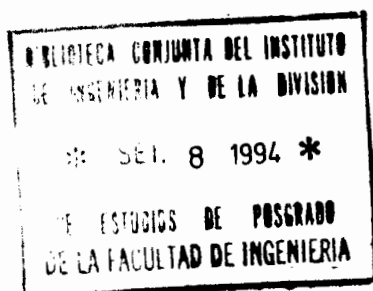


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA



PRONOSTICO DE AVENIDAS

M en I FRANCISCO J. PINEDO DE ANDA

1. EL PROBLEMA DEL PRONOSTICO METEOROLOGICO

1.1 Desarrollo y estado de los pronósticos meteorológicos

Los primeros pronósticos de tormentas se elaboraron en Holanda (1860), Inglaterra (1861), Francia (1863) y Estados Unidos (1870). La herramienta básica utilizada era el mapa sinóptico.

En dicha época ya existían las bases para un enfoque más científico de los problemas de pronóstico meteorológico. J. Bjerknes en 1904 hizo el primer esfuerzo por aplicar los principios de la mecánica y termodinámica al pronóstico meteorológico; sin embargo, la carencia de mediciones regulares de la atmósfera no permitía emplear tal metodología.

El uso de radiosondas, que suministran información regular de humedad, presión y temperatura de la atmósfera superior, permitió la representación tridimensional de ésta, en la década de 1930-1940.

El radar meteorológico, usado desde 1940, representó para el meteorólogo una valiosa herramienta para localizar y rastrear fenómenos severos y medir características de las tormentas, entre otras muchas aplicaciones más.

Los avances en la radiocomunicación logrados entre 1920 y 1950, principalmente la utilización del facsímil, teletipo y radio para transmitir y recibir datos, facilitaron la elaboración de los pronósticos.

A pesar de los avances mencionados, el pronóstico atmosférico permaneció como un arte hasta la mitad de este siglo, momento en el que comenzaron a emplearse modelos numéricos operacionales (década de 1950-1960).

Un factor determinante para el desarrollo de los pronósticos numéricos, fue el advenimiento de las computadoras electrónicas. Veinte años después de su uso operacional, el pronóstico numérico ha aumentado su complejidad desde modelos barotrópicos hasta modelos baroclínicos. Su calidad también se ha incrementado, al aplicarse sistemáticamente los análisis de regresión.

Uno de los últimos sucesos importantes es el empleo de los satélites meteorológicos a partir de 1960; mediante ellos se obtienen imágenes de los sistemas atmosféricos que afectan a la tierra. Además se han desarrollado métodos radiométricos para sondear la atmósfera desde los satélites; su aplicabilidad dependerá del mejoramiento en la instrumentación y el diseño de métodos perfeccionados capaces de asimilar los datos de satélite en los modelos de pronóstico numérico.

Se considera que estos satélites meteorológicos permitirán lograr avances mayores en el campo del pronóstico.

Los cambios que han ocurrido en la elaboración de los pronósticos se deben en resumen a:

- 1) El adelanto tecnológico general
- 2) El conocimiento físico de los fenómenos, derivado de la observación
- 3) La comprensión de los aspectos teóricos que gobiernan los fenómenos.

Respecto a los pronósticos generales, el avance más importante se ha alcanzado en el campo de la presión y los campos de viento asociados; gracias a esto pueden pronosticarse las características de gran escala, del flujo en los niveles altos de la atmósfera, con tres días y en ocasiones hasta con cinco días de anticipación.

Desafortunadamente, el progreso en la elaboración de pronósticos de temperatura y precipitación, no ha sido paralelo al anterior. Aunque se ha logrado mejorar el pronóstico de ocurrencia de precipitación, el aspecto cuantitativo todavía tiene considerables deficiencias.

Los radares Doppler y otras nuevas herramientas tales como sensores acústicos, ofrecen oportunidades promisorias en el pronóstico de tormentas severas.

El pronóstico de trayectoria de huracanes ha mejorado entre 1958 y 1970, en parte por el desarrollo y utilización de una variedad de métodos estadísticos y por el advenimiento del pronóstico numérico.

En el futuro, cuando se encuentren métodos más económicos y precisos que permitan medir las características de la atmósfera en un mayor número de puntos será posible, por ejemplo, aplicar modelos de mallas finas para el pronóstico de trayectorias y evolución de huracanes y tormentas severas.

Se reconoce, sin embargo, que el concepto que debe investigarse con prioridad, es el pronóstico de la distribución espacial y temporal de tormentas locales severas.

Algunas sugerencias de acciones por ejecutar, hechas por la Sociedad Americana de Meteorología (Pielke, 1977) son, entre otras:

1. Mejorar los métodos de pronóstico de cantidad, tipo, duración y localización de la precipitación.
2. Desarrollar métodos para obtener estimaciones precisas de lluvia en terrenos montañosos, utilizando datos de satélite, pluviómetros y radar.

3. Comprender plenamente la influencia del terreno en la formación, evolución y disipación de las tormentas.
4. Tratar de conocer mejor los mecanismos físicos que pueden producir la persistencia de un sistema meteorológico particular.

1.2. Tipos de pronóstico meteorológico

Un pronóstico es la conjetura de la ocurrencia de un suceso y se hace basándose en ciertas leyes físicas y su evolución en el tiempo.

Los pronósticos meteorológicos pueden clasificarse, según Willet (1951), de acuerdo con su período de validez en cuatro categorías:

1. A muy corto plazo. Comprende períodos hasta de 18 hs.; en este tipo de pronósticos es posible obtener eficiencias entre 90 y 95%, con un 50% de probabilidad.
2. A corto plazo. Se extienden desde 12 a 48 hs. Las eficiencias fluctúan entre 70 y 90%, con un 50% de probabilidad.
3. A mediano plazo. Para períodos que incluyen del segundo al sexto o séptimo día. La eficiencia alcanzada al cuarto día es del orden de 50 a 55% con un 50% de probabilidad, decreciendo a partir de ese instante.
4. A largo plazo. Cuando se elaboran para períodos mayores de una semana; este tipo de pronóstico es estrictamente cualitativo.

El principal problema del pronóstico se deriva de su categoría de metodología empírica y subjetiva. El pronóstico práctico fue, hasta hace poco, un método de extrapolación al futuro cercano, de las condiciones actuales y la tendencia de la evolución del estado del tiempo, con base en experiencia si-

nóptica, reglas empíricas y probabilidades basadas en análisis estadísticos.

1.2.1. Técnicas de pronóstico. Básicamente las técnicas de pronóstico meteorológico se pueden dividir en dos clases; de extrapolación y físicas.

1.2.1.1. Técnicas de extrapolación. Emplean exclusivamente los patrones atmosféricos presentes y pasados, incluyendo la tendencia actual y, en algunos casos, los patrones de aceleración. Se utilizan para elaborar pronósticos de los cuatro tipos mencionados. Las técnicas de extrapolación se clasifican en:

a) Estadísticas.- Se utilizan generalmente para indicar cambios de presión, temperatura y precipitación a largo plazo; sólo se aplican ocasionalmente en pronósticos diarios.

Son simples en sus principios, basándose esencialmente en: persistencia y tendencia, análisis periódico y correlaciones lineales múltiples. No permiten pronosticar la ocurrencia de fenómenos excepcionales, que son los de mayor importancia práctica. Su aplicación, sin considerar ningún concepto físico, genera pronósticos con un 50% a 60% de confiabilidad. Se define aquí la confiabilidad como el cociente entre el valor pronosticado de la variable y el valor observado de la misma, expresado en porcentaje.

b) Sinópticos.-Son las técnicas más comunes para elaborar pronósticos a corto plazo; se basan en el análisis de mapas sinópticos, los que muestran las condiciones atmosféricas prevalecientes en una región extensa.

Para efectuar el análisis es necesario contar por lo menos con dos mapas; uno que represente la situación actual, y otro que indique el estado del tiempo en algún momento precedente. Al comparar dichos mapas se podrá conocer la evolución general de los sistemas y el posible desplazamiento experimentado por éstos en el período considerado. Con base en el comportamiento

anterior de dichos sistemas y las condiciones atmosféricas actuales, se plantean conjeturas respecto a las condiciones que se espera prevalezcan durante el lapso por pronosticar. Su aplicación genera pronósticos a 24 hs., con 90-95% de confiabilidad y con 70 a 90% para pronósticos hasta de 48 hs.

c) Matemáticas.-Se basan en las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento, expresadas en varias formas. Actualmente no es posible aplicar este tipo de técnicas para elaborar pronósticos precisos por las siguientes razones:

1. Se deben procesar una gran cantidad de datos para calcular el estado futuro de la atmósfera, problema que sin duda será resuelto.
2. La magnitud de las variaciones aleatorias locales de los elementos del tiempo, es grande en comparación con la tolerancia permisible de los errores observacionales.
3. No existe un modelo completo que explique como se efectúa el proceso de circulación general de la atmósfera y que sirva como una base física o teórica para el cálculo.

Además, se desconoce hasta qué punto el futuro estado de la atmósfera está determinado por el estado anterior, o en qué grado deben de tomarse en consideración las fuentes de energía internas o externas al sistema.

Por tal motivo, las técnicas matemáticas deben vencer el mismo obstáculo que las otras menos rigurosas: La necesidad de comprender mejor la mecánica de la circulación general atmosférica.

1.2.1.2. Técnicas físicas. Este tipo de técnicas se basan en la conside-

ración de factores físicos que son capaces de modificar el estado actual y la tendencia del estado atmosférico, a través del tiempo.

En el caso de pronósticos locales detallados, resulta muy útil estudiar las propiedades físicas de las masas de aire, como son: la distribución vertical de la humedad y la estabilidad vertical, junto con los factores físicos que las modifican. Dicho estudio se hace basándose en diagramas termodinámicos.

Según Willet (1951), los pronósticos meteorológicos mejorados pueden elaborarse solamente a partir de una mejor comprensión física de la mecánica de la circulación general de la atmósfera, y no a partir de manipulaciones estadísticas y sinópticas.

1.3. Factores que gobiernan la precipitación

El tipo de precipitación, su intensidad y variabilidad en el espacio y en el tiempo, dependen básicamente de factores físicos que pueden clasificarse en: climatológicos, permanentes y eventuales, (Almazán y otros, 1978 a) (Fig. 1.1.).

1.3.1. Los factores climatológicos.- Son sistemas que manifiestan una marcada recurrencia estacional. Los sistemas de este tipo que ejercen mayor influencia sobre las condiciones atmosféricas de nuestro país son: los anticiclones subtropicales, los vientos alisios y la zona de convergencia intertropical.

1.3.2. Los factores permanentes son: situación geográfica, orografía, distribución de tierras y mares, y naturaleza propia del terreno. El tipo de suelo ejerce una influencia muy pequeña sobre la nubosidad y precipitación.

1.3.3. Los factores eventuales son perturbaciones atmosféricas que se clasifican de acuerdo a sus dimensiones en función del tiempo y del espacio en: sistemas de escala sinóptica, de mesoescala y de escala local o convectiva. (Fig. 1.2).

1.3.3.1. Sistemas de escala sinóptica

Tienen una duración de días a semanas y son capaces de afectar a la mayor parte del territorio nacional; pueden subclasificarse en sistemas extratropicales y tropicales.

1.3.3.1.1. Los sistemas sinópticos extratropicales con los que se asocia una precipitación significativa en el país son: corrientes de alta velocidad; vaguadas y bajas superiores; y los sistemas frontales.

Entre ellos, los sistemas frontales son los más importantes productores de precipitación en México. Las condiciones más críticas se presentan cuando interactúan estos sistemas, ya sea con las corrientes de alta velocidad o con las vaguadas y bajas superiores.

1.2.2.1.2. Sistemas sinópticos tropicales.-Se pueden clasificar en ciclones tropicales, ondas tropicales y líneas o zonas de confluencia.

-Ciclones tropicales.-Existen tres categorías dependiendo de la intensidad de sus vientos máximos: depresión tropical si los vientos no exceden de 50 kph; tormenta tropical si los vientos fluctúan entre 50 y 120 kph; y huracán cuando los vientos son de 120 kph o mayores.

-Las ondas tropicales no producen precipitación tan intensa como los huracanes; sin embargo la zona afectada frecuentemente es mayor y sus efectos pueden persistir por más tiempo. Consisten en deformaciones del flujo de los vientos alisios y están formados por aire relativamente caliente y húmedo.

-Las líneas de confluencia son zonas donde tienden a converger vientos de distinto origen. Estos sistemas se forman dentro de una misma masa de aire cálido, húmedo e inestable, donde fácilmente se generan nubes de gran desarrollo vertical, productoras de precipitación importante.

1.3.3.2. Sistemas de mesoescala

Estos sistemas pueden afectar una zona del orden de miles de kilómetros cuadrados durante uno o dos días. Las perturbaciones atmosféricas de este tipo normalmente se relacionan con sistemas de escala sinóptica. Entre estos sistemas tenemos:

1.3.3.2.1. Líneas de turbonadas.- Algunos sistemas frontales de movimiento rápido tienden a producir entre 100 y 200 km adelante de la línea frontal, una línea de cumulonimbus (CB) capaces de ocasionar fuerte precipitación, muchas veces más importante que la que puede generar el mismo frente.

Las líneas de CBs que se forman en las bandas alimentadoras de los huracanes, también pueden catalogarse dentro de la mesoescala por sus dimensiones y período de actividad. Estas nubes producen abundante precipitación y ocasionalmente tormentas severas.

1.3.3.2.2. Tormentas orográficas.- Las cadenas de CBs que se forman a lo largo de las principales cordilleras pueden ocasionar chubascos frecuentes e intensos. Estas formaciones nubosas se generan por la acción de los vientos al chocar contra las montañas.

1.3.3.3. Sistemas de escala local o convectiva

En México la mayor parte de la precipitación se registra en forma de chubasco, o sea, precipitaciones de corta duración pero relativamente intensas que se inician y terminan bruscamente.

Estos sistemas se originan por la actividad convectiva que eleva el aire húmedo e inestable. En el momento que una nube cumulonimbus (CB) comienza a precipitar también se inicia su proceso de disipación.

En dicho proceso, la nube se fragmenta y los restos se transforman en distintos tipos de nubes: cirrus en la parte superior; altocumulus en su porción media y estratocúmulus en la parte inferior. Estas últimas pueden ocasionar lloviznas intermitentes que ocasionalmente perduran algún tiempo después del chubasco.

Para el hidrólogo, lo más importante es conocer el área que puede afectar una tormenta y la intensidad de la precipitación. La extensión cubierta por la lluvia, depende de las dimensiones de la nube que la produce y de la trayectoria de la misma.

Las características de los chubascos, sin embargo, dificultan la medición de la precipitación por medios convencionales por lo que es necesario recurrir a reportes de radiosondeo, observaciones de superficie, etc., para obtener indicios que permitan inferir la existencia de chubascos.

1.4. Datos que se requieren para elaborar los pronósticos.

Fundamentalmente son: temperatura, presión y humedad. Si se conoce además: la velocidad y dirección del viento, el punto de rocío, el tipo de nubes, la medida de la cobertura del cielo y el estado del tiempo, se podrán elaborar pronósticos más precisos.

Los valores de las variables mencionadas se proporcionan para distintos puntos, mediante el programa de observación sinóptica, para los tiempos mundialmente establecidos, que son: 0000, 0600, 1200 y 1800 (GMT).

Para medir la temperatura, humedad y presión a diferentes niveles de la atmósfera se utilizan radiosondas que son instrumentos que contienen sensores electrónicos mediante los cuales se transmiten los datos a una estación terrestre. Ahí se procesan los valores para elaborar los reportes sinópticos en un código completamente numérico. La altura que se sondea es de 30 kilómetros.

En nuestro país las principales fuentes de información meteorológica son las Secretarías de: Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) a la que pertenece actualmente el Servicio Meteorológico Nacional; Comunicaciones y Transportes (SCT) a través del SENEAM (Servicio Nacional del Espacio Aéreo Mexicano, antes RAMSA); la Defensa Nacional (SDN); y Marina (SM).

1.5. Proceso de elaboración de los pronósticos de precipitación.

Existen diferentes metodologías dependiendo del objetivo que se persiga. A manera de ejemplo se explica someramente la que se emplea en la Subdirección de Previsión Atmosférica de la Dirección General de Control de Ríos e Ingeniería de Seguridad Hidráulica de la S.A.R.H.

El enfoque que se utiliza consiste en dividir el problema en dos partes: el diagnóstico y el pronóstico de las condiciones atmosféricas.

1.5.1. El diagnóstico sirve para describir el estado que guarda la atmósfera en un momento determinado y comprende dos tipos de análisis: cinemático y termodinámico.

-Análisis cinemático.- Conocidas las características de los vientos (velocidad y dirección), mediante los radiosondeos, se hace una representación esquemática de los mismos (carta de vientos) para dos capas que generalmente corresponden a la tropósfera inferior y superior, y a partir de ella se obtienen las cartas de divergencia y vorticidad.

Los tres tipos de cartas se interrelacionan, lo que permite corroborar un fenómeno detectado en una de ellas, a través de observaciones en las restantes.

A partir de estas cartas se puede inferir la formación de nubes o la existencia de algún sistema, como por ejemplo, un ciclón o un anticiclón.

