

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Localización óptima de estaciones climatológicas y observatorios meteorológicos en la República Mexicana.
<i>Autor / Adscripción</i>	Jaime Collado Víctor Toledo Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 12(1): 47-64
<i>Fecha de publicación</i>	1997
<i>Resumen</i>	Se muestra el procedimiento empleado para la ubicación óptima de cuatrocientas estaciones climatológicas automáticas y de diez observatorios meteorológicos en la República Mexicana que, junto con el remplazo del equipo en los ochenta observatorios en operación y con la instalación de doscientas estaciones hidroclimatológicas, conformarán las redes climatológica, hidroclimatológica y sinóptica nacionales con transmisión vía satélite, capaces de brindar la mejor cobertura espacio-temporal de fenómenos hidrometeorológicos y de difundir oportunamente las mediciones en todo el país.
<i>Identificador</i>	<a href="http://hdl.handle.net/123456789/1240">http://hdl.handle.net/123456789/1240</a>

# Localización óptima de estaciones climatológicas y observatorios meteorológicos en la República Mexicana

Jaime Collado  
Víctor Toledo

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*El objetivo de este trabajo es dar a conocer el procedimiento empleado para la ubicación óptima de cuatrocientas estaciones climatológicas automáticas y de diez observatorios meteorológicos en la República Mexicana que, junto con el remplazo del equipo en los ochenta observatorios en operación y con la instalación de docientas estaciones hidroclimatológicas, conformarán las redes climatológica, hidroclimatológica y sinóptica nacionales con transmisión vía satélite, capaces de brindar la mejor cobertura espacio-temporal de fenómenos hidrometeorológicos y de difundir oportunamente las mediciones en todo el país. La finalidad de localizar adecuadamente esas estaciones, es obtener el máximo provecho de la información recolectada para ayudar a tomar decisiones en situaciones de emergencia hidrometeorológica, para fortalecer aspectos prácticos de agrometeorología, para pronosticar el tiempo en centros turísticos y para apoyar actividades de planeación hidráulica. Debido a que la variabilidad horizontal de un gran número de fenómenos medidos en estaciones climatológicas y en observatorios es muy pequeña en comparación con la variabilidad espacial de la precipitación, además de que sus efectos están implícitamente representados en la altura de lluvia, se utilizó esta variable como la más representativa y decisiva para diseñar las redes climatológica y sinóptica. Se determinaron las diez tormentas más severas en 1, 3, 7, 15, 30 y 365 días consecutivos para el periodo 1968-1983, de entre las cuales se seleccionaron aquellas con mayor extensión espacial y persistencia temporal. Para cada una de las 156 cuencas principales de las 37 regiones hidrológicas del territorio nacional, se identificó la Función de Covariancia Generalizada y se estimaron sus parámetros empleando las tormentas más importantes. Se utilizó el método Kriging para interpolar la altura de lluvia y para estimar la precipitación media en una cuenca o región hidrológica, ya que éste considera la configuración geométrica de las redes de medición mediante i) las distancias entre estaciones climatológicas, ii) las distancias entre los puntos de observación y un punto que describe cada cuenca o región hidrológica, y iii) la estructura espacial de la lluvia a través de la Función de Covariancia Generalizada. De esta manera, se pueden diseñar las redes climatológica y sinóptica, jerarquizando la importancia relativa de las estaciones. Ésta se determina eliminando la estación que menos aumenta la variancia del error de la estimación de la precipitación media en cada cuenca o región hidrológica si es removida, con lo cual se obtienen las  $n-1$  estaciones más importantes. Continuando con este criterio, se determinan las  $n-2$  estaciones más importantes, y así sucesivamente hasta conocer la estación que más contribuye a la estimación de la precipitación media en una cuenca. Del conjunto de 5 566 estaciones en operación, se jerarquizó la importancia relativa de las 4 594 estaciones climatológicas cuyas coordenadas geográficas son conocidas. Tomando en cuenta las docientas estaciones hidroclimatológicas y los ochenta observatorios, cuyos emplazamientos son fijos, se seleccionaron las estaciones climatológicas y las ampliaciones de observatorio con mayor jerarquía, para definir las redes climatológica, hidroclimatológica y sinóptica automatizadas, con cuatrocientas, docientas y noventa estaciones, respectivamente. Por tanto, se precisaron las coordenadas geográficas de las estaciones climatológicas y observatorios meteorológicos que permitieron conformar una red combinada de 690 puntos de observación, de la cual puede extraerse en tiempo real información suficiente para atender emergencias hidrometeorológicas, actividades agrometeorológicas, pronósticos del clima en centros turísticos, y coadyuvar en el acopio de datos para la planeación hidráulica nacional.*

**Palabras clave:** estaciones climatológicas, observatorios meteorológicos, localización óptima, México, fenómenos hidrometeorológicos, red climatológica, red sinóptica, red hidrológica, función de covariancia generalizada, método Kriging, planeación hidráulica.

## Introducción

En la República Mexicana existen diversos organismos gubernamentales y privados que operan redes de observación climatológica, hidrométrica y sinóptica con distintos fines. Estas mediciones sirven desde propósitos básicos a largo plazo, como el cálculo de normales climatológicas en el país, hasta objetivos específicos a corto plazo como el pronóstico hidrometeorológico y la navegación aérea. Las aplicaciones a mediano plazo –por mencionar sólo algunas– incluyen la determinación de gastos medios y extremos en ríos, la construcción de planos de isotacas e isobaras, y el monitoreo de la migración de contaminantes a través del ciclo hidrológico.

La densidad espacial y la intensidad de medición de estas redes depende de la cantidad de información requerida. Por una parte, la importancia de determinar la frecuencia de las mediciones, la distribución espacial de los sitios de observación y el tiempo que debe permanecer operativa una red hidrológica, dependen de los objetivos que se persiguen con el establecimiento de las mismas. Por otra parte, la necesidad de especificar qué tantos datos son suficientes, estriba en los costos inicial, de operación y de mantenimiento de las redes. Por tanto, es menester evaluar la utilidad de la información provista por una red –a la luz de las necesidades físicas de monitoreo y de la oportunidad con que se obtiene la información– y confrontarla con el costo asociado de la misma.

En México, el 90% de las estaciones hidrológicas están controladas por la Comisión Nacional del Agua, CNA, a través de la Gerencia del Servicio Meteorológico Nacional, GSMN. Recientemente, esta entidad pública planeó modernizar sus redes climatológica, hidroclimatológica y sinóptica nacionales, mediante la instalación de cuatrocientas estaciones climatológicas y doscientas hidroclimatológicas, todas ellas automáticas y con transmisión instantánea vía el satélite denominado *Geostationary Operational Environmental Satellite*, GOES. Adicionalmente, debería remplazarse el equipo de ochenta observatorios meteorológicos e instalarse diez más, los cuales también transmitirían directamente al Centro Meteorológico Nacional de Tacubaya, D.F. Actualmente, en la GSMN se codifican los datos recibidos de la red combinada en el sistema CLICOM y, junto con información adicional disponible por otros medios, se retransmiten vía los satélites GOES y Solidaridad.

El objetivo de este trabajo es exponer el procedimiento seguido para precisar la ubicación de cuatrocientas estaciones climatológicas y diez nuevos observatorios que, conjuntamente con la instalación de

doscientas estaciones hidroclimatológicas y ochenta observatorios meteorológicos en sitios previamente seleccionados, conforman la red telemétrica climatológica, hidroclimatológica y sinóptica del país. A la fecha, los mencionados equipos han sido instalados en su totalidad. La red resultante es capaz de funcionar independientemente del resto de las estaciones hidrológicas, y de proveer la información suficiente para atender situaciones de emergencia hidrometeorológica, aspectos agrometeorológicos, pronósticos del tiempo en centros turísticos y fortalecer las actividades de planeación hidráulica nacional.

## Redes de medición

En la República Mexicana, hasta hace pocos años, se disponía principalmente de redes de medición convencionales: climatológica, hidrométrica, sinóptica, agroclimatológica, de radio-sondeo-viento y de radares meteorológicos. Dadas las características de las estaciones automáticas que adquiriría la GSMN, en este trabajo se consideraron sólo los primeros cuatro tipos de redes. Entre éstas, la más extensa es la climatológica, con aproximadamente 5 566 estaciones que miden precipitación, temperatura y evaporación. La ubicación de 972 estaciones climatológicas se conoce sólo por localidad y no por coordenadas geográficas.

La red hidrométrica está formada por 1 103 estaciones hidrométricas, localizadas en las corrientes más caudalosas y en los embalses más grandes. Algunas de las estaciones hidrométricas también son climatológicas, por lo que son referidas como hidroclimatológicas. La red sinóptica consta de ochenta observatorios meteorológicos, la mayor parte de ellos ubicados en poblaciones grandes. Finalmente, la red agroclimatológica está formada con cuarenta estaciones climatológicas, emplazadas principalmente en zonas de riego.

## Operación y mantenimiento

Uno de los principales problemas que afrontan las redes climatológica y meteorológica convencionales en México, es el alto costo de operación y mantenimiento de los equipos de medición. Adicionalmente, existe un buen número de estaciones climatológicas y observatorios meteorológicos que funcionan deficientemente por carencia, ya sea de personal calificado para atenderlas o bien, de los insumos necesarios para su operación normal.

Aunado a esto, se encuentra la lentitud con la que se conocen los datos recabados en los miles de sitios de observación, no sólo para desarrollar las funciones propias del Servicio Meteorológico Nacional, sino también para apoyar las actividades de los centros e institutos de investigación así como de las empresas consultoras nacionales.

#### *Modernización de una configuración mínima*

La idea básica que persiguió la modernización de las redes hidrológicas del Servicio Meteorológico Nacional, SMN, fue contar con una red combinada de estaciones climatológicas, hidroclimatológicas y observatorios meteorológicos, capaz de cubrir automáticamente y por sí sola la variación espacial y temporal de los fenómenos atmosféricos. Esto reduciría los costos de operación y mantenimiento de la red combinada, al mismo tiempo que permitiría conocer y difundir la información hidrometeorológica, prácticamente al momento de ser recolectada.

La gran flexibilidad que implicaba la instalación simultánea de 690 equipos de medición para el diseño de la red combinada, permitió emplazar las nuevas estaciones en los sitios donde puede extraerse información con mayor precisión y con mayor utilidad hidrológica. Esto es, la ubicación de las nuevas estaciones fue seleccionada en función de los modelos hidrológicos básicos que se emplearán para atender situaciones de emergencias hidrometeorológicas, aspectos de operación agrometeorológica, pronósticos del tiempo con fines turísticos y para apoyo de actividades de planeación hidráulica en todo el país.

