIDAR de alta resolución.

Determinar en campo los umbrales o niveles de alerta (Amarilla, Naranja, Roja) para cada uno de los puntos de interés o las poblaciones ribereñas.

7 BIBLIOGRAFÍA

- (SMHI), Meteorological and Hydrological Institute. *he HBV Model: Its Structure and Applications*. Norrköping, Julio 1992.
- Aldana Valverde, Angel Luis. "El problema de las inundaciones." *Jornadas Prohimet* . Brasil: Prohimet, 2006. Peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo.
- Ancil, F., Rousselle, J. y Lauzon, N. *Hydrologie: cheminements de l'eau* . Presses inter Polytechnique, 2005.
- Arbelaez Salazar, Julián Dario, and Mario Diaz Granados. *Evaluación de herramientas informáticas para análisis de amenaza por inundaciones*. Bogotá: Universidad de los Andes, 2011.
- Banco de la República. "Banco de la República." *Banco de la República Web Site*. Julio 5, 2013. http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/dtser_189.pdf.
- Bendat, J. S., and A. G. Piersol. *Random data analysis and measurements procedures*. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- Beven, K. *Rainfall-Runoff modelling. The Primer. Second Edition*. John Wiley & Sons. , 2012.
- Beven, K., Leedal, D., McCarthy, S., Lamb, R., Hunter, N., Keef, C., Bates, P., Neal, J. y Wicks, J. *Framework for Assessing Uncertainty in Fluvial Flood Risk Mapping. FRMRC Research Report SWP1.7*. 2011.
- Bloschl, G., & Sivapalan, M. "Scale issues in hydrological modelling a review." *Hydrological processes*., 1995: 251 – 290.
- Bolshakov, Vitaly. "Regression - based Daugava River Flood Forecasting and Monitoring." *Information Technology and Management Science*, 2013: 137-142.
- Brockenbrough, Roger L. "Highway Engineering Handbook: Building and Rehabilitating the Infrastructure." In *CULVERTS, DRAINAGE, AND REPLACEMENTS FOR BRIDGES*, by Roger L. Brockenbrough, Capitulo 5. McGraw-Hill Professional, 2009 2003 1996, 2009.
- Chow, V. *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill, 1994.
- Comision de Hidrologia . "Guia de Practicas Hidrolocias ." In *Modelizacion de procesos Hidrologicos*, by Comision de Hidrologia, 1-58. 2009.
- Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique, Cardique, Plan de Acción Trienal. . "Por una cultura de desarrollo sostenible." Cartagena, 2004-2006.
- David Purkey, Ph.D., Director, SEI-US Water Program. *Water Evaluation And Planning System*. Suecia , Somerville, Agosto 2015.
- Del río San José, Jorge. "Tratamiento de los datos espaciales en hidrología." 2010.
- Deltares. *Hydrodynamics, Rainfall Runoff and Real Time Control*. Rotterdam, Agosto 2016.
- DHI. *MIKE SHE*. Horsholm, Febrero 2016.
- Diaz Granados, Mario. "Memorias del curso Hidráulica de Rios." Bogotá : Universidad de los Andes, 2009.

- Domínguez C., Efraín A. *Modelación Matemática. Una introducción al método*. Notas de clase, Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2007.
- Efraín Domínguez-Calle, Sergui Lozano Baez. "Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia." *Ciencias de la Tierra*, 2014: 321-332.
- EPA. "Guidance on Systematic Planning Using the Data Quality Objectives Process." 2004.
- Estrela, T. *Metodología y Recomendaciones para la Evaluación de Recursos Hídricos*. Madrid: Centro de Estudios Hidrográficos.- Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Gabinete de Formación y Documentación., 1992.
- FAO. "Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos." 2006.
- Flood Site. "Flood inundation modelling. Model choice and proper application." *Flood Site*. Febrero 01, 2009. www.floodsite.net (accessed Agosto 24, 2009).
- Fondo Adaptación . «Modelación de la amenaza de inundación en la Mojana.» Bogotá D.C., 2015.
- Friedman, R., Ansell, C. and Diamond. S. "Use of models for water resources management, planning, and policy. ." *Water Resources Research*, July 1984: 793-802.
- Galina Merkuryeva, Yuri Merkuryev, Boris Sokolov, Semyon Potryasaev. "Advanced River Flood Monitoring, modelling and forecasting." *Journal of Computational Science* , 2015: 77-85.
- Garzón, Heydt G. "La importancia de la escala y los elementos representables en la cartografía geomorfológica fluvial." In *Mapas de Peligrosidad de Avenidas e Inundaciones*, by Instituto Geológico y Minero de España, 159-168. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2006.
- Giardine, B., Riemer, C., Hardison, R. C., Burhans, R., Elnitski, L., Shah, P., & Nekrutenko, A. " Galaxy: a platform for interactive large-scale genome analysis." *Genome research* 15 , no. 10 (2005): 1451-1455.
- Giraldo, L. "Hidrología Forestal - Influencias de los bosques. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ciencias Forestales." Medellín, 2002.
- Gnouma, R. "Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron." 2006.
- González Blandón, Jackelline. *Desarrollo y aplicación de un modelo hidrológico de niveles en el río magdalena. Tramo girardot –puerto berrio*. Bogotá: Tesis Universidad de los Andes, 2005.
- Horrit, M.S., and P.D. Bates. "Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation." *Journal of Hydrology*, 2002: 87-99.
- Hughes, J.D., Langevin, C.D., and Banta. *Documentation for the MODFLOW 6 framework: U.S. Geological Survey Techniques and Methods*. 08 11, 20147.
- Hydrologic Engineering Center. *Hec-GeoRAS User's Manual*. New York: US Army Corps of Engineers, 2002.
- IDEAM. *ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL FENÓMENO "LA NIÑA" 2010-2011 EN LA HIDROCLIMATOLOGÍA DEL PAÍS*. Bogotá: IDEAM, 2011.