-Análisis termodinámico.- La formación de nubes depende también de las condiciones de estabilidad del aire y del contenido de humedad; aspectos que se estudian en el análisis termodinámico.

Existen varios tipos de cartas que sirven para efectuar este tipo de análisis. Por lo general relacionan la presión con la altura. En ellas se dibujan las isotermas y se consignan la temperatura del punto de rocío y la del aire para diferentes elevaciones.

En estos diagramas se pueden determinar: la altura del nivel de libre ascenso, el agua precipitable entre dos niveles dados, los espesores de las capas entre dos niveles barométricos, etc. También se determinan las condiciones de estabilidad o inestabilidad del aire, lo que da una idea de la actividad convectiva en la zona.

Otro diagrama que se emplea es el de temperaturas potenciales (Almazán, 1978-b) mediante el cual se puede estimar la energía total que existe entre dos niveles de la atmósfera. La ventaja que éste presenta, es que permite comparar la temperatura de dos volúmenes de aire que se encuentran a distinto nivel, considerando la cantidad de calor que libera el vapor de agua que contiene cada uno de ellos, al condensarse.

El conocimiento de la actividad convectiva y del contenido de humedad de la atmósfera a diferentes niveles, permite pronosticar con mayor confiabilidad la formación de nubes en determinadas zonas.

El proceso descrito se realiza con los datos de los radiosondeos que se efectúan dos veces al día en sólo once puntos del país; sin embargo, debido a las condiciones fuertemente variables de los parámetros atmosféricos, es necesario inferir ciertas modificaciones de manera subjetiva, debido a que están supeditadas a la experiencia del meteorólogo y al conocimiento que tenga éste, de la zona por pronosticar.

Dichas modificaciones se hacen, con base en el conocimiento de la evolución de los parámetros atmosféricos, que se registran en diferentes estaciones como aeropuertos, barcos, etc.

1.5.2. El pronóstico de la precipitación.- Desde el punto de vista de control de avenidas, la variable que nos interesa pronosticar es la precipitación; para ellos es necesario pronosticar primero para un lapso de 12 hs. los valores de: la temperatura potencial equivalente, la vorticidad y el campo de vientos. Con estas variables se elabora un pronóstico objetivo de precipitación puntual a 12 horas sobre las estaciones de radiosondeo.

Cabe recordar que sólo hay once estaciones de este tipo: nueve sobre el territorio nacional y dos sobre las Islas de Socorro y Guadalupe. Para extrapolar los datos de precipitación a otras regiones, es necesario utilizar un proceso subjetivo que tome en cuenta la variación de un conjunto de parámetros tales como: el movimiento vertical, la distribución de la actividad convectiva en el país, la distribución de la capa húmeda, la profundidad y volumen de la humedad, la influencia orográfica, etc.

El proceso de extrapolación contempla algunas de las técnicas mencionadas en el inciso 1.3.4., como por ejemplo la persistencia.

Una vez elaborado el pronóstico, se debe hacer una evaluación de la eficiencia de las tormentas, que permita al meteorólogo previsor conocer las diferencias existentes entre su pronóstico y la situación real, con lo que adquirirá paulatinamente un mayor conocimiento de los fenómenos que ocurren en la región que pronostica.

Se observa que al elaborar los pronósticos de precipitación se conjugan tres aspectos: (1) la experiencia del meteorólogo previsor, (2) los modelos generales de la circulación atmosférica con que se cuenta y, (3) la cantidad y calidad de los datos disponibles.

Por lo tanto la confiabilidad de los pronósticos elaborados, mientras no se mejoren las últimas dos características, dependerá en gran parte de la experiencia del meteorólogo previsor, así como del conocimiento de la zona donde se pronostique.

2. RELACIONES LLUVIA-ESCURRIMIENTO EMPLEADAS PARA PRONOSTICAR AVENIDAS

El problema del cálculo del escurrimiento total en una cuenca se ha estudiado mediante enfoques muy diversos; primero desde el punto de vista empírico, y posteriormente desde el hidráulico y estadístico, auxiliándose de técnicas matemáticas.

En este capítulo se presenta primero una breve descripción de los factores que rigen el escurrimiento con la intención de que se comprenda mejor el problema. En el segundo inciso se describen brevemente algunas soluciones propuestas a través del tiempo, desde el momento en que se intentó por primera vez cuantificar el escurrimiento.

A continuación se presenta una clasificación general de los métodos existentes para predecir el escurrimiento, destacando los dos tipos de modelos empleados generalmente para el pronóstico de avenidas: los modelos conceptuales y los de caja negra; en el punto 2.4 se establecen las principales diferencias que existen entre dichos modelos.

Puesto que algunos de ellas sólo reproducen el escurrimiento directo, se requiere utilizar primero modelos que permitan evaluar las pérdidas. Para ello, en el inciso 2.5, se hace una descripción de éstas y la forma de evaluarlas aproximadamente. Se discuten además, en forma somera, los conceptos de dos modelos de pérdidas y se comenta su posible utilización práctica.

Por último se hace referencia a los métodos de tránsito, describiendo sucintamente sus principios y formas de solución.

2.1. Factores que determinan el escurrimiento.- Una cuenca engloba un gran número de factores. Su topografía se caracteriza por áreas y pendientes distintas con geología y suelos diferentes, variando su capacidad para transmitir y almacenar agua.

Las entradas de materia y energía a la cuenca son, entre otras: nieve, lluvia, viento, radiación, etc. Otros parámetros meteorológicos también afectan la cuenca: cobertura del cielo, humedad y temperatura.

Tanto las características geológicas como las meteorológicas tienen un efecto pronunciado en el tipo de vegetación y su distribución sobre la cuenca.

Las características topográficas, meteorológicas, geológicas y la vegetación, afectarán el desarrollo de la red de drenaje, así como las dimensiones de las secciones transversales y pendiente de sus canales. Las características del suelo, vegetación, viento y lluvia determinarán entre otras cosas, el grado de erosión.

Al explotarse los bosques se producen cambios en la forma y volumen del escurrimiento superficial y en el grado de erosión del suelo.

Las presas que se construyen para suministrar agua y energía o para minimizar las situaciones de inundación o sequía, cambian las características del flujo y del transporte de sedimentos en un río reduciéndose paulatinamente la capacidad del cauce, por el crecimiento de vegetación, etc.

La urbanización incrementa las áreas impermeables. El desarrollo de las ciudades también conduce al empleo de las llanu

ras de inundación para viviendas e industrias. Esto en ocasiones incluye un cambio en la topografía, al rellenar ciertas áreas con el fin de disminuir el riesgo, lo que a su vez modificará las características del flujo hacia aguas abajo.

Todos los cambios mencionados afectan las características de la cuenca de un modo muy diverso, lo que explica la variabilidad en la forma y el volumen del escurrimiento.

2.2. Relaciones lluvia-escurrimiento.-El primer experimento cuantitativo que relacionó la lluvia con el escurrimiento fue hecho por Pierre Perrault (1608-1680).

La literatura contiene poco respecto a las relaciones lluvia-escurrimiento hasta finales del siglo XIX.

Uno de los primeros intentos de calcular el escurrimiento en forma racional fue hecho por Meyer en 1915, el cual presentó un método en el que usaba la lluvia y otros datos físicos de la cuenca para inferir valores del escurrimiento mensual y anual.

Podría afirmarse que la hidrología moderna comenzó con los trabajos de Horton y Sherman en la década de 1930. Con base en ellos, los hidrólogos comenzaron a pensar en un proceso de dos fases: el cálculo del volumen del escurrimiento superficial se separó del problema de definir la distribución de dicho escurrimiento en el tiempo.

Desde entonces los hidrólogos se interesaron por investigar el concepto del hidrograma unitario y el proceso de la infiltración.

El primer concepto se ha tratado ampliamente en la literatura. Uno de los trabajos relevantes es el de Snyder quien desarrolló hidrogramas unitarios sintéticos que consideraban algunos parámetros físicos de la cuenca. Bernard presentó la idea del hidrograma unitario en forma de histograma. Morgan y Hulinghorst sugirieron el método de la curva S para analizar hidrogramas unitarios. Clark presentó el concepto del hidrograma unitario como un diagrama de tiempos de translación contra áreas de la cuenca.

En 1958, Nash concibió el hidrograma unitario como el producto final de una serie de almacenamientos lineales sucesivos en la cuenca. Su trabajo fue continuado por Dooge en 1959.

La idea original del hidrograma unitario se basa en la premisa de una relación lineal de entrada-salida; sin embargo desde 1960 se iniciaron estudios intensivos que consideraban al hidrograma de salida como una función no lineal de la entrada al sistema; los trabajos típicos son los de Amorocho y Orlob.

Las computadoras hicieron posible que se consideraran enfoques nuevos. Así, se intentó el análisis de los hidrogramas en gran escala; Nash trató de ajustar las formas del hidrograma a ecuaciones generales mediante regresión múltiple entre los parámetros apropiados de la ecuación y factores que representaban varias características físicas de la cuenca.

O'Donnell intentó un enfoque similar utilizando series de Fourier. Desde entonces, se han derivado varios procedimientos para generar hidrogramas unitarios a partir de datos de lluvia y escurrimiento.

Por otra parte, después del trabajo de Horton sobre infiltración (1931) se emprendió una investigación exhaustiva que in-

dicó que la capacidad de infiltración era función de la humedad antecedente y de la variación de la intensidad de la lluvia en el tiempo. Cook (1946) describe algunos problemas relacionados con la aplicación estricta del concepto de infiltración.

Algunos hidrólogos que estudiaron las técnicas de pronóstico de avenidas (Snyder, 1939), llegaron a la conclusión de que no es adecuado el uso de índices de infiltración para predecir el volumen del escurrimiento.

Por otra parte, Linsley y Kohler en 1951 seleccionaron como parámetros más indicativos: la lluvia total, la duración de la tormenta, la época del año, y un índice que reflejara las condiciones de humedad en la cuenca, al que denominaron índice de precipitación antecedente (API).

Dichos autores obtuvieron relaciones entre los parámetros mencionados y construyeron un conjunto de gráficas mediante las cuales podía calcularse el escurrimiento superficial de la zona estudiada.

Crawford y Linsley, en 1959, presentaron un modelo que resuelve el problema desde un punto de vista totalmente diferente de los anteriores, ya que trata de reproducir los procesos del ciclo hidrológico que suceden en la cuenca. Este es el origen de los modelos conceptuales.

2.3. Métodos matemáticos utilizados para calcular el escurrimiento.- Los datos hidrológicos y los modelos matemáticos usados en la toma de decisiones, o en el diseño, no representan en forma precisa un conocimiento completo del régimen hidrológico que se estudia, debido a las razones básicas siguientes:

a).- Existe una variabilidad temporal de los sistemas hidrológicos, debido a cambios producidos por el hombre y a procesos naturales de erosión, cambios climatológicos, etc., los que constituyen la evolución geomorfológica del terreno.

b).- Hay incertidumbre con respecto a las magnitudes y la distribución temporal y espacial de las entradas y salidas de los sistemas hidrológicos, y con respecto a los estados y características de sus elementos internos.

c).- Se tiene dificultad en formular matemáticamente los complejos procesos no lineales de transferencia de masa y energía que constituyen el ciclo hidrológico.

Sin embargo, se han desarrollado muchos métodos para ayudar al ingeniero a conocer más ampliamente el régimen hidrológico de una cuenca y a predecir la respuesta debida a cambios propuestos en la misma.

En la figura 2.1. se presenta una clasificación general de los métodos matemáticos utilizados en hidrología, propuesta por Fleming (1975); en ella se distinguen dos grupos principales: los que incluyen optimización y los que no incluyen.

La optimización, la considera Fleming en el sentido del proceso de toma de decisiones, más que en el de optimización de parámetros en el modelo, la cual puede emplearse al calibrar modelos pertenecientes a las dos categorías.

Los métodos sin optimización, también denominados paramétricos, pueden dividirse en: deterministas y estadísticos. Existe sin embargo una fuerte interrelación entre ellos, ya que los procesos del ciclo hidrológico son parcialmente aleatorios y parcialmente deterministas.

La Hidrología determinista o física utiliza los métodos que aquí denominaremos de caja negra y conceptuales, que son los que generalmente se utilizan para calcular el escurrimiento a partir de datos de lluvia.

Antes de explicar las características generales de los modelos conceptuales y de caja negra se describen brevemente los demás métodos paramétricos con el único fin de especificar un poco más la clasificación propuesta.

2.3.1. Métodos matemáticos sin optimización (Paramétricos).- El ciclo hidrológico puede considerarse como un sistema que involucra muchos procesos que se relacionan entre sí. Los métodos sin optimización son sistemas abstractos que intentan representar el sistema real que es el ciclo hidrológico.

Sin embargo el sistema real, no se conoce ni se entiende completamente, ya sea desde el punto de vista conceptual o cuantitativo. Por tal razón, los sistemas abstractos están lejos de ser una representación exacta; son en realidad una aproximación.

Por el contrario, el enfoque de sistemas (métodos de optimización) sí representa el panorama completo e interrelacionado de todas las facetas del ciclo hidrológico, y tiene por objeto seleccionar la mejor política o conjunto de decisiones y acciones que permitan alcanzar los objetivos planteados, cumpliendo además con las restricciones impuestas.

2.3.1.1. Modelos paramétricos estadísticos.- Se subdividen en tres tipos dependiendo del método que emplean: técnicas de correlación y regresión múltiple, métodos probabilísticos y métodos estadísticos.

a).- Regresión lineal y correlación.- Estas técnicas determinan la relación funcional que existe entre los datos históricos o generados; la relación obtenida se caracteriza en términos estadísticos mediante el coeficiente de correlación, la desviación estándar, los intervalos de confianza y las pruebas de significancia.

La correlación coaxial múltiple presentada por Kohler y Linsley (1975) es un ejemplo de correlación gráfica.

b).- Modelos probabilísticos.- En este tipo de modelos se considera que los eventos son independientes del tiempo ya que se desconoce la secuencia con que se presentan.

El cálculo de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos, se hace con base en el conocimiento de las características estadísticas de los datos disponibles.

El objetivo del análisis es determinar el número de años durante el cual un evento ocurrirá por lo menos una vez.

c).- Modelos estocásticos.- El uso de métodos estocásticos en Hidrología representa un intento de ampliar y extender el conocimiento sobre eventos hidrológicos y mejorar la habilidad en la toma de decisiones; esto se logra mediante la generación de grandes secuencias hipotéticas: de los volúmenes registrados y del lapso entre ellos.

Una de las principales desventajas de estos modelos es que se requiere estimar un gran número de parámetros, los cuales no pueden definirse en muchos casos por falta de información.

2.3.1.2. Modelos paramétricos deterministas.- Antes de expli

car cuales son las características de los modelos de este tipo se hace una breve descripción: del concepto de sistema, de la forma como se aplica éste al problema hidrológico, y de las principales consideraciones que se hacen en la mayoría de los modelos que utilizan estos enfoques.

Un sistema, según Dooge (1973), se puede definir como: cualquier estructura esquema o procedimiento, real o abstracto, que se interrelaciona en una referencia de tiempo dada, con una entrada causa o estímulo, de materia, energía o información y una salida efecto o respuesta de información energía o materia.

En este caso se puede considerar a la lluvia y al escurrimiento como entrada y salida respectivamente del sistema y como componentes de la estructura del mismo, a los almacenamientos: superficial, subterráneo, en cauces y en la capa superior del suelo, entre otros.

Los procesos hidráulicos e hidrológicos como la evaporación, infiltración, escurrimiento superficial, flujo en canales, ascensión capilar, transpiración, interflujo y flujo de agua subterránea, determinan la interacción entre los componentes del sistema.

La mayoría de los modelos suponen que los sistemas hidrológicos son lineales, a pesar de que Amorocho y Diskin han demostrado lo contrario. La razón de esta hipótesis es que aún no se han podido establecer criterios confiables para calcular la infiltración y otros procesos que contribuyen a la no linealidad del sistema hidrológico completo.

El tratar los sistemas hidrológicos como lineales genera errores sistemáticos; sin embargo Eagleson y coautores (1966) consideran que el intento de reducir tales errores mediante el uso de análisis no lineales es, por lo general, injustificado, si se observan los grandes errores de tipo aleatorio que se tienen en los datos disponibles.

En la mayoría de los modelos se utiliza, por tanto, el enfoque lineal.

2.3.1.2.1. Modelos de caja negra.- El método de solución de la caja negra, no se interesa en los detalles acerca de los componentes del sistema y de la interacción entre éstos; sólo proporciona un mecanismo que transforma las entradas en salidas (Bunge, 1972). El problema por resolver consiste en determinar la función de transferencia o mecanismo de la caja negra.

Los métodos empíricos y las técnicas del hidrograma unitario pueden agruparse dentro de esta clasificación. A continuación se describen diferentes tipos de caja negra y se explica en forma general su proceso de solución.

a).- Caja negra de un sistema hidrológico lineal estacionario.- En este caso se utilizan la lluvia efectiva y el escurrimiento directo para el análisis. Si las variables son deterministas el problema se puede resolver mediante una integral de convolución del tipo:

$$Q(t) = \int_{-\infty}^t h p_i(t-z) q(z) dz \quad (2.1.)$$

en donde $Q(t)$ es el escurrimiento directo (dato de salida); $h p_i(t-z)$ es la altura de precipitación en el punto i y en el instante $(t-z)$ dato de entrada; y $q(z)$ es la función de transferencia.

