

# **CAPÍTULO 1**

## **Manejo del riesgo por inundaciones**

# **1. Manejo del riesgo por inundaciones**

En este capítulo se presentan los aspectos generales necesarios para la comprensión del problema de manejo de riesgo por inundaciones. En primer lugar a manera de reseña histórica se hace un breve resumen sobre las diferentes formas en que el ser humano ha sobrellevado y manejado los distintos riesgos a los que se encuentra expuesto. Posteriormente, se introducen los conceptos básicos necesarios para la generación de estrategias de mitigación control y adaptación ante fenómenos extremos y por último, se hace una descripción del concepto de incertidumbre y su importancia en la generación de resultados de inundaciones fluviales.

## **1.1 Desarrollo histórico del manejo de riesgos**

La existencia humana implica la exposición a muchas amenazas. Desde el comienzo de la civilización, los desastres naturales ('actos de Dios') como las inundaciones o los terremotos, han amenazado a la humanidad. Con los avances tecnológicos se introdujeron nuevas herramientas y con ello nuevas amenazas. Como antecedente de este estudio se presenta a continuación una breve reseña histórica de las maneras en que la humanidad ha lidiado con el riesgo y la seguridad. Tomando como base los trabajos presentados por Bernstein (1997), Covello et al (1985) y Ale (2003,2005).

### **1.1.1 Historia temprana: creencia y los desastres naturales**

Nuestros antepasados que pertenecieron a la época de la prehistoria fueron amenazados principalmente por peligros naturales originados por incendios, inundaciones y animales salvajes. Hace mucho tiempo, la gente se protegía con métodos relativamente simples y principalmente intuitivos, por ejemplo a través de la construcción de casas en zonas altas para protegerse contra las inundaciones. Diversas formas de creencia y religión jugaron un papel importante en los intentos para evitar daños. En el siglo V a. C. Los funcionarios del gobierno chino requerían el sacrificio anual de una doncella virgen para ofrecerla en ofrenda a los Dioses del Río Amarillo a fin de evitar las inundaciones. El gobierno Griego por su parte consultó a Pitia, el Oráculo de Delfos, para asesorarse en decisiones difíciles e importantes (Jonkman, 2007).

Dentro de la historia de la humanidad, también existen ejemplos más racionales de manejo de riesgos en relación a aquellos provocados por el hombre. El concepto de responsabilidad es reconocido en el código de Hammurabi, emitido alrededor de 1780 a. C. Donde se asienta que: "Si un constructor hace una casa y no hace una construcción firme y la casa que él ha construido se derrumba causando la muerte del propietario, el constructor se someterá a la muerte" (Corotis, 2003).

### **1.1.2 Desarrollo en la regulación y manejo de riesgos**

Desde la antigüedad, las autoridades gubernamentales han intervenido directamente a reducir, manejar y/o controlar los riesgos asociados con los desastres naturales, epidemias, contaminación de ambiente y la alimentación. Las primeras civilizaciones desarrollaron instrumentos para hacer frente a los riesgos provocados por el hombre, como incendios y accidentes de transporte. Algunos ejemplos son las regulaciones de seguridad de tráfico en la Roma antigua y el ya mencionado código de construcción de Hammurabi. Sin embargo, el nivel de desarrollo de técnicas de manejo de riesgo difiere entre civilizaciones y zonas geográficas correspondientes.

A lo largo del tiempo, la introducción de nuevas tecnologías y la aparición de los desastres condujeron al desarrollo de sistemas de protección y regulación en una especie de proceso de ensayo y error a largo plazo. Ale (2003) describe dos ejemplos de este tipo de situaciones en los Países Bajos. En 1654, una explosión de pólvora en la torre había demolido una gran parte del centro de la ciudad de Delft produciendo la muerte de alrededor de 1500 personas. Después de este desastre, el almacenamiento de pólvora se mudó fuera de la frontera de la ciudad.

En 1807, una explosión similar destruyó parte de la ciudad Centro o Leiden. El evento causó 150 muertos, incluyendo a 50 niños cuya escuela fue demolida por la explosión. La explosión se llevó a un decreto imperial por el emperador Napoleón, en la que se hace una distinción entre: 1) industrias prohibidas en la ciudad, 2) se le permitían a industrias ubicarse en el centro de la ciudad siempre y cuando se ha demostrado son suficientemente seguras. A pesar de la introducción de estas normas en el siglo XIX, hubo una explosión más de un almacenamiento de fuegos artificiales dentro de la ciudad de Enschede que causó 12 muertes en el año 2000.

El desarrollo en la revolución industrial del siglo XIX dio pie a nuevas regulaciones. Muchas personas se trasladaron a la ciudad para trabajar en las fábricas. Vivieron y trabajaban en circunstancias muy insalubres. Estas condiciones, especialmente para los niños trabajadores, condujeron a la introducción de la legislación sobre seguridad en el trabajo y el reconocimiento de la responsabilidad del empresario. Históricamente, la ocurrencia de desastres también ha disparado la mejora de los sistemas de protección. Por ejemplo, el sistema de defensa de inundaciones en los Países Bajos se ha formado principalmente por desastres de inundación.

### **1.1.3 La comprensión cuantitativa del riesgo**

El desarrollo del álgebra comenzó en el antiguo Egipto y Babilonia alrededor de 3000 a. C. Además se desarrolló en el hindú, griego y el mundo Islámico. El sistema numérico Hindú-árabe llegó a Europa hace 700-800 años y sentó las bases para el desarrollo de las matemáticas.

