

Aplicación del método kriging en la construcción de campos de tormenta en la ciudad de México

Héctor Leonardo Cisneros Iturbe
Christophe Bouvier

Laboratorio de Hidrología del IRD, Francia

Ramón Domínguez Mora

Universidad Nacional Autónoma de México

En este trabajo se estudia la estructura espacial de las tormentas con el objeto de mejorar el cálculo de las avenidas en el proceso lluvia-escurrimiento. Se describen las características generales de los modelos con los que se interpolaron los datos de precipitación. Con los datos de una red de pluviómetros de la ciudad de México se constituyó una muestra de episodios diarios de lluvia con alturas de precipitación superiores a 30 mm. La muestra es empleada para comparar los modelos a través de la frecuencia y dispersión de los errores de interpolación (validación cruzada). Los resultados obtenidos con la función spline son superados con el método kriging. Con este método no se encuentran ventajas utilizando diferentes modelos de ajuste del variograma, como tampoco con la introducción de diferentes grados de deriva. Esto sugiere que la interpolación resulta insensible a la elección de un variograma. Se discuten las aplicaciones del error de estimación (y del método en general) y se sugieren los pasos a seguir para reforzar la interpolación.

Palabras clave: precipitación, interpolación espacial, kriging, hidrología urbana, México.

Introducción

El interés del trabajo se centra en el cálculo de avenidas de frecuencia baja en cuencas, cuya superficie varía entre algunas hectáreas hasta varias decenas (o incluso centenas) de kilómetros cuadrados. Las distribuciones puntuales de las lluvias por lo general son conocidas a través de las curvas IDF (Franco, 1998), sin embargo, en la mayor parte de los casos no son suficientes para caracterizar directamente las distribuciones de las avenidas, ya que la estructura espacial de la tormenta tiene un papel muy importante. A pesar de que ya se han obtenido algunos resultados en el valle de México, particularmente en el cálculo de factores de reducción por área (DGCOH, 1982), es necesario revisar esos resultados tomando en cuenta nuevos datos.

La interpolación mediante kriging es un método que se utiliza para construir eficientemente los campos de lluvia a partir de los registros de una red de aparatos de medición (Delhomme, 1976; Lebel, 1984). Se apoya en la previa identificación de la estructura espacial

de las precipitaciones con ayuda del variograma, función que liga la correlación de la lluvia medida con la distancia que los separa. El uso del método implica el cumplimiento de ciertas condiciones de ergodicidad y homogeneidad de los sistemas de precipitación. Estas condiciones pocas veces son cumplidas rigurosamente. En México, como en otros sitios montañosos de zonas tropicales, los efectos orográficos inducen una inestacionariedad espacial de los momentos estadísticos puntuales (media, variancia) (Cisneros, 1997). Estos lugares presentan igualmente una cierta diversidad de tipo de tormentas, las cuales condicionan sus características puntuales y espaciales (Bouvier *et al.*, 1998).

En ese contexto, el uso del kriging es particularmente delicado. A pesar de ello, dicho método continúa siendo muy atractivo, tanto por la relativa disponibilidad de numerosos paquetes de cálculo como por el vasto rango de posibles aplicaciones: interpolación, evaluación de la incertidumbre, optimización de la densidad de la red de medición, simulación y generación de lluvias en el espacio. México resulta un lugar intere-

sante para probar el desempeño del kriging en medios montañosos tropicales, así como para adaptar eventualmente el método a un contexto sujeto a fuertes influencias orográficas.

En este artículo se presenta la manera en que se trató la información y el análisis de los errores de interpolación con diferentes modelos. Se muestran los alcances y las limitaciones del método utilizado en materia de interpolación de lluvias.

La zona de estudio y la información disponible

México está situado sobre los depósitos lacustres de una cuenca endorreica, a una altitud de 2,240 m, rodeada de montañas que alcanzan los 5,500 m (volcán Popocatepetl). La cuenca cubre una superficie de 9,784 km², de los que aproximadamente 4,600 corresponden a la superficie metropolitana. Para este trabajo se dispuso de los registros pluviográficos de 49 estaciones entre 1988 y 1997, excepto 1994. Dos tercios de las estaciones se encuentran en la zona lacustre, mientras que el resto cubre las montañas del sur y del oeste de la cuenca. La zona instrumentada corresponde principalmente al Distrito Federal y tiene una superficie de 2,036 km² (ilustración 1), al considerar un rectángulo mínimo que cubre los sitios de medición.

Aun cuando existen precipitaciones durante la época invernal ligadas con los fenómenos anticiclónicos de América del Norte, es en el verano (entre mayo y octubre) que se tienen las lluvias más importantes. Es-

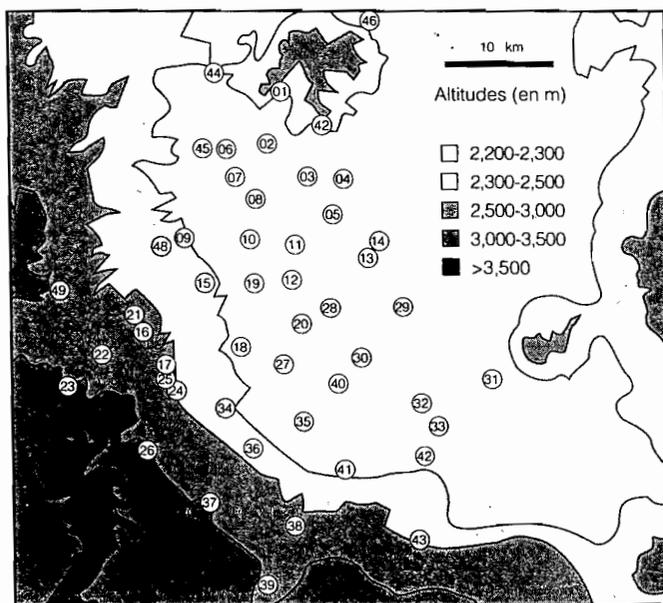
tas precipitaciones están ligadas estrechamente con la fragmentación de las perturbaciones ciclónicas en las costas de los océanos Atlántico y Pacífico, al entrar en contacto con las sierras al este o al oeste de México. Por otra parte, la lluvia media anual en la zona varía de 500 a 1,200 mm en un eje orientado globalmente en dirección noreste-suroeste.

