

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Procesos fluviales: conferencia Enzo Levi 2004.
<i>Autor / Adscripción</i>	Francisco Javier Aparicio Mijares Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 20(4): 53-68
<i>Fecha de publicación</i>	2005
<i>Resumen</i>	Se presenta una discusión crítica sobre el conocimiento relativo a los procesos fluviales y se emplean diversos ejemplos de acciones y obras en ríos, así como las lecciones que los mismos han dejado, en paralelo con conceptos escritos por Enzo Levi. Se plantean diversos errores y aciertos, y se discuten las formas de evitar los primeros y aprovechar los segundos.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/800

Procesos fluviales Conferencia Enzo Levi 2004

Francisco Javier Aparicio-Mijares

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Se presenta una discusión crítica sobre el conocimiento relativo a los procesos fluviales y se emplean diversos ejemplos de acciones y obras en ríos, así como las lecciones que los mismos han dejado, en paralelo con conceptos escritos por Enzo Levi. Se plantean diversos errores y aciertos, y se discuten las formas de evitar los primeros y aprovechar los segundos.

Palabras clave: procesos fluviales, Enzo Levi, protección marginal, río Mississippi, río Colorado, planicies de inundación.

El doctor Enzo Levi, destacado profesor, investigador, matemático, ingeniero práctico y ejemplo de muchas generaciones, en cuyo honor se instituyó el premio que lleva su nombre, sin el menor asomo de duda sabía hidráulica. Esto lo constatamos todos los que nos preciamos de haber sido sus alumnos. En su libro *El agua según la ciencia* (Levi, 2001), el doctor Levi escribió estas memorables palabras: “Precisión de disponer de agua para satisfacer necesidades básicas corporales y domésticas; utilización de vías marítimas o fluviales para el transporte, y cruce de ellas; irrigación de cultivos; defensa contra las inundaciones, aprovechamiento de la energía de corrientes; todo esto ha forzado al hombre, desde los tiempos más antiguos, a vérselas con el agua. No ha sido un trato fácil. El habitante urbano que la observa a diario, dócil a sus necesidades, bajar mansa de la llave, no tiene idea de su idiosincrasia. No imagina con cuánta paciencia y astucia hay que manejar a esta nuestra gran amiga-enemiga; cuán a fondo hay que entender su índole altiva para poder someterla y doblegarla; cómo hay que ‘dorarle la píldora’ para reducirla a nuestra voluntad, respetando —sin embargo— la suya. Por eso, el hidráulico ha de ser, ante todo, algo así como un psicólogo del agua, conocedor profundo de su naturaleza.

“En efecto, no es con violencia como se pueden hurtar sus secretos, sino con amor; con esa comprensión que se deriva de una larga convivencia con ella, tan larga que

ni la vida de un individuo ni la de muchas generaciones es suficiente. Hay que atesorar todo lo que la humanidad ha venido aprendiendo, a veces a costa suya, dejándose sorprender; otras al intentar precaverse, realizando observaciones, ensayos, cálculos. [Los libros de texto], con todos sus méritos, adolecen por lo general de un defecto: crear la ilusión de una ciencia demasiado madura y segura de sí misma; que, algo alejada —a veces— de los fenómenos que pretende dominar, olvida las limitaciones de sus principios y adquisiciones, y hace que parezcan duraderos muchos de los que algún día, tal vez muy cercano, podrían ser puestos en duda o refutados.

El mayor enemigo del hombre actual parece ser no la bomba atómica, sino la ignorancia. [...] aludo a la ignorancia de quienes hemos estudiado y creemos saber. Se trata de una ignorancia curiosa, fruto quizás de un exceso de información. Nunca hemos tenido a nuestro alcance tantos conocimientos como hoy en día; pero son conocimientos prefabricados, que se ofrecen reunidos y sintetizados en enciclopedias, audiovisuales, programas de cómputo; que se tragan como píldoras, sin valuar cuánto de cierto o dudoso, efímero o permanente, hay en ellos. Mirar al presente olvidando el pasado nos vuelve demasiados seguros de nosotros mismos y, por tanto, inermes frente a un posible fracaso”.

Hasta aquí la cita del doctor Levi. Quisiera en esta ocasión, como un homenaje en su honor, hacer girar este trabajo alrededor de estas palabras.

Foto 1. Doctor Enzo Levi.



Foto de Nadia Levi.

Foto 2. Doctor Enzo Levi.



Foto del archivo familiar Levi.

Foto 3. Cañón del Sumidero, Chiapas.



Foto de Javier Aparicio.

Foto 4. Valle de Bravo, estado de México.



Foto de Javier Aparicio.

En los congresos de hidráulica tratamos de responder a la pregunta: “¿Cuánto ha avanzado nuestro conocimiento de la hidráulica?”. Sin embargo, a veces conviene hacer un alto en el camino, ser más radicales y más bien preguntarnos “¿Sabemos hidráulica?”. Aquí estoy usando el término “hidráulica” en un amplio contexto, que abarca no sólo los aspectos mecánicos del movimiento del agua, sino también la hidrología y la relación del agua con el medio ambiente. Dejaré de lado la discusión, siempre generadora de controversia, de si la hidrología es parte de la hidráulica o es al revés.

Contra lo que a veces se supone, los ríos rara vez son entes naturales fijos e inamovibles. De hecho, de tal manera se considera a los ríos como inamovibles que con frecuencia se usan como fronteras entre países. Por el contrario, en general los ríos siempre se están

moviendo, tanto lateralmente como en profundidad, y no tomar en cuenta estos movimientos, con frecuencia nos pone en serios aprietos.

