

Antropovsky, V. I.; Batista Silva, J. L. (1979): Estudio de los procesos que ocurren en los cauces fluviales. Voluntad Hidráulica N° 51, INRH, ISSN: 0505-9461, La Habana, pp. 7–15.

RESUMEN

Se presentan los fundamentos de la teoría hidromorfológica de los procesos en el cauce y se analizan algunas características de los ríos cubanos.

Introducción

El rápido crecimiento del aprovechamiento de nuestros ríos, el desarrollo de las construcciones hidrotécnicas y la explotación de distintos tipos de obras hidráulicas nos obliga a profundizar en el conocimiento de las características de los cauces fluviales y en las leyes que rigen sus cambios. Sin embargo, el método tradicional hidrodinámico no es recomendable para dar respuesta a las interrogantes relacionadas con los procesos en el cauce, debido a que el mismo se basa en el modelo de cauces fluviales como canales de secciones trapezoidales o parabólicas (y de cauces con llanuras de inundación en forma de dos canales paralelos), apoyándose, además, en la ecuación del movimiento de un líquido y en el balance de los azolves transversal y longitudinalmente. Son ejemplos de lo planteado, la gran cantidad de fallas técnicas que ocurren, tales como el azolvamiento de una toma de agua, la destrucción de líneas conductoras, de cables de comunicación de líneas de transmisión eléctrica, etc. Generalmente, estas fallas se les achacan a desastres naturales, aunque, en realidad, esto no es más que un desconocimiento del fenómeno de los procesos que ocurren en los cauces.

Precisamente, el surgimiento de la llamada teoría hidromorfológica de los procesos en el cauce (1,3), que se fundamenta en la Geomorfología, la Hidrodinámica y la Hidrología, es una consecuencia de lo anterior. Debemos contar, en este caso, con la presencia en los ríos, de una serie de formaciones morfológicas continuas, distintas por su magnitud y formación y que respondan a una estructura hidrodinámica moderada. Con este método, tenemos la posibilidad de ampliar el círculo de tareas a resolver y, a la vez, mejorar la exactitud de las soluciones.

FUNDAMENTOS DE LA TEORIA HIDROMORFOLOGICA DE LOS PROCESOS EN EL CAUCE

Al formular la teoría hidromorfológica, se ha prestado especial atención al planteamiento de la tarea y al procesamiento de los principios y bases iniciales fundamentales (1,3).

Por procesos en el cauce se entienden los cambios de la estructura morfológica del cauce y de la llanura de inundación que tienen lugar por la acción de la corriente fluvial. Todas las deformaciones en el cauce y en la llanura de inundación se dividen en irreversibles en una sola dirección, relacionadas con el proceso de desarrollo del río durante siglos o su adaptabilidad a los cambios de las condiciones existentes (por ejemplo, si se ha construido un embalse) y en deformaciones cíclicas reversibles relacionadas con el proceso del movimiento de los azolves.

Por azolves entendemos las partículas sólidas que pueden “caer” desde la corriente y

formar parte de los sedimentos del fondo del cauce o de la llanura de inundación.

Los azolves se dividen en sedimentos en suspensión y de arrastre o de fondo. Los azolves de fondo son aquéllos que se encuentran estáticos, bajo fuerzas hidrodinámicas o que pueden estar cerca del fondo en estado de saltación. El movimiento de los azolves de fondo generalmente es acompañado por la formación de pequeñas “dunas”. Los sedimentos en suspensión que se encuentran en la corriente pueden seguir en ese estado durante mucho tiempo y moverse a una distancia suficientemente grande, debido a la pulsación de la corriente, después de lo cual precipitan al fondo mezclándose con los de arrastre o formando una fina capa en los lugares en que la velocidad de la corriente disminuye.

Cuando en un río ocurre solamente una deformación reversible (deformaciones producidas por el transporte de los azolves), tenemos un estado de equilibrio dinámico.

La mayor parte de los ríos que tienen un régimen natural, se encuentran en un estado cercano al equilibrio dinámico. Al aumentar o disminuir el escurrimiento sólido, que “saca” al río del estado de equilibrio dinámico, ocurre una transformación tal del cauce y de la llanura de inundación que se restablece el equilibrio dinámico.

Lo fundamental en la teoría que analizamos es el principio de la “modelación de las formas del cauce”, el cual permite dividir todos los tipos de cauces por niveles estructurales. Cada uno de los niveles estructurales están regidos por leyes y requieren su propia metodología de investigación, basada en los conocimientos y logros de una ciencia determinada. El principio de “modelación” y la determinación de niveles estructurales puede o no considerar las funciones continuas y su correspondiente aparato diferencial; solamente se definen los límites de su aplicación. Se distinguen los siguientes niveles estructurales: nivel del movimiento de partículas aisladas, microformas, mesoformas, macroformas y zonas morfológicamente homogéneas.

Al tratar el movimiento de partículas aisladas generalmente se analizan los procesos de la estabilidad de una partícula sólida en el fondo, las condiciones de su fluidez y desprendimiento, el mecanismo de saltación, el movimiento de la partícula en estado de suspensión y otros. Como métodos básicos investigativos quedan los métodos hidrodinámicos.

