

Leyes hidrográficas

I

Las leyes científicas, cuyo cuerpo orgánico es la ciencia, representan la síntesis de fenómenos observados aisladamente y cuya generalización y ordenación conduce a su mejor conocimiento sistemático y también a la comprobación y deducción de nuevos fenómenos.

Estas leyes científicas, cuyo último sentido está vinculado a los resultados de su aplicación, llegan a establecerse como consecuencia de principios generales, cuyo fundamento son aquellos postulados esenciales al conocimiento, incluidos en la categoría de hipótesis universalmente admitidas.

En todo orden de conocimientos así establecido, al enunciado de las hipótesis debe suceder, para que el sistema sea puramente científico, la deducción íntegra, por el camino de una figura lógica, de todas las leyes que en su síntesis se involucran.

No pudiendo esto conseguirse más que por el razonamiento matemático, por este medio habrán de desarrollarse las hipótesis admitidas, para deducir las leyes que las expresen, y para lo cual es esencial la posibilidad del enunciado matemático de dichas hipótesis.

Una vez conseguido esto, la investigación de la totalidad de leyes o normas contenidas en cada hipótesis se encierra en el estudio de una expresión matemática, de la que puedan deducirse, con las características mensurables inherentes a estas expresiones y en forma de cuerpos de un sistema, los grupos de fenómenos que cada hipótesis general contiene.

Siguiendo los conceptos anteriores, y a título de ejemplo, tratamos a continuación de deducir las principales leyes hidrográficas de las cuencas de los ríos, partiendo de la expresión de la admitida hipótesis geofísica de la formación erosiva de los valles.

II

El fenómeno hidrográfico fundamental de la formación de los valles se explica como de origen tectónico y de desarrollo erosivo. La ubicación de un valle la determinan, según esto, los movimientos orogénicos, y su formación es debida a la erosión producida por las enormes precipitaciones acuosas y escorrentías consiguientes, en las épocas de configuración de nuestro planeta. La orogenia, podríamos decir, es la herencia, y la erosión los caracteres adquiridos, cuyo conjunto forma la personalidad de una cuenca hidrográfica.

Aislada la hipótesis geofísica de la erosión como la principal causa fundamental de la configuración superficial de la corteza terrestre, expresando en forma matemática esta energía, podremos obtener, por el estudio de dicha expresión, las leyes que como consecuencia de dicha hipótesis ordenen los diversos fenómenos que observamos en la hidrografía de las cuencas.

La acción erosiva de las lluvias ancestrales debe considerarse descompuesta en dos términos: el de la acción de choque producida directamente por su precipitación y la acción de erosión propiamente dicha producida por la escorrentía del caudal precipitado,

con la disolución y suspensión de los elementos proporcionados a la masa hidráulica, en la desintegración de los terrenos producida en el choque de las precipitaciones acuosas. El segundo factor erosivo es el que interviene en la configuración de las cuencas dándoles sus facies características, dependiendo en parte también del primero, únicamente la intensidad de su acción.

La fuerza erosiva de las corrientes líquidas es debida a la energía de gravedad, que actúa por intermedio de la fuerza viva, cuya conocida expresión es $\frac{1}{2} MV^2$. La masa de la corriente es proporcional a su caudal y la velocidad a la pendiente de su cauce.

Esta proporcionalidad no es exacta, porque depende de la densidad del agua, por una parte, que puede variar considerablemente al llevar materiales en suspensión, y por otra parte, la velocidad depende también, además de la pendiente, de la masa de la corriente. Como primera aproximación en nuestros cálculos consideramos las condiciones elementales enunciadas, prescindiendo de estos factores modificativos.

III

CONFIGURACIÓN VERTICAL. — En el período de las lluvias ingentes, en que la fuerza erosiva era de una magnitud incomparablemente superior a la que los ejemplos de la época actual nos presenta, dicha fuerza podía determinar configuraciones de la corteza terrestre y determinar la formación de las cuencas que hoy podemos observar.