- . *Sistemas de Información, Componente Hidrológico, Redes, Mediciones, Observaciones y Procesos Básicos*. Subdirección de Hidrología. Bogotá, D.C., Colombia., 1999.
- IDEAM-UNIVERSIDAD NACIONAL. *Zonificación de amenazas por inundación escala 1:2000 y 1:5000 en áreas urbanas para 10 municipios del territorio colombiano*. Contrato N°408-2013. Bogotá: IDEAM, 2013.
- Instituto Geológico y Minero de España. *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundación: Métodos, experiencia y aplicación*. Madrid : Ministerio de ciencia e innovación, 2008.
- . *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía Metodológica para su elaboración*. Madrid: Ministerio de Ciencia e innovación, 2008.
- ISO. 772. *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Vocabulary and Symbols, tercera edición*. Ginebra., 1988.
- K.A Tilford, K.J. Sene, R. Khatibi. "Flood Forecasting Model Selection." In *Flood Risk Management in Europe*, by K.J. Sene, R. Khatibi K.A Tilford, 401-4016. London : Springer, 2007.
- Kherde, Rajesh Vijaykumar. "Rainfall runoff modelling – Modellers Guide." *International Journal of Applied Engineering Research* 11, no. 3 (2016).
- M.R. Knebl, Z.-L. Yang, K. Hutchison, D.R. Maidment. "Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin." *Journal of Environmental Management*, 2005: 325-336.
- M.S. Horrit, P.D. Bates. "Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation." *Journal of Hydrology*, 2002: 87-99.
- MADVT – Vice Ministerio de Ambiente. *Política Nacional del Recurso Hídrico*. 2010.
- MAVDT. *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. 2010.
- Merriam. *Webster's Seventh New Collegiate Dictionary*. Springfield, MA, 1963.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques - MDDELCC. *Guide de gestion des eaux pluviales. Stratégies d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain*. . 2014.
- Misión BID - CEPAL. *Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia, 2010-2011*. Bogotá: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal). 2012., 2012.
- Mohiuddin Ali Khan, Ph.D. "Flood Scour for Bridges and Highways: Prevention." By Ph.D Mohiuddin Ali Khan. Delaware: McGraw-Hill Global Education Holdings, 2015.
- Muhammad Azam, Hyung San Kim, Seung Jin Maeng. "development of flood Alert Application in Mushim Stream Watershed Korea." *International Journal of Disaster Risk Reduction* , 2017: 11-26.
- Néelz, Sylvain. *Desktop review of 2D hydraulic modelling packages*. Great Britain. Dept. for Environment, Food and Rural Affairs., 2009.
- Neil M. Hunter, Paul D. Bates, Matthew S. Horritt, Matthew D. Wilson. "Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review." *Geomorphology*, 2007: 208-225.
- Normalización., Organización Internacional de. *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Vocabulary and Symbols, tercera edición, ISO 772*. Ginebra., 1988.

- Obregón, N. "Modelación hidrológica e hidráulica de la cuenca del río Coello, de acuerdo con los lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua- ERA." 2017.
- OMM. "Guía de Practicas Hidrológicas." By Organización Meteorologica Mundial, Capitulo 2. 2008.
- OMM. "Seminario Itinerante Sobre Los Modelos Matemáticos Utilizados en la Predicción Hidrológica." Notas de conferencia, 1985.
- ONU-Agua, GWP. *Roadmapping for Advancing Integrated Water Resources Management (IWRM) Processes.* . 2007.
- Ordoñez, J. "Balance hídrico superficial. Cartilla Técnica." SENAMHI., 2011.
- Organización Internacional de Normalización. *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Vocabulary and Symbols, tercera edición, ISO 772.* 1988.
- Plate, Erich J. "Early warning and flood forecasting for large rivers with the lower Mekong as example." *Hydro-environment Research*, 2007: 80-94.
- PNUMA-DHI Centro para el Agua y el Medio Ambiente. WWAP, DHI Water Policy. *Integrated Water Resources Management in Action.* . 2009.
- Ponce, Victor Miguel. "Engineering Hydrology, Principles and Practices." In *Catchment Modeling*, by Victor Miguel Ponce, 389-451. Prentice Hall, 1989.
- Puricelli, M. "Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica. Tesis Doctoral. ." Universidad Politécnica de Valencia., 2003.
- Rajesh, K. "Rainfall Runoff Modelling – Modellers Guide. International Journal of Applied Engineering Research." Volume 11, no. Number 3 (2016): 1900-1907.
- Randrianasolo, Annie Rindra. "Evaluation de la qualité des prévisions pour l'alerte aux crues." 2009.
- Robert J. Moore, Victoria A. Bell, David A. Jones. "Forecasting for Flood Warning ." *Comptes Rendus Geoscience*, 2005: 203-217.
- Rossman, Lewis A. *Storm Water Management Model.* Cincinnati, Septiembre 2015.
- Siingh, P. V. *Computer models of watershed hydrology.* Water Resources Publications, 1995.
- Singh, P. V. *Rainfall - Runoff modelling. Hydrologic systems.* . Prentice Hall, 1989.
- . *Wathershed modeling. Computer Models of Watershed Hydrology.* Colorado, USA.: Hydrology: Water Resources Publications, Highlands Ranch., 1995.
- Steffler, P M, and J Blackburn. *River2D: Two-dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat. Introduction to depth averaged modeling and user's manual.* Edmonton: Universidad de Alberta, 2002.
- Steffler, Peter, and Terry Waddle. *R2D_Mesh: Introduction to Mesh Generation and User's Manual.* Canadá: Universidad de Alberta, 2002.
- T.Brauer, M. Fleming and. *Hydrologic Modeling Systems HEC-HMS.* . Davis , California , Agust 1, 2016.
- Teng , J, A Jakeman, J Vaze , B Croke, D Dutta , and S Kim. "Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances." *Environmental Modelling & Software*, 2017: 201-2016.

- Tomas Morer, Xavier, Lucinio González Sabaté, Laura Fernández Ruano, and Jordi Cuadros Margarit. *Tablas Estadísticas*. Sarria: IQS - Institut Quimic Sarria, Departamento de Estadística Aplicada, 2004.
- Tucci, C. *Regionalização de Vazoes*. . Universidade" UFRGS., 2002.
- Universidad de Alberta. *River2D*. Canadá: Universidad de Alberta, Introduction to Depth Averaged Modeling and User's Manual.
- Universidad de Coruña. Departamento de Tecnología de la Construcción. *Hidrología superficial y subterránea. Curso de Ingeniería de Obras Públicas*. 2015.
- University Corporation for Atmospheric Research. *Guia de Referencia para Sistemas de Alerta Temprana de Crecidas Repentinas*. Vol. 1, in *Guia de Referencia para Sistemas de Alerta Temprana de Crecidas Repentinas*, by University Corporation for Atmospheric Research, translated by Leticia Saenz Cynthia Diez, 10-223. Silver Spring: NOAA, 2012.
- UN-Water. *Status Report on IWRM and Water Efficiency Plans for CSD16*. 2008.
- V. Andréassian, C. Perrin, L. Berthet, N. Le Moine, J. Lerat, C. Loumagne, L. Oudin, T. Mathevet. "Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models." *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, , 2009: 1757–1764.
- Valencia, M. "Modelación hidrológica distribuída de tipo conceptual como elemento para ordenación y manejo ambiental de cuencas hidrográficas. Caso de estudio: cuenca hidrográfica del río La Miel, Departamento de Caldas Colombia." Tesis Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales., 2008.
- Vaze, J., Jordan, P., Frost, A. y Summorel, G. *Guidelines for rainfall - runoff modelling. Towards Best Practice Model Application*. Bruce, Australia: eWater Cooperative Research Center, 2012.
- Vélez, J. J. "Modelación en hidrología, tendencias actuales y futuras." *III Simposio Nacional. Actualidad y tendencias de la Ingeniería Civil*. . Manizales- Colombia., 2008.
- Ven Te Chow, Larry W. Mays, David R. Maidment. "Crecientes de Diseno." In *Hidrologia Aplicada* , by Ven Te Chow, 542-544. New York : Mc Grall Hill , 1993.
- Vijay P. Singh, Ph.D. *Handbook of Applied Hydrology*. United Stated: Mc Graw Hill Professional , 2017.
- Vijay P. Singh, Ph.D., D.Sc., D. Eng. (Hon.), Ph.D. (Hon.), D. Sc. (Hon.), P.E., P.H. "Handbook of Applied Hydrology." In *Handbook of Applied Hydrology*, by Ph.D., D.Sc., D. Eng. (Hon.), Ph.D. (Hon.), D. Sc. (Hon.), P.E., P.H. Vijay P. Singh. McGraw-Hill Professional, 2017.
- Water Environment Federation. "Overview of Available Modeling and Simulation Protocols." In *Water Environment Federation: Wastewater Treatment Process Modeling*. New York: McGraw-Hill Professional, 2014.
- WMO. *Guía de prácticas climatológicas*. 2011.
- Wood, E. F., Sivapalan, M., Beven, K., & Band, L. "Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modelling." *J. Hydrology*, 102, no. 1-4 (Sep. 1988): 29-47.
- World Meteorological Organization. *integrated flood management tools series. Flood Mapping*. Zurich: World Meteorological Organization, 2013.
- Xu, Chong-yu. *Hydrologic Models*. Villavägen Sweden: Uppsala University, 2002.