Para efectuar los tratamientos de este trabajo se escogieron los episodios diarios en los que la lluvia superaba un umbral de 30 mm, al menos en una estación. Se constituyó así una muestra de 437 eventos. La elección del episodio diario se adoptó para facilitar la separación de los eventos lluviosos, que por lo general son muy intensos y cortos con respecto al registro diario. Se sabe (Cisneros, 1997) que en más de 66% de los casos sólo se tiene una tormenta al día, por lo que la adopción del episodio de 24 horas se considera adecuado. En la ilustración 2 se muestran la media y la variancia de la lluvia diaria de los 437 episodios, lo que ilustra la heterogeneidad de las distribuciones estadísticas.

Métodos utilizados de interpolación

Existen varias revisiones de los métodos de interpolación (Creutin y Obled, 1982; Nepel, 1997) a las que el lector se puede referir para obtener información más amplia. Se presentan las características generales de los interpoladores spline y kriging, que se utilizaron en este trabajo.

Ilustración 1. Ubicación de las estaciones pluviográficas.



Interpolación mediante la función spline

El método consiste en ajustar una función $V(x,y)$ a las N mediciones de la precipitación. Esta función es un método numérico que consiste en hacer pasar una "placa delgada" por los puntos de medición (condición 1), minimizando la energía de flexión (condición 2) (Nepel, 1997). Ello asegura la continuidad de las curvas y las pendientes, y suaviza las curvas de interpolación, pero puede no corresponder a la realidad física del fenómeno estudiado. Las ecuaciones de las condiciones 1 y 2 son:

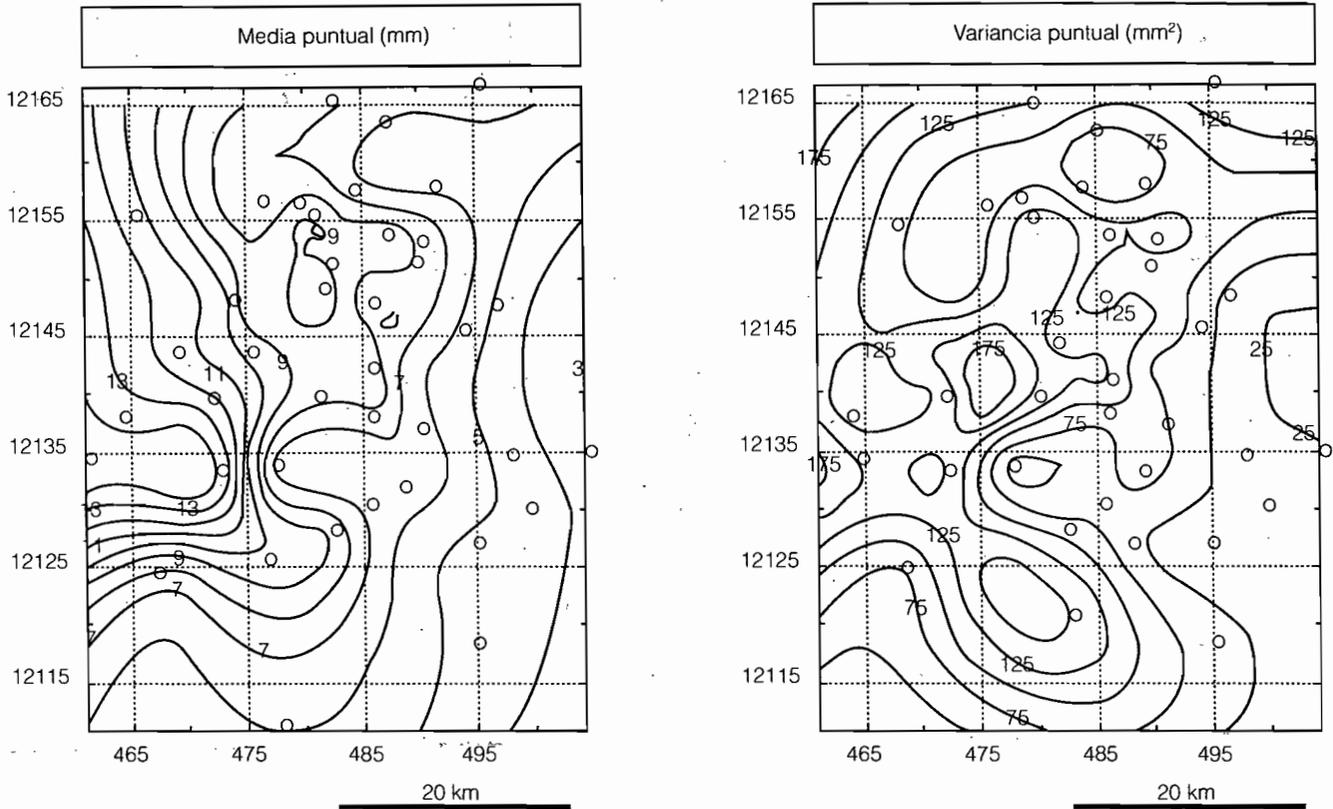
Condición 1

$$V(x, y) = \alpha x + \beta y + \gamma + \sum_{i=1}^N \lambda_i K_i(x, y) \quad (1)$$

Condición 2

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 0, \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i x_i = 0, \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i y_i = 0 \quad (2)$$

Ilustración 2. Isohietas de la media y la variancia puntuales de los episodios de la muestra.



Donde α , β y γ son parámetros a calcular, mientras que el resto de los elementos matemáticos se obtienen con $K_i(x, y) = d^2 \ln(d^2)$, $d = (x-x_i)^2 - (y-y_i)^2$ y $K_i(x_i, y_i) = 0$.

Interpolación mediante kriging

El kriging se inscribe en la categoría de los métodos de interpolación probabilísticos y se apoya en la inferencia de una función de correlación espacial (o de estructura). Se considera que las lluvias constituyen una función aleatoria de la que se conoce un número de realizaciones en ciertos puntos. El problema radica en estimar lo mejor posible la lluvia en otros sitios y simular eventualmente otras realizaciones de esta función aleatoria. El kriging responde a esas cuestiones bajo ciertas hipótesis concernientes a la homogeneidad del proceso en el espacio y en el tiempo, proporcionando además el error de interpolación cometido en un punto o en una zona. Es por ello que el kriging se presta a numerosas aplicaciones prácticas, como son el error inherente en los datos de entrada de los modelos lluvia-escorrentía, la densidad o disposición óptimas de una red de aparatos o el control de la calidad de los registros pluviométricos.