Aplicando transformadas de Fourier a las variables de la ec. 2.1 y mediante el teorema de la convolución (Brigham, 1974) se obtiene:

$$q(\omega) = \frac{Q(\omega)}{h p_i(\omega)} \quad (2.2.)$$

Si aplicamos la antitransformada de Fourier a la expresión anterior, se obtiene la función de transferencia $q(z)$:

$$q(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} q(\omega) e^{i\omega z} d\omega \quad (2.3.)$$

Cuando las funciones $Q(t)$ y $h_{pi}(t-\tau)$ son aleatorias no tienen transformadas, por lo que se debe utilizar el siguiente enfoque:

Si denominamos a $\phi_{hQ}(\tau)$ como la covariancia cruzada de las entradas y salidas y a $\phi_{hh}(\tau)$ como la autocovariancia de las entradas, podemos obtener sus transformadas de Fourier que designaremos como $\phi_{ha}(\omega)$ y $\phi_{hh}(\omega)$ respectivamente. A continuación se repite el proceso utilizado en el caso de variables deterministas, obteniéndose como resultado la función de transferencia buscada.

b).- Caja negra de un sistema no lineal y estacionario.- En este caso se utilizan los datos medidos de lluvia y escurrimiento directamente, sin ninguna modificación.

El método de solución es el mismo que el mencionado en el caso lineal, sólo que las funciones no lineales generan una dificultad computacional en el proceso, lo que lo hace tedioso en el caso de variables deterministas, y complejo en el caso de variables aleatorias.

Sin embargo, el método es promisorio ya que puede servir como base para el desarrollo de una técnica de análisis no lineal sencilla y confiable.
(Chao-Lin Chiu, 1967).

c).- Caja negra de un sistema no estacionario.- La metodología que se propone hasta ahora es obtener una función de transferencia para cada lapso durante el cual se considera al sistema como estacionario; el lapso dependerá de la variabilidad de los factores de la cuenca; puede ser para una tormenta, un mes, o una estación del año.

Con las funciones de transferencia así obtenidas se puede formar un conjunto de series de tiempo que al analizarse indicarán la importancia relativa de las variaciones mensuales, estacionales o anuales de las funciones de transferencia que representan la relación lluvia-escurrimiento.

También se podrían considerar funciones de transferencia promedio para pro-

nosticar un escurrimiento a partir de una lluvia dada (Chao-Lin Chiu, 1967).

2.3.1.2.2. Modelos conceptuales.- El enfoque conceptual puede considerarse opuesto al de la caja negra ya que pretende identificar los diferentes procesos y sus interrelaciones.

En estos modelos es necesario usar aunque sea parcialmente relaciones empíricas ya que aún no se cuenta con expresiones analíticas que describan completamente los procesos hidrológicos.

Los modelos de este tipo utilizan las técnicas de simulación para representar la interacción de los procesos físicos en el tiempo.

En otras palabras, la simulación permite resolver problemas siguiendo los cambios que, en el tiempo, sufre el modelo dinámico de un sistema.

En los modelos conceptuales se representa la cuenca por medio de un sistema, con una estructura particular formada por varios estados. Estos, a su vez, se definen como bloques con estructura matemática.

Los estados que se consideran generalmente son: la retención superficial (intercepción, almacenaje por depresiones y evaporación), la detención superficial (almacenaje en la cuenca), la infiltración, el almacenamiento en los cauces y los volúmenes de salida (Linsley etc al, 1975).

Este enfoque, también denominado síntesis paramétrica, fue presentado por Dooge (1973), quien supuso que la cuenca estaba formada por un sistema lineal de canales y almacenamientos (estados) al que aplicaba los principios de continuidad y cantidad de movimiento. Otros investigadores como Nash, Singh y Diskin han propuesto estructuras más simples para el mismo problema.

Dentro de este tipo de modelos existen dos clases; en la primera se agrupan los modelos que simulan la parte del ciclo hidrológico que comprende el proceso precipitación total-escurrimiento total. Entre ellas se pueden mencionar el modelo de cuenca de Stanford IV (Crawford y Linsley, 1966) y el modelo del Laboratorio Hidráulico del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDAHL) elaborado por Holtan y López (1970).

La segunda clase agrupa aquellos modelos que sólo simulan el escurrimiento directo, como el modelo del Departamento de Estudios Geológicos de los Estados Unidos (USGS) realizado por Dawdy, Lichty y Bergmann (1970).

En los modelos del primer tipo se incluye un gran número de parámetros los cuales deben determinarse mediante calibración; se requiere además el conocimiento previo de ciertas relaciones entre varios de los parámetros involucrados, sin las cuales puede resultar muy laborioso y costoso lograr la calibración del modelo.

El número de parámetros que intervienen en los modelos del segundo tipo es mucho menor, lo que representa mayores ventajas para su calibración y uso posterior.

Modelos deterministas de simulación digital que pueden emplearse para el pronóstico de avenidas.

A continuación se presenta una lista de modelos de este tipo, sus autores y la fecha en que se desarrollaron.

- 1.- Modelo SSARR I (Stream flow Synthesis and Reservoir Regulation; Rockwood, 1958); Modelo SSARR III (Anderson, 1967).
- 2.- Modelo de cuenca de Stanford IV (Crawford y Linsley, 1966).
- 3.- Modelo USGS (United States Geological Survey Department; Dawdy Lichty y Bergmann, 1970).
- 4.- Modelo HSP (Hydrocomp Simulation Program; Crawford y Linsley, 1969).

- 5.- Modelo Hyreun (Schultz, 1968).
- 6.- Modelo Kozak (Kozak, 1968).
- 7.- Modelo del Instituto de Hidrología de Gran Bretaña (Nash y Sutcliffe, 1970).
- 8.- Modelo "Disprin" de la Junta de Recursos Hidráulicos de Inglaterra (Jamieson y Wilkinson, 1972).
- 9.- Modelo de cuenca UBC (University of British Columbia; Quick y Pipes, 1972).

Fleming (1975) hizo una revisión de los modelos mencionados y discute los antecedentes y estructura de los mismos. Además, hace referencia a: las funciones que utiliza cada uno de ellos para representar los procesos más importantes, los requerimientos de entrada, los resultados que se obtienen y el rango de aplicación de éstos.

2.4. Aplicabilidad de los modelos conceptuales y de caja negra.- Entre las ventajas de los modelos de caja negra se pueden mencionar las siguientes:

- a.- Son más sencillos desde el punto de vista computacional.
- b.- Se pueden adaptar más fácilmente a la información que se tenga.
- c.- Requieren menor cantidad de información que los conceptuales, ya que sólo consideran las entradas y salidas al sistema.

Los modelos conceptuales, por otra parte, tienen las siguientes ventajas:

- a.- Se entiende más el fenómeno en estudio.
- b.- Se pueden obtener resultados más precisos puesto que consideran algunas o todas las fases del proceso; esto se logrará siempre y cuando se cuente con información suficiente y confiable.
- c.- Una vez calibrados, permiten probar condiciones extremas del sistema, o sea probar valores de entradas distintos para los que fueron calibrados.

Los modelos de caja negra tienen la desventaja de que pueden generar un conjunto de valores fuera del rango físico de las variables por calibrar.

Los conceptuales presentan el inconveniente de tener que calibrarlos siempre que se hagan modificaciones en la estructura de los mismos.

Desde el punto de vista de control de avenidas, los modelos más completos son: el USGS, el de Stanford IV, el HSP y el SSARR III; de ellos el más empleado en México es el USGS, una de cuyas últimas versiones (1973) actualmente se instrumenta en la comisión del Plan Nacional Hidráulico.

Puede observarse que la selección del modelo por utilizar en un sistema, dependerá de la cantidad y calidad de la información disponible, del grado de exactitud que se desee alcanzar al predecir los escurrimientos y del conocimiento o explicación matemática de los procesos físicos que ocurren en el sistema.

En el caso que se decida utilizar un modelo que sólo simule el escurrimiento directo, ya sea éste de tipo conceptual o de caja negra, se deberán evaluar las pérdidas con anticipación. En el inciso siguiente se describen los diferentes tipos de pérdidas y la forma de evaluarlas aproximadamente.

2.5. Descripción y evaluación de las pérdidas.- Se denomina "pérdidas" a la parte de la lluvia que no contribuye en forma más o menos rápida al escurrimiento superficial en los cauces. Así podemos clasificarlas como: iniciales y por infiltración.

Las pérdidas iniciales incluyen: la intercepción, el almacenaje en depresiones y la detención superficial.

a).- Pérdidas por intercepción.- Dependen del tipo y densidad de la cubierta vegetal, la evaporación de la superficie mojada de las plantas y la velocidad del viento.

Horton derivó una serie de fórmulas empíricas para estimar la intercepción

(por tormenta) para varios tipos de cubierta vegetal.

La interceptación total en una tormenta puede estimarse según él, mediante la fórmula:

$$L_i = S_i + KEt \quad (2.4)$$

donde L_i es el volumen de agua interceptada expresada en lámina (cm); S_i es el almacenamiento por interceptación retenido en el follaje en contra de las fuerzas: del viento y de gravedad (generalmente varía entre 0.25 mm y 1.25 mm); K , el cociente del área del follaje entre la proyección horizontal del mismo; E , la evaporación horaria que ocurre durante el período de precipitación; y t , el tiempo en horas.

Para el análisis de tormentas individuales es necesario conocer o suponer la distribución de esta pérdida.

b).- Pérdidas debidas al almacenaje en depresiones.- Tan pronto como la intensidad de la lluvia excede la capacidad de infiltración, la lluvia en exceso empieza a llenar las depresiones superficiales.

Linsley (1975) presenta una expresión para calcular el volumen de agua almacenado en las depresiones (V) en función de la precipitación en exceso acumulada (P_e) y de la capacidad máxima de almacenamiento por depresiones (S_d):

$$V = S_d (1 - e^{-KP_e}) \quad (2.5)$$

donde K es una constante equivalente a $1/S_d$. Basándose en su experiencia con modelos hidrológicos, Linsley sugiere valores de S_d entre 10 y 50 mm para la mayoría de las cuencas. La expresión desprecia la evaporación del agua almacenada en las depresiones, durante la ocurrencia de la tormenta.

c).- Pérdidas por detención superficial.- La detención depende principalmente de la pendiente y de la rugosidad o tipo de la cubierta vegetal en la cuenca.

La cantidad de agua retenida en esta forma es relativamente grande. Izzard proporciona una fórmula para calcular el volumen de detención para una región donde el flujo sobre la superficie se haya establecido (Linsley, 1975).

d).- Pérdidas por infiltración.- La capacidad de infiltración depende de los siguientes factores: tipo de suelo y características del mismo (contenido de materia orgánica, porosidad, estructura, textura), compactación y presencia de finos en la superficie del escurrimiento, cubierta vegetal, y contenido de humedad del suelo.

Otros factores que la afectan pero en menor grado son: el aire atrapado, la temperatura, la pendiente del terreno, la densidad del fluido y los efectos de heladas.

Anteriormente, las investigaciones realizadas para valuar la infiltración estaban enfocadas a: (1) desarrollar ecuaciones empíricas basadas en observaciones de campo y (2) obtener la solución de ecuaciones basadas en la mecánica del flujo en medios porosos.

Dentro del primer tipo de enfoque se encuentra el trabajo de Horton quien en 1933 estudió exhaustivamente el proceso de la infiltración y propuso una expresión del siguiente tipo para calcularla:

$$f_p = f_c + (f_o - f_c)e^{-Kt} \quad (2.6)$$

La capacidad de infiltración f_p es máxima al inicio de la tormenta (f_o) y se aproxima a un valor bajo y constante (f_c) cuando el suelo está saturado.

El valor límite lo determina la permeabilidad del subsuelo. K es una constante y t es el tiempo desde el inicio de la lluvia.

La ecuación es aplicable cuando $i_s \geq f_p$ donde i_s es la intensidad de la lluvia menos la retención. Aunque simple en su forma, las dificultades que se tienen para determinar los valores de f_o y K , restringen el uso de esta ecuación.

En el segundo tipo de enfoque se tiene la ecuación de Philip deducida en 1954 a partir de la ecuación de Darcy.

$$\frac{dF}{dt} = \frac{K}{\mu} \left[1 + \frac{(m - m_o) - (P + H)}{F} \right] \quad (2.7)$$

donde μ es la viscosidad dinámica del fluido, K la permeabilidad, F el volumen total infiltrado, H la profundidad del frente húmedo, m_o el contenido de humedad inicial del suelo, P la capilaridad potencial en el frente húmedo y m el contenido de humedad promedio hasta la profundidad del frente húmedo al tiempo t . El uso de las dos ecuaciones anteriores se dificulta debido a la variable independiente, tiempo (t).

Cuando la precipitación es menor que la capacidad de infiltración ($i_s \leq f_p$) se complica la determinación de ésta; varios investigadores han evitado este problema introduciendo la humedad del suelo como la variable dependiente, por ejemplo la ecuación propuesta por Huggins y Morke en 1966.

$$f = f_c + A \left[\frac{S - F}{T_p} \right]^P \quad (2.8)$$

donde T_p es la porosidad, F es el volumen total infiltrado, A y P son coeficientes, S es el almacenamiento potencial de la capa de suelo (T_p menos la humedad antecedente); la variable F debe calcularse para cada incremento de tiempo en el proceso iterativo. En la figura 2.2. puede observarse la variación de la capacidad de infiltración para el último caso.

Las dificultades que entrañan tanto el enfoque de Horton como el de Philip ham motivado el uso de índices. El más simple de éstos es el índice ϕ definido como la cantidad de lluvia arriba de la cual el volumen de la misma iguala al del escurrimiento. El índice W es igual al volumen infiltrado promedio durante el tiempo que la intensidad de la lluvia excede la capacidad de infiltración. La magnitud de ambos índices depende grandemente de las condiciones de humedad antecedente.

2.5.1. Modelos de pérdidas

a).- Dunin (1969) desarrolló un modelo conceptual para valuar las pérdidas iniciales en función de ciertas características físicas de las cuencas. El modelo se basa en dos hipótesis:

1.- El agua, al precipitarse, primero satisface los déficits de humedad en los almacenamientos de intercepción, de depresiones superficiales y de la capa superior del suelo, sin producir escurrimiento superficial.

2.- Una vez satisfechos los déficits de los almacenamientos mencionados, el nivel de humedad del subsuelo controlará el proceso de infiltración y por tanto la generación de escurrimiento directo.

Dunin considera el almacenamiento por depresiones y de intercepción como constantes en el modelo; supone que al inicio del escurrimiento la intensidad de la lluvia es igual a la capacidad de infiltración para determinar el déficit de humedad del subsuelo.

Basándose en lo anterior y en una relación derivada por él mismo (1969) para calcular la infiltración, obtiene una ecuación que constituye el modelo a probarse.

Los resultados que obtiene con el modelo se aproximan a los valores que él obtuvo en cuencas experimentales muy pequeñas (2 has).

Menciona, sin embargo, que es necesario hacer ciertas modificaciones a los parámetros del modelo, si se quiere emplear para el pronóstico en áreas no aforadas.

b).- Otro modelo de pérdidas presentado por Domínguez y coautores (1977) relaciona los siguientes parámetros: índice de precipitación antecedente (API), coeficiente de infiltración (ϕ), gasto base (Q_0) y pérdida inicial (almacenaje por depresiones).

Los resultados obtenidos en el caso que se analizó fueron:

- 1.- La relación entre la pérdida inicial (D_i) y la humedad antecedente (API) sólo pudo confirmarse de manera cualitativa.
- 2.- El coeficiente de infiltración (ϕ) es una función logarítmica decreciente, del índice de precipitación antecedente (API).
- 3.- El API tiene poca relación con el gasto base (Q_0); éste, sin embargo puede emplearse para tener una idea del valor del API cuando no se cuente con otro dato. El error puede ser grande ya que se trabaja con una envolvente.
- 4.- La relación entre el gasto base (Q_0) y el coeficiente de infiltración (ϕ) sigue una tendencia similar a la existente entre el API y el ϕ .

Los resultados enunciados se esquematizan en las figuras 2.3 a 2.5.

Para aplicar el modelo mencionado es necesario conocer la distribución de la lluvia en el tiempo y el índice de precipitación antecedente para cada tormenta por analizar.

Mediante las relaciones obtenidas se calcula el coeficiente de infiltración media a partir del API o del gasto base. La ventaja que esto repre-

senta es que tanto el API como Q_0 son parámetros que se pueden determinar fácilmente.

La confiabilidad y exactitud de las relaciones que se obtengan entre API, ϕ y Q_0 , dependerán de la instrumentación que se tenga en cada cuenca particular, o sea del mejor conocimiento de la variación de cada uno de los parámetros mencionados.