La razón de que se suele dar por hecho que un río no se mueve es probablemente que su escala del tiempo normalmente es diferente de la nuestra: mientras que nosotros experimentamos, en condiciones normales, cambios físicos o mentales apreciables en periodos que están en el orden de años o decenas de años a lo sumo, un río cambia, en términos generales, en periodos mucho mayores. Esto hace que las personas no suelen observar cambios apreciables en los ríos, salvo los cíclicos en toda su vida. Aquí cabe el comentario de Levi en el sentido de que para hurtar los secretos del agua se requiere una comprensión que se deriva de una larga convivencia con ella, tan larga que ni la vida de un

individuo ni la de muchas generaciones es suficiente. Sin embargo, nosotros podemos sufrir cambios físicos más o menos bruscos —en periodos menores de un año— debido, por ejemplo, a enfermedades o accidentes. Así también los ríos pueden cambiar en formas relativamente repentinas a causa de accidentes, como avenidas extraordinarias causadas por descargas de vertedores de presas o precipitaciones de grandes periodos de retorno o bien por enfermedades tales como la deforestación.

Llevemos un poco más allá este paralelismo entre los cambios sufridos por una persona y los propios de los ríos. Cuando intentamos conducir el desarrollo de una persona negligentemente o mediante la violencia y la soberbia, cuando intentamos obligar a un niño a que siga un curso diferente al de sus propios intereses o naturales inclinaciones, con una alta probabilidad obtendremos, en el mejor de los casos, una conducta totalmente contraria a la que tratamos de imponer; si no

es que un serio problema para la persona en cuestión y también para la sociedad.

Por el contrario, si tratamos de comprender los intereses e inclinaciones de la persona y conducimos su desarrollo por el cauce delimitado por dichos intereses e inclinaciones, habremos construido un camino que sólo en raras ocasiones nos conducirá al fracaso. Es más, con los pueblos ocurre lo mismo; la historia ha demostrado en repetidas ocasiones que las dictaduras nunca han servido para modelar el comportamiento de los pueblos y que éstos tarde o temprano se vuelven contra aquéllas.

Los ríos son muy parecidos a las personas y a los pueblos en este sentido: parafraseando a Levi, no es con negligencia ni con soberbia y mucho menos con violencia, como podemos lograr que un río se comporte como a nosotros nos parece que debe comportarse. A fin de cuentas, el río tiene milenios por delante para rectificar su propio curso, mientras que nosotros, lamentablemente, no. Por lo tanto, es necesario estudiar con detenimiento y buena voluntad las costumbres de los ríos, sus aparentes caprichos y los métodos más efectivos que podemos desarrollar para educarlos y “dorarles la píldora” de tal manera que se comporten como nosotros quisiéramos o, al menos, para poder predecir su comportamiento futuro. Aquí son útiles la paciencia y la astucia con que, según Levi, hay que manejar el agua, nuestra gran amiga-enemiga. Mucho de nuestro trabajo como hidráulicos requiere en forma vital que seamos capaces de predecir o incluso controlar el comportamiento de los ríos. He usado el término “controlar” simplemente impulsado por la costumbre, pero así como a una persona no se le educa para controlarla, sino para que desarrolle sus propias potencialidades en beneficio propio y de la

Foto 5. Efectos del huracán *Paulina*, Acapulco, Guerrero.



Foto de Javier Aparicio.

Foto 6. Efectos de las avenidas en la costa de Chiapas, 1998.



Foto de Javier Aparicio.

Foto 7. Río Grijalva, Chiapas.



Foto de Javier Aparicio.

sociedad, en el caso de los ríos no deberíamos usar en ese sentido dicho término, a menos que lo que se desee sea una solución inmediata a los problemas más apremiantes, aun a costa de que el río eventualmente se salga de ese control, para empeorar, en el futuro más o menos cercano. En suma, así como para educar a las personas debemos tener ciertos conocimientos de psicología, para poder declararnos capaces de educar ríos debemos ser, como decía Levi, psicólogos de ríos, conocedores profundos de su naturaleza o, lo que es lo mismo, *saber hidráulica*.

Pero si los métodos educativos en el caso de las personas han experimentado un notable avance en los últimos años, la psicología de los ríos —a la que en adelante me referiré con sus términos más comunes: ingeniería o hidráulica fluvial o mecánica de ríos— no ha progresado tanto como quisiéramos, tal vez porque dado que somos personas y no ríos, hemos puesto más interés y cariño en los humanos que en las corrientes fluviales, o tal vez porque el campo de experimentación en el primer caso es mucho más vasto y hemos logrado aprender algo de nuestros errores.

De cualquier modo, nuestro bagaje de conocimientos acerca de la mecánica de ríos no es en absoluto despreciable, así que trataré de comentar una pequeña parte de ellos, y la ilustraré con algunos ejemplos. No es mi intención, por supuesto, acusar a nadie ni poner en evidencia a ninguna persona o institución, sino hacer los comentarios en términos generales como gremio e incluso como civilización. Por ello, no mencionaré los nombres ni ubicaciones de algunos de los ríos que pondré como ejemplos, aunque seguramente muchos lectores los identificarán de inmediato.

Foto 8. Río Grande (Bravo), Nuevo México, Estados Unidos.



Foto de Javier Aparicio.

Foto 9. Agua Azul, Chiapas.



Foto de Javier Aparicio.

Foto 10. Canal Wellton-Mohawk, Sonora.



Foto de Javier Aparicio.

Fronteras fijas y fronteras móviles

La hidráulica actual puede dividirse para su estudio en dos partes: la que incluye el arrastre de sedimentos y la que no lo incluye. Los grados de desarrollo de estas partes de la hidráulica son notablemente diferentes entre sí: mientras que la hidráulica de agua pura en conductos de fronteras fijas —en los que paredes y fondo no se mueven—, como la que se estudia en los primeros cursos de hidráulica ha alcanzado tal grado de desarrollo que es difícil que un buen diseño hecho en estas condiciones por un ingeniero sea seriamente objetable por otro; en el caso de la hidráulica de fronteras móviles y flujo con arrastre de sedimentos, lo difícil es con frecuencia llegar a un mediano acuerdo.

