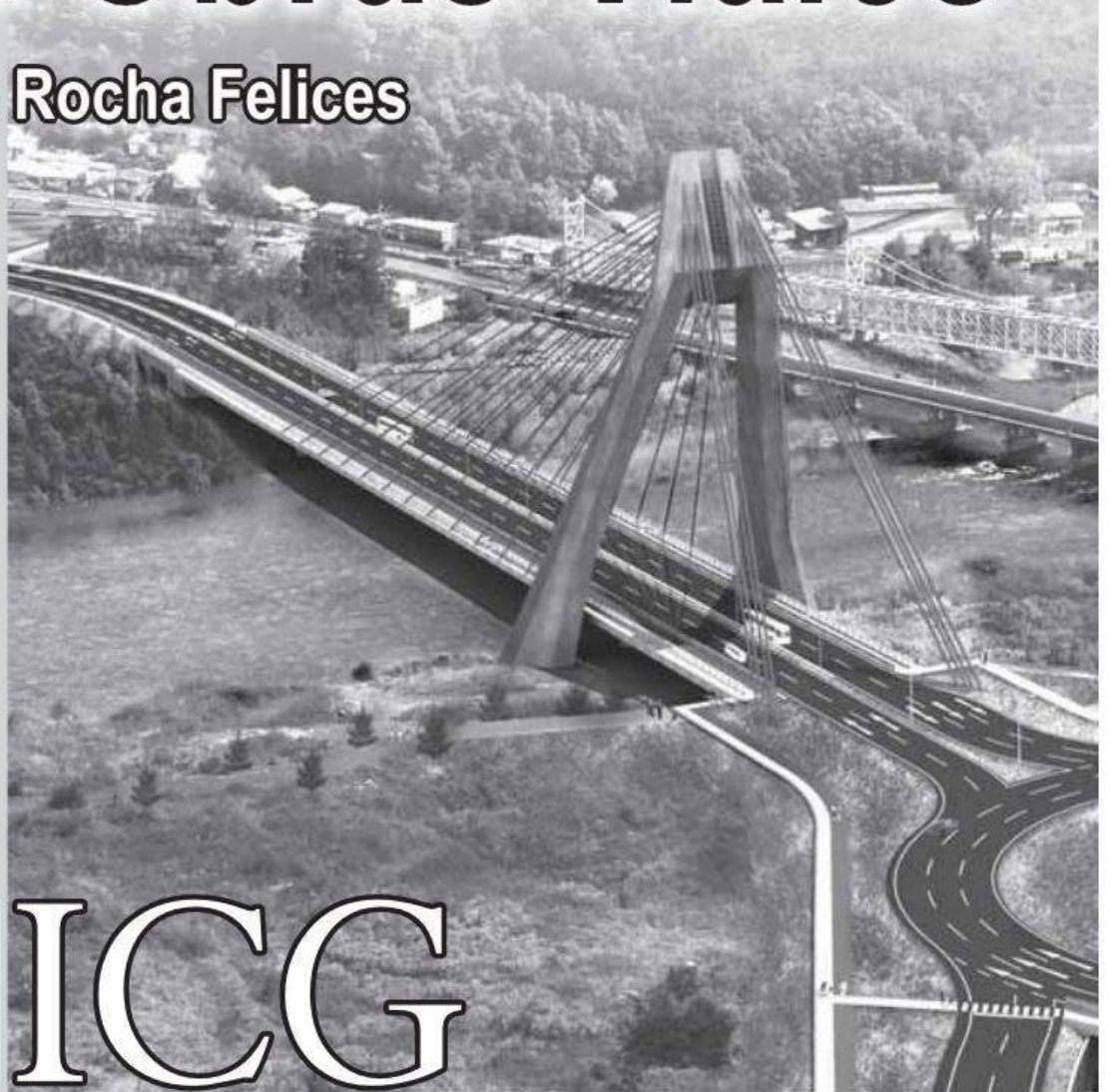


3ra Edición

Introducción a la

Hidráulica de las Obras Viales

Arturo Rocha Felices



ICG

INSTITUTO DE LA CONSTRUCCION Y GERENCIA

FONDO EDITORIAL ICG

PT-44

- **COMPRAR ORIGINAL.** Recomendamos comprar libros originales ICG en lugares de Distribución autorizados. Esto nos permitirá ampliar y actualizar nuestras publicaciones.
 - Las publicaciones ICG son distribuidas exclusivamente por ICG, en nuestras Oficinas, eventos ICG, Filiales y Web de forma directa al usuario final.
 - No hay venta al por mayor y no Autorizamos a distribuidores, librerías, ni intermediarios, por lo que queda totalmente prohibida su reproducción y/o venta sin previa autorización escrita de ICG.
 - Los Libros ICG son actualizados permanente- mente, tener cuidado con la edición que se adquiere. Ver en web última edición.
 - Los que adquieran el presente libro, en lugares autorizados, tienen derecho a registrarse via web www.construccion.org para enviarles "fe de erratas" si los hubiera, así como actualizaciones e información adicional.
- © Queda prohibida toda reproducción total o parcial de esta publicación, sea por cualquier medio o procedimiento. Todo tipo de reproducción impresa, fotocopia o digital deberá contar con la autorización previa, expresa y por escrito del Instituto de la Construcción y Gerencia.

Introducción a la Hidráulica de las Obras Viales

Arturo Rocha Felices

PT-44

3ra Edición - 2013

2da Edición - 2010

1ra Edición - 2009

Hecho por el Departamento de Imprenta de ICG

Hecho el Depósito Legal en la
Biblioteca Nacional del Perú N° 2013-08014

PRÓLOGO

Con mucho agrado y satisfacción ICG, Instituto de la Construcción y Gerencia, presenta la tercera edición del valioso libro “Introducción a la Hidráulica de las Obras Viales” cuyo autor es el distinguido profesional Dr. Ing. Arturo Rocha Felices.

El libro es de satisfacción institucional para ICG, el Dr. Rocha es Consultor en Ingeniería Hidráulica con amplia experiencia profesional, nos presenta una importante introducción al campo de la Hidráulica aplicado a las Obras Viales. Los temas desarrollados nos dan una amplia visión de la importancia de las consideraciones de la Ingeniería Hidráulica al proyectar una obra vial. Como sabemos las obras viales (carreteras, puentes, etc.) implican una importante inversión pública por lo que deben de ser proyectadas tomando en consideración todos los elementos vitales que garanticen su operatividad, seguridad y durabilidad.

En esta nueva edición los textos son íntegramente nuevos y actualizados, se desarrollan temas tales como: Significado e importancia de los ríos en la vida del hombre, la morfología fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales, Albert Einstein y el origen de los meandros, cursos de agua en régimen, cauces, riberas y fajas marginales, conceptos básicos sobre transporte de sedimentos, entre otros. Consideramos que será un valioso texto de consulta profesional y de utilidad para la enseñanza de la especialidad.

Es para ICG un honor el volver a publicar un libro con tan destacado profesional de la Ingeniería. Es nuestro objetivo institucional la publicación y divulgación de libros que contribuyan al desarrollo y actualización profesional.

ICG expresa su agradecimiento a todos aquellos que contribuyeron a la presente publicación, así como a los profesionales que confían en nuestras publicaciones y que con sus sugerencias nos permiten mejorar las nuevas ediciones.

Ing. Angel Gómez Ramos
Director Ejecutivo ICG
Instituto de la Construcción y Gerencia

ÍNDICE

Introducción	7	Fórmulas de Kellerhals	78
Capítulo 1		4.9 Grados de libertad	78
Significado e importancia de los ríos en la vida del hombre	11	Referencias	82
1.1 Introducción	11	Capítulo 5	
1.2 Los ríos constituyen riqueza	14	Cauces, riberas y fajas marginales	83
1.3 La agresión fluvial.....	19	5.1 Introducción	83
1.4 La protección de los ríos.....	22	5.2 Dominio Público Hidráulico	84
1.5 El binomio río-ciudad	27	5.3 Cauces.....	86
1.6 La Hidráulica Fluvial	30	5.4 Riberas	88
Anexo 1- A Algunas conclusiones del III Seminario Internacional de Potamología.....	32	5.5 Fajas Marginales.....	89
Referencias.....	35	5.6 Implicancias para los encauzamientos.....	93
Capítulo 2		5.7 Invasión de cauces fluviales por obras viales.....	96
La morfología fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales	37	Anexo 5-A Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos N° 29338	101
2.1 Introducción	37	Anexo 5-B Reglamento para la delimitación y mantenimiento de fajas marginales en cursos fluviales y cuerpos de agua naturales y artificiales	104
2.2 Clasificación de los ríos	38	Anexo 5-C Conclusiones y recomendaciones del Foro "Problemas en el manejo de ríos en áreas urbanas"	119
2.3 Los ríos aluviales	40	Referencias	126
2.4 Ríos rectos	43	Capítulo 6	
2.5 Ríos entrelazados o trenzados	43	Avenidas, sedimentos y quebradas	128
2.6 Ríos con meandros (Meandriiformes)	46	6.1 Introducción	128
2.7 Criterios para distinguir las Formas Fluviales	51	6.2 Las avenidas.....	130
Referencias.....	54	6.3 Predicción de máximas avenidas.....	134
Capítulo 3		6.4 La avenida de diseño	136
Albert Einstein y el origen de los meandros	56	6.5 Control de avenidas	138
3.1 Introducción.....	56	6.6 El transporte de sólidos.....	142
3.2 Su vida.....	56	6.7 Las quebradas	142
3.3 Su interés en diversos temas.....	57	Referencias	151
3.4 Hans Albert Einstein	58	Capítulo 7	
3.5 Los meandros	59	Interacción del comportamiento fluvial y las obras viales durante los Meganifios	154
3.6 El origen de los meandros	59	7.1 Presentación del tema	154
Anexo 3-A Las Causas de la Formación de los Meandros Fluviales y la llamada Ley de Baer	62	7.2 El Fenómeno El Niño (FEN).....	156
Referencias.....	66	7.3 El Impacto de la Naturaleza sobre las obras viales	168
Capítulo 4		7.4 El impacto de las obras viales sobre la Naturaleza	181
Cursos de agua en régimen	67	7.5 Reflexión final	182
4.1 Introducción	67	Anexo 7-A Informe del fenómeno El Niño 1997-1998: Colegio de Ingenieros del Perú - Consejo Nacional	183
4.2 Las investigaciones de Kennedy	69	Referencias	191
4.3 Otras investigaciones empíricas	70		
4.4 Método de Blench.....	72		
4.5 Las observaciones y mediciones	73		
4.6 Las ecuaciones de Blench.....	74		
4.7 Transformación de las ecuaciones de Blench.....	77		
4.8			

Capítulo 8
Consideraciones de diseño de
Estructuras hidráulicas sujetas
a los Meganiños 193

8.1 Introducción 193
 8.2 El diseño 194
 8.3 Manuales y códigos 196
 8.4 La información 197
 8.5 Recurrencia de los Meganiños 198
 8.6 Los cambios durante el FEN 199
 8.7 El impacto de las fuertes lluvias 200
 8.8 El Hidrograma de Diseño 201
 8.9 Transporte sólido durante los
 Meganiños 202
 8.10 Incremento de niveles 203
 8.11 Consideraciones de diseño 204
 Referencias 206

Capítulo 9
Defensas fluviales con espigones 208

9.1 Las defensas fluviales 208
 9.2 Los espigones 209
 9.3 Espigones permeables e
 impermeables 215
 9.4 Diseño del sistema de defensa 222
 9.5 Control de la migración de un
 meandro 233
 Referencias 235

Capítulo 10
Erosión en pilares y estribos de
puentes 237

10.1 Aspectos generales 237
 10.2 Fallas en puentes 239
 10.3 El comportamiento fluvial 243

10.4 Aspectos hidráulicos en el diseño
 de puentes 244
 10.5 Manifestaciones de la
 degradación fluvial 247
 10.6 Cálculo de la profundidad de
 socavación 249
 10.7 Profundidad de socavación en
 pilares circulares 252
 10.8 Profundidad de socavación bajo
 diversas condiciones 254
 10.9 Socavación en estribos 258
 10.10 Medidas de protección 260
 Referencias 265

Capítulo 11
Conceptos básicos sobre
transporte de sedimentos 269

11.1 Sedimentos 269
 11.2 Propiedades físicas de los
 sólidos 270
 11.3 Número de Froude 272
 11.4 Transporte de sedimentos
 fluviales 272
 11.5 Modos de transporte 273
 11.6 Flujo a dos fases (bifásico) 274
 11.7 Gasto sólido 275
 11.8 Fuerza tractiva 277
 11.9 Fuerza tractiva crítica 278
 11.10 El concepto de iniciación
 del movimiento 279
 11.11 Capacidad de Transporte 279
 11.12 Función Transporte 280
 11.13 Fases del Transporte Sólido 280
 11.14 Acorazamiento del lecho
 fluvial 282
 Referencias 283



INTRODUCCIÓN

El mundo en el que vivimos, y nuestro país en particular, está lleno de amenazas, es decir, de eventos que pueden causar daños a los seres humanos y a las estructuras construidas por ellos. Las amenazas tienen diversos orígenes. Algunas son esencialmente manifestaciones de la Naturaleza, como las lluvias muy fuertes o los movimientos sísmicos, y no se puede anticipar el momento de su ocurrencia, pues según nuestro grado actual de conocimientos están ligadas al azar y son, por tanto, probabilísticas.

Otras manifestaciones tienen su origen en las acciones humanas (antrópicas) y pueden ser muy peligrosas, como por ejemplo el estrechamiento exagerado de un río para construir un puente, sin tener en cuenta las indispensables consideraciones de la Hidráulica Fluvial. Al respecto, no debe perderse de vista lo señalado por Blaikie y otros autores: “Muchos desastres son una mezcla compleja de amenazas naturales y acciones humanas.”

El presente libro, que es una introducción al complejo problema de la Hidráulica de las Obras Viales, gira en torno al notable contraste que existe entre los cursos de agua, que por su naturaleza son cambiantes y dinámicos, y las obras viales construidas cerca de ellos, las que por sus propias funciones deberían ser estables y permanentes en el tiempo. De acá que sea muy importante la consideración del dinamismo fluvial y la seguridad de las obras viales frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

El binomio río-obra vial adquiere una relación más compleja y difícil durante los Meganiños, que son una gran transformación climática que se manifiesta mediante eventos hidrometeorológicos inusitados que causan un enorme impacto sobre la vida, las obras de ingeniería, la economía, las actividades humanas en general y, ciertamente, sobre las infraestructuras viales. Por el contrario, la escasez de agua, que a veces dura varios años, y la “desaparición” de ciertos cursos de agua, crean la sensación de que pueda existir algo así como un “río seco” o una “quebrada seca”, los que, sin embargo, de pronto se activan y descargan un inesperado caudal que causa importantes daños.

La visión que se intenta presentar en este libro acerca de la compleja interrelación entre los cursos fluviales y las obras viales, parte de la idea básica de que los problemas se originan porque son las obras viales las que se acercan a los ríos, y no estos a aquellas.

El tema de la seguridad de las obras viales, en su aspecto general, fue tratado por el autor en trabajos anteriores. Este libro es más específico y se refiere a la vulnerabilidad de las obras viales frente al dinamismo fluvial, es decir, frente a la gran movilidad característica de los ríos aluviales, la que se ve notoriamente

aumentada durante los años muy lluviosos y durante los periodos húmedos que siguen a las fuertes sequías.

Existe una profunda interacción entre las obras viales y la Naturaleza. Las obras viales tales como caminos, ferrocarriles y puentes, así como también las ubicadas en las ciudades, son muy vulnerables, según el caso, al exceso de lluvia, a la escorrentía, a las crecidas fluviales, a la gran movilidad de los ríos y quebradas y a diversos fenómenos como aluviones, deslizamientos, derrumbes y avalanchas y, ciertamente, a las acciones humanas, que muchas veces son más agresivas que los fenómenos naturales. Para los fines de este libro, la vulnerabilidad de una obra vial consiste en la incapacidad que pudiera tener de adaptarse a los cambios que experimenta el río que está junto a ella. Así por ejemplo, si un camino está ubicado (peligrosamente) junto a la parte exterior de una curva fluvial, ésta tenderá con el paso del tiempo a cambiar, es decir a desplazarse, como consecuencia de un aumento de caudales o por cualquier motivo, y el camino estará imposibilitado de adaptarse a la nueva situación creada. La migración del meandro terminará por destruir el camino (o cualquier obra de que se trate), si no se toman oportunamente las medidas correctivas adecuadas.

La dinámica fluvial, es decir, la gran tendencia que tienen los ríos al cambio y que se manifiesta como deformaciones del lecho, desplazamientos laterales, creación de nuevos brazos, migración de meandros, activación de quebradas y de otras maneras más, debe ser tomada en cuenta en los estudios de obras viales próximas a un río. La prevención, entendida como la preparación y disposición que se hace anticipadamente para evitar un riesgo o ejecutar algo, resulta ser fundamental.

El Fenómeno de El Niño (FEN) con características de Meganiño es una realidad que no puede ignorarse, pues su periodo de recurrencia en la costa norperuana es del orden de 42 años. En consecuencia, tenemos que convivir con los Meganiños y aceptar y conocer la enorme movilidad fluvial que se presenta durante los eventos fuertemente lluviosos para poder así controlar sus efectos. Las grandes descargas fluviales han causado en diferentes épocas enormes daños a las obras viales, los que podrían haber sido menores mediante un adecuado planeamiento y diseño. Para fines de diseño lo interesante no es el pronóstico, sino el conocimiento de la probabilidad de ocurrencia de eventos de determinada magnitud.

Como la mayor parte de los daños que ocurren en las obras viales se origina en una inapropiada consideración de los aspectos hidráulicos es imprescindible que en el planeamiento y diseño se dé una primerísima importancia al estudio de la acción del agua y al incremento de sus efectos en los años muy húmedos.

Se ha constado que a nivel mundial la principal causa de la falla de puentes se origina en problemas hidráulicos. Por eso es necesario que en el Perú, para el

análisis de diversos problemas de Hidráulica Fluvial, especialmente los relacionados a la degradación de cauces, se use los hidrogramas de descargas en lugar de los valores máximos instantáneos.

Evidentemente que mediante una adecuada prevención podríamos disminuir notablemente la vulnerabilidad de la Red Vial del País frente a fenómenos naturales y, en consecuencia, debemos tener presente que un fenómeno natural no es necesariamente un desastre. El desastre es no haber estado preparados.

Esta es la tercera edición del libro, considerablemente ampliada y actualizada con respecto a la segunda. Empieza con algunas consideraciones sobre la importancia y significado de los ríos en la vida del hombre, pues los ríos, además de constituir una obvia y disputada riqueza, son agresivos y debemos defendernos de ellos y, a la vez, debemos cuidar de ellos.

El conocimiento de las formas fluviales y su evolución en el tiempo es indispensable para el planeamiento y diseño de las obras viales ubicadas cerca de un río o sobre su lecho. Por eso en el segundo capítulo se presenta una exposición de la morfología fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales. Un tema interesante dentro de la morfología fluvial es el de los meandros. Einstein, el famoso autor de la Teoría de la Relatividad, también se ocupó de ellos y de ese tema trata el tercer capítulo de este libro.

En los encauzamientos, sea para obras viales o no, el ingeniero se enfrenta al difícil problema de determinar el ancho de un río (asociado a la Avenida de Diseño). Es frecuente que se produzcan estrechamientos excesivos, especialmente en la construcción de puentes, lo que debe evitarse. De acá surge la necesidad de examinar en el cuarto capítulo los llamados cursos de agua en régimen y se presenta el método de Blench, y varias relaciones empíricas. Este tema se complementa en el capítulo quinto con la presentación, a partir del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, de los conceptos de cauces, riberas y fajas marginales, muy importante para efectos de diseño.

En el sexto capítulo se presenta algunas reflexiones sobre las avenidas, sedimentos y quebradas, causantes de muchos daños en las obras viales. La interacción del comportamiento fluvial y las obras viales durante eventos hidrológicos extremos se examina en el capítulo séptimo, el que se complementa con lo que ocurre durante los Meganiños que es cuando se producen las grandes avenidas y deformaciones fluviales con el consiguiente daño para las obras viales, por lo que se presenta en el capítulo octavo algunas consideraciones sobre el diseño de estructuras sometidas a los Meganiños.

Para la estabilidad de los puentes es indispensable que el tramo fluvial comprometido esté debidamente encauzado. El tema de las defensas fluviales

es muy amplio y requeriría un libro completo. Como un ejemplo de ellas se ha visto útil la presentación, en el noveno capítulo, de los fundamentos del diseño de un sistema de defensas fluviales por medio de espigones.

Y, como los puentes fallan casi siempre por razones hidráulicas es que se presenta en el décimo capítulo la problemática de la erosión en pilares y estribos.

El capítulo décimo primero se dedica a una breve presentación de los Conceptos Básicos de Transporte de Sedimentos que pudieran resultar útiles al lector por haber sido mencionados en el texto.

Como puede verse fácilmente el tema de la Hidráulica de las Obras Viales es muy amplio. En el presente libro, que pretende ser una introducción al tema, sólo se trata algunos de los aspectos involucrados. En su lectura se deberá tener presente que los ríos son muy cambiantes, que conducen agua y sedimentos y que su flujo es tridimensional. Estas tres ideas constituyen el Leitmotiv de toda la exposición.

CAPÍTULO 1

SIGNIFICADO E IMPORTANCIA DE LOS RÍOS EN LA VIDA DEL HOMBRE

1.1 Introducción

Para tratar de la Hidráulica de las Obras Viales resulta indispensable empezar con algunas consideraciones generales sobre los ríos, especialmente en lo que respecta a su significado e importancia en la vida del hombre.

Cuando llueve, el agua tiende a escurrir sobre el terreno y se concentra en determinados cursos que se van juntando unos a otros y que constituyen finalmente los ríos. Según Frijlink, los ríos constituyen “un sistema de canales (cursos de agua) por medio de los cuales se descarga el agua de la cuenca.” El Diccionario de la Real Academia Española (DRAE) dice que un río es una “corriente de agua continua y más o menos caudalosa que va a desembocar en otra, en un lago o en el mar.”

El comportamiento de los ríos es fascinante. Tratar de entenderlos mediante la representación matemática de los fenómenos que usualmente hacemos en ingeniería es una tarea ardua y que sólo puede lograrse parcialmente. Esto se debe a que su comportamiento no puede describirse con las fórmulas que generalmente se aplica en la hidráulica de conductos abiertos. Son tres las causas principales de esta limitación. La primera es que los ríos son esencialmente cambiantes y dinámicos. La segunda es que en un río el flujo es a dos fases, es decir, que lleva agua y sedimentos (sólidos). Y, por último, el flujo en un río es marcadamente tridimensional. Estas tres circunstancias, a las que podría añadirse otras más, plantean un enorme desafío para el ingeniero hidráulico.

Sin embargo, enfrentarse a este reto encuentra su justificación en la enorme importancia que tienen los ríos en nuestra lucha constante por alcanzar una mejor calidad de vida y lograr así el progreso de la humanidad. El bienestar del que ahora goza una parte de la sociedad no podría imaginarse sin la labor que realiza la ingeniería para mejorar nuestro conocimiento, aprovechamiento y control de los ríos. Basta con recordar que en julio del 2010 Naciones Unidas declaró que el acceso al agua potable y al saneamiento son derechos humanos esenciales para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos.

1.1.1 La ingeniería de ríos

La Ingeniería de Ríos nos enseña a trabajar con los ríos y a contrarrestar sus características de gran variabilidad y de desplazamientos continuos, pues lo más representativo de un río es su dinamismo, el que debe comprenderse cabalmente para poder realizar su aprovechamiento y control. Nos enseña también a manejar las enormes cantidades de agua y de sólidos que llevan los ríos y a tratar de comprender su flujo tridimensional y sus corrientes secundarias, tan diferentes de lo que encontramos en la mayor parte de las fórmulas de la Hidráulica de Canales, las que son idealizaciones de la realidad.

Cada río es diferente a los otros. Los hay grandes y caudalosos que parecen tener inacabables cantidades de agua. Los hay muy pequeños y de escaso caudal. Los hay de flujo permanente y los de descargas eventuales (efímeros). Cada río, al igual que cada hombre, tiene su propio comportamiento y sus peculiaridades que lo hacen único. Sólo con muchas reservas se puede hablar de “ríos típicos”. Este conocimiento de la singularidad fluvial resulta muy importante, por ejemplo, al diseñar un puente que interactúa con un río. El conocimiento de los ríos resulta ser fundamental para comprender y manejar los problemas que surgen entre los ríos y las obras viales, cuando las segundas se acercan a los primeros.

Los ríos son los elementos naturales de drenaje de la cuenca y, además de agua, llevan sólidos que son producto de la erosión de la cuenca. En algunos lugares los ríos también llevan hielo. Además de estas funciones naturales los ríos tienen, en algunos lugares como en el Perú, una función no natural que crea enormes dificultades para su aprovechamiento: eliminar y evacuar desperdicios, residuos sólidos (basura), relaves mineros, desmonte, derrames de petróleo, compuestos químicos diversos usados en la producción de drogas, plásticos, troncos de árboles, ramas, animales muertos, palizadas y otros cuerpos extraños.

1.1.2 La Potamología

La Potamología es la ciencia del estudio integral de los ríos en sus tres dimensiones: económica, social y ambiental. Etimológicamente, viene del griego “*potamos*” (Ποταμός) que significa río. En noviembre del 2008 se celebró en México el Primer Seminario de Potamología “José Antonio Maza Álvarez”, organizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Comité Nacional Mexicano del Programa Hidrológico Internacional, con el objetivo de estimular las investigaciones y aplicaciones en el área de la mecánica de ríos.

En la convocatoria de dicho Seminario se señaló que: “Los retos que enfrenta México en materia de ingeniería de ríos son enormes, tanto por el aumento en la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos, como por el incremento

en la vulnerabilidad de las poblaciones asentadas sobre las planicies inundables que causan inundaciones y daños severos a los centros de población y áreas productivas del país.”

Lo expresado con respecto a México podría decirse exactamente del Perú. Como puede observarse, al Seminario se le dio el nombre de José Antonio Maza Álvarez, notable ingeniero mexicano que hizo importantes contribuciones a la Hidráulica Fluvial.

Para tener una mejor y más amplia idea del sentido y significado del término Potamología, poco usado en el Perú, bastaría con mencionar los temas que incluyó el antes mencionado Primer Seminario. Ellos fueron: Paleopotamología, Estabilidad de bordos y obras marginales, Producción y transporte de sedimentos, Resistencia al flujo y formas de fondo, Geomorfología fluvial, Transporte de contaminantes en ríos, Restauración de cauces y encauzamientos, Erosión local en estructuras, Sedimentación en embalses, Flujos de lodo y avalanchas, Modelación del escurrimiento superficial, Morfodinámica de abanicos y deltas, Modelación de flujo en ríos, Medición de variables hidráulicas en ríos y lagos y Descripción geoespacial de cauces y planicies de inundación. En agosto del 2009 se celebró el II Seminario, cuyo lema fue la Restauración de Ríos para la sustentabilidad ambiental.

El III Seminario se realizó en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, en agosto 2011. Se adjunta como Anexo 1-A de este capítulo algunas de las Conclusiones de tan importante Seminario, las que, si bien están inspiradas en problemas mexicanos, también son de gran utilidad para nuestro país.

La preocupación por los ríos es mundial. En abril del 2011 se celebró en Viena la Conferencia Internacional sobre la “Situación y el Futuro de los Grandes Ríos del Mundo”, con el objetivo de “proporcionar un foro global para una amplia discusión de las cuestiones clave relacionadas con la investigación de los grandes ríos y su gestión eficaz y sostenible, con la participación tanto de científicos y tomadores de decisiones.” Al final de la Conferencia se aprobó la Declaración de Viena sobre los grandes ríos.

1.1.3 El significado de los ríos

Los ríos constituyen una realidad mucho más compleja que su comprensión desde el punto de vista hidráulico, pues, como se ha dicho, tienen una enorme importancia y significado en la vida del hombre, lo que es fundamental tener presente para poder trabajar con ellos.

Con ocasión de la ceremonia inaugural del XIX Congreso Mundial de la Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas (IAHR) el prestigioso ingeniero hidráulico John F. Kennedy, por entonces su presidente, pronunció unas palabras que se deben tener siempre muy presentes y que son las

siguientes: “A través de la historia de la Humanidad se puede comprobar que las grandes civilizaciones sólo han florecido donde el agua ha sido cuidada y amada como una madre, respetada como un poderoso enemigo y manejada como una caja de caudales y tesoros, que es lo que en verdad son los ríos.”

Para comprender mejor el significado e importancia de los ríos en la vida del hombre es necesario examinarlos desde tres puntos de vista. Primero, como riqueza que aprovechamos cada vez más en beneficio de la humanidad. Segundo, como elementos agresivos de los que el hombre debe defenderse. Y, tercero, como constituyentes de una parte muy vulnerable de la Naturaleza, que necesita ser protegida de la agresión humana. Cada uno de estos tres puntos será examinado a continuación, pues constituyen expresión de la compleja interacción entre el Hombre y el Río.

1.2 Los ríos constituyen riqueza

Los ríos deben ser mirados como riqueza, es decir, como un recurso natural que es fuente de vida y que constituye un conjunto de posibilidades que se usa en beneficio de la humanidad. Así ha sido desde los tiempos más remotos, cuando el hombre se estableció junto a las fuentes de agua, las aprovechó y empezó la civilización. Desde entonces, y hasta ahora, se ha producido un conflictivo, pero indispensable, binomio Hombre-Río. Esta asociación ancestral ha hecho posible el desarrollo social y económico que hemos alcanzado.

De la gran cantidad de agua que hay en nuestro planeta (1350 millones de km^3), en la actualidad sólo podemos tener acceso técnica y económicamente posible a los ríos y corrientes, lagos de agua dulce y aguas subterráneas poco profundas. Por lo tanto, los ríos representan una gran riqueza, que es muy difícil de cuantificar y de valorar debidamente. Sólo para tener una idea se podría mencionar que la escorrentía superficial mundial, en cifras redondas y como promedio, está alrededor de 40 000 km^3 por año y es la llamada Agua Azul, constituida básicamente por las aguas superficiales y los acuíferos. Representa el 40% de la lluvia (Agua Verde) que cae sobre la tierra firme del planeta.

El agua de los ríos se caracteriza por su gran variabilidad espacial y temporal. Hay zonas del planeta en las que el agua superficial es abundante y otras en las que el agua es muy escasa. Hay cinco países, India, China, Pakistán, Rusia y Canadá, que poseen la mitad de las reservas mundiales de agua. Lo mismo ocurre dentro de un mismo país, en el que hay cuencas, o bien regiones, excedentarias y otras deficitarias.

En el Perú la disponibilidad de agua superficial es muy alta (2000 km^3 por año). Esto nos coloca en el puesto 17 dentro de 180 naciones. Es cierto, sin embargo, que esta gran cantidad de agua, que representa casi el 5% de la escorrentía mundial, se encuentra muy desigualmente distribuida en el tiempo y

en el espacio. Es decir, hay escasez relativa de agua, que en nuestro caso significa escasez económica de agua.

La historia del progreso de la humanidad podría escribirse a partir de los avances obtenidos en el aprovechamiento de los cursos de agua. Las más importantes civilizaciones de la antigüedad, a las que algunos autores llaman Civilizaciones Fluviales, surgieron junto a los grandes ríos, crearon una cultura propia e iniciaron así su progreso y desarrollo. Los hombres construyeron ciudades, desarrollaron campos de cultivo y alcanzaron su esplendor y cultura a partir del aprovechamiento de los ríos en cuyas orillas se asentaron. La navegación constituyó un importante aprovechamiento fluvial. De acá que se haya dicho que existe un “vínculo emocional” entre el Hombre y el Río. Recordemos la conocida frase de Heródoto, “Egipto es un don del Nilo”.

1.2.1 Inicios del aprovechamiento fluvial

Cuando el hombre se acercó a las fuentes de agua y se estableció junto a ellas, su economía basada en la recolección y la caza se transformó en una economía sustentada en la agricultura. Los excedentes económicos dieron lugar a la formación de ciudades. Los ríos Nilo, Tigris, Eufrates, Amarillo, Indo y muchos otros más, corresponden a lo que venimos señalando. Los ríos eran fuente de agua para beber y sembrar, eran medio de transporte y lugar de recreación y pesca. En ese entonces el agua parecía un recurso inagotable. No había necesidad de planificar ni de cuidar su uso, pues no había escasez. En el siglo XXI la situación ha cambiado radicalmente.

La árida costa del antiguo Perú no fue la excepción. Ante la ausencia de lluvias útiles, el nacimiento, desarrollo y muerte de la civilización estuvo en función del dominio del agua mediante el aprovechamiento de los ríos. La aparición eventual de los grandes Niños tiene que haber sido causa de la destrucción y muerte de muchos pueblos.

En los tiempos más antiguos el aprovechamiento de los ríos era pasivo, es decir que se obtenía beneficios de ellos tal como se encontraban en la Naturaleza. Así ocurría, por ejemplo, con las inundaciones del Nilo y del Indo y en los ríos de la costa norperuana.

Posteriormente vino el aprovechamiento fluvial activo que consiste en la construcción de obras de ingeniería, de creciente complejidad, para obtener un beneficio mayor de las aguas de los ríos. El avance de la civilización significó una mayor y más fructífera y peligrosa aproximación del hombre hacia el río. Se intensificó así la importancia del binomio Hombre-Río.

En los primeros tiempos de la utilización activa de los ríos, ésta se lograba mediante sencillas obras de ingeniería, tal como hasta ahora se practica en muchos lugares. Pero, para satisfacer la creciente demanda de agua y de

bienestar se requirió de obras complejas. La ingeniería hizo posible lo que algunos autores llaman el dominio de la naturaleza.

En el Perú tenemos numerosos ríos cuyas descargas se encuentran muy irregularmente distribuidas en el tiempo y en el espacio y cuyo aprovechamiento resulta ser fundamental para lograr el desarrollo. El manejo de los ríos, su tránsito de ríos jóvenes e impetuosos a ríos maduros, de cauce más definido y estable, es una de las tareas que la ingeniería tiene ante sí. Para lograrlo es necesario poseer los conocimientos indispensables de Hidráulica Fluvial.

En el Perú y en el mundo se desarrollan proyectos de irrigación, de hidroelectricidad, de abastecimiento poblacional e industrial, de navegación, así como de control y encauzamiento de ríos, todos los cuales requieren importantes obras de ingeniería que se basan en el conocimiento del complejo comportamiento fluvial. Los ríos también cumplen una función recreativa o lúdica: natación, pesca, canotaje y otras más.

La navegación fluvial empezó desde los albores de la civilización y ha contribuido poderosamente al progreso de la humanidad. El manejo de los ríos navegables ha planteado interesantes problemas a la Hidráulica de Ríos. En lugares como la Amazonía la navegación es casi el único medio de transporte.

La Hidráulica Fluvial tiene mucho que ver con la concepción de importantes estructuras hidráulicas. Así, las bocatomas son obras construidas en un río con el objeto de captar sus aguas para utilizarlas en un proyecto de desarrollo. El diseño, construcción y operación de una bocatoma es un importante tema de la Hidráulica de Ríos, pues su implementación significa una modificación, a veces muy intensa, del escurrimiento fluvial. Los problemas principales se originan en el contraste entre las máximas y mínimas descargas, en la movilidad fluvial, y en los sólidos y cuerpos extraños que acarrea la corriente.

Para el aprovechamiento de los ríos se recurre también a la construcción de presas con el objeto de regular caudales. En la actualidad existen en el mundo más de 50 000 grandes presas, la mitad de las cuales está en China. Las presas que pasan de 15 metros de altura se denominan grandes. Cuando las presas están ubicadas sobre el lecho de los ríos representan cambios fluviomorfológicos importantes, como erosión y sedimentación.

Para aprovechar los ríos, muchas veces es necesario garantizar su estabilidad, la que se puede lograr con un sistema de defensas, uno de ellos es el de espigones (Capítulo 9). Para comunicar ambos márgenes se construye puentes, algunas de cuyas particularidades desde el punto de vista hidráulico son examinadas en el Capítulo 10. Para hacer posible la navegación y la existencia y operación de los puertos fluviales se requiere una intensa participación de la Hidráulica de Ríos.

Como los ríos representan riqueza hay disputas por su posesión. Cuando un Estado se constituye como tal tiene que proclamar para sí la propiedad de las aguas de su territorio. En las guerras se puede dominar al enemigo controlando las fuentes de agua. Así lo hicieron los Incas cuando conquistaron la costa peruana. El control del agua era, y es, fuente de poder. No se debe olvidar que el 98% de los recursos hidráulicos superficiales del Perú tiene algún grado de compromiso internacional.

Como una demostración de la riqueza que significan los ríos se recuerda que en la antigua legislación española las aguas eran de propiedad real y su uso se autorizaba mediante mercedes, denominación que hasta ahora se conserva en algunos lugares, como por ejemplo en Chile.

