

PROYECTOS DE INVESTIGACION

ESTUDIO DEL EQUILIBRIO EN RIOS

Oscar J. Mesa S.

Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia

Por qué un río, en un tramo dado, tiene la pendiente que tiene y no otra mayor o menor? Normalmente, el ingeniero hidráulico no se hace esta pregunta. Para él, la pendiente y demás propiedades geométricas del río son datos dados y fijos. Probablemente, esta forma de acercarse al problema sea válida de acuerdo a la escala de tiempo de interés para sus problemas. Para un geólogo sin embargo, la pregunta tiene mucho sentido, pues está relacionada con la tasa de levantamiento de la cordillera, la tasa de erosión, la antigüedad de los depósitos y demás posibles síntomas e hipótesis sobre la evolución del valle. La escala de tiempo de interés para el geólogo es mucho mayor, en consecuencia, la pendiente deja de ser constante y se vuelve digna de ser explicada. Hay sin embargo otra escala de tiempo intermedia, años o decenas de años, en la cual el río tiene suficiente tiempo para modificar su propio cauce, mientras que otros eventos geológicos distintos a la erosión y depositación no alcanzan a ser significativos (Mackin, 1948). Esta escala permite el estudio del ajuste de la pendiente, la granulometría del material de fondo, el ancho y demás variables hidráulicas, al caudal líquido y sólido que debe transportar el río.

Con el propósito de avanzar en el estudio de ese ajuste se emprendió el proyecto de investigación.

Los objetivos planteados eran:

- Formular un modelo matemático que represente las relaciones de equilibrio en ríos y las respuestas que se producen ante perturbaciones de dicho estado.
- Identificar físicamente los parámetros del modelo desarrollado.

- Desarrollar procedimientos analíticos y/o numéricos para solucionar las ecuaciones del modelo en y cerca al equilibrio.

- En forma secundaria y dependiendo del éxito alcanzado en los objetivos anteriores, se tratará de aplicar el modelo a casos específicos de ríos colombianos.

De manera satisfactoria se desarrolló el trabajo, cuyos resultados se presentan en detalle en el informe (Mesa, 1990) el cual comprende una completa revisión de literatura; un análisis de la escala de tiempo, con la correspondiente propuesta del factor de conversión de escala de tiempo del modelo, parámetro fundamental del modelo y que apunta al segundo objetivo planteado. También se presenta en informe el modelo desarrollado, se analiza el estado de equilibrio y los estados transitorios, se presentan y se examinan los resultados y finalmente se hace una discusión detallada y exhaustiva de las conclusiones del trabajo (ver también Angel y Mesa, 1990).

Se espera que el presente trabajo sea un aporte al conocimiento cuantitativo del comportamiento de las corrientes naturales, con aplicaciones posibles a: estudios de estabilidad en el diseño de canales, cuantificación de efectos sobre corrientes producidas por obras civiles, estudios sobre control de ríos, estudios geológicos que requieran mayor precisión sobre historia geomorfológica y estudios hidrológicos.

Las siguientes conclusiones se desprenden del trabajo de investigación:

- Se desarrolla un modelo cuantitativo para estudiar el comportamiento de corrientes naturales (sistema lecho-flujo) a una escala de tiempo geomorfológico.
- Las variables independientes del modelo son los influjos de caudal sólido y líquido a la corriente y la altura del nivel base en el extremo aguas abajo. La variable dependiente es la altura del lecho. En consecuencia, el modelo permite cuantificar el perfil (altura vs distancia horizontal) de equilibrio de la corriente y estudiar la evolución de dicho perfil producida por cambios en alguna de las variables independientes (caudal líquido, sólido o nivel base).
- El modelo está conformado por las ecuaciones de conservación de masa y de momentum para el agua y el sedimento.
- La ecuación de continuidad de la cantidad de agua se trabaja a un nivel externo, habida cuenta que el caudal es una variable independiente. Se asume pues que las variaciones locales de almacenamiento de agua en un tramo corto (variaciones en la profundidad) ocurren en períodos de tiempo muy cortos y que por tanto no tienen efecto significativo sobre el fenómeno de interés. Queda entonces sólo el incremento (o decremento) del caudal asociado al aporte hidrológico de la cuenca.
- Es bien sabido que el caudal es una variable que tiene gran variabilidad temporal, lo que incluso justifica el empleo de métodos estocásticos. Además, se sabe que de la gama de descargas sólo las suficientemente grandes pero no muy infrecuentes tienen un efecto duradero importante en el perfil. Esto motivó la modelación del caudal mediante la descarga a sección llena (aproximadamente la media de la creciente anual y que tiene un período de retorno del orden de dos años).
- Asumir en el modelo que en un punto dado de la corriente, el caudal es invariante en el tiempo e igual a la media de la creciente anual, es equivalente a tener una escala de tiempo deformada, como una película en la cual las cosas suceden más rápido que en la realidad. Mediante la curva de duración de caudales se propone un método para calcular el factor de conversión necesario entre los tiempos en el modelo y los tiempos en la realidad.
- La continuidad de sedimento sí requiere una consideración más detallada, puesto que los cambios locales de almacenamiento (agradaciones o degradaciones del lecho) constituyen los fenómenos de interés.
- La ecuación dinámica para describir el movimiento del agua se simplifica a una ecuación de fricción (Manning o Chezy). Nuevamente, la escala de tiempo en la que se trabaja justifica esto.
- El transporte de sedimentos se representa mediante la ecuación de Einstein-Graff. A pesar de que existen muchas otras y de la ausencia de los umbrales propios del transporte de sedimentos, esta ecuación es aceptada en la literatura como una ecuación general y que captura la esencia física principal del fenómeno.
- Sin embargo, el modelo simplifica aún más el transporte de sedimentos al considerar que el material está conformado en un sitio dado por granos de un tamaño único. Esta suposición no se acomoda a la realidad reconocida de la gran variabilidad granulométrica del material sólido que transporta una corriente en una sección dada. La justificación de esta suposición es meramente práctica, ante la complejidad del problema. Esto puede impedir reconocer relaciones importantes entre formas de lecho y/o variabilidad temporal de los caudales, lo cual tendría una importancia innegable en hidrología.
- Longitudinalmente, sí se tiene en cuenta la variación del tamaño del sedimento. Esto se modela exclusivamente a través del fenómeno de la abrasión. Se asume que a la escala de tiempos en la que se está trabajando el transporte selectivo (sorting) no tiene efecto importante. Sin embargo, se reconoce que habría que considerar la meteorización, migración lateral y el transporte selectivo en un modelo más realista.
- El modelo trivializa además la dimensión transversal del problema. Por motivos prácticos y ante la complejidad del problema no se tiene en cuenta la migración lateral y el ajuste del ancho a la carga sólida y líquida que transporta la corriente. Se determina usando la relación empírica de Leopold et al (1964) que lo expresa en función del caudal líquido. En este aspecto el modelo comparte esta limitación con los demás reportados en la literatura y por tanto no aporta en la dirección de resolver un problema fundamental en geomorfología: debido a que existen más variables que ecuaciones hay un principio físico por descubrir en el equilibrio geomorfológico de corrientes. Esta ausencia es llenada aquí por la ecuación empírica arriba mencionada (ver Leopold et al, 1964).
- El modelo obtenido del sistema lecho-flujo es un sistema estable con un único punto (perfil) de equilibrio.
- Se obtiene una expresión analítica para la forma del

perfil de equilibrio como función del aporte de caudal sólido y líquido de la cuenca, el tamaño y peso específico del sedimento y el ancho de la corriente (ver sección 5.1).

- La anterior relación obtenida a partir de principios físicos fundamentales concuerda básicamente con relaciones empíricas clásicas como las de Shulits (1941), Rubey (1952), Lane (1955) y Yatsu (1955). Esto se toma como una demostración indirecta de lo apropiado de las ecuaciones y suposiciones del modelo.

