

# ANALISIS Y APLICACION DEL FACTOR CLIMATICO DE FOURNIER EN LA ESTIMACION DE LA EROSION ESPECIFICA EN LA REGION DE MADRID

Juan Guerra\*  
Fernando López Vera\*\*

## RESUMEN

*La estimación del poder erosivo de las precipitaciones, expresada como degradación específica ( $Tm/km^2/año$ ) mediante el método empírico de Fournier, se ha aplicado en múltiples ocasiones con resultados desiguales. Ello es debido a que frecuentemente no se respetan las hipótesis de partida y condiciones de aplicación del método. Según Fournier, para cuencas extensas los diversos factores determinantes de la erosión se minimizan, resultando ser esta función fundamental del coeficiente  $p^2/P$ , siendo  $p$  la precipitación del mes más lluvioso, y  $P$  la precipitación total anual. De aquí la necesidad de hacer un riguroso análisis de las precipitaciones.*

*La principal aportación de este trabajo consiste en la metodología presentada para la normalización y homogeneización de los datos de las precipitaciones. El método se ha aplicado a los tres grandes dominios geomorfológicos sierra, campiña y páramos, que constituyen la Región de Madrid. La zona dividida en varias subcuencas tiene una superficie de  $7.994 km^2$ , y se ha dispuesto de datos en un período de 80 años, obteniéndose valores de erosión potencial muy altos, de  $1.000$  a  $3.000 tm/km^2/año$ .*

## SUMMARY

*The erosive power of rainfall valuation, expressed as Specific Degradation, ( $tons/km^2/year$ ) using Fournier empirical method, has been used fre-*

\* Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

\*\* Departamento de Geomorfología y Geotectónica. Universidad de Salamanca.

*cuently with variable results. It is because initial hypothesis are not frequently respected. Fournier says that on large basins, the various factors fixing slope erosion are minimum, resulting erosion function of climatic coefficient  $p^2/P$ , being  $p$  annual rainfall of the rainiest month, and  $P$ , the whole annual rainfall. For this cause a strict rainfall analysis is indispensable.*

*This paper shows a methodology in order to obtain complete and homogeneous rainfall data. It has been applied for an area of 7.994 km<sup>2</sup> in Madrid Region along a period of 80 years, drawing out that this potential erosion is very high, about 1.000 to 3.000 tons/km<sup>2</sup>/year.*

## 1. Antecedentes y planteamiento del problema

La aplicación de métodos empíricos para el cálculo de la erosión potencial, aunque es utilizada con frecuencia en ingeniería forestal, agrícola, etc., su uso suele ser de tipo práctico para diversos proyectos, sin que existan en nuestro país gran número de publicaciones sobre ello. Ecuaciones como la ecuación Universal de Pérdidas del Suelo (1968) precisan datos inexistentes o se aplican en pequeños terrenos y no en cuencas de varios miles de km<sup>2</sup>. Sin embargo existen aproximaciones basadas fundamentalmente en los trabajos de Fournier (1960). Caben destacar los de López Cadenas y Blanco (1968), Heras (1972) y Sánchez San Román (1979), así como diversos estudios realizados por ICONA en la cuenca mediterránea y otros lugares.

Sin embargo estas ecuaciones basadas en datos de precipitación son frecuentemente utilizadas con insuficiencia de los mismos o con muestras poco significativas, lo que conduce a resultados desiguales.

En el presente trabajo se han utilizado datos para un período de 80 años (1902-1981) en un total de 94 estaciones distribuidas en los 7.994 km<sup>2</sup> de la región de Madrid. A estos datos, en principio muy irregulares se les ha aplicado un método de completado y homogeneización por regresión que ha permitido disponer de los datos prácticamente completos en los 80 años, incluso en estaciones donde no se realizó observación.