Para una función aleatoria Z , el kriging propone un interpolador lineal, sin desviación y de error cuadrático medio mínimo expresado por las ecuaciones:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) ; E(z^*(x_0) - z(x_0)) = 0 ; \quad (3)$$

$$E(z^*(x_0) - z(x_0))^2 \text{ mínima}$$

donde $z^*(x_0)$ es el valor estimado en el punto x_0 , $z(x_0)$, el valor exacto, y $z(x_i)$, el valor observado en el sitio i de n puntos. Se puede mostrar que bajo ciertas hipótesis de estacionariedad espacial del valor de la media de z , los coeficientes λ_i son la solución del sistema:

$$\sum_{j=1, n} \lambda_j \gamma_{ij} + \mu = \gamma_{i0} \text{ con } i = 1, \dots, n ; \quad \sum_{i=1, n} \lambda_i = 1 \quad (4)$$

donde μ es el multiplicador de Lagrange utilizado para la solución del sistema y γ_{ij} es la función de correlación entre dos puntos del espacio (x_i, y_i) separados por una distancia h definida por:

$$\gamma_{ij} = \gamma(x_i, x_j) = \text{var}(z(x_i) - z(x_j)) / 2 = (E((z(x_i) - z(x_j))^2) - (E(z(x_i) - z(x_j)))^2) / 2 \quad (5)$$

La variancia de estimación en el punto x_0 es igualmente obtenida con la ayuda de γ .

$$\sigma^2 = \sum_{i=1, n} \lambda_i \gamma_{i0} + \mu \quad (6)$$

a γ se le conoce como semivariograma o variograma, y su estimación constituye el punto más delicado del método.

Caso de una realización única

Cuando los dos primeros momentos estadísticos de la variable estudiada (media y variancia) no varían por translación en el espacio (hipótesis de homogeneidad de segundo orden), o incluso cuando sólo lo hacen los incrementos de sus momentos (hipótesis intrínseca, menos restrictiva), el variograma puede estimarse en cada rango de distancias $N(h)$ a partir de registros experimentales mediante:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 \cdot N(h)} \sum_{j=1}^{N(h)} [(z_j(x+h) - z_j(x))^2] \quad (7)$$

En caso de que la media no sea homogénea en el espacio (es decir, con deriva), entonces se deberá formular de nuevo el sistema que conduce al cálculo de los coeficientes λ_i en función de γ_{ij} , y estimar el variograma. El efecto principal es que ello no se puede llevar a cabo con la ayuda de la ecuación 7, ya que el término $E(z(x_i) - z(x_j))^2$ no es igual a cero en la ecuación 5. Es interesante señalar que existen procedimientos automáticos que permiten "filtrar" la deriva, siempre que ésta pueda expresarse con una aproximación polinomial de grado k . En la práctica se utilizan, por ejemplo:

Deriva lineal (primer grado):

$$m(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y \quad (8)$$

Deriva cuadrática (segundo grado):

$$m(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (9)$$

Caso de realizaciones múltiples

Es posible incrementar la robustez de la estimación del variograma utilizando todas las realizaciones del proceso. El variograma obtenido recibe el nombre de variograma climatológico, el cual sintetiza el total de la información espacial de la lluvia. Ello supone, sin embargo, que las diferentes realizaciones procedan de

un mismo proceso aleatorio (hipótesis de estacionariedad en el tiempo y de ergodicidad), y que los diversos sistemas lluviosos sean normalizados con un factor de escala, siendo éste la variancia del campo k , estimada mediante la variancia calculada en diferentes puntos de medición durante la realización k :

$$\alpha_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(x_i)^2 - \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i(x) \right]^2 \quad (10)$$

La estimación del variograma se realiza entonces con la ecuación 7 para todos los eventos. El problema de la deriva se trata como se hizo anteriormente. Puede mostrarse que la variancia de la estimación puntual (lo que también es cierto para una estimación zonal) asociada con un evento k se deduce de la variancia de estimación de un proceso unitario:

$$\sigma_k^2 = \alpha_k / \alpha_u \cdot \sigma_u^2 \quad (11)$$

en donde la variancia del campo unitario α_u es teóricamente igual a 1.

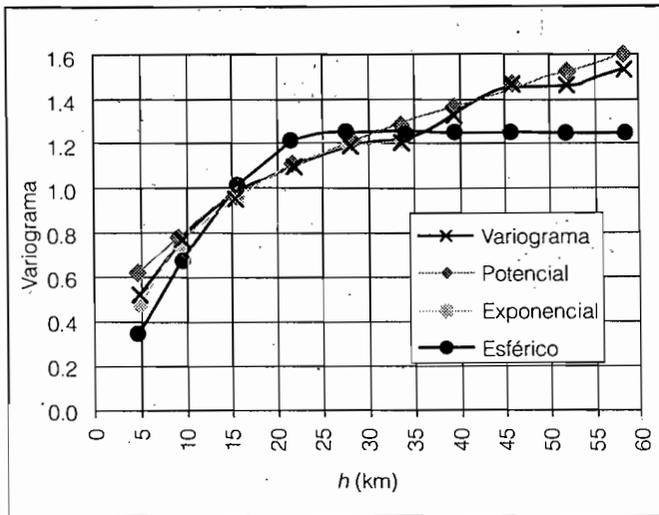
Interpolaciones y resultados

El objetivo es comparar diferentes métodos de interpolación y caracterizar la incertidumbre asociada con los datos en la configuración actual de la red de medición. En el caso del kriging, ya se ha dicho que el problema de validación del variograma es delicado y necesita que se cumplan varias etapas:

Construcción de un variograma climatológico y ajuste de un modelo teórico

Se calculó el variograma climatológico de la muestra de 437 episodios, admitiendo provisionalmente la hipótesis de ergodicidad. En la ilustración 3 se observa que el variograma no tiene una plataforma definida, lo que podría resultar una deriva. Aun cuando no se tienen estaciones suficientemente cercanas como para establecer si se presenta un efecto de pepita (es decir, una discontinuidad de la función de correlación en el origen), se aceptó que éste no existe. Varios modelos se ajustaron al variograma experimental: esférico, exponencial (que desarrollan una plataforma) y potencial (ilustración 3). Se presentan las expresiones matemáticas de los modelos de ajuste (sin pepita), donde α y β son los parámetros de los modelos y los valores usados en los ajustes (cuadro 1).