Para el mejor y mayor aprovechamiento de la riqueza que representan los ríos y para su control y cuidado se requiere la presencia y acción de la ingeniería. Sin embargo, para que ésta sea efectiva tiene que partir del conocimiento del río y de las magnitudes asociadas a él.

1.2.2 La información hidrológica

El conocimiento de un río es una tarea larga que requiere mucha paciencia y la inversión de tiempo y dinero. El conocimiento tiene que empezar por el inventario, que es la recolección, procesamiento e interpretación de datos, que no son otra cosa que las observaciones y mediciones efectuadas en el campo y también de aquéllas que puedan obtenerse por cualquier otro medio. La recolección es la acumulación pasiva de datos. Últimamente la paleohidrometría viene recibiendo un gran impulso. Los datos deben ser procesados e interpretados para obtener el producto final que es la Información. La obtención de Información no es un fin en sí, sino un medio para obtener conocimiento. La información es un instrumento para la acción. La posesión de Información se convierte así en fuente de poder. La información es riqueza.

En todos los campos del conocimiento se requiere información para lograr el progreso. La diferencia entre los países desarrollados y los subdesarrollados podría expresarse en función del grado de información que cada uno posee. Los primeros invierten grandes cantidades de dinero para obtener información. En el Perú se ha descuidado mucho la obtención de información básica. La Hidrología, específicamente la Hidrometría, siempre ha sido el punto débil de nuestros estudios. La información nos permite conocer la disponibilidad de agua, las probabilidades de sequías y de avenidas, el transporte de sólidos y las variaciones del curso de los ríos, además de muchos otros aspectos.

Esta escasez de información hidrológica confiable es mayor en las grandes avenidas. Las crecidas de los ríos son difíciles de medir; sin embargo, ese es precisamente el dato que necesitamos para calcular la probabilidad de

ocurrencia de eventos extremos. Así por ejemplo, para el diseño de un puente son muy importantes el conocimiento del río y la información hidrológica. Para la navegación es indispensable medir las profundidades, pues se debe conservar calados mínimos.

Numerosas personalidades del mundo profesional, académico e institucional han llamado la atención en repetidas oportunidades acerca de la escasez de información básica y el riesgo y el mayor costo que esto implica para nuestros proyectos. El “Informe del Colegio de Ingenieros del Perú sobre El Niño 98” recomendó el fortalecimiento de los organismos encargados de la toma de datos y la repotenciación y modernización de la red hidrometeorológica nacional con la participación de los grupos interesados en esa información. El Comité Peruano de Grandes Presas llamó la atención en numerosas oportunidades acerca de la necesidad de mejorar la cantidad y la calidad de la información básica disponible sobre los ríos.

En todo caso, los registros disponibles son muy cortos y seguirán siéndolo por mucho tiempo. En lo que toca al agua, lo que no se midió en su oportunidad es un dato que se perdió para siempre. Queda, sin embargo, el recurso de los métodos indirectos para conocer los eventos extremos ocurridos en el pasado, en los últimos cientos o miles de años.

La obtención, el procesamiento y la interpretación de la Información es el camino para una mejor comprensión del comportamiento fluvial, el que nos lleva a su aprovechamiento y a tomar medidas para contrarrestar adecuadamente sus efectos negativos. Este es el primer reto que tenemos frente a nosotros. Los problemas no son fundamentalmente técnicos. Tenemos a nuestro alcance la tecnología necesaria para obtener información valiosa, tenemos los medios para atacar los problemas difíciles que puedan presentarse y los conocimientos para interpretar los resultados. El problema está en la decisión política, que corresponde al Estado, para la obtención de la información que nos permita aprovechar mejor la gran riqueza que representan los ríos.

1.2.3 Riqueza espiritual

Los ríos no sólo representan una riqueza material, sino que para muchos pueblos son una riqueza espiritual; así, en la religión hindú se les considera dioses. En la India, el Ganges fluye desde las alturas heladas del Himalaya, recorre unos 2600 kilómetros y llega a su desembocadura en el golfo de Bengala donde forma un delta de 320 kilómetros de ancho. El río Ganges, al que llaman Ganga, es el símbolo de la India. Se ha dicho que es el río más sagrado del mundo y sus aguas se consideran purificadoras.

Desde hace siglos los creyentes llegan por millones hasta él para sumergirse en sus aguas y liberarse así de sus pecados y creen que “morir en sus orillas

conduce a la salvación.” Dentro del hinduismo, y según el filósofo y poeta místico hindú Tulsidas, el río Ganges es “el dador de salvación y disfrute material”. Los creyentes manifiestan que beber sus aguas es “como ser amamantado por la propia madre”. Todo esto a pesar de que un profano pensaría en el elevado grado de deterioro de calidad que tienen sus aguas, pues el Ganges es uno de los diez ríos más contaminados del mundo.

El Nilo es el río sagrado de Egipto. Se origina en las alturas de Etiopía (Nilo Azul) y en el lago Victoria (Nilo Blanco), en África Central, y desemboca en el Mediterráneo. En sus orillas crece la flor del loto, símbolo sagrado de Egipto. El Nilo separa el Este del Oeste y para los egipcios era la representación simbólica de la Vía Láctea. Se le consideraba “la fuente de la descendencia”, pues contenía las aguas de la vida.

El río Vilcanota-Urubamba (Willka Mayu, “río sagrado” o “río del sol”), que rodea la ciudadela de Machu Picchu, nace en el nevado Cunurana en Puno a 5443 msnm. Era el río sagrado de los Incas.

1.3 La agresión fluvial

Así como los ríos son fuente de vida y de riqueza, también son fuente de muerte. Por lo tanto, se les debe mirar como elementos naturales de los cuales el hombre tiene que defenderse. Un río es, potencialmente, un peligro.

La agresión fluvial se manifiesta básicamente de dos maneras. La primera corresponde a las grandes crecidas, riadas y avenidas, o aluviones como se les decía antiguamente, que son fenómenos naturales producto de la aparición de determinadas condiciones hidrometeorológicas y que implican no sólo el aumento del caudal y de los sólidos, sino también cambios fluviomorfológicos importantes. En la costa norperuana estas grandes avenidas se presentan con relativa frecuencia y, muchas veces, aunque no siempre, se deben al Fenómeno de El Niño. La segunda manifestación de la agresividad fluvial se debe a la facilidad con la que los ríos conducen las sustancias contaminantes, generalmente de origen humano, de un lugar a otro.

1.3.1 Las avenidas

La aparición de una determinada avenida es un evento natural cuyo origen escapa a las posibilidades humanas. En el Capítulo 6 se amplía la exposición referente a las avenidas. La agresión fluvial se manifiesta muchas veces contra las obras de ingeniería en general, las viales y, en particular, sobre los puentes.

Para el aprovechamiento de un río mediante la construcción de obras en contacto con el cauce es necesario conocer las avenidas que pueden presentarse. Dicho en otras palabras, lo que se requiere conocer es la probabilidad de ocurrencia de avenidas de una magnitud dada durante la vida

del proyecto. Para ello es fundamental el uso de la información antes mencionada. La ocurrencia de avenidas mayores que las previstas puede tener consecuencias funestas para una obra. Las grandes presas se protegen contra avenidas de un periodo de retorno muy grande. Así por ejemplo, la presa de Poechos del Proyecto Chira-Piura se calculó para la avenida decamilenaria. Es usual que para las grandes estructuras se verifique el valor de la Avenida Máxima Probable.

El último Meganiño de 1997-98 provocó avenidas de larga duración y de valores muy altos. Quebradas, llamadas erróneamente secas, se activaron y tuvieron descargas inusitadas. Los ríos se volvieron fuente de muerte y de destrucción. Los daños fueron considerables, 58 puentes quedaron destruidos.

1.3.2 Avenidas e inundaciones

En el comportamiento de los ríos a veces se confunde los conceptos de avenida y de inundación. Una inundación es el desbordamiento de un río por la incapacidad del cauce para contener el caudal que se presenta. La inundación es, pues, un fenómeno de tipo hidráulico, prueba de ello es que pueden ocurrir inundaciones sin que haya crecidas o eventos hidrometeorológicos extraordinarios.

El escurrimiento de la avenida a lo largo de un cauce es un tema que corresponde a la Hidráulica Fluvial y que, en muchos casos, puede ser razonablemente controlado. De modo que la Hidráulica Fluvial tiene ante sí una tarea muy grande en la defensa contra las inundaciones. Grandes áreas del Perú están sujetas al impacto del Fenómeno de El Niño, una de cuyas características es la aparición de avenidas de larga duración que representan un tren de ondas. Para controlar las avenidas hay diversos métodos, uno de ellos es la construcción de defensas.

Las inundaciones por desbordes fluviales causan enormes daños y pérdida de vidas humanas. Sin embargo, no se debe perder de vista que es el hombre el que se acerca al río, a veces demasiado, y no el río al hombre. Las obras de control y el tratamiento del problema de las avenidas e inundaciones son parte de la Hidráulica Fluvial. La prevención es fundamental y el planeamiento del uso de la tierra resulta ser indispensable porque el recurso tierra es muy escaso en el Perú.

Para enfatizar la importancia de la prevención se señala un ejemplo. Una de las primeras y más fuertes manifestaciones del Meganiño 1997-98 fue la inundación de la ciudad de Ica ocurrida el 29 de enero de 1998. No era la primera vez que esta ciudad sufría una inundación importante, la anterior había sido en 1963. Los daños causados por la inundación de 1998 fueron considerables. Numerosas familias perdieron sus casas y las autoridades dispusieron el traslado de los pobladores afectados. Las familias se

establecieron en condiciones precarias y con la esperanza de que se hiciesen las habilitaciones urbanas indispensables. Las chozas de esteras en medio del arenal, sin agua, desagüe ni luz eléctrica eran condiciones sumamente severas. En la ciudad de Ica no sólo se había perdido las casas, sino que habían colapsado los sistemas de agua potable y alcantarillado, lo que produjo una situación delicada desde el punto de vista sanitario. Si a lo anterior se añade que por entonces el país vivía una situación económica difícil, una de cuyas manifestaciones era la escasez de trabajo, se comprende el enorme impacto social y económico de esta inundación, la que también afectó zonas agrícolas con los consiguientes daños asociados.

Lamentablemente, al igual que en otros lugares, no se tiene información acerca de los caudales que pudieron haberse presentado en el río Ica. No hubo mediciones. Los primeros valores anunciados para el máximo caudal fueron bastante más grandes de lo que un simple análisis permitía calcular. Esta inundación se debió a que al presentarse caudales importantes, el cauce del río y el antiguo sistema de evacuación fluvial se encontraban en condiciones hidráulicas desastrosas. Esta incapacidad de los antiguos cauces de evacuar las aguas originadas por las fuertes precipitaciones en la cuenca dio lugar a la inundación de Ica. Los cauces habían sido ocupados, urbanizados o convertidos en botaderos de residuos sólidos (basura) y desmonte.

La inundación fue, pues, por desborde del río. Esta es una diferencia con respecto a lo que ocurre durante el FEN en el norte del país, donde las inundaciones se deben tanto a la lluvia persistente como al desborde fluvial, como fue por ejemplo en Zaña en 1720.

1.3.3 Los sedimentos

Pero, los ríos además de agua transportan sedimentos que durante las avenidas pueden representar grandes cantidades. Se calcula que los ríos de todo el mundo descargan anualmente 20 000 millones de toneladas de sólidos. El estudio de la pérdida de volumen útil de los embalses y los métodos de lucha para conservar su volumen útil forman parte de los problemas de la Hidráulica Fluvial. Por efecto de la sedimentación se pierde en el mundo, cada año, el 1% del volumen de los embalses.

1.3.4 La contaminación

La otra forma de agresión fluvial se encuentra en la propagación de la contaminación. La contaminación es la pérdida de pureza por incorporación de sustancias extrañas. Este es otro motivo para que un río sea, potencialmente, un peligro. En el Perú casi todos los ríos están contaminados, lo que afecta, encarece, impide o dificulta su aprovechamiento.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) está empeñada en prevenir las enfermedades causadas por el agua contaminada. Se calcula que durante el año 2008 murieron en el mundo 1 600 000 personas como consecuencia del agua contaminada. En la actualidad hay 2400 millones de personas en el mundo que no tienen acceso a agua de calidad apropiada.

1.4 La protección de los ríos

La agresión Hombre-Río es recíproca. Ya se ha descrito como el río amenaza y ataca al hombre. En este punto se verá la agresión del hombre a los ríos y la forma de protegerlos para que sigan siendo fuente de riqueza. La diferencia entre ambas agresiones está en que, como ya se dijo, es el hombre quien se acerca al río y no el río al hombre.

1.4.1 El ecosistema fluvial

Un río es un ecosistema valioso y debemos protegerlo. Los ríos son agredidos por las acciones humanas, típicamente por la construcción de obras. Una de las formas más comunes de agresión al río es la invasión de su cauce, de lo que se trata en el Capítulo 5. Más adelante se desarrolla la interacción entre el río y los espigones, como parte de un sistema de defensas ribereñas (Capítulo 9), y con los pilares y estribos de un puente (Capítulo 10). Las grandes presas, antes mencionadas, permiten el progreso y el desarrollo, pero ¿qué mayor agresión se le puede hacer a un río que construir una gran presa sobre su lecho e interrumpir su curso natural dando así lugar a la aparición de fenómenos de agradación y degradación?.

A propósito del impacto de las acciones humanas el ingeniero J. Hoover Mackin, citado por Richardson, escribió lo siguiente: “El ingeniero que altera el equilibrio natural de un río, sea porque construye una presa, una derivación o cualquier otra obra pronto se dará cuenta que hay una larga cadena de reacciones que aumentan a medida que trata de restituir al río a algo parecido a su estado inicial. Debe ser consciente que está trabajando con un río y no en un río.”

La diferencia es sutil, pero fundamental. Un autor ha dicho que los ríos son temperamentales: reaccionan violentamente cuando los tocamos, lo cual sucede generalmente al construir una obra de ingeniería. Por eso, la regla número uno de la Hidráulica Fluvial es la de alterar lo menos posible el río con el que estamos trabajando.

1.4.2 La agresión por contaminación

Otra forma típica de agresión a los ríos, que luego se vuelve contra quien la causó, es la contaminación. La contaminación es un fuerte limitante para el uso del agua. En los últimos 100 años los sistemas fluviales han sufrido el mayor

deterioro desde que el hombre está sobre la Tierra. Se ha producido lo que algunos autores han llamado el “Acoso físico al ecosistema fluvial”.

“Esta degradación se refleja en una constante reducción territorial del Dominio Público Hidráulico (que nos pertenece a todos), la falta de naturalidad en los ríos, el aumento de desastres “naturales” y un número creciente de especies acuáticas amenazadas y en peligro de extinción”, ha señalado Guido Schmidt. El deterioro fluvial tiene origen múltiple, según las épocas y las circunstancias, y se manifiesta de muchas formas, entre las que están:

- a) La erosión de cuencas que trae como consecuencia una disminución de su poder regulador y, además, el incremento de la producción de sólidos, todo lo cual significa dificultades y encarecimiento del aprovechamiento fluvial.
- b) El impacto causado por las obras de ingeniería que buscan el aprovechamiento fluvial en general y el control de los ríos.
- c) La alteración y/o la interrupción del recorrido fluvial. En muchos lugares del mundo, y la costa peruana no es una excepción, hay brazos de ríos “taponeados” que han dejado de existir como tales y que durante las grandes avenidas tratan de recuperar sus antiguos cauces (paleocauces), generalmente urbanizados o llenos de basura y desmonte. Tal es el caso de la quebrada Huaycoloro, San Juan de Lurigancho, Lima. Un vecino informó que: “Durante las noches algunos camiones con desperdicios llegan hasta el puente y echan bolsas de basura al cauce.” El año 2004 la Municipalidad de Lima retiró 30 000 toneladas de desperdicios, basura y desmonte del cauce de la quebrada Huaycoloro que impedían su libre curso. En febrero de 1998 un huaico destruyó más de 150 viviendas ubicadas en la quebrada. La descarga estuvo acompañada de troncos de árboles, maleza, desperdicios diversos y hasta cadáveres de caballos.
- d) La derivación de un elevado porcentaje, o de la totalidad, del caudal de un río con la consiguiente disminución o anulación del imprescindible caudal ecológico, también llamado biológico o sanitario. El río Rímac es un claro y mal ejemplo de ello.
- e) La contaminación creciente que existe en el mundo, es decir, la pérdida de calidad del agua.

El agua que está en la Naturaleza es prácticamente pura; se contamina cuando entra en contacto con la corteza terrestre y con las acciones humanas (en algunos casos el agua se contamina antes de llegar a la tierra, como ocurre con la lluvia ácida). El río es un gran dren colector de la cuenca, no sólo del agua, sino de todo aquello que está en contacto con ella. Los ríos conducen las sustancias contaminantes de un lugar a otro. Se debe, pues, luchar contra la contaminación y así proteger a los ríos para que sea más fácil y económico su

aprovechamiento. Desde hace siglos los ríos vienen siendo maltratados por el hombre. Este maltrato es de consecuencias más graves como resultado de la explosión demográfica y de la mayor capacidad de contaminación como resultado de la industrialización.

La destrucción de los ríos ha llamado la atención de escritores y novelistas. Así, por ejemplo, Miguel Delibes, uno de los grandes de la literatura española del siglo XX, cuya obra se caracteriza por la importancia que da a la convivencia del hombre con la naturaleza, señaló que: “La destrucción de los ríos no es solamente física, es también una destrucción de su significado para el ser humano; es una verdadera amputación espiritual del paisaje en el que transcurre nuestra vida. Los ríos están llenos de referencias personales y de la comunidad a la que pertenecemos; son parte viva de nuestra historia, testigos de nuestro fluir generacional”. Esas palabras aparecen en la “Presentación del Congreso en Homenaje al río Duero” (2006). El Duero, al que se le considera “uno de los ejes culturales más importantes del sur de Europa”, es un importante río binacional (España y Portugal) navegable, con una cuenca de casi 100 000 km².

Dicho Congreso pretendió hacer una “Hidrología Humanista”, según sus organizadores, y comprendió tres grandes temas: El agua como recurso, el agua como naturaleza y el agua como cultura y emoción. Estuvo dirigido a hidrólogos, biólogos, sociólogos, ecólogos, geógrafos, responsables de salud pública, abastecedores de agua potable, productores hidroeléctricos, regantes, paisajistas, especialistas en patrimonio hidráulico, educadores, gestores de agua y del medio ambiente, estudiantes del medio natural y la ingeniería medioambiental, grupos conservacionistas, escritores, deportistas fluviales, pescadores, empresarios de la naturaleza, medios de comunicación y amantes de los ríos en general. Como puede verse fácilmente el Congreso sobre el Duero (Douro, en Portugal) buscaba una comprensión holística, es decir totalizadora, de la enorme complejidad que representa un río y de la gran responsabilidad que tenemos frente a él.

1.4.3 Erosión de cuencas

En el Perú tenemos diversas manifestaciones del daño que estamos causando a los ríos. Hay serios y crecientes problemas de erosión de cuencas. La erosión de cuencas es un proceso natural, que se ve agravado por la acción humana. El producto de la erosión de la cuenca es transportado por los ríos y se conoce con el nombre de sedimentos (sólidos). Los ríos transportan cantidades crecientes de sólidos que crean graves problemas para su aprovechamiento. La agresión a las cuencas es una agresión a los ríos, pues se incrementa el transporte sólido fluvial. El control de la erosión de cuencas es fundamental para el adecuado manejo y aprovechamiento de los ríos.

1.4.4 Las obras de ingeniería

La construcción de obras de derivación, eventualmente asociadas a grandes presas y embalses, trae como consecuencia una disminución del caudal remanente en el río. Este caudal debería tener un valor mínimo, variable para cada río, al que se le llama caudal ecológico, biológico o sanitario. La ausencia de un caudal ecológico apropiado se agrava por los vertimientos y desagües que se arroja a los ríos.

Las bocatomas y las presas ubicadas sobre el lecho fluvial causan profundas transformaciones en el escurrimiento del agua y de los sólidos y deben tratarse como problemas de Hidráulica Fluvial. Una de las respuestas del río es la agradación aguas arriba con la consiguiente pérdida de capacidad de los embalses. En cambio, hacia aguas abajo hay tendencia a la degradación. Las grandes presas han contribuido enormemente al aprovechamiento fluvial y al desarrollo humano. Tienen, sin embargo, sus detractores. A veces las grandes presas desvían fuera del cauce enormes cantidades de agua que de lo contrario “se perderían en el mar”; pero, todo el curso fluvial ubicado aguas abajo de la presa queda seco y se produce la muerte prematura del río, sin haber llegado al mar.

Las obras de defensa y encauzamiento de ríos constituyen agresiones al escurrimiento natural de un río. Sin embargo, hacen posible su aprovechamiento y control. En grandes partes del territorio peruano los ríos sufren la agresión del Fenómeno de El Niño, especialmente cuando éste tiene características de Meganiño.

Los ríos sufren la destrucción y ocupación de sus riberas, lo que significa un atentado contra el Dominio Público Hidráulico. Por eso en el Capítulo 5 se trata de los cauces, riberas y fajas marginales. Los estudios de Impacto Ambiental deberían ser muy cuidadosos al respecto.

1.4.5 La restauración de ríos

El maltrato a los ríos es tan grande que ha surgido el concepto de Restauración de Ríos, que es el conjunto de acciones que debemos realizar todos para que un río recupere las características que tenía antes de la agresión que sufrió por la acción humana, o de otro tipo, y que nos permitirá seguir aprovechando su riqueza y sus beneficios. La restauración de ríos sólo se está poniendo en práctica en algunos lugares, aunque está despertando un interés cada vez mayor, sobre todo en Europa. La restauración de un río es algo similar a la “Reconstrucción y Rehabilitación” de las zonas afectadas por algún fenómeno natural.

En España, en la actualidad, más de la mitad de sus ríos están contaminados. Para contrarrestar lo cual elaboraron en enero del 2008, y bajo el lema “Los

ríos: un compromiso de todos”, una Estrategia Nacional de Restauración de Ríos para el periodo 2008-2015, cuyo objetivo es la restauración de la calidad ambiental de las masas de agua españolas, así como los valores ambientales asociados a éstas, ayudando a paliar los efectos de las inundaciones. El costo de este programa es de 1456 millones de euros.

La Estrategia Española no se centra exclusivamente en el cauce de los ríos, sino también en la recuperación de los ecosistemas de ribera degradados, puesto que la vegetación ribereña ayuda a reducir las inundaciones, así como los daños por erosión de las márgenes y contribuye a la depuración y mejora de la calidad del agua, sin olvidar su contribución al mantenimiento del equilibrio biológico de la zona. El objetivo principal de la Estrategia Española es la mejora del estado ecológico de los ríos y será un elemento fundamental dentro de los programas de medidas que se lleven a cabo en los próximos años, integrados en los respectivos planes hidrológicos de cuenca.

Desde hace miles de años, cada vez con mayor intensidad, venimos utilizando los ríos para la satisfacción de nuestras necesidades y para lograr el progreso y bienestar. Pero, lamentablemente la agresión humana que sufren los ríos también es cada vez mayor. Qué nuestra meta sea lograr el máximo beneficio de los ríos y, a la vez, la de cuidarlos y mantenerlos.

Como una expresión de la necesidad de tener una estrategia nacional de restauración de ríos se realizó en la Universidad Politécnica de Madrid una Mesa de Trabajo sobre “Las Alteraciones Geomorfológicas de los Ríos”. Los puntos tratados son sumamente interesantes. A continuación se transcribe algunos de ellos.

“Los ríos son sistemas naturales enormemente dinámicos y complejos. Su principal función es el transporte de agua, sedimentos, nutrientes y seres vivos, pero además conforman corredores de gran valor ecológico, paisajístico, bioclimático y territorial, que enlazan montañas y tierras bajas. Por tanto, la red fluvial constituye un elemento clave en la dinámica ambiental y en la planificación territorial. Transportan agua, ese bien extraordinario, y es agua que se ve fluir, que se siente y se escucha, que cambia continuamente, en el tiempo y en el espacio. Por ello son los ríos protagonistas allá por donde circulan. De ahí su carácter único, singular, inigualable, dominando un espacio estrecho y alargado con personalidad propia, una franja de territorio muy valiosa y, por tanto, también muy apetecible. Porque ríos y valles cuentan con una enorme capacidad estructurante y articuladora del territorio, lo cual ha ido siempre en beneficio del ser humano, pero también implica una excesiva presión desde éste.”

Parte de la primera conclusión obtenida en la Mesa de Trabajo fue la siguiente:

“Los ríos cuentan con valores, funciones y utilidad traducibles en beneficios sociales, económicos y ambientales. Preservar su muy buen estado o conseguir, directa o indirectamente, que su actual situación tienda a acercarse a él, constituyen una necesidad urgente.”

Una de las mayores agresiones que sufren los ríos, además de las obras de ingeniería y la contaminación, se produce cuando atraviesan ciudades. En realidad, cuando las ciudades se desarrollan junto a los ríos y los estrangulan, maltratan y ocupan lo que se ha llamado “el territorio fluvial”. Ese es el tema del punto siguiente.

1.5 El binomio río-ciudad

En abril del 2011 el Capítulo de Ingeniería Civil del Consejo Departamental de Lima del Colegio de Ingenieros del Perú organizó el Foro “Problemas en el Manejo de Ríos en Áreas Urbanas”, con aplicación al río Rímac. En el Capítulo 5 se presenta como Anexo 5-C las “Conclusiones y Recomendaciones del Foro”.

El autor desarrolló dentro del Foro el tema “Interacción de la dinámica fluvial y el desarrollo urbano”, del que se ofrece a continuación su introducción y sus conclusiones y recomendaciones.

“En todas partes del mundo existe una relación muy intensa entre el río y la ciudad que se asienta en sus orillas. Londres y el Támesis, París y el Sena, Florencia y el Arno, Lima y el Rímac, son algunos de los muchísimos binomios río-ciudad que podría mencionarse. Esta relación es esencialmente dinámica y compleja, porque así son sus componentes. El tratamiento que las ciudades del mundo dan a los ríos que las cruzan es muy variado, dependiendo de diversos factores y circunstancias, así como, por cierto, de las características hidráulicas, hidrológicas y sedimentológicas de cada río. Así por ejemplo, Zoido y Fernández señalan que el Guadalquivir “es un factor clave en la función urbana de Sevilla” y recuerdan “las azarosas relaciones del Guadalquivir con la ciudad a causa de sus avenidas” y la invasión por las aguas de los espacios urbanos y las consiguientes repercusiones de diverso orden.

En general, las grandes y más importantes ciudades han alcanzado soluciones armoniosas para los problemas fluviales, estéticos y funcionales generados por su proximidad al río. Recordemos que son las ciudades y los pueblos los que se acercan al río y no este a ellos. Por ello se ha dicho que en el binomio río-ciudad “el río es la realidad dominante”. El río puede vivir sin la ciudad, pero la ciudad no puede vivir sin el río. Heródoto dijo que “son los ríos los que deben determinar la vida de los pueblos, mientras que éstos con mucho pueden determinar la muerte de los ríos, pero no su vida.”

En la búsqueda de soluciones armoniosas juega un papel importantísimo el carácter de cada río. Es así como muchas veces se trata de ríos maduros, de

régimen netamente tranquilo y cuya variación estacional y anual de caudales alcanza valores extremos sólo en situaciones verdaderamente excepcionales. A la vez, en ellos se dispone de información, orden, recursos y demás elementos que permiten el planeamiento y ejecución de las acciones de control fluvial y de ocupación territorial. Pero, cuando los ríos son en realidad torrentes, jóvenes, agresivos, de fuerte pendiente, con gran diferencia entre sus caudales máximos y mínimos, de fuerte e irregular transporte sólido y su tratamiento e incorporación a la ciudad no ha seguido un plan, entonces los problemas, acumulados durante centurias, se manifiestan en un momento dado de una forma violenta.

El binomio río-ciudad adquiere características especiales cuando, como ocurre en varios ríos de la costa peruana, se trata en realidad de torrentes, es decir de cursos de agua con flujo supercrítico y descargas muy variables en el tiempo. En ellos el problema más grave para su incorporación a la ciudad es la escasez o la ausencia de agua. Se les podría considerar como “ríos secos”. Tal es el caso del Rímac, pues aguas abajo de la última captación el cauce no sólo está sin agua un porcentaje elevado del tiempo, sino que sus condiciones sanitarias son indeseables. Como la demanda de agua de la ciudad aumenta rápidamente el cauce estará seco gran parte del tiempo. Pero, estos “ríos secos” de pronto, especialmente cuando se presenta el Fenómeno El Niño (FEN), descargan grandes caudales que ponen en peligro las instalaciones ubicadas frente a ellos.

Por lo tanto, el tratamiento del río debe verse de un modo integral. Como el río es el elemento de drenaje natural de la cuenca su comprensión y manejo, como parte del binomio río-ciudad, tiene que ubicarse dentro de la compleja naturaleza de la cuenca, puesto que el río transporta agua, sólidos y cuerpos extraños, así como la contaminación. Por lo tanto, la incorporación del río a la ciudad tiene que formar parte de un enfoque holístico en el que la solución de los problemas hidráulicos (en la más amplia acepción del término) sea de prioridad absoluta para lograr una decorosa “fachada fluvial”. Al estudiar las complejas relaciones río-ciudad desde punto de vista morfológico y de ordenación es evidente que las características del río influyen en las de la ciudad y el desarrollo urbano de ésta en las del río. Por ello resulta propio hablar de una interacción entre la dinámica fluvial y el desarrollo urbano.

Como resultado de una inadecuada ocupación territorial en las proximidades de un río y de un desconocimiento del comportamiento fluvial, surgen como paliativos los encauzamientos, a veces asociados a un estrechamiento excesivo, cuyas consecuencias pueden ser la socavación del cauce fluvial o el desborde con la consiguiente inundación urbana. En la costa peruana la presencia eventual del Fenómeno El Niño hace más intensa y problemática la interacción entre el río y la ciudad. Los puentes han sufrido las consecuencias de este mal manejo.

En esta exposición se busca presentar la problemática del binomio río-ciudad en la costa peruana y, en especial, la difícil relación entre el río Rímac y los centros urbanos que atraviesa, como un caso típico de lo que ocurre en otros lugares.”

Las Conclusiones y Recomendaciones del autor, en la presentación “Interacción de la dinámica fluvial y el desarrollo urbano”, con aplicación al río Rímac fueron las siguientes:

Conclusiones

- a) El río y la ciudad que se desarrolla en sus márgenes constituyen una unidad que debe ser comprendida y tratada como tal. Sin embargo, se trata de una relación compleja, pues ambos sufren cambios continuamente, lo que da lugar a una fuerte interacción entre la dinámica fluvial y el desarrollo urbano.
- b) Son los centros urbanos los que se acercan a los ríos y no éstos a aquéllos. Cuando no existe el planeamiento urbano adecuado, las ciudades crecen desordenadamente, ocupan el cauce fluvial y producen estrechamientos, a veces excesivos, lo que trae como consecuencia que las grandes crecidas causen daños a las obras e instalaciones ubicadas en sus inmediaciones, por socavación o por inundación. En la costa peruana hay numerosos ejemplos de esta falta de planeamiento.
- c) La incorporación al paisaje urbano de los ríos que atraviesan las ciudades y que tienen largos periodos sin descargas significativas y, eventualmente, grandes caudales acompañados de fuerte cantidad de sólidos, presenta enormes dificultades que sólo pueden tratarse de un modo integral y multidisciplinario, pues su enfoque es holístico. Debe detenerse el maltrato creciente que viene sufriendo el Rímac.
- d) En el planeamiento del uso del suelo y en el diseño de las obras de ingeniería ubicadas en las proximidades de un río o sobre el lecho fluvial es necesario tener presentes los conceptos de Hidráulica Fluvial, incluyendo los de cauces, riberas y fajas marginales. Sin embargo, no es fácil definir el ancho de un río. Su inadecuada consideración y la de su área de influencia traen numerosos daños a las obras ubicadas en sus inmediaciones. Una decisión equivocada implica no sólo la invasión del Dominio Público Hidráulico, sino un hecho físico innegable: la ocupación del área que pertenece al río y que éste, en algún momento tratará de recuperar.
- e) Falta una autoridad única para el manejo de cada río, especialmente en los tramos urbanos. Hay múltiples responsables, lo que dificulta o impide el control adecuado del río y de su interacción con las instalaciones vecinas.

- f) Hay ríos como el Rímac que en realidad son torrentes, de régimen muy irregular, escasos de agua, con mucho transporte de sólidos y gran contaminación, en los que preocupa los estrechamientos causados por acciones humanas que provocan aumento de la velocidad de la corriente y la peligrosa degradación del cauce. Preocupa también la erosión de la cuenca, la irregularidad de las descargas y el elevado grado de contaminación que presentan, lo que dificulta su incorporación al paisaje urbano.
- g) Un fuerte y creciente porcentaje del tiempo el cauce del río Rímac ubicado aguas abajo de la captación de La Atarjea se encuentra seco, al igual que otros ríos de la costa, lo que complica cualquier proyecto de embellecimiento de ese tramo fluvial.

Recomendaciones

- a) Debe haber en forma real y efectiva una autoridad responsable de cada cuenca en su integridad y del manejo del río. En el caso del Rímac esto es absolutamente urgente.
- b) La incorporación del río a la ciudad debe ser una actividad multidisciplinaria y tener un enfoque holístico en el que la solución de los problemas de Hidráulica e Hidrología sea de prioridad absoluta para lograr así una decorosa “fachada fluvial” del río a la ciudad.
- c) Debe detenerse el maltrato creciente que vienen sufriendo muchos ríos, especialmente el Rímac. Debe impedirse nuevos estrechamientos de los cauces fluviales. Por lo tanto, debe fortalecerse las labores de conocimiento del río, la preservación de su cuenca, el afianzamiento de caudales, la recuperación del ancho fluvial y la disminución de la contaminación, para acercarnos así a la restauración fluvial.
- d) Debe tenerse presente y solucionarse el problema de que la oferta de agua del Rímac es insuficiente, no sólo para el abastecimiento de la ciudad, cuya demanda es creciente, sino para dar a su cauce las más elementales condiciones de salubridad y de ornato.

1.6 La Hidráulica Fluvial

Reconocidas la importancia y el significado de los ríos en la vida del hombre, que deben formar parte de la cultura general de cualquier persona, viene la acción de la ingeniería para lograr y hacer posible que cada uno de nosotros pueda gozar de las ventajas que nos ofrecen los ríos. Surge así la Hidráulica Fluvial.

La Hidráulica Fluvial estudia el comportamiento de los ríos, cualquiera que sea la finalidad que se busque con su aprovechamiento o manejo (represamiento, abastecimiento poblacional e industrial, irrigaciones, centrales hidroeléctricas, defensas ribereñas, navegación, puentes, etc.). La Ingeniería Fluvial nos enseña como intervenir en el río, como trabajar “con el río”, para lograr los fines de un determinado proyecto. En nuestro caso, para garantizar la estabilidad de una estructura sin afectar la del río.

Los ríos aluviales están cambiando constantemente de posición y forma y adquieren, por un mecanismo que ha sido llamado de “Autoajuste”, el ancho, el tirante y la pendiente correspondientes al gasto líquido, al gasto sólido y a la composición granulométrica de los sólidos que arrastran (Capítulo 4). No pocas veces esto implica cambio de recorrido. Dentro de las numerosas causas de la movilidad fluvial se encuentran la irregularidad de las descargas, especialmente la alternancia de avenidas y sequías extremas, muy frecuentes en el Perú, a lo que debe añadirse el impacto de las acciones humanas (construcciones, deforestación, etc.).

La movilidad fluvial atenta contra la estabilidad de las obras construidas sobre el lecho fluvial y en sus inmediaciones. En el diseño de obras de ingeniería ubicadas sobre el lecho fluvial o en sus proximidades, es importantísimo realizar un estudio de Hidráulica Fluvial, lo suficientemente profundo como para conocer la morfología y el comportamiento del río durante las grandes crecidas y, especialmente, durante la Avenida de Diseño, como consecuencia de la construcción de la obra de ingeniería. El transporte de sólidos está íntimamente asociado al comportamiento del río y debe ser cuidadosamente estudiado. En el ejercicio de la ingeniería de ríos no hay normas para el manejo del comportamiento fluvial, pues es muy variable según las características de cada río y de cada tramo fluvial.

El estudio de Hidráulica Fluvial, asociado al de Hidrología, servirá para el diseño: desde la selección de la ubicación óptima de la obra hasta la posibilidad de un encauzamiento. ¿Cuán profundo y detallado debe ser el estudio de Hidráulica Fluvial? Evidentemente que la respuesta la debemos buscar en las características del río (caudales, morfología, sedimentos, etc.) y en las de la obra, incluyendo su importancia, daños que causaría su puesta fuera de servicio o destrucción y otras consideraciones.

En este libro se presenta algunos de los numerosos problemas de Hidráulica Fluvial vinculados a las obras de ingeniería en general y de las viales en particular.