## 2. Características físicas de la Región

La Región de Madrid se divide en tres grandes dominios tanto desde el punto de vista geológico como geomorfológico (Fig. 1):

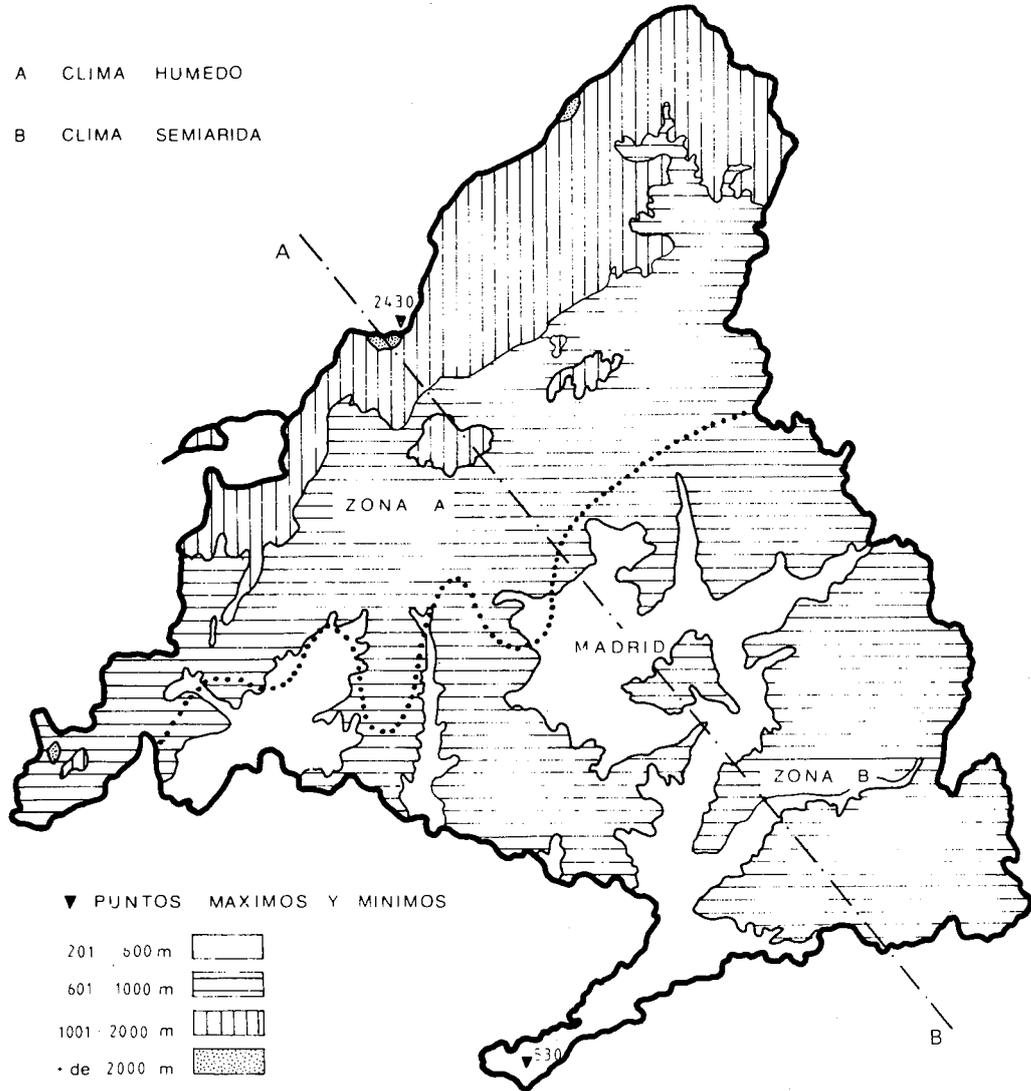
a) El dominio de la Sierra, formado por rocas ígneas (granitos, granodioritas) y rocas metamórficas (gneises, esquistos). Es un macizo elevado con una rampa o pedimen hacia la zona de la meseta.

b) El denominado borde detrítico de la Meseta o terciario detrítico de Madrid, formado por una serie aparentemente homogénea de arenas arcó-

## APLICACION DEL FACTOR CLIMATICO DE FOURNIER

DIVISION CLIMATICA (TURC)

