

04-010

SPATIAL VALIDATION OF TEMPERATURE DATA FROM THE AGROCLIMATIC INFORMATION NETWORK OF ANDALUSIA

Estévez Gualda, Javier ¹; Gavilán Zafra, Pedro ²; García-Marín, Amanda P. ¹;
Herrera Grimaldi, Pascual ¹

¹ Universidad de Córdoba, ² IFAPA Córdoba

Spatial validation of meteorological data is based on the application of quality control procedures using data from neighboring stations to assess the validity of data from candidate station (the station of interest). These kinds of tests are called in literature as spatial consistency tests. Spatial consistency tests compare a station's data against the data from a reference series, generated from neighboring stations. They involve the use of neighboring stations to make an estimate of the measurement at the candidate station. This estimate can be formed by weighting according to distance separating the stations, correlation coefficient, etc. The test applied in this work -based on statistical decisions- use a weight according to the root mean square error. The results of the application of this test to maximum, minimum and mean temperature data from the Agroclimatic Information Network of Andalusia are summarized in this work. This quality control procedure is able to take decision, based on a factor f , the fraction of potential outliers for each station. Using GIS techniques, the geographic distribution of the errors detected is also analyzed.

Keywords: *validation; temperature; spatial regression test ; quality assurance*

VALIDACIÓN ESPACIAL DE DATOS DE TEMPERATURA EN LA RED DE INFORMACIÓN AGROCLIMÁTICA DE ANDALUCÍA

La validación espacial de datos meteorológicos consiste en la aplicación de procedimientos de control de calidad empleando datos de estaciones vecinas para asegurar la fiabilidad de los datos que se generan en la estación candidata (cuyos datos se pretenden validar). Este tipo de métodos de validación se conocen como tests de coherencia o consistencia espacial. Se trata de comparar los valores de la estación candidata con una serie de referencia, construida a partir de las estaciones cercanas. Existen varias formas de ponderar los valores o registros de cada estación vecina: en función de su distancia, de su coeficiente de correlación, etc. La ponderación basada en el error cuadrático medio es la que utiliza el test empleado en el presente trabajo, un test que está basado en decisiones estadísticas. Se muestran los resultados obtenidos tras su aplicación a todas las estaciones de la Red de Información Agroclimática de Andalucía. Las variables que han sido analizadas son: temperatura máxima, mínima y media. Este mecanismo nos permite decidir, en función de un factor, el porcentaje de potenciales 'outliers' para cada una de las estaciones. Mediante la integración de este test con herramientas SIG se han analizado la distribución espacial de los errores detectados.

Palabras clave: *validación; temperatura; test coherencia espacial; control de calidad*

Correspondencia: Javier Estévez Gualda jestevez@uco.es

1. Introducción

Actualmente se requieren datos climáticos de calidad para la mejora de la fiabilidad en las estimaciones y resultados de múltiples aplicaciones y modelos que se nutren de ellos (Shafer et al., 2000; Feng et al., 2004; Graybeal, 2006; Estévez et al., 2012). La validación de los datos meteorológicos asegura que la información se genera correctamente y permite identificar valores incorrectos y detectar problemas que requieran atención inmediata (Estévez et al., 2011b).

Una de las categorías dentro de los procesos de validación de datos meteorológicos son las técnicas o procedimientos de control de calidad que utilizan los registros de estaciones vecinas para compararlos con los datos de la estación que se pretende validar (candidata). Este tipo de métodos de validación se conocen como tests de coherencia espacial. En este sentido, recientemente se han desarrollado procedimientos de control de calidad para la validación de datos meteorológicos que utilizan múltiples estaciones. Los tests de coherencia espacial comparan los registros de la estación que se pretende validar (candidata) con los datos de estaciones vecinas (Wade, 1987; Gandin, 1988; Reek et al., 1992; Eischeid et al., 1995; Hubbard, 2001). Este tipo de procedimientos utilizan las estaciones cercanas para hacer una estimación de los datos que se registrarían en la estación candidata. Una técnica utilizada habitualmente es la técnica del inverso de la distancia, la cual pondera los valores de las estaciones cercanas en función del inverso de la distancia que separa la estación candidata de la estación vecina (Guttman and Quayler, 1990; Wade, 1987), con la desventaja de asignar –independientemente del tipo de variable y otras circunstancias- más peso a las más cercanas, obteniendo resultados no siempre satisfactorios (Hubbard y You, 2005). Sin embargo, el test de regresión espacial (Hubbard et al., 2005) que se ha usado en el presente trabajo para datos de temperatura no asigna el peso mayor a la estación vecina más cercana, sino que pondera los registros en función del error estándar de la estimación entre la estación candidata y cada una de las estaciones vecinas preseleccionadas. Es un procedimiento de validación complejo y está basado en decisiones estadísticas.