Para conocer mejor las posibilidades de aprovechamiento, cuidado y defensa de los ríos es muy útil presentar algunas consideraciones sobre las formas fluviales en su relación con la estabilidad de las obras de ingeniería, que es el tema del siguiente capítulo.

ANEXO 1- A

ALGUNAS CONCLUSIONES DEL III SEMINARIO INTERNACIONAL DE POTAMOLOGÍA

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

25 y 26 de agosto de 2011

1. *Se requiere que se vayan construyendo mapas de riesgo que guíen la formulación de políticas públicas de ocupación territorial que reduzcan la vulnerabilidad ante los riesgos de inundación, ejemplos de esto es la iniciativa SAVER y los proyectos de construcción de mapas de riesgo en la zona de Soconusco en Chiapas.*
2. *México tiene una de los sistemas más complicados desde el punto de vista hidrometeorológico, ya que por un lado tenemos precipitaciones menores a los 50 mm al año y zonas de más de 2,000 mm ligados a una orografía complicada que dificultan el realizar pronósticos acertados de precipitación con la consecuente imprecisión en el pronóstico de los escurrimientos que ante los efectos del cambio climático incrementan aún más su incertidumbre. En consecuencia se requieren mejores sistemas de pronóstico de lluvia y escurrimiento.*
3. *Los riesgos de deslizamientos de tierra como el ocurrido en la zona de Juan de Grijalva en Chiapas aguas arriba de la presa Peñitas ocurrido durante la gran inundación en 2007 en Tabasco, son eventos que ocurren con mucha frecuencia alrededor del mundo y que ponen en peligro vidas humanas y estructuras hidráulicas de gran tamaño. Su solución ha requerido de mucho esfuerzo y dinero es por ello que es necesario implementar programas de vigilancia de laderas para prevenir su ocurrencia y minimizar daños.*
4. *La modelación matemática ha mostrado ser muy útil en el diseño de acciones de control hidráulico, sin embargo su uso ha conducido múltiples casos a resultados equivocados al ser aplicados de manera indiscriminada sin tener un conocimiento claro de la hidráulica que controla el fenómeno. Es así que la complejidad de los modelos numéricos no necesariamente mejoran de manera sustancial las soluciones en comparación con modelos de baja complejidad.*
5. *La falla de bordos ocurre con alta frecuencia en el mundo, en México no es la excepción y recientemente se ha hecho más notable en los bordos del río Grijalva. Los bordos son estructuras lineales simples que los hacen muy vulnerables. Una de las múltiples causas de su falla es el fenómeno asociado al vaciado rápido en los cauces, tal y como ocurre con las variaciones horarias de los tirantes en el tramo del río Carrizal aguas abajo de la presa Peñitas. Para reducir el riesgo de falla por esta causa se mostraron estudios que guían el diseño de políticas de operación para el desembalse de los cauces mediante la velocidad del vaciado, asimismo se brindaron algunas recomendaciones para incrementar el factor de*

seguridad entre ellos están el evitar: la filtración de agua a nivel del desplante del bordo, la erosión interna, los asentamientos excesivos, el agrietamiento y la falla por cortante en los taludes y en la cimentación. Se mencionaron también alternativas tecnológicas como las llamadas inclusiones que son perforaciones controladas que se rellenan con concreto simple que incrementan la estabilidad de los bordos.

- 6. La socavación en pilas en puentes es uno de los fenómenos que causan la falla de estos en el mundo. Investigaciones recientes apuntan a modificar la forma y resistencia del flujo que reduzcan de manera sustancial la amplitud y profundidad del pozo de socavación.*
- 7. El impacto del cambio climático en los gastos máximos de las corrientes ya se ha manifestado como en el caso del sur de la República de Chile debido en principio al cambio de la isoterma de cero grados que ha producido un derretimiento de nieve de la cordillera de los Andes, sin embargo, lo contrario se manifiesta en la parte norte donde los caudales máximos han disminuido, efecto complementario de lo que sucede en el sur. Lo anterior conduce a revisar las capacidades de estructuras hidráulicas y de las posibles zonas de inundación.*
- 8. La ecohidrología persigue la integridad ecológica, es una nueva disciplina que requiere vaya permeando de manera integrada en los diseños hidráulicos. Se mostraron diversas opciones para que el agua regule a la vegetación y esta al agua. En general se requiere impulsar la modelación ecohidrológica y construir una conciencia ecohidrológica en las nuevas generaciones.*
- 9. Se enfatizó el uso de sistemas de alerta temprana en la gestión de inundaciones, la cultura de prevención es de muy alta relevancia ya que es más económica y la que puede reducir considerablemente los daños por inundación, incluyendo la pérdida de vidas humanas. Se indicó que estos sistemas tienen en general tres niveles de alerta, la primera a nivel de un gran territorio (estado del país) con pronóstico de lluvias a 2 o 3 días, un segundo nivel de alerta es a nivel territorial de un municipio y menor a 24 horas y el tercer nivel de alerta es puntual (ciudad o poblado) con pronóstico de minutos. Se mencionó que en general hay que reducir la vulnerabilidad, así como utilizar medidas tanto estructurales como institucionales, regular para evitar asentamientos en zonas de riesgo (mapas de riesgo), y el aplicar las acciones de manera oportuna.*
- 10. Se presentaron diversas maneras de cálculo del transporte de sedimentos, indicando que bajo los mismos datos se pueden tener grandes diferencias, es necesario entonces tener un conocimiento de hidráulica para su aplicación. Es fundamental realizar una adecuada calibración así como la rugosidad. Se requiere que los modelos realmente representen la física del fenómeno. Es importante también la forma de toma de las mediciones en campo ya que son mediciones sólo puntuales, en todo caso habrá que hacer promedios. Se indicó asimismo que la constante de von Kármán no es tal y esto modifica el perfil de velocidades. A la*

fecha, el cálculo de transporte de sedimentos es más arte que ciencia, se requiere de "feeling", ya que cada caso es diferente.

- 11. Se comentaron sobre los estudios de transporte de sedimentos en la desembocadura del río Grijalva para dar base a un proyecto de un canal de navegación con el mínimo dragado de mantenimiento. El gasto sólido se estimó a través del concepto de gasto formativo, y se estudió el nivel de inundación que se tendría con escolleras de protección y espigones y en la situación actual con un gasto líquido del orden de los 17,000 m³/s llegando a niveles de inundación del orden de los seis metros. Se recomienda que se instrumente medición de gastos en la confluencia de los ríos Grijalva y Usumacinta, así como realizar y actualizar los estudios batimétricos para observar los cambios morfológicos y realizar un estudio beneficio-costos para establecer su factibilidad.*
- 12. El Plan Hidráulico de Tabasco (PHIT) comprende múltiples tareas integradas para reducir la vulnerabilidad ante nuevas amenazas hidrometeorológicas. Comprende acciones de gestión de avenidas, manejo de cuencas, ordenamiento territorial y medidas estructurales, entre estos están estructuras de control, dragado de ríos, regulación eficiente, protección marginal y aumento de medidas estructurales. Los retos a enfrentar están mejorar la medición, establecer mejores programas de ordenamiento territorial (zonas federales, crecimiento urbano, legislación, mapas de riesgo), desarrollo de capacidades, mantenimiento de la infraestructura, seguridad de presas, procesos costeros, sistema financiero, coordinación institucional, consideración de los efectos del cambio climático, y la socialización del problema. Se ha aprendido que es mejor prevenir que remediar. Se requiere la conservación de las principales estructuras de control, revisar las políticas de operación de las presas y crear nueva documentación de los eventos ocurridos y las decisiones tomadas (mapas, base de datos).*
- 13. En conclusión se puede afirmar que la potamología como la ciencia que estudia de manera integral el comportamiento de los ríos en sus tres dimensiones (económica, social y ambiental) requiere sea impulsada para abordar de manera integrada los problemas de control de los ríos para garantizar su aprovechamiento eficiente y sustentable y garantizar asentamientos seguros ante la presencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos (inundaciones catastróficas).*

Formuló: Alberto Güitrón

Tuxtla Gutiérrez, Chis, 26 de agosto de 2011

Referencias

1. DELIBES Miguel. Citado en la Presentación del **Congreso en Homenaje al río Duero**. Zamora, 2006.
2. DOMÍNGUEZ C. Bernardo. **El culto del agua en la historia**. Anales de la Universidad de Chile, Quinta Serie, N° 8. Agosto 1985.
3. FRIJLINK H. C. **Introduction to River Engineering**. Delft, Holanda.
4. GALLEGOS VARGAS Héctor y VARGAS DE GALLEGOS Isabel. **La ingeniería empezó en Sumer**. Revista El Ingeniero Civil Mayo-Junio N° 48, Lima, 1987.
5. HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ Santiago. **Los ríos. El agua como soporte de vida**. Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, N° 50, Año 2000, Madrid, España.
6. KENNEDY John F. **Conferencia Inaugural**. XIX I.A.H.R. Congress, New Delhi, 1981.
7. MAISCH GUEVARA Ernesto. **Esperando el trasvase del Mantaro**. El Ingeniero de Lima. Revista del Colegio de Ingenieros del Perú-Consejo Departamental de Lima, Año XIII N° 66, Noviembre 2012.
8. MAISCH GUEVARA Ernesto. **El Rímac urbano**. El Ingeniero de Lima. Revista del Colegio de Ingenieros del Perú-Consejo Departamental de Lima, Año XII N° 58, febrero 2011.
9. MAISCH GUEVARA Ernesto. **La ciudad de Lima y el río Rímac**. El Ingeniero Civil N° 70, enero-febrero 1991.
10. MARTÍN VIDE Juan P. **Ingeniería de Ríos**. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2007.
11. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE y UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. **Las alteraciones geomorfológicas de los ríos**. Madrid, Julio de 2007.
12. MOLINA FOIX Vicente. **El Ganges: Río Sagrado**. El País Semanal, 2007.
13. OLLERO Alfredo, IBISATE Askoa y DÍAZ Elena. **Gestión del agua y ordenación de espacios fluviales: situación actual y perspectivas**. Bilbao, Universidad del País Vasco.
14. PAVEZ WELLMANN Alejandro. **La inundación de Ica: del desastre al desarrollo**. 1998
15. ROCHA FELICES Arturo. **El Agua Virtual y la Huella Hídrica en el Siglo XXI**. Conferencia. Academia Peruana de Ingeniería. 4 octubre 2011.
16. ROCHA FELICES Arturo. **Interacción de la dinámica fluvial y el desarrollo urbano**. Foro "Problemas en el Manejo de Ríos en Áreas Urbanas", Colegio de Ingenieros del Perú, Consejo Departamental de Lima, Capítulo de Ingeniería Civil, publicado en la revista Ingeniería Civil año 09-2011.
17. ROCHA FELICES Arturo. **La ingeniería frente al agua, manantial de vida, propiedad de todos**. Conferencia Magistral. Colegio de Ingenieros del Perú. 2007.
18. ROCHA FELICES Arturo. **Introducción a la Hidráulica Fluvial**. Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1998.
19. ROCHA FELICES Arturo. **Recursos Hidráulicos**. Colegio de Ingenieros del Perú, Capítulo de Ingeniería Civil. Colección del Ingeniero Civil, Lima, 1993.
20. RODRÍGUEZ B. Rafael. **Agua**. Comunicación personal. 2006

21. SCHMIDT Guido. **Los ríos son nuestra vida**. Integral, mayo 2000.
22. SCHMIDT Guido. **La restauración de ríos y riberas: principios básicos, alternativas y técnicas**. “Jornadas por una nueva cultura del agua”, Madrid 1999.
23. TERCER SEMINARIO DE POTAMOLOGÍA. **Memorias**. México, 2011.
24. WITTFOGEL Karl A. **Despotismo oriental**. 1957.

CAPÍTULO 2

LA MORFOLOGÍA FLUVIAL Y SU INCIDENCIA EN LA ESTABILIDAD DE LAS OBRAS VIALES

2.1 Introducción

La Fluviomorfología (Morfología Fluvial) estudia las formas fluviales y el mecanismo mediante el cual un río ha llegado a ellas. De acá es posible inferir el comportamiento futuro del río. Las formas que adopta un río pueden originarse en su propio comportamiento, ser una consecuencia de determinadas acciones externas, principalmente humanas, o una combinación de dichas posibilidades. Si a esto se añade que dichas formas son muy cambiantes en el tiempo y que dependen de un gran número de variables (caudales sólidos y líquidos, rugosidad, formas del fondo, etc.) se comprende la gran dificultad que implica su determinación.

Cuando se habla de la forma de los ríos, es decir de su apariencia, debe entenderse que esto equivale a describirlos tal como se ven desde el aire. Se trata de las formas en planta. Sin embargo, no debe perderse de vista que la forma de los ríos, a la que en inglés se llama "*channel patterns*", no es la misma a lo largo del tiempo. Los caudales que se presentan, básicamente en el estiaje o en la época de avenidas, son fundamentales para definir la forma de un río.

A lo anterior debe añadirse que cuando se habla de la forma de un río se trata de la forma de un tramo fluvial específico, pues los ríos no tienen la misma forma a lo largo de todo su recorrido. Además, un mismo tramo fluvial puede cambiar de forma como consecuencia de una variación de los factores que la determinan, como podría ser por ejemplo aumentar o disminuir el caudal líquido (avenidas y sequías) o el caudal sólido. Por lo general, los cambios que sufre un río se extienden más allá del lugar específico en el que se originaron.

Los problemas relativos a la Morfología Fluvial constituyen un reto permanente para la ingeniería; sin embargo, la comprensión de las variadas formas que adoptan los ríos es indispensable para el diseño de las obras de ingeniería y de las viales en particular, que estén en contacto con un río o cerca de él.

Los ríos, como puede comprobarse fácilmente, tienen formas muy diversas y, además, muy variables en el tiempo. Cada río, en realidad cada tramo fluvial, tiene una forma característica. Al tratar de las formas fluviales con fines de diseño, no se intenta responder a la hipotética pregunta de ¿Por qué son los ríos como son?, sino a las preguntas ¿Cómo son los ríos? y ¿Cómo influye su apariencia en la estabilidad de las estructuras? Las principales dificultades que

enfrenta la Fluviomorfología se originan en el cambio constante que experimentan los ríos y en el gran número de variables involucradas.

Los estudios fluviomorfológicos, como parte de los de Hidráulica Fluvial, son de vital importancia para garantizar la estabilidad de las obras viales construidas en las inmediaciones de un río y deben emprenderse desde la iniciación de los estudios de una obra. En el Capítulo 11 se presenta algunos “Conceptos Básicos sobre Transporte de Sedimentos”, que pueden ser útiles para la lectura de este libro.

2.2 Clasificación de los ríos

Un río se parece a un canal en cuanto tiene una superficie libre, en contacto con la atmósfera. Pero, hay grandes diferencias entre ambos. Una de ellas, dentro de muchas otras, es que un canal tiene una sección prismática e invariable. En cambio, un río tiene un contorno variable. Para efectos de la proximidad entre un río y las obras a proyectarse en sus alrededores es necesario tener en cuenta que existen dos grandes tipos de ríos: los aluviales o de ancho indefinido y los confinados. Los ríos aluviales son aquellos cuyo lecho está formado por materiales que han sido transportados por el río y que pueden volver a ser transportados por él. Los ríos aluviales o de ancho indefinido están cambiando constantemente de posición y forma. Su ancho B (anchura) es muy variable (Figura N° 2.1).

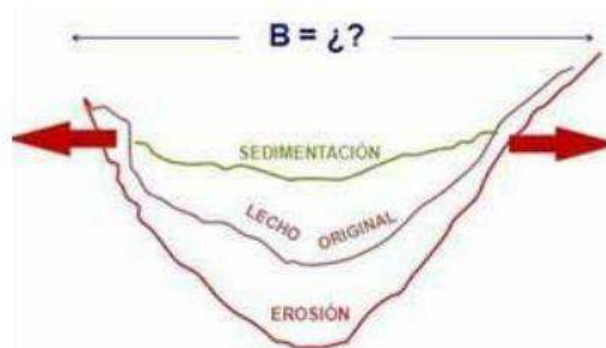


Figura N° 2.1 Río aluvial (ancho indefinido).

No debemos perder de vista que los ríos que corren sobre un material aluvial tienen la tendencia a adquirir, mediante un mecanismo que ha sido llamado de autoajuste, la pendiente, el ancho y el tirante correspondientes al gasto líquido, al gasto sólido y al tamaño de los sedimentos que arrastran. Cuando el río llega a ese estado se dice que está “en régimen”, de lo que se trata en el Capítulo 4. Este principio general de la Hidráulica Fluvial sigue siendo válido durante las grandes descargas de sólidos y de agua que se presentan eventualmente. En consecuencia, el río manifiesta su tendencia natural a adquirir una nueva

pendiente, un nuevo ancho y un nuevo tirante, lo que a veces implica cambio de recorrido o la formación de nuevos brazos.

Resulta entonces claro que un río aluvial tiene tendencia a desplazamientos longitudinales y transversales y a desarrollar procesos fluviomorfológicos como erosión y sedimentación. Es entonces cuando se hace evidente el conflicto entre el río y las estructuras, especialmente cuando éstas no han tenido en cuenta la posibilidad de que ocurran esos cambios. Los ríos confinados no tienen la posibilidad de desplazamientos transversales (laterales). El confinamiento puede ser natural o artificial. El típico confinamiento natural se presenta cuando un río corre entre cerros (Figuras N° 2.2 y 2.3).

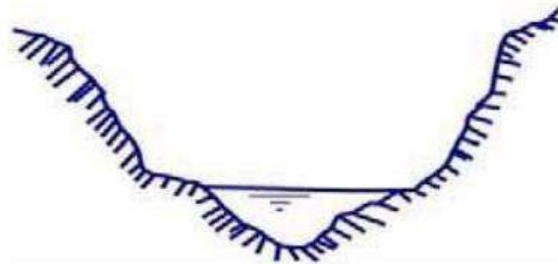


Figura N° 2.2 Río con confinamiento natural (entre cerros).



Figura N° 2.3 Río Vilcanota (confinamiento natural).

El confinamiento artificial ocurre cuando se ha construido defensas y el río está encauzado (Figura N° 2.4). Más adelante veremos cómo es que en muchas oportunidades el confinamiento artificial inadecuado es causa de fracasos en las obras próximas al río. La presencia de vegetación en las márgenes juega un papel importante en la estabilidad y en la morfología fluvial.

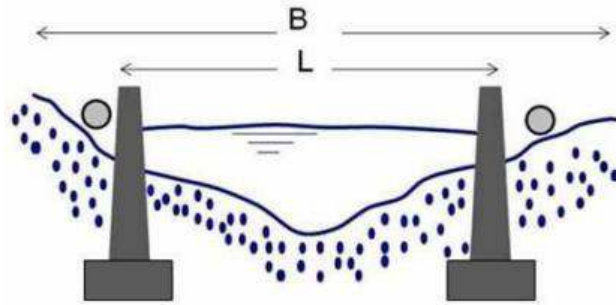


Figura N° 2.4 Río confinado artificialmente (encauzamiento).

2.3 Los ríos aluviales

Los ríos aluviales toman su nombre precisamente del hecho de correr sobre un material aluvial, que es el que ha sido transportado y depositado por el río. En los ríos aluviales las márgenes son erosionables y cambiantes; en consecuencia, los ríos son muy dinámicos con el paso del tiempo y de los diferentes caudales líquidos y sólidos que se presentan. Los ríos aluviales se desplazan y modifican más de lo que suele imaginarse.

Esta movilidad fluvial representa un peligro para la población que suele asentarse junto a los ríos aluviales y para las obras de ingeniería ubicadas sobre el lecho fluvial y en sus inmediaciones, las que por su propia naturaleza deben ser estables. En consecuencia, para el diseño de estas obras, que incluye especialmente las viales, se debe conocer el comportamiento del río, lo que implica identificar las diferentes formas fluviales.

Una vista aérea de los ríos indicaría que sus formas son tantas como ríos existen, pero para fines prácticos la Morfología Fluvial considera tres formas fundamentales, las que aparecen esquemáticamente en la Figura N° 2.5 (Leopold)

Ellas son: a. Ríos rectos, b. Ríos entrelazados, y c. Ríos con meandros.



Figura N° 2.5 Formas fluviales básicas.

Al presentar esta clasificación de los ríos, que es muy usada en Hidráulica Fluvial, no puede dejar de recordarse la importante contribución que al mejor conocimiento de la Fluviomorfología hicieron Luna B. Leopold y M. Gordon Wolman. Su trabajo "River Channel Patterns: braided, meandering and straight" es un clásico en la materia. Hay, sin embargo, numerosas investigaciones que tratan de este tema. Se podría mencionar, entre otros, los estudios de Knighton (1984), de Rosgen (1996) y los que aparecen en las Referencias.

La clasificación antes mencionada se basa en el grado de sinuosidad del río y es ilustrativa de las tres formas principales que suelen presentarse. Estas diferentes formas pueden verse en tramos sucesivos de un mismo río, en función de la pendiente, del caudal líquido, del caudal sólido, de la granulometría y de otros factores. Naturalmente que hay estados transitorios o intermedios. Así por ejemplo, se habla de ríos sinuosos, que no son rectos ni llegan a ser meándricos.

En la Figura N° 2.6 se representa el concepto de sinuosidad. Para describir y cuantificar la sinuosidad de un río se establece la relación entre la longitud del *talweg* (ABC) y la longitud del valle (AC). A esa relación se le llama Índice de Sinuosidad o, simplemente, sinuosidad (Si). El *Talweg* es la línea que une las máximas profundidades de cada sección transversal de un río. *Talweg* es una palabra alemana que literalmente significa algo así como camino (*Weg*) del valle (*Tal*). En inglés se suele escribir "*thalweg*" (Fig. N° 2.18). La palabra castellana equivalente a *Talweg* es vaguada, poco usada en el Perú; el Diccionario la define como "Línea que marca la parte más honda de un valle, y es el camino por donde van las aguas de las corrientes naturales". En los ríos navegables es muy importante su determinación. El valor mínimo de la sinuosidad es 1 y correspondería a un río perfectamente recto. El valor máximo está, referencialmente, alrededor de 4.

La sinuosidad (Si) es tan importante en la descripción de las formas fluviales que algunos autores clasifican morfológicamente a los ríos como de baja ($Si < 1,3$), moderada ($1,3 < Si < 2$) o alta sinuosidad ($Si > 2$), tal como se aprecia en la Figura N° 2.6. Carmelo Conesa García estudió tramos significativos de 29 ríos españoles y encontró un Índice de Sinuosidad Medio de 1,38 (con una desviación estándar de 0,35) y valores máximos y mínimos de 2,9 y 1,06, respectivamente.

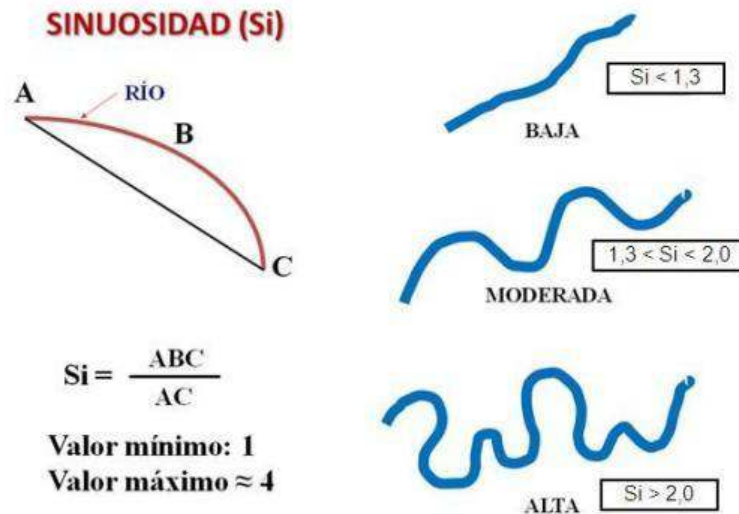


Figura N° 2.6 Representación esquemática de la sinuosidad (Si) y de sus grados.

Richardson et al. a partir de los estudios realizados por varios investigadores establecieron algunos principios generales para describir la respuesta fluvial frente a las alteraciones del gasto líquido y del gasto sólido. Ellos son:

- El tirante (y) es directamente proporcional al caudal (Q) e inversamente proporcional al gasto sólido de fondo (T_F).
- El ancho (B) es directamente proporcional al caudal (Q) y al gasto sólido de fondo (T_F).
- La relación ancho tirante (B/y) de la sección transversal es directamente proporcional al gasto sólido de fondo (T_F).
- La longitud de onda (L) de un meandro es directamente proporcional al caudal (Q) y al gasto sólido de fondo (T_F).
- La pendiente (S) es inversamente proporcional al caudal (Q) y directamente proporcional al gasto sólido de fondo (T_F) y al tamaño representativo del material sólido de fondo (d).
- La sinuosidad (Si) es proporcional a la pendiente general del valle e inversamente proporcional al gasto sólido de fondo (T_F).

Estos principios se aplican cuando un río puede desarrollarse libremente. No son aplicables cuando un río tiene condiciones de frontera impuestas (sea porque corra entre cerros o porque esté encauzado). Se observa que los principios arriba señalados son de tipo cualitativo. No se dispone de

información suficiente para obtener relaciones cuantitativas en todos los casos. Para las definiciones sedimentológicas puede verse el Capítulo 11.

2.4 Ríos rectos

En la naturaleza prácticamente no existen ríos rectos. Se les suele considerar como un estado transitorio al meándrico. Blench dice que un tramo fluvial recto es anormal y transitorio; es decir, esencialmente inestable. Leopold dice que, según su experiencia, en la naturaleza los cursos de agua verdaderamente rectos son tan raros que pueden considerarse como inexistentes. Hay ríos que tienen pequeños tramos rectos, o casi rectos (se les llama semirectos), cuya longitud podría ser, referencialmente, tan sólo del orden de 10 veces el ancho del río. Esta aparición circunstancial de pequeños tramos rectos puede deberse a la presencia de determinadas estructuras geológicas. En inglés a los ríos rectos se les llama "*straight rivers*".

Un río recto podría definirse como aquel cuya sinuosidad, con descarga de banco a banco ("caudal de no desborde"), es tan pequeña que podría despreciarse. En un tramo rectilíneo el Índice de Sinuosidad es teóricamente igual a 1. Referencialmente, se puede señalar que usualmente se llama "río recto" a aquel cuyo Índice de Sinuosidad es menor que 1,05.

Algunas veces la construcción de obras viales requiere la ejecución de un encauzamiento formado por diques paralelos. Se tiene, aparentemente, un río recto. Es una situación creada artificialmente y el río sólo se comporta como recto cuando el caudal es lo suficientemente grande como para ocupar totalmente la caja fluvial. A este caudal a veces se le llama "caudal de no desborde". En inglés se conoce con el nombre de "*fullbank discharge*". Para caudales pequeños el río formará, dentro del encauzamiento, un cauce sinuoso. Por eso, a veces, la situación más peligrosa en un encauzamiento de esta naturaleza se produce cuando el río, sin alcanzar la avenida de diseño, desarrolla su recorrido y a causa de su sinuosidad ataca frontalmente las defensas.

2.5 Ríos entrelazados o trenzados

Los ríos entrelazados reciben varios nombres. Se les llama también trenzados. Una variante de ellos está constituida por los ríos anastomosados, cuyas características se presentan más adelante. En inglés se les llama "*braided rivers*" a los primeros y "*anastomosing rivers*" a los segundos.

Los ríos entrelazados son muy anchos; tienen varios canales secundarios (brazos o cauces menores) que se comunican entre sí y que forman bancos entre ellos (islas transitorias, eventualmente sumergibles). Se ha dicho que son "multicanalizados". Estos canales se separan y vuelven a unirse. Hay gran inestabilidad según los caudales que se presenten. Este tipo de ríos tiene un

curso divagante, literalmente entrelazado o trenzado. Los cauces se entrecruzan. Los brazos no tienen una definición permanente. Estas variaciones son notables después de las grandes avenidas.

Se acepta que un río trenzado se origina cuando en una corriente con un fuerte caudal líquido hay gran transporte sólido de fondo y, de pronto, disminuye el caudal líquido y entonces los sólidos, al no poder ser arrastrados, depositan en el lecho formando islas o barras, tal como se aprecia en las Figuras N° 2.7 y 2.8.



Figura N° 2.7 Río entrelazado.

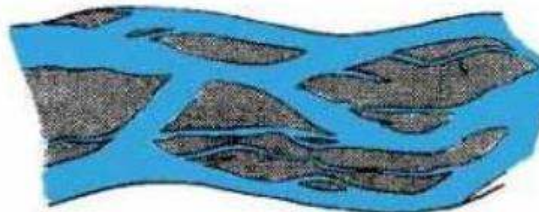


Figura N° 2.8 Representación esquemática de un río entrelazado.

Una vista panorámica de un río entrelazado daría la impresión de ser rectilíneo, pero los brazos (canales) que lo constituyen suele ser muy sinuosos. En general, en las márgenes y en el lecho hay poca cantidad de limos y arcillas.

Los ríos entrelazados son marcadamente inestables y de comportamiento altamente impredecible. Aparecen con pendientes grandes, tienen pequeños calados (tirantes) y su ancho es grande. Pueden tener grandes cantidades de sólidos de fondo, en comparación con el transporte en suspensión. El material de fondo es relativamente grueso y su cantidad excede la Capacidad de Transporte de la corriente (Capítulo 11). El exceso de sólidos sedimenta y se forman islas transitorias y bancos inestables. El río se subdivide en varios brazos muy sinuosos que rodean los bancos que se forman.

Lane planteó la existencia de dos causas que, juntas o independientemente, podrían dar lugar a la formación de un río entrelazado:

- a) Exceso de sedimentos que el río no puede transportar en su totalidad, lo que trae como consecuencia que una parte de ellos deposite en el cauce y dé lugar a la formación de bancos (islas).
- b) Pendiente grande, lo que origina pequeños tirantes.

La primera causa señalada por Lane se presenta, como ya se dijo antes, cuando la Capacidad de Transporte de la corriente es insuficiente para transportar las cantidades de sólidos de fondo que se presentan en el río como producto de la erosión de la cuenca. Se denomina Capacidad de Transporte a la máxima cantidad de material sólido de fondo, de una cierta granulometría, que una corriente puede transportar con un gasto dado.

Una variante de los ríos entrelazados está constituida por los ríos anastomosados (es decir, que tienen anastomosis), los que se presentan cuando del curso principal se separan brazos que regresan, luego de un cierto recorrido, al cauce principal (Figura N° 2.9). La isla que se forma tiene un carácter más o menos permanente, a diferencia de lo que ocurre con un río trenzado en el que las islas (en realidad, bancos) son variables, inestables y transitorios. La palabra anastomosis, de donde proviene uno de los nombres de este tipo de ríos, no se originó en la Hidráulica. Anastomosis es la "Unión de unos elementos anatómicos con otros de la misma planta o del mismo animal". Según Leopold, parece que esta expresión fue introducida en la Hidráulica Fluvial por Jackson hacia 1834.

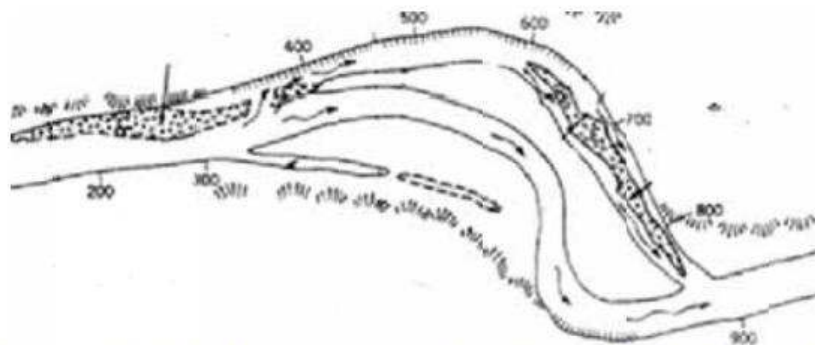


Figura N° 2.9 Río anastomosado: Horse Creek (Leopold).

Los ríos entrelazados presentan serias dificultades cuando se trata de construir obras sobre su lecho o en sus inmediaciones. Así por ejemplo, si se trata de construir un puente sobre un río entrelazado se requiere de una gran longitud originada en el ancho importante del río, cuya rápida y gran variabilidad no puede dejar de tenerse en cuenta. Esta variabilidad es muy sensible al aporte sólido de la cuenca y puede dar lugar a rápidos ensanchamientos o angostamientos del cauce. Hay ríos entrelazados que están en una etapa de expansión, que se caracteriza por la agradación del lecho y el aumento de su

ancho, lo que compromete la ocupación y desarrollo de las áreas próximas al río (es decir, del valle).

2.6 Ríos con meandros (*Meandriforme*)

La tendencia a formar meandros es característica de los ríos aluviales. Por eso se les llama serpenteantes. Es decir, que tienen una tendencia natural a no seguir un curso rectilíneo, lo que constituye una expresión de su inestabilidad. En inglés a este tipo de ríos se les llama “*meandering rivers*”. (Figuras N° 2.10, 2.11 y 2.12).



Figura N° 2.10 Planta característica de un río a meandros (Leopold).



Figura N° 2.11 Un típico río meándrico.



Figura N° 2.12 Meandros del río Utcubamba.

Son muy ilustrativas las menciones que hace Leliavsky acerca de las investigaciones realizadas hace muchos años en el laboratorio de Dresde y que consistieron básicamente en lo siguiente. Se colocó un fondo granular con una ligera pendiente. Se insinuó un cauce recto y se dejó correr el agua. Leliavsky comenta: “¿Erosionará esa agua un solo cauce rectilíneo...?” Se observó que a medida que iba pasando el tiempo el cauce originalmente rectilíneo iba curvándose paulatinamente hasta que se formaba un cauce sinuoso o meándrico. En la Figura N° 2.13 se observa el desarrollo descrito, según las investigaciones de Friedkin en el **Waterway Experimental Station**, en Vicksburg, U.S.A. (1945), presentadas por Leliavsky.

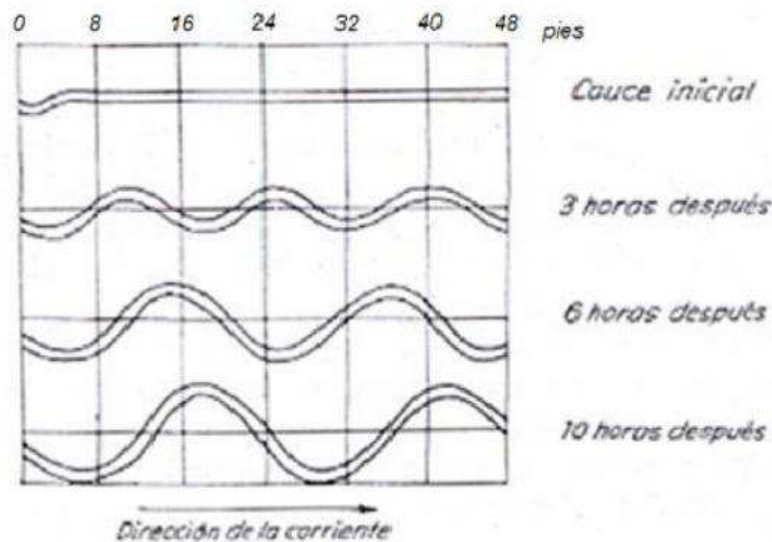


Figura N° 2.13 Evolución de un cauce originalmente rectilíneo. (Friedkin, Waterway Experimental Station, en Vicksburg, U.S.A.)

Numerosos investigadores se han dedicado a estudiar los meandros fluviales. Así por ejemplo, H. D. Farias señala que: “Para ríos aluviales el alineamiento *meandriforme* parecería ser la forma más plausible y eficiente a través de la cual el sistema tiende a minimizar progresivamente su pendiente para aproximarse a la condición de equilibrio dinámico. Aunque algunos ríos exhiben largos tramos cuasi-rectilíneos, la mayor parte de los ríos de llanura desarrollan meandros más o menos regulares.” En el Manual “Sedimentation Engineering” publicado por la ASCE (American Society of Civil Engineers) hay un capítulo titulado “River Meandering and Channel Stability” del cual es coautor nuestro compatriota el Dr. Jorge D. Abad, quien en una conferencia dictada en la UNI explicó “los mecanismos bajo los cuales los ríos meándricos son los principales agentes de interacción en la planicie de inundación”.

Los ríos con meandros son ríos muy sinuosos y presentan muchas inflexiones a lo largo de su recorrido. Se dice también que un meandro es la sinuosidad de un río formada por un proceso de erosión (degradación) en la orilla exterior (cóncava) y de sedimentación (agradación) en la orilla interior (convexa) (Figura N° 2.14).