Microformas. Son pequeñísimas dunas de arenas que cubren el fondo del río y que determinan su rugosidad. Estas microformas pueden observarse en una corriente estacionaria uniforme y deben su origen al flujo macroturbulento. Las pérdidas de energía y el gasto sólido están relacionadas con esas microformas. Muchos trabajos se han realizado para analizar las microformas y su tipificación (4). Los principales métodos de investigación son las experiencias que se llevan a cabo en laboratorios hidráulicos.

Mesoformas. Estas son grandes acumulaciones de arena, de tamaño comparable al mismo cauce y que determinan la estructura interna del mismo. Un ejemplo de mesoformas lo constituyen los bancos de arenas (shoal). Dentro de los límites de estos aluviones ya podemos considerar la corriente uniforme. Debido a las grandes dimensiones que presentan las mesoformas, éstas tienen cierta capacidad de inercia, conservan su paso en el régimen hidráulico, no respondiendo a las condiciones de su

formación.

En relación con las variaciones estacionales del régimen del río, solamente se observan cambios en el plano vertical. De manera que el comportamiento de las mesoformas está relacionado con el movimiento no uniforme del agua en el cauce, ocurriendo los cambios estacionales en condiciones de movimientos no estacionarios. El transporte de las mesoformas se corresponde con desprendimientos locales y acumulaciones temporales de azolves que, a su vez, dependen del gasto de sedimentos de fondo o arrastre. El estudio de la morfología y la dinámica de las mesoformas es necesario para resolver innumerables tareas prácticas relacionadas con el aprovechamiento hidroeconómico de los ríos y las construcciones hidrotécnicas.

Las *macroformas* están compuestas por todas las formaciones del cauce y de las llanuras de inundación que definen el tipo de proceso en el cauce. En la composición de las macroformas, además de las formas del cauce y de las partes similares del banco arenoso del cauce (shoal), también podemos considerar los distintos tipos de llanuras de inundación. Como ejemplo de macroformas pueden servir los meandros y las correspondientes zonas de las llanuras de inundaciones.

Las macroformas son el producto de la interacción de los principales factores determinantes de los procesos en el cauce, a saber: el carácter de los escurrimientos líquidos y sólidos y los factores que delimitan el desarrollo de los procesos en el cauce (en los planos horizontal y vertical). Así, podemos decir que el estudio de las macroformas, que tienen un gran valor práctico, está basado, ante todo, en la Hidrología, Geomorfología y Geología. Un tramo del río que esté formado por una cadena de macroformas de un mismo tipo, constituye un tramo morfológicamente homogéneo.

Se distinguen (1,3) los siguientes tipos de procesos en el cauce (tipos de macroformas):

- a) pequeñas dunas en cintas,
- b) bancos de aluviones en el cauce (o cauce de varios brazos)
- c) bancos de arena (shoal)
- d) formación de meandros definidos
- e) meandros libres
- f) meandros no definidos
- g) llanura de inundación de muchos brazos

Los tipos de procesos en el cauce se han colocado por el orden de la variación lineal–direccional de la capacidad de transporte. En cada nuevo tipo se señala la aparición de nuevas formas de transporte de sedimentos. A cada tipo de proceso en el cauce le corresponden sus propias características y esquema de desarrollo de las deformaciones.

- a) *El tipo de pequeñas dunas en cintas* se encuentra en los tramos relativamente

rectos o poco sinuosos, y el mismo se caracteriza por la presencia en el cauce de una cadena única de pequeñas “dunas” moviéndose lentamente con un paso que supera considerablemente el ancho del río. Las deformaciones del cauce consisten en el transporte de los aluviones corriente abajo y en la variación de la lámina de aluviones por temporadas.

En el período de estiaje, algunas áreas de aluviones pueden sobresalir a la superficie y formar una cadena de “isletas” de arenas. Las características más importantes del tipo de pequeñas dunas son: el paso λ , la lámina Δ y la velocidad de los aluviones C .

b) *Los bancos de aluviones en el cauce* (o cauce de varios brazos) se forman en los ríos sobrecargados de azolves de fondo. Para transportar estos materiales, el río utiliza toda la pendiente longitudinal del valle fluvial y labra un amplio y extenso cauce. Los azolves de fondo o arrastres se mueven desordenadamente en forma de aluviones de grandes dimensiones, que, al secarse en el período de estiaje, forman isletas divididas por pequeñas corrientes.

Los bancos de aluviones pueden estabilizarse, con ayuda de la vegetación, formando llanuras de inundación con isletas. Las deformaciones del cauce se observan en el transporte de aluviones y en algunos cambios (horizontalmente) de la situación del cauce principal, como resultado de la deformación de los canales de las orillas. Las características principales son las mismas que tiene el tipo de pequeñas dunas en cintas.

c) *El tipo de bancos de arena (shoal)* es parecido al tipo de pequeñas dunas en cintas, pero los aluviones se mueven (horizontalmente) uno detrás de otro, hasta alcanzar la cresta del banco. En la época de estiaje, la parte superior de los aluviones se seca, formando bancos de arena (shoal), que se pegan a las orillas en un orden parecido al movimiento del juego de ajedrez. El cauce comienza a formar sinuosidad, la llanura de inundación no debe aparecer necesariamente como en el tipo de pequeñas dunas en cintas. Las deformaciones del cauce consisten en el deslizamiento de las dunas (principalmente durante el período de niveles altos) y en los cambios de altura que ocurren por temporadas. En general, este tipo de proceso tiene las mismas características que las pequeñas dunas en cintas.