Este tipo de procedimientos tienen la ventaja de ser tests que se adecúan a las necesidades y características de cada red de estaciones meteorológicas y que tiene la capacidad de aumentar su eficacia a medida que las series temporales son mayores, ya que utiliza agregados estadísticos que dependen del número de registros. Tests basados en decisiones estadísticas como el de rango, salto o persistencia se han aplicado en Andalucía satisfactoriamente (Estévez et al., 2011a).

Básicamente se trata de aplicar un conjunto de algoritmos o reglas a cada registro, donde el procedimiento de validación aceptará el dato etiquetándolo como verdadero o rechazará el dato marcándolo como un valor anómalo, “outlier” o dato sospechoso. Esta hipótesis (H_0) de verificar cada registro y la decisión estadística de aceptarlo o marcarlo como potencialmente erróneo puede generar dos tipos de errores, tal y como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de errores

| Decisión Estadística | Situación verdadera | |
|----------------------|---------------------|------------------|
| | H_0 verdadera | H_0 falsa |
| Aceptar H_0 | <i>Sin Error</i> | Error Tipo II |
| Rechazar H_0 | Error Tipo I | <i>Sin Error</i> |

Así pues, si el dato es válido y el test lo acepta o si el dato no es válido y el test lo rechaza, se puede afirmar que el test de validación está funcionando correctamente. Cuando un dato válido es rechazado por el test se produce un error Tipo I, y si el dato no es válido y el test lo acepta, se producirá un error Tipo II.

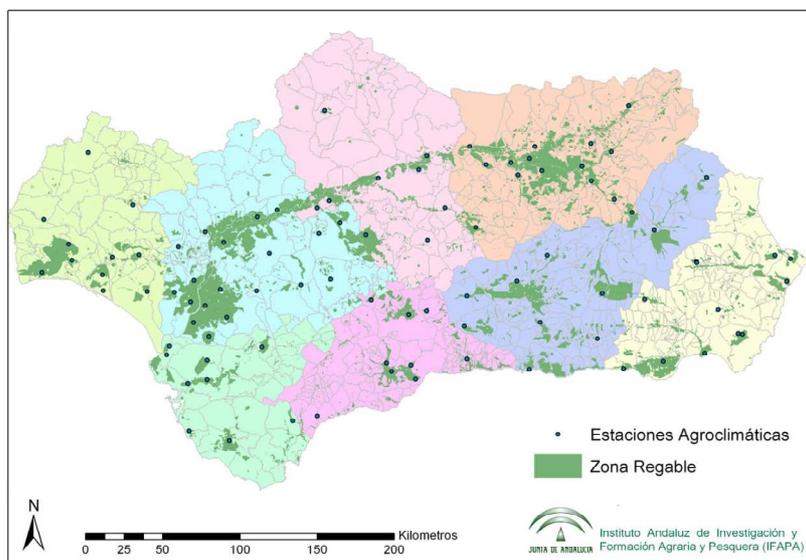
Supongamos la hipótesis de que el valor de una variable en concreto es válido sólo si está entre los límites ± 3 desviaciones típicas (σ) de la media (μ). Asumiendo una distribución normal, la hipótesis H_0 será aceptada en el 99,73% de los casos sin error. Los registros que se salgan de este intervalo definido como $\mu \pm 3 \sigma$ serán rechazados generando errores Tipo I si hubiera registros válidos fuera de ese rango. En estos casos (H_0 es rechazada cuando los datos son válidos) se generarían errores Tipo I en un 0,27% de los casos, asumiendo que el conjunto de datos no tuviera valores erróneos. Si un registro “verdadero” se reemplazara por un valor “erróneo”, la hipótesis será rechazada correctamente sólo si el valor “erróneo” está fuera del rango $\mu \pm 3 \sigma$. Por el contrario, si la hipótesis fuera aceptada cuando el registro es “erróneo” se generaría un error Tipo II. De esta forma se puede comprobar cómo reduciendo los límites frente a los que se verifica cada uno de los datos, se producirán más errores Tipo I y menos errores Tipo II, mientras que ampliando el intervalo disminuimos los errores Tipo I y aumentamos los errores Tipo II. Para un correcto diseño de los procedimientos de validación basados en decisiones estadísticas es necesario conseguir un equilibrio donde se puedan reducir los errores Tipo II al mismo tiempo que no se incrementen los errores Tipo I. Es importante recalcar que debido a que los errores Tipo I no pueden ser evitados por completo, todos los administradores de sistemas de almacenamiento de datos meteorológicos deben guardar los registros originales independientemente de los resultados generados por los procedimientos de validación que se hayan aplicado.

2. Materiales y Métodos

2.1. Fuente de datos

El presente trabajo ha utilizado datos diarios de temperatura máxima, mínima y media procedentes de la Red de Información Agroclimática de Andalucía (Figura 1). El set de datos fue de 2000 a 2006 para un total de 86 estaciones. Las coordenadas de las mismas puede verse en Estévez et al. (2011a).