ANEXO 1 ESTUDIOS DE CASO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICO EMPLEADOS PARA DIFERENTES FINES

Autor	Nombre del Proyecto	Finalidad	Modelo	Lugar
IDEAM, Subdirección Hidrología, 2009.	Modelación Matemática Unidimensional del río Magdalena en Mike 11 del tramo Puerto Salgar – Barrancabermeja.	Pronósticos inundaciones.	de HEC - HMS	Colombia
IDEAM, Subdirección Hidrología, 2010.	Modelación Matemática Unidimensional del río Magdalena en Mike 11 del tramo Barrancabermeja - Banco.	Pronósticos inundaciones.	de HEC - HMS	Colombia
IDEAM, Pronósticos y Alertas, 2011.	Modelación Hidrológica e Hidráulica del río Magdalena en Cuenca Media.	Pronósticos inundaciones.	de HEC - HMS	Colombia
IDEAM, Subdirección Hidrología, 2015.	Implementación en la herramienta FEWS-Colombia de la modelación hidrológica e hidráulica del río Magdalena en la Cuenca Media.	Pronósticos inundaciones.	de HEC - HMS	Colombia
IDEAM, Subdirección Hidrología, 2016.	Implementación en FEWS-Colombia de los modelos hidrológicos e hidráulicos de la cuenca baja del río Magdalena – Sector Mojana.	Pronósticos inundaciones.	de HEC - HMS	Colombia
Jean-Baptiste Charlier, 2007	Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical.	Modélisation hydrologique dans un contexte cultivé en banane.	MHYDAS	BasseTerre, Guadeloupe
Rodríguez et al., 2014	El páramo andino como productor y regulador del recurso agua. El caso de la microcuenca alta de la Quebrada Mixteque.	Relación precipitaciones y drenaje microcuenca paramera.	Relaciones caudal y precipitación mensual.	Venezuela
Martha Elena Carrillo Serrano, 2010	Modelación hidrológica semidistribuida de micro cuencas de diferente cobertura vegetal+C31	Comportamiento hidrológico de micro-cuencas de montaña.	TOPMODEL	Ecuador
Flores et al., 2012	Modelación del Rol de Páramo en la Hidrología bajo un Escenario de Cambio Climático	Modelación Páramos.	de WEAP	Perú

Autor	Nombre del Proyecto	Finalidad	Modelo	Lugar
Jesús Geovanny Solarte Guerrero, 2014	Efecto del cambio de uso del suelo sobre la cantidad superficial del recurso hídrico en la microcuenca Peñas Blancas, municipio de Tangua, Departamento de Nariño.	Oferta hídrica en función de su cobertura	SWAT	Colombia - Nariño
Díaz Granados et al., 2005	Páramos hidrosistemas sensibles.	Modelación hidrológica	AvSWAT	Colombia - Chingaza
Eydlith Girleza Gil Morales, 2012	Modelación Hidrológica de los Páramos Andinos con TOPMODEL: Páramo de Chingaza, Colombia.	Modelación Hidrológica en Páramos.	TOPMODEL	Chingaza, Colombia
Olga Lucía Ocampo Jorge Julián Vélez, 2014	Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná	Simulación continua en cuencas de alta montaña	Tetis, Thomas, Temez, T, P, ARIMA	Caldas - Colombia
USAID, 2015	Forjando capacidad de adaptación al cambio climático en la gestión de recursos hídricos en la cuenca del río Otún	Explora los efectos del cambio climático en el ecosistema páramo.	WEAP	Risaralda, Colombia
Omar Alexis Cely Reyes, 2013	Utilización de modelos hidrológicos para la determinación de cuencas en ecosistemas de Páramo.	Análisis de la red hídrica del páramo de la Cortadera.	SWAT	Boyacá Colombia
CAR - IDEAM – PU, 2015	Modelación hidrológica de los impactos de los escenarios de cambio climático en la escurrentía superficial y en un caso de estudio de un acuífero de la jurisdicción de la CAR en las cuencas hidrográficas, que sirva de base para avanzar en las Evaluaciones Regionales del Agua – ERA	Determinación del caudal ofertado en las cuencas.	Thomas	Cundinamarca - Colombia
Conservación Internacional, 2014	Análisis la vulnerabilidad actual y futura a la variabilidad climática y al cambio climático de la región Bogotá-Cundinamarca, bajo un enfoque territorial.	Modelación hidrológica con fines de evaluación de vulnerabilidad	FIESTA/ Water world	Cundinamarca - Colombia
IDEAM - UN Sede Medellín, 2007	Desarrollo de una estrategia de modelación que permita simular la dinámica de los ciclos del agua y del carbono en ecosistemas de alta montaña en Colombia ante cambios en el régimen climático.	Simular la dinámica de los ciclos del agua en ecosistemas de alta montaña.	TETIS	Colombia
Fondo Adaptación, 2015	Modelación hidrodinámica de la Mojana.	Modelación probabilista de la amenaza de inundación.	Sacramento	Mojana - Colombia

ANEXO 2. ESTUDIOS DE CASO DE MODELACIÓN HIDRÁULICA EMPLEADOS PARA DIFERENTES FINES.