d) *Los meandros definidos* es un desarrollo ulterior del proceso de formación de los bancos de arena (shoal) expresados en la aparición de cauces con poca sinuosidad y macizos aislados de llanura de inundación coincidentes con cada meandro del río. Las deformaciones del cauce, en este caso, consisten en el movimiento aguas abajo de los meandros y los macizos de llanuras de inundación erosionados por la corriente; además de esto, la propia forma del cauce y de la llanura de inundación no está sujeta a cambios y leyes. Las deformaciones en el plano vertical en el cauce son las mismas que las del tipo de bancos de arena (shoal). En las partes profundas del cauce, las deformaciones verticales tienen una dirección contraria. Las características más importantes de los meandros definidos, son: el paso del meandro λ , el ancho de la faja del meandro B_m , la velocidad de movimiento del meandro C , y otros.

e) *Los meandros libres* se caracterizan por un cauce único, con muchos meandros en un amplio valle. Dentro de un mismo tramo, morfológicamente homogéneo, los meandros pueden ser muy distintos, por su magnitud y por los ángulos de giro.

En las llanuras de inundación de los ríos con meandros libres, se observan huellas del traslado del cauce en forma de residuos de bancos originados en las orillas, los que forman un sistema de ondulaciones llamadas “abanicos errantes”. Se observan pequeñas lagunas en forma de media luna, que vienen a ser residuos de viejos meandros. Durante el proceso de las deformaciones del cauce, los meandros libres pasan por un ciclo cerrado de desarrollo, consistente en el movimiento del meandro con un aumento paralelo del ángulo de giro y en el quebrantamiento de la simetría en el plano horizontal. La descripción del proceso continúa con la rotura del meandro y la rectificación del tramo del cauce. Las características más importantes de los meandros libres, son: el largo del meandro, S ; el paso λ ; el ángulo de giro, α (el ángulo es el formado por la tangente al eje del cauce, trazada por el punto de la curvatura que delimita el meandro), la velocidad del desarrollo del meandro $C = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$

f) *Los meandros no definidos* se caracterizan por la existencia de algunos cauces naturales rectificadas en los ríos con meandros. Este tipo de deformaciones en el cauce se desarrolla en llanuras de inundación fuertemente inundadas con una superficie fácilmente erosionable. En la fase inicial (para pequeños valores de α) el meandro se desarrolla de la misma forma que los meandros libres; posteriormente, surge el cauce rectificado, el cual va desarrollándose gradualmente y se convierte en cauce principal. Producto de esta deformación, el antiguo cauce principal se debilita y desaparece completamente. Nuevamente, el cauce principal que se ha formado, se desarrolla por el mismo esquema, repitiéndose el ciclo de desarrollo de los meandros no definidos. Las características más importantes, son: el grado de desarrollo del meandro, S/λ ; y el grado de inundación de la llanura, h_p/h_n .

g) El tipo de *llanura de inundación de muchos brazos* se caracteriza por una amplia llanura de inundación a través de la cual, el río corre dividido en muchos brazos. Las isletas formadas por estos cauces vienen a ser un tramo de la llanura de inundación y tienen una gran estabilidad en el plano horizontal. Las deformaciones del río, vistas en conjunto, consisten en un lento desarrollo de los cauces rectificadas y en la desaparición de los cauces de mayor sinuosidad. Los procesos en el cauce dentro de cada canal natural ocurren como en un cauce propio del tipo correspondiente.

El valor práctico de la tipificación de las macroformas estriba en el valor del esquema básico de las deformaciones en el cauce, lo cual permite pronosticar los fenómenos y, al mismo tiempo, solucionar con más confiabilidad las interrogantes hidrológicas e hidroeconómicas. Esto se realiza con ayuda de varios métodos conocidos como análisis hidromorfológico. Al aplicar estos métodos, se define, por medio de materiales cartográficos y fotos aéreas, el tipo de procesos en el cauce en un tramo cualquiera y, por consiguiente, el esquema de deformaciones en los planos horizontal y vertical.

Tomando como base estos materiales (o por investigaciones de campo) se determinan las características cuantitativas de los procesos en el cauce. El solo hecho de conocer el esquema de deformaciones y las características cuantitativas del proceso, ya nos permite seleccionar los lugares óptimos para situar las obras proyectadas y, además, si fuese necesario considerar el esquema de medidas de protección con respecto a los futuros daños que puede causar el desarrollo de los procesos en el cauce.

Sin embargo, algunas veces se utiliza como complemento al método analizado el cálculo morfométrico de las deformaciones en el cauce. Así, cuando tenemos los tipos de deformaciones en el cauce, pequeñas dunas en cintas, bancos de aluviones en el cauce y los bancos de arena (shoal), en los cuales el desarrollo de las deformaciones de las llanuras de inundación no son características y que las principales deformaciones son las verticales, lo más importante es la determinación del posible límite del perfil transversal del cauce del río. Con ayuda de este perfil se determina la profundidad de las columnas de apoyo de los puentes, el tendido de conductoras, los cables de comunicación, las torres de las líneas de transmisión eléctrica, etc. Se obtiene gráficamente un perfil de la erosión límite del río, para el cual los perfiles transversales —característicos para distintos lugares de un tramo morfológicamente homogéneo— se plotean en un mismo gráfico por la línea del eje de la corriente y por la escala vertical. Aquí, la envolvente inferior trazada por debajo de todos los puntos en el gráfico, se toma como el perfil de erosión límite probable.