Ilustración 3. Variograma climatológico y modelos de ajuste.



$$\text{Esférico: } \gamma(h) = \alpha \left(\frac{3|h|}{2\beta} - \frac{|h|^3}{2\beta^3} \right) \quad h < \beta \quad (12a)$$

$$\gamma(h) = \alpha \quad h > \beta \quad (12b)$$

$$\text{Exponencial: } \gamma(h) = \alpha \left(1 - \exp\left(-\frac{|h|}{\beta}\right) \right) \quad (13)$$

$$\text{Potencial: } \gamma(h) = \alpha |h|^\beta \quad (14)$$

Cuadro 1. Parámetros de los modelos.

	α	β
Potencial	0.35	0.38
Exponencial	9.40	1.25
Esférico	30.0	1.25

Simulaciones y validación cruzada

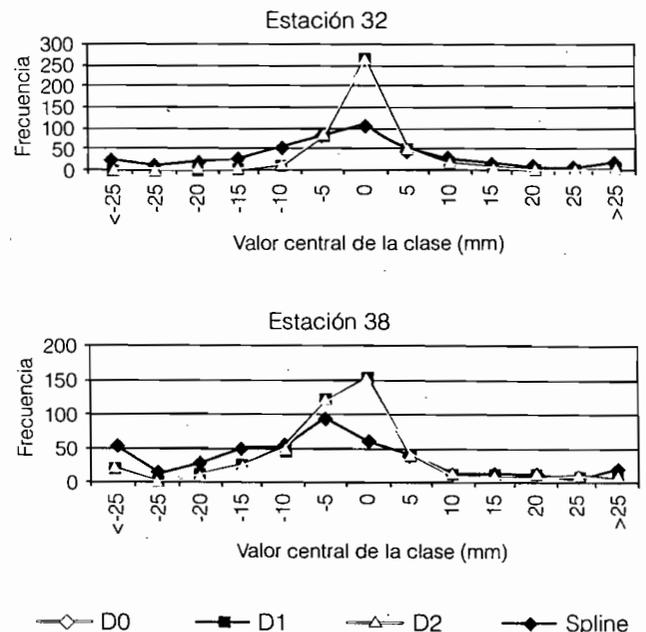
Enseguida se efectuaron diversas interpolaciones con el método kriging, utilizando los diferentes modelos de variograma. Se buscó además identificar un fenómeno de deriva con ayuda del modelo potencial. Para evaluar los resultados de las simulaciones se efectuó una validación cruzada que consiste en: 1) retirar los registros de una estación y modelarlos con base en el resto de las estaciones; 2) comparar los valores observado V_0 e interpolado V_k mediante el cálculo de los errores

$E_k = V_0 - V_k$ de los 437 eventos, y 3) considerar la media y la variancia de los E_k como criterios de calidad. Para ello se eligieron cinco estaciones de la muestra (pluviógrafos 21, 27, 32, 38 y 47). Las estaciones seleccionadas se sitúan en el centro, norte, sur, este y oeste de la zona en estudio (ilustración 1).

En la ilustración 4 se presentan los resultados del análisis de E_k en las estaciones 32 y 38 con varios grados de deriva D (0 = sin deriva, 1 y 2), así como los de la interpolación con la función spline. Para iniciar la discusión se puede decir que un caso ideal de simulación corresponde a una curva en la que la frecuencia de valores de la clase de errores 0 fuera igual o próxima al total de episodios modelados. Los criterios de calidad figuran en el cuadro 2. En ese contexto se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Respecto a los cálculos con grados de deriva 1 y 2 (modelo potencial), se encontró que su utilización no presenta ventajas respecto a la deriva 0, a pesar de que la forma de los variogramas (sin plataforma) y la distribución espacial de los parámetros estadísticos sugieran su existencia.
- Los resultados de la interpolación con el método spline son de menor calidad. Considerando además que la interpolación spline resulta generalmente errática fuera de la área instrumentada, se preferirá definitivamente la interpolación kriging.

Ilustración 4. Histograma de errores de interpolación con diferentes derivas.



Cuadro 2. Media y variancia de los errores. Modelos potencial y spline. Pruebas con deriva.

Estación	21		27		32		38		47	
	E_{km}	Var_E	E_{km}	Var_E	E_{km}	Var_E	E_{km}	Var_E	E_{km}	Var_E
Potencial $D = 0$	1.15	59.4	-0.09	41.7	-0.13	29.5	-1.93	84.3	0.28	40.1
Potencial $D = 1$	1.02	59.2	-0.10	41.7	0.05	29.6	-1.95	85.6	0.40	40.1
Potencial $D = 2$	1.00	59.1	-0.10	41.8	0.02	29.9	-1.95	87.3	0.37	40.3
Spline	2.53	12642	-0.14	43.2	-12.01	1.1 ^{E5}	-13.38	1.3 ^{E5}	-5.65	3.2 ^{E5}