Autor	Nombre del Proyecto	Finalidad	Modelo	Lugar
Fondo Adaptación - CNM, 2013-2015	Plan de Acción de la Mojana	Análisis de la Amenaza, Modelación hidráulica de alternativas de intervención	SOBEK RURAL R2.13	Región Mojana - Colombia
Cormagdalena-CIRMAG 2014	Programa de modelación permanente del río Magdalena	Herramienta de planificación del río Magdalena	SOBEK RURAL R2.13	Río Magdalena sector Salgar-Calamar - Colombia
Fondo Adaptación, 2014	Restauración Ambiental del sistema Canal del Dique	Análisis de alternativas de regulación y control del transito de sedimentos.	SOBEK RURAL R2.13 / Delft3D	Canal del Dique - Colombia
IDEAM-CNM, 2016	Mapas de Inundación escala Municipal	Mapas de Inundación escala Municipal	HEC RAS 5	Mojana / Brazo Mompós - Colombia
IDEAM-CNM, 2016	Modelo de pronóstico hidrológico Río Cauca, Sector La Coquera-Tres Cruces	Modelo hidráulico de pronóstico de nivel para el sistema de alertas tempranas FEWS Colombia	SOBEK RURAL R2.13	Río Cauca, Sector La Coquera-Tres Cruces - Colombia
IDEAM-CNM, 2016	Modelo de pronóstico hidrológico Río Cauca, Sector La Coquera-Tres Cruces	Modelo hidráulico de pronóstico de nivel para el sistema de alertas tempranas FEWS Colombia	SOBEK RURAL R2.13	Depresión Momposina - Colombia
IDEAM, Subdirección Hidrología, 2009.	Modelación Matemática Unidimensional del río Magdalena en Mike 11 del tramo Puerto Salgar - Barrancabermeja.	Pronósticos de inundaciones.	MIKE 11	Colombia
IDEAM, Subdirección Hidrología, 2010.	Modelación Matemática Unidimensional del río Magdalena en Mike 11 del tramo Barrancabermeja - Banco.	Pronósticos de inundaciones.	MIKE 11	Colombia
IDEAM, Pronósticos y Alertas, 2011.	Modelación Hidrológica e Hidráulica del río Magdalena en Cuenca Media.	Pronósticos de inundaciones.	SOBEK RURAL R2.13	Colombia
IDEAM, Subdirección Hidrología, 2015.	Implementación en la herramienta FEWS-Colombia de la modelación hidrológica e hidráulica del río Magdalena en la Cuenca Media.	Pronósticos de inundaciones.	SOBEK RURAL R2.13	Colombia
IDEAM, Subdirección Hidrología, 2016.	Implementación en FEWS-Colombia de los modelos hidrológicos e hidráulicos de la cuenca baja del río Magdalena - Sector Mojana.	Pronósticos de inundaciones.	SOBEK RURAL R2.13	Colombia

ANEXO 3 FUENTES DE INFORMACIÓN

De acuerdo con el objetivo de la modelación, las particularidades de la zona de estudio y las características de los modelos, se pueden requerir diferentes tipos de datos e información. Ésta se puede clasificar en temporal y espacial.

Información temporal o Hidrometeorológica. La información hidrometeorológica debe ayudar a comprender las distintas fases del ciclo hidrológico, desde el paso del agua de la atmósfera a la tierra hasta su regreso a la atmósfera. Constituye, pues, la base de la evaluación y gestión de los recursos hídricos y de los problemas prácticos ocasionados por las crecidas y las sequías, la erosión y el transporte de sedimentos y la polución del agua (WMO 2011).

Comúnmente, los procesos de modelación lluvia – escorrentía implementan registros hidrometeorológicos de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa del aire, brillo solar o radiación solar, velocidad del viento, caudales y sedimentos. Esta información puede ser solicitada u obtenida en los siguientes enlaces:

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM:

<http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>

<http://sirh.ideam.gov.co:8230/Sirh/faces/observatorio.jspx>

Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá - SIATA

https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/home

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas- CIOH

<https://www.cioh.org.co/>

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC:

https://www.cvc.gov.co/images/boletin_hidroclimatico/

Centro Nacional de Investigaciones de Café - CENICAFE

<http://agroclima.cenicafe.org/home>

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia - CENICAÑA:

http://www.cenicana.org/clima_/index.php

XM S.A.

<http://informacioninteligente10.xm.com.co/hidrologia/paginas/default.aspx>

A continuación, se hace una breve descripción de algunas variables hidroclimatológicas utilizadas en los procesos de modelación.

Precipitación. La cantidad total de precipitación que llega al suelo durante un período determinado se expresa en términos de la profundidad que alcanzaría sobre una proyección horizontal de la superficie terrestre si se fundiese alguna parte de la precipitación caída en forma de nieve o hielo. Las nevadas se miden también en términos del espesor de nieve fresca que cubre una superficie plana y horizontal (WMO 2011).

Las formas de medición de la precipitación pueden ser consultadas en la “Guía de Practicas Hidrológicas – Volumen 1: Hidrología – De la Medición a la Información hidrológica” publicada por la Organización Meteorológica Mundial en el año 2011.

En cuencas grandes, algunos modelos que utilizan registros de precipitación con paso de tiempo diario podrían ser adecuados para los propósitos de la modelación, donde las variaciones espaciales de la precipitación pueden ser más importantes que las variaciones temporales. En pequeñas cuencas, un paso de tiempo diario puede ser mayor que el tiempo de respuesta de la cuenca; por ende, se puede requerir mayor resolución temporal de los registros de precipitación para representar adecuadamente la dinámica de respuesta y el pico del hidrograma (Rajesh 2016).

Los volúmenes e intensidades de lluvia pueden variar rápidamente en espacio y tiempo al interior de la zona de estudio, particularmente frente a eventos convectivos. Así como la interpolación de los volúmenes de lluvia en el tiempo producen el perfil de la tormenta, también puede ser necesario interpolar en el espacio debido a que las mediciones de lluvia tan sólo representan puntos de medición.

Temperatura del aire. En estaciones meteorológicas convencionales y automáticas, la temperatura del aire se mide dentro de abrigos meteorológicos (pantallas de Stevenson o casetas ventiladas) a 2 m sobre la superficie, de acuerdo con los estándares de la Organización Meteorológica Mundial - WMO.

La temperatura del aire se mide con termómetros o termopares instalados en el abrigo. Los termómetros de mínima y máxima registran la temperatura mínima y máxima del aire en un periodo de 24 horas. Los termógrafos generan gráficos de las temperaturas instantáneas durante un día o

una semana. Las estaciones meteorológicas electrónicas comúnmente hacen un muestreo de la temperatura del aire cada minuto y entregan promedios horarios además de los valores máximo y mínimo en 24 horas (FAO 2006).