2.6. Técnicas de simulación del tránsito de avenidas.- Las técnicas de simulación del tránsito, en general, pueden utilizarse, ya sea para predecir el hidrograma de salida de una cuenca sujeta a una cantidad conocida de precipitación, o para conocer las variaciones espaciales y temporales que sufre una onda de avenida al recorrer un cauce, o al ser regularizada por un vaso de almacenamiento.

En este trabajo se tratará en forma muy breve sólo el último aspecto, o sea: simulación del tránsito en vasos y en cauces. El objetivo que se persigue es enunciar algunas de las técnicas que se pueden emplear, en el caso que se haya utilizado un modelo que sólo simule el escurrimiento directo para transitar los hidrogramas así obtenidos, hasta el punto de interés.

La simulación del tránsito se define como "una técnica usada para calcular los efectos: del almacenamiento, y de las condiciones dinámicas del sistema, en la forma y movimiento de una onda de avenida".

2.6.1. Simulación del tránsito en cauces.- Puede clasificarse en dos categorías: hidrológica e hidráulica.

La simulación hidrológica emplea la ecuación de continuidad y alguna relación que describa el almacenamiento en el sistema; sólo proporciona resultados satisfactorios, cuando se quiere determinar el gasto y el tirante en un tramo cuyos extremos estén aforados; no es recomendable usarlo, si se

tienen gastos mayores que el máximo registrado, o si las características del flujo varían extremadamente rápido.

La simulación hidráulica se basa en la aplicación de las ecuaciones: de conservación de la masa, y de cantidad de movimiento, para flujo no permanente gradualmente variado (ec. de San Venant, Chow, 1959). Zurutuza (1978) presenta una deducción detallada de dichas ecuaciones, así como la forma de utilizarlas.

Este tipo de simulación describe más apropiadamente las condiciones dinámicas del flujo, ya que toma en cuenta las características físicas e hidráulicas de los cauces; sin embargo presenta las desventajas de ser más compleja y de requerir información más detallada.

- Simulación hidrológica del tránsito de avenidas.- Las técnicas existentes de simulación hidrológica, generalmente utilizan alguna forma del método de Muskingum, el cual consiste de dos ecuaciones: una de almacenamiento (S),

$$S = K [XI + (1-X)O] \quad (2.9)$$

y otra de tránsito,

$$O_{t+\Delta t} = C_0 I_{t+\Delta t} + C_1 I_t + C_2 O_t \quad (2.10)$$

donde I son las entradas y O las salidas; K y X son coeficientes que se determinan mediante calibración, a partir de registros coincidentes de gastos de entrada y salida al elemento considerado.

Las constantes C_0 , C_1 , y C_2 son función de K, X y Δt que es el intervalo de tiempo entre instantes consecutivos.

Las hipótesis en que se basa el método son: (1) el tramo de río considerado es estable, (2) la superficie del agua tiene un perfil uniforme y continuo en dicho tramo; y (3) no hay aportaciones laterales entre las dos secciones de interés. Las constantes del método son válidas sólo para el rango de valores estudiados.

Si existen diferencias significativas respecto a las condiciones mencionadas, será necesario trabajar con tramos más pequeños o utilizar enfoques más sofisticados, los que se justificarán también cuando se requiera: (1) interpolar entre puntos aforados, (2) extrapolar gastos mayores que los observados y (3) predecir los efectos de los cambios en las características del cauce.

2.6.2. Simulación del tránsito en vasos de almacenamiento. Para efectuar la simulación del tránsito en presas con vertedor libre, la ecuación de continuidad de masa expresada como:

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (2.11)$$

se utiliza en la forma siguiente:

$$I_1 + I_2 + \left(\frac{S_1}{t} - O_1 \right) = \frac{S_2}{t} + O_2 \quad (2.12)$$

donde las variables I_1 , e I_2 son los gastos de entrada al vaso, O_1 y O_2 los gastos de salida, y S_1 y S_2 los almacenamientos, al inicio y final del lapso considerado; t es el intervalo de tiempo o período de tránsito.

Linsley (1975) presenta una simulación del tránsito de una avenida por una presa con vertedor libre, mediante esta técnica.

La simulación del tránsito en presas con vertedor controlable dependerá de la política de operación de compuertas. Linsley menciona las modificaciones que se deben efectuar en la ec. 2.10 para este caso.

3. SISTEMAS DE ADQUISICION DE INFORMACION PARA EL PRONOSTICO DE AVENIDAS

Una de las tareas más complicadas entre las que integran un programa enfocado a la previsión de avenidas es recolectar información confiable en forma oportuna.

En este capítulo se mencionan algunos de los aspectos que se deben tomar en cuenta al establecer un sistema para recolectar información, como son su estructura y su forma de operación.

La estructura es función de las características del sistema por medir y la forma del muestreo; la operación dependerá del tipo de comunicación que se emplea y del volumen de los datos por obtener.

En este trabajo se destaca la importancia de la red de medición, como parte básica de la estructura del sistema y se presentan tres criterios de diseño de redes de pluviógrafos.

Enseguida se describe una forma alternativa para medir la lluvia mediante radar; se comentan los principios generales en que se basa éste, y se hace una breve reseña de los problemas que se presentan al utilizar el radar para medir la precipitación.

A continuación se discuten algunas de las ventajas y desventajas que presentan los sistemas combinados de pluviógrafos y radar para medir la lluvia.

Al final del capítulo se describen algunas formas de operación del sistema de medición, mencionándose en forma general los inconvenientes y ventajas que presenta cada una.

3.1. Estructura de un sistema de adquisición de información.

Un sistema de este tipo estará integrado por:

- a) Una red de medición de la información básica (lluvias, escurrimientos o datos meteorológicos).
- b) Un sistema de transmisión, para concentrar la información recabada en el sitio donde se procesará.
- c) Un banco de información para archivar los valores obtenidos.
- d) Un método que permita predecir los escurrimientos en el (los) punto (s) de interés, a partir de la información del inciso a).
- e) Una política de operación que indique las medidas por ejecutar en las distintas situaciones que se pueden presentar.
- f) Una organización que elabore los pronósticos de avenidas, los difunda y coordine la ejecución de las medidas que se tomen como consecuencia de dicho pronóstico.

El estudio de las características del sistema por medir (tamaño, forma y topografía de la cuenca) y del tipo de muestreo requerido (continuo, discreto) permite definir los siguientes factores:

- a) El sistema de comunicación por emplear.
- b) La distribución de los centros donde se recabe la información original, el método de procesamiento primario de los datos en dichos centros y la distancia de éstos al centro de procesamiento final.
- c) El grado de automatización del procesamiento de los datos.
- d) El intervalo de tiempo entre la recepción y transmisión de los datos.
- e) El tipo de red de medición por emplear y la forma del muestreo.

En general se pueden considerar tres formas de muestreo:

- 1.- El aleatorio simple.

2.- El aleatorio estratificado.

3.- El esquemático.

El muestreo aleatorio simple y el estratificado pueden considerarse como formas factibles desde el punto de vista hidrológico; en ellos se puede distribuir el número de estaciones más o menos aleatoriamente o se puede dividir la región en diferentes subáreas de tamaños semejantes; la posición detallada de la estación en cada subárea estará determinada por condiciones tales como: accesibilidad, topografía, características climatológicas de la zona, etc.

En este trabajo se tratan dos tipos de red de medición de lluvias:

1.- Red de pluviógrafos

2.- Red de pluviógrafos y radar.

Las ventajas y desventajas del segundo tipo de red se mencionan en el inciso 3.4.

Cualquiera que sea el tipo de red que se establezca en una cuenca, se requiere que ésta esté aforada. En casos especiales, como el que se menciona a continuación, el contar con dos o más estaciones hidrométricas, puede permitir ahorrarse un gran número de pluviógrafos.

Considérese una cuenca que pueda dividirse en dos subcuencas: una alta, con una gran área y otra baja, de área pequeña comparada con la anterior (figura 3.1.).

Supóngase que ambas subcuencas están aforadas y que el punto donde se desea pronosticar las avenidas está cerca de la boquilla de la subcuenca baja.

Si los tiempos de traslación (entre las estaciones hidrométricas), de dife

rentes ondas de avenida, son menores o iguales que el tiempo de concentración en la subcuenca baja, resulta incosteable establecer una red de pluviógrafos en la subcuenca alta. La medida adecuada consistiría en instalar una red de pluviógrafos en la subcuenca baja, para pronosticar el escurrimiento por cuenca propia y sumarle a éste, los gastos aforados en la cuenca alta ya transitados hasta el punto de interés.

Un pronóstico de este tipo resulta más confiable que el basado sólo en datos de lluvia, ya que se eliminan los errores que se tendrían al pronosticar el escurrimiento en la cuenca alta.

3.2. Diseño de una red de pluviógrafos.

Un sistema de medición debe evaluarse en función de los beneficios netos asociados con los objetivos que se pretenden alcanzar mediante el uso de los datos recopilados.

El proceso de diseño debe incluir la designación de objetivos relevantes, la consideración de todos los beneficios y costos atribuibles a los objetivos y la selección del sistema que maximice los beneficios netos.

3.2.1. Consideraciones generales.

La recolección de datos se trata aquí como un problema de estimación, en el cual un evento estocástico, la lluvia, que es continuo en espacio y en tiempo, debe obtenerse a partir de observaciones discretas, con ruido e incompletas, en tiempo y espacio.

El problema de diseñar una red de medición, consiste en seleccionar el sistema que proporcione la mejor estimación del evento real (lluvia); para ello debe establecerse algún criterio como la exactitud de las variables medidas, el costo o ambas.

La exactitud de la medición a su vez es función de la aleatoriedad de la lluvia, el lugar de las observaciones y los errores inherentes de los instrumentos usados.

El diseño de redes de medición se debe basar en la premisa siguiente: la información es útil si su posesión puede causar un cambio de decisión o acción y su valor se mide por la ganancia económica asociada con el cambio de acción.

3.2.2. Metodologías propuestas.

Los criterios de diseño de redes de pluviógrafos han evolucionado rápidamente. Al principio, el diseño se basaba en la exactitud de la precipitación medida. Posteriormente, se consideró como criterio más adecuado, la exactitud de los pronósticos obtenidos a través de la precipitación medida, y el uso de modelos lluvia-escorrentía. Finalmente se usó como criterio de diseño, la evaluación de la red de medición en función de los beneficios y costos que genera el uso de los datos medidos.

La mayoría de la literatura existente permite definir el número de estaciones necesarias; sin embargo muy pocos trabajos tratan el problema de la localización de las mismas y la forma de tomar en cuenta los errores de los instrumentos y el costo de la red.

Linsley y coautores (1975), presentan, por ejemplo, una relación gráfica del error estándar de la precipitación media, en función de la densidad de la red y el área, como un criterio de diseño.

Hershfield (1965) argumenta que el espaciamiento promedio necesario para obtener un coeficiente de correlación igual a 0.9 entre lluvias aisladas, puede estimarse a partir de la lluvia acumulada en 24 hs y 1 h para un período de retorno de 2 años. Usando este valor como un criterio de diseño, desarrolla gráficas que relacionan la distancia entre pluviógrafos con la

lluvia de las características mencionadas.

Eagleson (1967) propone un método de diseño que considera la exactitud de los gastos pronosticados (a través de un modelo lineal distribuido propuesto por él mismo), mas no toma en cuenta la localización de las estaciones, ni los errores de medición. Para desarrollar dicho método analizó la sensibilidad del gasto pico en función de la variabilidad de las lluvias convectivas y ciclónicas. Los resultados que obtuvo los presenta gráficamente (fig. 3.2.).

Posteriormente W. Grayman y P. Eagleson (1973) propusieron otra metodología para el diseño de redes. Esta consiste en determinar mediante simulación los beneficios netos que corresponden a una red particular. El proceso se repite para varias redes y se selecciona aquella que produzca el mayor beneficio neto. El enfoque utilizado permite incluir objetivos diversos como son: el desarrollo económico nacional, el desarrollo regional, el mejoramiento del medio ambiente, evitar pérdidas humanas, etc.

Brass (1975), considera solamente el criterio de la exactitud para diseñar una red de pluviógrafos y argumenta la inconveniencia de tratar de aplicar un modelo más idealizado si no existen datos para operarlo. En su modelo considera aparte del número de medidores, su localización, el error inherente de medición y la variabilidad espacial de la lluvia. Brass comenta finalmente que su modelo tiene las ventajas siguientes: es relativamente simple, requiere una cantidad mínima de datos y no es necesario efectuar simulaciones.

El diseño de redes para recolectar la información que se utilice en modelos para pronóstico debería contemplar la maximización de los beneficios netos y no solamente tratar con el criterio de exactitud del pronóstico.

Cabe recordar que las funciones de pérdidas relacionadas con el pronóstico de avenidas son no simétricas; o sea la pérdida esperada de una sobrepro-

tección, no es la misma que para la subprotección. Además, éstas son función de la respuesta del sector advertido mediante el pronóstico.

Maximizar los beneficios netos en tales condiciones requeriría conocer: la distribución condicional del gasto pronosticado dado el gasto real, así como una descripción estadística similar entre el sistema de pronóstico y la respuesta de la población ante un aviso dado.

Lo anterior podría intentarse mediante una simulación exhaustiva siempre y cuando se contara con información histórica considerable, de gastos y respuesta del sistema ante los pronósticos (Eagleson y Grayman, 1971).

3.2.3. Criterios de diseño.

Sánchez B y coautores (1976) exponen tres criterios de diseño de redes de pluviógrafos para el problema del pronóstico de avenidas. Ahí, hace una síntesis del criterio de Eagleson (1967) ya mencionado, para determinar la densidad óptima de pluviógrafos cuando se desea pronosticar el gasto en función de la precipitación media.

Los otros dos criterios que se presentan son: el basado en correlaciones de lluvia diaria (Hershfield, 1965) y el de la Organización Meteorológica Mundial.

A continuación se indican brevemente los datos que requieren cada uno de los tres métodos mencionados. En el capítulo 4 se diseñará una red de pluviógrafos mediante el criterio de Eagleson.

3.2.3.1. Criterio de Eagleson.

Se selecciona la clase de tormenta de la cuenca y mediante un estudio de su forma típica se calcula el radio de "correlación" de la misma (γ_0).

Se asimila la cuenca a una forma rectangular (fig. 3.3.). De un plano topográfico se estima la longitud del cauce principal (L_s) y la longitud transversal promedio de la cuenca ($2L_c$), con lo que se calculan el "factor de amplitud de tormenta" β definido como:

$$\beta = \frac{L_s}{r_o} \quad (3.1.)$$

y el "factor de forma de la cuenca", λ , dado por:

$$\lambda = \frac{L_c}{L_s} \quad (3.2)$$

A continuación se propone el porcentaje de error con que se quiere elaborar el pronóstico de los gastos y con ayuda de la fig. 3.2. se obtiene el número de pluviógrafos necesarios (G).

El problema que presenta el método para su aplicación es el cálculo de γ_o , para lo que se requiere contar con correlogramas espaciales de la zona; dichos correlogramas serán confiables si existen muchas estaciones; si éste no es el caso se tendrán que transponer tormentas de otras zonas.

3.2.3.2. Criterio de Hershfield

Este criterio considera la curva de isocorrelación 0.90 de las lluvias medias diarias para definir la densidad de pluviógrafos. Dichas curvas no tienen una forma regular, pero para fines de diseño se consideran de forma circular o elíptica.

La secuela de diseño se indica a continuación:

- 1.- Se escoge una estación cualquiera y se considera como punto central para correlacionar sus datos con los de otras estaciones.

- 2.- Se obtiene la curva de isocorrelación igual a 0.90 para dicha estación.
- 3.- Análogamente se trabaja con las demás estaciones dibujando una curva para cada una de éstas.
- 4.- Si alguna zona no queda cubierta por dichas curvas se indicará donde debe establecerse una estación adicional.

3.2.3.3. Criterio de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Con base en un estudio realizado en una región experimental, la OMM elaboró una gráfica que permite calcular el número de pluviógrafos requerido para pronosticar el gasto. Dicha figura (3.4.), relaciona la densidad de pluviógrafos con el área drenada aguas arriba del punto donde se pronosticará el gasto, el número de días que llueve al año y el escurrimiento medio anual expresado en lámina de agua sobre toda el área drenada.

En la referencia mencionada (Bribiesca y coautores, 1976), se observa que para el caso analizado, el criterio de Hershfield es el que requiere el mayor número de medidores, mientras que el de Eagleson propone el menor.

3.3. Medición de la lluvia mediante radar.

La primera aplicación práctica del radar para determinar la precipitación se hizo en 1941. El principio básico de su operación es muy simple. Un transmisor emite un pulso de energía electromagnética, el cual es irradiado direccionalmente en forma de un rayo angosto por una antena móvil.

La amplitud y forma del rayo dependen del tamaño y configuración de la antena. La onda irradiada viaja a la velocidad de la luz, es reflejada por partículas de agua o nubes y regresa al radar donde la recibe la misma antena.

La cantidad de energía que regresa al radar se denomina "potencia reflejada" y su manifestación en la pantalla se llama "eco". La brillantez o intensidad del eco es una indicación de la magnitud de la potencia reflejada, la cual a su vez es una medida de la reflectividad de los hidrometeoros.