Los ríos meándricos están formados por una sucesión de curvas cuyo Índice de Sinuosidad es superior a 1,5 (valor referencial). Un río aluvial es tortuoso en la medida en la que tiene muchas curvas y tiene meandros en la medida en la que estas curvas (es decir, las tortuosidades) se desplazan. Blench menciona que un canal en roca puede ser tortuoso, pero no tener meandros, porque no hay movilidad de las tortuosidades. Esta enorme movilidad de los meandros tiene gran importancia para la ingeniería en el momento de proyectar una obra, como podría ser un camino o un puente. Parece ser que existe una gran similitud, en diferentes ríos, entre sus respectivas relaciones entre el radio de curvatura y el ancho del río. Los ríos que forman meandros tienen generalmente las siguientes características:

- a) Márgenes (orillas) erosionables.
- b) Sección transversal variable.
- c) Baja pendiente.
- d) Transporte sólido no muy grande, de granulometría fina.
- e) En muchos casos, variación de caudales no muy marcada.
- f) Flujo característico en las curvas.
- g) Corren sobre amplias áreas de inundación que les permiten sus desarrollos laterales.

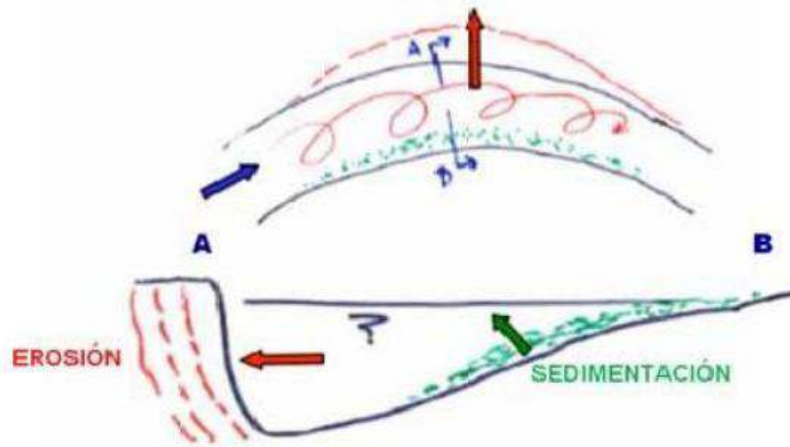


Figura N° 2.14 Erosión y sedimentación en un meandro.

Un río puede ser meándrico y entrelazado al mismo tiempo. Al respecto Martín-Vide señala lo siguiente: “El carácter trenzado y el meándrico pueden verse como dos ingredientes presentes en distintas proporciones en un mismo río real. Es frecuente que un río sea trenzado en su tramo alto y luego pase a ser meandriforme aguas abajo, donde la pendiente es menor aunque el caudal es mayor.” En la Figura N° 2.15 se aprecia un río de estas características.



Figura N° 2.15 Río a meandros y trenzado (Jeffrey F. Mount).

Las curvas características de los ríos con meandros son muy dinámicas y no se deben esencialmente a las propiedades del terreno, sino a la naturaleza del comportamiento fluvial.

Los meandros no son estables, sino todo lo contrario. Su dinámica se manifiesta por:

- a) Un continuo alargamiento.
- b) Migración, generalmente hacia aguas abajo.

c) Cortes eventuales.

En la Figura N° 2.16 se aprecia la formación y evolución de los meandros. La longitud del meandro (longitud de onda) está aproximadamente comprendida entre 7 y 11 veces el ancho B del río.

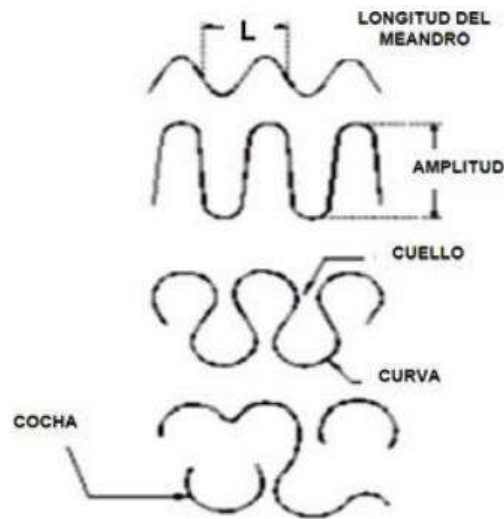


Figura N° 2.16 Evolución de meandros (NEDECO).

El intenso dinamismo que presentan las curvas fluviales, que se manifiesta mediante procesos de erosión y sedimentación y desplazamientos laterales y longitudinales, juega un papel muy importante en la gestación y desarrollo de la morfología fluvial. Tal como se dijo antes, un río recto prácticamente no existe en la naturaleza; en consecuencia, la formación de curvas y meandros es inherente a los ríos. Estas características de los meandros deben tenerse en cuenta necesariamente en el diseño de las obras ubicadas en las inmediaciones de un río, pues la migración de los meandros las pone en peligro.

En este tipo de ríos se presentan eventualmente los cortes de los meandros, que son propios de la dinámica fluvial. En inglés el corte de un meandro por el cuello se llama “*neck-cutoff*”. Los cortes corresponden a la propia inestabilidad y movilidad característica de los meandros. También pueden ser producto de una labor intencional en el manejo del río. Es indudable que el corte de un meandro producirá ajustes importantes: se acorta la longitud del río, aumentan su pendiente y su Capacidad de Transporte, etc., los que se producirán en un tiempo variable y que deberían ser cuidadosamente previstos. Los cortes, o rectificaciones, de un meandro suelen ser útiles en los ríos navegables y en los sistemas de defensas.

Es posible encontrarse con “meandros abandonados”. Cuando se compara mapas antiguos con la situación presente se observa la presencia de

paleocauces (cauces antiguos) que corresponden a cortes de meandros. En las inmediaciones de los ríos de la selva es frecuente encontrar lagunas, a las que, en general, se les conoce con el nombre de cochas. Ver Figura N° 2.16. En quechua cocha significa laguna. Corresponden a “meandros abandonados”. Algunas de ellas se originan cuando se produce, de un modo natural, el corte de un meandro. El antiguo tramo fluvial, ahora aislado, constituye una laguna o cocha, generalmente de forma semicircular. La gran tendencia a sufrir desplazamientos que tienen los ríos a meandros, lo que compromete las obras de ingeniería y las instalaciones ubicadas en sus inmediaciones, obliga a veces a tomar, además de las medidas ya descritas, las que se ven en la Figura N° 2.17.

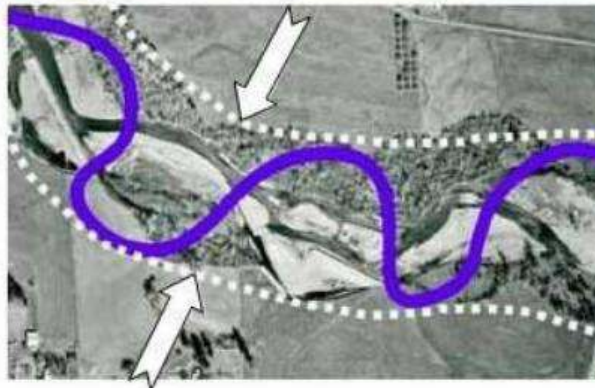


Figura N° 2.17 Imposición de límites a la migración de los meandros (U.S. Department of Agriculture).

2.7 Criterios para distinguir las Formas Fluviales

La relación entre sinuosidad y pendiente con respecto a las formas fluviales se muestra esquemática y cualitativamente en la Figura N° 2.18. El gráfico fue obtenido en laboratorio (Richardson), para un gasto constante muy pequeño. Se observa claramente en la figura que un cambio de pendiente puede dar lugar a una forma fluvial diferente. Así por ejemplo, el corte de un meandro da lugar a un aumento de pendiente y, eventualmente, a una forma fluvial diferente.

No es fácil establecer las condiciones hidráulicas que limitan las formas fluviales básicas que fueron anteriormente descritas, a las que algunos autores llaman umbrales morfológicos. Los criterios más usados son el de Lane y el establecido por Luna B. Leopold y M. Gordon Wolman (1957) para distinguir los ríos meándricos de los trenzados. Estos criterios no tienen alta confiabilidad y deben considerarse sólo como información referencial. Una de las mayores dificultades es identificar el valor del gasto que debe usarse. A continuación se expone brevemente cada uno de ellos.

El criterio de Lane fue establecido experimentalmente en trabajos hechos en cauces arenosos para distinguir los ríos meándricos de los entrelazados, en función del caudal y de la pendiente. En la Figura N° 2.19 se presentan sus resultados. Las ecuaciones que marcan los umbrales respectivos son las siguientes:

Si:	$S Q^{0.25} > 0,0041$	RÍO TRENZADO S
	$Q^{0.25} < 0,0007$	RÍO MEÁNDRICO

Q es el Caudal en m^3/s . Hay una zona intermedia a la que se llama de transición.

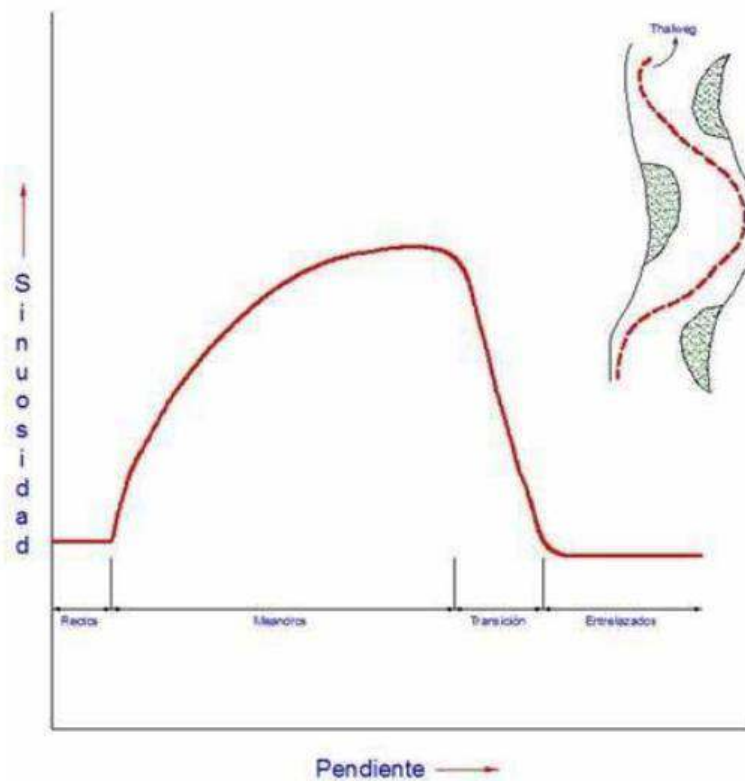


Figura N° 2.18 Relación entre sinuosidad y pendiente para caudal constante (Richardson y otros).

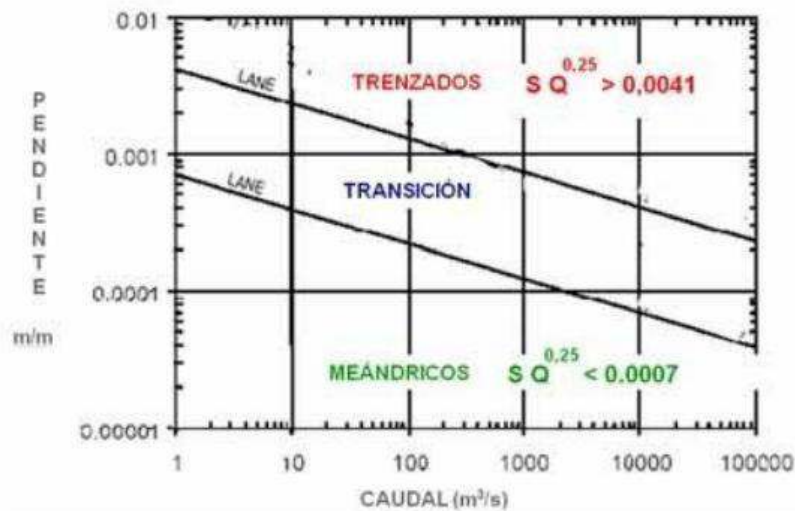


Figura N° 2.19 Criterio de Lane: Umbrales morfológicos.

Leopold y Wolman realizaron observaciones de campo en gran número de ríos de Estados Unidos y de la India y, además, estudios experimentales en el Laboratorio de Sedimentología del Instituto Tecnológico de California. Establecieron una relación entre pendiente y caudal, para lechos de arena y de grava, para distinguir los ríos trenzados de los meándricos. En la Figura N° 2.20 se muestra el resultado de sus investigaciones. La ecuación que marca el umbral respectivo es:

$$S = 0,012 Q^{-0.44}$$

Q es el Caudal en m^3/s .

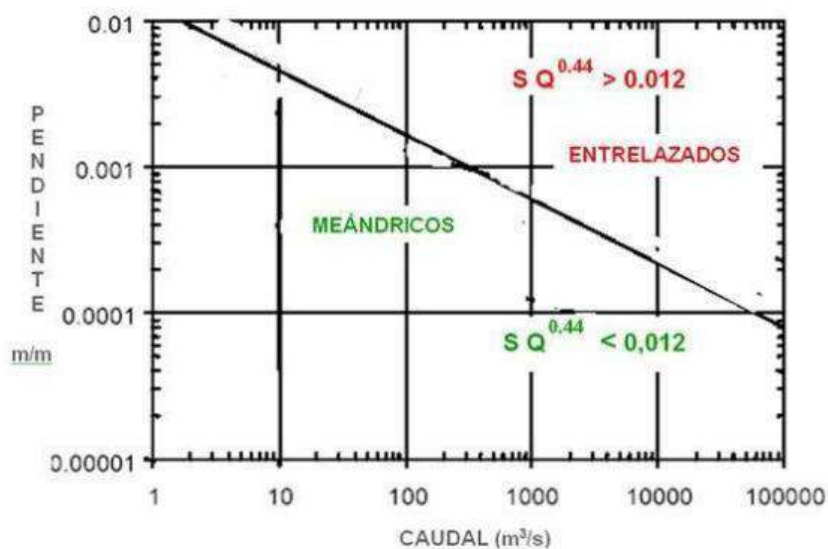


Figura N° 2.20 Criterio de Leopold y Wolman

Leopold y Wolman manifiestan que un río entrelazado es aquel que fluye con dos o más brazos anastomosados alrededor de bancos constituidos por el

material aluvial. En el estudio que realizaron llegaron a la conclusión de que los tramos fluviales entrelazados, tomados como un todo, son de mayor pendiente, más anchos y de menor calado que los mismos brazos fluviales, sin haberse dividido, y llevando el mismo caudal.

Posteriormente se pensó en la importancia que tiene el tamaño de las partículas constituyentes del lecho en el establecimiento de la condición de frontera entre ríos meándricos y trenzados. Es así como Henderson planteó una fórmula para incorporar el diámetro, Miller incluyó la influencia de la vegetación en las márgenes.

El comportamiento de los meandros es complejo e intrigante. Muchos investigadores han hecho grandes esfuerzos por comprenderlos. Es conveniente recordar el interés de Albert Einstein, el famoso autor de la Teoría de la Relatividad, por algunos aspectos de la Hidráulica Fluvial. En el capítulo siguiente se presenta la investigación de Einstein sobre el origen de los meandros.

Referencias

1. ABAD Jorge D. **Evolución de ríos meándricos**. Conferencia. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima 4 de noviembre 2008.
2. ABAD Jorge D. y otros. **2D Stream hydrodynamic, sediment transport and bed morphology model for engineering applications**. Hydrol. Process 22, 1443-1459 (2008).
3. ABAD Jorge D. y GARCIA Marcelo H. **RVR Meander a toolbox for re-meandering of channelized streams**. Computers & Geosciences 32 (2006).
4. BIEDENHARN D. S. y otros. **Fundamentals of Fluvial Geomorphology**. Sedimentation Engineering, Chapter 6, Manual ASCE, 2007.
5. BLENCH T. **Mobile-Bed Fluviology**. University of Alberta, Edmonton, Canada.
6. CAMPAÑA TORO Roberto. **Procesos morfológicos en ríos relevantes en el diseño de puentes**. IMEFEN.
7. CHANG Howard H. **River Morphology and River Channel Changes**. Trans. Tiajin Univ. 2008.
8. CONESA GARCÍA Carmelo. **Trazados de alta y baja sinuosidad en ríos españoles**. Papeles de Geografía, N° 18, Universidad de Murcia, España, 1992.
9. ELLIOTT M. Simon. **El río y la forma. Introducción a la geomorfología fluvial**. RiL Editores, Santiago de Chile, 2010.
10. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Stream Stability at Highway Structures**. Hydraulic Engineering Circular N° 20 (HEC 20), Washington, USA, March 2001.
11. FARIAS Héctor Daniel. **Forma en Planta de Ríos de Llanura. Conciliación de Criterios Empíricos y Analíticos para la Identificación de Umbrales Morfológicos**. Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Neuquén, Argentina, 2005.

12. FRIJLINK H. C. **Introduction to River Engineering**. International Course in Hydraulic Engineering. Delft, Holanda.
13. KNIGHTON D. **Fluvial Forms and Processes**. Arnold Publ. & J. Wiley and Sons, London, United Kingdom 1984.
14. LANE E. W. **A Study of the Shape of Channels Formed by Natural Streams Flowing in Erodible Material** (R). M. R. D. Sediment Series N° 9 U.S. Army Engineering Division, Missouri River, Corps of Engineers, 1957.
15. LELIAVSKY Serge. **Introducción a la Hidráulica Fluvial**. Ediciones Omega S.A. Barcelona, 1964.
16. LEOPOLD L. B. y WOLMAN M. G. **River Channel Patterns: braided, meandering and straight**. (R) USGS Professional Paper 292-B, 1957.
17. MARTÍN VIDE Juan P. **Ingeniería de Ríos**. Universidad Politécnica de Barcelona, 2007.
18. MARTÍN VIDE Juan P. **Ingeniería Fluvial**. Ediciones UPC, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2000.
19. MOUNT Jeffrey. **California Rivers and Streams**. University of California Press, 1995.
20. NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. **Design of stream barbs**. Technical Note 23. U.S. Department of Agriculture, April 2005.
21. ODGAARD A. Jacob y ABAD Jorge D. **River Meandering and Channel Stability**. En **Sedimentation Engineering**, Chapter 8, Manual ASCE, 2007.
22. PIÉGAY HERVÉ y otros. **Braided river management: from assessment of river behavior to improved sustainable development**. Institute of Geological and Natural Sciences, Lower Hatt, New Zealand, 2006.
23. RICHARDSON E. V., SIMONS D. B. y otros. **Highways in the River Environment-Hydraulic and Environmental Design Considerations**. Colorado State University.
24. ROCHA FELICES Arturo. **La Morfología Fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales**. VIII Congreso Internacional de Obras de Infraestructura Vial. Lima, 2009. Diciembre, 2009.
25. ROCHA FELICES Arturo. **El Dinamismo Fluvial y la Seguridad de Las Obras Viales durante el Fenómeno de El Niño**. SEMINARIO "Reducción de la Vulnerabilidad en la Red Vial del País por Desastres Naturales". Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Lima, 2005.
26. ROCHA FELICES Arturo. **Introducción a la Hidráulica Fluvial**. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 1998.
27. ROSGEN D. **Applied River Morphology**. Wildland Hydrology, Pagosa Springs, Colorado USA 1996.
28. SCHUMM S. A. y KHAN H. R. **Experimental Study of Channel Patterns**. Geological Society of America, Bulletin June 1972.
29. SCHUMM S. A. y HARVEY M. D. **Engineering Geomorphology**. Sedimentation Engineering, Chapter 18, Manual ASCE, 2007.
30. SCHUMM S. A. **Patterns of Alluvial Rivers**. Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 1985.
31. SCHUMM S. A. **Fluvial Geomorphology**. Colorado State University, 1973.
32. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Stream Stability at Highway Structures**. HEC N° 20, March 2001.

CAPÍTULO 3

ALBERT EINSTEIN Y EL ORIGEN DE LOS MEANDROS

3.1 Introducción

Albert Einstein, el famoso autor de la Teoría de la Relatividad, es muy conocido entre los científicos y también entre el gran público, a causa del enorme impacto que produjo su obra en el desarrollo de la física moderna y de la ciencia en general.

En cambio, los meandros, que son aquellas misteriosas curvas que de un modo reiterativo describen perezosamente algunos ríos, sólo son estudiados por los ingenieros dedicados a la Hidráulica Fluvial. Los meandros aparecen también, metafóricamente, en algunos críticos literarios y escritores, como por ejemplo en Borges al referirse a un cierto autor (“... los meandros de su infatigable novela”). A su vez, de la prosa de Borges se ha dicho que ella es difícil por los meandros ideológicos que se ocultan o emergen repentinamente de sus obras, en contextos inesperados... En arquitectura, meandro es un adorno de líneas sinuosas y repetidas.

Uno de los hechos menos conocidos de la actividad científica de Einstein es el interés que tuvo por algunos aspectos de la Hidráulica Fluvial. En efecto, en 1926 publicó en la revista “Die Naturwissenschaften” (“Las Ciencias Naturales”) un breve artículo titulado “Las Causas de la Formación de los Meandros Fluviales y la llamada Ley de Baer”, que correspondía a la conferencia que había dictado el 7 de enero de 1926 en la Academia Prusiana. Se adjunta la traducción, especialmente preparada para este libro.

De la lectura de lo arriba expuesto surge inmediatamente la pregunta: ¿Qué relación existe entre Albert Einstein y los meandros? Esa es la pregunta que trataremos de responder en el presente capítulo. Por ello es útil empezar con algunos aspectos de la vida del famoso científico.

3.2 Su vida

Albert Einstein nació en 1879 en Ulm (Baden-Wurttemberg, Alemania), a orillas del río Danubio, cuyos característicos meandros seguramente observó muchas veces. Realizó sus estudios de matemáticas y física en la famosa Escuela Politécnica de Zúrich, donde se graduó el año 1900. El laboratorio de Hidráulica de dicho Politécnico (VAWE), que fue durante muchos años dirigido por Meyer-Peter, reconocido investigador en el campo de la Hidráulica Fluvial, específicamente en Transporte de Sedimentos, ha tenido mucha relación con el Perú. En él se han realizado numerosos estudios en modelo hidráulico, el más

importante de ellos fue el de la sedimentación y purga del embalse del Proyecto Mantaro (Tablachaca).

A los 26 años, en 1905, Albert Einstein dió a conocer su trabajo titulado “Sobre la Electrodinámica de los Cuerpos en Movimiento”, que después se conoció con el nombre de Teoría de la Relatividad Especial. En 1909 era profesor en la Universidad de Zúrich, en 1911 lo era de Física Teórica en la Universidad de Praga y en 1914 llegó al alto cargo de director del Instituto de Física Kaiser-Wilhelm, (en la actualidad es el Instituto de Física Max Planck). En 1916 dió a conocer la Teoría de la Relatividad Generalizada y en 1922 obtuvo el Premio Nobel de Física por sus investigaciones de física teórica, específicamente por sus trabajos sobre la teoría del efecto fotoeléctrico. Al otorgársele el Premio no se mencionó la Teoría de la Relatividad, que aún no se consideraba suficientemente comprobada.

En 1933, luego de casi veinte años, ante la creciente presión del nazismo dejó la dirección del Instituto Kaiser-Wilhelm y se trasladó a Estados Unidos y se incorporó al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, New Jersey, donde permaneció unos veinte años. En 1940 se nacionalizó norteamericano y permaneció en Princeton trabajando en sus investigaciones sobre la Teoría del Campo Unificado, hasta su muerte en 1955. Desde hace muchos años se le reconoce como el padre de la física moderna.

3.3 Su interés en diversos temas

Einstein no sólo se interesó por la física; era muy aficionado a la música y tocaba el violín con gran habilidad. Fue también un gran pacifista y frente a la amenaza de las nuevas armas llegó a decir: “No sé con qué armamento se peleará la Tercera Guerra Mundial, pero la Cuarta Guerra Mundial se peleará con palos y piedras.” Escribió numerosos artículos en pro de la paz: “La cuestión del desarme”, “Se ha ganado la guerra, pero no la paz”, “La búsqueda de la paz” y otros más. En 1950 Albert Einstein se dirigió a los estadounidenses y señaló el peligro de las armas nucleares y los riesgos de la carrera armamentista entre Estados Unidos y la entonces Unión Soviética.

Einstein se interesó en numerosos temas, como los ya mencionados de la física, la música y el pacifismo. Tenía una mente inquieta y una vez afirmó: “Todos somos muy ignorantes. Lo que ocurre es que no todos ignoramos las mismas cosas.” Tuvo también mucha sensibilidad por los temas sociales; en una oportunidad expresó lo siguiente: “¡Triste época la nuestra! Es más fácil desintegrar un átomo que un prejuicio”. Escribió, entre otros temas, sobre: “Mis primeras impresiones de Estados Unidos”, “El auténtico valor del ser humano”, “La comunidad judía”, “Resurgir judío” y “Cristianismo y judaísmo”. Quizás fue en ese contexto de incompreensión y rechazo al segregacionismo que dijo: “Hay dos cosas infinitas: el Universo y la estupidez humana. Pero, no estoy muy seguro de la primera.

De la segunda puedes observar cómo nos destruimos sólo para demostrar quién puede más”

El interés y admiración que produjeron sus estudios sobre la Teoría de la Relatividad, de algún modo opacaron sus muy variadas contribuciones en otros campos del pensamiento. Su libro “Mis ideas y opiniones”, constituye una recopilación de lo que algunos autores han llamado sus trabajos “menos técnicos”. Escribió entre otros, sobre los siguientes temas: “El mundo tal como yo lo veo”, “El significado de la vida”, “Sobre la libertad académica”, “Fascismo y ciencia”, “Métodos inquisitoriales modernos”, “El espíritu religioso de la ciencia”, “Religión y ciencia: ¿Irreconciliables?”, “La necesidad de una cultura ética”, “Sobre la literatura clásica”, “Mahatma Gandhi”, “En la memoria de Max Planck”, “La cultura ha de ser una de las bases de la comprensión mundial”, “Sobre la verdad científica”, “Johannes Kepler”, “Mensaje en el aniversario de la muerte de Copérnico” y muchos otros más, entre los que se encuentra su notable contribución acerca del origen de los meandros.

Dado el interés que tuvo Einstein por tantos y tan diversos temas no debería llamarnos la atención su investigación sobre los meandros; sin embargo, debe reconocerse que se trata de un tema muy específico de Hidráulica Fluvial, que resultó ser algo aislado dentro de su enorme producción científica y humanista. Recordemos que no sólo escribió el artículo mencionado, sino que previamente había dictado una conferencia sobre los meandros.

¿Es que recordó los meandros que en su niñez vio en el Danubio? ¿Es que tuvo un interés por ellos como consecuencia de alguna conversación con su hijo Hans Albert, graduado de ingeniero civil en Zúrich el mismo año en que escribió el artículo? ¡Quién sabe!, pero lo que no puede dejar de tenerse en cuenta es que por sus trabajos de física, Einstein tuvo que estudiar muy profundamente la fuerza de Coriolis, así como los problemas relacionados a la curvatura en general, de donde no resulta tan extraño que se interesase por la curvatura de los ríos y por su explicación a partir del efecto de Coriolis.

3.4 Hans Albert Einstein

Al tratar de Einstein y los meandros se recuerda a su hijo Hans Albert, quien había nacido en 1904 en Berna, Suiza, cuya figura es muy conocida entre los especialistas en Hidráulica Fluvial por sus trabajos sobre Transporte de Sedimentos y, específicamente, por la fórmula que lleva su nombre que se usa para determinar la capacidad de transporte de sólidos de los cursos de agua. Hans Albert se recibió de ingeniero civil en 1926, el mismo año en el que su padre escribió el artículo sobre los meandros. Obtuvo su doctorado en Zúrich en 1936 con una tesis sobre “El Transporte Sólido de Fondo como un Problema Probabilístico”. Fue colaborador de Meyer-Peter. Más tarde, en 1938, se trasladó a Estados Unidos y continuó sus investigaciones sobre transporte de sedimentos en el U.S. Department of Agriculture Cooperative Laboratory, California Institute of Technology, de donde resultó su famosa fórmula para el

cálculo del transporte sólido (“The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows”). En 1947 se incorporó como profesor en Berkeley, California.

Hans Albert Einstein participó en el Estudio de Factibilidad del Proyecto Chira-Piura (1968) y, junto con J. S. Long, preparó el documento preliminar titulado “Report on the Sediment Inflow into the Proposed Poechos Reservoir”. En aquella oportunidad visitó el Laboratorio Nacional de Hidráulica y conoció el primer modelo de fondo móvil que se ha investigado en nuestro Laboratorio. Falleció en 1973.

3.5 Los meandros

Las características generales de los ríos meándricos han sido presentadas en el Capítulo 2, como parte de la clasificación morfológica de los ríos. El artículo de Albert Einstein ayudó a comprender el origen de esas misteriosas curvas fluviales.

La Real Academia Española define la palabra meandro como cada una de las curvas que describe el curso de un río. Por extensión se aplica a un camino. La palabra meandro, que se usa mucho en sentido metafórico, viene del griego, a través del latín. En griego, “Maiandros” (Μαίανδρος) era el nombre de un río del Asia Menor, célebre por lo tortuoso de su curso. En el presente se le conoce con los nombres de Mendereh, Büyük Menderes o Menderez y se encuentra en la actual Turquía. Su longitud total hasta su desembocadura en el mar Egeo es de 380 kilómetros.



3.6 El origen de los meandros

El artículo de Einstein de 1926 es en verdad breve. Menos de tres páginas, tres figuras muy simples y sólo una fórmula. Se recuerda acá unas palabras de

Einstein, dichas en otro contexto, pero aplicables a su explicación del origen de los meandros: “Desde que los matemáticos invadieron la teoría de la relatividad, yo mismo no la entiendo más.”

Einstein menciona en el título de su trabajo sobre el origen de los meandros la ley de Baer que consiste básicamente en que a causa de la rotación de la Tierra, en el hemisferio norte la erosión fluvial se presenta principalmente en la margen derecha, en tanto que en el hemisferio sur ocurre en la izquierda. Esta muy discutida ley se debe a las observaciones realizadas por el biólogo y geógrafo Karl Ernst von Baer (1860).

Einstein continúa su artículo con gran humildad, pues señala que no está seguro de que lo que escribe sobre el origen de los meandros sea algo nuevo para los especialistas. Pero, añade que como no ha encontrado a nadie que explique las relaciones causales correspondientes, resulta pertinente dar una corta y cualitativa exposición de ellas.

Sigue con gran sencillez, de un modo que recuerda a Galileo, quien se refirió a la naturaleza como el gran libro abierto ante nuestros ojos, y el sabio de Ulm, como si estuviese mirando el curso fluvial, dice: “Es de conocimiento general que cursos de agua tienden a formar curvas, en lugar de hacer un recorrido recto siguiendo la inclinación del terreno según la línea de máxima pendiente”. Como se ve, Einstein amaba la sencillez y se inspiraba en el mundo natural, lo que no ocurre con muchos científicos, quizás por eso dijo: “Cada día sabemos más y entendemos menos.”

Para tratar el origen de los meandros, Einstein utilizó, al igual que en otras de sus publicaciones científicas, la técnica denominada “experimentos mentales” y si se recuerda que sólo usó una fórmula, además muy simple, adquieren pleno significado algunas palabras suyas, dichas en otra oportunidad, pero muy significativas: “Cuando me examino a mí mismo y mi método de pensamiento, llego a la conclusión de que el don de la fantasía ha significado para mí más que mi talento para absorber el conocimiento positivo”. A lo que podría añadirse otras palabras suyas: “En los momentos de crisis, sólo la imaginación es más importante que el conocimiento.”

Siguiendo con la simpleza que lo caracteriza empieza con un pequeño experimento que cualquiera puede fácilmente repetir y que consiste en imaginar una taza con fondo plano, llena de té. A partir de la observación del movimiento de las hojas de té señala que algo similar ocurre cuando un río desarrolla una curva y concluye que “en cada sección transversal a lo largo de una curva fluvial se desarrolla una fuerza centrífuga que actúa hacia la parte exterior de la curva. Esta fuerza es menor cerca del fondo, donde la velocidad es menor como consecuencia de la fricción, y mayor lejos de él.” Y añade que esto causa un movimiento circular del líquido. Señala luego que aun en los

tramos fluviales que no son curvos se presentará un movimiento circular, aunque muy pequeño, y que se debe a la influencia de la rotación de la Tierra.

Y sigue su desarrollo señalando que el ajuste de la distribución de velocidades como consecuencia de la fricción interna contrarresta lentamente las consecuencias del movimiento circular. El desarrollo de un flujo helicoidal favorece la formación de los meandros.

Muchos estudiosos se han interesado por los meandros, pero muy pocos autores mencionan la contribución de Einstein a su esclarecimiento.

Se considera que el artículo de Albert Einstein sobre los meandros ayudó considerablemente a entender, de un modo muy simple, la participación del flujo helicoidal en la formación de los meandros, en la determinación de su longitud y en su propagación hacia aguas abajo.

Como los ríos tienen una tendencia a adquirir sus propias características y formas en el capítulo siguiente se examina el denominado "Autoajuste" de los ríos aluviales.

ANEXO 3-A

Las Causas de la Formación de los Meandros Fluviales y la llamada Ley de Baer

A. Einstein, Berlín

Die Naturwissenschaften, 1926

Traducción del artículo de Albert Einstein titulado

**Die Ursachen der Mäanderbildung der Flußläufe und des sogenannten
Baerschen Gesetzes**

(Traducción: Arturo Rocha Felices)

Es de conocimiento general que los cursos de agua tienen la tendencia a serpentear, formando curvas, en lugar de hacer un recorrido recto siguiendo la inclinación del terreno según la línea de máxima pendiente. Además, es bien conocido entre los geógrafos que los ríos del hemisferio norte tienen la tendencia a erosionar, principalmente, la margen derecha; con los ríos del hemisferio sur ocurre lo contrario (Ley de Baer). Ha habido numerosas investigaciones buscando la explicación de este fenómeno y no estoy seguro de que lo que digo a continuación sea algo nuevo para los especialistas, aunque algunas de las consideraciones que hago son ciertamente conocidas. Sin embargo, como no he encontrado a nadie que haya explicado las relaciones causales antes señaladas, pienso que es pertinente dar una corta y cualitativa exposición de ellas.

En primer lugar, está claro que la erosión debe ser mayor en la medida en que lo sea la velocidad de la corriente en la margen respectiva, o bien, en la medida en la que la velocidad se acerque más abruptamente a cero hacia el contorno. Esto es cierto para todas las condiciones, sea que la erosión dependa de factores mecánicos o físico-químicos (composición del cauce). Por lo tanto, debemos concentrar nuestra atención en las circunstancias que determinan el gradiente de velocidades cerca del contorno.

En ambos casos la asimetría en lo que respecta al gradiente de velocidades se debe indirectamente a la formación de un movimiento circular hacia el cual dirigiremos en primer lugar nuestra atención. Empiezo con un pequeño experimento que cualquiera puede fácilmente repetir.

Tengo delante de mí una taza con fondo plano llena de té. En el fondo hay algunas hojas de té, que están ahí porque son más pesadas que el líquido que desplazan. Si hacemos rotar el líquido por medio de una cuchara, las hojas de té se agruparán inmediatamente en la parte central del fondo de la taza. La razón de este fenómeno es la siguiente: la rotación del líquido genera una fuerza centrífuga. Como no se trata de un sólido, sino de un fluido, se producen deformaciones. Pero, como el contorno

produce un efecto retardador causado por la fricción, la velocidad angular con la que rota el fluido en sus proximidades es menor que en otros puntos más próximos al centro. En especial, la velocidad angular de rotación y, por lo tanto, la fuerza centrífuga será menor cerca del fondo que a una mayor altura. El resultado será un movimiento circular del líquido del tipo que se aprecia en la Fig. 1, el que a su vez aumenta hasta que por la influencia de la fricción del contorno se vuelve permanente¹. Las hojas de té son atraídas hacia el centro y con ello demuestran la existencia del movimiento circular.

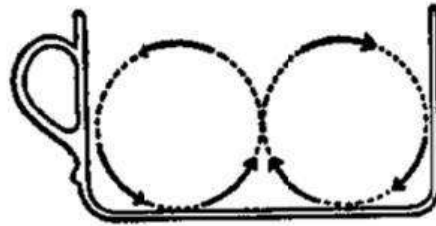


Fig. 1

Algo similar ocurre en un río que desarrolla una curva (Fig. 2). En todas las secciones transversales a lo largo de la curva fluvial se genera una fuerza centrífuga dirigida hacia la parte exterior de la curva (de A hacia B). Esta fuerza es menor cerca del fondo, donde la velocidad de la corriente es menor como consecuencia de la fricción del contorno, y es mayor lejos de él. Esto causa un movimiento circular del tipo que se ilustra en la figura. Aun en los tramos fluviales que no son curvos² se presentará un movimiento circular como el mostrado en la Fig. 2, aunque muy pequeño, y que se debe a la influencia de la rotación de la Tierra. Ese movimiento circular produce una fuerza de Coriolis, que actúa transversalmente a la dirección de la corriente, cuya componente horizontal de echa es $2V\omega \sin \varphi$ por unidad de masa del líquido, en la que V es la velocidad de la corriente, ω es la velocidad de rotación de la Tierra y φ es la latitud geográfica. Como la fricción con el contorno produce una disminución de dicha fuerza hacia el fondo, esto da lugar también a un movimiento circular como el indicado en la Fig. 2.