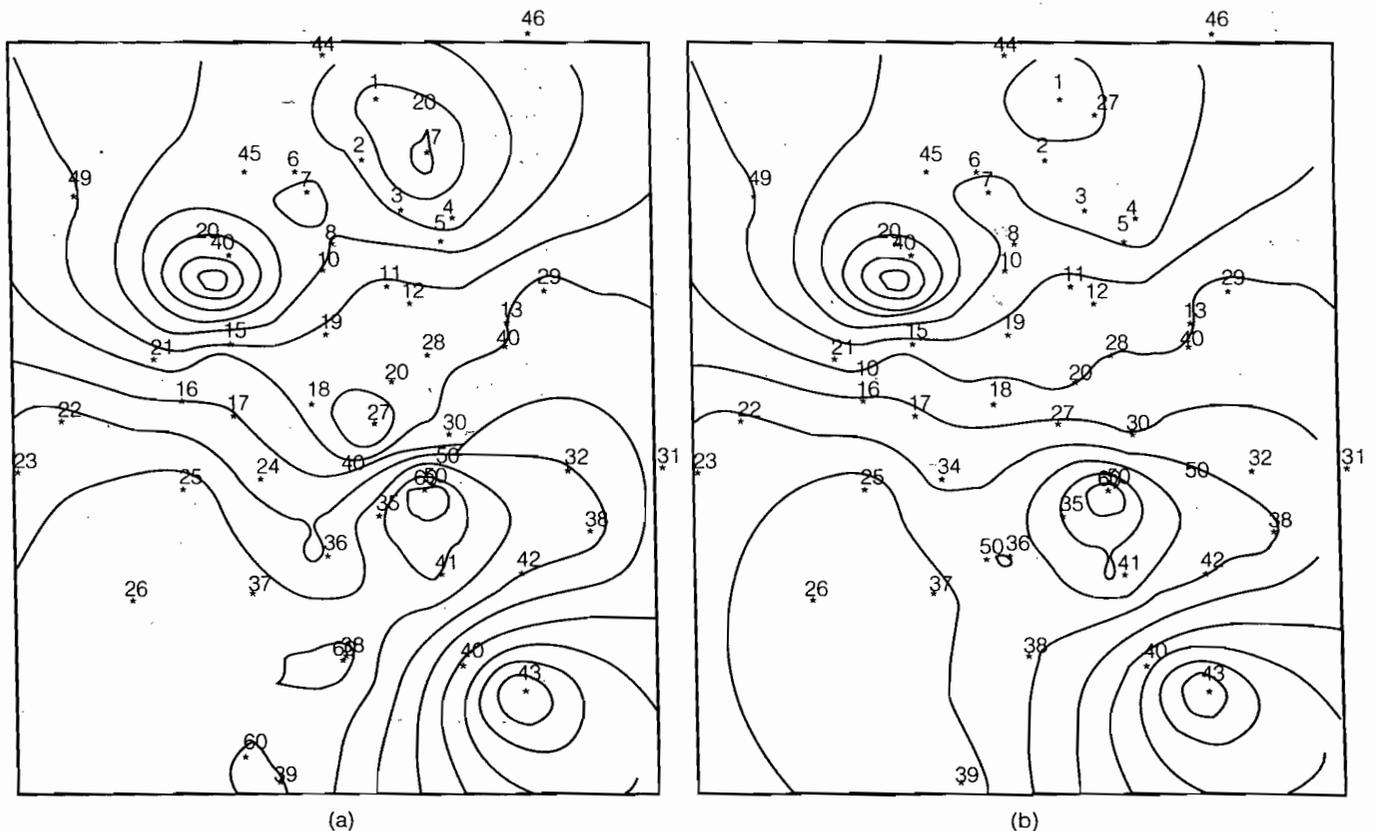
- En cuanto al desempeño de la simulación entre estaciones, se observa la importancia que adquiere la densidad regional de aparatos. En efecto, la estación 38 se sitúa relativamente aislada, lo que no sucede con el pluviógrafo 32 (así como en los puntos 27 y 47), rodeado por otras estaciones y cuyos resultados son similares. La estación 21, en cambio, se encuentra en el límite de la zona en estudio, lo que atenúa la eficiencia del método.

Se revisaron los resultados de la interpolación ligados con el cálculo de los errores más importantes. Para

ello se consideraron los errores mayores a 15 mm y menores a -15 mm. Éstos se presentan cuando:

- La información de los episodios en cuestión se encuentra incompleta o truncada. Esta causa de error se presentó pocas veces.
- El valor en la estación de referencia es un máximo o un mínimo respecto a los valores de las estaciones vecinas. Ello significa que el fenómeno es demasiado irregular para que pueda describirse con la función de correlación identificada. Esta limitación no es exclusiva del método kriging, pues apa-

Ilustración 5. Isohietas de precipitación (mm) del 21/06/89 (sin escala). Comparación de valores observados (a) e interpolados (b) (modelo potencial) en las estaciones 21, 27, 32, 38 y 47.



rece también al utilizar la función spline. En la ilustración 5a se muestran las isohietas de un episodio hechas con los valores observados y en la 5b con los resultados de la interpolación después de eliminar los datos de las cinco estaciones escogidas. En efecto, llaman la atención las diferencias de configuración entre las isohietas provocadas por esa eliminación, sobre todo en las estaciones 27 (al centro), 38 (al sur) y 47 (al norte).

También se efectuó una validación cruzada de los resultados de las funciones esférica y exponencial (la ilustración 6 sólo presenta la estación 27). Se observa que la interpolación con la función exponencial arroja resultados ligeramente mejores que las funciones esférica y potencial (cuadro 3).

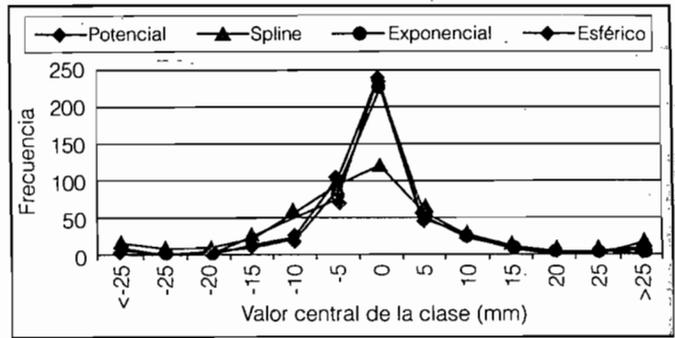
Cabe señalar que los resultados no dependen exclusivamente del modelo del variograma, pero tampoco del presumido efecto de deriva. A pesar de que no se puede pretender que la validación sea completa, parece que el error está ligado con la densidad de la red. En particular, Slimani (1985) y Lebel (1984) muestran que el ajuste de un modelo teórico al variograma experimental no garantiza la minimización del error de estimación; Lebel y Bastin (1985) proponen una validación sistemática para cada estación.

Aplicación en la construcción de tormentas espaciales

Posteriormente se hizo la interpolación con el kriging del episodio más importante de la muestra (con media y desviación espaciales de 51 y 21 mm, respectivamente), utilizando el modelo esférico y los parámetros $\alpha = 1.25$ y $\beta = 30$ km (ilustración 7). Al lado de las isohietas se encuentra el error de estimación σ_k , calculado por las ecuaciones 5 y 11.