En los tramos del río con meandros, también es necesario determinar las magnitudes de las deformaciones verticales y construir el perfil señalado (aquí la combinación de los perfiles transversales no se realiza por la línea media del cauce, sino por la línea media de la faja de meandros). Sin embargo, para todos los tramos de ríos con distintas formas de meandros también es importante determinar la dirección del desarrollo y las magnitudes de las deformaciones en el plano horizontal. Esto se lleva a cabo por la comparación directa de fotos del tramo del río que se analiza, tomadas en distintas épocas (cartas topográficas, planos o fotos aéreas) llevando todo a una misma escala. De esta forma, pueden determinarse las direcciones y los volúmenes de erosión (acumulación), así como las velocidades promedios máximas del traslado de las orillas del cauce. Para los casos en que no existen cartas topográficas, se ha propuesto un método, mediante el cual es posible restablecer la situación anterior del cauce fluvial por una sola foto aérea (1,3). Se ha elaborado un método para determinar la posible situación y las etapas del desarrollo general del cauce rectificado en los meandros no definidos y un método para confeccionar un pronóstico (para un tiempo de T años) de las situaciones de los meandros libres en desarrollo (2). Los resultados de los trabajos planteados determinan finalmente la situación de la obra proyectada.

El escurrimiento de los azolves presenta una solución relativamente más simple. Para los tipos de procesos en el cauce, pequeñas dunas en cintas, bancos de aluviones en el cauce y bancos de arena (shoal), es posible determinar el escurrimiento de los azolves, conociendo el tipo de formaciones internas del cauce, sus magnitudes, la composición granulométrica de los azolves y la velocidad de transporte de las formaciones. En los distintos tipos de formación de meandros (definidos, libres, no definidos y llanura de inundación de muchos brazos), para determinar el escurrimiento sólido, además de conocer la estructura interna del cauce (principalmente las mesoformas), es necesario conocer también los volúmenes y la composición granulométrica del material erosionable (acumulación). Los volúmenes del material erosionable (acumulado), se obtienen multiplicando el traslado promedio de las orillas en el tramo de deformación por la altura de la orilla.

Se solucionan una serie de tareas relacionadas con la morfología y el carácter de las deformaciones del cauce y de la llanura de inundación (por ejemplo: la distribución de

los gastos y niveles en los brazos de la llanura de inundación, el carácter y la magnitud de la inundación y el vaciado de la llanura de inundación, la altura de la ola producida por el viento en la zona inundada, las erosiones locales en los basamentos y otros).

En los casos en que exista un fuerte quebrantamiento del régimen natural del río como resultado de la construcción de obras hidráulicas, la extracción de una gran cantidad de agua, el trasvase de aguas o de algunas otras medidas, es necesario confeccionar pronósticos básicos para cada proceso.

La tarea de estos pronósticos consiste en evaluar las posibles variaciones del tipo de procesos en el cauce y las características medias de los mismos. El pronóstico se hace para todo el trayecto del río (incluyendo sus afluentes) que tenga relación con la obra proyectada. Aquí se utilizan las “*relaciones-criterio*” (7,9), es decir, relaciones hidromorfológicas que relacionan el tipo de proceso en el cauce y sus características medias con los factores hidrológicos y geomorfológicos determinantes. También se utilizan los métodos balance de azolves (3) y el de analogía (12).

El método de analogía que, se utilizó en el pasado por los hidrólogos solamente para el cálculo del escurrimiento, resulta (gracias al surgimiento de la idea estructural en el proceso del cauce) muy adecuado al confeccionar los pronósticos de las deformaciones en el cauce. Después de determinar el tipo de proceso en el cauce del tramo que se estudia en las condiciones del régimen variable (7,9), generalmente es probable encontrar un tramo con el mismo tipo en un río en condiciones naturales y llevar las características particulares del mismo al tramo que se estudia (12).

Finalmente, es posible definir las características del cauce en el plano horizontal, su perfil longitudinal, las magnitudes y la forma de la sección transversal en los lugares característicos (incluyendo las profundidades media y máxima en los vados). Los resultados se refieren a la fase final de las transformaciones en el cauce, cuando éste, que ha salido de su estado de equilibrio dinámico, nuevamente regresa a ese estado, adaptándose a las nuevas condiciones. Se da también una evaluación del tiempo aproximado necesario para el proceso, el cual generalmente varía de unos años a varias decenas de años.

ANÁLISIS DE LOS PROCESOS EN EL CAUCE EN RÍOS DE CUBA

El clima tropical de Cuba determina dos períodos, el lluvioso (V–XI) y el menos lluvioso (XII–IV); esto hace que los ríos tengan bien definidos regímenes no uniformes de escurrimiento líquido y sólido.

La mayor parte de los ríos cubanos se secan durante el período menos lluvioso, sin embargo, pueden alcanzar caudales de cientos (hasta miles) de m³/s producto de crecidas, provocadas por intensos y prolongados aguaceros.

Los suelos aluviales ocupan mucho menos territorio que los eluviales–deluviales. (Según la composición litológica, predominan las rocas arcillosas, las areniscas–arcillosas y las gravas de arenas. También pueden encontrarse depósitos de turbas y calizas. El carso está muy extendido). Los terrenos aluviales se encuentran en franjas a

lo largo del río, con espesores de 5–10 metros y más, en algunos lugares. La característica principal de los aluviales es la presencia (excepto en los tramos montañosos del río) de arenas finas y de lodos.

