

# Comparación de métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación para el acuífero de Icod-Cañadas (Tenerife, Islas Canarias)

*Comparing interpolation methods for rainfall maps elaboration in the Icod-Cañadas aquifer (Tenerife, Canary Islands)*

T. Izquierdo y A. Márquez

Grupo de Geología, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, c/ Tulipán s/n, 28933, Móstoles, Madrid  
t.izquierdo@alumnos.urjc.es, alvaro.marquez@urjc.es

## ABSTRACT

Groundwater is the main water resource in Tenerife (Canary Islands) where it represents almost 90% of the consumption. For the Insular Hydrological Plan the most important aquifer in the future will be the one located in Las Cañadas which belongs to the III Hydrogeological Zone. For exploiting this aquifer in a rational way in the future it is necessary to know and assess carefully the recharge estimates. It is for this reason, that the choice of the rainfall interpolation method is so important. In this study three different interpolation methods have been used to compare their results with the real data of the gauges and to obtain doing that, the best precipitation estimate in the area. The results show the ordinary kriging to be the best interpolation method in the study area and that the use of the relationship between elevation and precipitation do not increase the accuracy of the interpolation even though the climatic characteristics of the island have been taken into account.

**Key words:** Rainfall, interpolation methods, kriging, Icod-Cañadas aquifer, Tenerife.

*Geogaceta*, 40 (2006), 307-310  
ISSN: 0213683X

## Introducción y objetivos

En Tenerife (Islas Canarias) las aguas subterráneas son la principal fuente de recursos hídricos, representando casi el 90% del consumo según los datos del Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIAT; <http://www.aguastenerife.org>). La mayoría de los recursos subterráneos se explotan mediante un sistema de galerías subhorizontales algunas de las cuales superan los 5 kilómetros de longitud. En la actualidad existen en Tenerife más de 1000 galerías, de las cuales se extraen anualmente (según datos del CIAT del año 2004) aproximadamente 120 hm<sup>3</sup>. Estas extracciones han provocado en diversos acuíferos de la isla descensos importantes del nivel piezométrico.

Una de las zonas hidrogeológicas de Tenerife donde el número de galerías es menor es el Circo de Las Cañadas (Fig. 1), considerado como la más importante en el futuro en la extracción de aguas subterráneas por el Plan Hidrológico Insular de Tenerife (PHIT, 1996). Por ello, es una de las pocas zonas de la isla donde continúan las obras de perforación de galerías, de tal modo que 8 galerías han alcanzado ya este área, 5 de ellas penetrando en la zona saturada y extrayendo un caudal

conjunto aproximado de 500 l/s. El acuífero de Las Cañadas forma parte de la Zona Hidrogeológica III (PHIT, 1996) en

la que también se incluye el Valle de Icod (Fig. 1). El acuífero en toda la Zona III está formado por una sucesión de cientos

