

MODELOS ESTOCÁSTICOS DE PLUVIOMETRÍA Y TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES EN ESPAÑA

Ayuga Téllez, E.; González García, C.; Robredo Sánchez, J.C.; Martín Fernández, A.J. y Grande Ortiz, M.A.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. 28047- Madrid.

Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio de la pluviometría y la temperatura en diferentes ciudades españolas. Se agrupan diversas ciudades en tres conglomerados, atendiendo a las variables consideradas. Se selecciona una ciudad representativa de cada grupo. Las tres ciudades seleccionadas son Huelva, Madrid y Barcelona con más de 100 años de medidas mensuales cada una. En las series se analiza la tendencia para detectar posibles cambios significativos en la evolución de los valores climáticos. A continuación se aplica la metodología Box-Jenkins para la obtención de modelos estocásticos con dos objetivos: el primero tener una representación de la variación de la pluviometría y de la temperatura y el segundo, obtener previsiones a medio plazo.

Palabras clave: Cambio climático, tendencia, series temporales, predicción.

INTRODUCCIÓN

La Geología y la Climatología son ciencias que deben tener en cuenta los largos ciclos en los que se desenvuelven los cambios que afectan globalmente al Planeta. El análisis del clima y de su evolución requieren, por tanto, observaciones prolongadas en el tiempo. Actualmente, a pesar de la gran necesidad de tener información climática de calidad, no resulta fácil encontrarla. Las estaciones de medida de éstas variables, por motivos económicos o sociales, están incompletas y se centran en lugares próximos a núcleos urbanos. En España, la mayoría de las medidas de temperaturas y pluviometría comienzan a mediados del siglo XIX. No es fácil encontrar modelos **fiab**les que permitan predecir comportamientos futuros con apenas 160 años de medidas incompletas.

No obstante, la importancia de predecir el comportamiento climático futuro, debido a su influencia sobre los Bosques y el resto de los recursos Naturales ha aumentado el número de trabajos relacionados con los modelos de predicción en los últimos tiempos. Se han empleado modelos de predicción estadística temporales como los modelos ARIMA (AYUGA & GONZÁLEZ 2003), cadenas de Markov (GÓMEZ, 2003; LANA et al., 2004) y alisado de series (MOBERG et al. 2000; MARTÍN VIDE, 2004; SINGHRATTNA et al., 2005) y también espacio-temporales como el de análisis espectral (RODRÍGUEZ, 2003) y el de circulación general GCM, (acrónimo en inglés de Global Climate Model) que se basa en la incorporación de las leyes de conservación de la energía, masa, agua y de los impulsos y requiere variaciones de minutos y superficies de 100 m² que se intenta extrapolar a algunos siglos y al conjunto de la superficie del planeta. (BELL et al., 2003)

MATERIALES Y MÉTODOS.

Se han utilizado para este estudio los datos de precipitaciones y temperaturas medias de los últimos treinta años para las capitales de provincia españolas y las ciudades de Ceuta y Melilla (datos del INM que aparecen en su página web).

También se contó con series de datos (proporcionados por el INM) de las ciudades de Barcelona, Huelva y Madrid. En la mayoría de los casos las series se encontraban incompletas, los valores ausentes se estimaron empleando los valores tomados en otras estaciones próximas y en los

mismos periodos de tiempo (GONZÁLEZ HIDALGO et al., 2002).

En Barcelona se obtuvo una serie de **temperaturas** desde enero de 1869 a septiembre del 2004 empleando datos de la estación 201E, 200E y 69. La serie de **precipitaciones** desde enero de 1850 a septiembre de 2004 se obtuvo con las estaciones 201E, 69 y 200E.

En Huelva se obtuvo una serie de **temperaturas** desde enero de 1903 a diciembre del 2003 empleando datos de la estación 4605. Igualmente la serie de **precipitaciones** desde enero de 1903 a diciembre del 2003 se obtuvo con la estación 4605.

En Madrid se obtuvo una serie de **temperaturas** desde marzo de 1893 a septiembre del 2004 empleando datos de la estación 3195. La serie de **precipitaciones** desde enero de 1905 a septiembre de 2004 se obtuvo con la estación 3195.

Se midió la tendencia de la serie mediante un modelo temporal. Como las series disponibles son de datos tomados a intervalos regulares de tiempo, son susceptibles de ser tratadas mediante técnicas de series temporales: modelos ARIMA de BOX-JENKINS (1976) dada su longitud. Los análisis y las salidas gráficas se realizaron con el programa de ordenador STATGRAPHICS Plus 5.1.