Se nota claramente que la calidad de estimación depende en primer término de la densidad de la red de medición. El conocimiento de σ_k conduce a la determinación de un intervalo de confianza: suponiendo que la distribución de los errores es de tipo Gauss, un intervalo de confianza a 95% corresponde a $[z^*(x_0) - 2\sigma_k, z^*(x_0) + 2\sigma_k]$. Cabe señalar que la deter-

Ilustración 6. Histograma de errores de interpolación de los modelos. Estación 27.



minación del intervalo de confianza se puede extender a la estimación de una lámina de lluvia de cualquier superficie. Ello ilustra el interés del kriging en varias aplicaciones, tales como la optimización de la red de medición y el conocimiento del error en los modelos lluvia-escurrimiento, entre otras (Lebel *et al.*, 1987).

Sin embargo, la ecuación del intervalo de confianza representa una condición ideal en un estado teórico. En la práctica deben tomarse en cuenta otras incertidumbres ligadas con la adecuación de las hipótesis de homogeneidad y ergodicidad, así como con la validez del modelo del variograma. Por ello es importante notar que los errores de estimación del kriging no deben emplearse de forma absoluta, sino como guías espaciales de estimación.

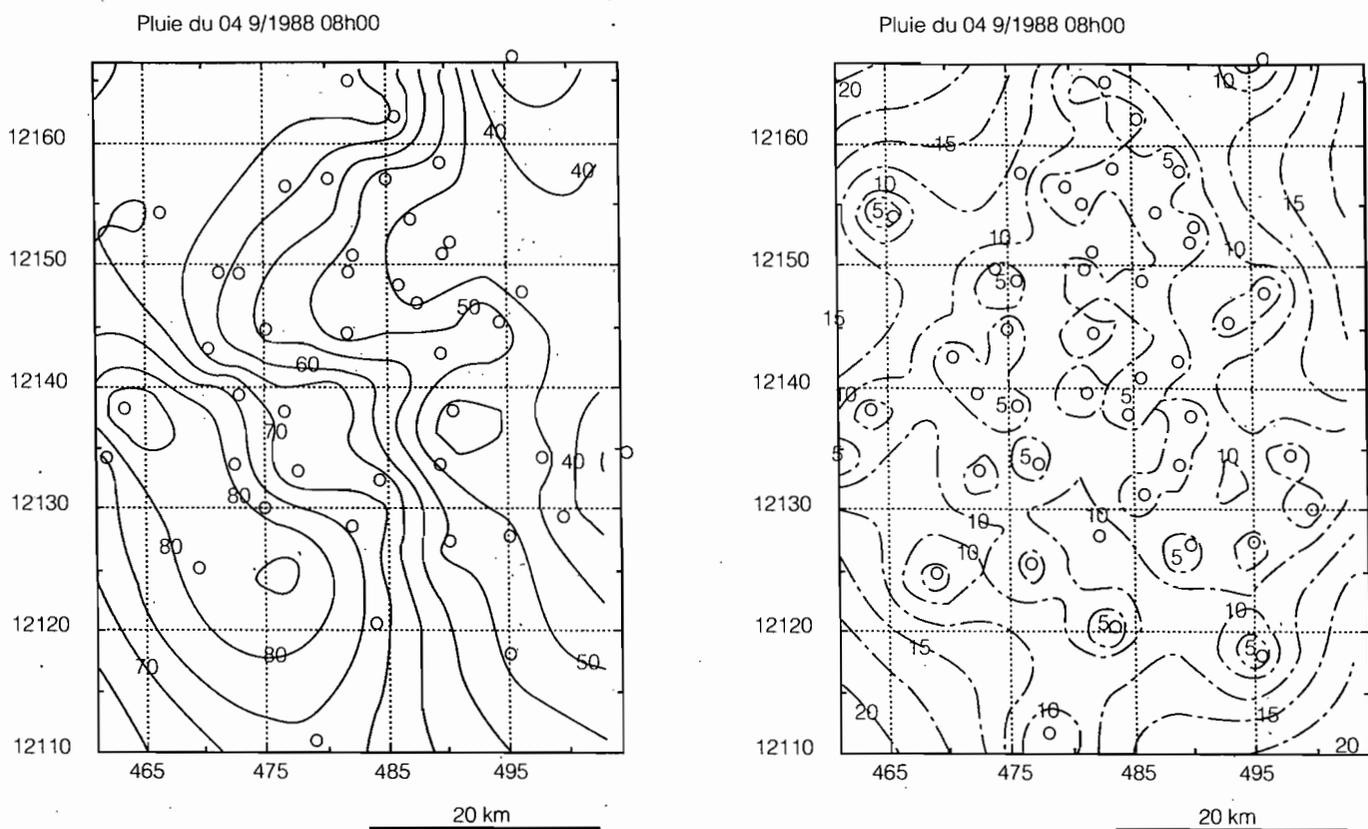
Conclusiones y perspectivas

En el estado actual del estudio y en función de los resultados de la validación cruzada, es evidente que la aplicación del método kriging a datos pluviográficos de México tiene un mejor desempeño que la función spline. No se encontró la presencia de una deriva, a pesar de que existe un gradiente de la media en dirección noreste-suroeste. Además, se obtienen dificultades en la simulación cuando se tienen valores observados máximos o mínimos en la estación simulada.

Cuadro 3. Media y variancia de los errores. Interpolaciones con diversos modelos.

Estación	21		27		32		38		47	
	E_{km}	Var_E								
Potencial	1.15	59.4	-0.09	41.7	-0.13	29.5	-1.93	84.3	0.28	40.1
Esférico	0.79	52.4	-0.04	41.0	0.12	30.8	-2.30	93.8	0.52	34.7
Exponencial	0.92	53.0	-0.06	40.8	0.01	29.7	-2.16	89.3	0.42	35.3

Ilustración 7. Isohietas del episodio del 4/9/88 y error de estimación σ_k .



En cierta medida puede concluirse que los errores de interpolación están ligados con la densidad insuficiente de estaciones de medición en cuanto a la extensión espacial de los sistemas de precipitación. Este problema afectaría de igual modo el uso de otros modelos de interpolación y sugiere la instalación de una red de estaciones más densa o el empleo de imágenes de radar eventualmente disponibles.