Los ríos generalmente nacen en los límites de las zonas montañosas o en las montañas (las que ocupan aproximadamente el 20% del área del país), formando en las cabeceras dos o más corrientes que se unen aguas abajo.

En la parte montañosa, los ríos tienen valles en forma de cañón, valles en “V” encajonados con grandes pendientes y velocidades y gran cantidad de material de origen aluvial y no aluvial. Preliminarmente, podemos distinguir los siguientes tipos de cauces fluviales (macroformas).

- 1) Cauce rectilíneo o poco sinuoso, que llega hasta las rocas madres;
- 2) Cauce sinuoso cortado por el meandro;
- 3) Meandros definidos (en los lugares de ensanchamiento del valle).

Además de los tipos señalados, existen llanuras de inundación de muchos brazos al salir el río de la zona montañosa. Los ríos que tienen este tipo de procesos, en realidad presentan corrientes en forma de torrentes de piedra y fango. (Ejemplos pueden ser, en nuestro país, los ríos que nacen en la Sierra Maestra y corren hacia el sur, presentando un corto curso y grandes pendientes. La construcción de la carretera que comunica Santiago de Cuba con Pílon, depende totalmente del régimen de escurrimiento de los ríos mencionados).

Después de salir de las montañas, los ríos corren hacia el mar por el tipo de llanuras de denudación (con área de 30%) y de acumulación (área 40%). Aquí los ríos tienen valles elaborados, sus cauces no tienen capacidad para evacuar sus avenidas que se forman en la parte superior de la cuenca, los ríos se salen de sus cauces, extendiéndose varios kilómetros por ambos márgenes arrastrando piedras, materiales que erosionan las orillas, arbustos, raíces y todo lo que encuentran a su paso. Los aluviales de grano fino que se encuentran en estado de suspensión son transportados a grandes distancias. Por consiguiente, los meandros libres, en este caso, no son del tipo serpenteante como los que se presentan en los valles. Generalmente, los meandros llegan a las rocas madres. Sin embargo, por el carácter del desarrollo de las deformaciones, no existen diferencias sustanciales entre ambos tipos de meandros mencionados. Podemos distinguir los siguientes tipos de tramos fluviales en la llanura:

- con cauces rectos o poco sinuosos, con altas orillas de grandes pendientes;
- con cauce sinuoso, con altas orillas de grandes pendientes;
- ríos de meandros libres.

Los tipos de tramos de la desembocadura son definidos por la interacción mar–río. Predominan:

- cauces de meandros libres;
- deltas (llanuras de inundación de muchos brazos);

- cauces poco sinuosos de un solo brazo.

Los dos primeros tipos frecuentemente coinciden con las partes bajas y pantanosas de la desembocadura cubierta por mangles.

Las magnitudes y las velocidades de formaciones horizontales no podemos determinarlas, ya que carecemos de fotos comparativas. Solamente podemos dar una idea de estas deformaciones mediante características indirectas. Los ríos que presentan meandros libres tienen una gran velocidad de deformaciones horizontales. Esta conclusión se reafirma por factores tales como la poca capacidad de erosión de los cauces fluviales y un intenso crecimiento de arbustos y plantas maderables en los ríos. Sin embargo, ante la ocurrencia de grandes crecidas de una baja probabilidad, los ríos pueden labrar un nuevo cauce corriendo por los lugares aledaños más bajos.

Así, el ciclón Flora (octubre 1963) destruyó el 80 % de las estaciones de la red hidrométrica de la antigua provincia de Oriente. Los cauces de los ríos cercanos a estas estaciones cambiaron su configuración.

Las grandes deformaciones de los cauces son hasta de 1,5 m, considerando los años promedios de mucha y poca acuosidad. Esto se confirma por la comparación de distintos perfiles transversales en los tramos de las estaciones hidrométricas.

Para poder obtener datos confiables sobre las magnitudes de las deformaciones (tanto en el plano horizontal como en el vertical) y de su régimen, es necesario organizar observaciones del cauce en los tramos de aforo de las estaciones hidrométricas existentes, de acuerdo a un programa especial.

Para obtener las “*relaciones criterio*” (son las que relacionan el tipo de procesos en el cauce y los valores promedios de las características con los factores determinantes) se utilizan como características del escurrimiento líquido el gasto máximo promedio $Q_{máx.prom.}$. El planteamiento de que el gasto que se forma en el cauce es cercano al $Q_{máx.prom.}$, puede apreciarse en los gráficos construidos, utilizando los datos de 10 ríos cubanos (un ejemplo de ellos puede verse en la Fig. 1).

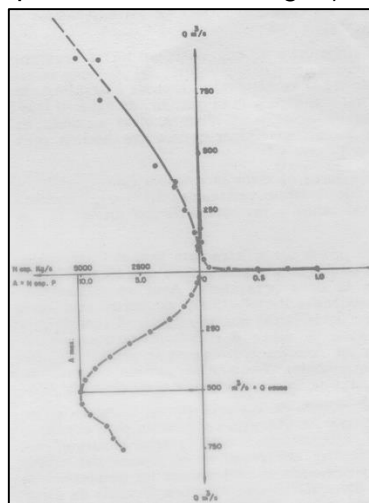


Fig.1. Determinación del gasto que se forma en el cauce por el método gráfico. Río Toa. Estación El Toro II.