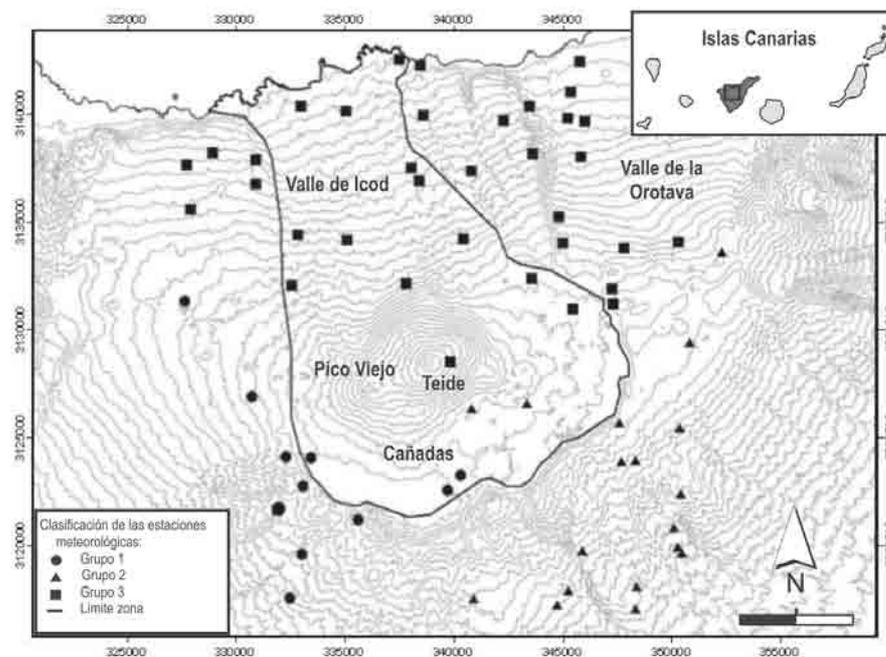


Fig. 1.- Mapa de localización de la zona de estudio en el que se representan las estaciones meteorológicas en grupos homogéneos de comportamiento de precipitación.

*Fig. 1.- Location map of the study area in which the meteorological stations are represented in homogeneous groups based on rainfall behaviour.*

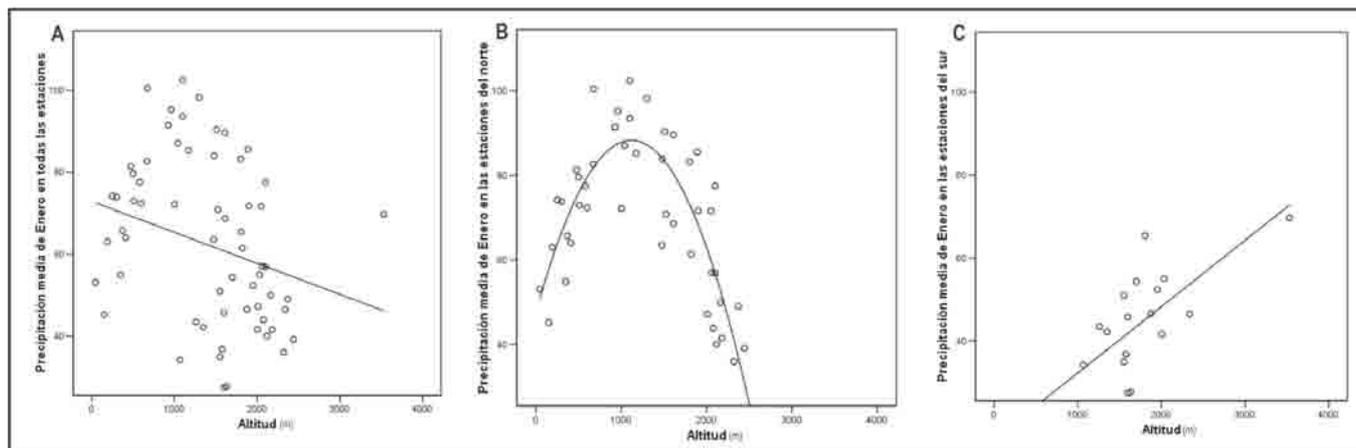


Fig. 2.- A) Precipitación mensual de Enero frente a la altitud. – B) Precipitación mensual de Enero frente a la altitud para las estaciones del Norte. – C) Precipitación mensual de Enero frente a la altitud para las estaciones del Sur.

Fig. 2.- A) Monthly rainfall against elevation for January. – B) Monthly rainfall against elevation for January in the North gauges. - C) Monthly rainfall against elevation for January in the South gauges.

de metros de espesor de coladas de lava muy permeables emitidas por los volcanes de Teide y Pico Viejo. El límite inferior del acuífero en el Valle de Icod está formado por un depósito brechoide de matriz arcillosa (PHIT, 1996), conocido en la terminología local por «mortalón», y cuya geometría se conoce bien en los bordes del valle por los datos de las galerías. En la zona de Las Cañadas, sin embargo, el límite inferior no está bien delimitado, y de hecho la propia configuración geológica del Circo de Cañadas es objeto de importante debate (p.ej., Martí, 2004), por lo que es difícil estimar el volumen de reservas existente en esta zona. La posición aproximada del nivel piezométrico en Las Cañadas es conocida gracias a datos de geofísica (Aubert y Kieffer, 1998), los datos de las galerías, 3 sondeos de exploración abandonados realizados en los años 70 en el marco del proyecto SPA-15 en la zona occidental, y dos sondeos activos realizados por el CIAT en la zona oriental (Farrujia *et al.*, 2001).