RESULTADOS

Agrupación de series del territorio Español.

Un primer paso es la agrupación de las capitales de provincia españolas basándose en los datos medios de los últimos treinta años.

Empleando el método de Ward con distancias euclídeas al cuadrado y estandarizando las observaciones se obtienen los tres grupos siguientes:

GRUPO 1: Centroides: 12,88°C 422,156mm
Albacete, Ávila, Burgos, Córdoba, Granada, Huesca, La Coruña, León, Lérica, Logroño, **Madrid**, Santa Cruz de Tenerife, Segovia, Soria, Teruel, Toledo, Valencia, Vigo y Vitoria

GRUPO 2: Centroides: 17,69°C 447,526mm
Alicante, Almería, Badajoz, **Barcelona**, Cáceres, Castellón, Ceuta, Ciudad Real, Cuenca, Jerez, Málaga, Melilla, Murcia, Palma de Gran Canaria, Palma de Mallorca, San Sebastián, Sevilla, Zaragoza.

GRUPO 3: Centroides: 13,57°C 1157,08mm
Bilbao, Gerona, **Huelva**, Lugo, Orense, Oviedo, Pamplona, Pontevedra, Salamanca, Santander, Valladolid, Zamora.

El diagrama de dispersión de los grupos se muestra en la Figura 1.

Como Ciudades representativas de cada grupo escogemos grandes capitales que tendrán series más largas de datos: del grupo 1 Madrid, del grupo 2 Barcelona y del grupo 3 Huelva.

Análisis de series de precipitación.

Comenzamos con un estudio sencillo de la tendencia de las series.

En los estudios más simples sobre el cambio climático la línea de tendencia estimada es la base inicial de dichos estudios. En este trabajo, se estima dicha tendencia y se considera el contraste sobre la pendiente de la línea como elemento para dilucidar si hay cambios en la precipitación, al menos en los 100 últimos años. En el contraste consideramos la hipótesis nula que no hay cambios y empleamos un 95% de confianza, ya que por el tamaño de la serie (más de 1000 datos) con los test tradicionales siempre será más probable la hipótesis alternativa (hay cambios de cualquier signo). Los valores estadísticos más importantes están recogidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Modelos de tendencia.

| Serie | Tendencia | Test pendiente = 0 | No hay cambios |
|--------|------------------------------|--------------------|------------------|
| Madrid | $y = 32,3374 + 0,00311792 t$ | $p = 0,2246449$ | Aceptamos |
| Huelva | $y = 46,4893 - 0,00623195 t$ | $p = 0,070031$ | Aceptamos al 95% |

| | | | |
|-----------|------------------------------|----------------|-----------|
| Barcelona | $y = 49,1745 - 0,00049937 t$ | $p = 0,805497$ | Aceptamos |
|-----------|------------------------------|----------------|-----------|

También se comprueba si la tendencia cumple las hipótesis del modelo y , por tanto, si se puede predecir precipitaciones futuras válidas con ellas. Los resultados se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2. Contrastes sobre las hipótesis del modelo

| Serie | RACHAS | RACHASM | Autocorrelación | Media | Varianza |
|-----------|--------|---------|-----------------|-------|----------|
| Madrid | *** | *** | *** | OK | *** |
| Huelva | *** | *** | *** | OK | *** |
| Barcelona | *** | *** | *** | OK | OK |

OK = contraste no significativo ($p \geq 0.05$)

* = poco significativo ($0.01 < p \leq 0.05$)

** = significativo ($0.001 < p \leq 0.01$)

*** = muy significativo ($p \leq 0.001$)

Los contrastes de RACHAS (exceso de valores por encima o debajo de la media) y RACHAM (exceso de valores por encima o debajo de la mediana) son altamente significativos en las tres localidades, junto con el contraste de Autocorrelaciones (que contrasta la ausencia de autocorrelaciones entre los residuos). Sólo el contraste para la igualdad de la media (para la igualdad de medias en la 1ª y la 2ª parte de la serie) en todas las series y el de varianzas en la 1ª y la 2ª parte de la serie de precipitaciones en Barcelona es no significativo estadísticamente.

Como el modelo de tendencias no es adecuado seleccionamos el modelo ARIMA, propuesto por BOX & JENKINS (1976), más sencillo y con mejores propiedades con el objetivo de predecir futuras precipitaciones.