Figura 1: Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIAA): estaciones, provincias y zona regable



2.2. Test de coherencia espacial

El test de coherencia espacial se ha desarrollado utilizando una adaptación del test de regresión espacial utilizado por diversos autores con excelentes resultados en comparación con otros métodos (Hubbard et al., 2005; Hubbard y You, 2005). En este procedimiento se comprueba que los datos de la variable en cuestión se encuentren en el intervalo de confianza formado por los datos de una serie de referencia creada a partir de las estaciones vecinas. Se selecciona un número de estaciones (M) dentro de un radio de distancia predefinido a la estación candidata. Este radio fue de 50 km para la mayoría de los casos y de 80 km para aquellas estaciones rodeadas de un menor número de estaciones cercanas, de forma que M tomase un valor mínimo de 10 estaciones. Se realiza una regresión lineal de cada estación vecina con la estación candidata, para toda la serie de datos (Ecuación 1).

$$x_i = a_i + b_i y_i \quad (1)$$

donde a_i y b_i son los coeficientes de cada regresión lineal, y_i son los registros diarios de cada estación vecina y x_i son los valores preliminares estimados de la estación meteorológica candidata. Para cada regresión lineal se calcula el error estándar de la estimación (s_i), el coeficiente de determinación (R^2) y el resto de parámetros de la regresión. El índice i representa cada una de estas regresiones.

Los valores ponderados de la estimación de la serie de referencia (x') se obtienen utilizando el error estándar de la estimación, también conocido como la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) (Ecuación 2):

$$x' = \pm \left(\sum_{i=1}^N \pm x_i^2 s_i^{-2} \right)^{0,5} \left(\sum_{i=1}^N s_i^{-2} \right)^{-0,5} \quad (2)$$

donde N es el número de estaciones utilizadas en la estimación de la serie de referencia (generalmente el criterio para su elección es que tengan un R^2 superior a 0,5, que estén obviamente dentro del radio de distancia predefinido, y que la longitud de la serie sea consistente, en este trabajo no se han tenido en cuenta series inferiores a 3 años). Siguiendo las indicaciones de Hubbard et al. (2005) N se ha fijado en 5. Téngase en cuenta que siempre $N < M$. De manera que se han escogido las cinco estaciones cercanas cuyo error estándar de la estimación es menor.

El error estándar de la estimación ponderado (s') se calcula de la siguiente forma (Ecuación 3):

$$\frac{1}{s'^2} = N^{-1} \sum_{i=1}^N s_i^{-2} \quad (3)$$

A continuación, se establecen los intervalos de confianza para la aplicación del test a partir de s' , donde se comprueba si el valor registrado en la estación candidata (x) está dentro de estos límites (Ecuación 4):

$$x' - fs' \leq x \leq x' + fs' \quad (4)$$

donde x' es el valor de la serie de referencia, f es un factor que toma diferentes valores y x es el dato de la variable que se está validando. Si cada registro cumple esta condición, el dato en cuestión pasa satisfactoriamente este test de coherencia espacial. Por el contrario, si es rechazado, pasará a ser un potencial 'outlier' y tendrá que ser verificado en la fase de inspección manual. En función de los diferentes valores que se le asignen al factor f , obtendremos un porcentaje determinado de potenciales 'outliers'. A medida que el factor f es mayor los potenciales errores detectados decrecen.

Debido a que los registros meteorológicos utilizados en este trabajo provienen todos de estaciones meteorológicas automáticas y se han integrado en una base de datos, se han podido realizar las comprobaciones previas para que las regresiones lineales sean consistentes. Es decir, cada pareja de datos utilizada en el modelo de regresión lineal corresponde a una misma fecha, y es idéntica para los dos registros (estación candidata y estación vecina). Es muy frecuente que al trabajar con series temporales que poseen gran cantidad de datos, existan lagunas o días puntuales en los que no existan registros.

Empleando esta metodología es posible preseleccionar el porcentaje de errores que el test puede detectar (Tipo I). De esta forma se puede seleccionar diferentes valores del factor f para estaciones en diferentes condiciones climáticas y mantener el porcentaje de potenciales errores uniforme en toda la Red.

2.3. Arquitectura del sistema y tecnologías empleadas

El sistema se ha desarrollado con el objetivo de posibilitar la aplicación del test para el control de calidad de forma remota. De esta manera, el administrador del sistema o la persona encargada de la validación puede ejecutar los procedimientos de control de calidad en cualquier equipo informático con conexión a Internet y no necesariamente en el mismo puesto donde estén almacenados los datos meteorológicos, lo que se denomina en el argot informático un sistema cliente/servidor. La autenticación previa mediante un nombre de usuario y una clave, dotará al administrador de los permisos necesarios para ejecutar el test de validación.