Después de esta reflexión preliminar regresamos al problema de la distribución de velocidades en la sección transversal de la corriente, que es el factor que controla la erosión. Para ello debemos, en primer lugar, visualizar cómo es que en un río (en flujo turbulento) se desarrolla y se mantiene la distribución de velocidades. Si el agua de un río que estuviese en reposo fuese de pronto puesta en movimiento por acción de una fuerza aceleradora uniformemente distribuida, la distribución de velocidades en la sección transversal sería inicialmente uniforme³. La distribución de velocidades, es

¹ Permanente: Se usa en el sentido del movimiento independiente del tiempo; es decir, que las derivadas parciales con respecto al tiempo son iguales a cero. En el original, "stationär" (N. del T.)

² Obsérvese que Einstein evita usar la expresión "ríos rectos" y emplea, elegantemente, el eufemismo ríos "que no son curvos" (N. del T.)

³ Es decir, como si se tratase de un fluido ideal (N. del T.)

decir, el aumento gradual de las velocidades desde el contorno hacia el interior de la sección transversal, se establecerá después de un cierto tiempo, como consecuencia de la fricción del contorno. Si ocurriese una alteración de la distribución (aproximadamente) permanente de velocidades en la sección transversal, ésta (por la influencia de la fricción) se restablecerá lentamente.

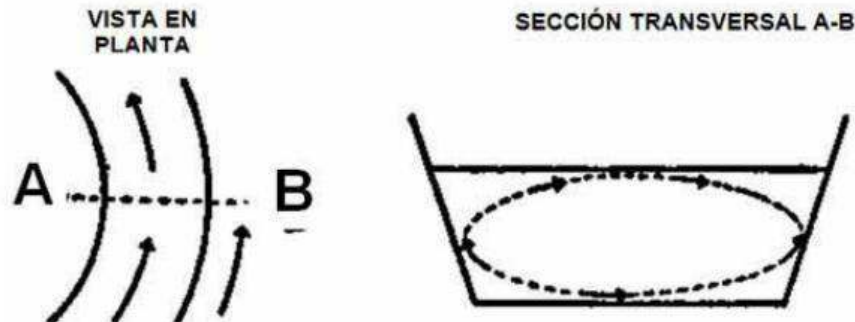


Fig. 2

La Hidrodinámica describe de la manera que se señala a continuación, el proceso mediante el cual se establece la distribución permanente de velocidades. En una distribución uniforme de la corriente (Flujo Potencial) todos los vórtices se agrupan en las paredes. De allí se desprenden y se mueven lentamente hacia el interior de la sección transversal de la corriente, distribuyéndose por sí mismos en una capa de creciente grosor. El gradiente de velocidades cerca del contorno disminuye gradualmente. Por acción de la fricción interna del líquido los vórtices en el interior de la sección transversal son gradualmente absorbidos y su lugar es ocupado por los nuevos que se forman en el contorno. Aparece entonces una distribución de velocidades casi-permanente. Lo importante para nosotros es que llegar a una distribución de velocidades permanente es un proceso lento. Esto se debe a que causas relativamente pequeñas, pero que operan constantemente, son capaces de ejercer una influencia considerable sobre la distribución de velocidades en la sección transversal.

Examinemos ahora qué clase de influencia, debida a una curva en el río o a la fuerza de Coriolis, como se muestra en la Fig. 2, ejercerá el movimiento circular sobre la distribución de velocidades en la sección transversal del río. Las partículas líquidas que se muevan más rápidamente estarán más alejadas del contorno, es decir, estarán en el centro de la superficie. Como consecuencia de la circulación, estas partículas de agua más rápidas son conducidas hacia la margen derecha, en tanto que a la margen izquierda llegan las partículas provenientes de la zona cercana al fondo que tiene velocidad particularmente pequeña. De acá que la erosión sea necesariamente mayor en la margen derecha que en la izquierda (en el caso de la Fig. 2). Se observa que esta explicación se basa fundamentalmente en que el lento movimiento circulatorio del

agua ejerce una influencia considerable sobre la distribución de velocidades, originado en el acomodo de las velocidades por fricción interna que contrarresta las consecuencias del movimiento circular es también un proceso lento.

Así queda aclarado el origen de la formación de los meandros. Pero, también pueden deducirse sin dificultad algunas particularidades importantes. La erosión no solo será comparativamente mayor en la margen derecha del cauce, sino también en la mitad derecha del fondo, de modo que habrá una tendencia a que se produzca un perfil como el de la Fig. 3.

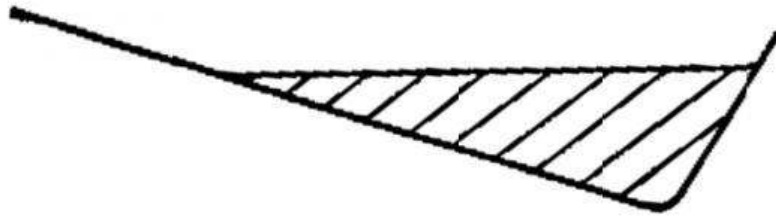


Fig. 3

Además, el agua superficial viene de la margen izquierda, y se mueve (especialmente en la margen izquierda) con menor velocidad que el agua que fluye a mayor profundidad; lo que ha sido observado en la realidad. Además, debe señalarse que el movimiento circular tiene inercia. En consecuencia, la circulación sólo adquiere su máximo más allá de la sección de mayor curvatura, y lo mismo se aplica naturalmente a la asimetría de la erosión. De acá que al progresar la erosión se producirá un avance del meandro en la dirección de la corriente. Por último, mientras mayor sea la sección transversal del río, el movimiento circular será más lentamente absorbido por la fricción, y la longitud de onda del meandro aumentará con la sección transversal del río.

Referencias

1. BOWKER Kent A. **Albert Einstein and Meandering Rivers**. Earth Science History, V. 1, N° 1, 1988.
2. EINSTEIN Albert. **Mis ideas y Opiniones**. Editorial Antoni Bosch, Barcelona, junio 2000.
3. EINSTEIN Albert. **Die Ursachen der Mäanderbildung der Flußläufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes**. Die Naturwissenschaften, 1926.
4. EINSTEIN Hans Albert. **Der Geschiebetrieb als Wahrscheinlichkeits Problem**. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule. Zürich, 1937.
5. EINSTEIN Hans Albert y LONG J. S. **Report on the Sediment Inflow into the Proposed Poechos Reservoir**. Estudio de Factibilidad del Proyecto Chira-Piura. IECO, 1968.
6. LIENHARD John H. **Meandering Rivers**. University of Houston's College of Engineering.
7. MARTÍNEZ FRÍAS Jesús y otros. **A Review of the contributions of Albert Einstein to Earth Sciences- In commemoration of the World Year of Physics**. Die Naturwissenschaften, 2006.
8. ROCHA FELICES Arturo. **Albert Einstein y el origen de los meandros**. V Congreso Internacional de la Construcción-ICG. Lima, diciembre 2010.
9. ROCHA FELICES Arturo. **La morfología fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales**. VIII Congreso Internacional de Obras de Infraestructura Vial. Lima, 2009. Diciembre, 2009.
10. ROCHA FELICES Arturo. **Sobre la influencia de aceleración complementaria de Coriolis en los modelos hidráulicos**. Boletín Técnico 4-003, Laboratorio Nacional de Hidráulica, Lima, febrero de 1966.

CAPÍTULO 4

CURSOS DE AGUA EN RÉGIMEN

4.1 Introducción

Este capítulo se refiere exclusivamente a los cursos de agua que tienen un contorno móvil, cuyo comportamiento es radicalmente diferente de los que tienen un contorno rígido. La diferencia de comportamiento es tan grande, dice Blench, como la que existe entre un flujo laminar y otro turbulento. Las fórmulas que se presentan en este capítulo se aplican en la práctica, tanto a canales como a ríos, siempre que tengan las características de movilidad antes señaladas. Es conveniente recordar que se ha dicho que un canal es un río sin meandros.

Los cursos de agua no confinados que corren sobre un material aluvial tienen la tendencia a adquirir, por un mecanismo que ha sido llamado de "Autoajuste", los anchos, tirantes y pendientes correspondientes a los gastos líquidos y sólidos y a la composición granulométrica del material sólido transportado por la corriente. Estos últimos son las variables independientes. Cuando ocurre la situación antes descrita se dice que el río está "en régimen". En 1919 Lindley se refirió a la condición "en régimen" como aquella que corresponde a un cauce cuyo ancho y tirante están en equilibrio con el caudal y varían con este. La condición de Autoajuste se expresa de la siguiente manera:

$$(B, y, S) = \phi(Q, T, d) \quad (4.1)$$

En donde, B es el ancho (anchura) del curso de agua, y es el tirante, S es la pendiente, Q es el caudal, T es el gasto sólido, y d es el diámetro representativo del material de fondo (Capítulo 11).

Una de las tareas más difíciles de la Hidráulica Fluvial cuando se proyecta un sistema de defensas o un encauzamiento es la de determinar cuáles deben ser el ancho, el tirante y la pendiente que corresponden al tramo en cuestión. Cuando se proyecta un canal "en tierra", con fondo arenoso, usando las fórmulas de los contornos rígidos, ocurre frecuentemente que el canal no se comporta como se había previsto. Si se proyecta muy estrecho, el canal tiende a ensancharse, si se proyecta muy ancho el canal tiende a depositar en las márgenes. Si la pendiente no es la adecuada se produce agradación o degradación. Lo que pasa, dice Blench, es que el canal o río trata de "autoajustarse" de acuerdo a la consideración expresada en la ecuación (4.1).

Sin embargo, el álveo (caja del río) no siempre adquiere el ancho y el tirante que le correspondería de acuerdo a la consideración anterior (Autoajuste), por

cuanto pudiera ser que el contorno en el que se desarrolla el curso de agua ofrezca resistencia suficiente para evitar que ello ocurra. En estos casos hay, pues, restricciones impuestas por la naturaleza del terreno, las que pueden estar en el lecho y/o en las márgenes.

Cuando un río adquiere libremente su ancho, tirante y pendiente, o cuando expresa esta tendencia, se está comportando como un río aluvial. En él los desplazamientos horizontales y verticales son algo natural en función de las condiciones cambiantes que ofrece la cuenca. Eventualmente, los desplazamientos antes señalados pueden presentarse o agravarse como consecuencia de acciones humanas. La construcción de defensas y diques impide que un río se desarrolle libremente. Se dice entonces que existen condiciones artificiales, las que, obviamente, no deben ser exageradas ni apartarse notoriamente de las condiciones de Autoajuste.

Desde hace muchos años ha sido motivo de preocupación e incertidumbre de parte de los ingenieros hidráulicos lograr el dimensionamiento (ancho, tirante y pendiente) de los canales fango-estables, llamados también “en tierra”, de modo que no se produzca erosión ni sedimentación. Es decir, se buscaba que dichos canales estuviesen en estado de equilibrio. A esos canales, en los que no había erosión ni sedimentación durante un tiempo suficientemente largo, se les llama canales “en régimen”.

En la actualidad se utiliza varias metodologías para el diseño de canales estables. Ninguna de ellas tiene suficiente precisión y confiabilidad para un diseño satisfactorio. Por eso en estos problemas juega un gran papel el buen juicio y la experiencia del ingeniero diseñador. En el presente capítulo se examina algunas de las antiguas y numerosas fórmulas empíricas que empezaron en el siglo XIX con estudios de campo en canales existentes de la India, Pakistán y Egipto. Estas fórmulas culminaron con la teoría del Régimen de Blench y con sus modificaciones, que se examinan más adelante.

Posteriormente, a lo largo del siglo XX, se han desarrollado fórmulas que parten ya sea de las velocidades máximas admisibles (velocidades críticas) o del concepto de fuerza tractiva. Es inmenso el número de fórmulas que se ha desarrollado, lo que se debe seguramente a la propia naturaleza de los problemas sedimentológicos. Cada ingeniero diseñador tiene sus preferencias, sin embargo, la utilidad de las llamadas fórmulas empíricas es invaluable para determinar las dimensiones de la sección transversal de un cauce estable.

Las fórmulas se establecen para la condición de un caudal que ocupe totalmente la sección transversal, sin desbordar. En inglés esta condición se conoce como “*bankfull discharge*”. En castellano a veces se usa la expresión “condición de no desborde”.

4.2 Las investigaciones de Kennedy

El concepto de canales “en régimen”, como se ha dicho, se refiere a la capacidad que tiene un canal (en tierra) o un río de realizar el ajuste de su sección transversal y de su pendiente como una respuesta a las condiciones externas antes mencionadas, las que para tal efecto constituyen las variables independientes.

La preocupación de los ingenieros del siglo XIX era diseñar canales de irrigación (no revestidos) en los que no hubiese erosión ni sedimentación. Se puede considerar que la llamada Teoría del Régimen, que para muchos no es realmente una teoría sino un conjunto de fórmulas empíricas, se originó en la India con las investigaciones de R. G. Kennedy, quien en 1895 dio a conocer los trabajos que desde hacía varios años venía realizando y que le permitieron establecer para el diseño de canales “en régimen” una relación empírica muy simple entre la velocidad media y el tirante, que se expresa mediante el siguiente monomio:

$$V = c y^m \quad (4.2)$$

Es decir, que en canales estables (“en régimen”) la velocidad media es proporcional a una potencia del tirante. En esta expresión, velocidad media significa aquella que no produce erosión ni sedimentación; en otras palabras, que el canal se encuentra “en régimen”. Los trabajos de Kennedy fueron seguidos por los de Lindley, Lacey, Inglis, Blench y muchos otros más hasta llegar a los modernos conceptos de fuerza tractiva y velocidad crítica.

Para las observaciones y mediciones realizadas en veintidós canales de irrigación del sistema Alto Bari Doab, Punjab, cuenca del río Indo, que estaban en funcionamiento y que permanecían estables durante un tiempo suficientemente largo, Kennedy obtuvo, en unidades inglesas (pies por segundo y pies) la siguiente expresión:

$$V = 0,84 y^{0,64} \quad (4.3)$$

Que es la que usualmente se conoce como la fórmula de Kennedy, la que, sin embargo, estrictamente sólo se aplicaría al sistema de canales para el cual fue establecida. Esta fórmula tiene hoy un valor histórico y ha sido superada por otros criterios. Para sistemas de canales de otras regiones Kennedy encontró, como era de esperarse, que los valores de c y de m de la ecuación 4.2 eran diferentes. Ven Te Chow menciona los siguientes valores del coeficiente c :

- $c = 0,56$ para suelos muy finos, como los de Egipto.
- $c = 0,84$ para arenas finas, como en Punjab, India.
- $c = 0,92$ para suelos arenosos, ligeramente gruesos.
- $c = 1,01$ para suelos arenosos.

$c = 1,09$ para suelos gruesos.

Se consideró también que el valor del exponente m sólo tenía variaciones muy pequeñas. Sin embargo, Lacey menciona que el coeficiente c de la ecuación 4.2 varía entre 0,67 y 0,95 y, según otros autores, entre 0,25 y 1,20 y que el exponente m varía entre 0,52 y 0,64 y, según otros autores, entre 0,61 y 0,73. Como se ve hay una gran dispersión en los resultados, lo que corresponde a la naturaleza empírica de estas fórmulas y a las diferentes condiciones para las que fueron establecidas.

La fórmula de Kennedy en el sistema métrico (metros por segundo y metros) es

$$V = 0,548 y^{0,64} \quad (4.4)$$

Estas investigaciones empíricas, anteriores al manejo de los modernos conceptos de iniciación del movimiento de las partículas de fondo, resultaron, sin embargo, muy útiles y fueron usadas en gran parte del siglo XX. Estas fórmulas, que tienen un valor histórico, han sido superadas, pero recientemente, a partir de las fórmulas de Blench que se examinan más adelante, han resultado de utilidad para el estudio de los ríos.

4.3 Otras investigaciones empíricas

En 1929 Gerald Lacey, antes mencionado, dio a conocer sus ecuaciones para el dimensionamiento de canales “en régimen” a partir de datos provenientes de canales de irrigación de la India, Pakistán y Egipto. Es interesante un comentario que hace Lacey en uno de sus escritos, cuando afirma que de las muchas ramas que tiene la Hidráulica, aquella que se refiere a las corrientes aluviales con transporte sólido es probablemente la más compleja y la más inexacta. Lacey obtuvo que el ancho superficial de un canal “en régimen”, en condiciones de descarga plena (“*bankfull discharge*”), era proporcional a la raíz cuadrada del caudal:

$$B = k_1 Q^{1/2} \quad (4.5)$$

Lacey precisa muy bien que los canales “en régimen” no son estables en el sentido de que el perímetro mojado sea rígido e inerte. Son canales vivos, dice Lacey, con un contorno móvil que, idealmente, está formado por los mismos sedimentos acarreados por la corriente. Lacey encontró para un determinado sistema de canales que el coeficiente k_1 tenía el valor $8/3$ (en unidades inglesas), con lo que

$$B = 8/3 Q^{1/2} \quad (4.6)$$

De acá se obtiene (en unidades inglesas):

$$q = 0,375 Q^{1/2} \quad (4.7)$$

$$B = 7,1 q \quad (4.8)$$

Siendo q el gasto específico.

Hubert H. G. Savenije señala que la fórmula de Lacey ha sido confirmada por muchos autores, pero que no tiene una explicación física. Sin embargo, coincide bastante bien con las mediciones efectuadas. Lacey encontró también una expresión para el tirante hidráulico:

$$y = k_2 Q^{1/3} \quad (4.9)$$

en la que,

$$k_2 = 0,47 f^{-1/3} \quad (4.10)$$

f es un factor sedimentológico ("*silt factor*", ft^2/s) que depende de la granulometría del material del lecho y , por lo tanto, de la rugosidad. Su expresión es:

$$f = K d_{50}^{1/2} \quad (4.11)$$

Los valores usuales del factor de proporcionalidad K están comprendidos entre 1,58 y 1,76. El diámetro medio (d_{50}) de las partículas sólidas está en milímetros.

Para el tirante hidráulico se obtiene la expresión:

$$y = 0,47 Q^{1/3} f^{-1/3} \quad (4.12)$$

Reemplazando el valor de f se llega a:

$$y = 0,395 \frac{Q^{1/3}}{d^{1/6}} \quad (4.13)$$

Obsérvese que el producto de $B \times y$ (ancho por tirante) es igual al área A de la sección transversal y que la relación Q/A es la velocidad media de la sección transversal. Luego,

$$A = 1,26 Q^{5/6} f^{-1/3} \quad (4.14)$$

$$V = 0,8 Q^{1/6} f^{-1/3} \quad (4.15)$$

$$S = 0,000559 Q^{-1/6} f^{5/3} \quad (4.16)$$

En el sistema métrico las ecuaciones de Lacey, anteriormente mencionadas, son:

$$B = 4,83 Q^{1/2} \quad (4.17)$$

$$q = 0,207 Q^{1/2} \quad (4.18)$$

Posteriormente, numerosos investigadores con base en sus trabajos de campo confirmaron, ampliaron ó modificaron las ecuaciones de Lacey. Chitale, Uppal y Sehgal estudiaron el comportamiento de numerosos canales en la India y encontraron que había discrepancias con las ecuaciones de Lacey. Los dos últimos de los nombrados fueron de la opinión que debía seguirse investigando los valores de los coeficientes. En cambio, Chitale pensó que la validez de los coeficientes debía ser regional (ad hoc para cada sistema de canales) y realizó 281 observaciones en diversos canales de la India, entre 1933 y 1963, para caudales comprendidos entre 6 y 14 400 ft³/s y diámetros de las partículas de arena constituyentes de los lechos comprendidos entre 0,021 y 0,425 mm y pendientes entre $0,046 \times 10^{-3}$ y $0,434 \times 10^{-3}$ y obtuvo valores característicos para cada una de las tres zonas en las que trabajó, lo que corresponde al carácter empírico de las fórmulas.

Sir Claude Inglis pensó, al igual que otros investigadores, que las ecuaciones de Lacey no consideraban con suficiente intensidad el aspecto sedimentológico. Casi 30 años después, Blench presentó sus fórmulas para el diseño de canales estables, muy usadas, y que se exponen en el punto siguiente.

4.4 Método de Blench

El doctor Thomas Blench, ingeniero consultor, se graduó en ingeniería civil en la Universidad de Glasgow en 1927, fue director de Investigaciones sobre temas de Irrigación en Punjab, India, hasta 1946, año en que se incorporó a la Universidad de Alberta, Canadá, de la que llegó a ser profesor. Se doctoró en 1959. Realizó notables contribuciones al estudio de los ríos de fondo móvil, como puede comprobarse en los varios libros que escribió, entre ellos, "Mobile-Bed Fluviology" en el que desarrolla el tratamiento de los ríos desde el punto de vista de la Teoría del Régimen. Tenía fama de ser muy pragmático y estar dispuesto a abandonar cualquier consideración teórica, si no correspondía con los hechos observados en la naturaleza.

De los numerosos estudios realizados para dimensionar canales en régimen, merece especial mención el realizado por Blench, que se expone a continuación, en el que consideró el comportamiento de numerosos canales construidos en la India. El objetivo de sus estudios era el de predecir las características que debía tener un canal (ancho, tirante y pendiente) para estar

en régimen. Sus trabajos tuvieron un fundamento teórico, y se basaron fundamentalmente en la observación y mediciones en canales existentes, de modo de obtener criterios de diseño.

4.5 Las observaciones y mediciones

Blench señala claramente, con gran rigor científico, que la validez de sus conclusiones está limitada a las condiciones en las que se realizaron las observaciones y mediciones utilizadas. Es, pues, una teoría inductiva. Blench señala que la expresión “teoría” que él usa debe entenderse como “concepción sistemática o planteamiento de los principios de algo”, o bien como “una explicación basada en la observación y en el razonamiento”, y no como una “especulación” opuesta a la práctica.

La validez del método de Blench está, o debería estar, como él lo señala, restringida a las condiciones prevalecientes en los canales que observó y a las mediciones que utilizó. Pero, Blench sostiene que la validez de sus ecuaciones podría ir un poco más allá y cubrir también el comportamiento de canales con caudales mayores que los estudiados por él. En la práctica se ha visto, como se examina más adelante, que existe la posibilidad de aplicar sus fórmulas a ríos aluviales. Naturalmente que sería necesario realizar las comprobaciones correspondientes.

Blench señala claramente las diferencias obtenidas en las fórmulas provenientes de mediciones en canales reales y las que se basan en mediciones de laboratorio. Estas últimas se realizan en canales con paredes de vidrio, u otro material, lo que no permite reproducir la erosión y deposición de sólidos en las márgenes. A esta dificultad debe añadirse que no es fácil obtener en un canal de laboratorio la misma fase de transporte (rizos, dunas, antidunas) que ocurre en un canal real. El campo de aplicación de las fórmulas de Blench está, estrictamente hablando y de acuerdo a dicho autor, limitado al cumplimiento de las siguientes condiciones:

- a) Debe haber un movimiento permanente, es decir, sin variaciones en el tiempo.
- b) Gasto sólido de fondo permanente y muy pequeño.
- c) Lecho arenoso, móvil, en fase de dunas y tal que la curva granulométrica de la arena tenga una buena distribución.
- d) Gasto sólido en suspensión insignificante, con variaciones estacionales.
- e) Taludes empinados, arcillosos, que se comporten como hidráulicamente lisos, erosionables y capaces de que los eventuales depósitos de sólidos en suspensión se adhieran a ellos.

- f) Lecho horizontal en el sentido transversal.
- g) Sección transversal y pendiente longitudinal uniformes.
- h) Viscosidad constante.
- i) Valores hidráulicos dentro de los siguientes rangos:
- Diámetros de las partículas constituyentes del lecho 0,1 < d < 0,6 mm
 - Concentración de sólidos de fondo (en partes en peso por 100 000) 0 < c < 3
 - Concentración de sólidos en suspensión 0 < c < 1%
 - Temperatura del agua 50 < T < 86 °F
(10 °C) (30 °C)
 - Relación ancho tirante (considérese, B y = A) 4 < B / y < 30
 - Valores de V^2/y (en ft/s²) 0,5 < V² / y < 1,5
 - Valores de VB/v $10^6 < \frac{VB}{v} < 10^8$
 - Caudal (ft³/s) 1 < Q < 10 000
(0,028 m³/s) (283 m³/s)

A las que debe añadirse que no haya formación de meandros.

4.6 Las ecuaciones de Blench

El método de Blench parte de tres ecuaciones fundamentales.

La primera de ellas corresponde al **Factor Sedimentológico de Fondo (F_b)** que depende de la naturaleza del lecho, específicamente del tamaño de las partículas sólidas. El subíndice b corresponde a la inicial de la palabra "bed", que en inglés significa lecho o fondo. Sus dimensiones son L T⁻². Su definición es:

$$F_b = \frac{V^2}{y} \quad (4.19)$$

La velocidad está en ft/s, el tirante (en realidad es el tirante hidráulico) en ft y F_b en ft/s^2 . Si se divide ambos miembros de la ecuación 4.19 por la aceleración de la gravedad se obtiene el Número de Froude:

$$\frac{F_b}{g} \equiv \frac{V^2}{gy} \quad \mathbb{F}^2 \quad (4.20)$$

Blench comenta que los cursos de agua, de iguales características, con flujo a dos fases, y con igual intensidad de transporte sólido tienden a adquirir el mismo Número de Froude.

El método de Blench se aplica para valores de F_b comprendidos entre 0,5 y 1,5 ft/s^2 . El valor más común es 1 ft/s^2 . Los valores de F_b dependen de la granulometría. Para los canales investigados no tienen un rango de variación muy amplio. Si observamos y medimos las características de un canal en régimen que cumpliera las condiciones antes señaladas, se podría averiguar el valor de F_b . Repitiendo esta operación nos acostumbraríamos a estimar el valor de F_b . Como una guía para la determinación de F_b se puede aplicar, cuando el gasto sólido sea despreciable, la siguiente expresión:

$$F_b = 1,9 d^{1/2} \quad (4.21)$$

En la cual el diámetro de las partículas es el d_{50} y está en mm. F_b se conserva en ft/s^2 . Nótese que la expresión dada por Blench para F_b es similar al factor sedimentológico f ("*silt factor*") utilizado anteriormente por Lacey.

Si el gasto sólido fuese significativo se podría aplicar:

$$F_b = 1,9 d^{1/2} (1 + 0,12 c) \quad (4.22)$$

en donde c es la concentración de sólidos de fondo en partes en peso por 100 000.

La segunda ecuación fundamental de Blench se refiere al **Factor Sedimentológico Lateral (F_s)**, cuyo valor depende de la erosionabilidad de las márgenes (taludes), de la viscosidad del agua y de la tendencia del material sólido a depositar en las márgenes. El subíndice s viene de "*side*", que en inglés significa lado. F_s se define así:

$$F_s = \frac{V^3}{B} \quad (4.23)$$

B es el ancho del canal, en ft. Las dimensiones de F_s son L^2T^{-3} y sus unidades son ft^2/s^3 . Los valores usuales recomendados por Blench para F_s dependen del material constitutivo de las márgenes y son:

Bancos arenosos fácilmente erosionables (material poco cohesivo)	0,1 ft ² /s ³
Material formado por materiales medianamente cohesivos	0,2 ft ² /s ³
Material muy cohesivo (arcilla)	0,3 ft ² /s ³

No se tiene una definición ni una cuantificación muy precisa de los alcances de las descripciones arriba señaladas, lo que, ciertamente, disminuye la confiabilidad del método.

La tercera ecuación fundamental de Blench es la siguiente:

$$\frac{V_2}{g y S} = 3,63 \left(\frac{VB}{v} \right)^{1/4} \left(1 + \frac{c}{2330} \right) \quad (4.24)$$

Cuando el gasto sólido es despreciable, $c = 0$.

Obsérvese que se trata de una generalización de la ecuación de Blasius para tuberías lisas. A partir de las ecuaciones 4.19 y 4.23 se obtienen los valores del ancho y del tirante:

$$B = \sqrt{\frac{F_b}{F_s}} Q^{1/2} \quad (4.25)$$

La ecuación 4.25 expresa que el ancho es proporcional a la raíz cuadrada del caudal, que es lo mismo que dice la ecuación de Lacey. En la fórmula de Blench el coeficiente k_1 (ec. 4.5) está más elaborado y es función de los dos factores sedimentológicos que usa.

El tirante hidráulico es:

$$y = 3 \sqrt{\frac{F_s}{F_b^2}} Q^{1/3} \quad (4.26)$$

Determinados los valores de F_b y F_s resulta que el ancho es proporcional a la potencia un medio del caudal, y el tirante es proporcional a la potencia un tercio del caudal.

Para la pendiente la Teoría del Régimen llega a la siguiente expresión:

$$S = \frac{F_b^{5/6} F_s^{1/12}}{K Q^{1/6}} \quad (4.27)$$

En consecuencia, para un canal determinado la pendiente es inversamente proporcional a la potencia un sexto del caudal. Por simplicidad se denomina K a la expresión:

$$K = \frac{3,63 \text{ g}}{v^{14}} \quad (4.28)$$

En el sistema inglés el valor de K está usualmente alrededor de 2000.

De las ecuaciones de Blench se obtiene también:

$$V = (F_b F_s Q)^{1/6} \quad (4.29)$$

$$y = \left(\frac{q^2}{F_b} \right)^{1/3} \quad (4.30)$$

$$S = F_b \frac{(v F_s)^{14}}{3,63 g V} \quad (4.31)$$

En el sistema métrico las ecuaciones de Blench son:

Factor Sedimentológico de Fondo (F_b)

$$F_b = 3,28 \frac{V^2}{y} \quad (4.32)$$

Factor Sedimentológico Lateral (F_s)

$$F_s = 10,76 \frac{V^3}{B} \quad (4.33)$$

4.7 Transformación de las ecuaciones de Blench

Farraday y Charlton transformaron las ecuaciones de Blench, adaptaron sus unidades y las presentaron de un modo que permite calcular directamente el ancho, el tirante y la pendiente de un canal “en régimen”. Como se trata en realidad de las mismas ecuaciones, sus limitaciones y alcances son idénticos a las ecuaciones originales de Blench. Ellas son:

$$B = 14 Q^{0,5} d_{50}^{0,25} F_s^{-0,5} \quad (4.34)$$

$$y = 0,38 q^{0,67} d_{50}^{-0,17} \quad (4.35)$$

$$S = \frac{F_b^{5/6} F_s^{1/12}}{3,28 K Q \left(1 + \frac{c}{2330}\right)} \quad (4.36)$$

Q en m³/s, d en m, F_s en sus valores originales que aparecen después de la ec. 4-23, q en m³/s/m, B e y en metros.

4.8 Fórmulas de Kellerhals

Para canales con fondo de grava Kellerhals desarrolló, en el sistema métrico, las siguientes ecuaciones:

$$B = 3,26 Q^{0,5} \quad (4.37)$$

$$y = 0,47 q^{0,8} d_{90}^{-0,12} \quad (4.38)$$

d₉₀ significa que el 90% de las partículas del lecho tiene un diámetro menor.

4.9 Grados de libertad

Los ríos aluviales tienen un lecho constituido por material no cohesivo que puede ser transportado por la corriente cuando se presentan determinados caudales (Capítulo 11). Como consecuencia de diversos factores y circunstancias, inherentes a su naturaleza, los ríos aluviales tienen una tendencia natural al cambio y a la inestabilidad, la que a menudo se ve agravada por diversos factores. Uno de los más frecuentes se origina, como se ha expuesto en capítulos anteriores, en las acciones humanas.

Los cambios que experimentan los ríos se manifiestan con intensidad variable; es decir, a veces son muy pequeños y, otras, muy severos. Pueden estar constituidos, por ejemplo, por una pequeña profundización del lecho, o por un desplazamiento lateral de varios cientos de metros. Las alteraciones fluviales, independientemente de su intensidad, suelen desarrollarse con velocidad variable. Los cambios rápidos podrían realizarse en horas, días o semanas; los cambios lentos podrían desarrollarse a lo largo de siglos. Por eso a estos últimos a veces se les llama seculares. Como puede comprenderse fácilmente hay un gran número de posibilidades intermedias para el tiempo que toma el

desarrollo de los cambios que experimentan los ríos. Así por ejemplo, el río Tumbes tuvo durante cada uno de los dos últimos Megañños de 1982-83 y 1997-98 un desplazamiento lateral de varios cientos de metros en su cauce bajo. El río Piura sufrió profundizaciones de cauce de varios metros. Ambas alteraciones se produjeron en semanas o pocos meses. En cambio, algunos meandros de los ríos de la selva pueden tardar siglos en desarrollarse.

Un río que corre sobre un material aluvial tiene la posibilidad de adquirir su propio ancho, su propio tirante, su propia pendiente y el número de brazos que corresponda a las condiciones externas existentes. Eventualmente, en lugar de formar varios brazos, el río puede desarrollar meandros. Blench, en su famoso libro "Mobile-Bed Fluviology", considera que un río tiene diferentes "grados de autoajuste", llamados también "grados de libertad". Para ilustrar este punto Blench señala las posibilidades que se expone a continuación.

La primera posibilidad corresponde a un canal muy largo, de contorno rígido (paredes y fondo), con un coeficiente de resistencia (rugosidad) y una pendiente determinados. Entonces, para cada valor del caudal habrá un valor del tirante. Prácticamente, no hay desplazamientos laterales. Dicho en otras palabras, al variar el caudal sólo puede variar el tirante. Esta variación se expresa con una de las conocidas fórmulas de la Hidráulica de Canales, como podría ser la de Chezy o la de Manning. En estas condiciones se dice que el sistema (es decir, el canal) tiene un (1) "grado de autoajuste" o un "grado de libertad" (Figura N° 4.1). La situación acá descrita podría darse también si en lugar de un canal se tratase de un río confinado de fondo rígido. Un río confinado de fondo rígido (acorazado para un cierto caudal) tiene contornos invariables. Lo único que puede cambiar es el tirante: subir o bajar, según el caudal. Algunos autores hablan de una "estabilidad estática". Maza dice que "Los movimientos o corrimientos laterales de un río con estabilidad estática son menos apreciables, aunque no por ello dejan de existir".



Figura N° 4.1 Curso de agua de un (1) grado de libertad.

La segunda posibilidad corresponde a un canal similar al anterior, en lo que respecta a sus paredes, pero cuyo fondo esté constituido por un material granular que ante la aparición de determinados caudales pueda ser puesto en movimiento por la corriente. Es decir, que se trata de lo que en Hidráulica Fluvial se conoce como un curso de agua con fondo móvil. Al presentarse un cierto caudal, acompañado del correspondiente caudal sólido, la resistencia del

lecho será variable, puesto que pueden desarrollarse diversas formas del fondo como rizos, dunas o antidunas y, eventualmente, con mayores velocidades podría aparecer un fondo plano. La vinculación entre el caudal y el tirante no puede ya establecerse con una sola fórmula como la de Manning o la de Chezy, sino que debe tenerse en cuenta las leyes propias del flujo a dos fases (sólida y líquida). En estas condiciones la corriente adquiere su propia pendiente y su propio tirante y entonces se dice que el sistema (es decir, el canal, o el río si fuese el caso) tiene dos “grados de autoajuste” o dos “grados de libertad” (Figura N° 4.2). Algunos autores hablan de una “estabilidad dinámica”. La situación acá descrita podría darse también si en lugar de un canal se tratase de un río confinado de fondo móvil. Un río confinado está limitado en sus desplazamientos laterales por la presencia de condiciones naturales (cerros) o condiciones impuestas (encauzamiento), pero no lo está necesariamente en lo que respecta al fondo.

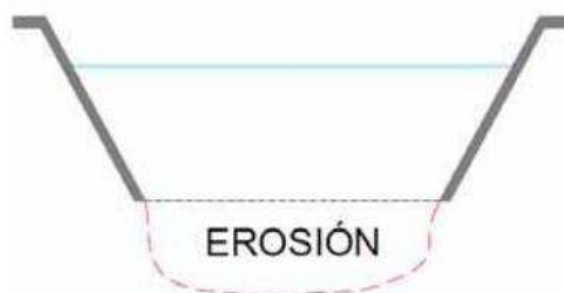


Figura N° 4.2 Río (canal) de dos grados de libertad.

La tercera posibilidad corresponde a un canal, en realidad sería un río, en el que las paredes no fueran rígidas, sino erosionables, al igual que el lecho. Ahora, dice Blench, interviene un nuevo elemento y una nueva ley de comportamiento que es la que vincula la mayor o menor erosionabilidad de las márgenes y la capacidad de ataque de la corriente sobre ellas. Como consecuencia de lo que resulte, el río puede adquirir su propio ancho, además de lo señalado en la posibilidad anterior. En estas condiciones se dice que el sistema, es decir, el río, tiene tres “grados de autoajuste” o tres “grados de libertad” (Figura N° 4.3). La situación acá descrita corresponde a un río aluvial con capacidad de desarrollarse libremente. Todo esto se expresa también diciendo que un río puede erosionar su lecho (profundizándolo) y lateralmente puede variar (aumentar o disminuir) su ancho.