Los modelos ARIMA constan de una parte autorregresiva (la serie se relaciona con los p valores anteriores) y otra de media móvil (la serie se relaciona con los residuos del modelo). Cuando el modelo presenta medias distintas de cero se suele aplicar una diferencia entre valores de retardo 1 y si es estacional de periodo r con media distinta de cero se suelen considerar diferencias entre valores de retardo r.

Los modelos que representan las precipitaciones en las estaciones climatológicas seleccionadas son del tipo $ARIMA(0,0,1) \times (0,1,1)_{12}$ que equivale a un modelo con estacionalidad con periodo 12, característica común en series de valores mensuales de variables climatológicas. Una vez extraída la estacionalidad, el modelo característico ha sido el de una media móvil estacional (Seasonal Moving Average), es decir, el modelo describe la dependencia de cada valor en el mes "t" del valor en el mes "t-12", del error aleatorio en la medida en t y de un parámetro (Θ) por el error aleatorio en la medida del mes "t-12".

El modelo estimado junto con las hipótesis de planteamiento del modelo que no se cumplen para la estimación concreta se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Modelos estimados para las precipitaciones

| Serie | Modelo | Hipótesis |
|-----------|---|-----------------------------|
| Madrid | $z_t = z_{t-12} + (1 + 0,1023B - 0,9746B^{12})a_t$ | Varianza ($p \leq 0.001$) |
| Huelva | $z_t = z_{t-12} + (1 + 0,0932B - 0,97641B^{12})a_t$ | Varianza ($p \leq 0.001$) |
| Barcelona | $z_t = z_{t-12} + (1 + 0,0394B - 0,9866B^{12})a_t$ | Ninguna |

Siempre que no existan variaciones anómalas, este modelo sirve para hacer predicciones, a partir de los valores mensuales de un año, para los meses del siguiente. Los errores se definen con la Ecuación (1)

$$a_t = \hat{z}_t - z_t \quad (1)$$

Sólo se tendrán una vez realizada la medición en el mes correspondiente por diferencia con el valor estimado con el modelo.

De acuerdo con la notación empleada en esta metodología B es el operador retardo que se aplica como se muestra en la Ecuación (2)

$$z_t - z_{t-12} = B^{12}z_t \quad (2)$$

Análisis de series de temperaturas.

Como en las series de precipitación, comenzamos con un estudio de la tendencia. Los valores estadísticos más importantes están recogidos en la Tabla 4.

Tabla 4. Modelos de tendencia.

| Serie | Tendencia | Test pendiente = 0 | H ₀ : No hay cambios |
|-----------|-------------------------------|--------------------|---------------------------------|
| Madrid | $y = 12,1881 + 0,00139931 t$ | $p = 0,003234$ | Aceptamos al 99,9% |
| Huelva | $y = 16,9316 + 0,000770729 t$ | $p = 0,063445$ | Aceptamos al 95% |
| Barcelona | $y = 16,0386 - 0,000513513 t$ | $p = 0,088721$ | Aceptamos al 95% |

También se comprueba si la tendencia cumple las hipótesis del modelo y , por tanto, si se puede predecir precipitaciones futuras válidas con ellas. Los resultados se recogen en la Tabla 5.

Tabla 5. Contrastes sobre las hipótesis del modelo

| Serie | RACHAS | RACHASM | Autocorrelación | Media | Varianza |
|-----------|--------|---------|-----------------|-------|----------|
| Madrid | *** | *** | *** | OK | OK |
| Huelva | *** | *** | *** | OK | OK |
| Barcelona | *** | *** | *** | OK | OK |

OK = contraste no significativo ($p \geq 0.05$)

* = poco significativo ($0.01 < p \leq 0.05$)

** = significativo ($0.001 < p \leq 0.01$)

*** = muy significativo ($p \leq 0.001$)

Los modelos que representan las precipitaciones en las estaciones climatológicas seleccionadas son del tipo ARIMA(0,1,2)x(0,1,1)₁₂ para Madrid y Huelva y ARIMA(0,1,3)x(0,1,1)₁₂ para Barcelona que equivalen a modelos estacionales con periodo 12 y una diferencia para obtener medias cero. Los modelos describen la dependencia de cada valor en el mes "t" del valor en el mes "t-12" y del valor en el mes "t-1" y "t-13". También dependen del error aleatorio en la medida en "t", "t-1" y "t-2" en Madrid y Huelva, dependiendo también de "t-3" en Barcelona, y además de un parámetro (Θ) por el error aleatorio en la medida del mes "t-12".