Con la finalidad de desarrollar un sistema que sea exportable a otras redes de estaciones meteorológicas automáticas se ha diseñado una arquitectura multiplataforma con la capacidad de ser totalmente funcional bajo la mayoría de sistemas operativos: Linux, Unix (Mac OS X, Solaris, AIX, Tru64, etc.) y Windows.

El sistema se ha diseñado en PostgreSQL (Postgres, 2014) que es un motor de base de datos objeto relación al basado en POSTGRES versión 4.2, inicialmente puesto en marcha en la Universidad de California, en el departamento de cálculo científico de Berkeley (Stonebraker y Kemnitz, 1991). Su licencia BSD (Berkeley Software Distribution) se engloba dentro de las licencias de software libre. PostgreSQL es un proyecto de código abierto donde es posible visualizar el código fuente y modificarlo libremente para las necesidades del sistema que se pretende desarrollar, como es el caso. PostgreSQL soporta el standard SQL (Structure Query Language) y sobre él se han desarrollado herramientas de alto rendimiento para la aplicación de los procedimientos de validación: consultas complejas, llaves foráneas, triggers o disparadores, vistas, programación de funciones, empleo de lenguajes procedurales, etc. Está considerado como la base de datos de código abierto más avanzada del mundo y proporciona características que habitualmente sólo se encontraban en las bases de datos comerciales como Oracle (Worsley y Drake, 2001, cap.1).

Para dotar a este sistema de control de calidad de las herramientas de los sistemas de información geográfica, se ha implementado la extensión espacial PostGIS (PostGIS, 2014), la cual añade soporte de objetos geográficos a los datos meteorológicos almacenados bajo PostgreSQL. Se publica bajo licencia GNU GPL (Licencia Pública General) que es una licencia de software libre gracias a la cual se han desarrollado diferentes funciones adaptadas a las necesidades del sistema por ser de código abierto. PostGIS fue certificada en 2006 por el Open Geospatial Consortium (OGC) lo que garantiza la interoperabilidad con otros sistemas y posibilita la exportación del sistema a otras redes de estaciones meteorológicas automáticas.

El test de coherencia espacial se ha desarrollado en el lenguaje procedural PL/pgSQL, lo que permite aumentar la potencialidad y flexibilidad de los procedimientos de validación. Esto es posible gracias al intérprete estructurado de secuencia de pasos que permite

modificar fácilmente cada uno de los algoritmos y funciones que son utilizados en el test. Estas funciones, las secuencias de código y el resto de algoritmos de programación se han documentado para futuras mejoras y adaptaciones a otras plataformas o sistemas. Determinados cálculos auxiliares en algunos procedimientos de validación se han desarrollado en el lenguaje de programación propio de MATLAB 2013, que es una aplicación orientada al análisis numérico y el tratamiento de datos. Esto es posible gracias a la flexibilidad e interoperabilidad de las tecnologías que conforman los pilares de la arquitectura del sistema de control de calidad desarrollado: PostgreSQL, PostGIS y PlpgSQL.

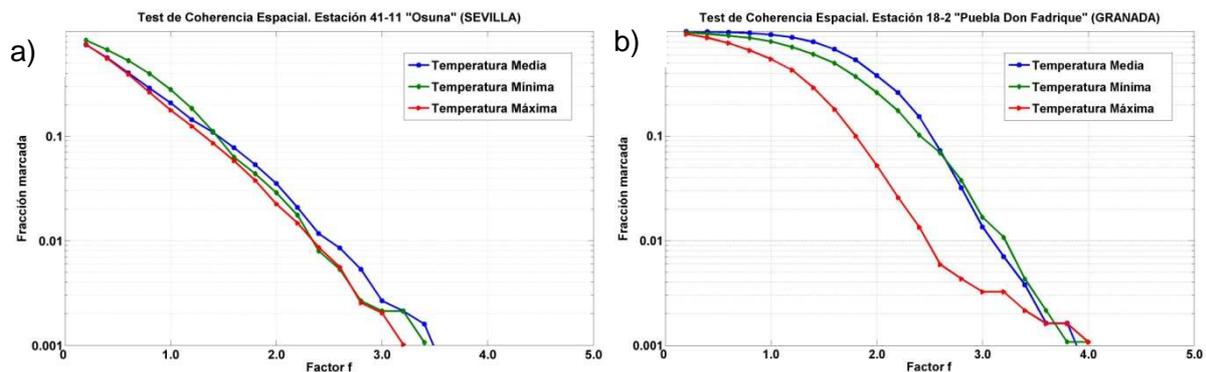
3. Resultados

A continuación se exponen los resultados obtenidos para los diferentes tipos de errores tras la aplicación del test.

3.1. Error Tipo I

Resulta de gran importancia el análisis de los errores Tipo I derivados de la aplicación del test diseñado en función de los diferentes valores del factor f . La forma general de las relaciones entre f y la fracción de potenciales errores se presenta en la Figura 2, en este caso se han tomado dos estaciones a modo de ejemplo.