#### *Operación en tiempo real*

Una de las principales ventajas de las nuevas estaciones que se instalaron, además de su operación automatizada y del almacenamiento de la información directamente en el formato CLICOM, es su capacidad para transmitir los datos medidos vía satélite y para poder ser interrogadas. Esto permite operar la red combinada en tiempo real y, por tanto, aplicar modelos hidrológicos y tomar decisiones oportunamente.

Adicionalmente, la transmisión automática de datos al Centro Meteorológico Nacional de Tacubaya, D.F., permite crear sin retraso la base de datos hidroclimatológicos y sinópticos correspondientes a la red combinada básica, y difundirla en medios magnéticos. Esto ha constituido un gran paso en el sistema de recolección, depuración, archivo y disseminación de la información hidrológica en el país.

#### **Base de datos**

Una de las características deseables más importantes de una red hidrometeorológica, es su capacidad para proveer muestras adecuadas de la distribución espacial de variables de interés, a partir de un conjunto limitado de mediciones en puntos discretos. Sin embargo, las redes de estaciones hidrometeorológicas se fueron formando cuando todavía no existían técnicas sistemáticas para diseñarlas, siendo el criterio ingenieril el único recurso para decidir la ubicación de los sitios de medición. Posteriormente se añadió la experiencia para expandir las redes en operación (Langbein, 1960; Hershfield, 1965), incorporándose empíricamente factores climáticos, geográficos y meteorológicos. Para acotar el tamaño de las redes, surgió una corriente de investigadores que se abocó a determinar la densidad óptima de estaciones en diversas regiones hidrológicas, atendiendo principalmente redes pluviométricas (Benson, 1965; Eagleson, 1967; WMO, 1972). Es hasta hace poco tiempo que la localización de estaciones hidrometeorológicas ha recibido atención formal (Hughes y Lettenmaier, 1981; Bastin, *et al.*, 1984; Moss, 1986) a través de la extracción sistemática y óptima de información.

Paralelamente al diseño de redes, se encuentra el problema de estimación de valores puntuales o medios de variables hidrometeorológicas. Así como la red debe ser capaz de proveer muestras representativas de la distribución espacial de las variables, el método empleado para estimar valores puntuales o medios, debe ser apto para reproducir la distribución espacial de las variables. Esta reciprocidad entre la ubicación de la red y el método usado para extraerle información, puede usarse ventajosamente en el análisis de redes y en la evaluación objetiva de su idoneidad. Esto es, las redes en operación ya tienen una cierta densidad y ubicación, por lo que el problema actual es determinar si esa densidad es apropiada o no, y en caso de no serlo, identificar ya sea, las estaciones que pueden removerse sin aumentar considerablemente el error de la variancia de la estimación, o bien, la localización donde deberían añadirse nuevas estaciones para reducir la variancia de la estimación. En el presente caso, se requirió jerarquizar la importancia relativa de las estaciones para seleccionar el subconjunto que debía instrumentarse con equipos automáticos y telemétricos. En cualquier caso, para lograr esa interacción es necesario hacer ciertas hipótesis sobre el fenómeno físico y buscar que el método de estimación satisfaga ciertas propiedades.

El diseño de la configuración mínima de las redes climatológica y sinóptica nacionales, se basa en el

análisis de precipitaciones. La razón subyacente es que la variabilidad espacial de la temperatura, evaporación, presión, humedad y radiación solar son mucho menores que la de la precipitación, además de que el efecto de las variables omitidas está implícitamente considerado en la altura de lluvia. Es decir, en regiones tropicales donde el mecanismo atmosférico dominante es la convección termal, cerca del 50% de la precipitación local puede provenir de la evaporación local (COHS, 1991). Ésta, a su vez, depende de la temperatura, presión, humedad y radiación solar. Por tanto, la jerarquización de la importancia relativa de estaciones en operación o la ubicación de nuevas estaciones con cualesquiera de las variables omitidas, conduce a seleccionar prácticamente los mismos sitios (Collado y Toledo, 1990). Adicionalmente, el objetivo final de medir la precipitación, así como el método usado para convertir mediciones puntuales en promedios espaciales, se utilizan formalmente para el diseño de la configuración mínima de la red combinada telemétrica.

Durante el lapso en que se diseñó la red automática y telemétrica, la GSMN disponía de 15 años de información climatológica diaria que abarcaba el periodo 1968-1983, de 5 566 estaciones climatológicas y de ochenta observatorios en todo el país. Los datos estaban disponibles en medios magnéticos, incluyendo la clave, tipo, nombre y organismo controlador de la estación, las coordenadas geográficas de 4 594 estaciones, y la altitud sobre el nivel medio del mar de 3 079 estaciones. Por tanto, fue necesario seleccionar las tormentas más severas y con mayor cobertura espacial, para localizar los sitios óptimos de las estaciones climatológicas y observatorios meteorológicos. Esto permitió, no sólo identificar y estimar los parámetros de las funciones que describen las tormentas, sino también conocer los límites de influencia de los fenómenos a escala sinóptica, así como la frecuencia con la cual se presentan.

#### *Definición de tormentas severas*

Se denomina tormenta severa a un frente húmedo capaz de provocar lluvia en una extensión territorial vasta, y con una persistencia temporal significativa. Para el caso de México, extensión territorial vasta significa varias cuencas o regiones hidrológicas contiguas, y persistencia temporal significativa se entiende como varios días consecutivos. La identificación de esos fenómenos atmosféricos se basó en el análisis de los datos pluviométricos comprendidos en el periodo 1968-1983, considerando las 5 566 estaciones climatológicas y los ochenta observatorios meteorológicos de la República Mexicana.

Sobre la extensión de cada una de las 156 principales cuencas que corresponden a la subdivisión de las 37 regiones hidrológicas del país, se calculó la altura de lluvia acumulada en uno, tres, siete, 15, treinta y 365 días consecutivos, con la finalidad de extraer la base de datos que permitiera diseñar las redes objeto de este trabajo. Se seleccionaron las diez tormentas con mayores alturas de lluvia para cada cuenca; sin embargo, como una gran cantidad de tormentas abarca, no sólo una, sino varias cuencas circunvecinas e incluso varias regiones hidrológicas contiguas, una misma tormenta puede utilizarse en varias regiones hidrológicas.

#### *Selección de las tormentas más significativas*

Dado que muchas tormentas abarcan varias regiones hidrológicas, y que la segunda o tercera tormenta más importante para una región puede ser la más importante para otra, se seleccionaron las tormentas con mayor cobertura territorial y temporal. En términos generales, las lluvias más intensas, acumuladas en uno o tres días, corresponden a fenómenos meteorológicos de mayor escala temporal, y por tanto quedan incluidas en las tormentas de siete y 15 días, y, en ocasiones, incluso en las de treinta y 365 días consecutivos.

De esta forma, las tormentas utilizadas para diseñar las redes hidrológicas son representativas de los fenómenos meteorológicos a escala sinóptica, lo que permite extraer sus características principales con la finalidad de poder responder ante un caso de emergencia hidrometeorológica. La mayor parte de las tormentas corresponden a lluvias acumuladas en uno o tres días consecutivos.

#### **Localización óptima de estaciones climatológicas**

La necesidad de contar con un procedimiento para la localización óptima de estaciones climatológicas se deriva de la siguiente situación *de facto*. Las redes nacionales de medición hidrológica se encuentran en un cierto estado de emplazamiento, operación, mantenimiento y difusión de los datos recolectados en ellas. Este hecho puede ser óptimo o no, dependiendo del problema específico que se tenga que resolver, y de la infraestructura de comunicación con la que se cuente. Sin embargo, cuando se presenta la oportunidad de instalar un número significativo de nuevas estaciones, resurge la interrogante con respecto a la idoneidad de las redes actuales. ¿Existe un número suficiente de estaciones? ¿Verdaderamente se requieren más o con menos se puede obtener información equivalente a la actual? ¿Es apropiada su ubicación? ¿En caso de ins-

calar nuevas estaciones, deberán remplazarse los equipos de los sitios que la experiencia ha demostrado son los más útiles o deberán considerarse lugares totalmente nuevos?

Evidentemente no existe una respuesta que deje satisfechos todos los puntos de vista; sin embargo, se pueden sentar las bases, tanto para jerarquizar la importancia relativa de los sitios actualmente en operación, como para identificar la ubicación de estaciones totalmente nuevas. El primer caso es útil para conocer las estaciones más importantes si se remplazan los equipos actuales por los automáticos. El segundo es ideal para incrementar el tamaño de las redes actualmente en operación. Debido a que la primera etapa de la modernización del SMN tiene como uno de sus objetivos la instalación de un número definido de estaciones climatológicas automáticas, y a que los objetivos técnicos que se persiguen no presentan conflicto alguno entre ellos, es posible diseñar las redes objetivamente, esto es, empleando formalmente el método utilizado para calcular la precipitación media sobre un área en un tiempo específico.

Los objetivos para poder responder bajo emergencias hidrometeorológicas, pronósticos del tiempo en centros turísticos, aspectos de operación agrometeorológica y fortalecimiento de las actividades de planeación hidráulica en todo el país, pueden conjuntarse en un solo criterio de decisión. Lo anterior se debe a que los cuatro objetivos requieren conocer la cantidad de lluvia que se precipita sobre un área de influencia. El pronóstico del tiempo en centros turísticos requiere, adicionalmente, determinar el número de días soleados. Sin embargo, dado que estos centros tienen una localización precisa se sabe donde instalar nuevas estaciones. Por tanto, para jerarquizar la importancia relativa de las estaciones climatológicas actualmente en operación, el criterio de decisión es determinar los sitios de las estaciones que, al ser removidas, aumenten lo menos posible la variancia del error de la estimación de la lluvia media. Para determinar la ubicación de puntos adicionales de medición, el criterio de decisión es localizar los sitios en donde, al instalar nuevas estaciones, se disminuya al mínimo la variancia del error de la estimación de la precipitación media.

#### *Estimación óptima de la precipitación media con el método Kriging*

La precipitación media sobre un área ha sido tradicionalmente calculada en hidrología con base en los bien conocidos Polígonos de Thiessen. En matemáticas, este concepto se conoce con el nombre de Mosaicos de Dirichlet; en geografía, se le denomina Dominios de

Voronoi; y, en biología, es referido como Regiones de Wigner-Seitz. De acuerdo con este método, a cada estación climatológica se le asocia un polígono de Thiessen, que define un área en donde cada uno de sus puntos está más cerca de esa estación que de cualquier otra. El cociente que resulta de dividir el área de cada polígono entre el área total de interés, define un conjunto de pesos conforme a los cuales se calcula la precipitación media como un promedio pesado.