El modelo estimado junto con las hipótesis de planteamiento del modelo que no se cumplen para la estimación concreta se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6. Modelos estimados para las temperaturas

| Serie | Modelo | Hipótesis |
|--------|---|-----------|
| Madrid | $z_t = z_{t-1} + z_{t-12} - z_{t-13} + (1 - 0,8018B - 0,1797B^2 - 0,9738B^{12})a_t$ | Ninguna |

| | | |
|-----------|---|---------|
| Huelva | $z_t = z_{t-1} + z_{t-12} - z_{t-13} + (1 - 0,7749B - 0,1435B^2 - 0,9709B^{12})a_t$ | Ninguna |
| Barcelona | $z_t = z_{t-1} + z_{t-12} - z_{t-13} + (1 - 0,7147B - 0,1173B^2 - 0,0911B^3 - 0,9773B^{12})a_t$ | Ninguna |

Predicciones.

En el trabajo de AYUGA Y GONZÁLEZ (2003) se comprueba la validez de uno de estos modelos para predecir valores mensuales de 15 años futuros con esta metodología.

Las previsiones para el 2015 en cuanto a temperaturas y precipitaciones de las tres localidades representadas se recoge en la Tabla 7.

Tabla 7. Predicción climatológica para el año 2015

| Serie | Ciudad | Enero | Febr. | Mar. | Abr. | Mayo | Junio | Julio | Agos. | Sept. | Oct. | Nov. | Dic. |
|---------------|-----------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| Temperatura | Madrid | 7,0 | 8,6 | 11,6 | 13,6 | 17,3 | 22,3 | 25,8 | 25,4 | 21,4 | 15,6 | 10,5 | 7,5 |
| | Huelva | 11 | 11,7 | 13,9 | 15,7 | 18,4 | 21,8 | 24,4 | 24,6 | 22,1 | 18,6 | 14,4 | 11,5 |
| | Barcelona | 9,8 | 10,7 | 12,9 | 15 | 18,6 | 22,6 | 25,7 | 25,7 | 22,7 | 18,4 | 13,7 | 10,7 |
| Precipitación | Madrid | 46,4 | 26,2 | 16,8 | 15,2 | 33,2 | 47,4 | 50,8 | 44,2 | 36,4 | 43,4 | 37,9 | 46,1 |
| | Huelva | 68,1 | 47,6 | 51,6 | 42,3 | 28,8 | 10 | 2,1 | 2,4 | 26,4 | 58,6 | 80,9 | 87,3 |
| | Barcelona | 52,4 | 45,4 | 38,4 | 33,2 | 44,3 | 46,3 | 52,7 | 35,4 | 26 | 45,7 | 81,8 | 45,4 |

CONCLUSIONES

Empleando la temperatura media mensual y la precipitación del mes, se ha clasificado un conjunto de ciudades españolas en tres grupos, de los que se seleccionaron ciudades con serie climatológicas largas de cada grupo.

Se estudiaron las series obtenidas concluyendo que las precipitaciones no muestran cambios apreciables en el conjunto de años medidos (como mínimo 100 años). El modelo que representa mejor la evolución de las precipitaciones es un modelo ARIMA(0,0,1)x(0,1,1)₁₂ que refleja la dependencia de dicha variable con la precipitación del mes anterior y el mes correspondiente del año anterior.

Las temperaturas tampoco muestran cambios salvo en la ciudad de Madrid, en que con un 95% de confianza en que no hay cambios, rechazamos dicha hipótesis (aunque puede aceptarse con un 99,9% de confianza en ella). El modelo general para las temperaturas es ARIMA(0,1,q)x(0,1,1)₁₂ con q=2 para Madrid y Huelva y q=3 para Barcelona que refleja una influencia de la temperatura de 2 o 3 meses anteriores y de los 2 o 3 meses correspondientes del año anterior.

Las predicciones mensuales se pueden realizar a medio plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- AYUGA, E. y GONZÁLEZ GARCÍA C.; 2003. Modelos estadísticos para las series pluviométricas de Huelva. Validación y actualización. En *Actas del IV Congreso Nacional de Agroingeniería*.
- BELL, J. L., L. C. SLOAN, J. REVENAUGH, & P. B. DUFFY; 2003. Evaluation of Northern Hemisphere natural climate variability in multiple temperature reconstructions and global climate model simulations. *Global and Planetary Change*, 37 (1&2): 19-32.
- BOX, G.E.P. & JENKINS, G.M.; 1976. *Time Series Analysis, Forecasting and Control*, Holden-Day, San Francisco.
- GONZÁLEZ HIDALGO, J.C.; DE LUIS, M.; ŠTEPÁNEK, P.; RAVENTÓS, J. y CUADRAT, J.M.; 2002. Reconstrucción, estabilidad y proceso de homogeneizado de series de precipitación en ambientes de elevada variabilidad pluvial. *Actas de la VII Reunión Nacional de Climatología*. 47-57.