La principal razón de esta diferencia radica sin duda en que, por ejemplo, en el caso de flujo uniforme

escurriendo en conductos con fronteras fijas lo único que puede variar en forma independiente al cambiar el gasto Q es el tirante h , como se puede ver en la fórmula de Manning (Chow, 1973)

$$Q = \frac{A}{n} R^{4/3} S^{1/2}$$

$$A = f_1(h)$$

$$R = f_2(h)$$

donde A es el área hidráulica; R , el radio hidráulico; S , la pendiente, y n es el coeficiente de rugosidad. En cambio, en el caso de fronteras móviles, al variar el gasto pueden cambiar el tirante, el ancho y la pendiente del cauce, como se puede observar, por ejemplo, en las ecuaciones de la *teoría de régimen* de cauces estables (Lacey, 1929; Kennedy, 1895), que en sistema métrico se pueden escribir como:

$$P(h) = 4.838Q^{1/2}$$

$$R(h) = 0.4725(Q/f)^{1/3}$$

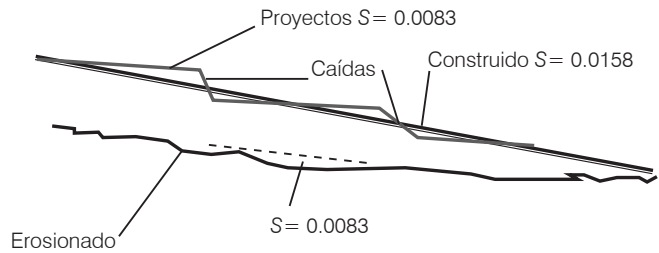
$$S(h) = 0.000302f^{5/3}/Q^{1/6}$$

$$f = 55.66D_m^{1/2}$$
(1)

donde f es un factor de fricción y D_m es el diámetro medio del material constituyente del fondo del canal. Se dice entonces que en el primer caso se tiene un solo grado de libertad y en el segundo tres; esto hace al último notablemente más difícil de abordar que el primero.

A pesar de que, como decía el doctor Levi, el hombre ha tenido una estrecha relación con el agua desde los tiempos más antiguos y de manera muy importante con los ríos —es decir, con fronteras móviles y arrastre de sedimentos— mucho tiempo antes de tenerla con canales revestidos y agua “pura”, se puede afirmar, sin temor a equivocarse, que la mecánica de ríos o canales con fronteras móviles en su concepción cuantitativa moderna se inició hace apenas poco más de un siglo, cuando aquellos famosos ingenieros ingleses recolectaron datos de un sistema de canales de riego en Paquistán y después relacionaron empíricamente dichos datos en la forma de las ecuaciones (1). Aunque existen actualmente otras formulaciones similares, éstas sirven para el propósito de este trabajo. Los canales estudiados entonces estaban en equilibrio, esto es, no se erosionaban ni se azolvaban, de forma que las ecuaciones anteriores pueden considerarse como

Ilustración 1. Proyecto de encauzamiento, construcción y efecto erosivo.



representativas de condiciones de equilibrio. Como se ve en estas ecuaciones, para un gasto dado no es posible cambiar la pendiente ni la geometría del canal a menos que se varíe también el tamaño del sedimento o bien el canal se convierta en uno de fronteras rígidas.

Caso de estudio: pendiente de construcción excesiva

Esto puede observarse con claridad en el caso siguiente. Se trata de un río en el que se hizo, con fines de protección a una ciudad, un encauzamiento formado por gaviones. En uno de los tramos del encauzamiento, el proyecto especificaba una pendiente del fondo de 0.0083 con caídas; estas caídas como aumentaban la velocidad del flujo, también debían estar protegidas con gaviones (ilustración 1).

Por razones que no viene al caso mencionar aquí, la construcción no se hizo conforme al proyecto, sino que se dio una pendiente constante, sin caídas. Esto, naturalmente, aumentó la pendiente general del fondo, lo que hizo que se incrementaran las velocidades y que el fondo se erosionara como se muestra en las fotografías 11 y 12.

La solución que se dio a este problema fue la construcción de muros o presas de gaviones transversales a la corriente que estimulasen la sedimentación y acelerasen el proceso de estabilización del río (ilustración 2).

En las fotografías 14 y 15 se muestra el efecto que tienen los muros en la sedimentación y la estabilización del río.

El trato con el agua no ha sido fácil, decía Levi. En las fotografías 16 y 17 se muestran aspectos del río ya restaurado, una vez que se ha tenido la paciencia y la astucia para manejarlo.

Movimientos laterales

Pero los ríos no sólo modifican la geometría de su sección transversal y su pendiente; también se mueven

Fotos 11 y 12. Efectos de erosión del fondo.



Foto de Javier Aparicio.



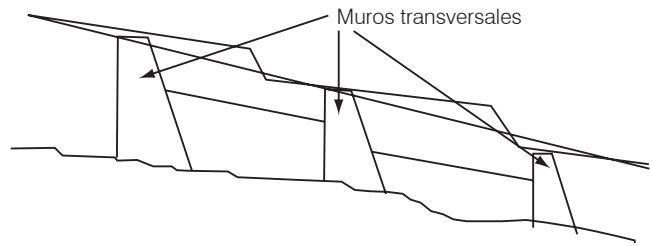
Foto de Javier Aparicio.

Foto 13. Construcción de muros transversales.



Foto de Javier Aparicio.

Ilustración 2. Muros transversales.



Fotos 14 y 15. Efectos de los muros en la sedimentación y estabilización del río.



Foto de Javier Aparicio.