La reflectividad de un grupo de hidrometeoros depende de los siguientes factores:

- a) Distribución del tamaño de las gotas.
- b) Número de partículas por unidad de volumen.
- c) Estado físico del agua, por ej.: sólido o líquido.
- d) Forma de los elementos individuales.

El lapso entre la emisión del pulso y la presentación del eco es una medida de la distancia al blanco, comúnmente llamada rango.

La extensión de una tormenta en el área puede obtenerse girando la antena. Inclinando la misma, se obtiene información de la estructura de la tormenta en la vertical.

Cuando la energía irradiada encuentra una partícula de agua, una parte se refleja y otra la absorbe la partícula. Rayleigh y Mie calcularon dos relaciones teóricas entre la cantidad de energía reflejada y las características de la partícula, definidas en función de un área teórica, conocida como área de la sección transversal equivalente (σ_c).

El uso de la aproximación de Rayleigh permite determinar el valor de σ_c :

$$\sigma_c = \frac{\pi^5 |K|^2 D^6}{\lambda^4} \quad \text{si } \alpha < 0,13 \quad (3.3)$$

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda} \quad (3.4)$$

$|K|^2$ es una función del índice de refracción del blanco; se considera aproximadamente igual a 0.9 para la lluvia. D es el diámetro de la partícula en mm. y λ la longitud de onda en mm.

Cuando se considera el área de la sección transversal equivalente de todas las partículas que cubre el rayo, la potencia reflejada promedio ($\bar{P}_r$), es simplemente la suma de la potencia reflejada por cada una de las partículas y se expresa como:

$$\bar{P}_r = \frac{C}{r^2} \Sigma D^6 \quad (3.5)$$

C depende de la longitud de onda, forma y ancho del rayo, longitud del pulso, potencia emitida, ganancia de la antena, e índice de refracción del blanco; y es el rango.

Por simplicidad se denomina a ΣD^6 como factor de reflectividad y se representa por Z. Por lo tanto:

$$\bar{P}_r = \frac{C}{r^2} Z \quad (3.6)$$

Puesto que Z puede obtenerse a partir de la potencia reflejada, se trató de relacionar dicho parámetro con la cantidad de lluvia R. La mayoría de los estudios han reportado relaciones del tipo siguiente:

$$Z = AR^6 \quad (3.7.)$$

Cuando Z se expresa en mm^6/m^3 , R se da en mm/h . En el caso de estimación de lluvia, se ha detectado que A varía entre 15 y 1100, y b entre 1.2 y 3.2.

Los métodos para determinar estos parámetros son de dos tipos: (1) mediante comparación de mediciones de pluviógrafos y (2) a través de mediciones directas de la distribución del tamaño de las gotas.

La variación de los valores de A y B se debe en gran parte a los errores generados al determinar la relación entre Z y R , pero también influyen bastante las diferencias climáticas y el tipo de tormenta. Wilson ha demostrado que la relación Z - R puede variar aún en el caso de una misma tormenta cuando varía la intensidad de la misma. Los valores estándar aceptados para A y b son 200 y 1.6 respectivamente, en el caso de la lluvia.

El principal obstáculo para determinar la relación Z - R con exactitud, es que la medición de la precipitación utilizando radar se hace en la atmósfera, mientras que los pluviógrafos la miden al nivel del terreno. La magnitud de la diferencia entre ambas medidas, varía con el ángulo del rayo emitido, el ancho del mismo y el rango.

Existen algunas condiciones meteorológicas que no permiten medir correctamente con el radar la precipitación sobre el terreno; entre ellas se pueden mencionar las siguientes:

- 1.- Formación de precipitación en altitudes bajas.
- 2.- Evaporación de las gotas antes de que alcancen el suelo.
- 3.- La presencia de vientos fuertes que alejen la precipitación de la nube que la produce.
- 4.- El alto grado de variabilidad en el perfil vertical de una tormenta.

En todos estos casos los problemas son más agudos cuando se opera a gran-

des distancias, o cuando se debe elevar el rayo con objeto de evitar obstáculos. El desarrollo de radares con rayos de amplitud muy pequeña reducirá estos problemas en forma considerable.

Por otra parte la longitud de onda del radar puede afectar la calidad de los resultados; de la ec. 3.3 puede observarse que cuando la longitud de onda aumenta, el área de la sección transversal equivalente de las partículas (σ_c) decrece rápidamente, disminuyendo por lo tanto la cantidad de potencia reflejada por la partícula. Esto significa que cuando la longitud de onda aumenta, el radar pierde sensibilidad, por lo que no detectará las partículas más pequeñas, que un radar de onda corta sí es capaz de detectar.

El fenómeno contrario se presenta con la atenuación que es la pérdida de energía electromagnética, absorbida o reflejada por la partícula. Esto puede explicarse de la siguiente manera: puesto que las áreas de la sección transversal equivalente (σ_c), de partículas medidas por radares de longitud de onda corta, son mucho mayores que aquellas medidas por radares de longitud de onda larga (ec. 3.3.), pueden absorber y reflejar un gran porcentaje de la energía transmitida.

Lo anterior significa que para un diámetro de partícula dado, entre menor sea la longitud de onda, mayor es la atenuación.

Otra deficiencia de los radares de onda corta, es la posible no aplicabilidad de la relación de Rayleigh, si es que α llega a ser mayor de 0.13. Lo anterior obligaría a utilizar la mucho más complicada teoría de Mie.

Por otro lado, el carácter fluctuante de las señales del radar climático presenta grandes inconvenientes al procesar los datos; por ejemplo: la potencia del eco instantáneo comúnmente difiere de la media por un factor de 2 veces o más; el 20% difieren del promedio por un factor de 4 por lo menos y, el 10% por un factor de 10 veces (Kessler, 1965).

Las tormentas que más requieren el uso del radar para una determinación más exacta son aquellas en las cuales tanto la precipitación promedio como su variancia son altas y que están asociadas a un sistema climático pequeño.

Las aplicaciones más importantes del radar se hacen en terrenos planos; en terrenos montañosos los ecos producidos por las características topográficas son grandes e interfieren bastante en la medición de los hidrometeoros. La misma condición se presenta en los casos de propagación anómala.

Una posible solución a estos problemas, consistiría en tratar de determinar alguna diferencia existente entre las propiedades estadísticas de los ecos del terreno y del fenómeno en estudio (lluvia, formación de nubes, etc.), (kessler, 1965).

Por ello, para calibrar las estimaciones de lluvia hechas con radar, es más práctico utilizar pluviógrafos en lugar de tratar de hacer una corrección de la lluvia estimada, que contemplara todos los errores mencionados, ya que éstos varían continuamente en el espacio y el tiempo.

Greene y coautores (1976) presentan un resumen de diversas técnicas que se han desarrollado con el fin de estimar la distribución temporal y espacial de la lluvia; mencionan que las técnicas de procesamiento automático de señales de radar (Kessler y Wilk, 1968), actualmente en etapa de experimentación en prototipo, permiten el análisis de los datos en "tiempo real" mediante computadoras.

Algunos de los problemas que requieren investigarse en este campo son: (1) discriminación de ecos no producidos por la precipitación (tanto propagación anómala, como ruido producido por el terreno); (2) mejoramiento en las estimaciones de precipitación tanto líquida como sólida y, (3) determinación de la sensibilidad de los modelos hidrológicos a datos del radar.

3.4. Estimación de la lluvia mediante un sistema combinado de radar y pluviógrafos.

La filosofía de los sistemas combinados de radar y pluviógrafos es utilizar el radar para especificar la distribución espacial de la lluvia y los pluviógrafos para medir la magnitud de la precipitación.

A partir de las mediciones hechas con el radar y de los datos de lluvia, se puede inferir un factor de ajuste que permita posteriormente estimar la cantidad de precipitación sobre un área, una vez conocidos los resultados arrojados por el radar.

La utilidad del factor de calibración generalmente decrece cuando aumenta la distancia al pluviógrafo. Esto indica que probablemente sería más efectivo obtener un conjunto de factores de ajuste a partir de medidores distribuidos en el área, que utilizar un solo factor de ajuste. Brandes demostró que, efectivamente, el primer enroque proporciona mejores resultados; sin embargo, el uso de uno y otro enfoque dependerá parcialmente de la variabilidad relativa de los factores de ajuste en tiempo y espacio.

Wilson descubrió que cuando la precipitación era muy variable o muy pequeña, se obtenían con frecuencia, factores de ajuste erróneos.

Se han efectuado experimentos tendientes a determinar la exactitud (o el error promedio) en la estimación de la precipitación hecha con radar y ajustada mediante pluviógrafos; sin embargo, es difícil establecer una comparación entre los resultados de cada uno, debido a las numerosas diferencias entre ellos.

Las diferencias que pueden tener influencia considerable en la exactitud son la duración del período de medición, el tamaño del área, el alcance del radar, la frecuencia con que se recolectan los datos y la densidad de los pluviógrafos.

Según Wilson (1970), puede afirmarse que el error promedio en las estimaciones de lluvia hechas con radar y ajustadas mediante pluviógrafos varían entre el 10% y el 20% y, que éstas son mejores que las hechas sólo con pluviógrafos, particularmente para el tipo de precipitación denominado "chubasco".

3.5. Transmisión de datos mediante redes telemétricas.

Las redes telemétricas son aquellas que permiten la medición remota de una variable y su transmisión hacia otro punto, donde se registra. La red se compone esencialmente de una serie de estaciones remotas en el campo y un puesto central de registro.

En cada estación remota se recogen los datos hidrológicos mediante medidores adecuados, se acondicionan, y se transmiten en forma automática al puesto central donde se registran y procesan automáticamente. Los datos de control y la información, se transmiten generalmente mediante enlaces radiofónicos en forma digital.

Para poder operar con niveles bajos de potencia y así gastar menos energía, se pueden utilizar frecuencias altas, lo que requiere que entre los dos puntos enlazados exista línea de vista. Cuando no se cumple con esta condición entre todos los puntos de medición, se emplean retransmisoras intermedias. De esta forma, por el bajo consumo de energía es factible operar la red con sistemas de celdas solares complementadas con baterías para almacenar energía.

Las estaciones remotas consisten esencialmente de una caseta donde se aloja todo el equipo electrónico (radios, acondicionadores) así como el equipo sensor y de transducción; debe tener además pararrayos, antenas y los paneles solares necesarios. El puesto central de registro deberá contar con todo el equipo necesario para recepción, decodificación, control, registro, y procesamiento de la información. La información una vez procesada podría

transmitirse por algún medio apropiado (teléfono, radio, etc.) hacia otro punto de interés.

El proceso de diseño incluye (1) identificación de sitios probables para estaciones, en un plano topográfico de la zona; (2) reconocimiento de dichos sitios en el campo; (3) confirmación de las líneas de vista entre los puntos escogidos mediante la elaboración de perfiles topográficos y, (4) selección definitiva de los puntos mediante la comprobación directa de las líneas de vista (pruebas de transmisión).

El aspecto más importante del diseño es, sin embargo, la selección del modo de transmisión. Este puede ser de cuatro tipos: (1) continuo, (2) intermitente-periódico, (3) por información acumulada y (4) por orden de la central. (interrogación).

La selección del modo de transmisión se podrá basar en un análisis de confiabilidad, eficiencia y costo de cada uno de ellos, para cada sistema hidrológico en particular.

Las redes telemétricas representan un avance hacia la solución del problema del pronóstico de avenidas eficiente y oportuno. En México, se estableció el primer sistema de este tipo en una subcuenca del Río Grijalva, en cuya boquilla se construye la presa Chicoasén. La red ha producido buenos resultados.

En el inciso siguiente se trata de enumerar en forma general las ventajas y desventajas que tiene un sistema de adquisición de información automático, con el objeto de tratar de definir en cuáles casos es conveniente establecer un sistema como el descrito en esta parte.

3.6. Ventajas y desventajas de la automatización de los sistemas de adquisición de información.

Se considera que un sistema de recopilación y transmisión automática de datos de lluvia y escurrimiento ofrece ventajas tales como bajos costos de operación, información más confiable, oportuna y precisa ya que se puede medir con mayor frecuencia un cierto parámetro, independientemente de las condiciones climáticas, y de la hora y lugar del muestreo.

Las desventajas que presenta el sistema automático son entre otras que se requiere personal especializado para atender las actividades de calibración periódica, mantenimiento y reparaciones en general; su alto costo inicial comprado con los dispositivos no automáticos, en el que se incluyen los costos asociados a una mejor y mayor protección y el costo de los equipos auxiliares de procesamiento, transmisión y recepción.

Por tanto, la conveniencia de establecer un sistema de este tipo, debe analizarse desde el punto de vista económico. Cuando los beneficios no pueden cuantificarse en una forma precisa, se considera como medida útil del proceso de toma de decisiones, la efectividad de un sistema propuesto para alcanzar un objetivo específico.

De esta manera la decisión de adquirir o no un cierto equipo automático puede tomarse mediante la comparación del costo-efectividad del sistema propuesto y la relación correspondiente a sistemas manuales alternativos.

Entre los factores que relacionan el costo y la efectividad de un sistema propuesto podemos citar: el número de estaciones de muestreo, la frecuencia del mismo, la precisión de las mediciones, la confiabilidad del sistema y el método de transmisión de los datos.

La precisión y frecuencia de las mediciones son mayores en el sistema automático; sin embargo, la efectividad del sistema se deberá multiplicar por la probabilidad de la falla del sistema, que las facilidades de transmisión y recepción sean adecuadas, etc. Los factores mencionados podrán a su vez disminuir su probabilidad de falla si, por ejemplo, se instala un equipo auxiliar, se aumenta el número de canales de transmisión, etc., representando esto a su vez, un aumento en el costo del sistema.

Por otra parte, el equipo seleccionado deberá cumplir con ciertos requisitos de sensibilidad, tiempo de respuesta, estabilidad a largo plazo y exactitud.

Cabe mencionar que un sistema de información, por eficiente que sea, no será útil si no se cuenta con los modelos para procesar o transformar la información recopilada en valores que se puedan contrastar con índices prefijados y de cuya comparación puedan adoptarse medidas de acuerdo con una cierta política de operación o control.

Es necesario además que se intensifique la investigación de metodologías que permitan cuantificar los efectos económicos y sociales inherentes al problema de las inundaciones.

4. METODOLOGIA PROPUESTA PARA SELECCIONAR UN SISTEMA DE PRONOSTICO DE AVENIDAS

El objetivo de este capítulo es desarrollar un ejemplo semihipotético, basado en la metodología que presenta Eagleson y coautores (1973), para evaluar la factibilidad de implantar un sistema de alertamiento para el caso de avenidas, utilizando un proceso de simulación.

Con este fin, se cuantifican los beneficios netos generados por redes de diversas densidades, las que permitirán medir la precipitación con diferente exactitud, seleccionándose aquella que genere el máximo beneficio neto. Se consideran sólo redes de medición constituídas por pluviógrafos.

En la primera parte del capítulo se describe la metodología en forma detallada, mencionándose las hipótesis propuestas. En la segunda parte se presenta el ejemplo de aplicación.

4.1. Descripción de la metodología.

4.1.1. Conceptos generales.

El beneficio de un sistema de pronóstico de avenidas, es igual al decremento en los daños, producido por la diseminación del pronóstico.

Los costos que se tomaron en cuenta son los asociados a las siguientes actividades:

- a).- Inversión necesaria para establecer el sistema.
- b).- Operación y mantenimiento del centro de pronóstico y de la red de medición.

c).- Diseminación del pronóstico.

d).- Movilización de algunos tipos de bienes (respuesta al pronóstico).

En el análisis se desprecian los costos o beneficios adicionales, asociados a un desarrollo posterior motivado por un sistema de pronóstico eficiente. Tampoco se considera el aspecto dinámico de la respuesta positiva al pronóstico, la cual depende de la exactitud del pronóstico anterior y del lapso entre avenidas.

El proceso de simulación utilizado para determinar los beneficios netos, asociados a redes de pluviógrafos de diferentes densidades, es el siguiente (Fig. 4.1.):

- Se genera un conjunto de gastos máximos, así como el lapso entre ellos, para el sitio de interés.
- Se generan varios conjuntos de gastos "pronosticados" con base en el conjunto de gastos generados en el inciso anterior y en la simulación del comportamiento de redes de pluviógrafos de diferentes densidades.
- Se calculan los beneficios y costos producidos por la respuesta de los ocupantes de la zona en donde se pronostica un gasto máximo y se determinan los costos de capital, operación y mantenimiento del centro de pronóstico y de la red de pluviógrafos.
- Se calculan para cada red de pluviógrafos los beneficios netos actualizados a valor presente para un horizonte de planeación estipulado.

Estos pasos se repiten para redes de pluviógrafos de diferentes densidades, cada una de las cuales permitirán medir la precipitación con una cierta exactitud, seleccionándose aquella que genere el máximo beneficio neto. A continuación se precisa la secuencia mencionada, presentándose al final el ejemplo de aplicación.

4.1.2. Generación de los gastos máximos.

Shane y Lynn (1964) propusieron un modelo matemático para evaluar el riesgo de las inundaciones. Mediante éste, generan una serie formada por gastos pico mayores que un nivel crítico (v). A tales eventos les denominan "eventos dañinos".