Humedad relativa del aire. La humedad relativa (HR) expresa el grado de saturación del aire como el cociente entre la presión real de vapor (e_a) a una temperatura dada y la presión de saturación de vapor ($e^{\circ}(T)$) a la misma temperatura (T); es el cociente entre la cantidad de agua que el aire realmente contiene a una determinada temperatura y la cantidad que podría contener si estuviera saturado a la misma temperatura. Es adimensional y se expresa comúnmente como porcentaje (FAO 2006).

Radiación Solar. La radiación neta diaria (promedio) esta expresada en megajoules por metro cuadrado por día ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Estos datos no están disponibles comúnmente en forma directa pero pueden derivarse de la radiación de onda corta (promedio) medida con un piranómetro o de la duración real diaria (promedio) del sol brillante (horas por día) medida con el heliógrafo (FAO 2006).

Velocidad del viento. Para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith se requiere contar con la velocidad del viento (promedio) diaria en metros por segundo (m s^{-1}) medida a 2 m de altura sobre el nivel del suelo. Es importante verificar la altura a la cual se mide la velocidad del viento, pues velocidades del viento medidas a diversas alturas sobre la superficie del suelo presentan con seguridad valores diferentes (FAO 2006).

Niveles. El nivel de agua (o altura) es la elevación de la superficie de una corriente fluvial, lago u otra masa de agua respecto de un valor de referencia (ISO 1988). Mediante su correlación con el caudal fluvial o con los volúmenes de almacenamiento de embalses y lagos, el nivel de agua constituye el punto de partida para obtener registros de caudal o de reserva (WMO 2011).

Sedimentos. Los sedimentos son transportados por el agua en movimiento de diversas maneras. Las partículas de sedimento pueden ser desplazadas mediante saltación, rodamientos o deslizamientos sobre el lecho o en sus proximidades, o pueden ser separados de éste y mantenidos en suspensión. El tipo de movimiento experimentado por las partículas dependerá de sus características físicas (tamaño y forma de las partículas, peso específico, etc.) y de la composición en tamaños de las partículas de sedimento, así como de las velocidades de flujo y de las profundidades (WMO 2011).

Las formas de medición de los sedimentos pueden ser consultadas en la “Guía de Prácticas Hidrológicas – Volumen 1: Hidrología – De la Medición a la Información hidrológica” publicada por la Organización Meteorológica Mundial en el año 2011 o en documento integrado de “Sistemas de Información, Componente Hidrológico, Redes, Mediciones, Observaciones y Procesos Básicos” publicado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM en el año de 1999.

Información espacial y sistemas de manejo de datos. Los sistemas de información geográfica son herramientas para manipular e interpretar información espacialmente distribuida, dando la posibilidad a investigadores, primero, de mejorar su comprensión de procesos físicos fundamentales vinculados a cada sistema y segundo, de solucionar las ecuaciones matemáticas que representan estos procesos. Cabe mencionar que una de las principales limitaciones de la información geográfica es el seguimiento de las variables y sus cambios en el tiempo.

Los modelos digitales de terreno, también llamados modelos digitales de elevación - DEM, los suelos y la cobertura de la tierra, son algunos de los requerimientos presentes en los procesos de modelación. A continuación, se hace una breve descripción de estas bases de datos.

Modelos digitales de Terreno. La topografía puede ser eficientemente representada a través de los modelos digitales de terreno. El agua tiende a moverse aguas abajo siguiendo la dirección de la pendiente; de tal forma, esta información tiene gran utilidad en la modelación hidrológica. Cabe mencionar que si se presentan flujos profundos de agua pueden desviarse significativamente de lo sugerido por el análisis de la topografía superficial (K. Beven 2012). Los modelos digitales de terreno pueden ser generados a partir de levantamiento de puntos en campo con niveles de alta precisión, información LIDAR, imágenes de vuelos aéreos, imágenes satelitales, entre otros.

A continuación, se relacionan algunas de las páginas donde se pueden descargar modelos digitales de elevación globales de diferente resolución espacial.

Nasa:

https://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle

AIRBUS:

<http://www.intelligence-airbusds.com/es/474-worlddem-el-nuevo-estandar-en-modelos-de-elevacion-a-escala-mundial>

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC permite descargar cartografía básica a nivel nacional, escala 1:25.000. Incluye curvas de nivel, a partir de las cuales se puede generar el modelo digital de terreno. A continuación, se presenta el enlace de descarga del IGAC:

<http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/MapasdeColombia/Descargas>

Información batimétrica (empleada en la modelación hidráulica). Para la determinación del perfil de terreno bajo agua se realizan trabajos batimétricos, los cuales deben ser procesados e integrados con los perfiles de terreno (seco) para generar el modelo continuo o las secciones completas a implementar en la modelación.

En el caso específico de modelación hidráulica y, en especial, para el caso unidimensional, no es estrictamente necesario generar un modelo continuo de terreno, por lo cual se acostumbra levantar las secciones transversales, separadas acorde con las necesidades específicas de cada estudio.

Suelo. El suelo cumple un papel importante en algunos procesos del ciclo hidrológico tales como la escorrentía, la infiltración, el almacenamiento de agua en el suelo, la evaporación directa de la superficie del suelo, la capilaridad, la cantidad de humedad del suelo disponible para las plantas dentro del alcance de sus raíces y la profundidad a la que pueden llegar las raíces. La cantidad de agua que alcanza cada uno de estos procesos y su interacción con el entorno depende de la condición física del suelo y las condiciones atmosféricas, ya que estas afectan la evaporación y la transpiración.

La conductividad hidráulica y la capacidad de almacenamiento son algunas de las características hidráulicas del suelo requeridas en los procesos de modelación hidrológica. Estas características hidráulicas dependen de factores tales como estructura, densidad, configuración de los macroporos, temperatura, entre otros.

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC ha clasificado los suelos a escala 1:100.000 para todo el territorio nacional. En las memorias técnicas de los estudios de suelos se puede encontrar información importante para los procesos de modelación como, por ejemplo, textura, contenido de materia orgánica, estructura, grado de compactación, densidades, porosidades y

propiedades hidráulicas como conductividad hidráulica y capacidad de almacenamiento a diferentes atmósferas.

Adicionalmente, algunos ejercicios adelantados por Corporaciones Autónomas Regionales han generado clasificaciones locales de los suelos de acuerdo con su comportamiento hidrológico como, por ejemplo, mapas de “Numero de Curva”. Cabe indicar que no contienen directamente el valor de los parámetros requeridos para procesos de modelación hidrológica.

Cobertura de la tierra. Las coberturas de la tierra o los usos del suelo tienen una relación directa con los procesos hidrológicos presentes en una zona de estudio. Los procesos hidrológicos a evaluar dependerán si la cobertura es un bosque, un cultivo, un cuerpo de agua, un área residencial, etc.