Foto de Javier Aparicio.

Fotos 16 y 17. Río restaurado.

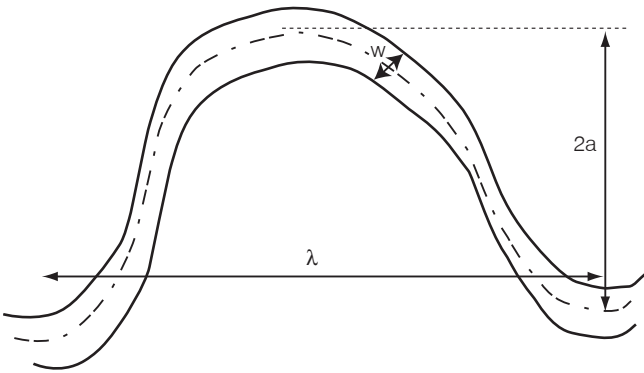


Foto de Javier Aparicio.



Foto de Javier Aparicio.

Ilustración 3. Características geométricas de los meandros.



lateralmente e incluso suelen cambiar de curso. A esto se le ha llamado el cuarto grado de libertad (Maza, 1987). Así como hay relaciones que ligan la pendiente y el ancho con el gasto, la geometría de los meandros también depende de las características del río, lo que hay que tomar en cuenta al querer “entrenarlo” o hurtar sus secretos. En la ilustración 3 se muestran las características geométricas de los meandros y en las ecuaciones (2), relaciones empíricas de dichas características con el gasto y el ancho de la corriente (Berezowsky *et al.*, 2000).

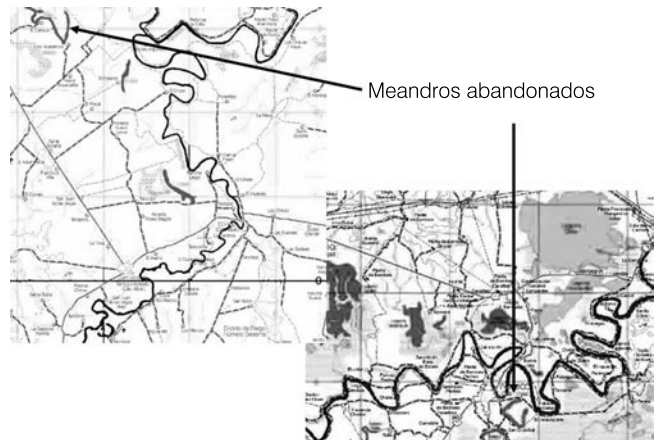
$$\left. \begin{aligned} \lambda &= c_1 a^{c_2} \\ \lambda &= c_3 Q^{c_4} \\ a &= c_5 W^{c_6} \\ c_j &= cte, j = 1, \dots, 6 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Foto 18. Meandro del río Papaloapan.



Foto de Javier Aparicio.

Ilustración 4. Meandros abandonados.



En la ilustración 4 se muestran tramos de dos ríos en su zona de planicie. Aunque estos ríos pueden considerarse *viejos*, en el sentido de que sus movimientos actualmente son ya muy lentos comparados con la escala humana, no por ello dejan de moverse. Se puede ver que los ríos pasaron en algún periodo por los meandros abandonados mostrados, y no hay por qué pensar que no volverán a reconocer ese curso en algún momento apropiado, que no tiene necesariamente que coincidir con la disposición humana para ello.

En realidad, lo que ocurre es que las planicies de inundación son parte integrante del río, pero no siempre están ocupadas por el mismo. Sin embargo, nosotros, creyendo que el río es sólo el espacio ocupado por la corriente en un instante dado, hemos construido en las planicies de inundación: ciudades, carreteras, vías férreas, bordos y zonas de cultivo. Esto tiene que ver con las escalas de tiempo que mencioné al principio de este trabajo y provoca problemas como los mostrados en las fotografías 19, 20 y 21.

En las fotografías 19, 20 y 21 se muestra que el río ha “atacado” una de sus márgenes; ha comenzado a

Foto 19. Ataque del río sobre la margen y solución con costalera de cemento.



Foto de Javier Aparicio.

Foto 20. Costalera de cemento para proteger el bordo de encauzamiento.



Foto de Javier Aparicio.

Foto 21. Falla incipiente de costalera de cemento.



Foto de Javier Aparicio.

erosionar el bordo de encauzamiento y ha dañado una carretera construida sobre dicho bordo. Además, el río amenazaba con destruir completamente el bordo y con ello se pondría en peligro la zona de cultivo y habitación del otro lado de éste. Para tratar de resolver este problema, se colocó, en la margen dañada, una serie de costales rellenos de cemento, material que, por ser de gran resistencia, sería capaz de detener el avance lateral del río. La solución *funcionó* durante algunos meses, periodo en el cual pareció satisfactoria. Sin embargo, poco tiempo después las costaleras de cemento empezaron a fallar también para luego desaparecer y el río prácticamente destruyó la totalidad de la carretera, como se observa en las fotografías 22 y 23.

El problema aquí es que el río meandrea, es decir, desarrolla curvas y se mueve a un ritmo que, en términos de la escala humana de tiempo, se puede considerar lento. En las fotografías 24 y 25 se observa, desde una perspectiva más amplia, que, hágase lo que se haga, el río seguirá avanzando y, sin importar lo resistente de los materiales empleados para “contenerlo”, las curvas continuarán su desarrollo. En la vecindad de dichas curvas se construyeron nuevos tramos de carretera que, al igual que las costaleras, resuelven el problema por un corto tiempo. Si no ocurre algo extraordinario, como la construcción de una presa aguas arriba de estos tramos, que cambie el régimen del río radicalmente, los meandros seguirán avanzando y en algún momento también *atacarán* los nuevos tramos carreteros.