En el caso de pronóstico de avenidas debe seleccionarse un nivel crítico menor que el nivel que produce daños. Así, por ejemplo, si el gasto pronosticado, traducido a nivel, es mayor que el nivel de daños y el gasto que se presenta ("real"), traducido a nivel, es mayor que el nivel crítico pero menor que el nivel de daños (Fig. 4.2.), se generará un costo de movilización por la respuesta positiva de los ocupantes de la zona.

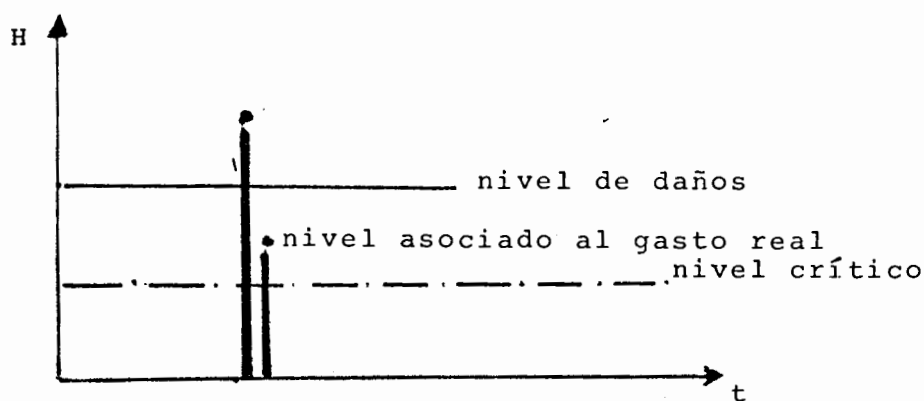


FIGURA 4.2.

Por tanto, el seleccionar un nivel crítico menor que el nivel que produce daños, permite tomar en cuenta los costos generados por una respuesta positiva de los ocupantes de la zona advertida, ante un aviso falso de inundación. El valor crítico (v) se escoge por inspección, con objeto de que la probabilidad de no considerar los costos de falsas alarmas sea mínima.

- Shane dedujo que la distribución teórica de la magnitud de "eventos dañinos" es de forma exponencial con función de distribución acumulada de la forma

$$F_{Q|v}(q) = 1 - e^{-(q-v)/\gamma} \quad (4.1)$$

donde Q es la magnitud del pico, v el nivel crítico arriba del cual se cataloga a un evento como dañino y γ un parámetro. Se considera que la magnitud de un evento dañino es independiente de la magnitud de todos los demás.

Shane comenta que no es extraño el buen ajuste de los datos a la distribución exponencial, ya que una serie de este tipo (eventos dañinos) es sólo una muestra de una población, cuya función de distribución corresponde a la cola de la función de distribución asociada con una población mayor (todos los gastos pico).

Si se hace un ajuste por momentos se puede considerar que $\bar{\gamma}$ es una buena aproximación de γ , donde:

$$\bar{\gamma} = \bar{Q} - v \quad (4.2)$$

siendo

$$\bar{Q} = \frac{\sum Q_i}{N} \quad (4.3)$$

y N = número de eventos dañinos.

- La generación de la magnitud de los "eventos dañinos" se hace de la siguiente manera:

1.- Se escoge el nivel crítico (v) del registro histórico de gastos máximos del punto en estudio.

2.- Se obtiene N , $\bar{Q}$ y γ .

3.- Se genera un número aleatorio (n_a) con distribución uniforme entre cero y uno, el cual se supondrá que es igual al valor de la función de distribución acumulada $F_{Q|v}(q)$, dada por la ec. 4.1:

$$n_a = 1 - e^{-(q-v)/\gamma}$$

4.- Se despeja el valor de q el cual es el gasto máximo "generado".

$$q = v - \gamma \ell_n [1 - n_a] \quad (4.4)$$

Los gastos máximos "generados" que en lo que sigue se denominarán como gastos "reales", se consideran como substitutos de los del registro histórico ya que conservan la media y la variancia de ellos y permiten aumentar el tamaño del registro de gastos.

4.1.3. Generación del lapso entre gastos máximos.

El número de "eventos dañinos" N sigue aproximadamente una distribución tipo Poisson si se cumplen las siguientes propiedades (Shane y Lynn, 1964).

- En un lapso arbitrariamente seleccionado, el número de eventos dañinos que ocurre, es independiente del que se presenta en todos los demás lapsos que no tienen algún punto en común.
- La probabilidad de ocurrencia de un número dado de eventos dañinos es la misma, para todos los intervalos de tiempo de la misma longitud.

- La probabilidad de que ocurran dos o más eventos en un lapso seleccionado, es muy pequeña.
- En el caso de lapsos muy pequeños, la probabilidad de ocurrencia de un evento dañino es proporcional a la longitud del intervalo.
- El número de eventos dañinos N que ocurren en un intervalo dado es completamente independiente de la magnitud de cada evento dañino.
- Shane demuestra en una forma simple, que el aceptar que el número de eventos dañinos sigue una función tipo Poisson, equivale a considerar que el lapso entre dichos eventos sigue una distribución exponencial, cuya función de distribución acumulada es de la forma:

$$F_T(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (4.5)$$

Si se hace un ajuste por momentos, se puede considerar que el promedio de ocurrencia de eventos dañinos ($\bar{\lambda}$) de la muestra, es una buena aproximación del parámetro λ o sea:

$$\bar{\lambda} = \frac{N}{t_r} \quad (4.6)$$

donde t_r es la longitud del registro en años y N el número de eventos dañinos.

- El lapso entre "eventos dañinos" generados se calcula mediante el siguiente procedimiento:

1.- Se calcula λ con la ec. 4.6.

2.- Se genera un número aleatorio con distribución uniforme entre cero y uno (n_a), el cual se supone que es igual al valor de la función de distribución acumulada $F_T(t)$ dada por la ec. 4.5.

$$n_a = 1 - e^{-\lambda t}$$

3.- Se despeja el valor de t de la ec. anterior:

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln [1 - n_a] \quad (4.7)$$

El número de lapsos generados (t) dependerá del tamaño del registro que se desee obtener. Dicho registro se construirá asociando a cada gasto máximo "generado" (gasto "real") el lapso generado correspondiente (t).

Con el fin de comparar cuanto se ajustan los gastos máximos registrados a la función de distribución acumulada dada por la ec. 4.1.; y el lapso entre eventos del registro histórico a la función de distribución acumulada dada por la ec. 4.5., se calcula la probabilidad observada de ambos eventos.

Se define como probabilidad observada a:

$$P(X_i) = P(X < X_i) \quad (4.8)$$

dicha probabilidad está dada por:

$$P(X < X_i) = 1 - \frac{1}{T_r} \quad (4.9)$$

donde T_r es el período de retorno. Para calcularlo se pueden utilizar varias fórmulas; una de las más empleadas es la de Weibull (Linsley, 1975).

$$T_r = \frac{N+1}{m} \quad (4.10)$$

en la que N es el número de datos y m es el número de orden que ocupa el evento X_i en el conjunto de datos ordenados de mayor a menor.

4.1.4. Generación de los gastos "pronosticados" con una cierta desviación estándar.

Para calcular los gastos "pronosticados" definiremos la variable X_p como:

$$X_p = \frac{\text{Gasto "pronosticado"}}{\text{Gasto "real"}} = \frac{Q_p}{Q_r} \quad (4.11)$$

Eagleson y Grayman (1971) demuestran que esta variable sigue aproximadamente una distribución log-normal, cuyos parámetros son función de varias características: climáticas (intensidad y duración de la lluvia, estructura de correlación espacial de la tormenta), de la cuenca (tamaño, forma, tiempo de respuesta), y de la red de medición (número de pluviógrafos, distribución)

Para calcular el valor de X_p es necesario definir primero su función de distribución acumulada, o su función de densidad. Esto se consigue una vez que se conocen los parámetros de la misma, o sea la media (μ_L), la desviación estándar (σ_L) y su límite inferior (a_L), los cuales están dados por:

$$\mu_L = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{(\mu - a_L)^4}{(\mu - a_L)^2 + \sigma^2} \right] \quad (4.12)$$

$$\sigma_L^2 = \ln \left[\frac{(\mu - a_L)^2 + \sigma^2}{(\mu - a_L)^2} \right] \quad (4.13)$$

$$a_L = \mu \left(1 - \frac{\nu}{\nu'} \right) \quad \forall X_p \neq 0 \quad (4.14.)$$

$$\text{donde } \nu = \frac{\sigma}{\mu} \quad (\text{coeficiente de variación}) \quad (4.15.)$$

$$\nu' = \left[+ \sqrt{(\gamma/2)^2 + 1} + \gamma/2 \right]^{1/3} + \left[- \sqrt{(\gamma/2)^2 + 1} + \gamma/2 \right]^{1/3} \quad (4.16)$$

$$\text{siendo } \gamma = \frac{1/n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{\left(\frac{n-1}{n} \cdot S^2 \right)^{1.5}} \quad (\text{coeficiente de asimetría}) \quad (4.17.)$$

En este caso se considera $a_L=0$ para que la variable X_p no resulte negativa en ningún caso.

Para valuar μ_L y σ_L es necesario conocer μ y σ . Si se hace un ajuste por momentos, la media (μ) y la desviación estándar (σ) de la población, se estiman con la media (μ_{xp}) y la desviación estándar (σ_{xp}) de la muestra, compuesta en este caso por los valores de X_p .

Si se supone que no existen errores sistemáticos, la media de los valores de X_p es igual a uno, lo que implica que el registro de gastos "pronosticados" no tiene tendencia.

o sea:

$$\mu_{xp} = 1.0$$

(4.18.)

Esto equivale a que la media de los gastos "pronosticados" sea igual a la media de los gastos "reales".

Puesto que en este caso $a_L = 0$ y $\mu_{xp} = 1$, basta suponer un valor de la desviación estándar (σ_{xp}), para poder definir la función de distribución log-normal de X_p (ec. 4.12. y 4.13.).

Una vez definida la función de distribución de X_p para una desviación estándar supuesta (σ_{xp}), se pueden calcular los gastos "pronosticados" simplemente generando valores de X_p y utilizando la ec. 4.11.

Para simplificar el proceso de generación de X_p se puede tratar la distribución log-normal como una distribución normal, siempre y cuando se empleen logaritmos de las variables aleatorias.

De esta manera, la probabilidad de que una variable aleatoria con distribución log-normal tome un valor entre a y b , será igual a la probabilidad de que una variable aleatoria con distribución normal y con $\mu = \mu_L$ y $\sigma = \sigma_L$,

tome un valor entre $\ln a$ y $\ln b$ o sea:

$$P(a \leq X \leq b) = F \left[\frac{\ln(b-a_L) - \mu_L}{\sigma_L} \right] - F \left[\frac{\ln(a-a_L) - \mu_L}{\sigma_L} \right] \quad (4.19)$$

Los valores dados por la ec. 4.19. se obtienen en cualquier tabla de valores de la distribución normal (Manual de Fórmulas y Tablas Matemáticas, serie Shaum's).

A continuación se explica la forma de calcular los valores de X_p .

1.- Se genera un número aleatorio (n_a) con distribución uniforme entre cero y uno el cual se supone que es igual al valor de la función de distribución acumulada de X_p o sea:

$$n_a = P(X \leq X_p) \quad (4.20)$$

donde

$$P(X \leq X_p) = F \left[\frac{\ln(X_p - a_L) - \mu_L}{\sigma_L} \right] = F[K\alpha] \quad (4.21)$$

2.- Se obtiene el valor de la abscisa de la distribución normal estándar $[K\alpha]$, correspondiente al valor de la función de distribución acumulada de X_p , valuada de $- \infty$ a $K\alpha$.

3.- Se despeja el valor de X_p de la ec. 4.21.

$$K\alpha = \frac{\ln(X_p - a_L) - \mu_L}{\sigma_L} \quad (4.22.)$$

puesto que $a_L=0$ se tiene:

$$X_p = e^{(\mu_L + K\alpha\sigma_L)} \quad (4.23.)$$

donde

$$\left. \begin{aligned} K\alpha &= -\gamma; & \text{si } 0 \leq n \leq 0.5 \\ K\alpha &= \gamma; & \text{si } 0.5 \leq n \leq 1.0 \end{aligned} \right\} \quad (4.24.)$$

Se generarán tantos valores de X_p como gastos se desee "pronosticar". El lapso entre los gastos "pronosticados" será el mismo que para los gastos "reales".

Obsérvese que el conjunto de gastos "pronosticados" está asociado a una cierta desviación estándar de X_p , lo que equivale a decir que se pronosticaron con un cierto error.

Si se define el error medio de los gastos "pronosticados" ($\bar{E}$) como:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{N} \quad (4.25.)$$

donde

$$E_i = \frac{|Q_{\text{pronosticado}} - Q_{\text{real}}|}{Q_{\text{real}}} \times 100 \quad (4.26)$$

se podrá conocer el valor de dicho error medio para cada conjunto de gastos "pronosticados" con una cierta desviación estándar de la variable X_p .

Una vez calculado el error medio de un conjunto de gastos "pronosticados", se relaciona a éste con el número de pluviógrafos que permite pronosticar

el gasto con dicho error.

Lo anterior se logra mediante el uso de la relación (fig. 3.2.) que se acepta igual a la propuesta por Eagleson, con la cual se calcula el número de pluviógrafos (G) en función: del tipo de tormenta (ciclónica o convectiva); la estructura de correlación de la misma (); y la forma y tamaño de la cuenca.

4.1.5. Cálculo de los beneficios y costos producidos por el sistema de pronóstico.

Los costos y beneficios que se consideran son los asociados a una respuesta positiva de la población advertida, ante un pronóstico diseminado. Estos se determinan como funciones lineales de diversas variables. Para situaciones particulares, esta hipótesis puede no ser válida; sin embargo, mientras no se cuente con información suficiente y confiable no se recomienda utilizar otro enfoque.

Se denominan como beneficios "posibles" en este trabajo a los generados por las medidas no estructurales (Yevjevich, 1974) que se tomen como consecuencia de un pronóstico oportuno (por ejemplo, evacuación). Para poder ejecutar dichas medidas, es necesario disponer del tiempo suficiente.

Por tal motivo, para estudiar la factibilidad de implantar un sistema de pronósticos, con base en datos de lluvia, sólo se tomarán en cuenta aquellas cuencas cuyo tiempo de concentración sea mayor que el requerido para efectuar las siguientes actividades: elaboración del pronóstico, diseminación del mismo y ejecución de las medidas no estructurales.

Al evaluar los beneficios se presentan dos casos

- 1.- Cuando el gasto "pronosticado" es menor o igual que el "real"; en este caso el beneficio es función del gasto "pronosticado".

2.- Si el gasto "pronosticado" es mayor que el "real", el beneficio es función del gasto "real".

Nótese que en ambos casos el beneficio es función del gasto menor, entre el "pronosticado" y el "real".

Con respecto a los costos, sólo se considerarán los asociados a la movilización (evacuación). No se toman en cuenta los costos de posibles medidas estructurales (construcción de bordos, desfuegos, etc.), ya que se supuso que no es posible ejecutar tales medidas por falta de tiempo.

Dichos costos siempre dependen del valor del gasto "pronosticado", el cual determina la magnitud de la medida por realizar.

Se pueden presentar, sin embargo, algunos casos en los cuales el hecho de que el pronóstico no sea exacto, puede generar un costo "adicional" al de la movilización.

Un ejemplo de este tipo se tendría cuando se pronosticara un gasto menor que el que produce daños (crítico) y se presentara un gasto mayor que el crítico.

Aunque este caso sería idéntico al de no contar con un sistema de pronóstico, el hecho de anunciar que no se presentará una avenida y que ésta si ocurra origina que la población advertida pierda la confianza en el pronóstico. Esta pérdida de confianza es difícil de medir; sin embargo, se refleja en la variabilidad del factor de respuesta de la población, lo que evidentemente afecta los beneficios posibles.

Otro ejemplo sería aquel en el cual el gasto "pronosticado" fuera exageradamente grande, lo que podría provocar el pánico en la población.

Obsérvese que los costos y los beneficios se determinaron como función de

los gastos "pronosticados" y "reales"; estos valores podrían transformarse en cotas mediante el uso de curvas elevaciones-gastos de la forma:

$$Y = (Q/\alpha)^{1/m}$$

donde α y m son parámetros de ajuste de la curva, Q , el gasto máximo considerado y Y , el nivel de la inundación producida por dicho gasto.

4.1.6. Costos asociados al sistema de medición.

Estos costos se pueden agrupar de la siguiente manera:

a).- Costo del centro de pronóstico.

Comprende la construcción del centro y la adquisición del equipo de procesamiento, transmisión, y recepción de la información que requiere dicho centro.

El tamaño del centro y la capacidad del equipo dependerán del tamaño de la cuenca por atender.

Si se construye un centro que atienda varias cuencas, el costo asociado a cada una podrá calcularse, ya sea en función de su área, de su densidad de pluviógrafos o de los beneficios posibles de la misma.

b).- Costo de la red de medición.