Por la directriz dibujada para fondo de la cuenca discurren al presente los ríos actuales, esquema solamente de las corrientes que formaron su valle. Para estudiar geométricamente su perfil le referiremos longitudinalmente a ejes cartesianos (x, y) , en los cuales la pendiente vendrá expresada por $\frac{dy}{dx}$, siendo x proporcional a la longitud e y a la altitud de la corriente. Como primera aproximación y en el período inicial de formación de la cuenca podemos considerar el caudal proporcional a la longitud, ya que este caudal se forma por la aportación de las escorrentías y la precipitación directa. La fuerza erosiva modeladora de la cuenca tendrá por expresión la de la fuerza viva de la corriente, que es:

$$E = \frac{1}{2} MV^2 = Q \cdot x \cdot \left(\frac{dy}{dx}\right)^2$$

En la constante Q se involucran factores que dependan de la configuración tectónica inicial y de la intensidad de las precipitaciones, además del factor corrector de escala para responder a la igual expresada.

La configuración del perfil del río responde a un régimen de equilibrio entre la fuerza erosiva y la resistencia del terreno a la erosión, la cual es función paramétrica de la constitución geológica del terreno, que representaremos por C .

Cuando la igualdad

$$Q \cdot x \cdot \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = C$$

tiene lugar, se llega a la forma de equilibrio. Por tanto, la ecuación diferencial del perfil del río será:

$$Q \cdot x \cdot \left(\frac{dy}{dx}\right)^3 - C = 0$$

y en términos finitos:

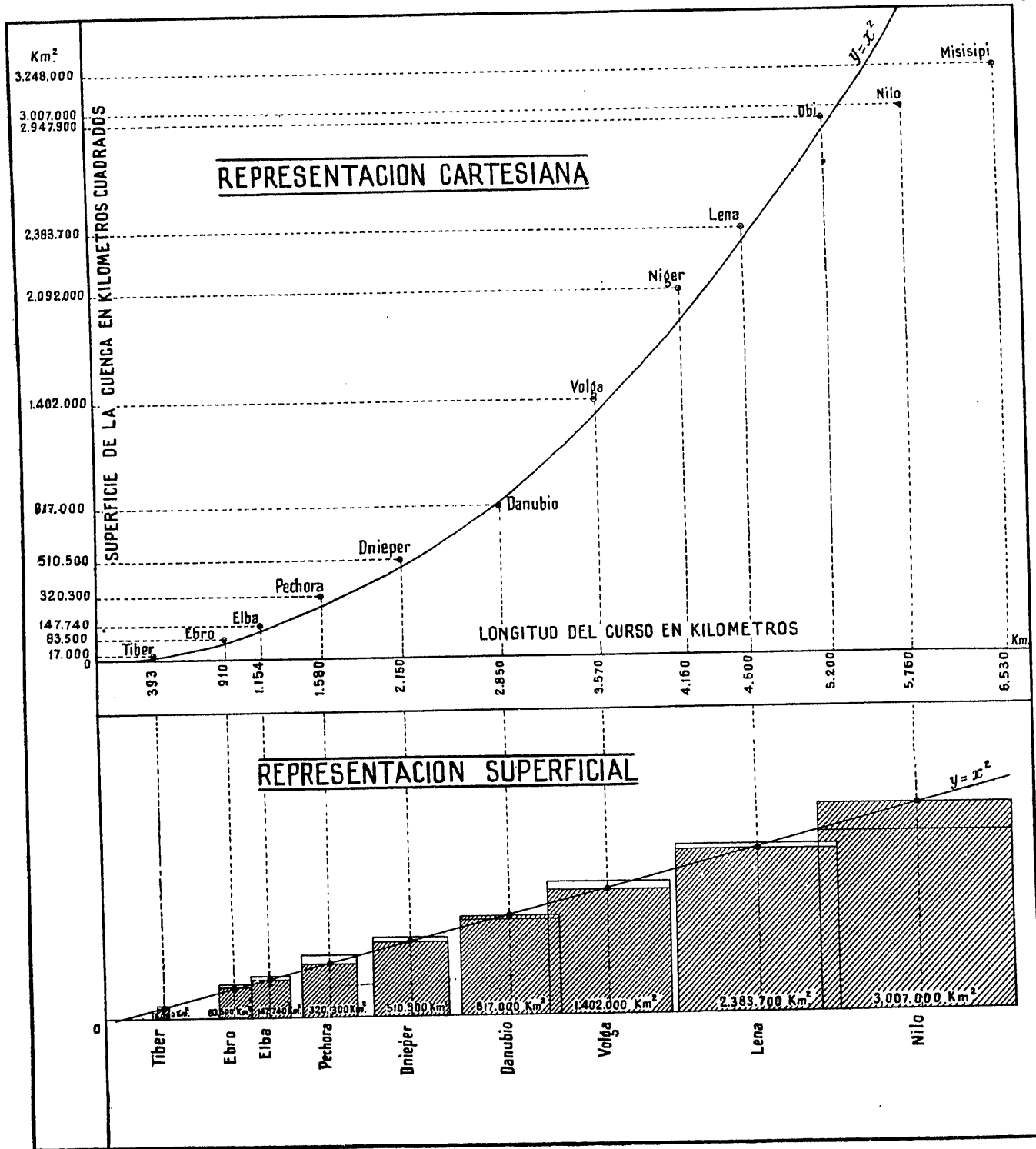
$$y = -\frac{2}{3} \sqrt{\frac{C}{Q}} x^{-\frac{2}{3}} + A$$