No obstante la gran popularidad de los polígonos de Thiessen, este método no puede utilizarse formalmente para diseñar una red climatológica, ya que sólo provee el valor de la precipitación media sobre un área, pero se desconoce la precisión de la estimación. Además de que esto es un punto esencial para el diseño de una red, también se requiere que el método empleado para calcular la precipitación media sea capaz de identificar y reproducir las variaciones espaciales de tormentas típicas. Por tanto, si el método utilizado para calcular la precipitación media no puede representar la distribución espacial de la lluvia –como es el caso de los polígonos de Thiessen– la red de pluviómetros, diseñada con base en tal método, no tendrá la capacidad de recolectar las muestras adecuadas para dicha distribución.

Las variaciones espaciales de la lluvia pueden modelarse mediante procesos estocásticos que las representen en forma continua sobre la región considerada; esto es, la precipitación se maneja como un campo aleatorio. El método Kriging (Kriging, 1966) permite estimar valores puntuales o funciones lineales del campo aleatorio en una región, utilizando un conjunto limitado de valores puntuales. Adicionalmente a la estimación puntual o al promedio de la precipitación, este método provee una medida de la precisión de los valores estimados, lo que permite diseñar formalmente una red climatológica.

Los fundamentos del método Kriging descritos a continuación siguen la exposición de Bras y Rodríguez-Iturbe (1985). Otras referencias útiles son Matheron (1971), Olea (1975), Journel y Huijbregts (1978), Ripley (1981), Matheron y Armstrong (1987), Cressie (1991) y Bárdossy (1992). Sea  $Z(\mathbf{x})$  un proceso estocástico continuo que describe la distribución espacial de la precipitación total en un intervalo de tiempo fijo, en donde la notación vectorial  $\mathbf{x}$  representa las coordenadas cartesianas de un espacio bidimensional. Suponiendo que las mediciones pueden efectuarse sin error de los instrumentos, la observación  $z(\mathbf{x})$  es una realización del proceso  $Z(\mathbf{x})$  y, para hacer inferencias estadísticas sobre éste, es necesario reconstruir su función de distribución de probabilidad a partir de una sola realización. Esto se debe a que dos tormentas

constituyen eventos meteorológicamente independientes y, por tanto, poseen estructuras espaciales diferentes. Sin embargo, una sola realización no basta para deducir los momentos de un campo aleatorio; por tanto, es necesario establecer hipótesis simplificatorias que permitan identificar la estructura espacial de la precipitación, tales como la estacionariedad de segundo orden, la hipótesis intrínseca o la hipótesis intrínseca generalizada.

El método Kriging es un estimador de funciones lineales de un campo aleatorio, que toma en cuenta la variabilidad espacial a través de la covariancia, el semivariograma o la covariancia generalizada del proceso  $Z(\mathbf{x})$ . A su vez, esas funciones tienen que identificarse y sus parámetros estimarse a partir de la observación  $Z(\mathbf{x})$ . Entonces, la precipitación media sobre un área  $A$ , definida como

$$P = \frac{1}{A} \int_A Z(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (1)$$

se calculará con un estimador lineal que considera  $n$  estaciones climatológicas

$$\hat{P} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(\mathbf{x}_i) \quad (2)$$

donde los pesos  $\lambda_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  se determinan de tal manera que el valor esperado del estimador sea igual al valor esperado de la precipitación media

$$E(P) = E(\hat{P}) \quad (3)$$

y que el error cuadrado medio de la estimación sea mínimo

$$\text{Var}(P - \hat{P}) = \text{mín} \quad (4)$$

La condición (3) asegura que el estimador no produzca errores sistemáticos en los valores estimados; es decir, Kriging es un estimador insesgado. La propiedad (4) establece un criterio para minimizar la variancia de estimación; esto es, cualquier otro estimador lineal e insesgado tiene una variancia del error de la estimación mayor que la de Kriging.

Con la finalidad de que el análisis de precipitaciones abarque un amplio espectro de estructuras espaciales de tormentas, se utilizará la hipótesis intrínseca generalizada, ya que es la más general y robusta. Se dice que un campo aleatorio bidimensional  $Z(\mathbf{x})$  satisface la hipótesis intrínseca generalizada, si los

pesos de la combinación lineal (2) satisfacen las condiciones

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i u_i^{p_1} v_i^{p_2} = 0 \quad (5)$$

para todos los enteros

$$0 \leq p_1 + p_2 \leq k \quad (6)$$

siendo  $u_i$  y  $v_i$  las coordenadas cartesianas del punto  $\mathbf{x}_i$ . Al proceso  $Z(\mathbf{x})$  se le denomina función intrínseca aleatoria de orden  $k$  (FIA- $k$ ), y a la combinación lineal (2), incremento generalizado de orden  $k$ . Simplificando la notación, los monomios que aparecen en (5) pueden remplazarse por funciones básicas polinomiales  $f^l(\mathbf{x})$ , capaces de generar el espacio bidimensional de todos los polinomios de orden  $l$ , donde  $l$  representa la condición (6). Por tanto, la combinación lineal (2) es un incremento generalizado de orden  $k$  si

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i f^l(\mathbf{x}_i) = 0 \quad (7)$$

se satisface para todos los monomios de orden  $l \leq k$ .

La teoría de las FIA- $k$  presupone que la media de orden  $k$  puede modelarse localmente con un polinomio

$$m(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^v a_i f^i(\mathbf{x}) \quad (8)$$

en donde  $a_i$  son coeficientes desconocidos y  $v$  es el número de monomios requeridos. Entonces, la condición de insesgadura (3) aplicada al estimador (2) conduce a

$$E\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(\mathbf{x}_i)\right] = E\left[\frac{1}{A} \int_A Z(\mathbf{x}) d\mathbf{x}\right] \quad (9)$$

Como ambas ecuaciones son lineales

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i E[Z(\mathbf{x}_i)] = \frac{1}{A} \int_A E[Z(\mathbf{x})] d\mathbf{x} \quad (10)$$

Sustituyendo la definición de la media (8), se obtiene

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{l=0}^v a_l f^l(\mathbf{x}_i) = \frac{1}{A} \int_A \sum_{l=0}^v a_l f^l(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (11)$$

o bien

$$\sum_{l=0}^v a_l \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i f^l(\mathbf{x}_i) - \frac{1}{A} \int_A f^l(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \right] = 0 \quad (12)$$

De aquí se observa que las constantes  $a_l$  no tienen que ser estimadas y, por tanto, la condición de insesgadura se expresa con las siguientes  $v + 1$  ecuaciones

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i f^l(\mathbf{x}_i) - \frac{1}{A} \int_A f^l(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = 0, l = 0, 1, \dots, v \quad (13)$$

La consideración de incrementos generalizados de orden  $k$  implica trabajar con toda una clase de procesos; es decir, las funciones  $Z(\mathbf{x})$  y  $Z(\mathbf{x}) + R(\mathbf{x})$ , donde el orden de  $R(\mathbf{x})$  es menor o igual que  $k$ , poseen exactamente el mismo incremento generalizado de orden  $k$ . De esta forma, la hipótesis intrínseca generalizada trabaja con diferencias sucesivas o incrementos de  $Z(\mathbf{x})$  hasta obtener un proceso estacionario. La función de covariancia de los incrementos generalizados de orden  $k$ , se denomina función de covariancia generalizada (FCG) de orden  $k$ ,  $K(\bullet)$ , la cual puede expresarse en términos del módulo  $h$  de la diferencia vectorial entre dos puntos cualesquiera

$$K(x_1, x_2) = K(|x_1 - x_2|) = K(h) \quad (14)$$

Por tanto, el error cuadrado medio de la estimación por minimizar, ecuación (4), es

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= E[(\hat{P} - P)^2] = E[\hat{P}^2] - 2E[\hat{P}P] + E[P^2] \\ \sigma_p^2 &= E\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j Z(\mathbf{x}_i) Z(\mathbf{x}_j)\right] - \\ &- 2E\left[\frac{1}{A} \int_A \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(\mathbf{x}) Z(\mathbf{x}_i) d\mathbf{x}\right] + \\ &+ E\left[\frac{1}{A^2} \int_A \int_A Z(\mathbf{x}_1) Z(\mathbf{x}_2) d\mathbf{x}_1 d\mathbf{x}_2\right] \quad (15) \end{aligned}$$

Invocando linealidad y la propiedad (14), la variancia del error de la estimación puede expresarse como

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j K(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|) - \frac{2}{A} \int_A \sum_{i=1}^n \lambda_i K(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|) d\mathbf{x} + \\ &+ \frac{1}{A^2} \int_A \int_A K(|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2|) d\mathbf{x}_1 d\mathbf{x}_2 \quad (16) \end{aligned}$$

Introduciendo un multiplicador de Lagrange  $\mu$ , el error cuadrado medio de la estimación (16) puede minimizarse sujeto a la condición de insesgadura (13). Después de formar la función auxiliar, de derivar con res-

pecto a los pesos  $\lambda$  y al multiplicador de Lagrange  $\mu$ , y de igualar a cero, se obtiene un sistema lineal de  $n + v + 1$  ecuaciones con igual número de incógnitas, llamado sistema Kriging

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j K(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|) - \\ \sum_{l=0}^v \mu_l f^l(\mathbf{x}_i) &= \frac{1}{A} \int_A K(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|) d\mathbf{x}, i = 1, \dots, n \quad (17) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i f^l(\mathbf{x}_i) &= \frac{1}{A} \int_A f^l(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = 0, l = 0, \dots, v \end{aligned}$$

de donde se obtienen los pesos óptimos  $\lambda^*$ , y los multiplicadores  $\mu^*$ . La mínima variancia del error de la estimación se calcula mediante

$$\sigma_p^{2*} = \frac{1}{A^2} \int_A \int_A K(|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2|) d\mathbf{x}_1 d\mathbf{x}_2 - \quad (18)$$

$$\frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \lambda_i^* \int_A K(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|) d\mathbf{x} + \frac{1}{A} \sum_{l=0}^v \mu_l^* \int_A f^l(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

El sistema Kriging (17) muestra que la estimación de la precipitación considera:

- Las distancias entre estaciones climatológicas mediante los términos  $K(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|)$ .
- Las distancias entre los puntos de observación y un punto que describe el área  $A$  con los términos  $K(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|)$ .
- La estructura espacial de la precipitación a través de la función de covariancia generalizada.