Para comprender los procesos hidrológicos en zonas boscosas es necesario comprender que el bosque se caracteriza por tres compartimentos. El primero es el área foliar por encima del suelo que forma un cierto número de capas o estratos, el segundo es la acumulación de hojarasca o “litter” sobre el suelo constituyendo el denominado “suelo forestal” y el tercero es el suelo que se forma por debajo con raíces vivas y muertas, confiriéndole al suelo condiciones apropiadas de macroporos y permeabilidad. Estos tres compartimentos se deben tener en cuenta cuando se quiere observar el movimiento del agua a través de la cobertura de bosque (Giraldo 2002).

Algunos procesos hidrológicos relacionados con el tipo de cobertura en el marco del “Ciclo del agua” son: La interceptación de agua en el área foliar, la evaporación del agua interceptada en la cobertura, la recarga o infiltración, la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de las plantas.

Teledetección e Imágenes satelitales. La teledetección es una técnica que permite adquirir imágenes y otros datos, los cuales, son reflejados por la superficie de la tierra y capturados por sensores instalados en plataformas espaciales. Las imágenes satelitales son representaciones visuales de la información capturada por los sensores. Entre las técnicas de teledetección se distinguen imágenes pancromáticas (a color), monocromáticas (en blanco y negro) y multiespectrales (con información de varias bandas del espectro electromagnético).

Algunos de los productos que se pueden obtener a partir de imágenes de satélite son: temperatura de la superficie, precipitación, evapotranspiración, dirección y velocidad de los vientos, modelos digitales de terreno, cobertura de la tierra – usos del suelo, humedad de suelo, litología –

mineralogía, índice de vegetación, calidad del agua, entre otros. A continuación se relacionan algunos enlaces para la descarga de imágenes satelitales.

NASA's Earth Observing System

<https://eosps.nasa.gov/content/nasa-earth-science-data>

Cobertura de la tierra global – U.S. Geological Survey

<https://glovis.usgs.gov/>

ANEXO 4 CLASIFICACIÓN DE LA ESCALA ESPACIAL.

Clasificación de la escala espacial aplicable de acuerdo con el tamaño de la cuenca estudiada.

Nivel de la escala espacial	Dimensión (km ²)	Tipo de cuencas	Disponibilidad de información hidrológica
Macro	>10 ⁴	Grandes: pleno desarrollo del uso de los recursos hídricos	Adecuada para análisis globales
Transición (α)	Entre 10 ³ y 10 ⁴		
Meso	Entre 10 ⁰ y 10 ³	Medias: implican usos puntuales o múltiples del agua	Reducida
Transición (β)	10 ⁻⁴ y 10 ⁰		Prácticamente nula
Micro	<10 ⁻⁴	Lotes urbanos y/o potreros rurales	

Fuente: (Tucci 2002)

ANEXO 5 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS E INFORMACIÓN.

La información hidrológica básica es usada para mejorar la comprensión de los procesos hidrológicos; por tanto, en la etapa de producción del dato la garantía de la calidad de la información es un componente muy importante ya que el objetivo del control de calidad es asegurar la mayor estandarización posible de los datos primarios antes de que se encuentren disponibles para los usuarios. La componente calidad participa a todo lo largo del proceso continuo que va desde las actividades de terreno -como son la selección del sitio de recolección de datos y el mantenimiento de los instrumentos- hasta la difusión de datos e información. El dato como producto se obtiene con el procesamiento y análisis de la información implementando herramientas informáticas y el control de expertos (IDEAM 1999).

El procesamiento de datos hidrométricos se refiere generalmente a los niveles, caudales, transporte y concentración de sedimentos y éste implica transformar los datos brutos a ciertas formas que sean fáciles de utilizar y manipular para los usuarios. Los datos comúnmente entran al sistema mediante el registro de manuscritos, por conversión mecánica de registros analógicos o en forma digital. Los datos brutos son, en general, comprimidos o reformateados a una forma más útil y deben estar sujetos a una variedad de revisiones de calidad (IDEAM 1999).

Independientemente del tipo de datos que se esté procesando o el camino que su procesamiento tome, un requerimiento básico es el de mantener un estándar de operaciones que no degrade la calidad de los datos. El sistema debe estar estructurado de forma que garantice controles específicos en cada etapa del trabajo (IDEAM 1999).

Para saber más en cuanto al procesamiento de la información hidrológica remítase al documento "Sistemas de Información, Componente Hidrológico, Redes, Mediciones, Observaciones y Procesos Básicos" publicado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales en el año de 1999.

Un procesamiento básico de los datos debe seguir por los menos las siguientes etapas:

- Unificación de formatos.
- Conversión de escalas y/o unidades.
- Revisión de cantidad de datos.
- Revisión de calidad de los datos.

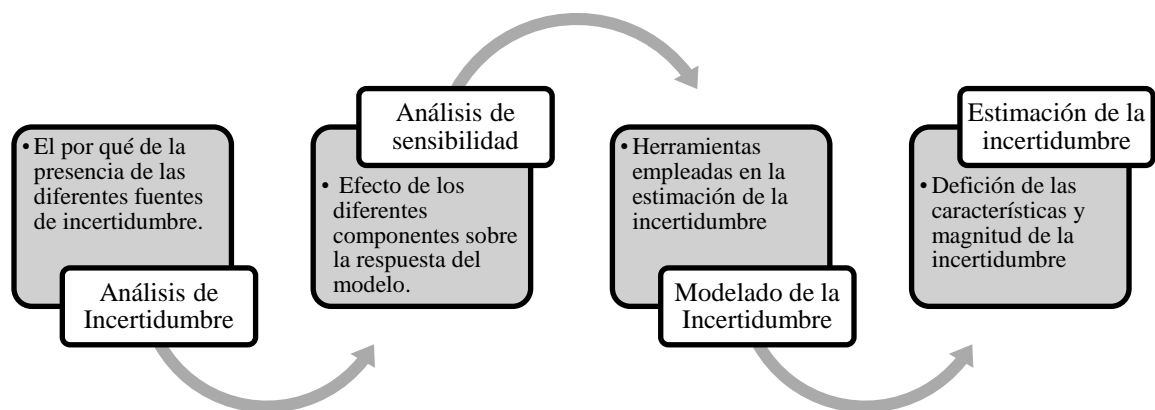
- Detección de datos anómalos.
- Análisis de consistencia de las series.
- Depuración de la información.
- Agregación de las series (cuando sea necesario).
- Selección de datos y periodos a emplear.
- Llenado de datos (cuando sea necesario).
- Interpolación (cuando sea necesario).

ANEXO 6 INCERTIDUMBRE.

El error y la incertidumbre siempre estarán presentes en todo proceso de modelación; sin embargo, la tarea respecto de este tema consiste, básicamente, en lograr reducir la incertidumbre en todo el proceso de modelación y reportar la incertidumbre de los resultados.

Actualmente, existe una gran discusión en cuanto a la pertinencia de realizar una evaluación de incertidumbre o al menos una parte de ésta; sin embargo, es indiscutible que un análisis de la incertidumbre siempre será justificado como un medio de expresión de confianza en las predicciones del modelo, pero es importante que el esfuerzo necesario para hacer cualquier evaluación sea proporcional a los costes y beneficios potenciales (K. L. Beven 2011).