- ZONA A CLIMA HUMEDO
- ZONA B CLIMA SEMIARIDA



ESQUEMA GEOMORFOLOGICO DE LA REGION

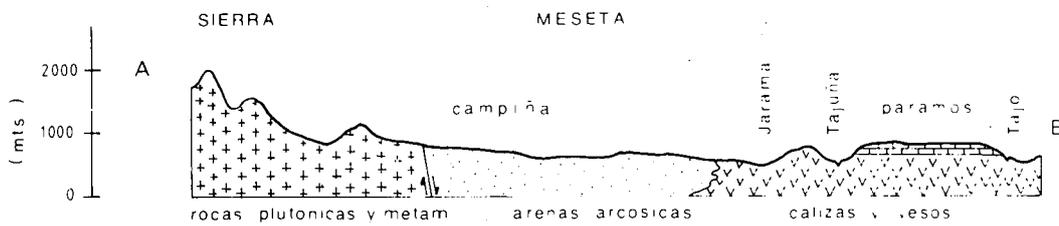


Figura 1

sicas y arcillas. Es una llanura ondulada donde el encajamiento máximo de los talweg es de unos 180 m.

c) Por último, la zona SE la integran materiales yesíferos, margosos y calcáreos, dando lugar a mesetas elevadas (páramos) y valles encajados.

Climatológicamente la zona se encuadra en la llamada Zona Parda de clima extremado continental (Font, 1983). Se caracteriza por el aislamiento orográfico y carácter netamente continental, con inviernos fríos, aunque menos que en la meseta norte y veranos más calurosos, y con menor oscilación de temperaturas. Hay un largo y seco estiaje y un mínimo pluviométrico secundario en invierno. Los máximos se dan en primavera y otoño, pero con gran irregularidad.

La línea a trazos de la Fig. 1 separa las dos zonas climáticas de Turc (climas húmedo y semiárido) que como se verá más adelante tienen gran importancia en la aplicación de las ecuaciones de Fournier.

### 3. Fundamentos teóricos

Según Fournier (1960), la erosión hídrica depende de los siguientes factores:

1. Pluviometría anual, en razón directa.
2. Distribución anual de la pluviometría, ya que la regularidad de las precipitaciones hace que las intensidades máximas disminuyan y por tanto su energía cinética es menor. Además aumentará la vegetación.
3. Relieve. La erosión es menor cuanto más llana es la cuenca.
4. Vegetación. Aumenta la sujeción de los suelos, a los que afecta fundamentalmente este tipo de erosión.
5. Geología. Es un factor variable. Sin embargo en nuestro caso es más importante la edafología de la cuenca, aunque la segunda dependa de la primera.

Fournier comprobó que para pequeñas extensiones, la influencia de los factores suelo, relieve y vegetación era muy manifiesta. Sin embargo, a escala regional, dada la gran variedad de características que presentan estos factores y ser el clima el único elemento de posible diferenciación, de aparecer regiones con diferentes estados de erosión, las causas más influyentes serán las climáticas, y de ellas, el régimen de precipitaciones.

El primero y segundo factores los engloba en el producto  $P (p/P)^2$ , o lo que es lo mismo,  $p^2/P$ , donde  $p$  es la precipitación del mes más lluvioso, y  $P$  la precipitación total anual.

## APLICACION DEL FACTOR CLIMATICO DE FOURNIER

Fournier, estudiando numerosas cuencas de más de 2.000 km<sup>2</sup> en todo el mundo, encontró una relación directa entre dicho factor y la erosión específica, calculando unas rectas de regresión que son las siguientes:

$$\begin{array}{l} \text{Para } h \operatorname{tg} \alpha < 6 \quad Y = 6,14 X - 49,8 \text{ (para } 8 \leq X \leq 20) \text{ (} r = 0,80) \\ \quad \quad \quad \quad \quad Y = 27,12 X - 475,4 \text{ (para } X \geq 20) \text{ (} r = 0,96) \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Para } h \operatorname{tg} \alpha > 6 \quad Y = 91,78 X - 737,6 \text{ (climas semiáridos) (} r = 0,98) \\ \quad \quad \quad \quad \quad Y = 52,49 X - 513,2 \text{ (otros climas) (} r = 0,95) \end{array}$$

donde Y = Degradación específica (Tm/km<sup>2</sup>/año)

$$X = p^2/P$$

Htg  $\alpha$  = coeficiente orográfico de la cuenca en el que h = altura media de la cuenca en m que es la ordenada media de la curva hipsométrica referida a la cota mínima de la cuenca. Tg  $\alpha$  es el coeficiente de masividad de Martonne, igual a la altura media dividida por la superficie de la cuenca.