La estimación de la precipitación media sobre el área  $A$  para ciertas observaciones  $z(\mathbf{x}_i)$ , se obtiene utilizando los pesos óptimos  $\lambda_i^*$  en el estimador (2). En caso de requerirse una estimación puntual en  $\mathbf{x}_0$ , la integral de la primera ecuación de (17) se sustituye por  $K(|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_i|)$  y la integral de la segunda se reduce a  $f^l(\mathbf{x}_0)$ ; la integral doble de (18) se simplifica a  $K(0)$ , que es una cantidad no negativa. La estimación de la precipitación total se obtiene integrando las estimaciones puntuales  $\hat{z}(\mathbf{x}_i)$  sobre el área  $A$ .

Detalles sobre la identificación y estimación de parámetros de la función de covariancia generalizada, pueden consultarse en Cressie y Hawkins (1980), Kitanidis (1983), o en Starks y Fang (1982), por citar sólo algunas referencias.

Para la realización del presente trabajo se desarrolló un programa de computadora que tiene como base el programa AKRIP, escrito por Kafritsas y Bras (1981).



Programas de cómputo comerciales también están disponibles, por ejemplo, Deutsch y Journal (1992). Matheron y Armstrong (1987), Collado (1988, 1991) y Bárdossy (1992), describen varias aplicaciones hidro-lógicas de Kriging.

#### Jerarquización de la importancia relativa de estaciones climatológicas

Una vez establecido el método que permite estimar la precipitación total, media o puntual en un área de interés, así como la variancia asociada al error de esa estimación, puede procederse a desarrollar la innovación que permita seleccionar a las estaciones climatológicas que tienen mayor valor estratégico con respecto a la hidrografía de las cuencas, y a las que contribuyen más a la exactitud y precisión estadísticas de la estimación de la precipitación.

Debe notarse que los pesos óptimos y la variancia del error de la estimación, dependen sólo de la estructura espacial de la precipitación y de la configuración geométrica de los puntos de medición. En particular, las lambdas no dependen de los valores observados  $z(\mathbf{x}_i)$ , excepto porque éstos son utilizados para identificar la estructura y para estimar los parámetros de la función de covariancia generalizada. Por tanto, una vez conocida esta función, no se requiere una tormenta específica para determinar la importancia relativa de los sitios donde están emplazadas las estaciones climatológicas.

Para jerarquizar la importancia relativa de las estaciones climatológicas —una vez conocida la función de covariancia generalizada— se suprimen con remplazo, una por una, todas las estaciones ubicadas dentro del área de interés  $A$ . Si se cuenta con  $n$  estaciones climatológicas y se desea conocer la estación que menos contribuye a la precisión de la estimación de la precipitación, es necesario resolver  $n$  veces el sistema Kriging (17) con  $n-1$  estaciones. Al eliminar la estación ubicada en el punto  $\mathbf{x}_m$ , la solución del sistema (17) proveerá la variancia del error de la estimación de la precipitación, calculada con  $n-1$  estaciones,  $\sigma_{n-1}^2(\mathbf{x}_m)$ . Esta variancia siempre es mayor que la determinada con  $n$  estaciones climatológicas,  $\sigma_p^{2*}$ , ecuación (18); por tanto, eliminando con remplazo una a una todas las estaciones, se obtiene el aumento relativo de la variancia del error de la estimación de la precipitación, con respecto a  $n$  sitios de medición

$$A_n(\mathbf{x}_m) = \frac{\sigma_{n-1}^2(\mathbf{x}_m) - \sigma_p^{2*}}{\sigma_p^{2*}}, m = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

Una vez determinados los  $n$  valores de  $A_n(\mathbf{x}_m)$ ,  $m = 1, 2, \dots, n$ , se puede conocer la estación que más aumenta la variancia del error de la estimación de la precipitación en una cierta área si es removida —la más útil— o bien, la estación que menos aumenta la variancia del error de la estimación de la precipitación si es removida —la menos útil. La disyuntiva de seleccionar las estaciones más importantes o eliminar las menos importantes, se dirime de la siguiente manera: si fuese a instalarse un número de estaciones automáticas cercano a  $n$ , entonces la jerarquización (19) sería suficiente para seleccionar las estaciones menos útiles e instrumentar al conjunto de  $q$  estaciones restantes. Sin embargo, como se va a instrumentar un número más bien reducido de estaciones automáticas,  $q \ll n$ , el procedimiento adecuado es remover la estación menos útil con respecto a  $n$  estaciones,  $\mathbf{x}_r(n)$

$$\mathbf{x}_r(n) = \underset{\mathbf{x}_m}{\text{mín}} \{A_n(\mathbf{x}_m)\}, m = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

y proseguir de esta forma eliminando la estación menos útil con respecto a las  $n-1$  más útiles,  $\mathbf{x}_r(n-1)$ , la estación menos útil con respecto a las  $n-2$  más útiles,  $\mathbf{x}_r(n-2)$ , y así sucesivamente hasta determinar la estación más útil de todas, el complemento de  $\mathbf{x}_r(2)$ . De esta forma, se conocerá la estación más importante cuando sólo hay dos, las dos estaciones más importantes cuando sólo hay tres, hasta determinar las  $n-1$  estaciones más importantes cuando están en operación  $n$  de ellas. Esto tiene la ventaja de que la jerarquización obtenida efectivamente identifica la importancia relativa de las estaciones bajo distintas condiciones, ya que las  $q$  estaciones más importantes de  $n$  en operación,  $\mathbf{x}_q^*(n)$ .

$$\mathbf{x}_q^*(n) = \{\mathbf{x}_i, i = 1, \dots, n\} - \{\mathbf{x}_r(q+1), \mathbf{x}_r(q+2), \dots, \mathbf{x}_r(n)\} \quad (21)$$

se obtienen de las  $n-q$  jerarquizaciones  $\{A_t(\mathbf{x}_m), m = 1, 2, \dots, n; t = n, n-1, \dots, q+1\}$  considerando sucesivamente  $n, n-1$ , hasta  $q+1$  estaciones en operación. Por tanto, las  $q$  estaciones más importantes con respecto a  $q+1$  estaciones

$$\mathbf{x}_q^*(q+1) = \{\mathbf{x}_i, i = 1, \dots, q+1\} - \{\mathbf{x}_r(q+1)\} \quad (22)$$

coincide con el resultado que se obtiene al eliminar la estación menos importante de  $q+1$  estaciones. De esta forma, se pueden determinar las  $q$  estaciones más importantes,  $1 \leq q \leq n$ , sin necesidad de saber *a priori* cuántas estaciones se instrumentarán en cada cuenca o región hidrológica.

En síntesis, las  $q$  estaciones más importantes de  $n$ ,  $\mathbf{x}_q^*$  ( $n$ ), están condicionadas a que se encuentren en operación  $n$  de ellas; mientras que las  $q$  estaciones más importantes, habiendo  $q$  en operación,  $\approx \mathbf{x}_q^*$  ( $q + 1$ ), no están condicionadas al número de estaciones,  $n$ , de entre las cuales se selecciona el conjunto de tamaño  $q$ . Así, para determinar la jerarquización de la importancia relativa de las estaciones climatológicas de una cuenca o región hidrológica, se calcula primero

$$\mathbf{x}_{t-1}^*(t), t = n, n-1, \dots, 2 \quad (23)$$

de donde se obtiene la jerarquización de todas las estaciones disponibles

$$\{\mathbf{x}_1^*(2), \mathbf{x}_2^*(3), \dots, \mathbf{x}_{n-1}^*(n)\} \quad (24)$$

Por tanto, una vez determinado el número  $q$  de estaciones por instrumentarse, basta con seleccionar el conjunto  $\mathbf{x}_q^*$  ( $q + 1$ ), para conocer las coordenadas geográficas de las estaciones más importantes.

#### Localización óptima de estaciones climatológicas adicionales

El caso contrario al de la jerarquización de la importancia relativa de las estaciones climatológicas en operación, lo constituye la localización óptima de estaciones climatológicas adicionales a las actualmente en operación. Aquí se busca determinar en qué sitios debería emplazarse un conjunto de  $q$  estaciones nuevas, tanto en equipo como en ubicación, condicionado a que existan  $n$  estaciones activas.

Si se cuenta con  $n$  estaciones climatológicas en una cuenca o región hidrológica  $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n\}$ , se puede, considerando un punto adicional  $\mathbf{x}_{n+1}$ , construir el sistema Kriging (17) para  $n + 1$  estaciones, y calcular la variancia del error de la estimación de la precipitación sin tener que hacer ninguna hipótesis sobre el valor experimental de  $z(\mathbf{x}_{n+1})$ . Este punto ficticio (Delhomme, 1978), conduce a una variancia del error de la estimación de la precipitación sobre el área  $A$  de interés, igual a  $\sigma_{n+1}^2(\mathbf{x}_{n+1})$ , la cual siempre es menor que la obtenida con  $n$  estaciones, ecuación (18),  $\sigma_p^2$ . Por tanto, si se añade la estación climatológica  $\mathbf{x}_{n+1}$ , la reducción de la variancia del error de la estimación de la precipitación relativa a  $n$  estaciones,  $R_n(\mathbf{x}_{n+1})$ , es

$$R_n(\mathbf{x}_{n+1}) = \frac{\sigma_p^{2*} - \sigma_{n+1}^2(\mathbf{x}_{n+1})}{\sigma_p^{2*}} \quad (25)$$

Cuando el punto ficticio  $\mathbf{x}_{n+1}$  está restringido a unos cuantos lugares específicos, se calcula la reducción de la variancia del error de la estimación de la precipitación para cada uno de ellos, y se determina el mejor sitio para emplazar una nueva estación climatológica, como aquel donde la reducción de la variancia es máxima –la estación más útil, condicionada a que haya  $n$  en operación. Sin embargo, si no existen sitios preferenciales de antemano, entonces el punto ficticio  $\mathbf{x}_{n+1}$  se mueve sobre una malla uniforme de puntos sobre todo el dominio  $A$  y sus alrededores inmediatos, y se calcula la reducción de la variancia en cada uno de ellos. El conjunto de estos valores permite trazar curvas de igual reducción de variancia relativa, en donde pueden identificarse los puntos con mayor reducción de la variancia del error de la estimación de la precipitación. Una vez seleccionado el primer punto adicional  $\mathbf{x}_{n+1}$ , se repite el proceso para encontrar el segundo mejor sitio, condicional a que existan  $n + 1$  estaciones climatológicas en operación,  $\mathbf{x}_{n+2}$ , y así sucesivamente hasta determinar las coordenadas geográficas de la  $q$ -ésima estación adicional,  $\mathbf{x}_{n+q}$ .