Figura 2: Fracción de datos detectados por el test de coherencia espacial en función de los diferentes valores del factor f .



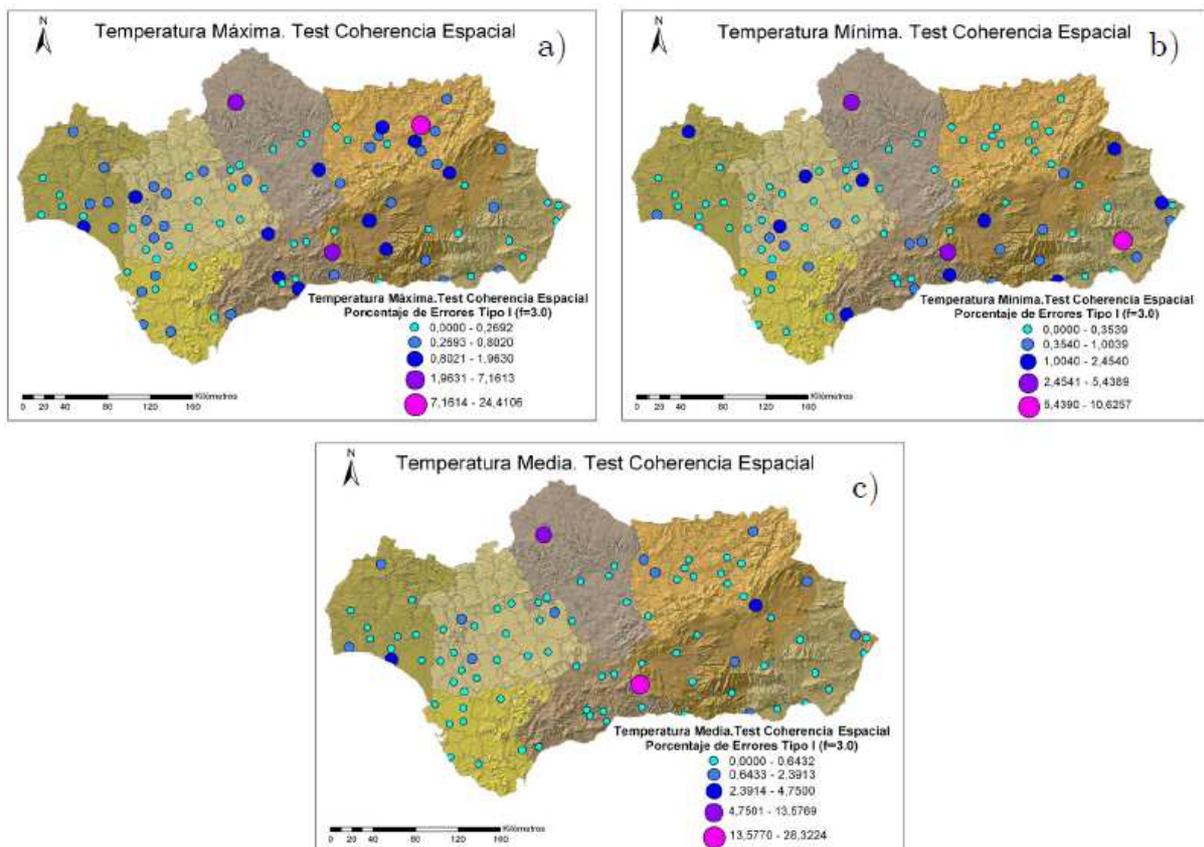
La cantidad de potenciales errores Tipo I (expresados en tanto por uno) se muestra en escala logarítmica en el eje de ordenadas, en función de los valores de f en el eje de abscisas.

Los resultados del test de coherencia espacial presentados en la Figura 2a, correspondiente a la estación de Osuna (Sevilla), muestran un comportamiento muy distinto a los obtenidos en la estación de Puebla de Don Fadrique (Granada), representados en la Figura 2b. En la primera estación, con un factor de f entre 2,3 y 2,5 para las tres variables analizadas el test detectaría un 1% de registros potencialmente erróneos. Sin embargo, en el segundo caso, f tendría que tomar valores por encima de 3 para detectar ese mismo porcentaje de potenciales errores en Temperatura Media y Mínima. Se puede observar también como la relación obtenida para Temperatura Máxima resulta distinta a la estación de Osuna, especialmente para valores de f muy restrictivos. Los resultados obtenidos muestran como la serie de referencia creada para la estación de Osuna (Sevilla) tiene un comportamiento bastante parecido a la serie candidata, debido a la cercanía de varias estaciones bajo condiciones climáticas similares en el Bajo Guadalquivir. El caso contrario ocurre para la estación de Puebla de Don Fadrique (Granada), fundamentalmente por ser una estación aislada, la única situada al noreste de la provincia de Granada.