La constante de integración A queda eliminada al variar a ejes coordenados pasando por el origen del río, pudiendo quedar como expresión general del perfil de éste:

$$y = -\frac{K}{x^{\frac{3}{2}}}$$

Para llegar a esta expresión hemos supuesto que el caudal resultaba proporcional a su distancia al origen, lo cual no puede admitirse más que en el período primitivo, que podríamos llamar de nacimiento

VARIACION DE LA SUPERFICIE DE LAS CUENCAS EN FUNCION DE LA LONGITUD DE LOS RIOS PRINCIPALES



de las cuencas. En el período de formación de éstas ya se ensanchan, llegando su extensión superficial y, por tanto, el caudal del río proporcional al cuadrado de su longitud, como se comprueba en los gráficos adjuntos.

En virtud de esta rectificación, la fórmula general del perfil del río queda en definitiva, siguiendo cálculos idénticos a los anteriores, reducida a

$$y = -\frac{K}{X^2}$$

Esta fórmula expresa la siguiente ley de *decremento de la pendiente*:

La pendiente de los ríos decrece desde el origen a la desembocadura proporcionalmente a la inversa del cuadrado de su longitud.

En el tramo que podemos llamar de formación de los ríos suele variar fuera de la proporción indicada la pendiente de éstos, porque las condiciones hipotéticas determinantes de la erosión que han servido para encontrar la expresión de ésta son modificadas, por no tratarse de una sola cuenca, sino de varias cuencas confluentes, y, por tanto, la ley de variación de caudales no puede cumplirse.

CONFIGURACIÓN VERTICAL, RELATIVA. — El fenómeno erosivo, aparte de la variación continua, siguiendo la ley anteriormente enunciada, presenta las discontinuidades dependientes de la naturaleza de la formación geológica, cuya resistencia determina la magnitud absoluta de la constante K . En los terrenos flojos, la pendiente con la que se llega al término de equilibrio es evidentemente menor para un caudal determinado, y al contrario en los terrenos resistentes.

Este fenómeno, siendo independiente de la magnitud absoluta de la corriente, es el que se observa actualmente en todos los ríos, cuyos tramos de pendiente se desarrollan en los desfiladeros rocosos con escarpadas márgenes y los remansos en los amplios valles.

Las variaciones de pendiente de los cursos naturales de agua cumplen, por consiguiente, la siguiente *ley de la variación de pendiente*:

Las discontinuidades de la pendiente de los ríos son debidas a la distinta resistencia de los terrenos que atraviesan, correspondiendo los tramos de mayor pendiente a los estrechamientos del valle y a las formaciones más resistentes.

IV

CONFIGURACIÓN HORIZONTAL. — La variación del fenómeno erosivo produce el fenómeno sedimentario al sobrevenir una disminución de la velocidad de la corriente, debida a una disminución del caudal. La sedimentación refuerza los efectos de la erosión, ensanchando y aplanando los valles a través de terrenos blandos y no influyendo en los duros por la mayor velocidad relativa de la corriente, que no permite tenga lugar dicha sedimentación, haciendo coincidir los tramos de menor pendiente con los ensanchamientos y los de mayor pendiente con los estrechamientos de los valles.

Las anteriores consideraciones nos permiten enunciar la siguiente *ley sobre la configuración horizontal relativa* de los valles, que puede considerarse como

complementaria de las anteriores referentes a la configuración longitudinal:

La anchura de un valle varía en razón inversa a la pendiente del río que por su fondo discurre.