La combinación de los criterios de jerarquización y localización de estaciones climatológicas adicionales permite decidir, objetiva y formalmente, si el tamaño de una red hidrológica de medición debe aumentarse o disminuirse –junto con las coordenadas de los sitios que deberán removerse o adicionarse– en función de la variancia del error de la estimación de la precipitación. Este hecho constituye un gran avance con respecto a los criterios que sólo pueden recomendar la densidad de estaciones climatológicas.

El criterio de localización permite tomar en cuenta aspectos físicos adicionales, ya que las curvas de iso-reducción definen una región factible para añadir una nueva estación. Esto permite, a su vez, refinar la selección de estaciones a escala de microlocalización. Asimismo, el criterio de jerarquización puede adaptarse para considerar factores económicos y estratégicos complementarios, ya que en muchos sitios existe un gran número de estaciones aledañas entre sí.

#### Diseño de las redes hidrológicas automatizadas

La primera etapa de la modernización del SMN, además de la prioritaria capacitación al personal técnico que atiende las estaciones de medición, comprendía el remplazo de los equipos de observación y, en algunos casos, el emplazamiento de estaciones en lugares totalmente nuevos. Por tanto, el criterio prominente para diseñar las redes hidrológicas, fue la jerarquización de la importancia relativa de las estaciones climatológicas.

En esa etapa el objetivo era instrumentar cuatrocientas estaciones climatológicas, doscientas estaciones hidroclimatológicas, los ochenta observatorios meteorológicos y la conversión de diez estaciones climatológicas en observatorios meteorológicos. Con la finalidad de comprobar el funcionamiento de las estaciones automáticas, el remplazo de los equipos de medición debe hacerse paulatinamente de la siguiente forma.

En un principio, se coloca la estación automática junto a la estación con operación manual y se monitorean simultáneamente las dos estaciones. Cuando se tenga confianza en la exactitud de los datos recolectados, y en el archivo y transmisión de la información hidrológica de las estaciones automáticas, entonces se podrá desmantelar la estación manual.

### *Red sinóptica*

La red sinóptica actual consta de ochenta observatorios meteorológicos, y se dispuso de noventa equipos nuevos con transmisión vía satélite. Entonces, se pudieron remplazar los instrumentos de toda la red sinóptica y sólo fue necesario determinar diez sitios para emplazar observatorios nuevos. Como los observatorios meteorológicos están registrados internacionalmente y reportan diariamente la información recolectada ante la Organización Meteorológica Mundial, OMM, requieren personal especializado para asegurar su buen funcionamiento. Además, por lo general están albergados en un edificio dotado de infraestructura de comunicaciones y cálculo numérico, que difícilmente puede encontrarse en localidades muy apartadas de las poblaciones grandes. Por tanto, los sitios para ubicar las diez ampliaciones de observatorio, fueron seleccionados de tal manera que se reforzara la cobertura nacional de fenómenos meteorológicos a escala sinóptica; esto es, no hubiera sido conveniente determinar la localización óptima de un observatorio adicional en cada una de las 37 regiones hidrológicas y de ahí seleccionar diez sitios, puesto que sólo se disponía de ese número limitado de nuevos equipos.

De esta forma, sabiendo que era necesario reforzar principalmente la costa del pacífico para identificar el movimiento de grandes masas de aire húmedo, así como algunas ciudades importantes, se sugirieron algunos sitios para convertir estaciones climatológicas en observatorios meteorológicos. Con base en la información de las necesidades de monitoreo proporcionada por la GSMN, se propusieron las siguientes ampliaciones de observatorio. En la costa del Pacífico, resultó conveniente instrumentar Rosarito, Baja California Norte; Cabo San Lucas, Baja California Sur; Guasave, Sinaloa; Puerto Vallarta, Jalisco; y, Zihuatanejo,

Guerrero. En la zona del golfo de México, hacía falta un observatorio en Ciudad del Carmen, Campeche; en el mar Caribe era necesario un observatorio en Cancún, Quintana Roo; y, ciudades importantes alejadas del monitoreo meteorológico a escala sinóptica eran Mexicali, Baja California Norte; Ojinaga, Chihuahua; y, Matamoros, Tamaulipas.

Las ampliaciones de observatorio de Cabo San Lucas, Zihuatanejo, Puerto Vallarta y Cancún, tienen, además, un interés con fines turísticos; y las correspondientes a Guasave y Mexicali refuerzan aspectos de operación agrometeorológica. La distribución espacial de la red sinóptica es bastante uniforme.

### *Red hidroclimatológica*

La red hidroclimatológica, como tal, no existe en el país. En la actualidad se cuenta con una red hidrométrica de 1 103 estaciones manuales que miden el gasto o los niveles de la superficie libre del agua, en sitios estratégicos para la planeación hidroeléctrica e hidroagrícola y, en general, para apoyar las actividades del aprovechamiento y el control de las aguas nacionales.

Por otra parte, en las inmediaciones de muchas presas de almacenamiento están emplazadas estaciones climatológicas con la finalidad primordial de medir la precipitación y estimar la evaporación en los embalses, así como para propósitos generales. Por tanto, surgió la conveniencia de establecer una red hidroclimatológica nacional, cuyos objetivos fueran conjuntar los beneficios de las estaciones hidrométricas y de las climatológicas.

Dadas las características de las estaciones hidroclimatológicas que adquirió la GSMN –midan las mismas variables que las estaciones climatológicas automáticas, más el nivel de la superficie libre del agua– convenía emplazar la mayor parte de éstas en presas de almacenamiento donde se requiere conocer oportunamente la evolución de los almacenamientos. Esto permitiría evaluar los riesgos de la seguridad de las presas, así como mejorar la operación de las compuertas para evitar descargas que pueden producir inundaciones cuando se presentan situaciones de emergencia hidrometeorológica.

Las presas de almacenamiento con mayores problemas de operación en época de avenidas, así como las estaciones hidrométricas localizadas aguas arriba de algunas presas –útiles para medir hidrogramas que pueden transitarse hacia aguas abajo para determinar las aportaciones a las presas– fueron identificadas por la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos de la CNA.

Dichos sitios son idóneos para el emplazamiento de las estaciones hidroclimatológicas automáticas; de hecho, éstas se ubicaron en los doscientos sitios más importantes, de acuerdo con la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos. Las estaciones hidroclimatológicas tomaron la clave de la estación climatológica correspondiente y, las que carecen de clave, es porque en ese lugar no existía una estación climatológica. La distribución espacial de la red hidroclimatológica no es uniforme –y no tiene porqué serlo– ya que atiende primordialmente las necesidades de información en los sistemas hidrológicos más caudalosos y en las regiones donde se concentra el mayor número de presas importantes del país, que es donde están los principales asentamientos humanos.

En la siguiente sección se muestra cómo las redes sinóptica e hidroclimatológica modifican la jerarquización de la importancia relativa de las estaciones climatológicas, y también la flexibilidad del método desarrollado para incorporar formalmente criterios complementarios en el diseño de la red climatológica.

### Red climatológica

La red climatológica convencional consta de 5 566 estaciones que miden la precipitación acumulada en 24 horas, las temperaturas mínima, máxima y media diaria, así como la evaporación potencial diaria. Las estaciones climatológicas automáticas miden precipitación, velocidad y dirección del viento, y presión, temperatura y humedad relativa del aire.

El criterio básico de diseño de la red climatológica automatizada es la jerarquización de la importancia relativa de las estaciones actualmente en operación, complementado con aspectos de operación agrometeorológica, pronósticos del tiempo en centros turísticos y el fortalecimiento de la información básica para la planeación hidráulica. La jerarquización de la importancia relativa de las 4 594 estaciones climatológicas que cuentan con coordenadas geográficas, se realizó por regiones hidrológicas cuando éstas son de forma razonablemente regular, y por cuencas, cuando las regiones son muy irregulares o extensas, o cuando contienen un gran número de estaciones.

Para aplicar la innovación al método Kriging expuesta con anterioridad, fue necesario convertir las coordenadas geográficas de cada estación en coordenadas cartesianas. Esto se logró a través de la proyección Universal Transversa de Mercator, UTM, para regiones de no más de 16 grados cuadrados, y la proyección Cónica Conforme de Lambert, CCL, cuando las regiones hidrológicas sobrepasan ese límite. El siguiente paso fue identificar una función de covarianza

generalizada para las tormentas seleccionadas, estimar sus parámetros y determinar el orden de la función, que es del tipo

$$K(h) = C \delta(h) + a_1 |h| + a_3 |h|^3 + a_5 |h|^5 \quad (26)$$

donde  $\delta(h) = 1$ , si  $h = 0$ , y  $\delta(h) = 0$ , si  $h \neq 0$ . Las tormentas analizadas muestran que la mayor parte de ellas pueden ser satisfactoriamente representadas por funciones de covarianza generalizada de orden 0 ó 1. Por tanto, los valores de  $a_3$  y  $a_5$  son iguales a cero. Se observó que, efectivamente, muchas tormentas tienen una cobertura espacial de varias regiones hidrológicas, lo cual asegura que el diseño de las redes responderá ante los eventos meteorológicos más importantes. Finalmente, se establece el sistema Kriging (17) tantas veces como sea necesario, para determinar la secuencia de estaciones más importantes, (24).

A continuación se presenta un caso típico de jerarquización de la importancia relativa de estaciones climatológicas, así como su modificación debido a factores complementarios. Considérese, por ejemplo, la región hidrológica 9; ésta abarca parte de los estados de Chihuahua y Sonora, y contiene cinco cuencas hidrológicas. Esta región cuenta con 179 estaciones climatológicas y cinco observatorios meteorológicos, todos ellos con coordenadas geográficas conocidas. Sin embargo, los observatorios de Guaymas y Empalme están muy cerca uno del otro, por lo que se considerará sólo uno de ellos. Por la cercanía con la zona turística de San Carlos, Sonora, se trabajará con el observatorio de Empalme.

Así, los cuatro observatorios, ubicados en Ciudad Obregón, Empalme y Hermosillo, Sonora, y el de Temosachic, Chihuahua, forman la red sinóptica automatizada de la región hidrológica 9.