El esquema utilizado para determinar los gastos que se forman en el cauce, es una aplicación de la idea de F. Shafernak (8). Según este esquema, se toma como gasto que se forma en el cauce aquel que realiza el mayor trabajo específico A.

$$A = N_{esp}P = \frac{N}{l}P = \frac{\gamma QH}{l}P = \gamma QYP = QYP$$

N_{esp} –potencia específica de la corriente, kg/s

N –potencia de la corriente, kg/s

γ – 1 T/m³ peso específico del agua

$Y = \frac{H}{l}$ –pendiente de la superficie libre del agua

A – gasto en m³/s

P – duración del gasto relativo (el año se toma como unidad)

En los ríos de la parte europea de la URSS (8) existen dos gastos formados en el cauce, uno de los cuales es aproximadamente igual al gasto promedio de los máximos anuales y es el que define el desarrollo de las macroformas; el segundo es un poco mayor que el gasto medio anual y juega un papel decisivo en la formación de las mesoformas (grandes aluviones). Al analizar los gráficos en las estaciones hidrométricas de Cuba, vemos que no aparece el máximo correspondiente al gasto medio anual. El hecho de que no exista el máximo señalado puede ser una de las causas del poco desarrollo de las formas internas del cauce (aluviones) en los ríos de Cuba. Sin embargo, es interesante que en una serie de cierres (por ejemplo, en el río Jaibo, estación Marianal y en Chaparra, El Roble) existan relaciones entre la potencia específica de la corriente (y de la pendiente de la superficie del agua) y la variación de los gastos, lo cual supone la presencia de otro tipo de gasto formado en el cauce (los máximos en la curva de la relación A con Q) para gastos máximos de una probabilidad muy baja. Es posible que este fenómeno explique la causa de los cambios de cauces durante el paso de grandes ciclones, como el “Flora”.

Una de las “*relaciones criterio*” que se utilizan para determinar el tipo de proceso en el cauce es la relación del tipo de proceso = $f(Q_{m\acute{a}x.prom.} Y_o)$, representada en la Fig. 2. El gasto promedio de los máximos $Q_{m\acute{a}x.prom.}$ y la pendiente del fondo del valle Y_o en este caso concreto, se toman como factores determinantes principales de los procesos en el cauce.

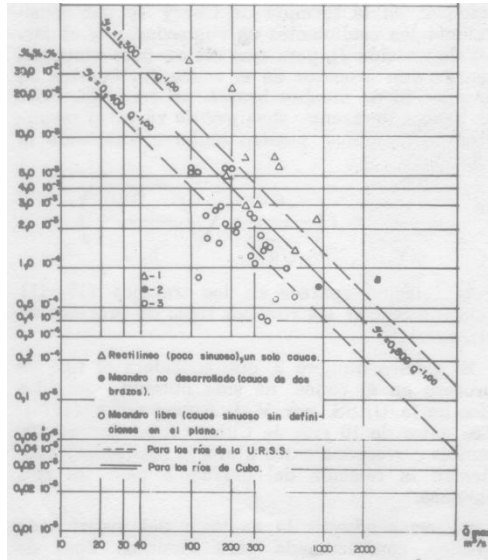


Fig. 2. Tipo de proceso en el cauce $Q_{máx.prom.} m^3/s$

Anteriormente se habían obtenido relaciones similares en los trabajos (5, 6, 7, 9). Para obtener estas relaciones se utilizaron datos de 39 estaciones hidrométricas de los ríos de Cuba, de las cuales 10 están situadas en tramos rectos, o poco sinuosos, 28 en tramos con meandros libres y 1 en un tramo de meandros no definidos. En los ríos de Cuba, prácticamente no existen tramos con meandros no definidos. Los lugares correspondientes a tramos rectos (poco sinuosos), con cauces cortados por una orilla y con tramos de meandros libres por la otra, están limitados por una línea que tiene la dependencia: $Y_0 = \frac{0.800}{Q_{máx.prom.}}$. De esta manera, podemos considerar que el paso de los ríos con meandros libres o rectilíneos (poco sinuosos) y viceversa, está caracterizado por el criterio señalado.

Teniendo en cuenta que la expresión para la potencia específica de la corriente tiene el tipo $N_{esp} = \gamma QY$, es posible deducir que el paso de un tipo de proceso en el cauce a otro, ocurre bajo valores críticos de potencia específica (la pendiente de la superficie del agua. Y se considera equivalente a la pendiente del fondo del valle Y_0), y precisamente para $N_{esp} = 800 \text{ kg/s}$. Esto demuestra que, en condiciones similares de la corriente de un cauce recto (poco sinuoso), existe mucha mayor potencia específica, en comparación con los ríos que forman meandros.

Además de esto, los trabajos realizados anteriormente y que tratan el mismo tema (8, 9) demuestran también que las corrientes con cauces rectos (poco sinuosos) tienen valores de velocidades medias de la corriente V_{med} más altos que los ríos con meandros (para los mismos valores de $(Q_{máx.prom.} Y_0)$, y que el paso de un tipo de proceso en el cauce a otro, ocurre prácticamente para valores constantes de velocidades medias en la sección, y precisamente para $V_{med} \approx 2 \text{ m/s}$.