La clasificación de climas es la de Turc que considera semiárido al que cumple la siguiente condición:

$$0,316 L < P < 0,632 L$$

siendo P: pluviometría media anual

$$L = 300 + 25T + 0,05 T_3$$

T = temperatura media anual

fuera de este intervalo el clima es árido o húmedo.

El factor vegetación aparece implícito en el coeficiente ya que la densidad y continuidad de la cubierta vegetal están ligadas a la intensidad y regularidad de las precipitaciones.

En las cuencas inferiores a 2.000 km<sup>2</sup> ciertas características de relieve y litología pueden alterar estas correlaciones, por ejemplo en zonas con fuertes desniveles. Sin embargo Fournier comprobó que estas correlaciones pueden ser válidas para cuencas de incluso una centena de km<sup>2</sup> si están mayoritariamente cubiertas por suelos.

Debe tenerse en cuenta en las regiones de clima predominantemente semiárido, como es nuestro caso, y con gran variabilidad en la distribución de la precipitación que el cálculo del factor  $p^2/P$  debe hacerse año a año y no con valores medios de varios años que atenuarían estas variaciones estacionales.

#### 4. Desarrollo del método

##### 4.1. Tratamiento de datos

Sobre los datos de pluviometría total mensual durante el período citado obtenidos en la totalidad de las 142 estaciones pluviométricas que posee o ha poseído la región de Madrid se han cubierto las abundantes lagunas por un método de comparación estadística. Es evidente que una observación que no se ha hecho no se puede suplir exactamente. Sin embargo, en análisis estadístico es posible muchas veces llegar a resultados satisfactorios.

Todos estos métodos descansan sobre la comparación con estaciones próximas de clima parecido. Dada la pequeña extensión de la zona estudiada a efectos pluviométricos se tomó la totalidad de las demás estaciones para efectuar la comparación. A pesar de la enorme cantidad de datos manejados, el uso de medios informáticos permitió la utilización del sencillo método que se expone a continuación:

Se calcula la matriz de coeficientes de correlación con las demás estacio-

$$r(m, n) = \frac{\text{cov}(m, n)}{S_m \cdot S_n} = \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{P \cdot S_m \cdot S_n}$$

nes. Se van escogiendo sucesivamente las de mayor coeficiente y los datos que faltan se completan por regresión simple.

Sin embargo, para poder utilizar la regresión es necesario que la información relativa  $I$ , definida como el cociente entre la varianza de la muestra original (con  $n_1$  observaciones) y la muestra completada (con  $n_1 + n_2$  observaciones) sea  $\geq 1$ , que es cuando la muestra completada tendrá una dispersión menor que la muestra original. Según Thomas:

$$I = \frac{1 - n_2}{n_1 + n_2} \left( \frac{(n_1 - 2)r^2 - 1}{n_1 - 3} \right)^{-1}$$

De esta ecuación se puede deducir que  $I \geq 1$  cuando  $r^2 \geq \frac{1}{n_1 - 2}$  siendo  $r$  el coeficiente de correlación y  $n_1$  el número de observaciones comunes. En nuestro caso se impusieron además de esta condición, otra de proximidad y un mínimo de 5 años comunes de observación, pues con menos años no se puede establecer una correlación aceptable. A los resultados se les aplicó un test de Homogeneidad recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (Jansá, 1969, pp. 63-66) que dio buenos resultados excepto por una cierta homogeneidad con tendencia monótona en los meses

## APLICACION DEL FACTOR CLIMATICO DE FOURNIER

de verano, explicable dada la gran cantidad de casos con precipitación nula. Estos datos no se incluyen lógicamente dada su extensión.

### 4.2. Cálculo de la Degradación Específica

Para el cálculo de la degradación específica se han tomado las 3 subcuencas en que se divide la Región de Madrid: Jarama, Guadarrama y Alberche y una pequeña parte del río Tajo. De ellas la única que supera los 2.000 km<sup>2</sup> es la del Jarama, aunque las restantes pueden dar resultados aproximados por estar cubiertas en su mayoría por suelos.