La futura explotación racional del acuífero de Las Cañadas implica cono-

cer en mayor detalle no sólo la estructura hidrogeológica de la zona, sino también las estimaciones de la recarga por infiltración. Este dato fundamental presenta el problema de la escasez de pluviómetros con series largas de datos en el interior de Las Cañadas (Fig. 1), por lo que resulta clave la elección de los métodos de interpolación utilizados para realizar los mapas de precipitación y evapotranspiración con los que calcular la recarga mediante balance hídrico. En los últimos años, diversos trabajos han explorado los posibles beneficios para la interpolación de datos climáticos del uso de variables geográficas relacionadas, como la altura o la orientación (p.ej., Goovaerts, 2000; Marquínez *et al.*, 2003; Lloyd, 2005). El uso de estas variables se está viendo facilitado gracias a la aparición de Modelos Digitales de Elevación de calidad gratuitos como los derivados de la misión SRTM (<http://srtm.usgs.gov>) o del sensor ASTER (<http://edcdaac.usgs.gov/aster/ast14dem.asp>). Como la precipitación en general se incrementa con la altitud, la correlación entre ambos factores

se ha usado para los cálculos de mapas de precipitación. Sin embargo, el clima de la región central de Tenerife no presenta una relación simple entre la altitud y la precipitación, debido a la influencia en altura de vientos cálidos (los contraalisos) que provocan en la cara Norte de la isla el efecto conocido como «mar de nubes». De este modo, aunque el efecto de los alisos en la cara Norte supone un aumento de la precipitación con la altura, a partir de unos 1500 metros de altitud las precipitaciones descienden de forma importante.

Por ello, dentro del marco de un proyecto en marcha para el estudio de la estructura geológica e hidrogeológica del acuífero de Icod-Cañadas, y como primer paso para la estimación de la recarga y sus incertidumbres, se ha realizado este estudio comparativo de métodos de interpolación de la precipitación, y el posible beneficio de la inclusión de datos de altitud en los cálculos. Se ha tomado como partida el año 1985 ya que se dispone de datos de la posición del nivel piezométrico del acuífero en ese momento (PHI, 1996).

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
P media (mm)	42,1	63,5	90	62,3	43,5	61,1	20	8,2	4,8	1,7	1,9	9,3
r <sup>2</sup> regresión lineal	0,1203	<b>0,0907</b>	0,0557	<b>0,068</b>	<b>0,082</b>	0,0389	<b>0,1968</b>	<b>0,3051</b>	<b>0,2409</b>	<b>0,3962</b>	0,0008	0,00001
r <sup>2</sup> regresión Norte	<b>0,264</b>	<b>0,711</b>	<b>0,475</b>	<b>0,674</b>	<b>0,415</b>	<b>0,46</b>	<b>0,596</b>	<b>0,51</b>	<b>0,273</b>	<b>0,536</b>	0,023	<b>0,201</b>
r <sup>2</sup> regresión Sur	0,133	<b>0,21</b>	0,06	<b>0,537</b>	0,02	<b>0,463</b>	0,003	0,178	<b>0,244</b>	0,001	<b>0,25</b>	0,00008

Tabla I.- Precipitación media mensual de la zona y valores de r<sup>2</sup> para la relación de la precipitación con la altura para la totalidad de la zona de estudio, para la vertiente Norte y para la vertiente Sur. Los valores en negrita son estadísticamente significativos (p<0,05).

Table I.- Mean monthly rainfall for the area and precipitation against elevation values of r<sup>2</sup> for the whole area, the North side and the South side. Values in bold are statistically significant (p<0.05).