Las estaciones hidroclimatológicas seleccionadas por la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, son 12: Abelardo L. Rodríguez (presa sin sobrenombre), Adolfo Ruiz Cortínez (presa Mocúzari), Álvaro Obregón (presa El Oviachic), Bacanora (presa Las Calabazas), Cajón de Onapa (presa sin sobrenombre), Cazanate (estación hidrométrica ubicada aguas arriba de la presa Josefa Ortiz de Domínguez (El Sabino)), El Tapiro (presa sin sobrenombre), Ignacio R. Alatorre (presa Punta de Agua), Jacinto López (presa Cuquiachic), Lázaro Cárdenas (presa La Angostura), Maximiliano R. López (presa Bachoco) y Plutarco Elías Calles (presa El Novillo), todas ellas en Sonora.

En forma independiente a las redes sinóptica e hidroclimatológica, se llevó a cabo la jerarquización de las 184 estaciones de todos los tipos de la región hidrológica 9. Por ejemplo, las cuarenta estaciones

**1. Las cuarenta estaciones y observatorios más importantes de la región hidrológica 9**

Orden	Estación	Cuenca
1	Tomochi	B
2	Vícam	B
3	Bavispe	B
4	El Carrizal	E
5	Sahuaribo	A
6	Rancho Viejo	D
7	Peñitas	B
8	Quechhueca	A
9	Arizpe	D
10	El Cubil	B
11	El Sahuaral	D
12	Maicoba	B
13	Carbó	D
14	San Juan Chihuahua	B
15	Ónavas	B
16	Kilómetro 47	B
17	López Mateos	B
18	Minas Nuevas	A
19	Guaymas	C
20	La Mesa Tres Ríos	B
21	Jupare	A
22	Tescachic	B
23	San Jorge	E
24	La Misa	C
25	Cucurpe	D
26	Temosachic	B
27	Nuri	B
28	Teonadepa	B
29	Cochibampo	A
30	Hermosillo	D
31	Rebeiquito	B
32	Las Cabañas	D
33	Baviácora	D
34	Ciudad Obregón	B
35	La Guadalupe	B
36	Félix Gómez	E
37	Nacoziari de García	B
38	Divisaderos	B
39	Santo Tomás	B
40	Mesa del Huracán	B

más importantes de esa región, se presentan en el cuadro 1. Si fuese a instrumentarse exclusivamente una red climatológica, los resultados del cuadro 1 serían suficientes para seleccionar las primeras *q* estaciones más importantes; sin embargo, como la red climatológica funcionaría combinadamente con las redes sinóptica e hidroclimatológica, fue necesario adecuar los resultados como consecuencia del emplazamiento de estas últimas redes que, por cierto, condicionan la red climatológica.

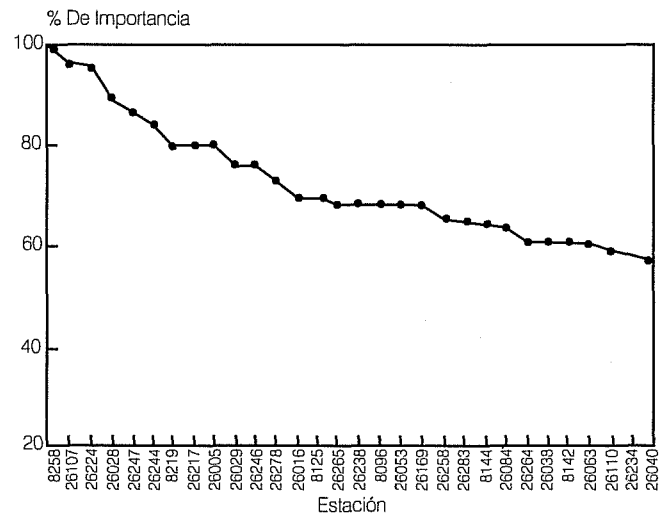
Se ignoraba el número de estaciones climatológicas automáticas que se instalarían en cada región hidrológica, pero se conocía la localización de las estaciones hidroclimatológicas y de los observatorios meteorológicos. Por tanto, el número de estaciones climatológicas por emplazarse en cada región hidrológica se determinó considerando dos factores:

- El número de estaciones hidroclimatológicas y observatorios en dicha región, de tal manera que la densidad final de todos los instrumentos automáticos fuera razonablemente uniforme en todo el país.
- El área de cada región en relación con la superficie del territorio nacional, para que la red climatológica automática también tuviera una distribución espacial uniforme.

Entonces, la estación Tomochi, Chihuahua, que tiene la jerarquía más alta de la región hidrológica 9, tiene que suprimirse debido a que está muy cerca de la presa Abraham González, Chihuahua, que es parte de la red hidroclimatológica en la región 34, cuenca A. Las estaciones Vícam, Bavispe y El Carrizal son seleccionadas. La estación Sahuaribo, Sonora, queda muy cerca del observatorio Temosachic, Chihuahua, por lo que, al ubicar en un plano todas las estaciones, se ve la necesidad de medir, por ejemplo, en San Bernardo, Sonora. La estación Rancho Viejo se cambia, por razones similares, al sitio denominado Ures.

Las estaciones Peñitas y San Juan Chihuahua se suprimen totalmente, en favor de la estación Mesa del Huracán. Quechhueca y Jupare se suprimen porque quedan muy cerca de Navojoa que tiene especial im-

**1. Jerarquización inicial de la región hidrológica 9**



portancia desde el punto de vista agroclimatológico, además de que es una ciudad mucho más importante. Arizpe permanece en la red climatológica. El Cubil está muy cerca de la hidroclimatológica Bacanora; El Sahuaral muy cerca del observatorio Hermosillo.

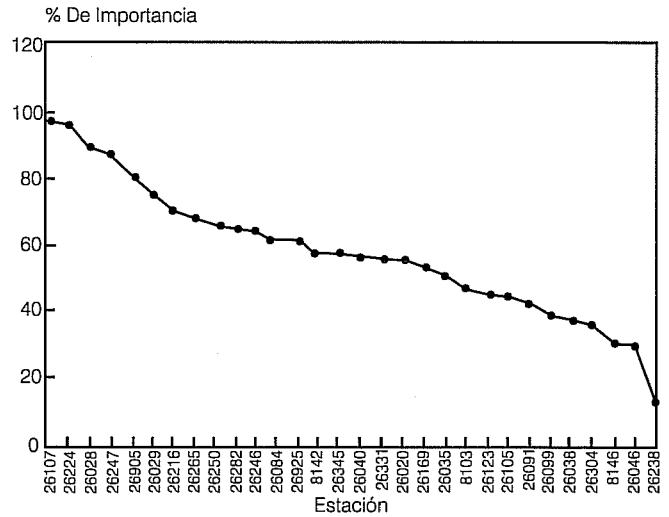
La estación Maicoba tiene que remplazarse por Yécora para conservar la cobertura hidrológica. Carbó y Ónavas permanecen en la red. La estación Kilómetro 47 se sustituye por la estación Agua Prieta; López Mateos se elimina y Minas Nuevas queda muy cerca de la hidrométrica Adolfo Ruiz Cortínez. El observatorio de Guaymas se reemplaza por el de Empalme para reforzar el pronóstico del tiempo en el centro turístico de San Carlos. La estación La Mesa Tres Ríos se sustituye por Moctezuma; Tescachic se suprime; San Jorge permanece; y La Misa está muy cerca de la hidrométrica Ignacio R. Alatorre.

La climatológica Cucurpe permanece, así como el observatorio Temosachic. Se remueve Nuri, y Teonadepa se reemplaza por Bacadehuachi; se suprime Cochibampo. El observatorio de Hermosillo permanece; Rebeiquito queda muy cerca de la hidrométrica Plutarco Elías Calles; Las Cabañas muy cerca de la hidrométrica Jacinto López; y, Baviácora, La Guadalupe, Félix Gómez, Divisaderos y Santo Tomás se suprimen. El observatorio de Ciudad Obregón permanece; y, finalmente, Nacozari de García está muy cerca de la hidrométrica Lázaro Cárdenas.

Este tipo de análisis puede llevarse a cabo con las 184 estaciones, pero evidentemente no es necesario. Los cambios que las redes sinóptica e hidroclimatológica provocan en la red climatológica, al reubicar algunas estaciones y suprimir otras, permiten construir una red combinada más adecuada para monitorear no sólo los sistemas meteorológicos de gran escala, sino también para atender aspectos agrometeorológicos, turísticos y de planeación hidráulica en general. Esto se logra de la siguiente manera: las estaciones hidroclimatológicas y los observatorios, de hecho liberan a la red climatológica de algunos sitios de medición, y este superávit en las estaciones más importantes permite incluir otras que tienen una jerarquía menor en cuanto a fenómenos meteorológicos se refiere, pero que refuerzan las actividades de los criterios adicionales de diseño.

En particular, para la región 9, los aspectos de operación agrometeorológica son tomados en cuenta mediante la introducción de las estaciones Calle 12, Calle 2 y Calle 6, ubicadas dentro de la zona de riego del río Yaqui. Adicionalmente, se selecciona otra estación en el Centro de Investigaciones Agrícolas del Noroeste, CIANO, para incentivar las actividades de investigación agrometeorológica. Los aspectos turísticos de la

## 2. Jerarquización final de la región hidrológica 9



región hidrológica 9 son atendidos con el observatorio de Empalme. Finalmente, se introduce una estación climatológica adicional en las cuencas A, B, C y D, en sitios estratégicamente escogidos para reforzar las actividades de planeación hidráulica: Tesocoma, Tres Ojitos, Nácori Grande y La Colorada, respectivamente.

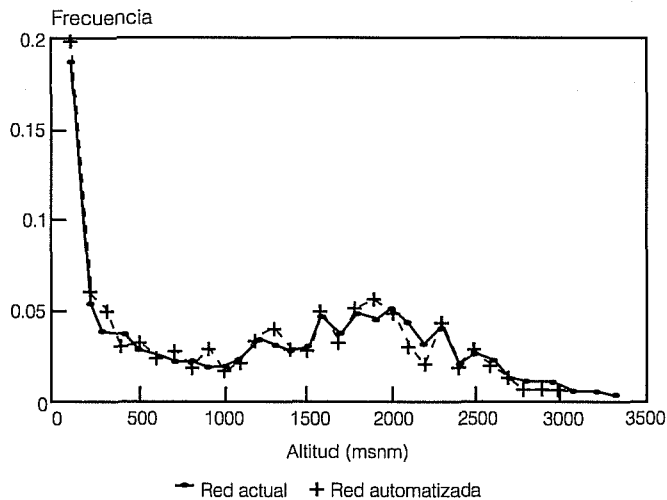
De la misma forma, se jerarquizaron y modificaron las 37 regiones hidrológicas y, en ocasiones, el análisis se hizo por cuencas. Algunas estaciones climatológicas se concentran, por ejemplo, en el Distrito Federal para reforzar la medición de la velocidad y dirección del viento, indispensables para el monitoreo de la calidad del aire; se instaló una estación en cada delegación política, así como dos observatorios: el de Tacubaya y el del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

Algunos otros puntos también fueron reforzados, por ejemplo, las estaciones de la isla Cayo Arcas, Campeche, y la de Dos Bocas, Tabasco, para ayudar al pronóstico del tiempo en plataformas importantes de Petróleos Mexicanos. En Laguna Verde, Veracruz, se instaló una estación climatológica con la finalidad de conocer el tiempo en la central nucleoelectrica del mismo nombre. También los principales centros turísticos costeros del país fueron instrumentados con estaciones climatológicas automáticas.