La información con que se cuenta y los tratamientos empleados justifican plenamente la etapa de validación de las interpolaciones. Ello permite tener acceso a la construcción de campos de precipitación, al estudio de sus propiedades espaciales y a la generación de valores simulados a utilizar en el perfeccionamiento de las interpolaciones. El kriging también tiene aplicaciones interesantes en la estimación del error, lo que puede aprovecharse directamente en aspectos operacionales, ya sea para la concepción de una red de pluviógrafos como para el control de sus registros. Es por eso que el método es sumamente poderoso tanto por su aptitud en la interpolación como por la diversidad de sus aplicaciones.

Sin embargo, hay que recordar que el kriging se apoya en hipótesis estadísticas que deben cumplirse, y que en la medida en que ellas sean respetadas, la interpolación será más eficiente. No se excluye la posibilidad de buscar en trabajos complementarios el uso de datos con mayor homogeneidad, tomando en cuenta la duración o la intensidad de los eventos, umbrales distintos a 30 mm, etcétera. Se deberá también considerar de manera general la tipología de las lluvias para reforzar la hipótesis de ergodicidad.

Agradecimientos

Agradecemos los oportunos comentarios de T. Lebel en la fase de interpretación de los resultados de la interpolación. Se agradece también a R. Mendoza (México) por el apoyo logístico. La elaboración de este trabajo contó con el soporte financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) (México) y con la ayuda del IRD (Francia).

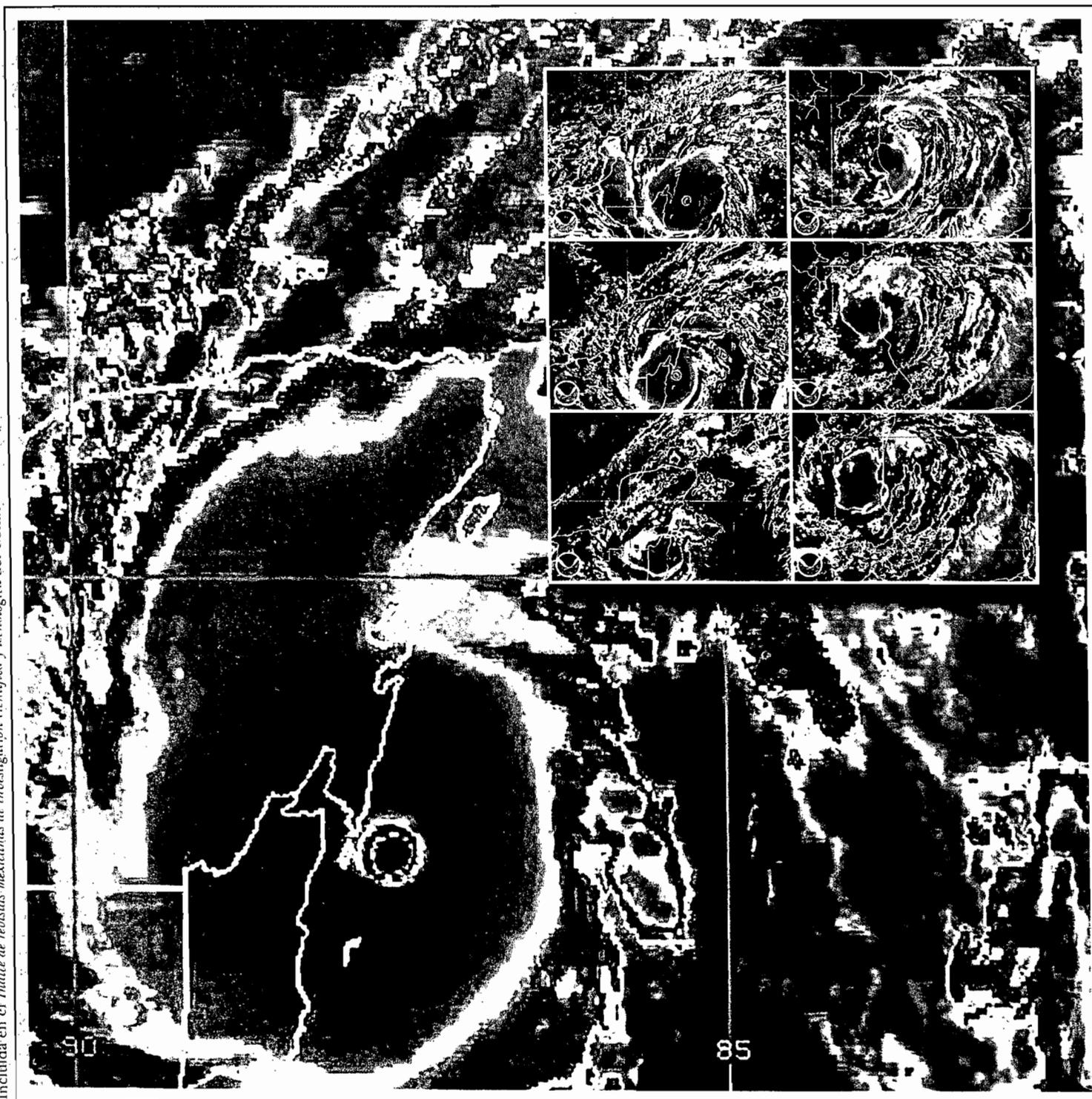
Recibido: 30/04/1999
Aprobado: 14/04/2000