Estos métodos matemáticos más tarde proporcionan las herramientas para la comprensión cuantitativa del riesgo. No fue hasta el Renacimiento que científicos generaron los conceptos de probabilidad y oportunidad. Aunque estos conocimientos se originaron principalmente con el deseo de comprender los problemas de juegos de azar, más tarde proporcionaron las herramientas para el análisis de riesgo cuantitativo. Precedido por las investigaciones de científicos principalmente italianos, los franceses Pascal y Fermat presentaron la teoría de la probabilidad alrededor de 1660. En el siglo XVII y a finales del siglo XVIII mostraron un rápido desarrollo de la teoría de la probabilidad y sus aplicaciones, con contribuciones de, Arbuthnot, Halley y Bernoulli. En el siglo XVIII el cálculo de tablas de expectativa de vida (introducido en los Países Bajos por Johan de Witt) era una práctica común y una floreciente industria de seguro de la Marina desarrollado en Londres. Otra aportación importante fue el trabajo de Bayes en la segunda mitad del siglo XVIII. El cual mostró cómo actualizar o revisar creencias basadas en información nueva. En 1792, Laplace analizó la esperanza de vida con y sin vacunación contra la viruela, proporcionando un primer prototipo de análisis de riesgo comparativo (Simon, 1951). Sin embargo, no fue hasta finales del siglo XX que estas técnicas desarrolladas recientemente se aplicaran sistemáticamente en el manejo y la evaluación de riesgo.

#### **1.1.4 Siglo XX**

A principios del siglo XX, se documenta la primera ocasión en que la teoría de la probabilidad se relacionó con las ciencias físicas. Einstein y otros discutieron cómo el comportamiento mecánico de partículas y de los átomos, podría darse bajo una interpretación estadística. Un ejemplo es el llamado movimiento browniano de partículas de gas, que se describe como un proceso estocástico o aleatorio. En ese período la teoría de la probabilidad se desarrolló aún más, por ejemplo con los axiomas de probabilidad de Kolmogórov y las bases filosóficas y matemáticas de la teoría de la probabilidad publicados por el economista J.M. Keynes.

Von Neumann et al (1943) propusieron los fundamentos teóricos para la toma de decisiones en relación con situaciones de incertidumbre y riesgo. Los primeros años del siglo XX también se caracterizó por desastres relacionados con el fracaso de los grandes sistemas de ingeniería, como el hundimiento del *Titanic* en 1912 y la pérdida catastrófica del dirigible alemán *Hindenburg* en 1937.

Corotis (2003) señala que en 1945 se realizó la primera introducción de seguridad por medio de la probabilidad, en una publicación estadounidense llamada National Bureau of Standards en 1945. Posteriormente, en las décadas de los 40's y 50's importantes desarrollos teóricos se alcanzaron en el ámbito de la seguridad estructural, por ejemplo en los artículos presentados por Freudenthal, campo en el que se han utilizado métodos probabilísticos (en los códigos de diseño) desde la década de 1970.

Bedford et al. (2002) describieron las primeras aplicaciones de análisis de riesgo probabilístico en otros sectores. Métodos probabilísticos básicos fueron desarrollados en el sector aeroespacial en la década de 1960 (con el programa Apolo). En 1975 dentro del campo de la energía nuclear, la Comisión Reguladora Nuclear (NRC, 1975) aplicó plenamente estos métodos por primera vez en los Estados Unidos. En ambos campos de aplicación, ingeniería aeroespacial y nuclear, los resultados de riesgo cuantitativo y el análisis fueron duramente criticados y a menudo rechazados por los tomadores de decisiones. Sin embargo, algunos accidentes, como el incidente con el reactor nuclear de Three Mile Island en 1979 y el accidente con el transbordador espacial Challenger en 1986, estimularon el desarrollo y aplicación de análisis de riesgos.

### **1.1.5 Observaciones finales**

La seguridad es una necesidad básica para el desarrollo social y económico. Situaciones que son insuficientemente seguras, requieren inversiones repetidas y extremadamente altas en reparación e indemnización de daños (ej. inundación de 2007 en Tabasco US\$700 Millones). Por lo tanto, estas situaciones limitan las posibilidades de desarrollo social y económico. A lo largo de la historia, se puede observar que escasos recursos son asignados para la reducción de riesgos de amenazas básicas, como la hambruna y la enfermedad, las cuales tienen una gran influencia en la salud pública y la esperanza de vida.

Con el desarrollo de la sociedad se ha incrementado la esperanza de vida, por lo que se prestará más atención eventos de pequeña probabilidad y grandes consecuencias (ej. tsunamis, accidentes nucleares). A pesar de que estos tipos de incidentes, tienen una contribución marginal a la esperanza de vida de la población, generalmente pueden causar grandes daños y perturbaciones sociales.

Es necesario hacer notar que en las sociedades modernas una división absoluta entre riesgos tecnológicos o provocados por el hombre y los riesgos naturales es totalmente inapropiada. Aunque los desastres naturales pueden activarse por causas naturales, la magnitud de los riesgos naturales dependerá de las acciones y decisiones humanas. Por ejemplo, la decisión de vivir cerca de un volcán o construir bordos a lo largo de un río tendrá un efecto sobre la magnitud de estos riesgos naturales.

La historia demuestra que la generación y aplicación de técnicas de análisis de riesgo, han sido motivadas por las consecuencias de diferentes eventos o accidentes. A raíz de la ocurrencia de accidentes la sociedad a menudo exige nuevos y mejores sistemas de defensa y una regulación estricta del riesgo. Así, la aplicación de las técnicas de manejo de riesgo, contribuyen a la generación de un enfoque más proactivo que reactivo ante los desastres sin importar su naturaleza.

## 1.2 Definición y Percepción del riesgo

En términos cualitativos se entiende por **riesgo** la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores. La probabilidad de ocurrencia de tales eventos en un cierto sitio o región constituye una amenaza, entendida como una condición latente de posible generación de eventos perturbadores (CENAPRED, 2006).