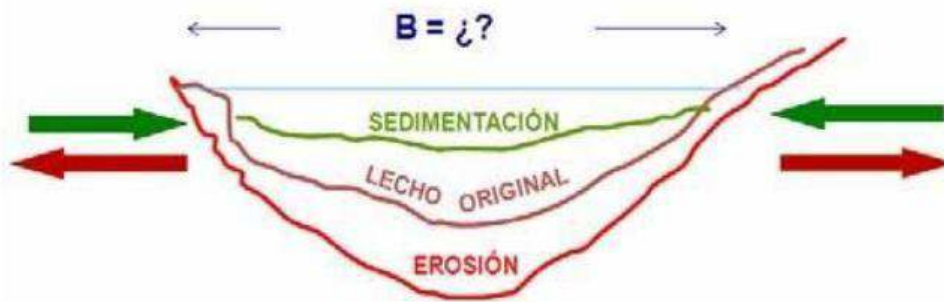


Figura N° 4.3 Río de tres grados de libertad.

Existe una cuarta posibilidad que consiste en que el río no pueda conservar sus características de alineamiento o su álveo. Podrían entonces formarse meandros, o bien aparecer los brazos propios de un río entrelazado o de un abanico fluvial. En estas condiciones se dice que el sistema, es decir, el río, tiene cuatro “grados de autoajuste” o cuatro “grados de libertad” (Figura N° 4.4). Como consecuencia de lo anterior resulta claro que un sistema de defensas, o uno de encauzamiento, busca restringir los grados de libertad de un río. También es posible aceptar el desarrollo del cuarto grado de libertad y estabilizar el sistema fluvial resultante.

Para un mejor conocimiento del ancho fluvial en relación a las obras de ingeniería es necesario conocer algunos conceptos sobre cauces, riberas y fajas marginales, que se presentan en el capítulo siguiente.

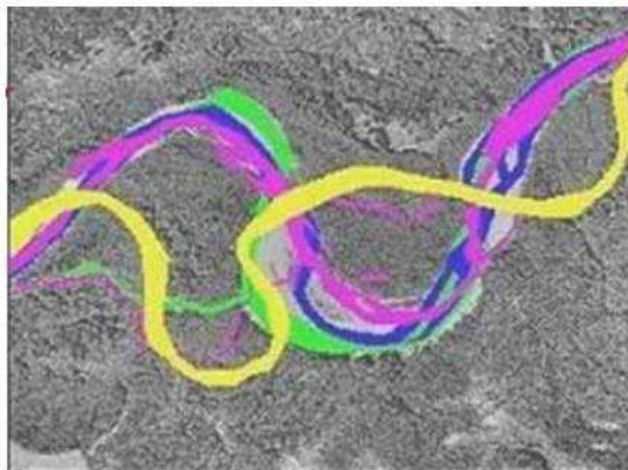


Figura N° 4.4 Río de cuatro grados de libertad.

Referencias

1. BLENCH T. **Mobile Bed Hydraulics**. I. A. H. R. Journal of Hydraulic Research, Volume 8-1970- N° 2.
2. BLENCH T. **Quantitative Interrelation of Erosion and River Regime by Regime Theory Methods** Universidad de Alberta, Canadá.
3. BLENCH T. **Mobile-bed Fluviology**. Universidad de Alberta, Canadá, 1966.
4. ELOUBAIDY, A. F., MOHAMMED T. A. y otros. **Regimen Hydraulic Concepts and Equations: The Case of Klang River, Malaysia**. Universiti Putra Malaysia Press, Pertanika J. Sci. & Technol 7(1), 1999.
5. FARRADAY R. V. y CHARLTON F. G. **Hydraulic factors in bridge design**. Hydraulics Research Wallingford, Oxfordshire, 1983.
6. KENNEDY R. G. **The Prevention of Silting in Irrigation Canals**. Proceedings, Institute of Civil Engineers, Vol. 119, London, 1895.
7. LACEY Gerald. **Sediment as a factor in the Design of Unlined Irrigation Canals**. International Commission on Irrigation and Drainage. Sixth Congress.
8. LELIAVSKY Serge. **Introducción a la Hidráulica Fluvial**. Ediciones Omega S.A. Barcelona, 1964.
9. PUJOL Alfonso y PATERSON Agnès. **Conceptual Problems in the Study of Regimen Channels in Fluvial Hydraulics**. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.
10. ROCHA FELICES Arturo. **Introducción a la Hidráulica Fluvial**. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1998.
11. SAVENIJE Hubert H. G. **The width of a bankfull channel; Lacey's formula explained**. Delft University of Technology, 2003.
12. SIMONS Daryl y MILLER Carl R. **Sediment Discharge in Irrigation Canals**. International Commission on Irrigation and Drainage. Sixth Congress.
13. SINGH Bharat. **Some implications of Regimen Design of Channels**. International Commission on Irrigation and Drainage. Sixth Congress.
14. UPPAL H. L. y SEHGAL S.R. **Regime Relationships as applied to Channels of the Upper Bari Doab Canal System**. International Commission on Irrigation and Drainage. Sixth Congress.

CAPÍTULO 5

CAUCES, RIBERAS Y FAJAS MARGINALES

5.1 Introducción

Por lo general muchos cursos de agua no tienen un ancho constante y definido, sino que éste varía en función de los caudales que se presentan, así como de otros factores, tal como se ha expuesto en los Capítulos 2 y 4. Esta variación propia de los ríos aluviales es particularmente intensa en los ríos jóvenes, los que tienen una mayor tendencia a cambiar, no sólo su ancho, sino su sección transversal y su recorrido.

La variabilidad de los ríos aluviales influye negativamente en el comportamiento de las obras de ingeniería, viales o no, ubicadas en las inmediaciones de esos ríos por lo que ella debe considerarse cuidadosamente, especialmente frente a la posibilidad de grandes avenidas, que es cuando se exacerban dichos cambios. El conocimiento de los conceptos de cauces, riberas y fajas marginales permite evitar o disminuir el impacto de las obras de ingeniería en general y de las viales en particular sobre los cursos de agua y de estos sobre ellas.

¿Cómo saber cuál es el ancho que va a tener un río cuando se presente una determinada avenida? Resolver esa cuestión es tarea de la Hidráulica Fluvial. Pero, hay una dificultad mayor involucrada en ella: ¿Cuán grandes pueden ser las avenidas que se presenten alguna vez? Y, de las avenidas que puedan ocurrir, cuál o cuáles escogeremos para nuestros diseños. A las dificultades anteriores se añade el hecho de que el transporte de sólidos, muy variable, también contribuye a que el concepto de ancho fluvial de los ríos aluviales se vuelva indefinido y difícil de precisar.

Cuando se presentan las avenidas, el río aluvial (también llamado de ancho indefinido, por oposición a los ríos confinados) desarrolla la tendencia antes señalada de adquirir su propio ancho y ocupa (inunda) las áreas vecinas, que muchas veces le pertenecen porque son, o fueron alguna vez, parte del cauce fluvial. Otras veces son las obras de ingeniería las que invaden el cauce (potencial) de un río y entonces se presentan graves daños.

En el manejo de los ríos es necesario aceptar que puede presentarse una avenida mayor que la esperada y como consecuencia el río adquirirá transitoria y temporalmente un ancho mayor. De acá la necesidad de considerar adecuadamente los conceptos de cauce fluvial, riberas y fajas marginales, no sólo desde el punto de vista de la planificación de las obras ubicadas en las inmediaciones de un río, sino como una información valiosa e indispensable para el manejo de las avenidas y el uso de las planicies de inundación. Como

no es fácil definir el ancho de un río, su inadecuada consideración y la de su área de influencia trae numerosos daños a las obras ubicadas cerca de ellos. Es causa importante de las fallas en las obras viales.

Los términos cauces, riberas y fajas marginales, antes mencionados, están definidos en la Ley y a ella nos referiremos a continuación. La Ley N° 29338 llamada de Recursos Hídricos fue promulgada el 30 de marzo del 2009 y un año después, el 23 de marzo del 2010, se expidió su Reglamento, cuyo Capítulo III trata de los Cauces, Riberas y Fajas Marginales, el que se incluye como Anexo 5-A de este Capítulo. El conocimiento del significado e implicancias de los términos que dan título al Capítulo III del Reglamento de la Ley, y de otros relacionados, es sumamente importante en el planeamiento y diseño de las obras, viales o no, ubicadas en las inmediaciones de los cauces o sobre ellos. Estos conceptos ya estaban considerados en la antigua Ley General de Aguas de 1969 y en sus reglamentos.

Los tres conceptos mencionados son importantes para el manejo fluvial en general y, en particular, cuando se trata de obras ubicadas en las inmediaciones de los cauces o sobre ellos. Para comprenderlos debidamente es indispensable partir del concepto de Dominio Público Hidráulico.

5.2 Dominio Público Hidráulico

Cuando un Estado se constituye como tal proclama para sí la propiedad de los recursos naturales de su territorio. Eso es lo que ocurre con el agua en sus diversas manifestaciones. La Ley de Recursos Hídricos señala (Art. 5°) que los bienes de Dominio Público Hidráulico (agua, en cualquier forma), que son materia de regulación por ella, son los siguientes:

- i. La de los ríos y sus afluentes, desde su origen natural;
- ii. La que discurre por cauces artificiales;
- iii. La acumulada en forma natural o artificial;
- iv. La que se encuentra en las ensenadas y esteros;
- v. La que se encuentra en los humedales y manglares;
- vi. La que se encuentra en los manantiales;
- vii. La de los nevados y glaciares;
- viii. La residual;
- ix. La subterránea;
- x. La de origen minero medicinal;
- xi. La geotermal;
- xii. La atmosférica; y
- xiii. La proveniente de la desalación.

A los que debe añadirse los Bienes Naturales Asociados al Agua (Art. 6°) que son:

- a) La extensión comprendida entre la baja y la alta marea, más una franja paralela a la línea de la alta marea en la extensión que determine la autoridad competente;
- b) Los cauces o álveos, lechos y riberas de los cuerpos de agua, incluyendo las playas, barriales, restingas y bajiales, en el caso de la amazonía, así como la vegetación de protección;
- c) Los materiales que acarrea y deposita el agua en los cauces;
- d) Las áreas ocupadas por los nevados y los glaciares;
- e) Los estratos o depósitos por donde corre o se encuentra el agua subterránea;
- f) Las islas existentes y las que se formen en los mares, lagos, lagunas o esteros o en los ríos, siempre que no procedan de una bifurcación del curso del agua al cruzar las tierras de particulares;
- g) Los terrenos ganados por causas naturales o por obras artificiales al mar, a los ríos, lagos, lagunas y otros cursos o embalses de agua;
- h) La vegetación ribereña y de las cabeceras de cuenca;
- i) Las fajas marginales a que se refiere esta Ley; y
- j) Otros que señale la Ley.

De lo anteriormente expuesto resulta claro que para el planeamiento y diseño de las obras de ingeniería ubicadas en las proximidades de los ríos es necesario conocer cuáles son los bienes que constituyen el Dominio Público Hidráulico y los respectivos Bienes Naturales Asociados al Agua. Dichos bienes están constituidos por aquello que no es, ni puede ser, propiedad privada.

Es indudable que la aplicación de estos criterios presenta dificultades prácticas muy grandes. Sin embargo, ellos no pueden dejar de considerarse en el planeamiento y diseño de las obras ubicadas en las proximidades de un río. Existen numerosas obras, no sólo viales, que se construyeron literalmente dentro del cauce o en las riberas, con consecuencias desastrosas. Este asunto es tan importante que la Ley, a través de su Reglamento, limita los desarrollos y ocupaciones de los cauces, aun más allá de las riberas y obliga a respetar las fajas marginales.

5.3 Cauces

Conviene recordar, a partir de la normatividad vigente y del DRAE (Diccionario de la Real Academia Española), algunas definiciones fundamentales para el mejor conocimiento de los ríos. Madre es el terreno por donde corren las aguas de un río o arroyo. Es el “cauce por donde ordinariamente corren las aguas de un río o arroyo”, según la definición del DRAE. De acá viene la expresión “salirse de madre”, que significa salirse del cauce, “desbordarse un río”, lo que ocurre muchas veces. Coloquialmente, “salirse de madre” significa pasarse una persona o una cosa de los límites considerados razonables o normales.

Madre es también la “Acequia principal de la que parten o donde desaguan las hijuelas” (DRAE). En los sistemas de irrigación se usa mucho la expresión Canal Madre. El término hijuelas, extraño entre nosotros, se refiere a “cada uno de los canales o regueros pequeños que conducen el agua desde una acequia al campo que se ha de regar, y escurren el sobrante a otros canales de evacuación.” (DRAE).

El Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos define el álveo o cauce como “El continente de las aguas durante sus máximas crecientes.” (Art. 108°). Sin embargo, el Reglamento no precisa qué debe entenderse por “máximas crecientes”, lo que sí ocurre, en alguna medida, en las legislaciones de otros países. Este es un problema difícil, que debemos tener presente, y al que no puede dársele una solución general, pero que tampoco debe ignorarse.

El cauce pertenece al río. El cauce es un bien natural asociado al agua y forma parte del Dominio Público Hidráulico. En consecuencia, es la Autoridad la que debe fijar en cada río, en cada tramo de él si fuese necesario, cuales son las “máximas crecientes” que determinarán el ancho del cauce. Es significativo que el Reglamento use el plural: “máximas crecientes”. Es decir, que implícitamente se está refiriendo a los periodos de retorno, a crecientes, no necesariamente iguales, que aparecen cada cierto tiempo.

A lo anterior podría añadirse, aunque no lo señala el Reglamento, que en los embalses el cauce es el terreno cubierto por sus aguas cuando éstas alcanzan su mayor nivel. Naturalmente, que este “mayor nivel” queda definido por las características del embalse. Podría ser el nivel correspondiente a la descarga del aliviadero durante la Avenida de Diseño o, en algún caso, el de la cresta de la presa (que sería el máximo físicamente posible).

Evidentemente que el ancho del cauce puede fijarse de varios modos, según las características de cada río y de la información disponible. El problema tiene que resolverse en cada río (en realidad, en cada tramo fluvial) y para cada circunstancia. Podría adoptarse un determinado periodo de retorno y hallar el caudal correspondiente a partir del cual se determinará el ancho fluvial. Otra posibilidad es realizar el examen del lugar e identificar hidráulicamente el cauce

que alguna vez ha ocupado el río. Para esto es muy útil el testimonio de los habitantes del lugar y las huellas dejadas por las “máximas crecientes”. Recordemos que lo que alguna vez sucedió en la Naturaleza volverá a suceder. La realidad física, topográfica y geológica, entre otras consideraciones, pueden ser determinantes (morfología fluvial, estabilidad de taludes, etc.). En cada río, de un modo u otro, debe fijarse en cada tramo el ancho del río correspondiente a la definición de cauce. Domina, pues, el concepto de lo que podríamos llamar el área de influencia del río. En muchas partes del mundo se usa el concepto de *plenissimum flumen*, con el que se designa “las más altas aguas en su estado normal”.

Pero, en las zonas áridas y semiáridas los cauces no siempre están ocupados por el agua. De acá la necesidad de examinar los llamados “cauces secos” y los “cauces inactivos”.

5.3.1 Los “cauces secos”

Los llamados “ríos secos” y las “quebradas secas”, a los que podría llamarse genéricamente “cauces secos”, son muy comunes en el Perú, pues se originan como consecuencia del régimen irregular de lluvias que hay en muchos lugares de nuestro país. Estos ríos y quebradas pueden no presentar descargas durante décadas, de allí la denominación (engañosa) de “secos”, pero en determinadas circunstancias ocurren descargas fuertes y de corta duración. También se les da el nombre de “ríos locos”, pues a la irregularidad de sus descargas suele añadirse la inestabilidad (divagación) de su cauce.

Cuando determinados cauces permanecen secos durante muchos años puede ocurrir que como consecuencia del transporte de las arenas eólicas, o por cualquier otra circunstancia, el cauce quede cubierto y cuando en un momento dado se presente una crecida, el río creará otro cauce. Ver Figura N° 7.5 del Capítulo 7. Los cauces secos son verdaderos paleocauces (cauces antiguos) que interesan mucho a los arqueólogos y que deben preocupar a los ingenieros. Debe tenerse en cuenta que dichos cauces siguen siendo potencialmente cauces fluviales y que, como ha ocurrido muchas veces, en un momento dado se activarán nuevamente. A los cauces de descargas eventuales algunos autores, como Martín-Vide, los llaman “ríos efímeros, por oposición a los ríos perennes”. Son característicos de las zonas áridas y semiáridas y muy frecuentes en el Perú. Se comprende fácilmente que estos cauces “secos” pueden dar lugar a un ancho que es difícil de calcular y de prever.

A veces ocurre que al activarse los cauces “secos” se manifiestan como un abanico fluvial. Las ocupaciones urbanas, agrícolas o de cualquier otro tipo, de uno o más de los brazos constituyentes del abanico, disminuyen notablemente la capacidad de conducción del sistema. Muchas veces sucede que son las obras viales las que ocupan estos brazos y los reducen a una o más

alcantarillas. En consecuencia, la formación de los abanicos obliga a pensar y establecer muy bien cuál es el ancho fluvial que debe considerarse.

Hay otros cauces que están secos la mayor parte del año y la población los usa para instalarse, sembrar o para botar basura y desmante, con consecuencias desastrosas para el normal escurrimiento en los días de descargas o de avenidas.

5.3.2 Cauces inactivos

El Reglamento menciona los cauces que han quedado inactivos (es decir, que no tienen descargas) “por variación del curso de las aguas” y añade que “continúan siendo de dominio del Estado, y no podrán ser usados para fines de asentamientos humanos o agrícolas.” (Art. 109°).

La situación descrita en el Reglamento con respecto a los cauces inactivos es relativamente frecuente en el Perú. Se trata de un concepto más amplio que es el de los paleocauces (cauces antiguos). Evidentemente, que la “variación del curso de las aguas” puede deberse a condiciones naturales o haber sido inducidas por la acción humana (causas antrópicas).

Con respecto a la ocupación de los cauces inactivos el Reglamento sólo se refiere a dos prohibiciones (asentamientos humanos y agrícolas). Sin embargo, debe evitarse la construcción de obras de ingeniería en cauces inactivos o en sus inmediaciones. Si su utilización fuese indispensable debería examinarse y preverse cuidadosamente la posibilidad real de que dichos cauces se activen, es decir que se conviertan nuevamente en ríos, lo que ha ocurrido numerosas veces en nuestro país.

Pasar por alto la existencia de cauces inactivos o secos tendría graves consecuencias para la estabilidad de las obras construidas en su lecho o en sus inmediaciones.

5.4 Riberas

Las riberas, al igual que los cauces, son Bienes Naturales Asociados al Agua y están definidas en el “Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos”, el que señala que son: “Las áreas de los ríos, arroyos, torrentes, lagos, lagunas, comprendidas entre el nivel mínimo de sus aguas y el que éste alcance en sus mayores avenidas o crecientes ordinarias.” (Art. 111°). El Reglamento no precisa o define qué debe entenderse por “mayores avenidas” o por “crecientes ordinarias”, lo que, como se señaló antes, sí ocurre en las legislaciones de algunos países. Sin embargo, el Reglamento da algunos criterios para delimitar las riberas (Art. 112°). Ellos son:

- a) “Nivel medio de las aguas, tomando para tal efecto periodos máximos de información disponible”.
- b) “Promedio de máximas avenidas o crecientes ordinarias que se determina considerando todas las alturas de aguas que sobrepasen el nivel medio señalado en el literal anterior”.

5.5 Fajas Marginales

En el Perú los conceptos referidos a las fajas marginales están definidos en el “Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos” y en el “Reglamento para la Delimitación y Mantenimiento de Fajas Marginales en Cursos Fluviales y Cuerpos de Agua Naturales y Artificiales”, aprobado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y que se incluye como Anexo 5-B de este capítulo.

5.5.1 Definición

El Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos establece que las fajas marginales “Son bienes de dominio público hidráulico” y que ellas “Están conformadas por las áreas inmediatas superiores a las riberas de las fuentes de agua, naturales o artificiales.” (Art. 113.1°). Y añade que sus “dimensiones en una o ambas márgenes de un cuerpo de agua son fijadas por la Autoridad Administrativa del Agua, de acuerdo con los criterios establecidos en el Reglamento, respetando los usos y costumbres establecidos” (Art. 113.2°). Este concepto se aplica tanto en las áreas rurales como en las urbanas.

Los cauces artificiales (canales) también deben tener las respectivas fajas marginales, las que se definirán en los estudios de las obras de infraestructura hidráulica mayor y serán habilitadas en la etapa constructiva del proyecto (Art. 116°).

En algún momento (de baja probabilidad de ocurrencia) las fajas marginales se convertirán transitoriamente en cauce fluvial. De acá que la Autoridad debe delimitarlas oportunamente y señalar cuáles son las restricciones para su uso. Hay determinadas actividades que están prohibidas en ellas, como se señala más adelante. Esto debe tenerse en cuenta por los proyectistas de obras civiles.

En lo que respecta a los programas de mantenimiento de las fajas marginales el Reglamento de la Ley señala en su artículo 118° que “La Autoridad Administrativa del Agua, en coordinación con el Ministerio de Agricultura, gobiernos regionales, gobiernos locales y organizaciones de usuarios de agua promoverá el desarrollo de programas y proyectos de forestación en las fajas marginales para su protección de la acción erosiva de las aguas”.

Los proyectos de forestación no sólo ayudan a la protección de las márgenes, sino que contribuyen a que éstas no tengan usos prohibidos o inconvenientes. Sin embargo, resulta claro que es difícil ponerse de acuerdo entre varias organizaciones.

En numerosos lugares del país hay preocupación por lo que ocurre con las áreas próximas a los ríos. Así, en mayo 2010 se realizó el “Encuentro entre Comunidades Campesinas, Comités de Riego y Juntas Administradoras de Servicios de Saneamiento de la subcuenca Huatanay (Cusco)” y una de sus conclusiones fue la de conformar un Consejo Multisectorial para afianzar la protección de las fajas marginales del río Huatanay. Se informó acerca de la “Invasión no planificada del territorio en la que las poblaciones se instalaron en zonas cercanas a las riberas del río invadiendo la faja marginal y en muchos casos angostando el cauce del río lo que originó la variación del régimen hídrico y de las zonas naturales de inundación.”

La Municipalidad de Andahuaylas procedió a demoler una construcción clandestina en el sector de Ccehuarpampa, en el límite con Talavera. Estuvieron presentes las autoridades y vecinos de la localidad a fin de verificar la transparencia del acto procesal. El alcalde manifestó que “Es preciso que se tomen estas actitudes que tienden a poner orden en las construcciones, especialmente en las fajas marginales, para evitar que en tiempo de lluvias pueda desbordarse el río, en perjuicio de la población.”

El Gobierno Regional de Ancash anunció que detendrá construcciones ilegales en las fajas marginales de los ríos y que emitirá directivas porque estos actos constituyen infracciones que contravienen la normatividad correspondiente. Las autoridades verificaron la construcción de viviendas y centros recreacionales en el mismo lecho del río y en plena faja marginal del río Casca y muy cerca a la carretera Huaraz–Caraz y señalaron que estos hechos constituyen infracciones que contravienen la Ley N° 29338 de Recursos Hídricos, asimismo se convierten en un alto riesgo en el tema de Defensa Civil, sobre todo en crecidas del río.

En Arequipa se planteó la elaboración de un convenio Interinstitucional entre la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y Municipalidades de Arequipa para delimitar cauces y fajas marginales de ríos y quebradas secas (torrenteras).

La Autoridad Nacional del Agua (ANA), el Gobierno Regional de La Libertad y el Proyecto Especial CHAVIMOCHIC firmaron un convenio de cooperación interinstitucional para elaborar un estudio técnico que sustente la delimitación de las fajas marginales de los ríos Moche, Virú, Chorobal y Huamanzaña. Señalaron que “se busca asegurar que las áreas ribereñas no sean invadidas, ya que se trata de zonas intangibles, donde nadie puede construir ni sembrar ni utilizarlas para algún servicio”, dijo el presidente regional de La Libertad. “La ANA se encargará de los estudios que determinarán los caudales máximos

para la delimitación de las fajas marginales y realizará la simulación hidráulica. Asimismo, elaborará la propuesta de delimitación de las fajas marginales en tramos priorizados por el proyecto CHAVIMOCHIC y aprobará dicha delimitación.”

En abril de 2011 se realizó en Lima el Foro “Problemas en el Manejo de Ríos en Áreas Urbanas”, organizado por el Capítulo de Ingeniería Civil del Consejo Departamental de Lima del Colegio de Ingenieros del Perú. Sus Conclusiones y Recomendaciones se pueden ver en el Anexo 5-C de este Capítulo.

5.5.2 Delimitación

El Reglamento da varios criterios para la delimitación, en cada caso, de las fajas marginales. Entre ellos están:

- a) “La magnitud e importancia de las estructuras hidráulicas de las presas, reservorios, embalses, canales de derivación, entre otros.
- b) El espacio necesario para la construcción, conservación y protección de las defensas ribereñas y de los cauces.
- c) El espacio necesario para los usos públicos que se requieran.
- d) La máxima crecida o avenida de los ríos, lagos, lagunas y otras fuentes naturales de agua. No se considerarán las máximas crecidas registradas por causas de eventos excepcionales”.

El literal c) podría incluir evidentemente las obras de ingeniería. Llama la atención lo señalado en el literal d): ¿Qué es máxima crecida?, ¿Qué es máxima avenida? ¿Qué son eventos excepcionales? ¿Qué es una máxima crecida que no corresponda a un evento excepcional? En lo que respecta a los ríos cabe la pregunta siguiente: ¿Hasta dónde se extiende el Dominio Público?

La ley española hace algunas precisiones importantes; así, Carlos Villarroya Aldea, Jefe de Área del Dominio Público Hidráulico de la Dirección General del Agua, señala que: “De acuerdo con el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, el caudal teórico de la máxima crecida ordinaria se define como el valor medio de los máximos caudales anuales en su régimen natural, observados en diez años consecutivos, que sean representativos del comportamiento hidráulico”.

5.5.3 Prohibiciones

Hay determinadas actividades que están prohibidas en las fajas marginales. No pueden usarse para fines de asentamientos humanos, agrícolas u otras actividades que las afecten. Es decir, por ejemplo, que no pueden construirse

viviendas. Para la ejecución de obras de defensas ribereñas y la utilización de materiales ubicados en las fajas marginales se requiere la autorización de la Autoridad Administrativa del Agua.

5.5.4 Linderos

La Autoridad debe fijar y señalar en cada río los linderos de las fajas marginales. En efecto, el Reglamento mencionado señala que: “La señalización en el lugar de los linderos de la faja marginal, previamente fijados por la Autoridad Administrativa del Agua, se efectuará mediante el empleo de hitos u otras señalizaciones” (Art. 117°).

Las fajas marginales son, o pueden ser, una propiedad privada, pero de uso restringido. De algún modo recuerda lo que ocurre con el retiro municipal en las construcciones urbanas. Para un mayor detalle sobre las fajas marginales se puede consultar el antes mencionado Reglamento de la Autoridad Nacional del Agua (Anexo 5-B de este capítulo).

La Ley de Recursos Hídricos y la Ley General de Aguas (Decreto Ley N° 17752, 1969), que la antecedió, tienen a través de sus respectivos Reglamentos un tratamiento similar en lo que respecta a los cauces, riberas y fajas marginales. Como una ilustración de los problemas y soluciones en torno al manejo de las áreas adyacentes a los ríos, se presenta brevemente algunos aspectos de una Sentencia del Tribunal Constitucional del año 2001.

Al resolver un cierto litigio el Tribunal Constitucional señaló que si bien la Ley y su Reglamento “declararon áreas intangibles los cauces, las riberas y las fajas marginales de los ríos” también lo es que con ello se “establece limitaciones a una propiedad que no le pertenece al Estado, sino a los demandantes”. Por lo tanto, señala el Tribunal, estas normas no pueden “de plano establecer limitaciones y desconocer derechos que ciertos particulares tienen sobre determinadas áreas que son de su propiedad, sino más bien, y ya que según los procuradores se trata de un tema de interés público, debe existir una previa declaración legal de interés público y el pago de la indemnización justipreciada correspondiente, a fin de que se respeten los derechos que ellos tienen sobre dichos terrenos, de conformidad con las condiciones establecidas en el artículo 70° de nuestra norma constitucional”. Y añade que “ya se han establecido limitaciones a la propiedad de los demandantes, al haber dejado sin efecto resoluciones, contratos y permisos de ocupación temporal, además de prohibirse la instalación de asentamientos humanos y la realización de actividades agrícolas, pecuarias e industriales”.

5.5.5 Reglamento para la delimitación y mantenimiento de fajas marginales en cursos fluviales y cuerpos de agua naturales y artificiales

El Reglamento tiene por objeto establecer y regular los criterios, términos y métodos para efectuar la delimitación, aprobación, señalización y mantenimiento de las fajas marginales en cursos fluviales y cuerpos de agua naturales y artificiales y es de aplicación nacional y cumplimiento obligatorio por los órganos de la Autoridad Nacional del Agua, así como por los particulares (Anexo 5-B).

El Reglamento trata temas como el dimensionamiento y señalización de la faja marginal, las propiedades marginales, y las actividades que se pueden desarrollar en éstas, así como su uso temporal en cursos y cuerpos de agua amazónicos.

Se ve, pues, que estos asuntos de cauces, riberas y fajas marginales tienen que ser vistos desde diversos ángulos que incluyan los aspectos técnicos, legales, sociales y económicos, todos ellos a la luz del interés público.

5.6 Implicancias para los encauzamientos

Una de las formas de fijar (artificialmente) el ancho de un río es construyendo un encauzamiento. El encauzamiento fluvial representa el proceso largo y paulatino hecho por el hombre para adecuar la Naturaleza a sus necesidades. Un encauzamiento se hace para proteger un área o para crear las condiciones favorables de funcionamiento de una estructura o de un proyecto (un puente, una bocatoma, un camino, etc.). También pueden realizarse para favorecer la navegación.

La dinámica fluvial juega un papel importante en el comportamiento de un río encauzado. Los procesos de erosión (degradación) y sedimentación (agradación) en el cauce fluvial creado por un encauzamiento suelen ser muy intensos. Es muy importante la selección adecuada del ancho de encauzamiento, el que guarda mucha relación con el concepto de equilibrio fluvial. Un río tiene una tendencia a fijar sus propias variables hidráulicas (ancho, tirante y pendiente), tal como se expuso en el Capítulo 4. El encauzamiento es la imposición de estas variables. El diseño y construcción de un encauzamiento no puede dejar de tener en cuenta y precisar debidamente, además del cauce, las riberas y las fajas marginales. Esta consideración es particularmente importante cuando se trata de obras viales, ubicadas en el área de influencia (áreas de inundación) de un río. En tal sentido, el Manual de Diseño de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) debería señalar la necesidad de considerar las características de los cauces, riberas y fajas marginales cuando se determina la longitud de un puente.

Si el encauzamiento produjese un estrechamiento excesivo, el río socavaría y profundizaría su lecho, para comprobar lo cual bastaría con mirar el río Rimac atravesando la ciudad de Lima, o el río Piura, atravesando la ciudad del mismo nombre. Por el contrario, si el encauzamiento tuviese un ancho muy grande, entonces el río divagaría dentro de él y podría atacar peligrosamente las defensas constituyentes del encauzamiento. El encauzamiento puede significar también un cambio en el alineamiento natural del río. Si se corta un meandro, el tramo resultante tiene mayor velocidad y pendiente y, por lo tanto, mayor capacidad de arrastre, con la consiguiente posibilidad de erosión.

Una vez que se ha fijado para determinadas condiciones el ancho de un río se puede proceder al encauzamiento y, por ejemplo, al diseño de un puente. La longitud del puente será consecuencia del ancho establecido para el río, y no al revés, como en algunas oportunidades se ha hecho.

El encauzamiento de un río, que implica la fijación de un ancho, es un problema técnico-económico. Es usual que se fije un ancho de encauzamiento para una cierta avenida, asociada a un periodo de retorno y, en ciertos casos, se considere la posibilidad de que se presente, eventualmente, una avenida mayor, la que ocuparía las áreas próximas al cauce principal. La existencia de estas fajas (izquierda y derecha), como se ha visto, está prevista en la ley peruana, pero en la práctica no se suele respetar su existencia. El Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos menciona la ocupación condicionada de las fajas marginales. Sin embargo, no se menciona el caso de los puentes y caminos por lo que deberían considerarse de un modo especial en el Manual de Diseño del MTC, pues constituyen parte de la infraestructura de servicios públicos.

El Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos señala que “Constituyen obras de encauzamiento las que se ejecutan en los cauces, con la finalidad de estabilizar el curso de las aguas.” (Art. 223.1º) y añade que: “Las obras de defensa ribereñas son las obras de protección de poblaciones, infraestructura de servicios públicos, tierras de producción y otras contra las inundaciones y la acción erosiva del agua.” (Art. 223.2º).

El mencionado Reglamento señala que: “Los estudios y obras para el encauzamiento y defensas ribereñas, deberán contar con las autorizaciones correspondientes por parte de la Autoridad Administrativa del Agua y deberán ser coordinadas con el Sistema Nacional de Defensa Civil.” (Art. 223.3º).

La construcción de sistemas de defensas ribereñas permite la estabilización paulatina, y a largo plazo, de los cursos de agua. Para su diseño es necesario establecer una avenida, a la que se le llama de Diseño y, como consecuencia, obtener un ancho para el río. Esto es particularmente importante al estudiar las inundaciones por desborde fluvial y, ciertamente, para asegurar la estabilidad

de una estructura construida sobre el cauce fluvial (presas, bocatomas, puentes y otras).

La determinación de la Avenida de Diseño es un problema en el que se establece un compromiso entre los aspectos de Hidrología, Hidráulica Fluvial, las necesidades existentes de protección, los riesgos aceptables y los costos involucrados. Evidentemente, que no puede haber una protección infinita. En consecuencia, es posible que eventualmente la Avenida de Diseño sea excedida y el río se desborde y adquiera temporalmente un ancho mayor al previsto. Es entonces cuando surgen los problemas con las estructuras y ocupaciones que se hubiesen hecho.

En la fijación de un ancho para el río no debe perderse de vista la cuestión económica. En consecuencia, para determinados proyectos se puede adoptar para el encauzamiento y control de inundaciones, una avenida no muy grande y ante la posibilidad de que se presente, eventualmente, una avenida mayor se admite que el ancho adicional requerido por el río corresponda a un área, prevista para esa función y de uso restringido a determinadas actividades. Esas son las fajas marginales. Se ve, pues, que las fajas marginales se convierten, eventual y temporalmente, en cauce de río. De hecho, constituyen el cauce secundario. Por lo tanto, la fijación del ancho fluvial tiene que ser necesariamente complementada con la adopción del concepto de faja marginal. Una de las acciones para disminuir el efecto perjudicial de las inundaciones es el respeto de la faja marginal.

También puede ocurrir que se proyecte un camino que se desarrolle paralelamente al cauce fluvial y muy cerca de él, en cuyo caso no pueden dejar de considerarse los conceptos señalados en este Capítulo.

Los encauzamientos tienen mucho que ver con que las zonas próximas a los ríos, cualquiera sea su denominación o tamaño, pues son muy solicitadas por su gran valor económico. Carlos Villarroya Aldea ha preparado un cuadro muy interesante en el que resume lo que llama "Tipos de Presiones Detectadas en los Cauces".

TIPOS DE PRESIONES DETECTADAS EN LOS CAUCES (VILLARROYA)

Urbanísticas	Situación de edificios para viviendas o industrias, urbanizaciones, viales, campings e instalaciones complementarias derivadas de la actividad humana en el cauce y su entorno.
Económicas	Explotaciones de áridos en general, aprovechamientos hidroeléctricos y explotaciones agrarias, que pueden ser con cultivos y plantaciones o las actividades ganaderas con existencia de construcciones.
Medioambientales y culturales	Alteraciones producidas en el entorno, por degradación de los cauces y márgenes y en consecuencia de su flora y fauna asociadas, así como por las servidumbres que acompañan a las zonas de protección especial (bienes artísticos, arqueológicos o geológicos a conservar, captaciones y reservas hidrológicas o la existencia de parques naturales).
Inestabilidad de cauces	Alteraciones producidas por la dinámica fluvial tras inundaciones, como meandros que dificultan la definición de los cauces y en consecuencia la del dominio público asociado. Encauzamientos con modificación del cauce y su entorno y su problemática jurídica
Vertidos y depósito	Escombreras, basureros y emisarios de efluentes líquidos urbanos, industriales o ganaderos y toda clase de vertidos líquidos y sólidos a los cauces o sus proximidades.
Infraestructuras	Carreteras, caminos, acequias, ferrocarriles, tendidos eléctricos o telefónicos ocupando el dominio público parcial o totalmente con obras civiles como muros, puentes, sifones, pilares, etc.

