CONSIDERACIONES SOBRE EL CÁLCULO POR COMPARACIÓN DE LA PENDIENTE DE COMPENSACIÓN EN LA CORRECCIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL

Ignacio Pérez-Soba

Ingeniero de Montes. Servicio Provincial de Medio Ambiente de la Diputación General de Aragón. Sección de Conservación del Medio Natural. ZARAGOZA

1. EL CÁLCULO DE LA PENDIENTE DE COMPENSACIÓN Y SUS LIMITACIONES

Como es bien sabido, el de la pendiente de compensación es uno de los principales cálculos necesarios para el diseño de hidrotecnias transversales de corrección hidrológica-forestal. Su definición "clásica", en la ciencia forestal española, es la que dio el célebre Ingeniero de Montes D. JOSÉ MARÍA GARCÍA NÁJERA (1962): aquella pendiente tal que los volúmenes depositados e incorporados a la corriente son iguales, no sólo en cuantía, sino también en naturaleza y en composición granulométrica. La idea de la pendiente de compensación no surgió de García Nájera: en su momento, fueron las expresiones clásicas de THIERY (1914) las que sirvieron de base para las acciones de corrección, y, en las décadas de 1940 y 1950, hubo varias propuestas de metodologías para el cálculo de la pendiente a partir de las características hidráulicas del cauce y de la cuenca, de las que cabe subrayar la DE ÁLVARO FERNÁNDEZ DE CASTRO (1947 y 1948). Sin embargo, fueron las expresiones (original o modificada) de García Nájera las que obtuvieron mayor éxito en España.

Desde el punto de vista teórico, cabe destacar que el proceso de cálculo combina varias de las expresiones más logradas de la hidráulica de canales abiertos sin perder nunca el sentido físico: en el caso de la fórmula original, el coeficiente de Bazin y las fórmulas de Schocklitsch, y, en el de la fórmula modificada, el número de Manning y la tensión tractiva de Meyer-Peter. Ello da lugar a un método de cálculo que antiguamente presentaba ciertas dificultades, como la ecuación de séptimo grado que permite hallar el valor de "u" (velocidad de la corriente suponiendo el agua limpia) y las iteraciones precisas para el cálculo de Cs. Esta última dificultad, no obstante, se podía soslayar sustituyendo el valor de Cs de la fórmula de Bazin por el obtenido mediante la fórmula de Strickler, teóricamente más imprecisa (aunque la fórmula de Bazin, en el fondo, se basa también en imprecisos coeficientes de rugosidad), pero que no necesita iteraciones. Sin embargo, esas dificultades de cálculo han quedado superadas mediante el uso de calculadoras programables, u ordenadores (MINTEGUI y ROBREDO, 1993).

Desde el punto de vista de la aplicación práctica, que es el que más interesa a los

Ingenieros que estamos dedicados a la gestión forestal directa, la importancia del cálculo de la pendiente radica en varios motivos, entre los que podemos destacar dos:

- en primer lugar, en el caso de una corrección completa de un torrente, es decir, de una corrección transversal escalonada, con un componente longitudinal, la pendiente de equilibrio permite calcular la longitud de aterramiento, magnitud muy útil para determinar objetivamente la ubicación aproximada de las hidrotecnias.
- en segundo lugar, la comparación entre la pendiente teórica de compensación y la real del torrente o barranco a corregir es un elemento importante de juicio para determinar prioridades de corrección de barrancos, junto con indicadores como el grado de cubierta vegetal, los usos del suelo en la cuenca vertiente, la peligrosidad de las avenidas para poblaciones, etc.

No obstante, y de nuevo desde el punto de vista de la construcción real de hidrotecnias, no es menos cierto que el cálculo de la pendiente de compensación mediante el método de García Nájera presenta algunas dificultades, más allá de las de mero cálculo, que en nada invalidan las ventajas antes expuestas, pero que sí las matizan:

- uno, es el uso del parámetro X (la proporción de sedimentos) en la fórmula para la determinación de la tensión tractiva (si se usa la fórmula de Schocklitsch) y del valor modificado del coeficiente de Bazin para una suspensión (Cs). A menudo, en los procesos de cálculo de las hidrotecnias se toma como valor universal el de X=0,10, lo que no deja de ser una convención. La determinación cuidadosa del valor de X en un barranco determinado supone una inversión de tiempo muy superior al que los Ingenieros constructores suelen disponer, sobre todo si trabajan directamente para la Administración Forestal, y no digamos ya si son gestores de un territorio. Si, para evitar el uso de X en la determinación de la tensión tractiva, se prefiere usar las expresiones de Meyer-Peter, sigue apareciendo un parámetro de determinación tan complicada como X, que sería d50, el diámetro característico de los materiales.
- otro, es el uso del ancho medio del cauce (b), que, en este caso, no ofrece especial dificultad si se ha hecho una medición cuidadosa del cauce del barranco, pero que no tiene en cuenta, lógicamente, la varianza de ese valor, que puede ser muy marcada en torrentes con influencia mediterránea.