En forma cuantitativa se ha adoptado una de las definiciones más aceptadas del riesgo, entendido como la función de tres factores: la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, es decir el peligro, la vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos. Esta definición se expresa en la ecuación de la figura 1.1. A continuación se analiza brevemente cada uno de estos conceptos y las características que deben tener en el análisis de riesgo.

$$\text{Riesgo} = f(\text{Peligro, Vulnerabilidad, Exposición})$$

$$R = f(P, V, E)$$

Figura 1.1 Definición de riesgo

El concepto de **percepción** puede caracterizarse como "una cuestión subjetiva, personal, presentación de la realidad acorde y concreta o a estímulos" (Pidgeon, 1992). Las dimensiones básicas subyacentes de la percepción de riesgo (o riesgo percibido) han sido investigadas por varios autores (Slovic, 1987; Vlek, 1996). Las dimensiones básicas de percepción del riesgo son las siguientes:

1. Grado potencial de daño o muerte
2. Medida física de los daños (zona afectada)
3. Magnitud de los daños sociales (número de personas involucradas)
4. Distribución del tiempo de los daños (efectos inmediatos y / o diferidos)
5. Probabilidad de consecuencias no deseadas
6. Control de las consecuencias
7. La experiencia y familiaridad con las consecuencias
8. Voluntad a la exposición (la libertad de elección)
9. La claridad, la importancia de los beneficios esperados
10. Distribución social de los riesgos y beneficios

Según Slovic (1987) las actitudes ante el riesgo dependen de dos factores, el terror al riesgo (incluyendo factores tales como la falta de control percibido, el temor, las posibles consecuencias catastróficas, fatales y la distribución no equitativa de riesgos y beneficios) y el riesgo desconocido (que se caracteriza por factores no observables y desconocidos, nuevos peligros).

### 1.3 Conceptos fundamentales sobre riesgo

Como se ha dicho, la existencia de un riesgo implica la presencia de un agente perturbador (fenómeno natural o generado por el hombre) que tiene la probabilidad de ocasionar daños a un sistema afectable (asentamientos humanos, infraestructura, planta productiva, etc.) en un grado tal, que constituye un desastre (ver Figura 1.2). Así, una inundación provocada por un desbordamiento de un río no constituye un riesgo por sí mismo, en caso de que se produjese en una zona deshabitada. Ya que no afectaría ningún asentamiento humano y por tanto, no produciría un desastre.



Figura 1.2 Esquema de riesgo

A continuación se presentan algunos conceptos básicos necesarios para entender los esquemas de riesgo en el mundo.

El **Peligro** se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado.

Para el estudio de los peligros, es importante definir los fenómenos perturbadores mediante parámetros cuantitativos con un significado físico preciso que pueda medirse numéricamente y ser asociado mediante relaciones físicas con los efectos del fenómeno sobre los bienes expuestos. En la mayoría de los fenómenos pueden distinguirse dos medidas, una de **magnitud** y otra de **intensidad**. La magnitud es una medida del tamaño del fenómeno, de su potencial destructivo y de la energía que libera. La intensidad es una medida de la fuerza con que se manifiesta el fenómeno en un sitio dado. Por ello un fenómeno tiene una sola magnitud, pero tantas intensidades como son los sitios en que interese determinar sus efectos.

La forma más común de representar el carácter probabilístico del fenómeno es en términos de un **periodo de retorno** (o de recurrencia), que es el lapso que en promedio transcurre entre la ocurrencia de fenómenos de cierta intensidad. El concepto de periodo de retorno, en términos probabilísticos, no implica que el proceso sea cíclico, o sea que deba siempre transcurrir cierto tiempo para que el evento se repita. En ocasiones se utiliza también el inverso del periodo de retorno llamada **tasa de excedencia**, definida como el número medio de veces, en que por unidad de tiempo, ocurre un evento que exceda cierta intensidad. Para muchos de los fenómenos no es posible representar el peligro en términos de periodos de retorno, porque no ha sido posible contar con la información suficiente para este tipo de representación. En estos casos se recurre a escalas cualitativas, buscando las representaciones de uso más común y de más utilidad para las aplicaciones en el tema específico.

La **Vulnerabilidad** se define como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas. En términos generales pueden distinguirse dos tipos: la vulnerabilidad física y la vulnerabilidad social. La primera es más factible de cuantificarse en términos físicos, por ejemplo la resistencia que ofrece una construcción ante las fuerzas de los vientos producidos por un huracán, a diferencia de la segunda, que puede valorarse cualitativamente y es relativa, ya que está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales, así como el grado de preparación de las personas. Por ejemplo, una ciudad cuyas edificaciones fueron diseñadas y construidas respetando un reglamento de construcción que tiene requisitos severos para proporcionar seguridad ante efectos sísmicos, es mucho menos vulnerable ante la ocurrencia de un terremoto, que otra en la que sus construcciones no están preparadas para resistir dicho fenómeno. En otro aspecto, una población que cuenta con una organización y preparación para responder de manera adecuada ante la inminencia de una erupción volcánica o de la llegada de un huracán, por ejemplo mediante sistemas de alerta y planes operativos de evacuación, presenta menor vulnerabilidad que otra que no está preparada de esa forma.

La vulnerabilidad física se expresa como una probabilidad de daño de un sistema expuesto y es normal expresarla a través de una función matemática o matriz de vulnerabilidad con valores entre cero y uno. Cero implica que el daño sufrido ante un evento de cierta intensidad es nulo, y uno, implica que este daño es igual al valor del bien expuesto. De dos bienes expuestos uno es más vulnerable si, ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad, sufre mayores daños.

La **Exposición o Grado de Exposición** se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y que son factibles de ser dañados. Por lo general se le asignan unidades monetarias puesto que es común que así se exprese el valor de los daños, aunque no siempre es traducible a dinero. En ocasiones pueden emplearse valores como porcentajes de determinados tipos de construcción o inclusive el número de personas que son susceptibles a verse afectadas.

El grado de exposición es un parámetro que varía con el tiempo, el cual está íntimamente ligado al crecimiento y desarrollo de la población y su infraestructura. En cuanto mayor sea el valor de lo expuesto, mayor será el riesgo

que se enfrenta. Si el valor de lo expuesto es nulo, el riesgo también será nulo, independientemente del valor del peligro. La exposición puede disminuir con el alerta miento anticipado de la ocurrencia de un fenómeno, ya sea a través de una evacuación o inclusive evitando el asentamiento en el sitio.

Una vez que se han identificado y cuantificado el peligro, la vulnerabilidad y el grado de exposición para los diferentes fenómenos perturbadores y sus diferentes manifestaciones, es necesario completar el análisis a través de escenarios de riesgo, o sea, representaciones geográficas de las intensidades o de los efectos de eventos extremos. Esto resulta de gran utilidad para el establecimiento y priorización de acciones de mitigación y prevención de desastres. Ejemplos de escenarios de peligro son la representación de los alcances de una inundación con los tirantes máximos de agua que puede tener una zona; distribución de caída de ceniza consecuencia de una erupción volcánica; la intensidad máxima del movimiento del terreno en distintos sitios debido a un sismo. Ejemplos de escenarios de riesgos serían el porcentaje de viviendas de adobe dañadas para un sismo de determinada magnitud y epicentro, el costo de reparación de la infraestructura hotelera por el paso de un huracán, el número de personas que podrían verse afectadas por el deslizamiento de una ladera inestable, etc.