Un ejemplo del porcentaje de errores Tipo I que son detectados por el test de coherencia espacial en todas las estaciones para un factor f de 3,0 se muestra en la Figura 3. Se puede apreciar cómo se distribuye geográficamente el porcentaje de potenciales errores para este test aplicado a las distintas variables y para un valor fijo del factor f .

Debido a la numerosa existencia de valores nulos y la escasa continuidad en los porcentajes obtenidos, se ha optado por representar los resultados de cada una de las estaciones en su propia localización, diferenciando su magnitud por tamaños y colores.

Figura 3: Porcentaje de potenciales errores Tipo I con $f = 3,0$ para el Test de Coherencia Espacial aplicado a temperatura máxima (a), mínima (b) y media (c).



En la Figura 3a se puede apreciar cómo se distribuyen los valores más bajos (inferiores al 0,26%) en la mayoría de las provincias de Andalucía, en color azul claro. Dentro de esta categoría, las estaciones que han registrado valores nulos han sido las de Málaga (Málaga), Tojalillo-Gibralfón y Moguer-El Cebollar (Huelva) y Fiñana (Almería). En general, porcentajes entre el 0,26% y el 1,96% se han dado también en todas las provincias, incluyendo varias estaciones cercanas a la costa. Existen dos casos aislados, con un mayor porcentaje de potenciales errores (color morado) en las estaciones de Belmez (Córdoba) y Zafarraya (Granada), con un 5,87% y 7,16% respectivamente. Por último, resaltar que el valor máximo de este porcentaje de errores en temperatura máxima se ha registrado en la estación de Sabiote (Jaén) con un 24,41%. La estación de Belmez, en el norte de la provincia de Córdoba, es una estación aislada que no tiene estaciones cercanas que mantengan un régimen térmico similar, por tanto, la serie de referencia creada para la aplicación del test resulta menos representativa que en otros casos. De igual modo, los

valores tan elevados registrados en Sabiote (Jaén) y Zafarraya (Granada) ponen de manifiesto que las condiciones climáticas locales son determinantes a la hora de generar una serie de referencia a partir de estaciones vecinas que nos permita discriminar valores anómalos en nuestra estación candidata. Se puede afirmar por tanto, que las estaciones vecinas a estas dos no se comportan de forma similar en cuanto a la temperatura máxima se refiere.

En la Figura 3b se puede observar algo más de continuidad en el porcentaje de errores detectados en los datos de temperatura mínima para todo el territorio de Andalucía. Valores por debajo del 0,35% han sido registrados en más de 50 estaciones, obteniéndose valores nulos en Sierra de Yeguas (Málaga) y Conil de la Frontera (Cádiz). De forma análoga a los resultados presentados en la Figura 3a, en las estaciones de Belmez (Córdoba) y Zafarraya (Granada) se han obtenido también valores elevados entre el 2,45-5,43%, lo cual indica una gran diferencia climática con las estaciones que las rodean, en relación a la temperatura mínima. Por último, el valor más elevado se ha registrado en la estación de Tabernas (Almería) con un 10,62% de errores detectados. En relación a la temperatura media (Figura 3c) se ha observado la mayor homogeneidad de los resultados, como consecuencia de ser una variable con más continuidad en toda la región. Más de 70 estaciones han registrado un porcentaje de errores por debajo del 0,64%, repartidas prácticamente en todas las provincias. De nuevo las estaciones de Belmez (Córdoba) y Zafarraya (Granada) muestran los valores más elevados, iguales a 13,57% y 28,32%, respectivamente.

3.2. Error Tipo II

En este apartado se pretende determinar la cantidad de errores conocidos que no pueden ser detectados por el procedimiento de validación diseñado, en función de la magnitud del propio error. Para ello se ha programado un sistema que introduce errores de forma controlada en la base de datos diaria, de forma que los valores que sean alterados puedan ser identificados de una forma inequívoca. Mediante un proceso aleatorio se seleccionaron un 10% de los registros de la base de datos diaria para ser alterados con un determinado error. La magnitud del error introducido se ha determinado de una forma aleatoria. Mediante la generación de un número aleatorio, r , insertado para cada registro, y que se distribuye según una distribución uniforme de media 0 y un rango de +/- 3,5. Multiplicando este valor r por la desviación típica de la variable meteorológica en cuestión, se obtiene la magnitud del error, de acuerdo con la Ecuación 5.

$$E_{iT} = \sigma_T r_i \quad (5)$$

Donde E_{iT} es la magnitud del error introducido en el valor de T original (temperatura máxima, mínima o media), σ_T es la desviación típica de la variable T para el mes en cuestión y r_i es el valor del número aleatorio generado para cada fecha o registro i . La distribución de la magnitud del error tendrá una media igual a 0 y un rango de 3,5 veces la desviación típica observada de la variable T para cada mes en cuestión. La elección de 3,5 asegura que el test incluye los casos más cercanos a los extremos de las series temporales analizadas.