- Sin embargo, se encuentra una discrepancia con los resultados de Shulits (1941). Este justificó un decrecimiento exponencial de la pendiente hacia aguas abajo como resultado de la disminución del tamaño del sedimento por abrasión. Según su análisis la constante que multiplica a la distancia en el exponente debería ser la constante de abrasión por peso. Al aplicar su teoría a datos del Mississippi encontró que el valor de decrecimiento de la pendiente era menor, motivo por el cual se vió obligado a dar explicaciones dudosas acerca de la dureza del material. En este modelo se muestra que la constante de decrecimiento exponencial de la pendiente es una fracción de la constante de abrasión del material, lo cual se acomoda mejor a las observaciones empíricas. Para el caso del Mississippi la fracción es del orden de 0,17.

- La concavidad hacia arriba (disminución de la pendiente hacia aguas abajo), que normalmente se observa en la mayoría de las corrientes naturales se explica como la combinación de diversos factores: incremento del caudal y disminución del tamaño del sedimento. Sin embargo, se muestra cómo es posible obtener perfiles con la curvatura contraria asociados a disminución de caudal a tasas mayores que un valor crítico dependiente de la constante de abrasión. Esto refuta algunas ideas erróneas de que tales perfiles están necesariamente asociados a estados alejados del equilibrio o a la presencia de controles geológicos, tales como afloramientos rocosos.

- El modelo muestra que el sistema lecho-flujo retorna a la posición de equilibrio de manera asintótica exponencial ante perturbaciones. Esto no se pudo mostrar analíticamente, sino mediante el empleo de un programa de computador.

- Se desarrolló el programa de computador "PERFIL" que permite la integración numérica del perfil de equilibrio en casos generales (discontinuidad en el tamaño del sedimento) y la integración de las ecuaciones

transitorias para estudiar la evolución del perfil ante cambios en los datos del problema (caudal sólido y líquido, altura del nivel base y tamaño del sedimento).

- El programa fue utilizado para un conjunto de casos típicos obteniéndose soluciones que concuerdan cualitativamente con lo reportado en la literatura.

- El programa puede ser utilizado para obtener de manera preliminar el posible comportamiento de una corriente ante cambios en las variables independientes producidos por acciones antrópicas o perturbaciones naturales.

- A pesar de las simplificaciones en el modelo, este mantiene todavía un nivel de complejidad tal como para impedir un tratamiento analítico del problema.

- Como pasos siguientes en esta investigación, aparecen claramente el relajar las suposiciones principales referentes a la dimensión transversal, el empleo de un único tamaño de material y el uso de un solo caudal representativo y determinístico. En ese orden, estas suposiciones deben cambiarse por otras menos restrictivas. Se espera que en el proceso se pueda responder a preguntas tan fundamentales como aquella acerca de la posibilidad de leer en la geometría de las corrientes naturales información sobre distribución probabilística de diversas variables hidrológicas (caudal). Ilusión ésta bastante pertinente para medios como el colombiano con tanta escasez de información hidrológica.

REFERENCIAS

- Angel, E. y Mesa, O. J. Equilibrio en Perfiles de Rios. *Memorias del IX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*. SCIA, Manizales, 346-357. 1990.
- Lane, E. W. The importance of fluvial morphology in Hydraulic Engineering. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 81, Paper 745 1-17, 1955.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G. and Miller, J. P. *Fluvial Processes in Geomorphology*. Freeman, San Francisco. 522p. 1964.
- Mackin, J. H. Concept of the graded river. *Bulletin of the Geological Society of America*, 59, 463-511. 1948.

- Mesa, O. J. *Estudio del Equilibrio en Rios*. Informe final no Publicado del Proyecto de Investigación Patrocinado por COLCIENCIAS. Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín, 1990.
- Rubey, W. W. Geology and mineral resources of the Hardin and Brussels quadrangles (In Illinois). *United States Geological Survey Professional Paper* 218. 1952.
- Shulitz, S. Rational equation of riverbed profile. *Transactions of the American Geophysical Union*, vol 22, 622-630. 1941.
- Yatsu, E. On the longitudinal profile of the graded river. *Transactions of the American Geophysical Union*, 36, 655-663. 1955.