Tratar de evitar estas dificultades del método de cálculo de García Nájera usando algún otro método de determinación de pendientes de equilibrio o de compensación, como el propuesto por L. Novak en 1988 para determinar "la pendiente estable de los torrentes" (resumido en LÓPEZ CADENAS DE LLANO, 1998), no conduce más que a dificultades similares: en el método citado de Novak, los elementos de incertidumbre que tientan al uso de valores medios convencionales son los coeficientes de resistencia a los empujes hidrodinámicos global y ascensional y sobre todo el valor de "f", el coeficiente de resistencia del lecho al comienzo del movimiento del material, que ha de determinarse en un canal experimental. Ello es así, evidentemente, porque parámetros de difícil determinación van a aparecer en cualquier expresión que no quiera perder sentido físico, y el modo de resolver de manera práctica esa dificultad siempre va a ser el recurso al empirismo.

2. LAS POSIBILIDADES DE CÁLCULO POR COMPARACIÓN

Por eso, y como complemento al cálculo teórico de la pendiente de compensación teórica, quizá conviene recordar que la corrección hidrológico-forestal comenzó, precisamente, definiendo la pendiente de compensación por comparación, a partir de pendientes realmente obtenidas mediante la acción de diques anteriores, de represamientos naturales, o de otras posibilidades de comparación con barrancos de características hidráulicas similares. En definitiva, se trataba de obtener conclusiones a partir de la acción de la naturaleza sobre las obras de corrección. Esas fórmulas de determinación de la pendiente de compensación por comparación son citadas en la obra de Mintegui (1990), pero, por ejemplo, están ausentes de la magnífica obra recopilatoria de LÓPEZ CADENAS DE LLANO (1998).

En este sentido, resultaría muy interesante el que esta vía de trabajo se profundizara mediante la aplicación de lo que dispone el artículo 354 del vigente Reglamento de Montes, según el cual "los proyectos hidrológico-forestales. especialmente en lo que concierne a obras de corrección, serán objeto de revisión, cada cinco años, que consistirán en considerar (...) resultados obtenidos y coste de lo realizado, poniéndolos en relación con lo establecido en el proyecto (...) y posibles rectificaciones, que habrán de justificarse para el futuro". Esta evaluación de las hidrotecnias de corrección es una de tantas labores pendientes que tienen las Administraciones Forestales sobre sus mesas de trabajo, y no es más que un reflejo del retroceso que la acción hidrológico-forestal ha tenido en los últimos años, a partir de una decadencia que comenzó levemente con la desaparición de las Divisiones Hidrológico-Forestales en 1971, y se agravó seriamente con las transferencias de las competencias forestales a las Comunidades Autónomas.

Quizá la primera fórmula aplicable en ese sentido fue la propuesta por THIERY (1914) en un libro que creó escuela en toda Europa, y especialmente en España. Thiery proponía que existía una relación de proporcionalidad entre las pendientes de equilibrio en dos secciones de un mismo torrente, idéntica a la que habría entre los productos de sus caudales y sus perímetros mojados. Esa proporcionalidad se refería, como queda dicho, a las pendientes de equilibrio, pero MINTEGUI (1990) afirma que también se da en las de compensación, lo cual es lógico, ya que la fórmula de Thiery se basa sólo en consideraciones geométricas, renunciando al sentido físico desde un inicio. Esta fórmula es, pues:

$$\frac{j}{jo} = \frac{x \bullet Q}{xo \bullet Qo} \Rightarrow j = \frac{jo \bullet x \bullet Q}{xo \bullet Qo}$$

La otra fórmula para la determinación de la pendiente de compensación por comparación fue, precisamente, elaborada por un español, y analizar la misma es el fin principal de esta comunicación. Se debe al Doctor Ingeniero de Montes, y brillante especialista en hidrología forestal, D. Antonio Pérez-Soba Baró (1931-1985). Esa fórmula, como queda dicho, es citada por Mintegui (1990) en la siguiente forma:

$$j = jo \bullet \left(\frac{b}{bo}\right)^{0,86} \bullet \left(\frac{Ao}{A}\right)^{0,86 \bullet C} \bullet e^{-1,43 \bullet n \bullet (x-xo)}$$

en donde:

jo es la pendiente de compensación medida en un lugar de la cuenca en el que, ya sea por aterramiento de un dique o por estrechamiento natural, se supone que el lecho ha adquirido este carácter (en %). Lógicamente, *j* es la pendiente que queremos determinar.