### Red combinada

La red combinada de estaciones climatológicas, hidroclimatológicas y observatorios meteorológicos es simplemente la superposición de las tres redes de medición. Las ventajas de esta red, como ya ha sido co-

### 3. Frecuencia de altitudes de las redes completa y automatizada



mentado en la sección anterior, es que atiende no sólo los aspectos puramente meteorológicos, sino también criterios complementarios de operación agrometeorológica, pronósticos del tiempo en centros turísticos y reforzamiento de las actividades de planeación hidráulica de todo el país.

Continuando con el ejemplo de la región hidrológica 9, ésta quedó instrumentada con 24 estaciones climatológicas, 12 hidroclimatológicas y cuatro observatorios meteorológicos. La jerarquización original de la red climatológica y sinóptica, cuadro 1, consideraba cinco estaciones en la cuenca A, 22 en la B, dos en la C, siete en la D y cuatro en la E.

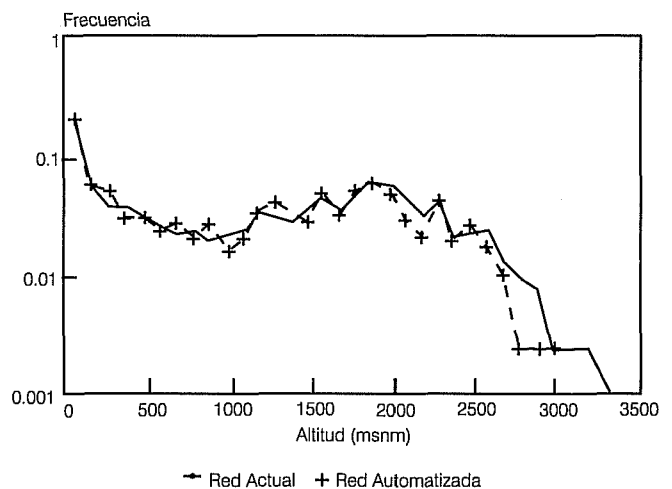
La red combinada final contiene cinco estaciones en la cuenca A, veinte en la B, tres en la C, diez en la D y dos en la E. Como puede apreciarse, la distribución espacial de sitios de medición, sean estaciones climatológicas o no, se respetó razonablemente. En la ilustración 1 se presentan los primeros treinta sitios de la jerarquización original de la importancia relativa

de estaciones climatológicas y observatorios –reportadas en el cuadro 1. En la ilustración 2 se muestran los primeros treinta sitios de la jerarquización final de la importancia relativa de estaciones climatológicas y observatorios.

Las estaciones hidroclimatológicas no pueden jerarquizarse ya que no existen en la actualidad, a menos que operen como climatológicas. Las estaciones hidrométricas, al no medir precipitación, definitivamente no pueden jerarquizarse mediante el procedimiento descrito en este trabajo.

La red automatizada consta de 690 sitios de medición, y representa adecuadamente la distribución espacial de la red completa de 5 566 estaciones a escala sinóptica. En la ilustración 3 se muestran los polígonos de frecuencias de la distribución altimétrica de la red completa y de la red automatizada. La misma información se presenta en la ilustración 4, excepto que la frecuencia está trazada en logaritmos para resaltar las

### 4. Frecuencia (logarítmica) de altitudes de las redes completa y automatizada



### 2. Altitud de las estaciones de la red combinada automatizada

Altitud [msnm]	Número de estaciones			
	Climatológicas	Hidroclimatológicas	Observatorios	Total
0 - 500	101	25	46	172
501 - 1000	41	5	6	52
1001 - 2000	104	43	25	172
2001 - 3000	46	16	10	72
> 3000	0	0	0	0
Total	202	89	87	468

diferencias de concentración de sitios de la red combinada a distintas altitudes sobre el nivel medio del mar. En estas dos gráficas puede observarse que la red automatizada representa apropiadamente la distribución de altitudes de las estaciones de la red completa a distintos niveles.

Las ilustraciones 3 y 4 fueron trazadas considerando 468 de las 690 estaciones de la red combinada, debido a que sólo en esas estaciones se conoce su altitud sobre el nivel medio del mar. Para la red completa, ilustración 5, se utilizaron, por la misma razón, 3 079 estaciones del total de 5 566 para construir el polígono de frecuencias. En la ilustración 4 se observa que, en prácticamente todos los niveles, la red automatizada hace una mímica del polígono de frecuencias de la red completa; sólo entre los 2 600 y 3 000 msnm, esta última queda ligeramente subrepresentada por la red automatizada. Aun así, la red automatizada propuesta tiene un 15% de estaciones por arriba de los 2 000 msnm, cuadro 2.

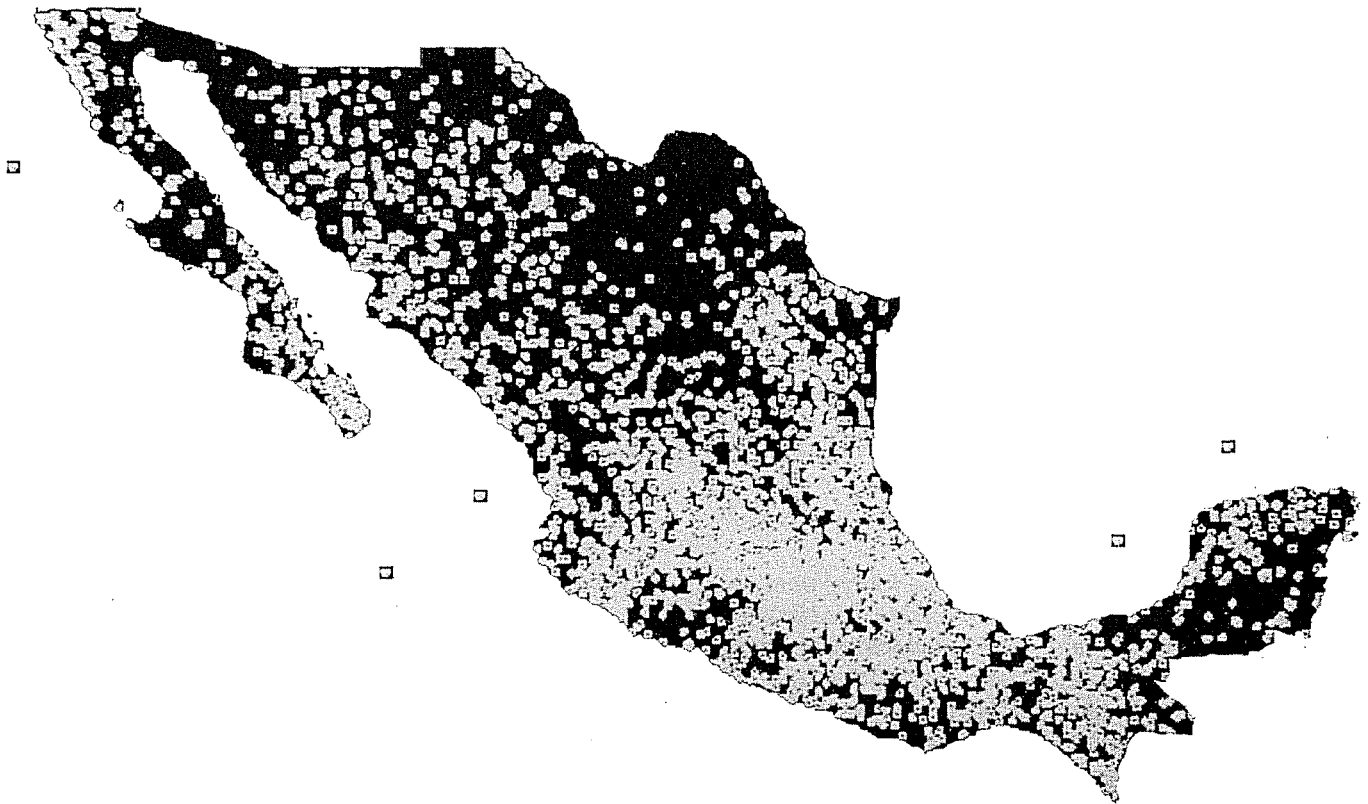
Debe hacerse notar que el diseño de la red combinada, ilustración 6, aún cuando estuvo fuertemente apoyado en el criterio de jerarquización de la impor-

tancia relativa de las estaciones, se guió en última instancia por la experiencia aportada por la GSMN en cuanto a los sitios más problemáticos con respecto a emergencias hidrometeorológicas.

El resultado final es que cada una de las redes climatológica, hidroclimatológica, sinóptica y combinada, son autosuficientes, a la vez que se complementan entre sí. La red climatológica y la red sinóptica cubren, cada una, uniformemente todo el país; la red hidroclimatológica abarca todos los sistemas hidrológicos y presas importantes del país; y, la red combinada verdaderamente constituye una configuración autosuficiente para el acopio de datos en tiempo real.

La red combinada cubre prácticamente las 156 cuencas hidrológicas del país. Existen sólo seis cuencas sin instrumentación automática. Estas son la 3C en Baja California Sur, la 4B en Baja California Norte, la 10H en Sonora, la 19B en Guerrero, y la 35A en Coahuila. Aunque estas cuencas no tienen estaciones automáticas, todas las cuencas circunvecinas están instrumentadas con estaciones automáticas, muchas de ellas casi en el límite con aquéllas. En particular, las cuencas 3C y 6C están juntas y prácticamente despo-

##### 5. Red nacional de estaciones climatológicas convencionales





## 6. Red nacional telemétrica de estaciones automáticas



bladas y sin ríos caudalosos, por lo que no es grave la falta de estaciones automáticas.