Para calcular el valor medio de  $p^2/P$ , al ser su dimensión en mm., se pueden utilizar los métodos geométricos clásicos (isoyetas, polígonos de Thiessen). En nuestro caso se ha utilizado el método de los 2 ejes, que tiene en cuenta la posición de las estaciones en la cuenca y su forma, además de no tener que medir superficies, frecuente causa de errores.

Este método se basa en la hipótesis de que la importancia relativa de una estación depende de su proximidad al centro geográfico de la cuenca. Este centro se obtiene por la intersección de 2 ejes de la siguiente forma: (Fig. 2).

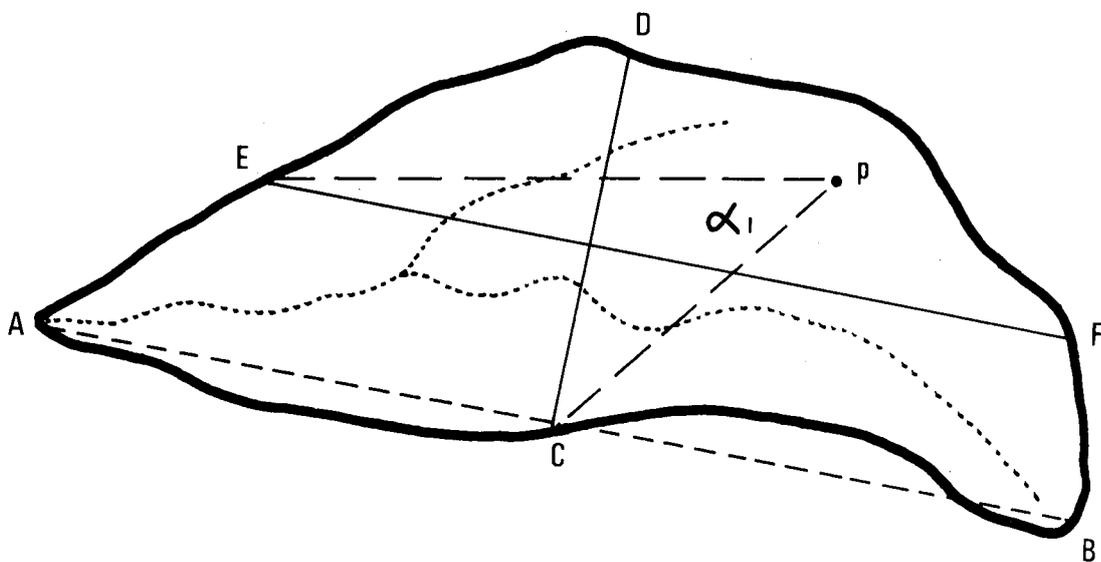


Figura 2

JUAN GUERRA, FERNANDO LOPEZ VERA

ISOYETAS ANUALES DE LA REGION DE MADRID

( ISOYETAS CADA 100mm )



Figura 3

## APLICACION DEL FACTOR CLIMATICO DE FOURNIER

Se traza una línea recta del punto más bajo de la cuenca (desembocadura) al más alejado siguiendo el curso de agua principal (AB). Se traza la mediatriz CD y el segmento comprendido dentro de la cuenca es el eje menor. El segmento a su vez mediatriz de éste es el eje mayor (EF).

El coeficiente de ponderación de una estación P es proporcional al ángulo con que se miran desde ella los extremos más alejados de los ejes

$$\omega_i = \frac{\alpha_i}{\bar{\alpha}_i}$$

siendo n el número de estaciones consideradas. La precipitación media será

$$P_m = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n P_r \omega_r$$

donde  $P^k$  es la precipitación mensual o anual registrada en k. Si llamamos

$\bar{P}\bar{E} = a$ ,  $\bar{P}\bar{C} = b$  y  $\bar{E}\bar{C} = c$ , el ángulo será:

$$\cos^{-1} \left( \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \right)$$

Por este método pueden calcularse fácilmente los coeficientes de ponderación.