Para resolver adecuadamente este problema, adoptando la idea de Levi sobre la psicología del agua, en este caso en particular aplicándola a los ríos, es necesario conocer la geometría de los meandros, así como su desarrollo y evolución. De otro modo, se seguirán construyendo carreteras *ad infinitum*. La evolución de los meandros no se detiene ni siquiera en ríos que fluyen en roca sólida, como se aprecia en la

Foto 22. Carretera destruida.



Foto de Javier Aparicio.

Foto 23. Carretera destruida.



Foto de Javier Aparicio.

Foto 24. Carreteras nueva y destruida.



Foto de Javier Aparicio.

Foto 25. Carreteras nueva y destruida.



Foto de Javier Aparicio.

Foto 26. Meandro en rocas.



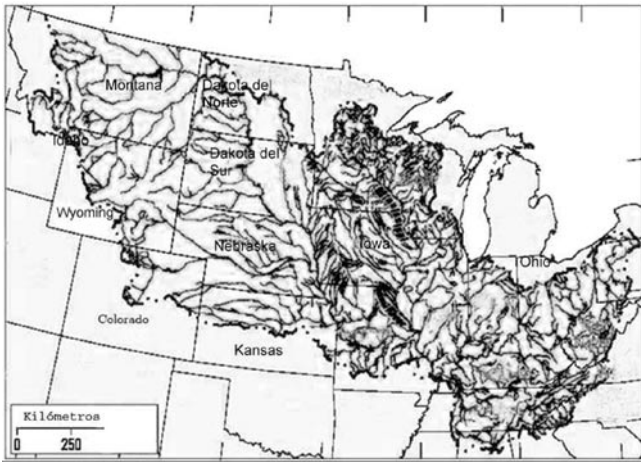
Foto de Javier Aparicio.

fotografía 26. Mucho menos lo hará contra costaleras u otros materiales menos resistentes.

El meandro de los ríos es probablemente uno de los temas más estéticos e interesantes de la hidráulica

fluvial, y sobre el que aún hay mucho que investigar para poder predecir y así educar el movimiento de los ríos. En este sentido, hay diversos temas de investigación. Desde los métodos empíricos, como los conducentes a

Ilustración 5. Cuenca del río Mississippi (Johnson et al., 2003).



las ecuaciones (2) hasta la modelación física o numérica de los procesos fluviales (Ikeda y Parker, 1989), las posibilidades son muchas y variadas.

Planicies de inundación

Las planicies de inundación son zonas que el hombre ha aprovechado desde tiempos inmemoriales. Esto ocurre debido a que, por un lado, son zonas muy fértiles y, por otro, constituyen un fácil acceso al agua y a una vía de transporte muy barata y eficiente, que es el propio río. Sin embargo, hay casos, como el que a continuación se analiza, en los que la planicie de inundación es mal utilizada.

“El poderoso río Mississippi, motor de mucha de la actividad económica del medio oeste estadounidense. A pesar de las múltiples obras de control del río, aún desprecia las limitaciones del *know how* de la ingeniería y revela un corazón salvaje que todavía late internamente”. Esto no está en un libro de algún famoso escritor o poeta, sino en algo tan mundano como un reporte del Wisconsin Department of Natural Resources (WDNR, 1993), aunque probablemente estas ideas se inspiraron en Mark Twain, éste sí un famoso escritor y cronista de dicho río: “El río Mississippi siempre tendrá su propio modo; ninguna habilidad ingenieril podrá persuadirlo de hacerlo de otra manera” (Twain, 1922).

Twain estaba perfectamente consciente de la índole altiva de este río, que Levi atribuyó al agua en general. Es notable la coincidencia de conceptos entre Levi y Twain.

A pesar de que el río Mississippi ha dado inequívocas muestras de ese corazón salvaje a lo largo de la historia de su proceso de “dominación” por el hombre, éste, con la ilusión detectada por Levi de que su ciencia era

Foto 27. Mark Twain.



Foto 28. Estabilización de márgenes en el río Mississippi, 1898.



Foto de la U.S. Army Corps of Engineers.

demasiado madura y segura de sí misma, no había comprendido cuál era el potencial del río de rebelarse contra esa falta de comprensión hasta que se produjo un grave desastre.

Foto 29. Bordo en Chalmette, Louisiana, 1895.



Foto de la U.S. Army Corps of Engineers.

Foto 30. Zona habitacional inundada.



Foto de Javier Aparicio.

Durante muchos años, se construyeron más de 13,000 km de bordos en el alto río Mississippi. Este río compite con el Colorado en cuanto a la cantidad de obras de ingeniería que se ha hecho en ellos, aunque, en el caso del Colorado, en general se trata de obras para el aprovechamiento del agua, mientras que en el Mississippi son más bien obras de defensa y control contra inundaciones, así como de navegabilidad.

Ambos son posiblemente los ríos con más ingeniería del mundo, y el Mississippi es, sin duda, el que más la tiene en Estados Unidos.

Como consecuencia de la construcción de bordos, además de otras obras, desde 1940, aproximadamente 80% de las áreas inundables originales en la planicie del río se han drenado. Esto produjo un importante desarrollo agrícola y urbano en las áreas desecadas, lo que impulsó a su vez más inversiones en obras de protección de la nueva infraestructura, que sumaron en su conjunto cifras del orden de los miles de millones de dólares. La conversión sistemática de áreas inundables y planicies a la agricultura y zonas urbanas reduce las posibilidades de almacenamiento de agua superficial, y

causa incrementos en los gastos y niveles en el río (Wall, 1993).