La cuenca 4B, rodeada de estaciones y observatorios automáticos, es muy pequeña. La cuenca 10H está formada por una serie de lagunas costeras y es prácticamente insignificante en cuanto a emergencias hidrometeorológicas se refiere. La cuenca 19B está prácticamente despoblada y no existen sistemas hidrológicos de importancia. Finalmente, en la cuenca 35A está la *zona del silencio*, donde literalmente no existe actividad humana alguna.

### Conclusiones

En este trabajo se presenta un método formal para jerarquizar la importancia relativa de estaciones climatológicas activas, en función de la precisión de la estimación de la precipitación. El procedimiento es una innovación al método geoestadístico conocido como Kriging, y permite seleccionar objetivamente las estaciones climatológicas más importantes de una red operada manualmente, para remplazar sus equipos

por instrumentos automáticos y con transmisión vía satélite.

También, se adecuó la técnica del punto ficticio para construir un método complementario a la jerarquización de estaciones, capaz de determinar óptimamente la ubicación de estaciones adicionales a redes climatológicas en operación. La combinación de los criterios de jerarquización y localización formaron la base para diseñar la red climatológica automatizada nacional; asimismo, su flexibilidad permitió considerar el emplazamiento de las redes sinóptica e hidroclimatológica para formar una red combinada automatizada, que cumple con varios objetivos.

Cada una de las redes puede operar independientemente o en coordinación con las otras redes automatizadas. La red de observatorios, prácticamente fija, cubre el territorio nacional para monitorear fenómenos meteorológicos a escala sinóptica. La red hidroclimatológica, propuesta por la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, permite prever y diagnosticar situaciones de emergencia hidrometeorológica, así como ayudar a controlar las principales presas de almacenamiento nacionales.

La red climatológica, cuyo diseño está reportado en Collado y Toledo (1992), es capaz de cubrir las necesidades de información con propósitos de planeación hidráulica en el país, sin la demora en la concentración de los datos. Finalmente, la red combinada, formada por la superposición de las tres redes automatizadas, puede atender situaciones de emergencia hidrometeorológica, aspectos de operación agrometeorológica, pronósticos del tiempo en centros turísticos, y acelerar la difusión de información climatológica con fines de planeación hidráulica en el ámbito nacional.

#### Agradecimientos

A Enrique Ortega, gerente del Servicio Meteorológico Nacional, por la confianza y apoyo brindados para ayudar a seleccionar la ubicación de las estaciones climatológicas automatizadas mediante la aplicación de técnicas de optimización. A Othón Cervantes, jefe de Climatología de la Gerencia del Servicio Meteorológico Nacional, la elucidante información provista que, en el transcurso de largas reuniones de trabajo, condujeron a un fructífero producto final. A Leobardo Palomino y Miguel Monroy por el manejo de la información pluviométrica, que facilitó enormemente la extracción de la base de datos utilizada para el diseño de las redes. A Teresa Soriano que ayudó en distintas fases del proyecto, manejando información, ejecutando corridas de programas de cómputo, e imprimiendo gráficas y cuadros. A Guillermo Reza por la digitalización del contorno y de la hidrografía de la República Mexicana, así como de sus estados, cuencas y regiones hidrológicas. Cualquier error remanente es responsabilidad única de los autores.

**Nota:** Actualmente, Víctor Toledo presta sus servicios en la Gerencia del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua.

#### Referencias

- Bárdossy, A., (Ed.), "Geostatistical Methods: Recent Developments and Applications in Surface and Subsurface Hydrology", International Hydrological Programme, UNESCO, París, Francia, 1992, 161 pp.
- Bastin, G., B. Lorent, C. Duqué y M. Gevers, "Optimal Estimation of the Average Areal Rainfall and Optimal Selection of Rain Gauge Locations", *Water Resources Research*, 20(4):463-470, 1984
- Benson, M. A., "Allocation of Stream-gauging Stations Within a Country", en *Design of Hydrological Networks*, Publicación IAHS número 67, 1965
- Bras, R. L. e I. Rodríguez-Iturbe, "Random Functions and Hydrology", Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1985, 559 pp. + xvi
- Collado, J., "Estimación Óptima de la Precipitación Media con el Método Kriging", *Ingeniería Hidráulica en México*, III(3):34-45, 1988
- Collado, J. "Red Hidrometeorológica en Morelos", en Tapia Uribe, M. (Ed.), *Primeras Jornadas de Investigación en el Estado de Morelos*, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuernavaca, Morelos, pp. 87-99, 1991
- Collado, J. y V. Toledo, "Localización Óptima de Estaciones Climatológicas en el Estado de Morelos", Proyecto Núm. IH9004, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, 1990, 40 pp. + iii
- Collado, J. y V. Toledo, "Localización Óptima de Estaciones Climatológicas y Observatorios en la República Mexicana", Proyecto Núm. CA9201, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, 1992, 162 pp. + ix, 10 planos
- Committee on Opportunities in the Hydrological Sciences, Water Science and Technology Board, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council, "Opportunities in the Hydrological Sciences", National Academy Press, Washington, D. C., 1991, 348 pp. + xvii
- Cressie, N. "Statistics for Spatial Data", Wiley, Nueva York, Nueva York, 1991
- Cressie, N. y D. M. Hawkins, "Robust Estimation of the Variogram: I", *Mathematical Geology* 12(2):115-125, 1980
- Delhomme, J. P., "Kriging in the Hydrosciences", *Advances in Water Resources*, 1(5):251-266, 1978
- Deutsch, C. y A. Journel, "GSLIB: Geostatistical Software Library User's Guide", Oxford University Press, 1992
- Eagleson, P. S., "Optimum Density of Rainfall Networks", *Water Resources Research*, 3(4):1021-1033, 1967
- Hershfield, D., "On the Spacing of Rain Gauges", *Symposium on Design of Hydrometeorological Networks*, Quebec, Canadá, IASH/WMO, 1965
- Hughes, J. P. y D. P. Lettenmaier, "Data Requirements for Kriging: Estimation and Network Design", *Water Resources Research*, 17(6):1641-1650, 1981
- Journel, A. G. y C. T. Huijbregts. "Mining Geostatistics", Academic Press, Nueva York, Nueva York, 1978, 600 pp.
- Kafritsas, J. y R. L. Bras, "The Practice of Kriging", *R. M. Parsons Laboratory, Massachusetts Institute of Technology*, Reporte Núm. 263, 1981
- Kitanidis, P. K., "Statistical Estimation of Polynomial Generalized Covariance Functions and Hydrological Applications", *Water Resources Research*, 19(4):909-921, 1983
- Krige, D. G., "Two-Dimensional Weighted Moving Average Trend Surfaces for Ore Evaluation", *Proceedings Symposium on Mathematical Statistics and Computer Applications for Ore Evaluation*, Johannesburg, South Africa, pp. 13-38, 1966
- Langbein, W. B., "Hydrologic Data Networks and Methods of Extrapolating or Extending Available Hydrologic Data", *Flood Control Series No. 15*, UNECA/WMO, 1960
- Matheron, G., "The Theory of Regionalized Variables and its Applications", Ecole de Mines, Fontainebleau, Francia, 1971, 212 pp.
- Matheron, G. y M. Armstrong, (Eds.), "Geostatistical Case Studies", D. Reidel, Dordrecht, Holanda, 1987
- Moss, M. E., (Ed.), "Integrated Design of Hydrological Networks", Publicación IAHS número 158, 1986
- Olea, R., "Optimum Mapping Techniques Using Regionalized Variable Theory", *Series on Spatial Analysis*, Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas, 1975, 137 pp.
- Ripley, B. D., "Spatial Statistics", Wiley, Nueva York, Nueva York, 1981, 252 pp.
- Starks, T. H. y J. H. Fang, "On the Estimation of the Generalized Covariance Function", *Mathematical Geology*, 14(1):57-64, 1982
- World Meteorological Organization, "Hydrological Network Design Practices", Publicación número 324, 1972.

#### Abstract

Collado, J. and V. Toledo-Reyes. "Optimal Location of Climatological Stations and Meteorological Observatories in Mexico". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XII. Num. 1, pages 47-64, January-April, 1997.

The objective of this paper is to present the procedure used to define the optimal sites for the 400 automated climatological stations and 10 meteorological observatories in Mexico that, in combination with the substitution of the equipment in 80 observatories in operation and the installation of 200 hydroclimatological stations, will make up the national weather and synoptic networks with satellite transmission. They will be capable of providing improved spatial-temporal coverage of the weather phenomena and transmitting timely measurements nationwide. The location of these stations is planned to obtain the greatest benefit from the collected data. Because the horizontal variability of most phenomena measured by climatological stations and observatories is very small in comparison with the spatial variability of rain, and that its effects are implicitly represented by the rain depth, this variable was selected as the most representative and decisive in the design of climatological and synoptic networks. Ten of the most severe storms for 1, 3, 7, 15, 30 and 365 consecutive days were selected for the period 1968 -1983. From among these, those with greatest spatial extension and persistence were chosen. For each of the 156 largest watersheds in the 37 hydrological regions in Mexico, the Generalized Covariance Function was identified and the parameters estimated for the most severe storms. The Kriging method was used to interpolate the rain depth and estimate the average rainfall in a watershed or hydrological region. This method was chosen because it considers the geometric configuration of the measurement network by means of i) the distance between climatological stations, ii) the distance between observation points and a point that describes each watershed or hydrological region, and iii) the spatial structure of the rain by means of the Generalized Covariance Function. Thus, the climatological and synoptic networks can be designed by assigning a relative importance to each station. This importance is determined by eliminating the stations that produce the smallest increase in the variance of the error of the estimate for the average rainfall in each watershed or hydrological region if it is removed. The  $n-1$  most important stations are identified. By continuing with this criterium, the  $n-2$  most important stations can be identified and so on until the station that contributes most to the estimate of the average rainfall in the watershed is identified. Of the 5,566 stations in operation, the relative importance of 4 594 climatological stations for which the geographic coordinates were known was determined. Considering the 200 hydroclimatological stations and 80 observatories that were programmed for substitution, the most important weather stations and modifications to observatories were defined for the 400, 200 and 90 stations on the automated climatological, hydroclimatological and synoptic networks. As such, the geographic coordinates for the stations and observatories were required to define the network for the 690 observation points that would provide sufficient real-time data to anticipate hydrometeorological emergencies, agricultural activities, forecast weather at the recreational centers and assist in the collection of data for national hydrological planning.

**Key words:** Climatological stations, meteorological observatories, optimal location, Mexico, hydrometeorological phenomena, climatological networks, synoptic networks, hydrologic networks, generalized covariance function, Kriging method, hydraulic planning