Finalmente, los registros son modificados sumando este error controlado al valor original de la variable T en la base de datos, según la Ecuación 6.

$$T^* = T + E_{iT} \quad (6)$$

Donde T^* es el valor de temperatura "erróneo" (máxima, mínima o media) al que posteriormente se le aplicará el test de validación. De esta forma el valor original de T se verá modificado aumentando o disminuyendo según el signo de r_i , ya que esta nueva variable toma valores en el rango +/- 3,5.

Los resultados de la aplicación del test al conjunto de datos “alterado” con estos errores, se muestran en términos de porcentaje de errores que ha sido correctamente identificado, en función de la magnitud del error introducido. El porcentaje de errores reales no identificados (Tipo II) resultaría de restar 100 al porcentaje de errores correctamente detectados. En la Tabla 2 se muestran los resultados de este análisis para la estación de Córdoba situada en el valle del Guadalquivir, para la variable temperatura máxima.

Tabla 2: Porcentaje de errores introducidos en los registros de temperatura máxima diaria en la estación de Córdoba que ha sido detectado por el test, en función de la magnitud del error

| Magnitud relativa del error (r) | Test Coherencia Espacial |
|---------------------------------|--------------------------|
| $r \leq -3,0$ | 100,00 |
| $-3,0 < r \leq -2,5$ | 92,31 |
| $-2,5 < r \leq -2,0$ | 100,00 |
| $-2,0 < r \leq -1,5$ | 91,86 |
| $-1,5 < r \leq -1,0$ | 84,44 |
| $-1,0 < r \leq -0,5$ | 38,46 |
| $-0,5 < r \leq 0,0$ | 0,00 |
| $0,0 < r \leq 0,5$ | 13,33 |
| $0,5 < r \leq 1,0$ | 62,50 |
| $1,0 < r \leq 1,5$ | 100,00 |
| $1,5 < r \leq 2,0$ | 92,31 |
| $2,0 < r \leq 2,5$ | 100,00 |
| $2,5 < r \leq 3,0$ | 94,12 |
| $r > 3,0$ | 94,12 |
| Total | 75,68 |

Se puede apreciar en esta tabla que el test no ha sido capaz de identificar errores entre $-0,5 < r < 0,0$; sin embargo, ha resultado más eficaz conforme la magnitud del error fue aumentando, detectando finalmente una gran cantidad de errores (75,68%).

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para la estación de Cádiar (Granada), donde se puede apreciar un comportamiento parecido al anterior. El test no consiguió identificar ningún error en el rango $-0,5 < r < 1,0$ al igual que en la estación de Córdoba. De igual manera, el test mostró una eficacia superior a medida que la magnitud del error fue aumentando.

Tabla 3: Porcentaje de errores introducidos en los registros de temperatura máxima en la estación de Cádiar (Granada) que ha sido identificado por el test de Coherencia Espacial, en función de la magnitud del error.

| Magnitud relativa del error (r) | Test Coherencia Espacial |
|---------------------------------|--------------------------|
|---------------------------------|--------------------------|

| | |
|----------------------|--------|
| $r \leq -3,0$ | 92,86 |
| $-3,0 < r \leq -2,5$ | 88,24 |
| $-2,5 < r \leq -2,0$ | 100,00 |
| $-2,0 < r \leq -1,5$ | 85,71 |
| $-1,5 < r \leq -1,0$ | 61,54 |
| $-1,0 < r \leq -0,5$ | 5,56 |
| $-0,5 < r \leq 0,0$ | 0,00 |
| $0,0 < r \leq 0,5$ | 0,00 |
| $0,5 < r \leq 1,0$ | 0,00 |
| $1,0 < r \leq 1,5$ | 33,33 |
| $1,5 < r \leq 2,0$ | 43,75 |
| $2,0 < r \leq 2,5$ | 61,54 |
| $2,5 < r \leq 3,0$ | 81,82 |
| $r > 3,0$ | 81,25 |
| TOTAL | 53,23 |

En términos generales, el resto de estaciones tuvieron resultados similares en relación a la eficacia del test aplicado. Por otro lado, en aquellas estaciones rodeadas de un menor número de estaciones con un régimen térmico similar, como el caso de Cádiar (Granada), el test mostró una eficacia menor. Por el contrario, en estaciones situadas en zonas climatológicamente más homogéneas (p.ej. el valle del Guadalquivir), rodeadas de varias estaciones con un comportamiento térmico parecido, se obtuvieron mejores resultados en la aplicación del test de coherencia espacial. Los resultados obtenidos por Hubbard et al. (2005) fueron muy similares.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos tras la aplicación de este test de coherencia espacial a todas las estaciones de la Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIAA) muestran una alta variabilidad en la detección de 'outliers' para los diferentes valores del factor f .