Además, los bordos mismos tienen un impacto significativo al constreñir el ancho del río, lo que genera un incremento en los niveles para un gasto dado. Así, al río se le deja poco o ningún espacio para atenuar las avenidas, y, en el caso de precipitaciones extraordinarias, el riesgo de un desastre es más severo que si el cauce conserva sus condiciones naturales (como el desastre producido por el huracán Katrina en agosto de 2005 en Nueva Orleans). Guardadas las debidas proporciones en cuanto a los montos de inversión, el mismo fenómeno se ha generado en algunos lugares de México, por ejemplo en la zona de Las Gaviotas en Villahermosa, Tabasco, donde se producen asentamientos humanos en las zonas inundables, que luego se regularizan y se protegen con bordos, lo que hace que haya más asentamientos, etcétera (foto 30). Este proceso se puede denominar *ciclo de los bordos* (ilustración 6). Esta situación es como si se reprende a un niño por llorar, lo que provoca que lllore más, lo que a su vez hace que se le reprenda más fuerte y así sucesivamente. O bien es como tratar de mantener tranquilo a un adolescente a base de inyectarle dinero.

En la fotografía 31 se puede observar el bordo que se construyó para proteger a la ciudad de San Luis Missouri, cuyo emblema es el arco que se asoma por encima del enorme muro (foto 32). Este tipo de soluciones evidentemente desoyen el consejo de Levi en el sentido de que no es con violencia como se pueden hurtar los secretos del agua, sino con amor.

Difícilmente se podría pensar en mayor violencia. Por supuesto que el uso de semejante fuerza obliga al

Ilustración 6. Ciclo de los bordos.

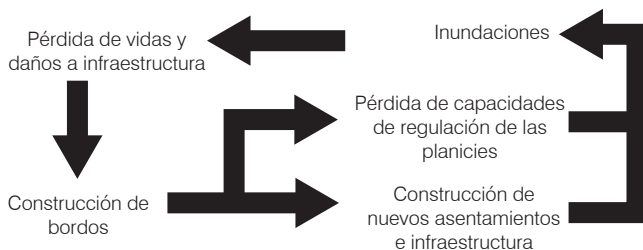


Foto 31. Muro de encauzamiento en San Luis Missouri (Johnson et al., 2003).



Foto 32. Arco en San Luis Missouri (Johnson et al., 2003).

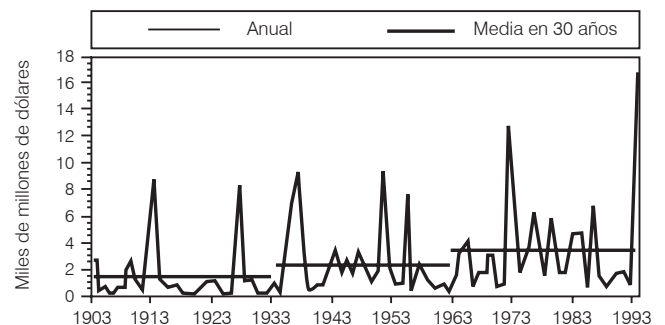


río a mantenerse en su lugar durante cierto tiempo. Sin embargo, ¿qué pasa con este tipo de obras cuando las lluvias son más abundantes que lo esperado?

En 1993, a causa de lluvias extraordinarias y a la saturación del suelo en una extensa zona de la cuenca, ocurrió el desastre provocado por inundaciones más devastador de la historia de ese país.

Entre 26,000 y 50,000 personas evacuadas; entre 56,000 y 100,000 casas dañadas, y pérdidas directas de entre 12,000 y 20,000 millones de dólares fueron parte de los efectos de este desastre (Classzone, 2005; McConnell, 1998; Galloway, 1995). Más de mil bordos, con una longitud de 9,300 km, se dañaron o se destruyeron completamente durante las avenidas (McConnell, 1998). En la ilustración 7 se muestra la evolución de los daños con el tiempo. Nótese el notable incremento. Pero los daños generados en 2005 por el huracán *Katrina* fueron aún más cuantiosos.

Ilustración 7. Monto de los daños en el río Mississippi (Fuente: U.S. Weather Bureau; adaptado de Hey y Philippi, 1994).



Ya lo decía Levi: hay que atesorar todo lo que la humanidad ha venido aprendiendo, a veces a costa suya, dejándose sorprender. De las recomendaciones emanadas de este desastre, se pueden destacar las

siguientes (Interagency Floodplain Management Review Committee, 1994):

- Tratar las planicies de inundación como parte de un sistema físico y biológico, que incluya a las propias planicies en el contexto más amplio de la cuenca.
- Identificar y mejorar los valores culturales, históricos y estéticos de las planicies de inundación.
- Adquirir, por interés ambiental, los terrenos correspondientes donde existan vendedores dispuestos.
- Asegurar la inclusión de aspectos sociales y ambientales en todas las acciones relacionadas con la planicie de inundación.

Las áreas prioritarias para la restauración son, entre otras:

- Hábitats de especies en peligro de extinción.
- Áreas contiguas e hidrológicamente conectadas con los cauces.
- Áreas de confluencia y tierras adyacentes a refugios de vida salvaje.
- Parques nacionales, estatales y locales.
- Antiguos humedales, áreas constantemente inundadas, etcétera.

Decir que sabemos hidráulica fluvial porque conocemos con la precisión que se quiera la mecánica del movimiento del agua y los sedimentos es como decir que conocemos a una persona porque hemos estudiado los mecanismos de sinapsis de sus neuronas o los de sus movimientos musculares, sin tomar en cuenta su idiosincrasia y entorno.

No se puede pedir, obviamente, que se dejen de aprovechar las planicies de inundación. Casi cualquier tesis de licenciatura e incluso de maestría relacionada con la hidráulica o la hidrología nos hace recordar que “el hombre, desde el inicio de la civilización, se ha asentado a la orilla de los ríos...”, pero sí podemos tomar en cuenta la idiosincrasia de los ríos, respetando su entorno, que en buena medida son las planicies de inundación. El río y su llanura de inundación son indivisibles.