bo es el ancho medio del cauce en la zona en que se ha medido esa pendiente (en metros).

b es el ancho medio (en metros) del aterramiento previsible en la zona en la que se quiere medir la pendiente *j*.

x y *o* son las longitudes de recorrido de las aguas desde su nacimiento hasta, respectivamente, el punto en el que se desea hacer el cálculo o el punto en que se da el estrechamiento natural o artificial del cauce que ya ha adquirido la pendiente de compensación (en Km).

A y *Ao* son, respectivamente, las superficies de la cuencas afluyentes al punto de cálculo y al de medición (en Km^2).

n y *C* son los coeficientes de, respectivamente, la relación de Sternberg y de la expresión exponencial del caudal generado por la superficie de la cuenca.

Mintegui afirma también, lo cual es cierto, que "aunque el autor nunca dio por definitiva esa fórmula, la utilizó en su trabajos de corrección, y presenta el interés de ofrecer un procedimiento sencillo y completo para el cálculo de la pendiente de compensación por comparación; por lo que merece ser revisado nuevamente". No es intención de este artículo proceder a esa revisión, pero sí exponer el que considero proceso de cálculo de esa fórmula, deducido partiendo de esa expresión y evolucionando "hacia atrás", proceso inverso que aquí presentaré directo, en pro de una mayor claridad. De este modo, se pretende dar a conocer cuáles son los fundamentos teóricos y las hipótesis de cálculo de esta fórmula, fase previa para cualquier revisión que se desee hacer de esa expresión. De este análisis, se comprueba que la expresión no es un ajuste estadístico, sino que tiene sentido físico demostrable, y con aplicaciones diversas en corrección hidrológico-forestal.

3. HIPÓTESIS BÁSICAS

Salvo error u omisión, de un simple examen de la fórmula del Dr. Pérez-Soba, se desprende que se basa en las siguientes hipótesis:

a) la tensión límite de arrastre (τ_{cr}) varía dentro de la cuenca en cuestión siguiendo una relación exponencial con la distancia (x) en kilómetros del punto en cuestión al origen del curso de agua, es decir, al camino recorrido por el material, como describe Sternberg: $\tau_{cr} = m \bullet e^{-n \bullet x}$.

Según Sternberg, m y n dependen fundamentalmente de las características de los materiales del lecho y velocidades habituales de circulación de las aguas.

b) los caudales generadores se pueden expresar en función de la superficie de la cuenca (A, en kilómetros cuadrados) mediante otra expresión exponencial, del tipo $Q = a \cdot A^C$, expresión muy usual en todas las fórmulas empíricas de determinación del caudal máximo (LÓPEZ CADENAS DE LLANO, 1998; MINTEGUI, 1990). Estos caudales generadores corresponden, en cada punto de la cuenca, a la avenida probable en ese punto, con igual período de retorno.

A esas dos suposiciones, que se desprenden, insisto, de la mera visión de la fórmula, hay que añadir, para obtener la expresión final, al menos una tercera, que ya nos abre la puerta de la demostración:

c) el caudal generador, al circular sobre el aterramiento, sigue la expresión de Strickler antes comentada (haciendo la simplificación de R=h, común en cauces anchos): $Q = K \cdot b \cdot h^{5/3} \cdot j^{0,5}$ siendo K el coeficiente de rozamiento (que sin mucha simplificación puede suponerse igual en toda la cuenca) y b el ancho medio del aterramiento.

En definitiva, y como es bastante lógico tratándose de una fórmula de comparación, se adoptan fórmulas exponenciales, que luego permiten fáciles simplificaciones.