Referencias

- Bouvier, Ch., E. Ayabaca, J.L. Perrin, F. Cruz, B. Fourcade, S. Rosario y L. Carrera, "Caractéristiques ponctuelles et spatiales des averses en milieu andin: exemple de la ville de Quito (Equateur)", por publicarse en la *Revue de Géographie Alpine*. 1998, 15 pp.
- Cisneros, L., *Etude descriptive de la répartition spatio-temporelle des pluies a Mexico*, Memoria de DEA, Francia, Universidad de Montpellier II, 1997, 54 pp.
- Creutin, J.D. y C. Obled, "Objective Analyses and Mapping Techniques for Rainfall Fields: An Objective Comparison", *Water Resources Research*, vol. 18, núm. 2, febrero, 1982, pp 413-431.
- Delhomme, J.P., *Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau*, tesis de doctorado, Universidad Pierre y Marie Curie, París, 1976, 160 pp.
- DGCOH, *Manual de hidráulica urbana, tomo 1*, Departamento del Distrito Federal, Secretaría de Obras y Servicios, México, 1982, 244 pp.
- Franco, D.C., *Análisis regional de lluvias convectivas. Aplicación al Valle de México*, tesis de maestría en ingeniería hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1998, 46 pp. más anexos.
- Lebel, T., *Moyenne spatiale de la pluie sur un bassin versant: estimation optimale, génération stochastique et gradex des valeurs extrêmes*, tesis de doctorado, Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, Francia, 1984, 339 pp.
- Lebel, T. y G. Bastin, "Variogram Identification by the Mean-Square Interpolation Error Method with Application to Hydrologic Fields", *Journal of Hydrology*, vol. 77, 1985, pp. 31-56.
- Lebel T., G. Bastin, C. Obled y J.D. Creutin, On The Accuracy of Areal Rainfall Estimation: A Case Study, *Water Resources Research*, vol. 23, núm. 11, 1987, pp. 2123-2134.
- Nepel, L., *Le risque pluvial en region Languedoc-Roussillon: Caracterisation de l'alea climatique*, tesis de doctorado, Universidad de Montpellier II, Francia, 1997, 272 pp.
- Slimani, M., *Etude des pluies de fréquence rare a faibles pas de temps sur la région Cévennes-Vivarais: estimation, relation avec le relief et cartographie synthétique*, tesis de doctorado, Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, Francia, 1985, 289 pp.

ingeniería hidráulica en México

Incluida en el Índice de revistas mexicanas de investigación científica y tecnológica del Conacyt



Contenido

Artículos técnicos

Análisis de la temporada 2000 de ciclones tropicales en México
Michel Rosengaus

La solución cuasi-lineal de la infiltración vertical
Carlos Fuentes
Yean-Yves Parlange
Randel Haverkamp
Michel Vauclin

Corrientes longitudinales y resistencia al flujo en la zona de rompientes
Andrés Rodríguez
César Mösso
Joan Pau Sierra
Agustín Sánchez Arcilla
Felipe Collado

Ecuaciones de flujo impermanente en canales trapeciales de fondo curvo
Gilberto Sotelo Ávila
Carlos A. Escalante Sandoval

Estudio numérico de estructuras turbulentas con un modelo κ - ϵ en 3D de un flujo sobre un obstáculo cúbico
Cecia Millán Barrera
Hermilo Ramírez León

Contenido de arsénico en el agua potable del valle del Guadiana, México
María Teresa Alarcón Herrera
Isela Flores Montenegro
Pedro Romero Navar
Ignacio R. Martín Domínguez
Rodolfo Trejo Vázquez

Solución analítica aproximada de la ecuación de tránsito de avenidas en vasos
Aldo I. Ramírez
Álvaro A. Aldama

Descripción hidrogeológica y balance hídrico de la cuenca alta del río Foix, Cataluña, España
Enrique Portugal Marín
Juan Antonio Hernández
Georgina Izquierdo

Selección del tren de tratamiento para deshidratar y reducir el volumen del lodo de plantas potabilizadoras
Luciano Sandoval Yoval
Leticia Motellano Palacios
Martín Piña Soberanis
Laura Sánchez Guzmán

Simulación de pérdida de suelo en la cuenca del lago de Patzcuaro a partir de sistemas de manejo agrícola con percepción remota
Luis Mario Tapia Vargas
Mario Tiscareño López
Alfredo Amador
Demetrio Fernández O.
Alma Delia Báez

Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de México, México
Khalidou M. Bâ
Carlos Díaz Delgado
Verónica Rodríguez Osorio

Paradigmas emergentes para el manejo del agua en el siglo XXI. Conferencia Enzo Levi 2000
Poliopetro F. Martínez Austria

Discusión

Guía para colaboradores

Contents

Technical articles

An Analysis of the 2000 Tropical Cyclone Season for Mexico
Michel Rosengaus

The Quasi-Linear Solution of Vertical Infiltration
Carlos Fuentes
Yean-Yves Parlange
Randel Haverkamp
Michel Vauclin

Long Shore Currents and Flow Resistance in the Surf Zone
Andrés Rodríguez
César Mösso
Joan Pau Sierra
Agustín Sánchez Arcilla
Felipe Collado

Non-Steady Flow Equations for Trapezoidal Channels over Curved Bed
Gilberto Sotelo Ávila
Carlos A. Escalante Sandoval

Numerical Analysis of Turbulent Structures with a κ - ϵ 3D Model of a Flow over a Cubic Obstacle
Cecia Millán Barrera
Hermilo Ramírez León

Arsenic Content of the Drinking Water Sources for the Guadiana Valley, Mexico
María Teresa Alarcón Herrera
Isela Flores Montenegro
Pedro Romero Navar
Ignacio R. Martín Domínguez
Rodolfo Trejo Vázquez

Approximate Analytical Solution of the Flood Routing Equation in Reservoirs
Aldo I. Ramírez
Álvaro A. Aldama

Hydrologic Description and Water Balance of the River Foix High Basin, Cataluña, Spain
Enrique Portugal Marín
Juan Antonio Hernández
Georgina Izquierdo

Selection of Dewatering Treatment to Reduce Sludge Volume in Water Potabilization Plants
Luciano Sandoval Yoval
Leticia Motellano Palacios
Martín Piña Soberanis
Laura Sánchez Guzmán

Simulation of Soil Erosion in the Lake of Patzcuaro Watershed, through the Use of Agricultural Systems with Remote Sensing
Luis Mario Tapia Vargas
Mario Tiscareño López
Alfredo Amador
Demetrio Fernández O.
Alma Delia Báez

Simulation of the Daily Discharges of the Amacuzac and San Jerónimo Watersheds in the State of Mexico, Mexico
Khalidou M. Bâ
Carlos Díaz Delgado
Verónica Rodríguez Osorio

Emerging Paradigms for Water Management in the 21st Century: Enzo Levi Lecture 2000
Poliopetro F. Martínez Austria

Discussion

Contributor's guide

<http://www.imta.mx/otros/RIHM/rihm.htm>