#### **1.4 Manejo y evaluación del riesgo de inundaciones**

El agua es el recurso natural más valioso de un país por los beneficios sociales y económicos que de ella obtiene. Sin embargo, su mala gestión y la mala planificación del ordenamiento territorial, da lugar a que año con año un número cada vez mayor de personas, sufran las consecuencias de las inundaciones y las sequías (SINAPROC, 1993).

Por su ubicación y naturaleza geográfica, nuestro país, favorece la presencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos, como son los 25 huracanes que en promedio se producen anualmente y que afectan principalmente las zonas costeras en ambos litorales. Así mismo, asociados a estos fenómenos, también se presentan lluvias torrenciales e intensas precipitaciones que a su vez producen inundaciones fluviales y deslaves de tierra

Un punto de partida para este trabajo de investigación, consiste en la definición de la palabra *inundación*, que de acuerdo al último estudio publicado por el Gobierno Británico se presenta cuando el agua de un río, lago o mar, ocupa de forma temporal una porción de tierra que no se encuentra comúnmente cubierta por agua. Esta definición bastante representa una descripción más general que la propuesta por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) que la definen como “una inundación se produce cuando el gasto de avenidas generadas en una cuenca supera la capacidad del cauce. Cuando esto sucede, el exceso de agua escurre fuera de su cauce si control hacia las partes bajas (CENAPRED, 1994).

Una de las causas más frecuentes de las inundaciones son las crecidas que de acuerdo con la UNESCO se definen como la “elevación rápida y habitualmente breve del nivel de aguas en un curso hasta un máximo desde el cual dicho nivel desciende a menor velocidad. Este tipo de fenómeno se presenta debido a ciertas

condiciones climatológicas y físicas de la cuenca. Un análisis de estas condiciones permitirá identificar características que favorecen o retardan la ocurrencia de inundaciones en una región.

De las condiciones climatológicas se analiza la intensidad de la lluvia, que es la altura de la precipitación expresada en milímetros para un intervalo de tiempo dado. Lluvias con alta intensidad en periodos cortos incrementan los volúmenes escurridos de agua en una cuenca. De las características físicas se toma en cuenta:

- El tamaño de la cuenca, pues este es directamente proporcional al volumen escurrido y los escurrimientos máximos.
- La forma de la cuenca representa también una característica importante ya que se relaciona con el tiempo de concentración, que define el tiempo necesario desde el inicio de la precipitación para que toda la cuenca contribuya a la corriente en estudio.
- Las pendientes del terreno y la cobertura vegetal en la zona de drenaje también representan características fundamentales para definir el volumen de escurrimiento.

De acuerdo a su origen, las inundaciones se clasifican en pluviales, fluviales y costeras. Las primeras se dan como consecuencia de las precipitaciones que pueden ser en forma de lluvia, nieve o granizo, y éstas pueden ser generadas por huracanes, vientos normales, masas polares y procesos convectivos en la atmósfera. Las inundaciones fluviales se deben únicamente al desbordamiento de ríos (ver Figura 1.3a) y las costeras a la sobre-elevación del nivel medio del mar por la presencia de un huracán en las costas, fenómeno conocido como marea de tormenta (ver Figura 1.3b).



Figura 1.3 Inundación fluvial en el río Carrizal, Tabasco (panel a) e inundación costera en Nueva Orleans, Estados Unidos (panel b). (Fuente: internet)

Por sus efectos, los desastres asociados a inundaciones pueden tener importantes consecuencias en el ámbito económico y social, en el desarrollo de una región e inclusive llegar a comprometer la seguridad nacional. Por tanto, su impacto puede incidir significativamente en el bienestar y calidad de vida de sus habitantes.

A nivel mundial, se ha aceptado que el manejo del riesgo por inundaciones costeras o fluviales, requiere la generación de políticas de largo plazo enfocadas a prevenir y reducir el efecto de estos fenómenos. Esto requiere la coparticipación y corresponsabilidad de los diferentes niveles de gobierno, federal estatal y municipal y los sectores social y privado (CENAPRED, 2006).

En el mundo en general, los instrumentos que han sido identificados como indispensables en el manejo de riesgos por inundación son los mapas de extensión de inundación. Estos mapas ubican geográficamente la extensión de la mancha de inundación en una región dada asociada a una probabilidad de ocurrencia específica, definida en función del periodo de retorno de la avenida (ej. 1/30, 1/100 o 1/1000).

La Figura 1.4 presenta un ejemplo de un mapa de inundación para un caso histórico en la cuenca del río Pánuco (1955, a partir del cual se genera el plan DN3 del Ejército). Los resultados fueron generados por el equipo de ríos y costas del Instituto de Ingeniería de la UNAM y conforman un ejemplo excelente del uso de un modelo hidrodinámico bidimensional para la generación de este tipo de información.