4. DEMOSTRACIÓN DE LA FÓRMULA

Se demuestra a partir de la relación física fundamental que rige la formación de la pendiente de compensación: la tensión tractiva del caudal generador se iguala a la tensión límite de arrastre. Ello ha de ser cierto tanto para el punto en el que se ha producido ya esa pendiente de compensación (jo) como para aquel en el que se ha de producir en el futuro a causa de nuestra intervención (j):

$$\tau_{cr_0} = \tau_o \text{ , y por tanto } \tau_{cr_0} = \tau_o \quad . (1)$$

El valor de las tensiones tractivas en el fondo del lecho se puede expresar, haciendo nuevamente la simplificación de R=h, y como es bien sabido, del siguiente modo:

$$\tau_{cr} = \gamma \bullet h \bullet i \text{ ,}$$

$$\text{y por tanto} \quad \tau_{cr_o} = \gamma \bullet h_o \bullet i_o \quad (2)$$

Según lo antes supuesto, las tensiones límites de arrastre siguen la expresión de Sternberg, es decir,

$$\tau_{cr} = m \bullet e^{-n \bullet x} \text{ y } \tau_{cr_o} = m \bullet e^{-n \bullet x_0} \quad (3)$$

Mediante una elemental división, se obtiene de ahí la relación entre los calados de la descarga de los caudales generadores:

$$\frac{h}{ho} = \frac{jo}{j} \bullet e^{-n \bullet (x - xo)} \quad (4)$$

Por otro lado, si aplicamos ahora la tercera de las suposiciones (fórmula de Strickler en la circulación del caudal sobre el aterramiento), vamos a hallar otra expresión que, combinada con la (4), nos dará finalmente la fórmula buscada:

$$\begin{Bmatrix} Qo = K \bullet bo \bullet ho^{5/3} \bullet jo^{1/2} \\ Q = K \bullet b \bullet h^{5/3} \bullet j^{1/2} \end{Bmatrix} \qquad (5)$$

Como hemos dicho que el caudal generado se puede expresar mediante la fórmula de Sternberg, ese sistema de dos ecuaciones nos quedaría como sigue:

$$\begin{Bmatrix} a \bullet Ao^{C} = K \bullet bo \bullet ho^{5/3} \bullet jo^{1/2} \\ a \bullet A^{C} = K \bullet b \bullet h^{5/3} \bullet j^{1/2} \end{Bmatrix} \qquad (6)$$

lo cual nos da a su vez otra relación de calados:

$$\frac{h}{ho} = \frac{A^{0,6 \bullet C} \bullet bo^{0,6} \bullet jo^{0,3}}{Ao^{0,6 \bullet C} \bullet b^{0,6} \bullet j^{0,3}} \qquad (7)$$

Igualando los segundos términos de las fórmulas (4) y (7):

$$\frac{A^{0,6 \bullet C} \bullet bo^{0,6} \bullet jo^{0,3}}{Ao^{0,6 \bullet C} \bullet b^{0,6} \bullet j^{0,3}} = \frac{jo}{j} \bullet e^{-n \bullet (x-xo)}$$

despejando nuestra incógnita, que no debemos olvidar que es j, tenemos:

$$j = jo \bullet e^{-1,43 \bullet n \bullet (x-xo)} \bullet \left(\frac{b}{bo}\right)^{0,86} \bullet \left(\frac{Ao}{A}\right)^{0,86 \bullet C}$$

quod erat demonstrandum.

5. APLICACIÓN PRÁCTICA

La fórmula de D. Antonio Pérez-Soba permite, por tanto, el cálculo de la pendiente de compensación "j" en un punto a partir del valor medido en otro (jo) y el conocimiento de las magnitudes b, bo, A, Ao, x, xo, y de los coeficientes n y c. Todos esos valores son fácilmente medibles sobre el terreno (con las particularidades de "b", como se ha dicho en un inicio), a excepción de n y de c, que parecen de nuevo tentarnos a tomar valores convencionales, con lo que no habríamos avanzado demasiado con respecto a las dificultades menores que ofrecen las expresiones de García Nájera. Sin embargo, la propia aplicación de la fórmula permite eludir esta dificultad: si hay varios lugares de la cuenca en los que ya se ha alcanzado la pendiente de compensación, entonces podemos formar sistemas de dos ecuaciones con dos incógnitas, que serán n y c. El sistema se formará tomando los valores conocidos de dos puntos (j, x, b, A), lo que nos da una ecuación, y haciendo lo mismo con los valores de uno de esos puntos y otro más. Por supuesto, esto nos obliga a tener como mínimo tres puntos de la cuenca en los que se halla producido la pendiente de compensación, para, mediante combinatoria, lograr tres sistemas de dos ecuaciones con dos incógnitas (aún así, sería conveniente tener más de tres puntos). De este modo, obtendremos tres pares de valores de n y c que satisfarán cada sistema. El parecido de esos pares de valores entre sí nos dará una idea de la calidad de los coeficientes obtenidos.