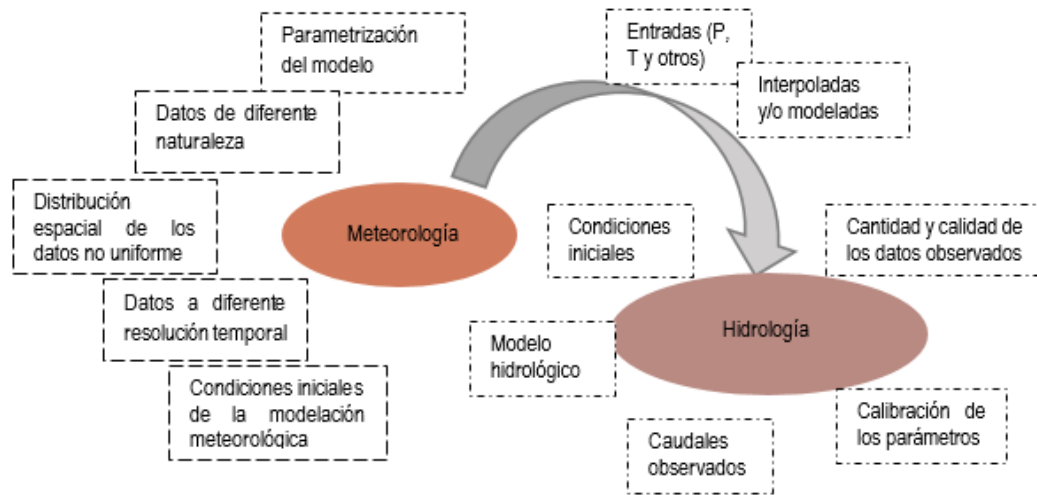
La evaluación de incertidumbre consiste en una serie de etapas en las que se hace análisis de incertidumbre, análisis de sensibilidad, modelación de la incertidumbre y asimilación de ésta, las cuales se presentan en la siguiente figura.



Etapas generales de la estimación de la incertidumbre.

Fuente: (Fondo Adaptación 2015)

El nivel al que se llegue en la evaluación de incertidumbre está condicionado a una determinada cantidad de factores; no obstante, en todo proceso de modelación se debe lograr, por lo menos, llegar hasta el análisis de incertidumbre y una caracterización general de ésta en los resultados. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra, a manera de ejemplo, parte del análisis de incertidumbre hidrológica en la modelación de la amenaza por inundación.



Análisis de incertidumbre en la modelación hidrológica.

Fuente: (Fondo Adaptación 2015)

ANEXO 7 PERFIL DE UN MODELADOR.

Para efectos de definir un perfil profesional adecuado para adelantar actividades de modelación acordes con los lineamientos y recomendaciones descritos en este protocolo, se recomienda un perfil específico como el descrito a continuación.

Profesional en ingeniería: civil, ambiental o sanitaria, geográfica, agrícola, catastral, o áreas afines. Posgrado en la modalidad especialización o maestría en áreas afines a Recursos Hídricos, Hidrosistemas, Hidrología, Hidrodinámica, Ingeniería Civil (con énfasis en recurso hídrico, hidrología o afines), Medio Ambiente y Desarrollo.

Experiencia específica de mínimo 24 meses en Modelación Hidrológica, Hidráulica o Calidad de agua (de acuerdo con el enfoque de la modelación a realizar); el tiempo de experiencia específica puede variar en función de la complejidad del proceso que se desea simular o del hidrosistema que se pretende representar, pero no se recomienda inferior a 1 año.

Si bien en programas de postgrado (maestrías y doctorados) cada vez es más frecuente encontrar perfiles de núcleo básico más diverso que se dedican en labores profesionales a la modelación hidrológica (incluyendo matemáticos, físicos, biólogos, entre otros), estos casos particulares deben evaluarse detenidamente en función de la experiencia específica o investigativa y la participación en proyectos de índole similar.

Adicional a lo anterior, se recomienda que, en los casos en que sea posible, el grupo de trabajo incluya profesionales de apoyo al hidrólogo modelador, el cual puede tener un perfil básico de las carreras profesionales descritas en el perfil anterior, el cual no necesariamente debe tener postgrado. La finalidad de esta recomendación es que profesionales que puedan tener interés y orientación en modelación hidrológica puedan adquirir experiencia específica en el tema.

ANEXO 8 ERRORES MÁS COMUNES EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA.

Categoría uno: conceptualización inadecuada del sistema hidrológico.	
<i>Error común</i>	<i>Potencial solución</i>
No entendimiento del problema.	Desarrollo y publicación de prácticas estándar de modelación hidrológica (p. e. ASTM)
Omisión de los procesos físicos relevantes.	Estudios bien diseñados de comparación de modelos para guías de aplicación general (p.e. WMO 1975)
Grado de conceptualización inadecuado (caja negra Vs basado en la física).	Más programas de entrenamientos (regional/local) a cargo de entidades e instituciones académicas con experiencia en modelación.
Selección de la geometría inadecuada del modelo.	Mayor disponibilidad de conjuntos de datos para el análisis.
Especificación inadecuada de las condiciones de borde y los límites del modelo.	
Asunciones erróneas sobre la heterogeneidad del sistema.	
Poca atención a la escala de los procesos (tanto temporal como espacial).	
Vacíos en cuanto a datos disponibles.	

Errores comunes en modelación hidrológica/hidráulica y sugerencias para solucionarlos. Categoría uno: conceptualización inadecuada del sistema hidrológico.

Fuente: Obeysekera, 2000

Categoría Dos: Selección de un código de cálculo inadecuado.	
<i>Error común</i>	<i>Potencial solución</i>
Seleccionar un código con mayor o menor potencial/versatilidad que el necesario.	Certificación de modelos para diversas aplicaciones (p. e. FEMA)
Seleccionar un código que no ha sido verificado o probado.	Establecimiento de un centro para difundir los modelos y sus aplicaciones.
Usar un código que se base en modelos matemáticos inadecuados para la simulación de los procesos físicos del mundo real en el problema específico.	Incentivar a los modeladores a enviar o compartir sus experiencias en la aplicación de modelos a través de un formato estándar de reporte.
	Aumentar el interés para desarrollar “soluciones analíticas” y su uso para verificación de modelos numéricos.
	Educación apropiada a estudiantes en todas las disciplinas (un click para obtener respuestas no es el camino adecuado).
	Fortalecer la documentación y compartirla a través de un centro especializado.
	Los desarrolladores de los modelos que hayan sido certificados deben hacer explícitas las limitaciones de los modelos así como sugerir las aplicaciones apropiadas e inadecuadas de sus modelos.

Errores comunes en modelación hidrológica/hidráulica y sugerencias para solucionarlos. Categoría Dos: Selección de un código de cálculo inadecuado.