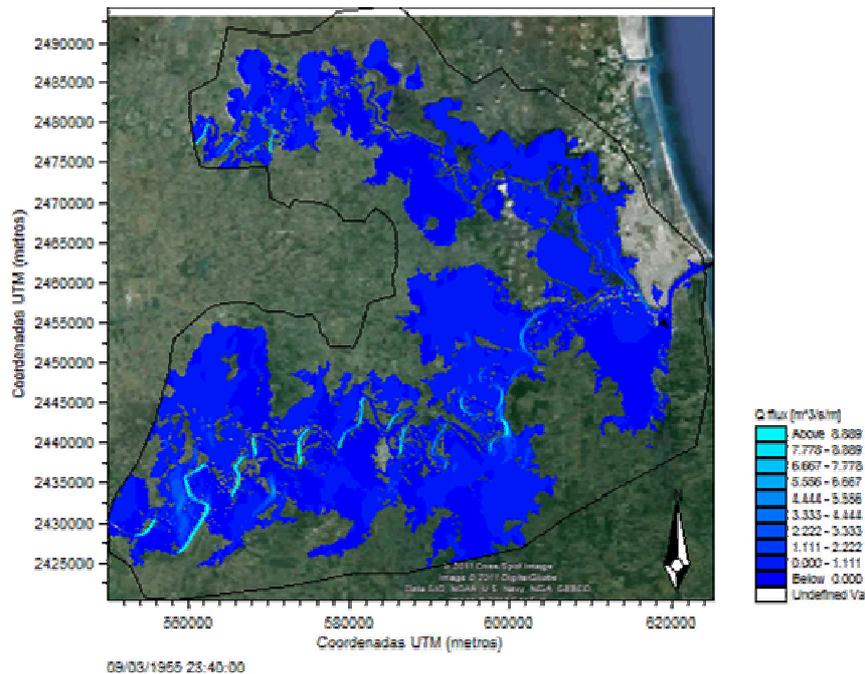


Figura 1.4 Mapa de inundación generado para la gran inundación del río Panuco en 1955 (Pedrozo-Acuña et al. 2011).

Por otra parte, un elemento clave para reducir el impacto destructivo que provocan las inundaciones, es la implementación de una estrategia efectiva de prevención. Para ello es necesario tomar acciones en cada una de las etapas identificadas del ciclo de la prevención mostrado en la Figura 1.5.

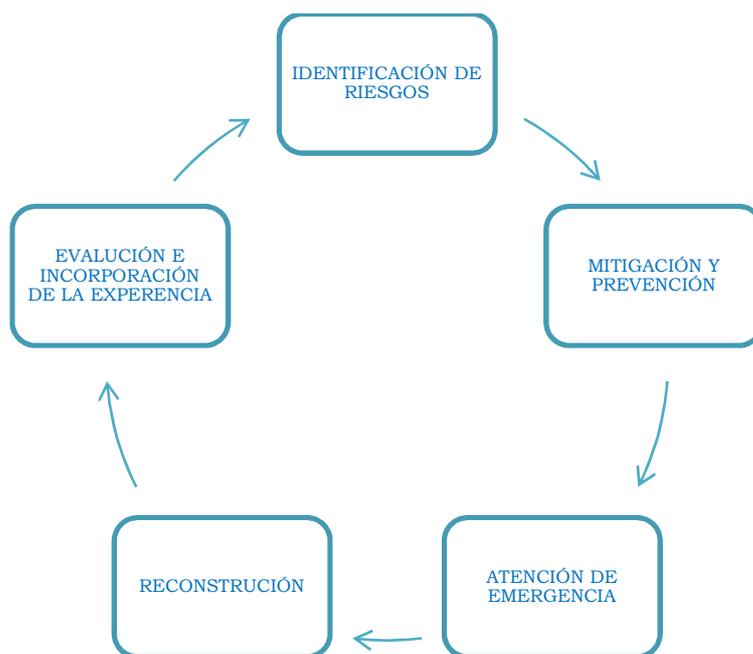


Figura 1.5 Ciclo de prevención.

Estas etapas incluyen:

**Identificación de Riesgos:** conocer los peligros y amenazas a los que se está expuesto; estudiar y conocer los fenómenos perturbadores identificando dónde, cuándo y cómo afectan. Identificar y establecer, a distintos niveles de escala y detalle, las características y niveles actuales de riesgo, entendiendo el riesgo como el productor del peligro (agente perturbador), la vulnerabilidad (propensión a ser afectado) y la exposición (el valor del sistema afectable).

**Mitigación y prevención:** basado en la identificación de riesgos, consiste en diseñar acciones y programas para mitigar y reducir el impacto de los desastres antes de que éstos ocurran.

**Atención de emergencias:** se refiere a acciones que deben tomarse inmediatamente antes, durante y después de un desastre con el fin de minimizar la pérdida de vidas humanas, sus bienes y la planta productiva, así como preservar los servicios públicos y el medio ambiente, sin olvidar la atención prioritaria y apoyo a los damnificados.

**Recuperación y reconstrucción:** acciones orientadas al restablecimiento y vuelta a la normalidad del sistema afectado (población y entorno). Esta etapa incluye la reconstrucción y mejoramiento de infraestructura y servicios dañados o destruidos.

**Evaluación del impacto e incorporación de la experiencia:** consiste en valorar el impacto económico y social, incluyendo daños directos e indirectos. Tiene entre otras ventajas: determinar la capacidad del gobierno para enfrentar las tareas de

reconstrucción, fijar las prioridades y determinar los requerimientos de apoyo y financiamiento, retroalimentar el diagnóstico de riesgos con información de las regiones más vulnerables y de mayor impacto histórico y calcular la relación costo-beneficio de inversión en acciones de mitigación.

La experiencia adquirida en las etapas anteriores del ciclo de la prevención debe incorporarse para redefinir políticas de planeación, mitigación y reducción de vulnerabilidades, y evitar la reconstrucción del riesgo, es decir que un mismo fenómeno vuelva a impactar en el futuro de manera semejante.

El manejo del riesgo por inundación como un proceso se ha debatido ampliamente, (UNDRO, 1991; Placa, 1997) con respecto a los actores involucrados en el proceso. Es más útil interpretar el manejo de riesgos como un proceso que consiste en tres diferentes conjuntos de acciones, según los operadores implicados.

El primero es el conjunto de acciones que se necesitan para operación de un sistema existente. Cuando el sistema ya no es suficiente para satisfacer las necesidades de las personas, por ejemplo, debido a cambios en el uso de la tierra, aumento de la población, o el cambio climático, iniciará el siguiente conjunto de acciones: la planificación de un sistema nuevo o revisado, que se adapta a los cambios de las condiciones. El proceso de planificación conduce a una decisión para el nuevo sistema. Este conjunto es el tercero de ellos, el proceso de obtención de un diseño óptimo para y la construcción de un proyecto.

Sin embargo, muchos ingenieros hidráulicos consideran sólo el tercer nivel como parte de su actividad. Para ellos, la solución a problemas de inundaciones es una cadena lógica iniciar con estudios de inundación por métodos hidrológicos, tales como análisis de valores extremos, selección de una descarga de diseño, tomar una decisión sobre el sistema estructural con la aprobación del diseño, y aplicar lo que se ha decidido, en otras palabras, la solución a los problemas de inundación se considera una tarea de ingeniería clásica.