Aquí se incluyen el costo de los pluviógrafos y del equipo de transmisión requerido; se deben considerar además los costos de construcción de la estructura de protección de los aparatos y los costos de instalación.

c).- Costos de operación y mantenimiento, tanto del centro de pronóstico como de la red de medición. Se deberá añadir al costo de operación de la

red en el primer año, el costo de las pruebas necesarias para iniciar la operación de la red de medición.

d).- Costo de elaboración y diseminación del pronóstico.

El costo de elaboración del pronóstico dependerá del tipo de modelo precipitación-escorrentía que se utilice, y del tipo y cantidad de personal que lo prepara.

En este concepto se tomará en cuenta el costo de formular adaptar y calibrar el modelo que se utilizará para elaborar el pronóstico.

El costo de diseminación dependerá de los medios de comunicación disponibles y de la localización y número de las localidades por advertir.

e).- Costo del estudio, para conocer la factibilidad técnica y económica de implantar un sistema de pronóstico, y diseñar las características del mismo.

4.1.7. Cálculo de las relaciones beneficio-costos y beneficio neto del sistema de pronóstico.

Una vez calculados todos los beneficios y costos mencionados se actualizan utilizando para ello la expresión:

$$V_p = V_i / (1+r)^i$$

donde V_i es el valor del beneficio o el costo en el año i ; r es la tasa de descuento; i , el año en que se obtiene el beneficio o se genera el costo, siendo $i = 1$ para el primer año de inversión; y V_p , el valor del beneficio o el costo del año i actualizado a valor presente.

Enseguida se obtienen los beneficios y los costos totales actualizados y

con ellos se calculan las relaciones beneficio entre costo (B/C) y beneficio neto ($B-C$). Estas, corresponderán a un sistema que permite pronosticar los gastos con un cierto error.

Sin embargo, lo que interesa conocer es el grado de exactitud con que se deben de pronosticar los gastos, para hacer máximas las relaciones mencionadas.

Esto se puede lograr de dos formas:

- 1.- Mediante una simulación exhaustiva que permita obtener los valores de las relaciones mencionadas para diferentes errores medios en el gasto pronosticado.
- 2.- A partir de curvas ajustadas: de beneficios y costos totales contra error medio de los gastos pronosticados. Dichas curvas se pueden definir con un número pequeño de puntos (Fig. 4.3.).

Fig. 4.3. Gráficas: Beneficios totales actualizados vs error medio de los gastos pronosticados (B vs $\bar{E}$); y gastos totales actualizados vs error medio (C vs $\bar{E}$).

Para obtener los puntos de las gráficas beneficios vs error y costos vs

error, se debe repetir la secuela desde el inciso 4.1.4., modificando en cada ocasión el valor de σx_p , o sea:

- a.- Se propone un valor de σx_p lo que permite definir la función de distribución log-normal de la variable x_p .
- b.- Se generan valores de x_p y se calculan los gastos "pronosticados".
- c.- Se estima el error medio de dichos gastos.
- d.- Se obtiene el número de pluviógrafos con base en dicho error.
- e.- Se calculan los costos y beneficios totales del sistema, con base en el número de pluviógrafos, y se actualizan a valor presente.

Una vez que se han definido las curvas B vs $\bar{E}$ y C vs $\bar{E}$ se pueden obtener fácilmente las curvas B/C vs $\bar{E}$ y (B-C) vs $\bar{E}$, que indicarán en cada caso cual es el valor de $\bar{E}$ que hace máxima cada relación.

Con dichos errores se podrá decidir sobre el número de pluviógrafos que deberá tener la red de medición, y con base en ello se podrían diseñar las demás características del sistema completo.

4.2. Ejemplo de aplicación.

El ejemplo que se presenta no es completamente hipotético. La cuenca analizada pertenece al sistema del Río Lerma. Los gastos máximos que se tomaron como base son los registrados en la estación hidrométrica Camécuaro. Los costos y beneficios, sin embargo, son valores estimados en función de los beneficios y costos generados en zonas cercanas por gastos de magnitud similar.

El objetivo principal de este ejemplo no es resolver un caso específico sino más bien ilustrar una metodología que permita estudiar la factibilidad económica de implantar un sistema de pronóstico de avenidas, en forma general.

El análisis de factibilidad señalará el rango de error con el cual debe operar una red de pluviógrafos, para que haga máximas las relaciones (B-C) y B/C. Dicho error indicará a su vez el número de pluviógrafos que se requiriera, según el criterio de diseño de Eagleson (Fig. 3.2.).

4.2.1. Generación de la magnitud de los gastos máximos.

El nivel crítico de daños (v) se seleccionó buscando que se presentaran tres o cuatro gastos que rebasaran ese nivel en el año (ver tabla 4.1.).

$$v = 25 \text{ m}^3/5.$$

Así se obtuvo un valor medio para los "eventos dañinos" de (tabla 4.2.):

$$\bar{Q} = 37.78 \text{ m}^3/5.$$

y por tanto

$$\gamma = \frac{1}{\bar{Q}} - v = 37.78 - 25 = 12.78$$

La función de distribución acumulada de la magnitud de los eventos dañinos se obtuvo mediante la ec. 4.1. (tabla 4.3.):

$$F_{Q|v}(q) = 1 - e^{-(q-25)/12.78}$$

Para comprobar el grado de ajuste de los datos del registro histórico, a la distribución teórica, se calculó la probabilidad observada de la magnitud de los gastos máximos (tabla 4.4.):

$$P(X < X_i) = 1 - \frac{m}{N+1} = 1 - \frac{m}{74}$$

En la fig. 4.4. se presenta la función de distribución acumulada (teórica) y la probabilidad observada de los gastos que producen daños.

Enseguida se generan las magnitudes de los eventos dañinos mediante la ec. 4.4., (tabla 4.5.).

$$q = 25 - 12.78 \ln [1 - n_a]$$

Así, por ejemplo, para el primer valor de dicha tabla:

$$N_a = 0.14 \Rightarrow q = 27 \text{ m}^3/5.$$

4.2.2. Generación del lapso entre gastos máximos.

Una vez seleccionado el nivel crítico de daños $v = 25 \text{ m}^3/\text{s}$ se analiza si los gastos mayores que ese nivel cumplen con las propiedades de la distribución tipo Poisson. En la tabla 4.1. se observa que la probabilidad de ocurrencia de los eventos dañinos ($Q > 25 \text{ m}^3/\text{s}$) es similar para los meses de julio, agosto y septiembre. Se tomaron en cuenta, sin embargo, los meses de junio y octubre para aumentar un poco el tamaño del registro y para no despreciar los eventos dañinos ocurridos en esas fechas.

El promedio de ocurrencia de los eventos dañinos es (ec. 4.6.).

$$\lambda = \frac{73}{28} = 2.61 \text{ eventos/año.}$$

La función de distribución acumulada del lapso entre eventos se calcula mediante la ec. 4.5., (tabla 4.6.):

$$F_T(t) = 1 - e^{-2.61t}$$

Los lapsos entre gastos máximos registrados se presentan en la tabla 4.7. y la probabilidad observada de los mismos en la tabla 4.8.

En la fig. 4.5. se graficaron los resultados obtenidos y la función de distribución acumulada del lapso entre eventos.

A continuación se generan los lapsos mediante la ec. 4.7., (tabla 4.9.):

$$t = - \frac{1}{2.61} \ln [1 - n_a]$$

si

$$\text{si } n_a \Rightarrow t = 0.072$$

Puesto que sólo se consideraron cinco meses para el análisis el lapso entre eventos expresados en días será:

$$t = 150 \text{ días} \times 0.072 = 11 \text{ días}$$

Si se observa, por ejemplo, el quinto evento de la tabla 4.9. se verá que el lapso acumulado en días, es 167; esto indica que el evento se presentó 17 días después del primer año o sea el 17 de junio del año dos, ya que el primer mes que se considera es junio.

En el ejemplo se escogió una vida útil de la red de 30 años. Esto equivale a un registro de 4,500 días. En la tabla 4.9. se observa que en este caso se requirió generar 83 eventos para tener un registro de tal longitud.

El proceso seguido hasta este punto, se ejecuta una sola vez.

4.2.3. Generación de los gastos "pronosticados"

A partir de aquí se hará el análisis tantas veces como puntos se desee obtener para definir las relaciones beneficios y costos totales actualizados vs. error medio de los gastos pronosticados. En el ejemplo se calcularon 10 alternativas.

A continuación, se describe la secuela empleada para generar los gastos "pronosticados" y para calcular el error medio de dichos gastos.

a) En todas las alterantivas se supone:

$$\mu X_p = 1.0$$

b) Se supone por ejemplo:

$$\sigma X_p = 0.15$$

c) Se calculan los parámetros de la distribución log-normal a la que se ajusta la variable X_p :

de la ec. 4.12.
$$\mu_L = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1.0}{1 + (0.15)^2} \right] = - 0.011125304$$

de la ec. 4.13.
$$\sigma_L^2 = \ln \left[\frac{1 + (0.15)^2}{1} \right] = 0.022250609$$

$$\sigma_L = 0.149166380$$

d) Se genera un número pseudo-aleatorio (η_a) entre 0 y 1, con distribución uniforme. Para ello se utilizó la fórmula

$$\eta_{ai} = \text{parte fraccionaria de } \left[(\pi + n_{ai-1})^5 \right]$$

donde η_{ai-1} es la "semilla"; así por ejemplo:

$$\eta_{ai-1} = 0.376219459$$

$$\eta_{ai-1} = 0.7201252$$

e) De la ec. 4.20.:

$$\eta_{ai} = p(X \leq X_p) = 0.7201252$$

Si se busca el valor de la abscisa de la distribución normal estándar (K_α) en una tabla donde la probabilidad se cuantifique de "oo" a " K_α " se tiene:

$$K_\alpha = 0.582848846$$

f) De la ec. 4.24.:

$$X_p' = e^{(-0.011125304 + 0.582848846 \times 0.14916638)}$$

$$X_p = 1.078764223$$

g) Para calcular los gastos "pronosticados" se debe conocer el gasto "real" de la tabla 4.5. se observa que el primer gasto es 27 m^3 .

De la ec. 4.11.: $Q_p = 1.079 \times 27 = 29.13 \text{ m}^3/5$.

h) El error asociado a dicho gasto es:

de la ec. 4.26.

$$E_i = \frac{|29.13 - 27.0|}{27.0} \times 100 = 7.87\%$$

i) Se repite la secuela a partir del inciso "d", tantas veces como gastos "pronosticados" se desee generar.

j) El error medio de los gastos "pronosticados" es: (tabla 4.10.)
de la ec. 4.26.

$$\bar{E} = \frac{963.8}{83} = 11.61\%$$

El cálculo se puede ordenar como se muestra en la tabla 4.10. El resumen de los resultados obtenidos de las 10 alternativas se muestran en la tabla 4.11.

4.2.4. Cálculo del número de pluviógrafos.

Conocido el error medio de los gastos pronosticados se diseñó la red mediante el criterio de Eagleson (capítulo 3). El proceso de cálculo es el siguiente:

- a) Se selecciona el tipo de tormenta: para este caso será convectiva.
- b) Se calcula el radio de correlación de la tormenta: de estudios hechos en la zona, se seleccionó un valor de $r_o = 10$ km.
- c) Se estiman la longitud del cauce principal (L_s) y la longitud promedio transversal de la cuenca ($2L_c$).

$$L_s = 60 \text{ km. ; } 2 L_c = 20 \text{ km.}$$

$$A = L_s \times 2 L_c = 1,200 \text{ km}^2.$$

d) Se calculan: el factor de amplitud de la tormenta (β) y el factor de forma de la cuenca (λ):

$$\beta = \frac{L_s}{r_o} = \frac{60}{10} = 6 \quad \lambda = \frac{L_c}{L_s} = \frac{10}{60} = 0.166$$

e) Con ayuda de la fig. 3.2. para $\bar{E} = 11.8\%$ y $\beta = 6$ se obtiene:

$$\frac{2G}{\lambda\beta} = 3.8 \Rightarrow G = \frac{3.8\lambda\beta}{2} = 1.94$$

En la tabla 4.12. aparece el número de pluviógrafos que se requiere para cada una de las 10 alternativas estudiadas en el ejemplo.

4.2.5. Cálculo de los beneficios y costos generados por el sistema de pronóstico.

Para evaluar los beneficios posibles o daños evitables mediante la evacuación se consideró que el lapso entre el aviso y la ocurrencia de la avenida sólo permite movilizar algunos bienes como ganado, maquinaria agrícola y vehículos.

A partir de los registros existentes de daños en la zona se obtuvieron tres valores medios de las pérdidas en el renglón ganadero y de maquinaria agrícola, los que se asociaron con los gastos promedio que las causaron. La gráfica obtenida de beneficios posibles vs gastos se presenta en la fig. 4.6.

Los costos de movilización se supusieron, arbitrariamente, iguales a un 10% de los beneficios posibles. Para cada cuenca, dicho porcentaje dependerá del tiempo disponible para la movilización. Así, podría establecerse una escala que relacionara el tiempo disponible y el porcentaje que representan los costos de movilización, con respecto a los beneficios posibles.

En el caso de una cuenca grande podrían establecerse relaciones similares entre el costo de medidas estructurales de emergencia y los beneficios derivados de dichas medidas.

En el ejemplo, los beneficios posibles se evalúan entrando a la gráfica de la Fig. 4.6. con el menor gasto entre el real y el pronosticado, y utili-

zando la función correspondiente.

Los costos de movilización se cuantifican a partir del gasto pronosticado y la función respectiva que también aparece en la Fig. 4.6.

En la tabla 4.13. se presentan tanto el beneficio posible como el costo de movilización para todos los casos en que por lo menos uno de los dos gastos (real y pronosticado) sea mayor que el gasto crítico que produce daños ($= 25 \text{ m}^3/\text{s}$). El conjunto de gastos corresponde a los pronosticados con una $= 0.15$ y con un error medio $\bar{E} = 11.61\%$.

Allí se indican también los casos en los cuales se podría asociar un costo "adicional" como se menciona en el inciso 4.1.5.

4.2.6. Costos asociados al sistema de medición.

Se consideró un horizonte de planeación de 30 años.

A partir de este inciso se relacionan todos los costos con el número de pluviógrafos. Se buscó una relación de este tipo con el fin de asociar un costo total a cada calor del error medio en los gastos pronosticados, el cual a su vez también es función del número de pluviógrafos.

a) Costo del centro de pronóstico (Ccp).

Dependerá del área por vigilar. Si el área es de $90,000 \text{ km}^2$ el centro tendría un costo aproximado de $\$2.5 \times 10^6$ (Eagleson y coautores, 1973).

Por simplicidad, y no tomando en cuenta economías de escala, si el área de la cuenca del ejemplo es de $1,200 \text{ km}^2$ esto equivaldría a $1/75$ del área vigilada por el centro, lo que correspondería a un costo capital de $\$20,000.00$.

Se consideró que dicho costo estaba asociado a un pluviógrafo y se propuso

una relación entre el número de pluviógrafos (G) y el costo del centro (Ccp) (Fig. 4.7.). Se podría suponer una relación como la que se indica con la línea punteada.

De la fig. 4.7. y si $G = 2$:

$$C_{cp} = \$30,000.00$$

b) Costo de la red de medición (Crm).

Se considera que el costo del pluviógrafo, del equipo de transmisión, de la estructura requerida y de la instalación de cada pluviógrafo es de \$25,000.00.

$$C_{rm} = 2 \times \$25,000.00 = \$50,000.00$$

Por tanto, el costo total de inversión (Cti) es:

$$C_{ti} = \$80,000.00$$

c) Costos de operación y mantenimiento:

Para el caso de la red de medición, si $G=2$, de la Fig. 4.8. se obtiene:

$$C_{op} + C_{man} = \$20,000.00/\text{año}.$$

En ningún concepto se considera el costo de la reposición del equipo.

En el caso del centro, para $G=2$, se obtiene de la Fig. 4.9.:

$$C_{op_c} + C_{man_c} = \$22,000.00/\text{año}.$$

Por tanto el costo total de operación y mantenimiento (Ctom) es:

$$C_{tom} = \$42,000.00$$

d) Costo de elaboración y diseminación del pronóstico.

Se estimó en \$35,000.00 para esta cuenta y se consideró independiente de la magnitud del evento pronosticado.

En el ejemplo no se consideró el costo del estudio de factibilidad para la implantación del sistema de pronóstico; sin embargo sería sencillo incluirlo como costo de inversión.

En la tabla 4.14. se presentan los costos mencionados así como los costos totales actualizados al año cero.

Si se repite la secuela indicada a partir del inciso 4.2.3. se tendrá un beneficio y un costo total actualizado para cada conjunto de gastos "pronosticados" con un error medio.

Los beneficios y costos totales actualizados que se obtuvieron para las 10 alternativas estudiadas se presentan resumidos (tabla 4.15) y graficados (Fig. 4.10.).

A continuación se trataron de ajustar varias funciones a los resultados obtenidos (Fig. 4.10.), entre ellas:

- a) de tipo exponencial: $Y = ae^{bx}$
- b) una curva logarítmica: $Y = a + b \ln x$
- c) de tipo potencia: $Y = ax^b$
- d) una recta: $Y = a + bx$

En el caso de los costos, la función que mejor se ajustó a los datos fue la del tipo c, obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.002. La ecuación de la función es:

$$C = 2526.63 \times E (\%)^{-0.4262}$$

Los beneficios se ajustaron mejor a una recta con un coeficiente de correlación de 0.901. La ecuación obtenida es:

$$B = 1866.03 - 39.90 \times E (\%)$$

En la tabla 4.16 aparecen los valores de los costos y beneficios totales actualizados, obtenidos a partir de dichas ecuaciones, para diferentes errores medios.