Si admitimos la existencia de cierto valor de criterio constante y una velocidad promedio de la corriente de la sección, en la cual ocurre el paso del cauce recto (poco sinuoso) al de meandros libres, y viceversa, tenemos que el valor de la fuerza tangente, llevada a la unidad de la longitud de la corriente T, también será constante (9).

Esto es lógico, si: $\frac{N_{esp}}{V_{med}} = \gamma \frac{QY}{V_{med}} = \gamma \omega Y = T$

Debido a que el valor de la velocidad promedio de la sección (ω), al considerar el paso de un tipo de proceso en el cauce a otro, varía un poco, entonces en la misma medida varía el valor de la fuerza tangente llevada a la unidad de la longitud de la corriente.

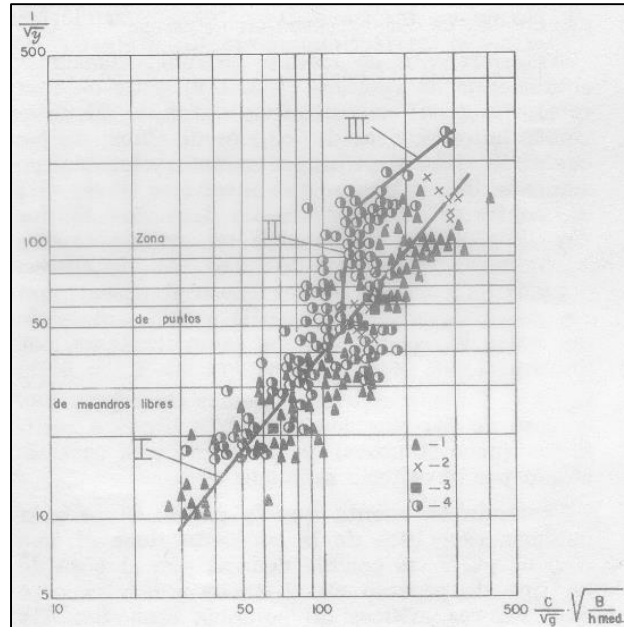


Fig. 3. Tipos de procesos en el cauce

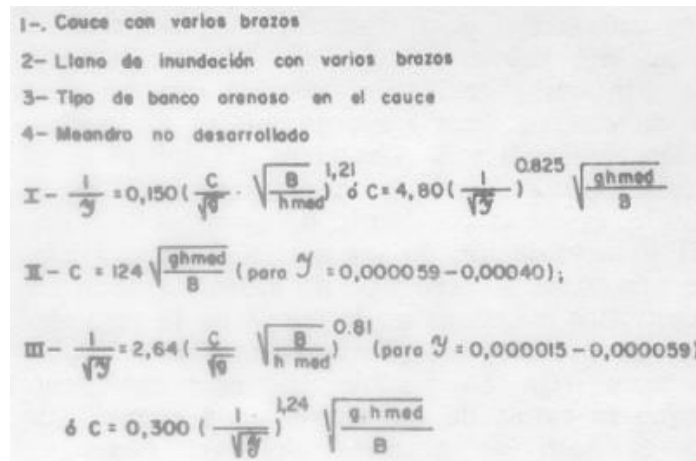
Como resultado de la presencia de valores promedio (de criterio) de la velocidad en la sección, existen también valores (de criterio) de flujo de velocidad $V_{med}^2/2g$, de energía cinética específica $E_{cin} = \alpha Q^2/2g\omega^2 = \alpha V_{med}^2/2g$ (el coeficiente de Coriolis, aproximadamente puede considerarse constante $\alpha = 1,1/1,2$). En el gráfico de la energía específica del flujo de la sección también se observan divisiones de los puntos en dependencia del tipo de proceso en el cauce (para un mismo gasto). El valor mayor del mínimo de energía específica de la sección ocurrirá más en corrientes de cauces rectos (poco sinuosos) que en corrientes que forman meandros (9).

En trabajos similares realizados anteriormente (8, 9), se han hecho una serie de conclusiones interesantes, donde se demuestra que las corrientes de cauces rectos (poco sinuosos) tienen, en comparación con las corrientes que forman meandros, otras magnitudes y valores de las características hidráulicas de las corrientes que por ellas corren.

- Para una misma pendiente del fondo del valle Y_0 , los ríos que presentan un cauce recto o poco sinuoso, tienen bastante área de la sección transversal ω y un cauce mucho más extendido (con valores altos de la relación B/h_{med} que los ríos que forman meandros).
- Para un mismo valor promedio de los gastos máximos anuales $Q_{máx}$, la mayor área de la sección transversal la tienen los ríos que forman meandros.
- Considerando iguales valores de la pendiente del fondo del valle o de los gastos máximos promedios anuales, los ríos que tienen cauce recto (poco sinuoso),

presentan mayores valores del número de Froude que los ríos que forman meandros.

- Para iguales y altos valores de fuerzas de la corriente $\tau = \gamma h_{med} Y$, los ríos con cauce recto (poco sinuoso) tienen un gran ancho B, un alto valor de los coeficientes de velocidad C, en la fórmula de Chezy; y bajos coeficientes de rugosidad "n" y del factor de fricción "f", en la fórmula de Darcy-Weisbach.