Fuente: Obeysekera, 2000

Categoría tres: Aplicación inadecuada del modelo.

<i>Error común</i>	<i>Potencial solución</i>
Selección de valores inapropiados para los datos de entrada o los parámetros del modelo.	Mayor investigación sobre la selección apropiada de las escalas temporales y espaciales y los errores numéricos asociados.
Errores en la selección de las escalas temporales y espaciales.	
Realizar predicción con un modelo que ha sido calibrado bajo diferentes condiciones.	Desarrollo y publicación de prácticas estándar para: calibración de modelos y fallas, análisis de sensibilidad, estimación de las incertidumbres de la predicción.
Ausencia y/o limitaciones en la calibración y las predicciones.	
Ausencia de estimaciones de incertidumbre en la predicción.	
Ausencia de verificaciones básicas de las salidas (p.e. balance de masa).	Programa de certificaciones para modeladores.
Desconocimiento de las premisas de los procesos que se usaron para desarrollar el modelo.	Más programas de entrenamiento.

Errores comunes en modelación hidrológica/hidráulica y sugerencias para solucionarlos. Categoría tres: Aplicación inadecuada del modelo.

Fuente: Obeysekera, 2000

Categoría 4: Interpretación de los resultados del modelo.

<i>Error común</i>	<i>Potencial solución</i>
Interpretación hidrológica errada de los resultados del modelo por analistas con poca experiencia.	Certificación profesional para quienes ayudan a interpretar los resultados de modelación.
Extrapolaciones gruesas.	
Poca atención a la precisión del modelo y a las estimaciones de incertidumbre de las predicciones.	
Aplicación errónea del modelo cuando no está diseñado o no es posible ser aplicado para ciertos usos (p. e. uso de modelos de suministro de agua para orientar aplicaciones de control de inundaciones).	
Mal uso de los resultados por representación parcial.	

Errores comunes en modelación hidrológica/hidráulica y sugerencias para solucionarlos. Categoría 4: Interpretación de los resultados del modelo.

Fuente: Obeysekera, 2000

ANEXO 9 DOCUMENTO SÍNTESIS DE LA MODELACIÓN.

Con el fin de facilitar el proceso de revisión, actualización, mejoramiento de la modelación y su utilización en el proceso de toma de decisiones, es decir, para que pueda ser útil no sólo para quienes posteriormente deseen retomar el ejercicio de modelación, si no para la adecuada interpretación de sus resultados, se propone que el documento en el que se consignan las diferentes etapas del ejercicio de modelación, contenga lo siguiente:

Objetivos de la modelación. Este capítulo define la finalidad de la modelación, el cual debe permitir dimensionar también su alcance.

Modelo conceptual. En este capítulo se reportan todas las consideraciones (hipótesis, asunciones, entre otros) que se tuvieron en cuenta para llevar a cabo la modelación, aquí debe quedar consignada información sobre: descripción del área de estudio (cuenca, subcuenca, área aferente, municipio, el sector de una población, cuerpo de agua, entre otros), las condiciones de frontera, las condiciones iniciales, los procesos del fenómeno estudiado sobre los cuales se debe hacer énfasis, los flujos de información, los datos e información requerida, las estrategias empleadas ante la falta de datos e información, la construcción topológica del modelo, las escalas de la modelación, los criterios de selección del modelo así como las características de éste (haciendo especial énfasis en el ámbito de aplicación del mismo, así como de sus limitaciones), y todas las demás hipótesis y supuestos planteados durante la modelación.

Datos e información. Este capítulo debe contener la relación de los datos y la información disponible para la modelación, también incluye el análisis de la calidad de los datos e información así como todo su procesamiento y los resultados de éste.

Evaluación de incertidumbre. Se debe recordar que hay diferentes posibilidades para abordar el tema de la incertidumbre, y que el nivel de complejidad que se adopte depende del modelador, sin embargo sin importar a qué nivel se llegue, debe reportarse en este capítulo. Los enfoques adoptados en éste tema y las actividades llevadas a cabo para reducir errores e incertidumbre deben quedar consignados aquí.

Desempeño del modelo. Este capítulo contiene puntualmente, la selección de los criterios de desempeño, el análisis de sensibilidad, la calibración del modelo y la validación del modelo.

Resultados de la simulación. Se consignan aquí los resultados del modelo (numéricos, gráficos, estadísticos, espaciales, entre otros) de todos los escenarios de interés, que deben ir acompañados de su respectiva descripción.

Análisis de resultados. Este capítulo se enfoca en la interpretación de los resultados arrojados por el modelo, en él se traduce a un lenguaje más sencillo (entendible para otro tipo de público diferente a especialistas en modelación) los resultados de la modelación.

Conclusiones. Aquí quedan consignados los hallazgos más importantes del ejercicio de modelación.

Recomendaciones. En este capítulo se deben presentar todas las sugerencias a diferentes niveles, pero especialmente debe contener las recomendaciones para hacer la adecuada lectura de los resultados y para mejorar a futuro el mismo ejercicio de modelación u otros con características similares.

En el documento se debe especificar la ubicación física de todos los datos e información empleados para implementar el modelo así como los generados en la modelación, especificar los contenidos y formatos.

Bibliografía. Aquí deben quedar consignadas todas las fuentes consultadas y citadas, incluyendo todas las referencias de los enfoques y modelos adoptados para llevar a cabo la modelación.

Anexos. En el que se condensen de manera ordenada, todos los datos y la información hidrometeorológica, cartográfica, y demás información (la que finalmente fue empleada), la configuración del modelo, el resumen parámetros calibrados, las condiciones de frontera y el resumen de los resultados.

ANEXO 10 DOCUMENTOS DE CONSULTA.

Tema	Referencia
Aspectos prácticos en la implementación de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico	(UN-Water 2008)
Modelación en la GIRH	(Friedman 1984)
Selección de modelos para pronósticos	(K.A Tilford 2007)
Modelos AR	(Bolshakov 2013)
Escalas características de los procesos hidrológicos.	(Bloschl 1995)
Calibración	(Gnouma 2006)
Calibración – Parámetros del suelo	(Puricelli 2003)
Análisis de calidad de los datos e información	(Del río San José 2010)
Incertidumbre	(Fondo Adaptación 2015)
Modelación Lluvia – Escorrentía	(K. Beven 2012)
Modelo distribuido	(Muhammad Azam 2017)
Modelación para las ERA's	(Obregón 2017)
Guía de Modelación	(Rajesh 2016)
Método FAO – Penman - Monteith	(FAO 2006)
Calidad de datos	(EPA 2004)
Métricas de desempeño crecientes	(Randrianasolo 2009)
Modelación lluvia escorrentía	(Kherde 2016)
Métricas de desempeño de modelos hidrológicos	(V. Andréassian 2009)

Fuente: Elaboración propia