En la Fig. 4.10 aparecen las funciones graficadas.

En la tabla 4.16 se presentan los valores de las relaciones beneficios netos (B-C) y beneficios entre costo (B/C). Las gráficas correspondientes a estas relaciones se muestran en la Fig. 4.11.

Con base en ellas se selecciona el error dentro del cual puede operar la red para obtener el beneficio neto máximo o la máxima relación B/C.

De la Fig. 4.11 se observa que, si deseamos obtener un beneficio neto igual a \$500,000.00 se deberán pronosticar los gastos con un error que fluctúe entre 7.6% y 13%.

Si lo que se busca es alcanzar una relación beneficio entre costo igual o mayor que 1.55, se deberán pronosticar los gastos con un error que fluctúe entre 10% y 18%.

El intervalo común de ambas relaciones es del 10 al 13% lo que a su vez equivale a instalar tres o dos pluviógrafos respectivamente, de acuerdo

con la tabla 4.12.

Dependiendo de las limitaciones presupuestales y de la topografía de la zona, podría ser más conveniente la instalación del número mayor de pluviómetros; esto disminuiría la probabilidad de que el centro de la tormenta no fuera detectado por ninguno de los medidores, y además permitiría lograr pronósticos un poco más exactos, lo que a su vez redundaría en una mejor respuesta de la población al pronóstico.

CONCLUSIONES

Aunque el pronóstico de la ocurrencia de la precipitación se ha podido mejorar mucho, el aspecto cuantitativo del mismo todavía tiene considerables deficiencias.

Las técnicas más utilizadas para el pronóstico de precipitación a corto plazo son las sinópticas y las físicas; éstas, sin embargo, no permiten pronosticar la ocurrencia de precipitación al nivel de detalle que interesa al hidrólogo.

Actualmente se estudia la forma de mejorar el aspecto cuantitativo del pronóstico de la precipitación a escala local; se cree que las técnicas estadísticas pueden ser las herramientas más sencillas y rápidas para resolver en forma aproximada dicho problema.

El ciclo hidrológico es un proceso bastante complejo que involucra una cantidad muy grande de factores; la variabilidad de éstos en tiempo y espacio es distinta: algunos pueden variar rápidamente y otros en un plazo muy largo por lo cual se podrían considerar como constantes.

Los modelos matemáticos empleados en la hidrología paramétrica son, hasta la fecha, la representación más sencilla de dicho ciclo, aunque posiblemente no la más exacta. El enfoque de sistemas podría proporcionar quizá mejores resultados, pero la mejoría que se logre en éstos, si se compara con los valores obtenidos mediante los modelos conceptuales o de caja negra, no justifica la complejidad de dicho enfoque. Por tal motivo se prefieren, para pronosticar el escurrimiento, modelos del primer tipo.

Por otra parte, a pesar de que los sistemas hidrológicos no son lineales, se utilizan generalmente modelos lineales ya que no es conveniente emplear en algunos casos otro enfoque que complique el proceso de cálculo, si no se

cuenta con datos suficientes y confiables.

Es necesario buscar métodos que permitan cuantificar mejor las pérdidas, con el fin de establecer relaciones lluvia-escorrentamiento más confiables.

El conocer la densidad de la red de pluviómetros que produce el máximo beneficio neto o la relación máxima de beneficio entre costo, reduce bastante el problema de seleccionar el sistema de pronóstico.

Si no se contara con ese dato, el proceso que se debería seguir sería:

- 1.- Diseñar la red de pluviómetros utilizando cualquier criterio de los expuestos.
- 2.- Generar tormentas y simular la medición de éstas mediante la red de pluviómetros propuesta (Brass, 1975).
- 3.- Calcular los gastos "pronosticados" mediante algún modelo precipitación-escorrentamiento, a partir de los datos obtenidos en el inciso 2.
- 4.- Calcular los costos y beneficios totales actualizados con base en los gastos "pronosticados" con un cierto error medio, los cuales están asociados a una red de pluviómetros de cierta densidad.
- 5.- Calcular los valores de la relación (B/C) y $(B-C)$.
- 6.- Los pasos 1 a 5 se repiten para redes de diferentes densidades, seleccionando aquella, cuyas relaciones (B/C) y $(B-C)$ sean máximas.

La metodología descrita en el capítulo cuatro permite calcular los gastos "pronosticados" en una forma más sencilla que la mencionada en los incisos 2 y 3 de la secuela anterior, aunque no considera las características de la lluvia (intensidad y duración), ni la localización de los pluviómetros, aspectos que sí se estudiarían en el enfoque alternativo descrito.

En el trabajo, se explicó que los costos y beneficios del sistema de alertamiento son función de los gastos pronosticados con determinado error y

que dicho error depende del número de pluviógrafos.

Las diez alternativas presentadas en el ejemplo, en realidad constituyen un análisis de sensibilidad de los costos y beneficios totales actualizados, realizado para diferentes números de pluviógrafos.

En un caso real se tendría que hacer además una investigación exhaustiva para definir los costos y beneficios en términos de la precisión, posibilidad de movilización, tiempo de antelación, etc., y efectuarse otro análisis de sensibilidad, modificando los valores de los beneficios y los costos de los diversos conceptos involucrados.

En el ejemplo se estudió el efecto que producían diferentes incrementos marginales de los gastos pronosticados, sobre los costos y beneficios totales actualizados; o sea, se analizó la ventaja que podría presentar el difundir un pronóstico cuyo gasto fuera mayor que el gasto pronosticado con un cierto error.

Para realizar este análisis se escogieron los gastos pronosticados con un error medio del 12%, ya que esa alternativa se encuentra dentro del rango de error que produce el máximo beneficio neto o la relación máxima de B/C, para el ejemplo estudiado.

Los resultados del análisis se presentan en la tabla 4.22. A continuación se graficaron (Fig. 4.12.) y se les ajustaron funciones del tipo mencionado en el inciso 4.2.6.

Los costos totales actualizados se ajustaron más a una recta y los beneficios a una ecuación del tipo $Y = ax^b$.

En la tabla 4.22 se presentan las ecuaciones de las funciones mencionadas, así como los beneficios y los costos generados mediante dichas ecuaciones, para diferentes porcentajes de incremento en el gasto pronosticado.

A partir de estos datos se obtuvieron los valores de los beneficios netos y de las relaciones beneficio entre costo (B/C). En la Fig. 4.13. se presentan las gráficas de dichas funciones. En ellas se observa, para el ejemplo estudiado, que si se incrementa un 5% el valor del gasto pronosticado, se obtiene un beneficio neto mayor; lo mismo ocurre con la relación beneficio entre costo.

En este caso específico, los costos de movilización eran bajos (10% de los beneficios posibles) lo que pudo influir en los resultados obtenidos con este análisis.

Lo que se pretende enfatizar, es que deben efectuarse análisis de este tipo para determinar si es conveniente tomar determinadas medidas (en este caso específico, sobrepronosticar), con el fin de tratar de obtener beneficios netos mayores.

Respecto al tipo de sistema por establecer (red de pluviógrafos sólomente o red de pluviógrafos y radar), Eagleson (1973) menciona que en todos los casos que él estudió, las redes de pluviógrafos producían mayores beneficios netos que los sistemas que incluían radar, si se consideraba como objetivo único el pronóstico de avenidas.

La situación, sin embargo, puede cambiar si se fijan otros objetivos como por ejemplo, investigación, y se toman en cuenta los costos y beneficios asociados a dichos objetivos, o si se considera el desarrollo tecnológico general y la disminución de los costos que éste genera normalmente.

En cuencas grandes, se debe buscar la forma de reducir el número de pluviógrafos, por ejemplo, mediante el uso de limnógrafos; esta medida podrá tomarse, cuando el tiempo de translación de la avenida desde el sitio aforado hasta el punto de interés, es menor o a lo sumo igual, al tiempo de concentración de la lluvia en la subcuenca considerada.

En resumen, el proceso que se debe seguir para establecer un sistema de pronóstico de avenidas es:

- 1.- Seleccionar la cuenca. Para ello se analizarán los daños producidos por las inundaciones anteriores y se especificarán los daños que se pretenden evitar mediante el sistema de pronóstico. También se estudiarán algunas características generales de la cuenca como su forma, tamaño, topografía, etc., con el fin de proponer el tipo de sistema de medición por emplear (red de pluviógrafos, o red formada por pluviógrafos y limnógrafos).
- 2.- A continuación se efectúa un análisis que permita determinar las características de la red de medición que genera el mayor beneficio neto. Esto se hace mediante la metodología descrita en el capítulo cuatro.
- 3.- La red de medición seleccionada permitirá pronosticar los gastos con un cierto error medio; sin embargo, en función del presupuesto disponible se deberá proponer la red definitiva, considerando para ello la localización exacta de los medidores y el sistema de transmisión y recepción de la información.
- 4.- Enseguida se establece el sistema de medición, con el equipo respectivo de transmisión, recepción y procesamiento.

En México, el primer sistema de este tipo que se implantó fue el de Chicoasén (Domínguez y otros, 1979); conviene, con base en los costos de éste, buscar relaciones que permitan calcular en forma aproximada el costo de sistemas que se deseen implantar en cualquier cuenca del país.

Es recomendable también mantener una vigilancia continua del sistema mencionado con el fin de obtener mayor información de beneficios, exactitud, etc.

5.- Por último, se deberá construir o modificar el modelo lluvia-escurrimiento que permita elaborar el pronóstico y calibrarlo con los datos disponibles.

Debe recordarse que para estudiar la factibilidad de implantar un sistema de pronóstico mediante el criterio de Eagleson, no se tiene que construir dicho modelo antes de establecer el sistema.

Por tal motivo, la metodología propuesta por Eagleson, además de ser bastante sencilla, permite evaluar en forma rápida y económica la ventaja de implantar un sistema de pronóstico de avenidas. El problema que se presenta es idéntico al de todos los criterios existentes: la falta de información sobre costos y beneficios atribuibles al sistema.

REFERENCIAS

- 1.- Pielke, R. A., "Sumary of the Sessions on Problems in Forecasting", American Metereological Society 57th Annual Meeting, Enero de 1977, Tucson, Ariz.
- 2.- Willet, H.C., "The Forecast Problem", Compendium of Meteorology, American Meteorological Society, 1951.
- 3.- Almazán, R., y otros, "Algunas Características de la Precipitación en México", Nota técnica DIT-1-78, Subdirección de Previsión Atmosférica, DGCRISH, SARH, 1978-a.
- 4.- Almazán, R., Barrera, T.M., "Memorando Tec. DIT-5-78", Subdirección de Previsión Atmosférica, DGCRISH, SARH, 1978-b.
- 5.- Reed, R. J. "The Development and Status of Modern Weather Prediction", 57th Annual Meeting of the American Meteorological Society, Tucson, Ariz. Ene., 1977.
- 6.- Cook, H.L., "The Infiltration Aproach to the Calculation of Surface Runoff". Trans. Am. Geophys. Union, 27 (Oct. 1946), pp 726-747.
- 7.- Snyder, F.F., "A Conception of Runoff Phenomena". Trans. Am., Geophys. Unions, Pt 4, (1939), pp 725-738.
- 8.- Eagleson, P.S., Mejía, R.R., March, F., "Computation of Optimum Realizable Unit Hydrographs", Water Resources Research, Vol. 2, No. 4, pp 755-764, 1956.

- 9.- Chao-Lin Chiu, "Analysis of Black Box Relationship Between Rainfall and Runoff", Proceedings of the International Hydrology Symposium, Vol 1, Fort Collins, Colorado, USA, Sep., 1967.
- 10.- Dunin, F. X., "A Model for Rainfall Routing During Initial Abstraction", Jour of Hydrology, Vol 9, 1969, pp 57-72.
- 11.- Nash, J.E., y Sutcliffe, J.V., "River Flow Forecasting Through Conceptual Models; Part. I, A Discussion of Principles". Journal of Hydrology, Vol 10, 1970, pp 282-290.
- 12.- Domínguez M.R., Quaas W., Legaria M.G., Barradas B.J.L., Alvarez T.A., "Aplicación de los Sistemas de Informatica a la Previsión de Hidrogramas", Estudio del I.I. de la Facultad de Ingeniería de la UNAM para la SARH. Dic. 1977.
- 13.- Eagleson, P.S., "Optimum Density of Rainfall Networks", Water Resources Research, Vol 3, No. 4, pp 1021-1033, 1967.
- 14.- Eagleson, P.S., y Grayman, W.M., "Evaluation of Radar and Rainage Systems for Flood Forecasting", Ralph M. Parson La. of Water Resources and Hydrodynamics, MIT, Rep. No. 138, Cambridge, Mass. Ags. 1971.
- 15.- Grayman W.M., y P.S. Eagleson, "Desing of Optimal Precipitation Networks", Ralph M. Parson Lab. of Water Res. and Hydrodynamics, MIT, Rep. No. 168, Cambridge, Mass., Marzo de 1973.
- 16.- Bras, R.L., y Rodríguez-Iturbe I., "Rainfall-Runoff as Spatial Stochastic Processes: Data Collection and Synthesis", Ralph M. Parsons Lab. of Water Res. and Hyd., MIT, Rep., No. 196, Cambridge, Mass. Jan., 1975.
- 17.- Sánchez B.J.L., Chargoy V.E., Domínguez M.R., Castro A.J., "Aplicación de los Sistemas de Informática a la Previsión de Hidrogramas", Estu-

dio del II de la FI, UNAM para la SRH, Nov. 1976.

- 18.- Green, D.R., Flanders, F.A., "Radar Hydrology-The State of the Art", Conference on Hydrometeorology, American Meteorological Society, Fort Worth, 1976.
- 19.- Kessler E., "Radar Measurements for the Assessment of Areal Rainfall: Review and Outlook", Water Resources Research, Vol 2 No. 3, 1965, pp 413-425.
- 20.- Wilson, J.W. "Radar-Rainage Precipitation Measurements: A Summary"; Conference on Hydrometeorology American Meteorological Society, Fort Worth, April 1976.
- 21.- Grayman W.M. y P.S. Eagleson, "A review of the Accuracy of Radar and Paingages for Precipitation Measurements", Ralph M. Parsons, Lab. of Water Ress. and Hydrodynamics, MIT , Rep. No. 119, Cambridge, Mass., Feb. 1970.
- 22.- Shane R.M., y Lynn R.W. "Mathematical Model for Flood Risk Evaluation", Jour. of the Hydraulics Div., ASCE, HY6., Nov. 1964.
- 23.- Hershfield, D., "On the Spacing of Rain Gauges", IASH and WMO Symposium on Design of Hydrometeorological Networks, Quebec City, 1965.
- 24.- Kessler, E. y K.E. Wilk, "Radar Measurement of Precipitation for Hydrological Purposes", Rep. No. 5, Geneva, World Meteorological Organization, 1968.
- 25.- Yevjevich V., "Systematization of Flood Control Measures", Journal of the Hydraulics Div., ASCE, HY11, Nov. 1964.

26.- Horton, R.E., "The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle"

Trans. Am. Geophysics Union, 1931, pp 189-202.

27.- Domínguez M.R., Quaas W. R., Legaria M.G., "Sistema telemétrico de
previsión de avenidas para la presa Chicoasén, Chiapas", Publicación

Interna del I.I. de la Fac. de Ing. de la UNAM, Enero de 1979.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Fleming, G., "Computer Simulation Techniques in Hydrology", Ed. American Elsevier Publishing Co. Inc., New York, 1975.
- 2.- Linsley, R., Kohler, M., Paulhus, J., "Hidrology for Engineers", 2nd ed., Ed. McGraw-Hill, Book Co., 1975.
- 3.- Schawb, G.O., Frevert, R.K., Edminister, T.W., Barnes, K.K., "Soil and Water Conservation Engineering" 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1966.
- 4.- Viesmann, W., Harbaugh, T.E., Knapp, J.W., "Introduction to Hydrology", The Intext Series in Civil Engineering, New York, 2nd ed., 1978.
- 5.- Chow, V.T., "Open Channel Hydraulics", McGraw-Hill Book Co., N.Y. 1959.
- 6.- Chow, V.T., "Handbook of Applied Hydrology", McGraw-Hill Book Co., N.Y., 1964.
- 7.- Dooge C.I.J., "Linear Theory of Hydrologic Systems", Technical Bull. No. 1468, Agricultural Research Service, Department of Agriculture, USA, Washington, D.C., Oct. 1973.
- 8.- Bringham, O.E., "The Fast Fourier Transform", Prentice-Hall, 1974.
- 9.- Bunge, M., "Teoría y Realidad", Ed. Ariel, 1972.
- 10.- Ortega, G.E., "Aplicación de un Modelo Digital para Simulación del Ciclo Hidrológico", Tesis Profesional, Fa. Ing. UNAM, 1972

F/DEPFI/D-23/1981



702255