Esto nos descubre también una posibilidad no evidente, a primera vista, en esta fórmula, pero interesante: aun cuando nuestra corrección proyectada se halle lejos fuera de la cuenca en la que anteriores correcciones han logrado la pendiente de compensación, esta fórmula permite el cálculo preciso de n y c, y su comparación con valores tabulados o convencionales, de modo que podemos hacer corresponder a cada modelo de cuenca concreta unos valores de n y c derivados de un hecho empírico cercano a la realidad física de que se trata, y no provenientes de otros países o de valores estandarizados. De cualquier manera, gracias al infatigable trabajo de las Divisiones Hidrológico-Forestales, no faltan cuencas cuya corrección está iniciada; al mismo tiempo, debido al brusco e injustificado descenso que las inversiones en hidrología forestal han padecido en nuestro país, tampoco faltan cuencas donde la corrección no ha sido terminada. De este modo, es muy probable que la principal utilidad actual de esta fórmula sea el cálculo de las pendientes de compensación dentro de cuencas con corrección incompleta.

Si sólo tenemos dos puntos, entonces no podemos hallar nada más que una ecuación con dos incógnitas, y por tanto infinitas soluciones. En ese caso, podemos tratar de resolver este problema introduciendo un valor convencional de "C". Al comprobar la forma de las fórmulas empíricas de relación exponencial entre el caudal y la superficie de la cuenca, observamos que el valor del coeficiente C oscila entre 0,5 y 0,8, pudiendo llegar al valor de 0,9 en cuencas pequeñas. A falta de datos, se puede usar el valor C=0,6 ("fórmula de Zapata") como índice medio. De este modo, al menos tendremos dos valores de "n" que podemos comparar, y que no provienen de convenciones. La fórmula de Pérez-Soba, con valor C=0,6, adopta la siguiente expresión:

$$j = jo \bullet e^{-1{,}43 \bullet n \bullet (x-xo)} \bullet \left(\frac{b}{bo}\right)^{0{,}86} \bullet \left(\frac{Ao}{A}\right)^{0{,}51}$$

Si tenemos sólo un punto, entonces, aunque hiciéramos la suposición anterior, resulta que no conocemos el valor de "n". Esta dificultad se puede salvar acudiendo a los valores tabulados de n en función del tipo de materiales que constituyen el lecho, y el coeficiente de desgaste que les corresponde según Schoklitsch (López Cadenas, 1998), pero se entraría ya en una dinámica de convenciones tal que este método de cálculo de la pendiente de compensación por comparación no ofrecería más ventaja (que, de cualquier manera, no es pequeña) que la de servir de comparación a los valores obtenidos teóricamente, ya que no tenemos modo de calcular los valores de n y c más que por convención o por tabulación.

6. BIBLIOGRAFÍA

FERNÁNDEZ DE CASTRO, ÁLVARO, 1947. "Estudio del movimiento del agua cuando lleva arrastres sólidos y determinación de la pendiente de compensación". *Montes. Publicación de los Ingenieros de Montes*, nº 18, pp. 546-550.

FERNÁNDEZ DE CASTRO, ÁLVARO, 1948. "Estudio del movimiento del agua cuando lleva arrastres sólidos y determinación de la pendiente de compensación". *Montes. Publicación de los Ingenieros de Montes*, nº 19, pp. 53-58.

GARCÍA NÁJERA, JOSÉ MARÍA, 1962. *Principios de hidráulica torrencial. Su aplicación a la corrección de torrentes.* Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE), Madrid, 350 pp.

LÓPEZ CADENAS DE LLANO, FILIBERTO, 1965. *Diques para la corrección de cursos torrenciales y métodos de cálculo.* Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE), Madrid, 228 pp.

LÓPEZ CADENAS DE LLANO, FILIBERTO (Dir.), 1998. *Restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de la erosión.* Ministerio de Medio Ambiente, TRAGSA, TRAGASATEC y Mundi-Prensa, Madrid, 945 pp.

MINTEGUI AGUIRRE, JUAN A., 1990. *La ordenación agrohidrológica en la planificación.* Servicio de Publicaciones del Gobierno Vasco, Vitoria, 306 pp.

MINTEGUI, JUAN ÁNGEL y ROBREDO, JOSÉ CARLOS, 1993. *Métodos para la estimación de los efectos torrenciales en una cuenca hidrográfica. Manual para un programa básico* Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid, 88 pp.

THIERY, E., 1914. *Restauration des montagnes, correction des torrents et reboisement. Librairie* Polytechnique Beranguer, Paris y Lieja, 480 pp.