Río Colorado

Un caso conspicuo en donde no se ha respetado el binomio río-cauce de inundación es el río Colorado. Como ya se mencionó, este río es uno de los más aprovechados del mundo, y sin duda el más aprovechado de Estados Unidos (Fradkin, 1981).

Ilustración 8. Cuenca del río Colorado.



Ilustración 9. Esgurrimientos en el río Colorado.

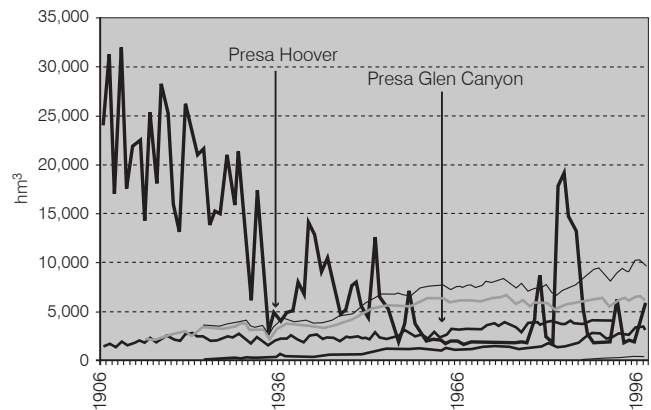


Foto 33. Presa Morelos.

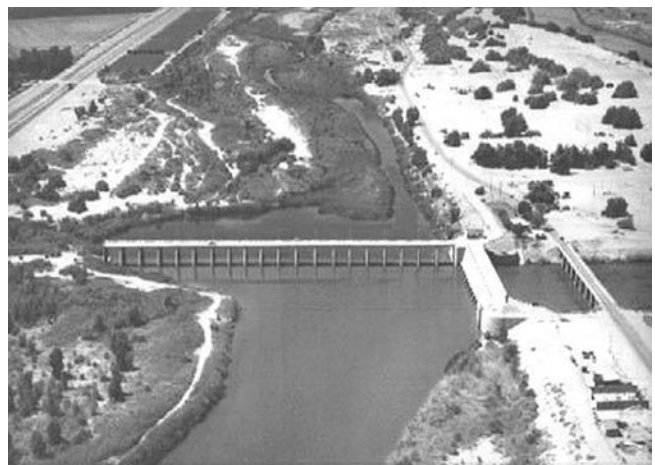


Foto de Javier Aparicio.

Como se observa en la ilustración 8, este río tiene un sinnúmero de presas, tanto en el cauce principal como en los afluentes, algunas de las cuales fueron las más grandes del mundo en el tiempo de su construcción, como la Hoover y la Glen Canyon. La última presa que hay en el río, y la única en territorio mexicano, es la presa Morelos (ver fotografía 33), que desvía el poco volumen que escurre hacia el delta del río a la zona de riego de Mexicali. Dicho control ha causado severos cambios a lo largo del río como un todo, y en particular en su delta y estuario (Gleick, 2002). En la ilustración 9 se observa el severo efecto que estas obras han tenido en los escurrimientos naturales del río.

Las múltiples obras de aprovechamiento del Colorado parecían justificar la confianza en que no habría ya grandes gastos en la zona baja y, en consecuencia, sería difícil que el cauce se moviera. Sin agua, ¿cómo se movería? Una vez que la presa Glen Canyon terminó de llenarse, fue necesario derramar los excedentes y los gastos generados produjeron movimientos laterales del río —*divagación* es el término que se suele utilizar en estos casos, con la connotación, nuevamente, de que el río anda donde no debe—. Dichos movimientos amenazaban con dañar el canal Wellton-Mohawk, que pasa por la margen izquierda del río (ver ilustración 10).

Ante esa situación, se construyeron unos espigones que impedían al río seguirse moviendo lateralmente, es decir, lo *volvían a poner en su lugar* y protegían así el canal. De hecho, se logró el objetivo de proteger el canal Wellton-Mohawk, pero, como efecto colateral, se

deflectó el cauce del río y se provocó una seria erosión en la margen derecha, lo que produjo la pérdida de tierras agrícolas y una seria amenaza a la estabilidad del puente carretero. Como se observa, en este caso se tuvo una falla en la forma en que se intentó “dorarle la píldora” al río para reducirlo a nuestra voluntad, respetando —sin embargo— la suya, como Levi escribió.

Respetar la naturaleza y convivir con la ecología no sólo son ideas *nice* o de moda; no hacerlo puede costar, como se ha visto en los casos relatados y en muchos otros, grandes cantidades de dinero.

La mejor manera de solucionar un problema causado por un fenómeno natural es entendiendo el fenómeno. Esto se logra sólo mediante la investigación sistemática, es decir, en las palabras de Levi, intentando precaverse, realizando observaciones, ensayos, cálculos.

En el caso de los procesos fluviales, existen todavía muchos aspectos que ignoramos. Por ello representan un fascinante campo de investigación, que nos ayuda a defendernos de la ignorancia contra la que nos prevenía Levi. La investigación y la educación son los únicos medios para evaluar si sabemos hidráulica.

Agradecimientos

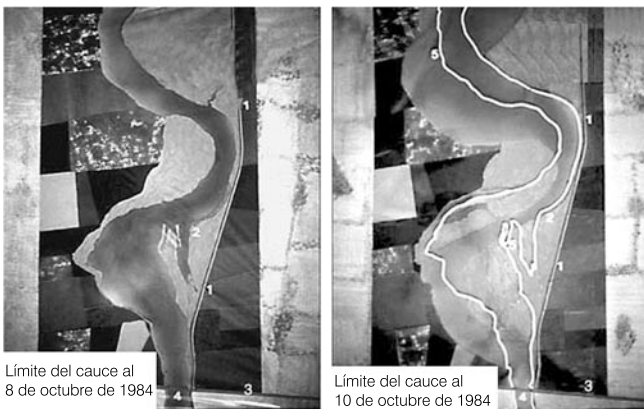
Quiero dedicar este trabajo a la memoria de mi padre, quien me enseñó que el trabajo honesto y comprometido, así como la atención esmerada a la familia son ingredientes esenciales para una vida plena.