En cierto modo, esto sigue siendo cierto para las tareas de algunos ingenieros hidráulicos, es decir los que están llamados a hacer el diseño y la construcción de un sistema de protección de inundaciones, una vez que se ha decidido que este sistema será construido. En un marco moderno de diseño, esta tarea también puede ser muy exigente, ya que es necesario hacer un trabajo de ingeniería más eficiente e incluyendo una evaluación exhaustiva de la seguridad del sistema ingenieril contra fallas (Placa, 2000; Vrijling, 1998; Vrijling et al., 1995).

En un nivel más alto, sin embargo, el enfoque de ingeniería debe verse como incrustado en el proceso de toma de decisiones de planificación para el manejo de riesgos de inundación. No sólo los ingenieros están involucrados en este proceso, también muchos grupos sociales, políticos y personas que están directamente expuestas a inundaciones. La secuencia de los tres conjuntos de acciones es consecuencia del hecho de que nunca se realiza la tarea de administración de riesgos de inundación. Cada generación debe reconsiderar sus opciones y establecer sus propias prioridades de acuerdo con el sistema social.

### 1.4.1 Administración de riesgos de inundaciones

La administración de riesgos por inundación en un sentido estricto es el proceso de controlar una situación de riesgo de inundación existente. En un sentido más amplio, incluye la planificación de un sistema, lo que reducirá el riesgo de inundaciones.

Estos dos aspectos del manejo de riesgo por inundación se considerarán por separado, comenzando con la gestión de un sistema que consiste en los procesos indicados en la Figura 1.6.

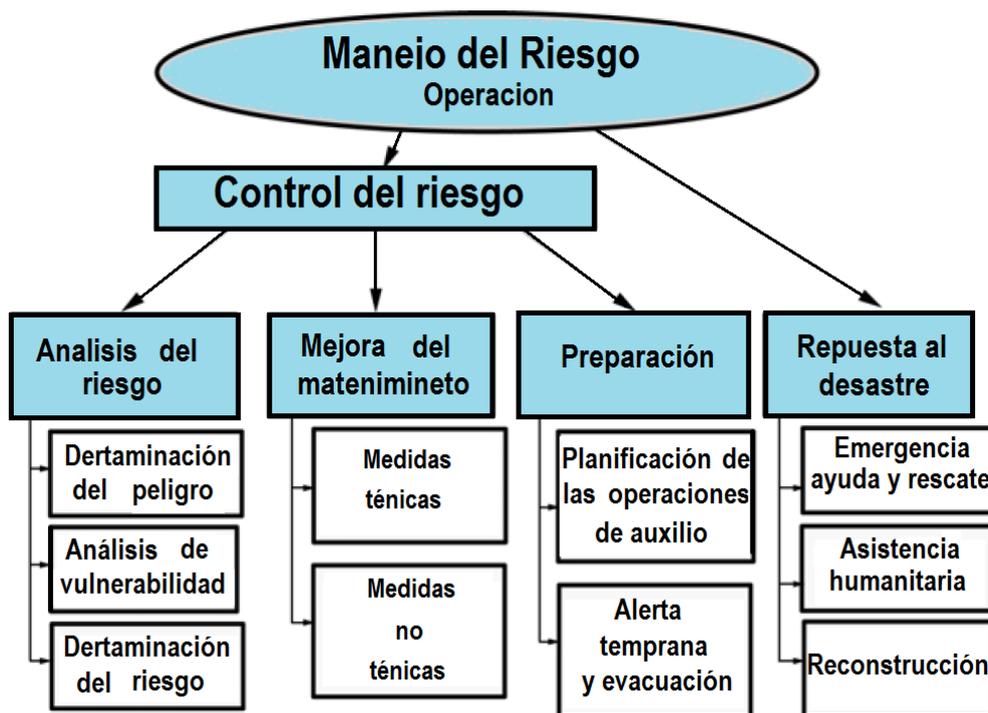


Figura 1.6 Etapas del manejo de riesgo (Eikenberg, 1998).

Administración de riesgos para el funcionamiento de un sistema de protección de inundaciones es la suma de acciones para un enfoque racional para la mitigación de desastres. Su propósito es el control de desastres por inundación, en el sentido que se está preparado para una inundación y minimizar su impacto.

Incluye el proceso de análisis de riesgo, que proporciona la base para las decisiones de manejo a largo plazo para el sistema de protección de inundaciones. La mejora continua del sistema requiere una reevaluación de los riesgos existentes y una evaluación de los riesgos en función de la información disponible más reciente: en nuevos datos, en nuevos desarrollos teóricos o en nuevas condiciones de límite, por ejemplo por cambio climático.

El análisis de riesgo constituye la base para las decisiones de mantener y mejorar el sistema, que es la segunda parte de la operación de un sistema existente. Es obvio que un sistema requiere mantenimiento continuo para siempre estar funcionando como estaba previsto, y que nuevos conceptos de protección pueden requerir mejoras locales del sistema existente. Una tercera parte del manejo es la etapa de preparación, cuya finalidad es proporcionar el sistema de soporte de decisiones necesarias para el caso que ha fallado el sistema. Es evidente que ninguna solución técnica a inundaciones es absolutamente segura. Incluso el sistema no siempre supone que se va hacer, es difícilmente posible ofrecer protección contra cualquier inundación concebible. Siempre existe un riesgo residual, debido a un error de sistemas técnicos, o debido a la inundación extrema que supera la inundación de diseño. Un ejemplo es la inundación del río Oder de 1997 (Bronstert et al 1999; Grünwald et al., 1998).

Un paso importante en la mejora de un sistema de protección de inundaciones es la prestación de mejores sistemas de alerta. Obviamente, la base para un sistema de alerta tiene que ser la prevención, que permite la detección temprana y la cuantificación de una inminente inundación a que está expuesta la población.

El primer paso en la evaluación del riesgo por inundaciones es el diseño de mapas de riesgo. El mismo tipo de mapas para la administración de riesgos operacionales son también la base para la toma de decisiones para casos de desastre.