V

AFLUENTES. — De la fórmula que expresa la pendiente de un río principal, anteriormente indicada:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{K}{x}$$

y para el afluente

$$\frac{dy'}{dx'} = \frac{K'}{x'}$$

considerando que en el punto de afluencia x es siempre, por definición de río principal, mayor que x' , se deduce la *ley de Penck o de la pendiente de los afluentes*:

El perfil longitudinal de un río de primer orden envuelve al de todos sus afluentes.

VI

CONFIGURACIÓN TRANSVERSAL. — El predominio del fenómeno erosivo directo o del efecto de sedimentación determina la configuración transversal de los valles en V o en U ; pero esta sección no resulta simétrica porque en dicha configuración transversal interviene también, en algunos casos, la fuerza de reacción de la masa líquida contraria a la rotación de la tierra, ocasionando dicha fuerza el desplazamiento hacia el Oeste de la corriente dentro de su cauce.

Este efecto se presenta en los tramos orientados en dirección aproximada Norte-Sur, por ser en los que alcanza la fuerza indicada su máximo de intensidad. En los ríos orientados en dirección de los paralelos, no existiendo esta fuerza, el efecto resulta nulo, y en los de direcciones intermedias está reducido al efecto de la componente activa que por su proyección resulta

Las disimetrías de los valles pueden ordenarse, según esto, con arreglo a la siguiente ley de la *desviación de las corrientes*:

Los valles de los ríos que según la dirección de los meridianos son de pendientes transversales desiguales, correspondiendo la mayor a su margen occidental.

VII

FENÓMENOS DE DESEMBOCADURA. — Las leyes anteriormente enunciadas se cumplen también en el punto particular correspondiente al desagüe de los ríos en el mar, dando lugar a las características geográficas de las desembocaduras.

Consecuencia de la *ley de variación de pendiente* y de su complementaria sobre la *configuración horizontal relativa* es la coincidencia de los desagües en ría o bahía en las costas abruptas, debido a la mayor resistencia del terreno.

Análogamente, los desagües en costas suaves a causa de la menor resistencia del terreno y menor pendiente del río se producen las sedimentaciones, originando las desembocaduras en delta.

En el desagüe al mar de los ríos principales se

cumple también la ley de desviación de la corriente, debido a la fuerza de reacción contraria al movimiento de rotación terrestre. Esta fuerza produce en las desembocaduras la curvatura hacia el Este de la dirección de la corriente, como línea de equilibrio que acuerda el efecto nulo que dicha fuerza de reacción tiene en el mar, y el efecto máximo que alcanza a cierta distancia de su desembocadura.

En los ríos de dirección oblicua a la meridiana esta fuerza queda reducida a su componente sobre dicha dirección y el efecto es menor, aunque también notable.

Las leyes anteriores, deducidas de la hipótesis

erosivo-sedimentaria de la formación de los valles de los ríos, modificada por la fuerza de inercia de las corrientes, se comprueban en la realidad, siendo las excepciones muy interesantes, por corresponder a casos en que no se han producido las hipótesis admitidas, cuyo análisis y estudio expondremos en breve a la consideración y rectificación de nuestros más capacitados compañeros, por entender que, a pesar de la imposibilidad, por ahora, del estudio cuantitativo exacto de las variables que consideramos, por ser tan grande su número, puede resultar en muchos casos de interés, no solamente este estudio teórico, sino las aplicaciones prácticas que de él se deducen.

A. G. VEDOYA
Ingeniero de Caminos

Electrificación de ferrocarriles

Comentario necesario en propia defensa.

En los últimos números de esta REVISTA he publicado cuatro artículos sobre la conveniencia de la electrificación de ferrocarriles. La opinión y la crítica serenas dirán si en mis alusiones, juicios y palabras hay algo que se aparte de la exquisita corrección a que siempre ajusté mi conducta. De aquí mi asombro ante el inesperado y brusco ataque del Sr. Lucia, que, sin esperar la terminación de mi trabajo, arremete altivo contra mí, calificando mi persona y opiniones en términos desdeñosos, que no pienso recoger. Sólo me haré cargo de lo que al público de esta REVISTA interesa, que es la defensa de las ideas expuestas.