El tema de este capítulo fue uno de los asuntos tratados en el Primer Seminario de Potamología (mencionado en el Capítulo 1) bajo el nombre de “Descripción geoespacial de cauces y planicies de inundación”.

En conclusión, en el planeamiento y diseño de las obras viales ubicadas sobre el cauce fluvial o en sus inmediaciones se debe tener en cuenta los conceptos antes expuestos a fin de realizar las coordinaciones correspondientes y obtener las autorizaciones debidas. Este problema es particularmente grave en el Perú donde el recurso tierra es muy escaso y hay valles en los que el escaso espacio disponible se lo disputan el río, el canal, el ferrocarril, la agricultura, los asentamientos humanos y otras actividades. Hay muchas obras de ingeniería que ocupan el cauce fluvial. Entre ellas están ciertamente las viales, pero también las hidráulicas, como las bocatomas y presas, las urbanas y otras.

5.7 Invasión de cauces fluviales por obras viales

La construcción de obras viales suele significar una invasión de las áreas pertenecientes al río. Se denomina “Invasión vial” (“*encroachment*”, en inglés) a “cualquier ocupación del cauce y/o de sus áreas de inundación para construir obras viales”. Este tema ha sido tratado por muchos autores. Para la presente exposición se ha tenido muy presente el importante trabajo “Highways in the river environment” de Richardson, Simons, Karaki, Mahmood y Stevens.

Los ríos aluviales, que son los de ancho indefinido como se señaló anteriormente, tienen la posibilidad de crecer lateralmente (ensancharse) y aun de desplazarse en cantidades importantes. De acá que para el planeamiento

de una obra vial próxima a un río haya que examinar y tener en cuenta esta circunstancia. Sin un encauzamiento adecuado ninguna obra en contacto con el río, o cercana a él, podrá ser segura.

Volviendo al concepto de invasión vial es necesario precisar que ésta tiene repercusiones hidráulicas, fluviomorfológicas, económicas y ambientales, las que se originan en el hecho de que el río constituye una unidad inseparable. Lo que se haga o deje de hacerse en un lugar repercute en otros lugares del río. Hay determinadas obras viales que se construyen junto a los ríos. Surge así, como consecuencia de la proximidad, la posibilidad de una invasión.

Las invasiones viales, tal como se han definido, tienen muchas veces su origen en las peculiares características de nuestro territorio y en la escasez de tierra para el desarrollo de actividades sociales y económicas. El valle, que es el lugar en el que la vida humana se desarrolla más fácilmente, resulta siendo disputado por el río y por diversos usuarios. A esto se agrega los depósitos de basura, de desmonte y desperdicios en general. Esta difícil condición nos obliga a ser excepcionalmente cuidadosos en la planificación del uso de la tierra.

Las invasiones del cauce producen un estrechamiento que puede causar el aumento de la socavación o el desborde del río, entre otros efectos. La invasión de cauces es un fenómeno que ocurre en diferentes partes del mundo. Sus consecuencias afectan la vida y la seguridad de las personas, así como sus inversiones económicas. Por ello debe haber un ordenamiento de la ocupación de las áreas inundables. Esta exposición se restringe a algunos aspectos vinculados a las obras de ingeniería.

Es frecuente que el estrechamiento fluvial excesivo para construir un puente sea causa de desastres. Las invasiones viales son de dos tipos: transversales y longitudinales.

5.7.1 Invasiones Transversales

Se dice que las invasiones son transversales cuando lo son con respecto al eje del río. Las invasiones transversales están por lo general asociadas a los puentes y a algunas obras hidráulicas, aunque no exclusivamente. Hay dos modalidades de invasiones transversales vinculadas a puentes.

Una de ellas se refiere a los terraplenes de aproximación construidos transversalmente al río con el objeto de disminuir la longitud de un puente (Figura N° 5.1). Esto obligaría al río a pasar por un cauce con un ancho menor que el que necesita. El río aluvial reacciona y profundiza su cauce o busca la manera de recuperar su ancho. En un caso o en otro se puede producir la falla del puente. En otras oportunidades sucede que al ser los terraplenes elementos extraños al río y al no haberse tomado en cuenta las características

de su interacción con el flujo, el río busca un nuevo cauce, para lo cual crea un brazo fluvial.

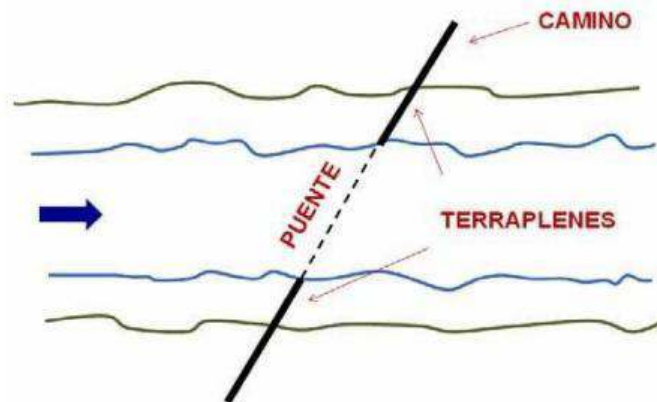


Figura N° 5.1 Invasión del cauce fluvial por un estrechamiento transversal excesivo.

Otra forma de invasión transversal ocurre cuando se construye un puente en el que las luces entre los pilares son pequeñas. Como hemos dicho anteriormente un río transporta muchas veces gran cantidad de cuerpos extraños, que a veces constituyen una palizada que al llegar a los pilares bloquea el espacio entre ellos y obstruye el paso de agua, lo que finalmente conduce a la falla de la estructura.

Un camino construido transversalmente a un abanico fluvial constituye otra forma de invasión transversal. Se denomina abanico fluvial al fenómeno mediante el cual un río se abre en varios brazos. Generalmente un abanico fluvial se presenta como consecuencia de un cambio de pendiente, de mayor a menor. Tanto el abanico como el delta fluvial corresponden a una disminución de la velocidad (Figura N° 5.2). En zonas áridas y semiáridas, frecuentes en diversas partes de nuestro país, puede ocurrir que los caudales sean intermitentes y que algunos de los brazos se comporten como “ríos secos”. En realidad los ríos secos no existen. Hay algunos que parecen serlo porque durante varios años se encuentran sin agua.

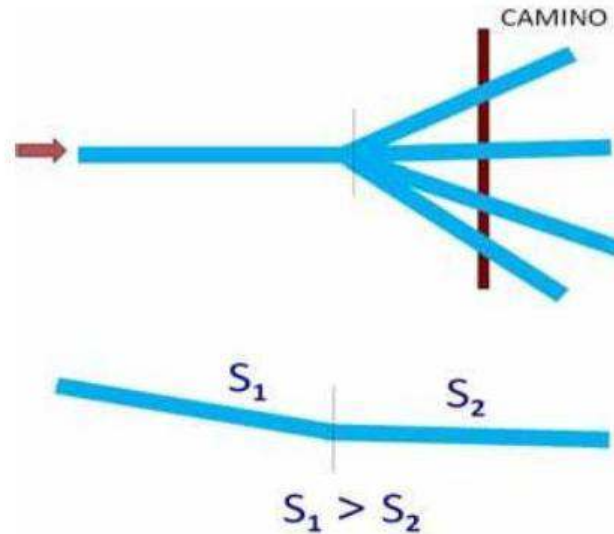


Figura N° 5.2 Abanico fluvial: se origina al disminuir la pendiente.

Usualmente, al construirse un camino que atraviesa los brazos del abanico fluvial se proyecta un puente sobre lo que parece ser el cauce principal y se considera algunas alcantarillas sobre los que parecen ser “cauces secos”. Pero, cuando ocurren avenidas importantes el río busca la manera de recuperar sus antiguos brazos y cauces (paleocauces). Es entonces cuando el conjunto de la carretera, su terraplén y los cruces de los cursos de agua se convierten en una “represa”, en una invasión transversal al río, y ocurre la inundación, el desborde fluvial y la aparición de nuevos cauces.

5.7.2 Invasiones Longitudinales

Otras veces se construye el camino, el ferrocarril o el canal, paralelamente al cauce fluvial, dentro del álveo (cauce), dando lugar a que el camino y la defensa se confundan y el cauce se estreche (Figura N° 5.3). En algunos lugares se encauza el río, lo que a veces implica su rectificación, o el corte de meandros, para “acomodarlo” al camino. Hay otras formas de invasión, que podríamos llamar totales, que se presentan cuando se construye sobre un cauce “seco” o sobre una quebrada, lo que es muy frecuente. En relación con las invasiones no se debe olvidar que en el Perú uno de los recursos más escaso es la tierra.

Otra forma de invasión vial longitudinal es la construcción de un túnel bajo el cauce del río para usarse como vía rápida. Una estructura de estas características requiere de estudios muy rigurosos de Hidráulica Fluvial, Hidrología, Transporte de Sedimentos y de otras disciplinas.

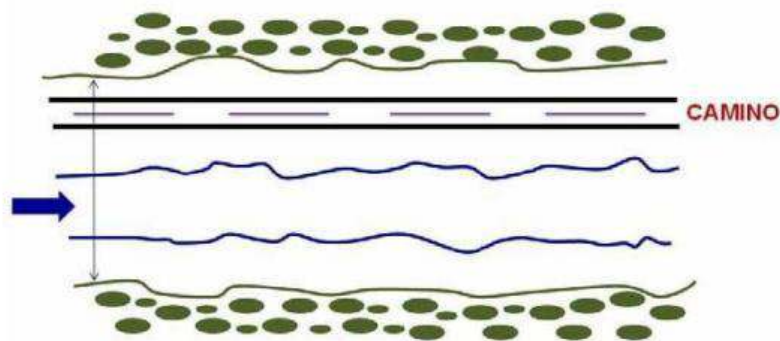


Figura N° 5.3 El camino construido dentro del cauce, paralelamente al río constituye una invasión vial longitudinal.

5.7.3 ¿Qué hacer ante las invasiones?

De lo expuesto resulta claro que en el planeamiento y diseño de las obras de ingeniería ubicadas en las proximidades de un río se debe tener presente los conceptos expuestos sobre cauces, riberas y fajas marginales. Una decisión equivocada implica no sólo la invasión del Dominio Público Hidráulico, sino un hecho físico innegable: la ocupación del área que pertenece al río que éste en algún momento tratará de recuperar. La selección adecuada de la Avenida de Diseño para cada caso es muy importante.

Sin embargo, es cierto que en el Capítulo III del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos se usa varios conceptos para referirse a las avenidas, los que no están definidos: Máximas crecientes, Mayores avenidas, Crecientes ordinarias, Máxima crecida, Máxima avenida, Eventos excepcionales, Máxima crecida que no corresponda a un evento excepcional. En consecuencia, sería conveniente adoptar algunas precisiones generales y específicas al respecto.

Producida una invasión aparece la respuesta del río, la que puede ser inmediata (corto plazo) o mediata (mediano o largo plazo). Por lo general, la reacción del río ante la invasión de su cauce se manifiesta durante las grandes crecidas y puede ser local o generalizada, en función de la extensión del cauce comprometida con la invasión. Con respecto a las invasiones viales no queda sino dos posibilidades. En primer lugar, evitarlas, siempre que ello sea posible. Si no fuese posible evitarlas, las invasiones viales deben ser tratadas, sin olvidar que se trata de un problema de hidráulica fluvial.

ANEXO 5-A**REGLAMENTO DE LA LEY DE RECURSOS HÍDRICOS N° 29338
Decreto Supremo N° 001-2010-AG, 2010****CAPÍTULO III****CAUCES, RIBERAS Y FAJAS MARGINALES****Artículo 108°.- Cauces o álveos**

Para efectos de la Ley, los cauces o álveos son el continente de las aguas durante sus máximas crecientes.

Artículo 109°.- Cauces inactivos

Los cauces que han quedado inactivos por variación del curso de las aguas, continúan siendo de dominio del Estado, y no podrán ser usados para fines de asentamientos humanos o agrícolas.

Artículo 110°.- Reparación de daño por desvío del cauce

110.1 *Cuando los flujos o corrientes de los cauces naturales o artificiales desvíen su curso por acción del hombre causando daños, la reparación será por cuenta del autor del hecho.*

110.2 *La Autoridad Nacional del Agua al tomar conocimiento de la desviación no autorizada del curso del agua por acción de una persona natural o jurídica, se constituirá al lugar para verificar y evaluar los hechos y los daños ocasionados así como para dictar las disposiciones de la restitución inmediata e inicio del procedimiento sancionador.*

Artículo 111°.- Riberas

Las riberas son las áreas de los ríos, arroyos, torrentes, lagos, lagunas, comprendidas entre el nivel mínimo de sus aguas y el que éste alcance en sus mayores avenidas o crecientes ordinarias.

Artículo 112°.- Criterios para la delimitación de las riberas

La delimitación de las riberas se realiza de acuerdo con los siguientes criterios:

- a.** *Nivel medio de las aguas, tomando para tal efecto períodos máximos de información disponible.*
- b.** *Promedio de máximas avenidas o crecientes ordinarias que se determina considerando todas las alturas de aguas que sobrepasen el nivel medio señalado en el literal anterior.*

Artículo 113°.- Fajas Marginales

113.1 *Las fajas marginales son bienes de dominio público hidráulico. Están conformadas por las áreas inmediatas superiores a las riberas de las fuentes de agua, naturales o artificiales.*

113.2 *Las dimensiones en una o ambas márgenes de un cuerpo de agua son fijadas por la Autoridad Administrativa del Agua, de acuerdo con los criterios establecidos en el Reglamento, respetando los usos y costumbres establecidos.*

Artículo 114°.- Criterios para la delimitación de la faja marginal

La delimitación de la faja marginal se realiza de acuerdo con los siguientes criterios:

- a.** *La magnitud e importancia de las estructuras hidráulicas de las presas, reservorios, embalses, canales de derivación, entre otros.*
- b.** *El espacio necesario para la construcción, conservación y protección de las defensas ribereñas y de los cauces.*
- c.** *El espacio necesario para los usos públicos que se requieran.*
- d.** *La máxima crecida o avenida de los ríos, lagos, lagunas y otras fuentes naturales de agua. No se considerarán las máximas crecidas registradas por causas de eventos excepcionales.*

Artículo 115°.- Actividades prohibidas en las fajas marginales

115.1 *Está prohibido el uso de las fajas marginales para fines de asentamiento humano, agrícola u otra actividad que las afecte. La Autoridad Nacional del Agua en coordinación con los gobiernos locales y Defensa Civil promoverán mecanismos de reubicación de poblaciones asentadas en fajas marginales.*

115.2 *La Autoridad Administrativa del Agua autoriza la ejecución de obras de defensa ribereña y la utilización de materiales ubicados en las fajas marginales necesarios para tal fin.*

Artículo 116°.- Fajas marginales en cauces artificiales

Los estudios de las obras de infraestructura hidráulica mayor definirán las dimensiones de las fajas marginales correspondientes, las mismas que serán habilitadas en la etapa constructiva del proyecto.

Artículo 117°.- De la señalización de los linderos de la faja marginal

La señalización en el lugar de los linderos de la faja marginal, previamente fijados por la Autoridad Administrativa del Agua, se efectuará mediante el empleo de hitos u otras señalizaciones.

Artículo 118°.- De los programas de mantenimiento de la faja marginal

La Autoridad Administrativa del Agua, en coordinación con el Ministerio de Agricultura, gobiernos regionales, gobiernos locales y organizaciones de usuarios de agua promoverá el desarrollo de programas y proyectos de forestación en las fajas marginales para su protección de la acción erosiva de las aguas.

Artículo 119°.- Reservas para fines de defensa nacional

A iniciativa del Ministerio de Defensa y con la opinión de la Autoridad Nacional del Agua, mediante Decreto Supremo refrendado por el Presidente del Consejo de Ministros se determinarán las fajas marginales a reservarse para fines de defensa nacional.

Artículo 120°.- Del régimen de propiedad de terrenos aledaños a las riberas

120.1 En las propiedades adyacentes a las riberas, se mantendrá libre una faja marginal de terreno necesaria para la protección, el uso primario del agua, el libre tránsito, la pesca, caminos de vigilancia u otros servicios públicos, según corresponda.

120.2 En todos estos casos no habrá lugar a indemnización por la servidumbre, pero quienes usaren de ellas, quedan obligados, conforme con el derecho común, a indemnizar los daños que causaren, tanto en las propiedades sirvientes como en los cauces públicos o en las obras hidráulicas.

Artículo 121°.- Pérdida de la propiedad de terrenos adyacentes a fajas marginales

Cuando las aguas, por causas propias de la naturaleza, arrancan una porción considerable y reconocible de un terreno colindante con la faja marginal, el propietario perderá su derecho de propiedad, si dentro de los siguientes dos años de ocurrido el evento no inicia las acciones necesarias para su recuperación. En este caso pasa a formar parte del dominio público hidráulico.

Artículo 122°.- Del aislamiento de un predio por un nuevo cauce

Cuando un nuevo cauce deje aislado o separados terrenos de un predio o estos fueran inundados con motivo de las crecientes de las aguas, dichos terrenos continuarán perteneciendo a su propietario, cuando éstas se retiren.

Anexo 5-B**REGLAMENTO PARA LA DELIMITACIÓN Y
MANTENIMIENTO DE FAJAS MARGINALES EN CURSOS
FLUVIALES Y CUERPOS DE AGUA NATURALES Y
ARTIFICIALES****(Resolución Jefatural N° 300-2011-ANA)****Lima, 23 Mayo de 2011****TÍTULO I
DISPOSICIONES GENERALES****Artículo 1°.- Objeto y ámbito de aplicación**

- 1.1** *El presente reglamento tiene por objeto establecer y regular los criterios, términos y métodos para efectuar la delimitación, aprobación, señalización y mantenimiento de las fajas marginales en cursos fluviales y cuerpos de agua naturales y artificiales.*
- 1.2** *El reglamento es de aplicación nacional y de cumplimiento obligatorio por los órganos de la Autoridad Nacional del Agua, así como por las personas naturales o jurídicas de derecho público o privado.*
- 1.3** *Cuando se haga referencia a la “Ley” o al “Reglamento de la Ley”, se entiende que se trata de la Ley N° 29338 - Ley de Recursos Hídricos, o al Reglamento de dicha Ley aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG, respectivamente.*

Artículo 2°.- Finalidad

El presente reglamento tiene por finalidad uniformizar a nivel nacional criterios, términos y métodos para la delimitación y mantenimiento de las fajas marginales en cursos fluviales y cuerpos de agua.

Artículo 3°.- Aplicación del reglamento

Los criterios, términos y métodos regulados por el presente reglamento son de aplicación obligatoria vinculante para las siguientes actividades:

- a.** *Delimitación de la faja marginal.*
- b.** *Dimensionamiento de la faja marginal.*
- c.** *Señalización de la faja marginal*
- d.** *Actividades en la faja marginal.*

- e. *Mantenimiento de la faja marginal.*
- f. *Fajas marginales para defensa nacional.*
- g. *Predios ubicados en las fajas marginales.*

TÍTULO II ASPECTOS GENERALES

Artículo 4°.- Definiciones

Para fines del presente Reglamento debe considerarse las definiciones siguientes:

- a) **Cauce o Álveo**
Continente de las aguas durante sus máximas crecientes, constituye un bien de dominio público hidráulico.
- b) **Cauce Inactivo**
Cauce o álveo por el que no discurre el agua por variación de su curso.
- c) **Riberas**
Áreas de los ríos, arroyos, torrentes, lagos y lagunas, comprendidas entre el nivel mínimo de sus aguas y el nivel de su máxima creciente. Para su delimitación no se considerarán las máximas crecidas registradas por eventos extraordinarios, constituye un bien de dominio público hidráulico.
- d) **Nivel mínimo de las aguas**
Nivel de las aguas, calculado o estimado en base a los niveles mínimos de los registros históricos considerando los periodos máximos de información disponible, o de la información disponible en la Unidad Hidrográfica.
- e) **Nivel de máxima creciente**
Nivel de las aguas durante su máxima crecida y en una sección transversal específica del cauce, arroyo, lago, laguna y reservorio; calculado o estimado por métodos directos o indirectos en función de la información existente en la Unidad Hidrográfica. No se considerarán las máximas crecidas por causas de eventos extraordinarios.
- f) **Faja Marginal**
Área inmediata superior al cauce o álveo de la fuente de agua, natural o artificial, en su máxima creciente, sin considerar los niveles de las crecientes por causas de eventos extraordinarios, constituye bien de dominio público hidráulico.
- g) **Unidades hidrográficas**
Espacios geográficos limitados por líneas divisorias de aguas, relacionadas espacialmente por sus códigos, cuya organización está estructurada

jerárquicamente por niveles, en el que la superficie de drenaje es el único criterio de decisión organizativa.

Artículo 5°.- De la delimitación de la faja marginal

- 5.1** *La Autoridad Administrativa del Agua - AAA, es la autoridad competente para aprobar la delimitación de la faja marginal, en base a un Estudio de Delimitación (ANEXO I).*
- 5.2** *La delimitación de la faja marginal tiene por objeto establecer las dimensiones y localización de las áreas y espacios destinados para las actividades y usos siguientes:*
- a. Protección de los cursos fluviales y cuerpos de agua.*
 - b. Vías de libre tránsito, caminos de acceso, vigilancia y/o mantenimiento de los cursos fluviales y cuerpos de agua.*
 - c. Áreas y accesos para las presas, reservorios, embalses, obras de captación y derivación, canales de riego, obras de drenaje, entre otros.*
 - d. Actividades de pesca.*
 - e. Áreas y acceso para la Infraestructura de navegación y otros servicios.*
- 5.3** *Cuando existan obras hidráulicas en el cauce o álveo, la faja marginal será fijada a solicitud del operador hidráulico o por los usuarios marginales.*
- 5.4** *La delimitación de Faja Marginal podrá ser de oficio o a solicitud de municipalidades, gobiernos regionales o entidades privadas. En los procedimientos a solicitud de parte, el solicitante deberá presentar el estudio correspondiente para su aprobación.*

Artículo 6°.- De la determinación del ancho de cauce del río

- 6.1** *En los cursos fluviales o cuerpos de agua con información hidrométrica histórica, los valores de mínima, media y máxima avenida serán estimadas en base a procedimientos estadísticos, hidrológicos e hidráulicos.*
- 6.2** *En los cursos fluviales y cuerpos de agua sin información hidrométrica histórica, los valores de mínima, media y máxima avenida, se estimarán mediante la aplicación de métodos matemáticos, fórmulas empíricas y/o la evidencia física que muestre los niveles alcanzados por los cuerpos de agua durante la época de estiaje y de crecientes.*
- 6.3** *En base a los valores de mínima, media y máxima avenida se determinará las características y dimensiones de los cursos fluviales y cuerpos de agua para realizar la delimitación de los cauces y fajas marginales en los planos topográficos y se precisarán los linderos del cauce y de la faja marginal en*

coordenadas del Sistema Universal Trasversal Mercator (UTM - WGS 84), y se ubicaran hitos solo en el límite exterior de la faja marginal.

TÍTULO III DIMENSIONAMIENTO DE LA FAJA MARGINAL

Artículo 7°.- Criterios

7.1 En los cauces o álveos de los ríos:

- a. *La faja marginal al ser un área inmediata superior al nivel alcanzado por la máxima creciente, su límite inferior será la línea establecida por las cotas de la máxima creciente en secciones transversales sucesivas.*
- b. *El área de terreno para la faja marginal será fijada, en función de las dimensiones del cauce o álveo del cuerpo de agua y podrá tener un ancho variable, desde un mínimo de cuatro (4) metros hasta el ancho necesario para realizar actividades de protección y conservación de la fuente natural de agua, permitir el uso primario, el libre tránsito, el establecimiento de los caminos de vigilancia u otros servicios. Asimismo, las dimensiones pueden variar de acuerdo a los usos y costumbres establecidos, siempre que no generen un riesgo a la salud y la vida humana.*

7.2 En los lagos y lagunas:

- a. *En los lagos y lagunas, la faja marginal se inicia en la cota que alcanza la máxima creciente y que se determina según el nivel máximo del río efluente; la máxima creciente se estimará en base a la información disponible, debidamente sustentada.*
- b. *El ancho de la faja marginal se establecerá usando los mismos criterios señalados para los álveos o cauces de un río.*

7.3 En los reservorios o embalses:

- a. *En los reservorios o embalses, el lindero inferior de la faja marginal está establecido por la línea determinada por la cota del máximo tirante de agua en el vertedero de demasías de la presa.*
- b. *El ancho de la faja marginal se establecerá usando los mismos criterios señalados para los álveos o cauces de un río.*

7.4 En los canales, drenes, estructuras de captación y otros:

- a. *En el caso de canales artificiales, la faja marginal corresponde al ancho establecido en los planos constructivos del proyecto, específicamente al ancho de los caminos de operación y mantenimiento del canal.*
- b. *En las obras que no se hayan establecido los anchos de la faja marginal en el diseño de los canales, drenes, estructuras de captación y otros, se definirán en función a las actividades necesarias para la operación y mantenimiento.*

Artículo 8°.- En los cauces naturales sin estructuras de encauzamiento o defensas ribereñas

En los cursos y cuerpos de agua, en el cual el régimen hidrológico es intermitente o transitorio (sin agua) y carentes de registros históricos, la delimitación del cauce o álveo y las fajas marginales, se realizará en base a la observación directa de las evidencias físicas válidas encontradas en las secciones del curso fluvial o cuerpo de agua, así como por las referencias proporcionadas por los pobladores existentes en las cercanías sobre la ocurrencia de las máximas avenidas.

Artículo 9°.- En los cauces naturales con estructuras de encauzamiento o defensas ribereñas

- 9.1 *En los cursos y cuerpos de agua en los cuales se han construido estructuras de encauzamiento (dique enrocado, gaviones, muros de concreto y otros), la AAA podrá modificar la faja marginal, previa solicitud y presentación por los interesados, de un estudio técnico.*
- 9.2 *Es recomendable, para los estudios técnicos, el empleo de un periodo de retorno de 50 años para estimar el Caudal Máximo de diseño para tramos del curso de agua con asentamientos agrícolas, y un periodo de retorno de 100 años en áreas urbanas.*

**TÍTULO IV
SEÑALIZACIÓN DE LA FAJA MARGINAL**

Artículo 10°.- De los linderos

- 10.1 *La colocación de hitos u otra señalización de carácter permanente, delimitará el lindero exterior de la faja marginal.*
- 10.2 *El hito o señalización tendrá preferentemente forma de tronco de pirámide y podrá ser de material noble (concreto armado) u otro material que no se degrade (roca), cuya colocación debe garantizar su visibilidad y permanencia.*
- 10.3 *Los hitos se numerarán o codificarán de manera correlativa, según las progresivas existentes del curso fluvial y en concordancia con la determinación*

establecida en el Estudio de Delimitación de la Faja Marginal. El posicionamiento de cada hito sobre el terreno será georeferenciado en coordenadas UTM - WGS 84, cuya relación deberá estar contenida en un cuadro (Formato 1) que formará parte de la Resolución Directoral de aprobación de los límites de la faja marginal.

Artículo 11°.- De la verificación, conservación y control de la señalización

- 11.1** *La AAA procederá a la verificación de la colocación de hitos u otras señalizaciones debidamente codificadas, sobre los linderos exteriores de las fajas marginales de cursos fluviales y cuerpos de agua. Cualquier modificación de su ubicación, será llevada a cabo, previa justificación técnica y verificación por dicha autoridad.*
- 11.2** *Una vez colocados los hitos, estos deberán ser conservados y preservados en su ubicación de origen por parte de los solicitantes, propietarios de predios colindantes y usuarios en general.*
- 11.3** *En los casos de alteración o reubicación de los hitos sin autorización, la AAA evaluará los daños y, dependiendo de su gravedad, dispondrá la restitución y/o formulación de la denuncia respectiva contra los responsables y la aplicación de la sanción conforme a Ley.*

TÍTULO V ACTIVIDADES EN LA FAJA MARGINAL

Artículo 12°.- Actividades prohibidas

- 12.1** *El desarrollo de asentamientos humanos, agricultura intensiva o permanente u otra actividad que afecte a la faja marginal.*
- 12.2** *Desviar las aguas de sus cauces naturales o artificiales sin la autorización correspondiente.*
- 12.3** *El retiro de material de acarreo que depositan los ríos, en los tramos señalados por la AAA, como críticas y vulnerables a riesgos de desastres en épocas de avenidas.*

Artículo 13°.- Reparación de daños

- 13.1** *La AAA, al constatar la construcción de obras sin autorización en las áreas de bienes de dominio público hidráulico (álveo o cauce y fajas marginales) que representen un daño o riesgo inminente en las épocas de avenidas ordenará su retiro o demolición a través de la autoridad competente y la sanción correspondiente conforme a Ley.*

- 13.2** *Cuando en terrenos de propiedad privada, las aguas abren un nuevo cauce debido a fenómenos propios de la naturaleza, dicho cauce pasará al dominio público si el propietario no inicia las acciones para su recuperación del terreno dentro de los siguientes dos años de ocurrido el evento.*
- 13.3** *En los casos de desviación del curso de agua por parte de persona natural o jurídica, el ALA se constituirá al lugar para verificar los hechos y evaluar los daños ocasionados; luego, dictará la disposición de restitución inmediata a su cauce original; y en casos de daños, la aplicación de la sanción conforme a Ley. La reparación del daño y forma de rehabilitación será señalada por la AAA.*
- 13.4** *Cuando se efectúe daños al cauce y faja marginal, como producto de la extracción de material de acarreo del río y actividades complementarias a estas, la ALA evaluará los daños ocasionados y comunicará a la Municipalidad correspondiente, para la aplicación de las acciones correctivas necesarias, cuyo cumplimiento deberá llevarse a cabo en forma coordinada con la ALA.*
- 13.5** *Para la reparación de daños causados por erosión de la ribera, colapso de obras de defensas ribereñas y rectificación de caminos de vigilancia, la AAA emitirá la autorización de ejecución de obras y verificará los trabajos de reparación.*

Artículo 14°.- Actividades sujetas a autorización

- 14.1** *Las áreas de dominio público hidráulico (álveos o cauces y fajas marginales) son bienes asociados al agua, por ello toda intervención de los particulares que afecte o altere estos bienes debe ser previamente autorizada por la AAA, con excepción del uso primario del agua y las referentes a la navegación. En este sentido, las actividades que podrán desarrollarse en las fajas marginales son temporales, como es el caso de la ejecución de obras para el uso común y los cultivos temporales, los cuales requieren de justificación técnica a fin que la AAA evalúe su procedencia o improcedencia. Este último, por ser nocivo y tener efectos negativos a las buenas condiciones ambientales de los cursos fluviales y cuerpos de agua.*
- 14.2** *La ejecución de obras de infraestructura hidráulica, vial o de servicio, que se realicen en los espacios del álveo o cauce y fajas marginales de cursos fluviales y cuerpos de agua, requiere de autorización previa por la AAA, quien aprobará el respectivo expediente técnico y verificará su ejecución.*
- 14.3** *La AAA podrá autorizar la habilitación de obras hidráulicas, las vías de acceso a la fuente de agua a través de la faja marginal, así como emitir autorización temporal para uso del cauce o álveo y faja marginal para actividades en aplicación de los usos y costumbres establecidos en la zona y respaldados por*

un informe o autorización del sector correspondiente. La autorización será otorgada solo por el tiempo que dure la habilitación de las obras.

- 14.4** *Para la realización de actividades en los cursos fluviales y cuerpos de agua de carácter intermitente, temporal o abandonado por variación del curso de las aguas, se requiere autorización de la AAA, para lo cual el solicitante deberá efectuar la justificación técnica y económica de la actividad y la factibilidad de realización por su propia cuenta y riesgo. La autorización será por el tiempo que dure actividad.*
- 14.5** *El incumplimiento de atribuciones y responsabilidades asumidas por el titular de la autorización del uso de la faja marginal, es causal para que la AAA extinga la autorización concedida. Asimismo, por causas justificadas y necesarias para la preservación y conservación del curso fluvial o cuerpo de agua se podrá extinguir la autorización otorgada, la cual no da derecho a indemnización alguna por parte del Estado.*

Artículo 15°.- Reserva de faja marginal para defensa nacional

- 15.1** *A iniciativa del Ministerio de Defensa, la ANA emitirá opinión sobre las fajas marginales a reservarse con fines de defensa nacional.*
- 15.2** *La AAA elaborará el informe técnico sobre las áreas marginales en cursos fluviales y cuerpos de agua a reservarse con fines de defensa nacional, debiendo elevar dicho informe a la ANA, con la finalidad de efectuar las coordinaciones con el Ministerio de Defensa para su aprobación.*
- 15.3** *El informe técnico contendrá los antecedentes y las referencias físicas del área, así como un plano de ubicación debidamente georeferenciado.*

Artículo 16°.- Programas de mantenimiento

- 16.1** *La AAA promoverá la formulación de proyectos y programas de mantenimiento de la faja marginal, destinados a la protección de los hitos colocados en el lindero exterior de esta, garantizar el libre tránsito, las condiciones hidráulicas naturales de los cursos fluviales y cuerpos de agua, la protección de la calidad del agua y los ecosistemas fluviales existentes.*
- 16.2** *La AAA en forma coordinada con el Ministerio del Ambiente, la Dirección General Forestal y Fauna Silvestre del Ministerio de Agricultura, los Gobiernos Regionales, Gobiernos Locales y organizaciones de usuarios de agua, promoverán y/o desarrollarán eventos de capacitación y sensibilización para el desarrollo de programas y proyectos de forestación y reforestación en las fajas marginales, respetando los usos definidos en el Artículo 74° de la Ley.*

- 16.3** *La formulación y ejecución de los programas de mantenimiento de las fajas marginales, serán realizadas por las organizaciones de usuarios de aguas y usuarios en general colindantes a las fajas marginales, y su ejecución será verificada por la ALA.*
- 16.4** *Las organizaciones de usuarios y usuarios en general que hayan obtenido la aprobación de la delimitación de fajas marginales, tienen la responsabilidad de realizar las acciones de mantenimiento de la faja marginal delimitada en coordinación con la AAA.*
- 16.5** *La AAA aprobará y verificará las propuestas de programas de forestación y/o reforestación promovidas por usuarios de agua organizados, organismos públicos o del sector privado afines, cuyos propósitos sean los siguientes: el control de la erosión lateral, las defensas ribereñas para la protección de campos de cultivos y asentamientos poblacionales.*
- 16.6** *La AAA promoverá la suscripción de convenios de cooperación interinstitucional entre ella y los usuarios de aguas organizados, instituciones públicas o del sector privado, a fin de propiciar la conservación de los cursos fluviales y cuerpos de agua y/o la ejecución de programas de forestación o de mantenimiento de la faja marginal.*
- 16.7** *La ANA, a través de la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, monitoreará y supervisará a los Órganos Desconcentrados (AAA), en relación a las acciones emprendidas sobre conservación y protección de las fajas marginales delimitadas y aprobadas, en los cursos fluviales y/o cuerpos de agua.*

TÍTULO VI DE LAS PROPIEDADES MARGINALES

Artículo 17°.- De los terrenos aledaños al cauce o álveo

- 17.1** *No habrá lugar a indemnización por las servidumbres, pero quienes usaren de ellas, quedan obligados, conforme con el derecho común, a indemnizar y/o reparar los daños que causaren a los predios sirvientes como en el caso de los cauces públicos o en las obras hidráulicas.*
- 17.2** *Cuando las aguas, por causas propias de la naturaleza, arrancan una porción considerable y reconocible de un terreno colindante con la faja marginal, el propietario perderá su derecho de propiedad, si dentro de los siguientes dos años de ocurrido el evento no inicia las acciones necesarias para su recuperación. En este caso pasa a formar parte de los bienes de dominio público hidráulico.*

- 17.3** *Cuando el río por causa natural deje aislado o separado parte de un predio o terreno o cuando estos fueran inundados por motivo de las crecientes de las aguas, dichos terrenos continuarán perteneciendo a su propietario cuando las aguas se retiren.*
- 17.4** *Para la determinación del régimen de propiedad de predios marginales en los cursos fluviales y cuerpos de agua (lagunas y lagos) del territorio nacional, la AAA en su ámbito jurisdiccional establecerá un catastro ribereño o lo actualizará a través de sus unidades orgánicas (Administración Local de Agua - ALA) mediante el empleo del Registro de Propiedad Marginal (Formato 3); empleando como base la información catastral y predial, elaborado por las entidades competentes.*

TÍTULO VII

USO TEMPORAL DE LA FAJA MARGINAL EN CURSOS Y CUERPOS DE AGUA AMAZÓNICOS

Artículo 18°.- Del Uso temporal

- 18.1** *El uso temporal para la siembra de cultivos solo se autoriza, en las fajas marginales y/o riberas de los cauces y cuerpos de aguas amazónicas, en aplicación del respeto a los usos y costumbres que consigna la Ley y en función a la duración de la campaña agrícola para la que es solicitada.*
- 18.2** *Las comunidades campesinas y/o comunidades nativas, tendrán prioridad para usufructuar las fajas marginales para cultivos temporales; para tal acción la AAA llevará un Registro de Usuarios Temporales de Faja Marginal (Formato 2) y el Registro de Propiedades Marginales (Formatos 3), debiendo determinarse previamente los tramos de ríos y cauces de los cuerpos de agua en los cuales es posible aplicar el respeto al principio de los usos y costumbres que consagra la Ley. Sin embargo, los cultivos temporales estarán restringidos a los de corto periodo vegetativo, previo informe de la ALA correspondiente y certificación de la autoridad competente.*

Artículo 19°.- Requisitos para el uso temporal de la faja marginal y/o ribera del río para cultivos temporales

Las personas naturales o jurídicas que soliciten la autorización para la siembra de cultivos temporales en áreas ubicadas en fajas marginales y/o riberas del río, deberán cumplir con alguno de los requisitos siguientes:

- a)** *Ser de la zona o haber cultivado el área en campañas anteriores, acreditado por la comunidad campesina o nativa de la zona.*
- b)** *Tener propiedad colindante a la ribera y/o faja marginal, factible de explotarse temporalmente.*

- c) *No poseer tierras en propiedad, ni con ingresos económicos derivados de otras actividades productivas, acreditada por la Municipalidad de su jurisdicción.*
- d) *No se otorgará más de una autorización a una misma persona natural o jurídica, para la misma campaña agrícola.*

Artículo 20°.- Evaluación del trámite administrativo para el otorgamiento del uso temporal del espacio de faja marginal y/o ribera del río

En el trámite administrativo para el otorgamiento del uso temporal del espacio de faja marginal, se evaluará lo siguiente:

- a) *El área solicitada no debe estar ubicada dentro de la demarcación de un área natural protegida por el Estado o área integrante del Patrimonio Cultural de la Nación declarada conforme a Ley.*
- b) *El área peticionada no deberá ser mayor a la autorizada con anterioridad al presente reglamento. En caso de solicitudes de áreas mayores, el usuario anexará a su solicitud un expediente donde exponga la viabilidad técnico - económica del área solicitada.*
- c) *La solicitud se dirigirá a la AAA del ámbito jurisdiccional donde se localiza el área a ser sembrada. Los usuarios actuales tendrán prioridad para la renovación de las autorizaciones, siempre que hayan cumplido con las obligaciones señaladas en el presente reglamento. Las renovaciones de las autorizaciones se presentarán hasta el último día útil del mes de marzo del año siguiente al de la vigencia de la autorización.*
- d) *En caso de existir concurrencia de solicitudes, para áreas nuevas o en las que el usuario actual no considere la renovación de su autorización, se considerará el orden de presentación de las mismas.*

Artículo 21°.- Obligaciones del titular de la autorización de uso temporal del espacio de faja marginal y/o ribera del río

Las obligaciones del titular de la autorización de uso temporal del espacio de faja marginal y/o ribera del río, son:

- a) *Utilizar el espacio de la faja marginal y/o ribera del río para el fin otorgado, con eficiencia técnica, garantizando su mantenimiento y protección, la prevención de riesgo de erosión y evitando la deposición de escombros y su contaminación.*

- b) *Cumplir oportunamente con el periodo de la autorización.*
- c) *Permitir las inspecciones que realice o disponga la AAA, en cumplimiento de sus funciones.*
- d) *Contribuir a la conservación y mantenimiento de la faja marginal y/o ribera del río.*
- e) *Dar aviso oportuno a la AAA, por causas justificadas, la modificación, suspensión o extinción de la autorización.*
- f) *No destruir las defensas vivas naturales o defensas ribereñas habilitadas por el Estado.*
- g) *No coadyuvar a la vulnerabilidad y la erosión lateral de las márgenes de riberas y cauces u obras hidráulicas habilitadas por el Estado.*
- h) *No realizar la tala de bosques.*
- i) *Respetar los espacios para el uso primario del agua, el abrevadero de ganado de pastoreo y actividades en general, conforme a lo establecido en el Artículo 74° de la Ley.*
- j) *Otras que la AAA considere convenientes.*

DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS TRANSITORIAS

Primera.- *En los ámbitos administrativos donde aún no se hayan implementado las AAA, corresponderá a las Administraciones Locales de Agua que resulten competentes la aplicación del presente Reglamento.*

Segunda.- *Las actividades ejecutivas de delimitación de fajas marginales y Resoluciones Administrativas emitidas por las ex Administraciones Técnicas de Distritos de Riego (ATDR) y las que a la fecha hayan sido expedidas por las Administraciones Locales de Agua (ALA), seguirán vigentes.*

DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA FINAL

ÚNICA.- *Apruébese el ANEXO I y ANEXO II que forman parte integrante del presente Reglamento.*

ANEXO I
Estudio de Delimitación de Faja Marginal
(Contenido Referencial)

1. *Introducción*

2. *Objetivos*

3. *Metas*

4. *Base Legal*

5. *Antecedentes*

6. *Revisión de Literatura*

7. *Metodología Aplicada*

Actividades de Campo, Gabinete y/o Simulación Hidráulica, identificación de áreas de inundación, determinación de riberas, etc.