Nadie puede decir con justicia que haya tenido ningún logro sin el concurso, la ayuda y el consejo de quienes forman parte de su entorno. En mi caso, debo considerarme sumamente afortunado. He estado siempre rodeado de seres que han sido una influencia muy positiva para mí.

Mi madre, que me ha mostrado el camino de la paciencia, la tolerancia y el amor; mi querida esposa Carmen, quien ha tenido siempre la sabiduría de mantener la felicidad y la unión de la familia mediante su ejemplo y sus consejos, al mismo tiempo que la entereza para soportar mis muchos malos momentos; mis hijos, que me dieron la vida: Andrea, mi conciencia y mi cómplice en la fotografía y el *rock* —algo anticuada en ambos aspectos— y Julio, mi coequipero y adversario en la pesca, el tenis y el boliche, en donde ocasionalmente tiene golpes de suerte y me gana; mis amigos, entre los que debo mencionar, aunque su modestia hace que no le guste del todo, a Álvaro Aldama, a quien debo mucho más que la chamba. Asimismo, mis compañeros de trabajo, que también son mis amigos, en particular los del IMTA, institución que me ha acogido durante los últimos 17 años.

A ellos, a muchos otros y a Dios debo mis aciertos; mis errores son el resultado de no haber puesto la suficiente atención.

Ilustración 10. Divagación del río Colorado.



(a)

(b)

- 1 Canal Wellton-Mohawk.
- 2 Enrocamiento.
- 3 Carretera Mexicali-San Luis.
- 4 Puente carretero.
- 5 Límite del cauce al 8 de julio de 1983.

Referencias

- BEREZOWSKY, V.M. y VILCHIS, V.R. *Protección y control de cauces*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2000.
- CLASSZONE, [en línea]. http://www.classzone.com/books/earth_science/terc/content/investigations/es1308/es1308/page08.cfm?chapter_no=investigation. 2005.
- CHOW, V.T. *Open-channel hydraulics*. Singapur: McGraw-Hill, 1973.
- FRADKIN, P.L. *A river no more, the Colorado river and the west*. IDEM: University of Arizona Press, 1981.
- GALLOWAY, G.E., Jr. *Learning from the Mississippi flood of 1993: Impacts, management issues, and areas for research*. Perugia, Italia: U.S.-Italy Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts, and Management of Extreme Floods, 1995.
- GLEICK, P. *The world's water. The biennial report on freshwater resources 2002-2003*. Washington: Island Press, 2002.
- HEY, D.L. y PHILIPPI, N.S. *Reinventing a flood control strategy. The wetlands initiative*. Chicago, 1994.
- IKEDA, S. y PARKER, G. (editores). *River Meandering*. Núm. 12. Washington: American Geoph. Union, Water Res. Monography, 1989.
- INTERAGENCY FLOODPLAIN MANAGEMENT REVIEW COMMITTEE. *Sharing the challenge: floodplain management into the 21st century*. Washington, D.C.: Report to the Administration Floodplain Management Task Force, 1994.
- JOHNSON, G.P., HOLMES, R.R.Jr. y WAITE, L.A. *The great flood of 1993 on the upper Mississippi river –10 years later–*. USGS (United State Geological Survey), 2003.
- KENNEDY, R.G. *The prevention of silting in irrigation canals. Minutes*. Proc. Inst. of Civil Eng. Vol. 119, 1895.
- LACEY, G. *Stable channels in alluvium*. Proc. Inst. of Civil Eng. Vol. 27, part. 1, Londres, 1929, pp. 259-384.
- LEVI, E. *El agua según la ciencia. Avances en hidráulica 8*. México, D.F.: Asociación Mexicana de Hidráulica e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2001.
- MAZA, J.A. *Introduction to river engineering*. México, D.F.: Facultad de Ingeniería, UNAM, 1987.
- MCCONNELL, D. 1998. *Mississippi River Flood: 1993* [en línea]. http://enterprise.cc.uakron.edu/geology/natscigeo/Lectures/streams/Miss_Floos.pdf.
- TWAIN, M.M. *Twain in eruption: hitherto unpublished pages about men and events*. Bernard DeVoto (editor). New York: Harper, 1922, 402 pp.
- WISCONSIN DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES. *The floods of 1993: the Wisconsin experience*. Madison, WI: Bureau of Water Regulation and Zoning, Wisconsin Department of Natural Resources, 1993.
- WALL, E. *River channel management. Case study-Mississippi floods 1993* [en línea]. <http://users.aber.ac.uk/erw2/index5.htm>.

Abstract

APARICIO-MIJARES, F.J. *Fluvial processes. Enzo Levi Reward 2004. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XX, no. 4, October-December, 2005, pp. 53-68.*

A critical discussion is presented on the knowledge related to fluvial processes and several examples are given of actions and works in rivers, as well as the lessons they have left, together with some concepts written by Enzo Levi. Several failures and successes are discussed in order to find ways to make use of the latter and avoid the former.

Keywords: *fluvial processes, Enzo Levi, marginal protection, Mississippi River, Colorado River, flood plains.*

Dirección institucional del autor:

Dr. Francisco Javier Aparicio-Mijares

Coordinador de Tecnología Hidrológica.
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, México,
C.P. 62550,
teléfono: + (52) (777) 329 3600,
japaricio@tlaloc.imta.mx