En mis artículos aparecen las conclusiones siguientes:

a) Todos los métodos expuestos (el de Parodi, el de Lucia y el mío) son necesariamente aproximados.

b) De las fórmulas a que se llega, me parece, como es natural, más completa la mía, porque, conservando la sencillez y expedición del método, figuran en ella las verdaderas características de la explotación ferroviaria, permitiendo además dar una generalidad al método, imposible de alcanzar con las otras dos. Esto lo he demostrado en mis artículos, sin que la impaciencia del Sr. Lucia le haya permitido leerlos con el detenimiento requerido.

c) Respecto a exactitud, afirmo que incluyo en la mía los gastos de material y tracción distintos del de combustible.

d) Mis gráficos son de general aplicación, tan exactos o aproximados como los de Parodi y Lucia; pero con esa nueva cualidad.

¿Qué dice acerca de todo esto el Sr. Lucia? Pues cosas que apenas guardan relación con mis conclusiones. Veamos:

Primera. Habla el Sr. Lucia de la prioridad en las fórmulas. No he planteado esta cuestión en mis artículos; sólo de pasada, relativamente a los gastos de material y tracción, que he hecho figurar en la condición de mínima economía, puedo invocarla; pero sin dar al hecho la importancia que el Sr. Lucia le atribuye.

Segunda. Da el Sr. Lucia gran valor a la originalidad de sus escritos, que, por mi parte, no he discutido. La originalidad es un mérito positivo, pero de poca calidad en la técnica moderna. Al insistir acerca de este tema el Sr. Lucia, en su escrito, parece que yo he tratado de encubrir lo que haya tomado de él en el desarrollo de mis ideas, y no es así. Las personas que hayan examinado, no sólo mis artículos actuales, los de 1927 y el extenso trabajo que presenté al Instituto de

Ingenieros Civiles—invoco los nombres de los señores Cordech, Sánchez Cuervo y conde de Fontao—dirán si no he citado, siempre que procedía, la labor del señor Lucia, y a la vez, y esto sí que lo creo importante, si en la concepción de mi trabajo, su desarrollo y su generalidad hay algo que guarde relación con lo hecho por el Sr. Lucia.

Sébase de una vez para siempre que yo enfoqué el problema de la economía de una electrificación de un modo general, distinto completamente al seguido por el Sr. Lucia; tanto, que permite obtener gráficos de general aplicación, deducir consecuencias generales y demás cualidades, en lo que, después de mis artículos, no es necesario insistir. Al desarrollar los términos de la ecuación fundamental de mínima economía a que yo llegaba, utilicé lo hecho por el Sr. Lucia, por considerarlo bien orientado; conservé incluso sus notaciones, para que no hubiera lugar a dudas, y reiteré en varios lugares su legítima procedencia. Nada de completar sus trabajos—aunque eso fuera honroso para mí—, porque el método que seguí no guarda relación con el suyo. Hubiera podido utilizar lo mismo los trabajos de Parodi, Balatroni o de cualquiera otro; pero preferí los de Lucia por las razones dichas, y no podía imaginar que esta conducta mía mereciera el apasionado comentario que el Sr. Lucia me dedica en el mismo número de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS en que publiqué un artículo pleno de corrección.

Tercera. Sobre la eficacia. Ignoro dónde habrá visto el Sr. Lucia que yo perseguía una exactitud. He insistido y recalado que todos los métodos tenían que ser forzosamente aproximados. Sólo he creído que hacía una modesta aportación a esta ciencia naciente que orienta los estudios sobre las economías de las electrificaciones, introduciendo en ellos una especificación verdad de dichas economías, no reduciéndolas a la debida al combustible, porque a veces las demás superan a ésta, como lo he probado con el ejemplo real de una línea. Y para puntualizarlo utilicé, robando horas al descanso, sin el menor estímulo de recompensa—que ni he tenido ni procuro obtener—, cuanto de un modo científico y digno de crédito se había publicado en todos los países. Creo que esto es más científico y, desde luego, menos cómodo que englobar la economía en un número para después aplicarlo a cualquiera línea, cuando tanto difieren en sus métodos de explotación. Tengo entendido que el eminente Parodi, en sus últimas conferencias en Barcelona, no sólo ha dado cifras coincidentes—no podía ser de otro modo, ya que nada he inventado—con las mías, sino que ha señalado la ne-