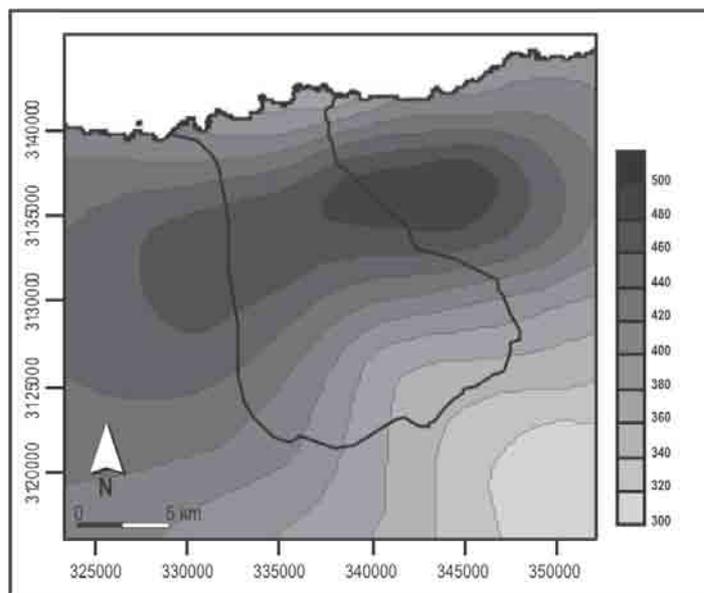


Fig. 3.- Estimación de la precipitación total anual de la Zona Hidrogeológica III usando el método del kriging ordinario.

Fig. 3.- Estimate of total annual precipitation using ordinary kriging method for the III Hydrogeological Zone

## Metodología

Para este estudio se han recopilado datos de precipitación mensual desde 1985 a 2000 de 95 estaciones meteorológicas pertenecientes a la red del Instituto Nacional de Meteorología. De ellas se han utilizado los datos de los 18 pluviómetros que se encuentran dentro de los límites del área de estudio, la Zona Hidrogeológica III. Además, y con el fin de minimizar posibles efectos de borde en los mapas resultantes se seleccionaron aquellos pluviómetros próximos a la zona de estudio que dispusieran de al menos el 50% de la serie temporal empleada (años hidrológicos 1985/1986 – 1999/2000). En el estudio se han utilizado también datos proporcionados por el Parque Nacional del Teide de una estación meteorológica situada en el límite de la zona hidrogeológica en estudio con el fin de aumentar la densidad de datos. Así, el número total de estaciones meteorológicas empleadas fue 64 (Fig. 1).

Para completar las series temporales, las estaciones se clasificaron en grupos en los que se maximizara la semejanza entre estaciones de un mismo grupo y se minimizara entre estaciones de diferentes grupos mediante una clasificación k-means de 3 grupos y 50 iteraciones. La agrupación resultante coincidió con lo esperado a priori teniendo en cuenta la situación geográfica de las estaciones (Fig. 1). Los huecos en las series temporales de cada estación se completaron mediante la

ecuación que aparece a continuación en la que para completar un dato ( $P_x$ ) se tienen en cuenta los datos de ese mes de las estaciones del mismo grupo y el coeficiente de correlación de Pearson ( $r^2$ ) de las series temporales de éstas con la de la estación a completar:

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \cdot r_i^2)}{\sum_{i=1}^n r_i^2}$$

Una vez completadas las series temporales de datos se utilizaron las medias mensuales de los 15 años utilizados para la generación de los mapas de precipitación. En este estudio se utilizaron tres métodos diferentes con el fin de comparar los resultados de cada uno de ellos con los datos reales de los pluviómetros y obtener así la mejor aproximación de la precipitación en la zona.

Para el primer método utilizado, kriging ordinario, se calculó el variograma de forma que la dependencia espacial de los datos quedaba incluida en la interpolación. La ventaja teórica de este método es precisamente la posibilidad de modelar la dependencia espacial de los datos (Lloyd, 2005) por lo que aporta los mejores resultados entre los métodos puramente espaciales en la interpolación de la precipitación. (Goovaerts, 2000; Lloyd, 2005)

El segundo método utilizado es la modelización de la precipitación mediante una regresión lineal que explique la

variación de la precipitación con la altura en la totalidad de la zona de estudio. Para ello, se calculó la regresión lineal de la precipitación media mensual (Fig. 2A) y se aplicó al Modelo Digital de Elevación SRTM transformado de un píxel de 90 m a uno de 1000 m.