### 4.3. Resultados obtenidos

Para el cálculo de la degradación específica se han utilizado las ecuaciones de regresión de Fournier correspondientes a un coeficiente orográfico  $> 6$ , pues como puede verse en la tabla I, donde se resumen los resultados, dicho coeficiente supera siempre este valor.

Los resultados obtenidos muestran unos valores de erosión potencial relativamente altos en comparación con los casos que estudió Fournier, que oscilaban entre 300 y 1.500 Tm/km<sup>2</sup>/año, mientras en nuestro caso varían entre 1.000 y 3.000 Tm/km<sup>2</sup>/año. Se puede ver también cómo los valores son más altos en las zonas de clima semiárido, lo que nos indica que la influencia de la variabilidad de la precipitación a lo largo del año, mayor en estas zonas, predomina sobre la mayor precipitación.

Excepción de ello es la cuenca del Guadarrama en la que este caso se invierte. Sin embargo puede observarse que en el mapa de la Fig. 3 existe una inflexión de los valores bajos hacia la zona de clima húmedo, lo que

indica una gran variabilidad incluso en este caso. Por otra parte, el valor de 978,7 dentro de la zona semiárida no es muy fiable debido al poco número de estaciones existente en esa zona. Algo parecido sucede en la subcuenca del Tajo, aunque sea lógico un valor más bajo por la escasez de precipitaciones.

## 5. Conclusiones

1.<sup>a</sup> La degradación Específica o erosión potencial para las subcuencas de la Región de Madrid es del orden de 1.000 a 3.000 Tm/km<sup>2</sup>/año.

2.<sup>a</sup> Los valores de Degradación Específica son relativamente elevados comparados con otras cuencas de todo el mundo.

3.<sup>a</sup> La erosión hídrica es mayor en las zonas de clima semiárido, y se observa por tanto, un predominio del factor variabilidad anual de la precipitación sobre la cantidad.

4.<sup>a</sup> Los resultados obtenidos son evidentemente valores globales medios. Un estudio a mayor escala requiere una sectorización de estas subcuencas y determinación diagnóstica en campo y/o mediante técnicas de tele-detección.

**Tabla 1. Resumen de resultados**

| Subcuenca    | Sup. (km <sup>2</sup> ) | Coef. orogr. | Erosión específica (Tm/km <sup>2</sup> año) |                | Rebajamiento medio (mm/año) |                |
|--------------|-------------------------|--------------|---|----------------|-----------------------------|----------------|
|              |                         |              | Zona húmeda                                 | Zona semiárida | Zona húmeda                 | Zona semiárida |
| Jarama       | 5148,3                  | 30,2         | 1289,4                                      | 1417,4         | 0,77(1)                     | 0,85           |
| Guadarrama   | 1059,8                  | 118,0        | 2242,5                                      | 978,7          | 1,35                        | 0,59           |
| Alberche     | 1160,2                  | 103,0        | 1523,4                                      | 2860,1         | 0,91                        | 1,72           |
| Tajo         | 626,5                   | 41,0         | —   | 932,8          | —                           | 0,56           |
| <b>Total</b> | <b>7994,8</b>           |              |   |                |                             |                |

(1) Por hipótesis de que la densidad aparente del suelo seco = 1,5 entonces 1 tm/km<sup>2</sup> año = 6<sup>-4</sup> mm/año.

## APLICACION DEL FACTOR CLIMATICO DE FOURNIER

### **Bibliografía**

- FONT, I. (1983). *Climatología de España y Portugal*. Publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.
- FOURNIER, F. (1960). *Climat et erosion*. Ed. Presses Universitaires de France. París.
- HERAS, R. (1970). La erosión y la sedimentación. Tomo VI del *Manual de Hidrología*. Dirección General Obras hidráulicas. Madrid.
- JANSA, J.M. (1969). *Curso de Climatología*. Publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.
- LOPEZ, F. y BLANCO, M. (1968). *Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica, del transporte y depósito de materiales*. Ministerio de Agricultura. Madrid.
- SANCHEZ, J. (1979). Estudio del poder erosivo de las precipitaciones en las cuencas de los ríos Tormes y Guareña. *1.ª Reunión Geología Cuenca del Duero*. Temas Geológico-Mineros. I.G.M.E.