El estudio de los errores Tipo I y Tipo II resultó esencial para evaluar el desarrollo y la capacidad del procedimiento de validación (en este caso el test de coherencia espacial) aplicado a los registros de temperatura máxima, mínima y media. En este sentido, se ha realizado un análisis del comportamiento de cada una de las estaciones meteorológicas de la RIAA en relación a este test, descrito en el apartado 2.2.

Los resultados muestran un comportamiento similar en cuanto a errores Tipo I en estaciones con diferente clima, aunque existen algunas diferencias dependiendo de la variable analizada. En términos generales, el uso de un factor $f = 3,0$ garantiza un número de errores Tipo I por debajo del 2%, si bien lo más adecuado para una región tan extensa y heterogénea como Andalucía sería prefijar un porcentaje de errores Tipo I tolerable para nuestras aplicaciones, y definir un valor f específico para cada estación meteorológica.

En relación a los errores Tipo II, y a la vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que los errores introducidos de forma controlada cercanos a cero no fueron detectados, y además a medida que la magnitud del error aumentó, también lo hizo la eficacia del procedimiento de validación. Para errores de gran magnitud (comparable al uso de un valor

de f mayor que 2,0), el test de coherencia espacial fue capaz de identificar entre el 90-100% de los errores introducidos para las tres variables analizadas, en todas las estaciones meteorológicas.

La integración de este procedimiento de control de calidad espacial con herramientas SIG hacen posible la generación de mapas como el de la Figura 3 donde se puede analizar visualmente tendencias o relaciones geográficas que pueden resultar de gran interés para el conocimiento de una Red meteorológica y del comportamiento de cada uno de las variable analizadas.

5. Bibliografía

- Eisched, J.K., C.B. Baker, T. Karl, and H. F. Diaz, (1995). The quality control of long-term climatological data using objective data analysis. *J. Appl. Meteor.*, 34, 2787-2795.
- Estévez, J., Gavilan. P., Garcia-Marin, A.P. (2011a). Data validation procedures in agricultural meteorology. A prerequisite for their use. *Advances in Science and Research*, 6, 141-146.
- Estévez, J., Gavilan, P., Giraldez, J.V. (2011b). Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. *Journal of Hydrology*, 402, 144-154.
- Estévez, J., Padilla, F., Gavilán, P. (2012). Evaluation and Regional Calibration of Solar Radiation Prediction Models in Southern Spain. *J. Irrig. and Drainage Eng.*, 138(10), 868-879.
- Feng, S., Hu, Q., Qian, Q. (2004). Quality control of daily meteorological data in China, 1951-2000: a new dataset. *Int. J. Climatol.*, 24, 853-870.
- Gandin, L. S. (1988). Complex quality control of meteorological observations. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 1137-1156.
- Graybeal, D. Y. (2006). Relationships among daily mean and maximum wind speeds with application to data quality assurance. *Int. J. Climatol.*, 26, 29-43.
- Guttman, N. B., and Quayler, R.G. (1990). A review of cooperative temperature data validation. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 7, 334-339.
- Hubbard, K. G. (2001). Multiple station quality control procedures. Automated Weather Stations for Applications in Agriculture and Water Resources Management, K. G. Hubbard and M. V. K. Sivakumar, Eds., *Tech.Doc.AGM-3 WMO/TD 1074, High Plains Regional Climate Center, Lincoln, NE*, 248 pp.
- Hubbard, K. G., Goddard, S., Sorensen, W. D., Wells, N., Osugi, T.T. (2005). Performance of quality assurance procedures for an applied climate information system. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22, 105-112.
- Hubbard, K. G., You, J. (2005). Sensitivity analysis of quality assurance using the spatial regression approach. A case study of the maximum/minimum air temperature. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22, 1520-1530.
- Infraestructura de Datos Espaciales de Andalucía, (2014). <http://www.andaluciajunta.es/IDEAndalucia/IDEA.shtml> (Acceso en diciembre 2014)
- PostGIS. (2014). <http://postgis.refractory.net> (Acceso en diciembre 2014)
- PostgreSQL. (2014). <http://www.postgresql.org> (Acceso en diciembre 2014)
- Reek, T., Doty, S. R., Owen, T.W. (1992). A deterministic approach to the validation of historical daily temperature and precipitation data from the Cooperative Network. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, 753-765.

- Shafer, M. A., Fiebrich, C. A., Arndt, D. S., Fredrickson, S. E., and Hughes, T. W. (2000). Quality assurance procedures in the Oklahoma Mesonet, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17, 474–494.
- Stonebraker, M. and Kemnitz, G. (1991). The Postgres next-generation database-management system, *Communicat. ACM.*, 34, 78–92.
- Wade, C. G. (1987). A quality control program for surface meso-meteorological data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 4, 435-453.
- Worsley, J., Drake, J. (2001). Practical PostgreSQL. *O'Reilly & Associates*, California.