Debido a las especiales características climáticas de la zona Norte de la isla de Tenerife se utilizó un tercer método en el que se realizó un modelo de la precipitación que tuviera en cuenta sus diferencias en comportamiento entre la vertiente Norte y la Sur de la isla; así, las estaciones meteorológicas se dividieron según pertenecieran al Norte o al Sur. Para la vertiente Norte se decidió utilizar un modelo cuadrático ya que la precipitación aumenta con la altitud hasta el mar de nubes y por encima de él descende (Fig. 2B), mientras que como en la vertiente Sur la precipitación se comporta de forma general (aumenta con la altitud), se ajustó a un modelo lineal (Fig. 2C).

Las predicciones realizadas con los diferentes métodos no pueden ser evaluadas visualmente con los mapas por lo que se calculó el error mínimo absoluto (MAE) como una medida de la precisión de la estimación para los meses en los que los modelos eran estadísticamente significativos:

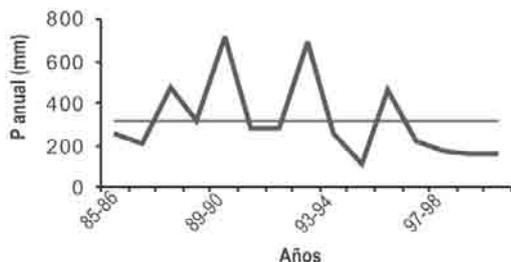
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - P_i'|$$

donde  $P_i$  es la precipitación medida en un punto dado y  $P_i'$  es la precipitación estimada según el modelo para ese mismo punto.

## Resultados

Como era previsible, debido a las características climáticas de la zona de estudio, la regresión lineal de la precipitación con la altura para el conjunto de las 64 estaciones utilizadas, ofrece correlaciones muy bajas con  $r^2$  siempre por debajo de 0,4 y en la mayoría de los casos por debajo de 0,1, aunque resultan estadísticamente significativas en 7 meses (Tabla I). La modelización realizada separando las vertientes Norte y Sur aporta mejores resultados, especialmente en la vertiente norte, con  $r^2$  por encima de 0,4 en 7 meses. A pesar de ello, sólo en 4 meses son estadísticamente significativas las correlaciones de ambas vertientes (Tabla I).

Para evaluar las predicciones de los tres métodos se analizaron los resultados obtenidos para el mes de Enero (Fig. 2), ya que es el mes donde las dos



**Fig. 4.- Evolución temporal de la precipitación anual en Cañadas según los datos del pluviómetro 405K (Montaña Rajada). La línea horizontal representa la precipitación media de la serie temporal.**

**Fig. 4.- Temporal evolution of annual rainfall in Cañadas on base to data from rain gauge 405K (Montaña Rajada). Horizontal line represents medium rainfall of the temporal series.**

modelizaciones en función de la altura ofrecen resultados significativos (Tabla I), y las precipitaciones son importantes (62,3 mm de media en los pluviómetros de la zona de estudio). El MAE obtenido al realizar la interpolación por el método del kriging ordinario es de 4,49 mm, frente a un MAE de 9,42 mm para la modelización en dos vertientes y de 16,89 mm para la relación lineal con la altura. El método del kriging ofrece errores más bajos que las modelizaciones con la altura incluso en los meses donde los  $r^2$  de la modelización en dos vertientes son más altas (Tabla I), como Marzo (6,17 mm del kriging frente a 6,75 mm de la modelización) y Noviembre (5,92 mm para el kriging y 9,96 mm de la modelización).

Por tanto, para realizar los mapas de precipitación mensual del área del acuífero de Icod-Cañadas se ha aplicado el método del kriging ordinario con cálculo del variograma para las series de datos completadas de los años 1985/1986 a 1999/2000 de los 64 pluviómetros seleccionados. Estos mapas serán utilizados posteriormente para estimar la variación espacial y temporal de la recarga. El método del kriging se ha aplicado asimismo para la obtención del mapa de precipitación media anual (Fig. 3), en el cual se aprecia el máximo de precipitación (480 mm) en las zonas altas del Valle de Icod en relación al mar de nubes, y el importante descenso que se registra en la zona del Circo de Cañadas.

### Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos indican que el uso de los datos de altura en la elabo-

ración de mapas de precipitación en el acuífero de Icod-Cañadas produce peores resultados que los métodos espaciales como el kriging, incluso teniendo en cuenta las especiales características climáticas de la zona.

En los últimos años diversos autores (Goovaerts, 2000; Lloyd, 2005) han mostrado la utilidad de métodos geoestadísticos complejos en la interpolación de datos de precipitación, utilizando la correlación entre precipitación y altitud como una variable externa en la interpolación por kriging universal. Sin embargo, este método no está implementado en los programas más comunes de análisis e interpolación de datos espaciales (Surfer, ArcGIS), y sólo aporta errores más bajos que el kriging ordinario cuando las correlaciones entre precipitación y altitud son buenas (Lloyd, 2005), lo que no sucede en el caso del acuífero de Icod-Cañadas.

La interpolación con el método del kriging ordinario para la serie temporal utilizada en este trabajo (años hidrológicos 1985/1986 a 1999/2000) arroja una precipitación media anual en la zona de Las Cañadas de entre 350 y 450 mm (Fig. 3), sensiblemente inferior a la aportada en el Plan Hidrológico Insular de Tenerife (PHIT, 1996) que es de entre 400 y 600 mm. Al no estar detallada en el PHIT la metodología de interpolación utilizada para construir los mapas de precipitación media anual, es difícil valorar si éstos pueden influir en la discrepancia. Sin embargo, al analizar la evolución temporal de la precipitación media en la zona (Fig. 4) aparece una posible explicación para las diferencias obtenidas. El mapa del PHIT está construido utilizando las precipitaciones del periodo 1985-

1992 (frente al periodo 1985-2000 analizado en este estudio), por lo que no considera los datos de los años 1994/95 y 1996/97 a 1999/2000, que fueron más secos que la media (Fig. 4). En ambos casos las series utilizadas no son suficientemente largas como para arrojar resultados fiables en la estimación de precipitaciones medias anuales. El objetivo de este trabajo, en cualquier caso, no es estimar esa media anual, sino disponer de mapas mensuales de precipitación fiables desde el momento de inicio del modelo a desarrollar (1985) para obtener los valores de recarga.

En resumen, los resultados de este trabajo indican que la introducción del parámetro de la altitud en la elaboración de mapas de precipitación de la Zona Hidrogeológica III de Tenerife (acuífero de Icod-Cañadas) no aporta beneficios respecto a los métodos espaciales como el kriging, incluso teniendo en cuenta las especiales características climáticas de la zona en la modelización de la relación precipitación-altitud.

### Agradecimientos

Deseamos agradecer al Instituto Nacional de Meteorología y al Parque Nacional del Teide – Tragsa SA los datos de las estaciones meteorológicas; al Consejo Insular de Aguas de Tenerife (y en especial a Isabel Farrujia) por los mapas y datos hidrogeológicos; y a Francisco Carreño y Raquel Herrera (URJC) por su ayuda en el tratamiento de los datos y sus comentarios sobre el trabajo. Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los proyectos REN2002-11953-E del MEC y PPR 2003-44 de la URJC.

### Referencias

- Aubert, M. y Kieffer, G. (1998) *Comptes Rendus de L'Academie des Sciences*, Serie IIA, 326, 87-92.
- Farrujia, I., Braojos, J.J. y Fernández Bethencourt, J. (2001) En: *VII Simposio de Hidrogeología*, 661-671.
- Goovaerts, P. (2000) *Journal of Hydrology*, 228, 113-129
- Lloyd, C.D. (2005) *Journal of Hydrology*, 308, 128-150
- Marquínez, J., Lastra, J. y García, P. (2003) *Journal of Hydrology*, 270, 1-11
- Martí, J. (2004) *Geotemas*, 6, 155-158
- Plan Hidrológico Insular de Tenerife. (1996). Decreto 319/1996, 23 Diciembre, BOC.