La evaluación del riesgo, sin embargo, no se detiene a evaluar el riesgo existente. Más bien, analiza cada una de las alternativas estructurales o no estructurales para mitigar los daños por inundaciones. Hasta ahora buenas soluciones técnicas integran la protección de zonas rurales y las zonas urbanas, a través de proyectos de drenaje urbano, regulación de flujo en las zonas rurales y municipales con puentes y alcantarillas diseñados con la inundación de diseño. Estructuras de diques y embalses son opciones técnicas habituales, pero también existen otras posibilidades adaptadas a la situación local, como canales de derivación y pólderes en ríos. La evaluación de riesgos, por ejemplo, también incluye la opción de no hacer nada técnicamente pero se prepara para cuando la inundación aparece, es decir, se prepara para vivir con la situación de las inundaciones.

## **1.5 Incertidumbre**

### **1.5.1 Definición**

El término incertidumbre se refiere a algo que no se conoce con total exactitud, tales como el resultado del lanzamiento de un dado. En general se distinguen dos tipos principales de incertidumbre: inherente y la incertidumbre de conocimiento (Jonkman, 2007).

**Incertidumbre inherente o aleatoria** surge a través de la variabilidad (natural) o aleatoriedad en los estados de un sistema. En el ejemplo del dado, La probabilidad (teórica) de cada resultado (1, 2...6) es de 1/6 por lanzamiento. De la misma manera, un volado con una moneda puede dar como resultado cara o cruz y el gasto máximo en un río es diferente año con año. En teoría, esta probabilidad puede evaluarse desde un punto de vista de la frecuencia de ocurrencia si se tiene un número infinito de observaciones.

La **incertidumbre en el conocimiento** o incertidumbre epistémica, surge como su nombre lo indica de una falta de conocimiento. En este caso, el cálculo de la probabilidad está basado en un número limitado de datos o en modelos con limitaciones en la descripción física de los procesos, que a su vez hacen el resultado incierto. En un sentido científico, es posible reducir o eliminar por completo las incertidumbres del conocimiento con el uso de mediciones, por medio de la observación y experiencia (Bedford et al. 2002).

Por otra parte, las incertidumbres inherentes representan la aleatoriedad de la naturaleza, por lo que no es imposible reducirlas.

Vrouwenvelder et al. (2000) muestran que la división anterior entre dos tipos principales de incertidumbre se aplica a diferentes sectores, aunque es posible utilizar diferentes palabras para su descripción. Van Gelder (2000) propone otra clasificación de incertidumbres (ver también Apostolakis, 1990), en ella las incertidumbres inherentes existen en espacio y tiempo. Mientras que las incertidumbres del conocimiento se dividen en incertidumbres de modelo y estadísticas.

La incertidumbre de modelo representa el hecho de que los procesos y fenómenos que se describen no son completamente conocidos y comprendidos. Por su parte, la incertidumbre estadística nace de la falta de certeza de que la función estadística elegida proporcione una descripción adecuada del fenómeno. La incertidumbre estadística se subdivide a su vez en incertidumbre debida al tipo de distribución y a la definición de los parámetros de esta distribución.

La Figura 1.7 presenta un resumen de las incertidumbres descritas en esta sección. Cabe señalar que las fronteras entre las sub-categorías de incertidumbre no son totalmente distintas. Sin embargo, se considera que la clasificación propuesta de incertidumbres es un marco de trabajo útil para una identificación estructurada de las incertidumbres y su tratamiento en el manejo de riesgos.

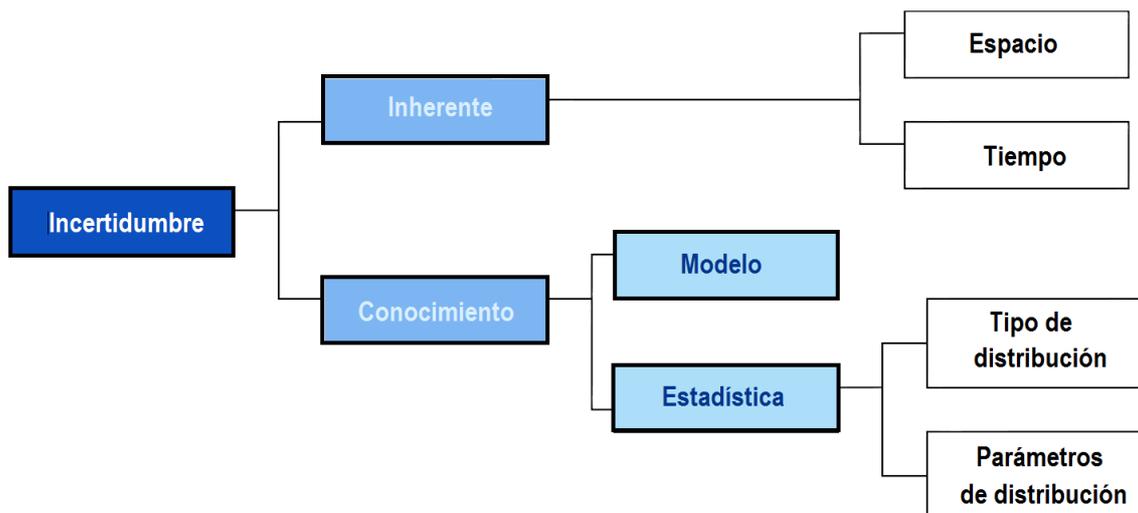


Figura 1.7 Etapas del manejo de riesgo (Eikenberg, 1998).

### 1.5.2 Estimación de la incertidumbre

A nivel global, existe la impresión de que como hidrólogos o ingenieros hidráulicos no podemos ignorar las incertidumbres inherentes al realizar predicciones. Por el contrario, existen autores que señalan que se ha subestimado gravemente el problema (Andréassian et al., 2007).