INM página web : <http://www.inm.es>

LANA, X.; MARTÍNEZ, M.D.; SERRA, C. & BURGUEÑO, A.; 2004. Spatial and temporal variability of the daily rainfall regime in Catalonia (northeastern Spain), 1950-2000. *International Journal of Climatology*, Volume 24, Issue 5: 613-641.

MARTIN-VIDE, J.; 2004. Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. *International Journal of Climatology*, Volume 24, Issue 8: 959-971.

MOBERG, A.; JONES, P.D.; BARRIENDOS, M.; BERGSTRÖM, H.; CAMUFFO, D.; COCCEO, C.; DAVIES, T.D.; DEMARÉE, G.; MARTIN-VIDE, J.; MAUGERI, M.; RODRÍGUEZ, R. & VERHOEVE, T.; 2000. Day-to-day temperature variability trends in 160-to 275-year long European instrumental records. *Journal of Geophysical Research*, 105, D18: 22849-22868.

SINGHRATTNA, N.; RAJAGOPALAN, B.; CLARK M. & KRISHNA KUMAR, K.; 2005. Seasonal forecasting of Thailand summer monsoon rainfall. *International Journal of Climatology*, Volume 25, Issue 5: 649-664.

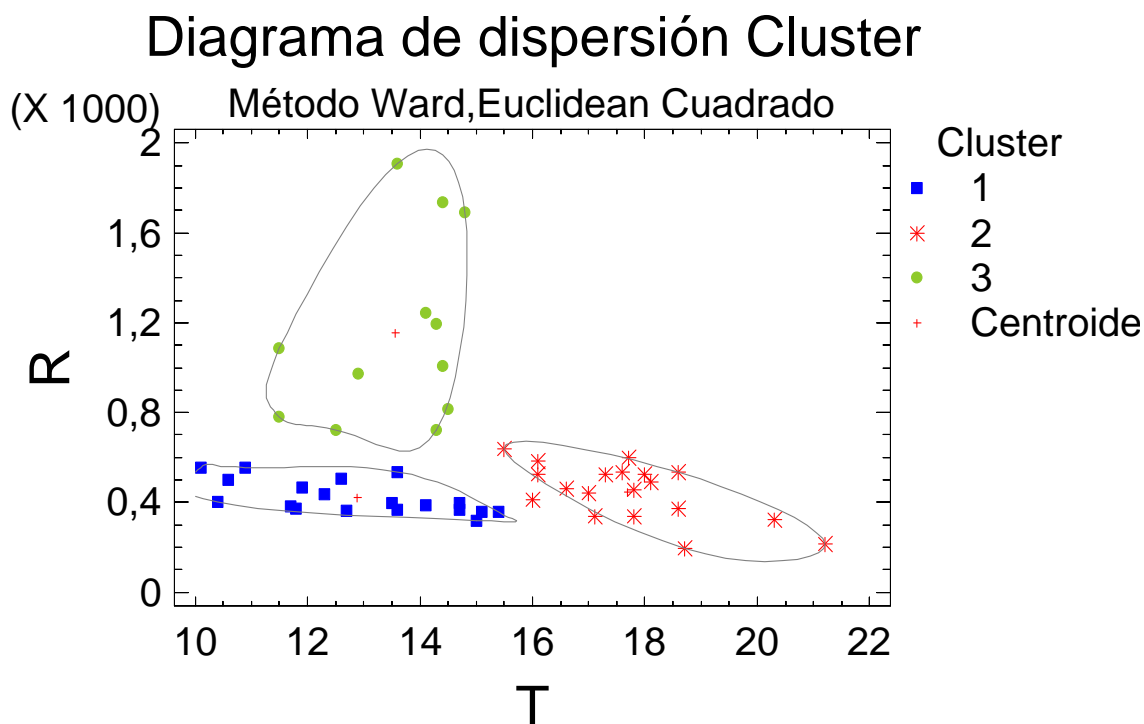


Figura 1. Agrupación de Ciudades mediante temperaturas y precipitaciones.