Valores aproximados del coeficiente de velocidad C, en la fórmula de Chezy (y por consiguiente los coeficientes de rugosidad "n" y el factor de fricción "f") para ríos rectos, poco sinuosos, (de ríos con procesos en el cauce de llanuras de inundación de muchos brazos, así como los tipos de bancos de arena shoal) y de ríos con meandros no definidos, pueden hallarse utilizando la relación:

$$\frac{1}{\sqrt{Y}} = f \left(\frac{C}{\sqrt{g}} * \sqrt{\frac{B}{h_{med}}} \right)$$

Esta relación aparece en los trabajos (10, 11), sin diferenciar los ríos por tipos de procesos en el cauce.

La Fig. 3, que considera el tipo de proceso en el cauce ha sido obtenido para los ríos de la URSS, por V. I. Antropovsky (1975). Los datos de 10 ríos de Cuba (alrededor de 100 puntos correspondientes de aforos realizados) confirman la relación del gráfico de la Fig. 3 para los ríos cubanos.

Debemos admitir la analogía del mencionado gráfico, confeccionado para distintos tipos de tramos y procesos en el cauce, y el gráfico de Nikuradze (1933) para tuberías con distinta rugosidad. Claro está que la Fig. 3 debe completarse (ya que en el mismo no aparecen una serie de líneas que representen a ríos con meandros libres). La investigación de la resistencia hidráulica para distintos tipos de procesos en el cauce es necesaria para el cálculo de canales y de ríos de régimen variable.

Esta cuestión es importante también en la extrapolación de curvas de gastos y para la construcción de curvas de remansos en los tramos que presenten determinados tipos de procesos en el cauce.

Es interesante señalar que muchas relaciones morfométricas, hidrológicas e hidráulicas, obtenidas anteriormente por distintos autores al analizar el tipo de procesos

en el cauce, han sido muy detalladas; por tanto, se ha elevado la exactitud de las características determinadas por medio de las relaciones obtenidas.

CONCLUSIONES

1. El análisis de los ríos de Cuba demuestran que es necesario investigar y considerar los resultados obtenidos en los proyectos de construcción.
2. Es necesario ampliar el conocimiento que se tiene de las deformaciones de los cauces. Para ello es necesario utilizar los materiales cartográficos-aerofotográficos y organizar observaciones de los cauces en los tramos donde hay instaladas estaciones hidrométricas.
3. Es conveniente confeccionar recomendaciones para calcular las deformaciones de los cauces cuando se proyecta el paso a través de ríos y embalses, en el tendido de tuberías magistrales, torres de líneas de transmisión eléctrica, tomas de agua y otras construcciones.
4. Debe comenzarse la confección de pronósticos básicos de cada proceso (evaluando la posibilidad de los cambios del tipo de proceso en el cauce y de las características promedio del cauce) para los casos en que se rompa el régimen hídrico natural, como resultado de la creación de complejos hidráulicos, embalses, tomas considerables de agua, etc.
5. Es necesario que los cálculos especiales para las deformaciones locales sean analizados conjuntamente con el curso del desarrollo de las deformaciones del cauce totales (cíclicas). Lo analizado en este trabajo sobre las deformaciones totales es la base a partir de la cual se desarrollan los procesos particulares.
6. No deben analizarse los cálculos morfológicos como el perfeccionamiento de la teoría del proceso en el cauce.

A pesar de una serie de ventajas claras de los cálculos morfológicos (ante todo la comodidad de su utilización para resolver tareas prácticas de urgencia) los mismos no dan respuesta a la esencia interna del fenómeno y en muchos casos, la última palabra, la dice la hidrodinámica (incluyen la experimental) o la estadística. Sin embargo, en cualquier caso las soluciones morfológicas permiten precisar la situación de los problemas y eliminar graves errores.

BIBLIOGRAFÍA

1. Procesos en el cauce (bajo la redacción de Kondriatev, N. E.). Hidrometeoizdat, Leningrado, 1959.
2. Kondriatiev, N.E., Bases fundamentales de la teoría hidromorfológica de los procesos en el cauce. Folleto Hidráulica fluvial y procesos en el cauce. Parte 2. Editora de la Universidad de Moscú, 1976.
3. Popov, I.V. Deformación de los cauces fluviales y construcciones hidrotécnicas. Hidrometeoizdat, Leningrado, 1965.
4. Znanenkaia, N. S. Movimiento de los azolves. Hidrometeoizdat, Leningrado, 1968.
5. Leopold, L.V., Wolman, M.E. River Channel Patterns, Braided, Meandering and Straight, U. S. Gov. print off Washington, 1957.
6. Romashin, V.V. Tipos de procesos en el cauce y las relaciones con los

- factores determinantes. Trabajos del GGT, eg. 155, Leningrado, 1968.
7. Antropovsky, V.I. Relaciones hidromorfológicas y su ulterior desarrollo. Trabajos del GGI, ed. 169, Leningrado, 1969.
 8. Antropovsky, V.I. Relación de los procesos en el cauce con los factores determinantes. Trabajos del GGI, ed. 183, Leningrado, 1972.
 9. Antropovsky, V.I. Relaciones de criterio de los tipos de procesos en el cauce. Trabajos del GGI, ed. 190, Leningrado, 1972.
 10. Zhelezniakov, G.V. Fundamento hidráulico de los métodos de hidrometría fluvial. A. de Ciencias de la URSS, 1950.
 11. Grishanin, K.V. Semejanza de cauces fluviales, trabajos del LIVY, 1968.
 12. Aplicación de la teoría hidromorfológica de los procesos en el cauce para la solución de tareas prácticas, trabajos del GGI, edición 216, Leningrado, 1964.