Las discusiones se han centrado en dos preguntas, cómo estimar las incertidumbres y cómo presentar los resultados de las investigaciones a la población en general y a los tomadores de decisiones. Entre otros, Hall et al. (2007), Todini et al. (2007) y Montanari (2007), han manifestado que tanto los usuarios como los tomadores de decisiones necesitan entender la base para la estimación de la incertidumbre y su significado. Estos autores sugieren que la mejor forma lograr lo anterior es por medio del uso de métodos de verosimilitud, de tal suerte que las incertidumbres pueden ser interpretadas directamente en términos de la probabilidad de un resultado futuro (observación).

Beven (2008) sugiere que esta sería la mejor forma de hacerlo en la práctica, si estamos seguros de que:

1. Nuestros modelos son representaciones adecuadas de la respuesta del sistema.
2. Que se puede encontrar un modelo de error apropiado para definir una función de probabilidad adecuada y
3. Que estamos seguros de que la estructura de error está basada en la calibración y predicción del modelo.

Por desgracia, es difícil estar seguro de cualquiera de estas condiciones con excepción de los experimentos hipotéticos que se realizan en modelos (ej.

Mantova et al, (2006); mientras que en aplicaciones reales, es de esperarse que todas estas condiciones sean inválidas. Sabemos que:

1. Nuestros modelos son necesariamente aproximaciones de la realidad.
2. Nuestros datos están sujetos a errores no estacionarios y
3. Cuando se procesan datos de entrada con errores por medio de un modelo no lineal, la estructura de los residuos de los resultados será compleja y no estacionaria.

Por lo tanto, todos los métodos de verosimilitud estarán equivocados, dado que sólo simplifican la estructura de los errores. Sin embargo, al igual que en el caso de modelos que ignoran la física pero que a veces pueden ser útiles, no hay ninguna razón que justifique no incluir a los métodos de verosimilitud como aproximaciones útiles, al menos en algunos casos. La utilidad de los resultados dependerá de qué tan bien se satisfacen las hipótesis. Por lo tanto, es necesario aplicar una comprobación cuidadosa de las mismas; algo que no siempre ha sido evidente en el campo de la hidrología (Beven, 2008).

Esto no significa que el uso de cualquier método de verosimilitud [como permite, por ejemplo, la metodología (GLUE, por sus siglas en inglés)] sea necesariamente mejor que estimar correctamente las verdaderas incertidumbres (ej. Smith et al., 2008).

Es difícil estar seguros de qué método es el más apropiado para la estimación de la incertidumbre si antes no se realiza una evaluación adecuada de la información que se considera como verdadera en los datos utilizados. En otras palabras el problema no es sólo estadístico, sino también del conocimiento de la naturaleza de las diferentes fuentes de incertidumbre y en particular de su no carácter no estacionario (Beven, 2008). Además del elemento de lo inesperado, asociado a la imprevisibilidad de la naturaleza y a su incertidumbre (Sivakumar, 2008).

Por lo tanto, es normal diferenciar entre incertidumbres aleatorias (estadísticas) y epistémicas (de conocimiento). Es posible tratar a las primeras en términos de probabilidades y verosimilitudes formales y sus errores deberán tener una estructura clara por definición. Lo anterior no es necesariamente cierto para el concepto de incertidumbres epistémicas, que engloba diferentes factores que afectan la precisión e incertidumbre con las que hacemos predicciones.

Las incertidumbres epistémicas (respecto al modelo, sus condiciones de frontera e iniciales) son importantes en aplicaciones reales. Sin embargo, si se desea representarlas en términos de probabilidades y verosimilitud, se hará necesariamente como una aproximación. En algunas ocasiones, esta aproximación podría ser útil para compensar la falta de conocimiento de las fuentes de incertidumbre (ej. en las estrategias de asimilación de datos para predicciones en tiempo real). En otros casos, podría llevar a una estimación errónea de parámetros y predicciones.

Se debe reconocer que es necesario esperar lo inesperado: resultado de variables desconocidas que todavía no se reconocen como importantes y que más aun no

serán reconocidas hasta que algo inesperado sobre ellas sea observado (y las predicciones de los modelos fallen).

Por supuesto, no hay ninguna forma real para permitir lo inesperado, pero es posible ganar más conocimiento a partir del estudio de las fallas de modelos que si simplemente se les compensa por medio de un error estadístico.

En la actualidad, para el caso de la generación de mapas de inundación, no es posible recomendar un método en específico para la estimación de la incertidumbre asociada a estos resultados. Por el contrario, existen diferentes filosofías sobre cómo estimar las incertidumbres y tenerlas en cuenta en los datos de entrada, las mediciones de campo y los errores inherentes al modelo numérico.

### **1.5.3 ¿Cómo se pueden reducir las incertidumbres en el futuro?**

Las respuestas a esta pregunta es muy evidente: mediante la mejora de los modelos utilizados (con mayor conocimiento de la física), mejorando la caracterización de los sitios de estudio (ej. rugosidades, vegetación, tipo de suelo), y definiendo de una mejor manera las condiciones de frontera y de inicio en los modelos numéricos.

Todos estos factores mejoran la precisión de una predicción numérica, tal y como ha quedado demostrado en el corto plazo con las predicciones del clima, las cuales han sido notablemente mejoradas con la asimilación de observaciones (Beven, 2008).

Los parámetros a definir en un modelo hidrodinámico (ej. rugosidad) pueden ser variables en espacio y tiempo. Si somos capaces de mejorar la descripción de la realidad con un modelo se abre una puerta a la reducción de la incertidumbre. Por otra parte, las relaciones entre caudales y características de una cuenca podrían mejorarse con nuevas técnicas de medición y con la obtención de datos más precisos. Esto permitiría la restricción de las incertidumbres en las predicciones del modelo de flujos de inundación.

La evaluación de la incertidumbre en la generación y modelación de mapas de inundación representan una oportunidad en este sentido. No se puede negar que la ciencia hidrológica y la hidráulica aplicadas a problemas del mundo real representan ciencias altamente inciertas.

Para hacer avanzar ambas ramas del conocimiento se tiene que hacer frente a esas incertidumbres y encontrar formas de restricción. El primer paso en este proceso consiste en encontrar formas de representación realistas de las fuentes de incertidumbre. Esto significa re-examinar las técnicas de recolección de datos y parametrización de modelos (y la forma en la que se presenta este último). En forma más rigurosa no debemos de estar satisfechos con una predicción determinista (Beven, 2008).