8. *Aspectos Geográficos y Fisiográficos del Tramo*

9. *Criterios de Delimitación*

Hidráulico-Hidrológico, descargas máximas de avenidas, fisiografía del tramo a delimitar la faja marginal, perfil del río en el tramo, secciones transversales, puntos de referencia; niveles alcanzados en avenidas máximas; criterios ambientales, sociales, legales; etc.

10. *Producto*

Documento Técnico.- Memoria Descriptiva, planos en coordenadas UTM - WGS 84, láminas, gráficos, etc.

ANEXO II

Formato 1 : *Sobre la codificación y relación de hitos en coordenadas UTM - WGS 84 para la demarcación de la faja marginal de cursos fluviales y cuerpos de agua delimitados.*

Progresiva del tramo del curso fluvial	Relación de hitos georeferenciales para la señalización del tramo de F.M. delimitado					
	Margen Derecha			Margen Izquierda		
	Código del	mEste	mNorte	Código del	mEste	mNorte
P1:0+000	H1					
Pn:0+000						

Fuente: Archivos ANA.

Formato 2 : *Registro de Usuarios Temporales de Ribera y Faja Marginal*

Autoridad Administrativa del Agua (AAA):				Organización de Usuarios de Agua			
Autoridad Local del Agua (ALA)				Sector de Riego:			
Campaña Agrícola:				Sub Sector de Riego:			
Orden	Nombre del Usuario	N° Resolución Administrativa	Periodo de la ocupación	Fuente de Agua		Condición de la Autorización	
				Nombre	Margen	Superficie	Tipo de

Fuente: Actualizado en base al Instructivo "Definición de linderos de propiedades marginales, fajas marginales y autorizaciones de ocupación temporal de riberas naturales con fines de siembra de cultivos temporales"-DGAS-1980.

Formato 3 : Registro de Propiedades Marginales

<i>Autoridad Administrativa del Agua (AAA):</i>					<i>Organización de Usuarios de Agua</i>				
<i>Autoridad Local del Agua (ALA)</i>					<i>Sector de Riego:</i>				
<i>Campaña Agrícola:</i>					<i>Sub Sector de Riego:</i>				
<i>N° de registro</i>	<i>Nombre del Usuario</i>	<i>Ubicación política</i>			<i>Fuente de Agua</i>		<i>Condición de la autorización</i>		
		<i>Distrito</i>	<i>Provincia</i>	<i>Región</i>	<i>Nombre</i>	<i>Margen</i>	<i>Superficie</i>	<i>Tipo de</i>	<i>Tipo de</i>

ANEXO 5-C

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL FORO “PROBLEMAS EN EL MANEJO DE RÍOS EN ÁREAS URBANAS”

28 Y 29 DE ABRIL DE 2011

CAPÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL DEL CONSEJO DEPARTAMENTAL DE LIMA DEL COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ

ORGANIZACIÓN Y PRESENTACIÓN DEL FORO:

Ing. CIP Elsa Carrera Cabrera, Presidente del Capítulo de Ingeniería Civil

EXPOSICIONES

Arturo Rocha Felices: INTERACCIÓN DE LA DINÁMICA FLUVIAL Y EL DESARROLLO URBANO.

Juan José Velásquez Díaz: HIDROLOGÍA DEL RÍO RÍMAC.

Petronila Ibáñez Lagorio: ESTUDIO DEL MODELO HIDRÁULICO EN FONDO MOVIL DEL RÍO RÍMAC.

Roberto Luis Campaña Toro: FAJA MARGINAL EN TRAMOS URBANOS DE RÍOS.

Arturo Rocha Felices: EL IMPACTO DEL FENÓMENO DE EL NIÑO EN ZONAS URBANAS.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. *El río y la ciudad que se desarrolla en sus márgenes constituyen una unidad que debe ser comprendida y tratada como tal. Sin embargo, se trata de una relación compleja, pues ambos sufren cambios continuamente, lo que da lugar a una fuerte interacción entre la dinámica fluvial y el desarrollo urbano.*
2. *Son los centros urbanos los que se acercan a los ríos y no estos a aquellos. Cuando no existe el planeamiento urbano adecuado, las ciudades crecen desordenadamente, ocupan el cauce fluvial y producen estrechamientos, a veces excesivos, lo que trae como consecuencia que las grandes crecidas fluviales causen daños a las obras e instalaciones ubicadas en sus inmediaciones, por socavación o por inundación. En la costa peruana, y en*

especial en el río Rimac, hay numerosos ejemplos de esta falta de planeamiento.

3. *Si bien los objetivos primarios del manejo de los ríos deben ser el proveer de agua y seguridad ante inundaciones a las poblaciones ribereñas, no es menos importante el brindarles un entorno ambientalmente saludable y estético.*
4. *La incorporación al paisaje urbano de los ríos que atraviesan las ciudades y que tienen largos periodos sin descargas significativas y, eventualmente, grandes caudales acompañados de fuerte cantidad de sólidos, presenta enormes dificultades que sólo pueden tratarse de un modo integral y multidisciplinario, pues su enfoque es holístico.*

En el planeamiento del uso del suelo y en el diseño de las obras de ingeniería ubicadas en las proximidades de un río o sobre el lecho fluvial es necesario tener presentes los conceptos de Hidráulica Fluvial, incluyendo los de cauces, riberas y fajas marginales. Sin embargo, no es fácil definir el ancho de un río. Su inadecuada consideración y la del área de influencia del río traen numerosos daños a las obras ubicadas en sus inmediaciones. Una decisión equivocada implica no solo la invasión del "Dominio Público Hidráulico", sino un hecho físico innegable: la ocupación del área que pertenece al río y que éste, en algún momento tratará de recuperar.

5. *En la relación río-ciudad es necesario tener presente que según la Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338) las fajas marginales de los ríos son bienes de "Dominio Público Hidráulico" y "están conformadas por las áreas inmediatas superiores a las riberas de las fuentes de agua naturales o artificiales".*

El artículo 74° de la misma ley afirma que la faja marginal es necesaria para la protección, el uso primario del agua, el libre tránsito, la pesca, caminos de vigilancia u otros servicios.

Según el reglamento de la Ley, los criterios para la definición de la faja marginal son:

- a) *"La magnitud e importancia de las estructuras hidráulicas de las presas, reservorios, embalses, canales de derivación, entre otros.*
- b) *El espacio necesario para la construcción, conservación y protección de las defensas ribereñas y de los cauces.*
- c) *El espacio necesario para los usos públicos que se requieran.*
- d) *La máxima crecida o avenida de los ríos, lagos, lagunas y otras fuentes naturales de agua. No se considerarán las máximas crecidas registradas por causas de eventos excepcionales."*

6. *Es evidente que en numerosos ríos de la costa peruana, y en especial en las grandes ciudades, el crecimiento urbano en el entorno ribereño ha producido afectaciones ecológicas, que si bien son menos evidentes para la sociedad, han sido también hechos irrefutables. Así por ejemplo:*
 - a) *La eliminación de áreas de inundación ha privado a la flora y fauna ribereñas de hábitats de bajas velocidades necesarios para su subsistencia.*
 - b) *Los procesos de degradación y la agradación de lechos asociados a la presencia de encauzamientos ha privado a la fauna ribereña de lugares de desove y refugio de especies ribereñas.*
 - c) *El incremento de velocidades asociado a los estrechamientos de cauces ha impedido que las especies salmónidas y crustáceas puedan remontar las corrientes hacia lugares de reproducción.*
 - d) *La presencia de diques de encauzamiento ha roto la conectividad lateral entre el cauce y las áreas naturales de inundación.*
 - e) *La existencia de barrajes ha roto la conectividad longitudinal de los cursos.*
7. *La realidad es que en la mayor parte de zonas urbanas las fajas marginales de los ríos han sido implementadas con posterioridad a la ocupación urbanística. Esto ha determinado que en algunos tramos encauzados por diques, estos se hayan convertido de hecho en los límites de la faja marginal. En la mayoría de los casos el entorno fluvial limitado por los diques presenta deficiencias de seguridad ante inundaciones, procesos fluvio-morfológicos no deseados en marcha y afectaciones ecológicas evidentes.*
8. *Falta una autoridad única para el manejo de cada río y de la cuenca, especialmente en los tramos urbanos. Hay múltiples responsables, lo que dificulta o impide el control adecuado del río y de su interacción con las instalaciones vecinas, lo que es muy grave en los tramos urbanos.*
9. *Hay ríos como el Rímac que en realidad son torrentes, de régimen muy irregular, escasos de agua, con mucho transporte de sólidos y gran contaminación, en los que preocupa los estrechamientos causados por acciones humanas que provocan aumento de la velocidad de la corriente y la peligrosa degradación del cauce. Preocupa también la erosión de la cuenca, la irregularidad de las descargas y el elevado grado de contaminación que presentan, lo que dificulta el aprovechamiento del recurso y la incorporación al paisaje urbano. Resulta claro que el maltrato creciente que viene sufriendo el Rímac no puede continuar.*

10. *Un fuerte y creciente porcentaje del tiempo el cauce del río Rímac, ubicado aguas abajo de la captación de La Atarjea, se encuentra seco, al igual que otros ríos de la costa, lo que complica cualquier proyecto de manejo ambiental y/o embellecimiento de ese tramo fluvial. En relación con el caudal mínimo en el río Rímac se observa que las derivaciones para agua potable y otros usos, han llegado al límite de la cantidad disponible de agua, por lo que es necesario poner en marcha nuevos proyectos, para el abastecimiento de la ciudad y para los aspectos sanitarios y ecológicos.*
11. *La información hidrológica de muchos de los ríos de la costa peruana, y en especial del río Rímac, es de baja confiabilidad. Esto se debe a varios factores entre los que está la metodología de medición de caudales de avenidas. Se ha constatado que en muchos casos los valores “medidos” corresponden a meras extrapolaciones realizadas a partir de registros que relacionan niveles de agua en el río con caudales medidos muy por debajo de los máximos observados. Las “mediciones” de grandes avenidas en el río Rímac se han realizado en cuatro secciones diferentes del río, durante el periodo 1920 a 2011.*
12. *Estudios hidrológicos de avenidas realizados en el pasado para proyectos en el río Rímac muestran diferentes resultados para iguales probabilidades de ocurrencia. Los mismos se identifican principalmente con la longitud de la serie histórica utilizada y la selección de la distribución de mejor ajuste de los registros de grandes caudales.*
13. *El Fenómeno de El Niño (FEN), con características de Meganiño, es una realidad que no puede ignorarse en la costa norte y central del Perú, pues su periodo de recurrencia para la costa norte es del orden de cincuenta años, con base en la información histórica. En consecuencia, tenemos que convivir con el FEN y aceptar que su presencia intensifica notablemente la interacción entre la dinámica fluvial y el desarrollo urbano.*
14. *Las obras de ingeniería son muy vulnerables al exceso de agua por lluvia o por escorrentía. Los Meganiños han causado en diferentes épocas enormes daños a las ciudades y a las obras de ingeniería, los que podrían haber sido menores mediante un adecuado planeamiento y diseño.*
15. *Hay una interacción profunda entre las obras de ingeniería y la naturaleza. La mayor parte de los daños se origina en una inapropiada consideración de los aspectos hidráulicos e hidrológicos vinculados a las obras de ingeniería. La aceptación de la ocurrencia de Meganiños tiene que llevarnos a la adopción de nuevos criterios de diseño que incluyan la consideración de hidrogramas de crecidas.*
16. *Uno de los problemas más estudiados y siempre actual de la ingeniería fluvial es el de las inundaciones, las que ocurren en casi todas las partes del mundo*

y son los desastres, originados en fenómenos naturales, que causan mayor cantidad de víctimas a nivel mundial. En el Perú, especial, pero no únicamente durante el FEN, las inundaciones por lluvia, por desborde fluvial o por ambas causas, han producido importantes daños en los centros poblados y los riesgos de inundaciones urbanas son cada vez mayores.

17. *La causa principal de los daños radica en una falta de coordinación entre el manejo de la cuenca y del río y en la falta de planificación del uso del suelo. La mala ubicación de los centros poblados con respecto a la amenaza que representa el agua es la causa esencial de los daños que se presentan, los que, en casi todos los casos son perfectamente evitables.*
18. *Las estructuras construidas sobre el lecho de un río están sujetas a sufrir algún tipo de daño por socavación fundamentalmente. En el Perú y por la ocurrencia de los últimos Meganiños (1983 y 1998), un número considerable de puentes resultó destruido o afectado. La acción del agua fue la principal causa de las fallas ocurridas.*
19. *Las características especiales, ya descritas, de ríos como el Rímac y la baja confiabilidad de la información hidrológica obligan a que las estructuras importantes que comprometan el cauce fluvial tengan que ser estudiadas en un modelo a escala reducida (modelo hidráulico), en el que se puede reproducir el flujo a dos fases (agua más sedimentos) y la tridimensionalidad del escurrimiento. En un modelo hidráulico se puede estudiar con mucha facilidad un gran número de posibilidades, involucrando un conjunto de variables que se presentan en la naturaleza y del propio diseño a ensayar.*
20. *El estudio en modelo hidráulico permite la obtención de un diseño más seguro en comparación con los "márgenes de seguridad" que un diseñador debiera considerar de no contar con él. Esto permite adoptar dimensiones justas para un funcionamiento eficiente. Un ejemplo de esto fueron los resultados obtenidos con el "Estudio del Modelo Hidráulico en Fondo Móvil del Río Rímac, Tramo Puente El Ejército" (LNH, 1997).*

RECOMENDACIONES

1. *Debe haber en forma real y efectiva una autoridad responsable de cada cuenca en su integridad y del manejo del río. En el caso del Rímac esto es absolutamente urgente.*
2. *La incorporación del río a la ciudad debe ser una actividad multidisciplinaria y tener un enfoque holístico en el que la solución de los problemas de hidráulica e hidrología sea de prioridad absoluta para lograr así una decorosa "fachada fluvial" del río a la ciudad.*

3. *Debe detenerse el maltrato creciente que vienen sufriendo muchos ríos, especialmente el Rímac. Debe impedirse nuevos estrechamientos de los cauces fluviales. Por lo tanto, deben fortalecerse las labores de conocimiento del río, la medición de caudales, la preservación de la cuenca, el afianzamiento de caudales, la recuperación del ancho fluvial y la disminución de la contaminación, para acercarnos así a la restauración fluvial.*
4. *Debe tenerse presente y solucionarse el problema de que la oferta de agua del Rímac es insuficiente, no solo para el abastecimiento de la ciudad, cuya demanda es creciente, sino para dar a su cauce las más elementales condiciones de salubridad y de ornato.*
5. *La delimitación de fajas marginales debería adicionar de manera explícita la componente de recuperación ambiental de los ríos. Esto implicaría tomar en cuenta aspectos de mejoramiento de hábitat fluviales para las especies que tradicionalmente formaron parte del ecosistema particular.*
6. *El concepto de faja marginal debe tomarse en cuenta en la planificación del crecimiento de las ciudades. El prohibir que las ciudades y centros poblados se expandan en las proximidades de los ríos, sin haber realizado antes un cuidadoso estudio hidráulico, permitirá evitar la “creación” de sectores potencialmente inundables.*
7. *En las situaciones en que la ciudad ya se haya desarrollado en zonas potencialmente inundables, la atención debe centrarse en:*
 - a) *Prevenir el desbordamiento.*
 - b) *Implementar sistemas de alerta temprana para avisar a la población de la inminencia de desbordes.*
 - c) *Proveer de sistemas de drenaje rápido en caso ocurra la inundación.*
 - d) *Considerar la reubicación de poblaciones y/o infraestructura vital en sectores donde se evalúe que la ocurrencia de una inundación podría ocasionar pérdidas de vidas humanas o daños materiales cuantiosos.*

Estas consideraciones, así como las expuestas en la recomendación anterior, adquieren particular relevancia en los sectores históricamente afectados por el Fenómeno El Niño.

8. *Los planes de ornato y embellecimiento de las ciudades que consideren la incorporación del río, en cuyas márgenes o proximidad se encuentren, deben considerar, como parte de un estudio multidisciplinario:*
 - a) *El comportamiento fluvial durante el Fenómeno de El Niño, en las zonas en las que éste ocurre.*
 - b) *La recuperación ambiental del río.*

9. *En el diseño de las estructuras, como los puentes, se debe considerar que la ocurrencia del Fenómeno El Niño significará un hidrograma de crecidas que tendrá que tomarse en cuenta para el cálculo de la socavación y de los encauzamientos.*
10. *Toda vez que una estructura comprometa el cauce fluvial, se hace necesario recurrir al estudio en modelo hidráulico, en el que se puede estudiar con mucha facilidad un gran número de posibilidades, combinando lo que se presenta en la naturaleza y las variaciones del propio diseño a ensayar.*
11. *El río Rímac desde el punto de vista hidrológico – hidráulico ha sufrido muchos cambios que en la actualidad (año 2011) obligan a la necesidad de ser muy cuidadosos en el desarrollo de nuevos proyectos. Se hace necesaria la participación de diferentes disciplinas o especialidades.*
12. *La determinación de un caudal de diseño para una estructura que compromete el cauce del río Rímac, debe ser cuidadosamente estudiada, tomando como referencia estudios anteriores y el comportamiento de estructuras existentes. Debe establecerse el riesgo de falla y las consecuencias de que esto ocurra, así como el tiempo de vida que se espera de la estructura, para calcular el periodo de retorno y como consecuencia de ello el caudal o el hidrograma de diseño del proyecto.*
13. *En el caso de ríos de la costa del Perú debe tomarse en cuenta que las aguas que discurren en el periodo de estiaje (abril a diciembre) corresponden en proporción importante a aguas servidas, residuos industriales, vertimientos orgánicos de camales y efluentes mineros que niegan la oportunidad de desarrollar proyectos de recuperación de las áreas vecinas y su puesta en valor, a menos de que se incremente el caudal mínimo del río al límite que permita una calidad de agua aceptable ambientalmente (Caudal Ecológico).*
14. *En general deben evitarse las intervenciones del cauce. En los casos en que debido a intervenciones previas (estrechamientos o modificaciones de pendiente) se hayan producido cambios morfológicos de magnitud relevante (erosión del lecho o sedimentación), esto debe ser evaluado con especial atención. Su no consideración podría dar lugar a fallas estructurales que podrían ocasionar pérdida de vidas humanas y/o pérdidas económicas que lamentar.*
15. *Los proyectos que comprometan el cauce de los ríos deben ser materia de una evaluación rigurosa por parte de ingenieros con experiencia en Proyectos Hidráulicos y de profesionales de otras disciplinas.*

Referencias

1. AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA. **Reglamento para la Delimitación y Mantenimiento de Fajas Marginales en Cursos Fluviales y Cuerpos de Agua Naturales y Artificiales**. Resolución Jefatural N° 300-2011-ANA. 23 mayo 2011.
2. CAMPAÑA TORO Roberto Luis. **Faja marginal en tramos urbanos de ríos. Aplicación al tramo urbano del río Chillón**. Foro “Problemas en el Manejo de Ríos en Áreas Urbanas”, Colegio de Ingenieros del Perú, Consejo Departamental de Lima, Capítulo de Ingeniería Civil, publicado en la revista “Ingeniería Civil” año 09-2011.
3. COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERU- CAPÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL. **Conclusiones y recomendaciones del foro “Problemas en el manejo de ríos en áreas urbanas”**. Lima, Perú, 28 y 29 de abril 2011. Revista “Ingeniería Civil”, año 09-2011, Edición 46 .
4. MARTÍN VIDE Juan P. **Ingeniería de Ríos**. Universidad Politécnica de Cataluña Barcelona, 2007.
5. MARTÍNEZ VARGAS Alberto y MARTÍNEZ DEL ROSARIO José. **Defensas Ribereñas en el río Rímac**. Facultad de Ingeniería Civil, UNI, Sección de Postgrado, Boletín Técnico N° 8, Mayo-Agosto 2003.
6. PALOMINO VELAPATIÑO Gladys Zuly y CAMPAÑA TORO Roberto (Asesor). **Medidas de atenuación de avenidas en la cuenca baja del río Chillón**. Tesis de Grado. UNI, 2011.
7. REPÚBLICA DEL PERÚ. **Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos**. Decreto Supremo N° 001-2010-AG, 2010.
8. REPÚBLICA DEL PERÚ. **Ley de Recursos Hídricos**, 2009.
9. RICHARDSON E.V., SIMONS D.B. y otros. **Highways in the River Environment**.
10. ROCHA FELICES Arturo. **Interacción de la dinámica fluvial y el desarrollo urbano**. Foro “Problemas en el Manejo de Ríos en Áreas Urbanas”, Colegio de Ingenieros del Perú, Consejo Departamental de Lima, Capítulo de Ingeniería Civil, publicado en la revista “Ingeniería Civil”, Año 2011.
11. ROCHA FELICES Arturo. **¿Cuál es el ancho de un río y sus implicancias para el diseño de las obras viales?** IX Congreso Internacional de Obras de Infraestructura Vial, organizado por el Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG). Lima, septiembre 2010.
12. ROCHA FELICES Arturo. **Comentarios sobre Aspectos Hidráulicos del Manual de Diseño de Puentes**. IV Congreso de Internacional Ingeniería Estructural, Sísmica y Puentes. Lima, Junio 2010.
13. ROCHA FELICES Arturo. **Revisión de los estudios del encauzamiento y de los puentes ferroviarios en la quebrada Alcamayo-Cuzco**. Instituto de Recursos Naturales (INRENA). Diciembre 2004.
14. ROCHA FELICES Arturo. **Interacción del comportamiento fluvial y las obras viales durante el Fenómeno de El Niño**. II Congreso Nacional de Obras de Infraestructura Vial. ICG. Lima, agosto 2003.

15. RODRÍGUEZ AGUILERA Patricio y VILLODAS Rubén. **Delimitación del dominio público hidráulico y el ordenamiento de las áreas inundables en las márgenes de los ríos de la provincia de Mendoza.** Jornadas Internacionales sobre Gestión del Riesgo de Inundaciones y Deslizamientos de Laderas. Brasil, Mayo 2007.
16. TRIBUNAL CONSTITUCIONAL. **Sentencia.** 22 diciembre 2001.
17. VILLARROYA ALDEA Carlos. **La delimitación del Dominio Público Hidráulico y el proyecto LINDE.** Ambienta. Setiembre, 2004.

CAPÍTULO 6

AVENIDAS, SEDIMENTOS Y QUEBRADAS

6.1 Introducción

Uno de los problemas más interesantes y siempre actual de la ingeniería fluvial es el de las avenidas que se presentan en los cursos de agua. Las avenidas son fenómenos naturales producto de determinada combinación de agentes hidrometeorológicos. En la costa norperuana las grandes avenidas se asocian generalmente al Fenómeno El Niño; sin embargo, algunas veces ocurren sin que se presente un Niño. También puede suceder que se presente un Niño y no haya grandes avenidas. El conocimiento y estudio de las avenidas es fundamental para el planeamiento y diseño de las estructuras hidráulicas en general y de las obras viales que interactúan con ríos y quebradas. Es bastante común que las obras viales fallen por causas hidráulicas. De acá la necesidad de estudiar las avenidas y las descargas extraordinarias de los cursos fluviales.

La Hidrología, a partir de la información existente, determina la probabilidad de ocurrencia de avenidas de determinada magnitud. Este es un estudio básico que se realiza independientemente de la obra u objetivo de que se trate. Es parte esencial del conocimiento y caracterización de un río. Si una cierta avenida no queda contenida en la caja fluvial (cauce) se produce el desbordamiento y la consiguiente inundación. En consecuencia, el estudio de las avenidas corresponde a la Hidrología y el de las inundaciones a la Hidráulica. Últimamente, por influencia de la lengua inglesa, se confunde avenidas con inundaciones, pues en ese idioma ambas se designan con la palabra “*flood*”.

Desde hace años la Ingeniería Hidráulica ha venido estudiando medidas para controlar las inundaciones. Sin embargo, cada vez se hace más evidente que no hay protección absoluta y total, y que a medida que se diseñan obras de mayor envergadura los costos aumentan enormemente. Por lo tanto, el control de las inundaciones no debe reposar exclusivamente en medidas infraestructurales, que son necesarias y complementarias, sino que debe considerar prioritariamente la planificación del uso de la tierra, lo que incluye ciertamente la correcta ubicación de las obras de ingeniería.

Constantemente vemos como se construye casas, urbanizaciones, estructuras, caminos, puentes e instalaciones de todo tipo en las áreas naturales que pertenecen al río, o a la quebrada, y que ocupa durante las crecidas. En el Capítulo 5 se ha presentado la problemática relacionada con los Cauces, Riberas y Fajas Marginales, muy vinculada al tránsito de las avenidas. Cada cierto tiempo se presenta una avenida que puede no ser muy grande y que, sin

embargo, da lugar a una inundación con los consiguientes daños y pedidos de ayuda. Mientras no se imponga un uso racional de la tierra que tenga en cuenta el comportamiento fluvial no habrá solución económicamente posible para los problemas de las inundaciones, que eventualmente afectan también a las obras viales. Lopardo y Seoane señalan que: “Las autoridades se acuerdan del agua cuando los pueblos ya se inundaron.”

El conocimiento de las grandes avenidas y de su probabilidad de ocurrencia es de vital importancia para el diseño de puentes que interactúan con cursos de agua, y de obras, viales o no, ubicadas en sus inmediaciones. Muchas veces las obras viales ocupan el cauce fluvial que, como se ha visto en el capítulo precedente, es el continente de las aguas durante sus máximas crecientes. Es también importante conocer las obras y medidas de prevención que se planea tomar para el control de las avenidas, pues repercutirán en la estabilidad de las obras ubicadas en las inmediaciones de los ríos. Así por ejemplo, si se construye una gran presa, para cualquier finalidad, se producirá degradación (socavación) aguas abajo y agradación (sedimentación) aguas arriba, lo que repercutirá negativamente sobre las estructuras existentes, viales o no, en contacto con el río.

Las avenidas vienen por lo general asociadas a grandes cantidades de sedimentos (sólidos) y de cuerpos extraños que crean dificultades en las obras ubicadas sobre el cauce fluvial o en sus inmediaciones.

En el Capítulo 10 se examina las causas más comunes de las fallas en puentes. Prácticamente el 50% de las fallas en puentes que ocurren en todo el mundo tienen su origen en las grandes descargas presentadas. La mayor parte de las fallas, el 60%, se debe a la socavación. Durante el Meganiño 1982-83, caracterizado por fuertes crecidas fluviales especialmente en la costa norperuana resultaron afectados o destruidos 55 puentes. Quince años después con el Meganiño 1997-98 los daños en la infraestructura vial fueron también considerables. Prácticamente, la totalidad de las fallas de puentes ocurridas en ambos Meganiños tuvo su origen en problemas de Hidráulica Fluvial. Es, pues, indudable que la experiencia a nivel mundial indica que la acción del agua es la causa principal de las fallas que ocurren en los puentes que interactúan con ríos. En lo que respecta a caminos y vías férreas, las descargas de quebradas causan enormes daños. Los huaicos, en realidad *llocllas*, son causa frecuente de las fallas. *Lloclla* es una avalancha de lodo y piedras.

En nuestro país son preocupantes las descargas eventuales de las quebradas que causan fuertes daños a las obras viales, urbanas y de todo tipo. La situación se agrava con la descarga de huaicos.

Resulta, pues, evidente, la necesidad de estudiar las avenidas, quebradas y descargas de sólidos de los cursos de agua. En términos generales tenemos en nuestro país las siguientes dificultades:

- a) Escasez de mediciones y baja confiabilidad de ellas. Como se verá más adelante, tenemos graves deficiencias en la medición de las grandes descargas de nuestros ríos, lo que influye negativamente en el cálculo de las avenidas y en el planeamiento de las medidas de control. Esta circunstancia desfavorable no puede dejar de considerarse en nuestros diseños.
- b) Aparición eventual de inusitadas lluvias en zonas generalmente secas, no causadas por lo que internacionalmente se conoce como Fenómeno El Niño.
- c) Aparición del Fenómeno El Niño (FEN).
- d) Huaicos.
- e) Mal uso de la tierra (ocupación de áreas pertenecientes a ríos y quebradas).
- f) En muchos casos, un tratamiento inadecuado del problema.

6.2 Las avenidas

Una avenida, crecida, creciente, riada, o aluvión como también se le llamaba hace algunos años, es por lo general producto de una combinación de determinadas condiciones hidrometeorológicas y no podemos hacer nada para evitarla. Las crecidas de los ríos tienen varias definiciones. En el “Glosario del Plan Nacional de Ordenamiento de los Recursos Hidráulicos” se señalaron las siguientes:

- a) “Elevación rápida y habitualmente breve del nivel de las aguas en un curso hasta un máximo desde el cual dicho nivel desciende a menor velocidad.
- b) Caudal relativamente alto, medido por altura o gasto.
- c) Avenida de un curso de agua originada por grandes lluvias o por fusión de nieve.
- d) Elevación temporaria y móvil del nivel del agua en una corriente de agua o lago”.

Las avenidas son expresión del carácter aleatorio de las descargas de los ríos y se deben casi siempre a la precipitación que ocurre sobre la cuenca. Por lo tanto, una avenida extraordinaria se origina, por lo general, en una precipitación

extraordinaria. La ocurrencia de crecidas de los ríos se describe en términos probabilísticos. Es decir, que cada avenida va asociada a una probabilidad de ocurrencia. Las avenidas de los ríos son muy variables en el tiempo, especialmente en la costa norperuana, en la que se presentan notables contrastes entre los máximos y mínimos caudales medidos (o simplemente estimados o apreciados, como ocurre en la mayor parte de los ríos del Perú). Las características de la cuenca en lo que respecta a tamaño, pendiente, cobertura vegetal y otras, son importantes y deben analizarse junto con el patrón de precipitación para explicar las grandes avenidas.

Excepcionalmente puede presentarse una avenida por falla de una presa. Esto ha ocurrido en algunas partes del mundo.

El registro y estudio de las máximas avenidas anuales permite determinar, bajo ciertos supuestos, la probabilidad de ocurrencia de avenidas iguales o mayores a una cierta magnitud. Este es un estudio típicamente hidrológico, basado en mediciones de campo que deberían ser confiables y en la aceptación de determinadas leyes probabilísticas. El estudio de las avenidas que pueden ocurrir en un río es independiente del proyecto de que se trate. Es descriptivo del comportamiento de la cuenca y del río; forma parte de los estudios básicos.

La probabilidad de ocurrencia de avenidas debe calcularse, tanto para la época de abundancia (que se vinculan a la seguridad de las estructuras y a la estabilidad fluvial) como para la época de estiaje (que se requiere para fines constructivos). Evidentemente, que estos cálculos deben incluir la incidencia de grandes lluvias, se deban o no al FEN. Las avenidas no deben caracterizarse para fines de un proyecto de ingeniería, con términos aislados, subjetivos e imprecisos, como: "Avenidas máximas y extraordinarias", "Caudal máximo" y otros similares.

6.2.1 Descripción de las avenidas

Una avenida o inundación, según el caso, puede ser apreciada o descrita de diversas formas. Ven Te Chow señala cuatro de ellas, las que se presentan y comentan a continuación:

- a) Por el máximo nivel alcanzado por las aguas. Este es el parámetro más evidente y es también el que permanece más tiempo en la memoria de los habitantes de la zona. Se usa frecuentemente en los ríos de la selva peruana, en los que la inestabilidad de la sección transversal y del recorrido, hacen difícil la utilización de métodos de aforo. Allí resulta más útil determinar la "creciente" (niveles máximos) y la "vaciante" (niveles mínimos). Es también útil para describir la magnitud de una inundación. Los niveles alcanzados por el agua durante una avenida o una inundación pueden y deben medirse en lo posible con aparatos registradores, como los limnógrafos. Los niveles alcanzados también quedan presentes por medio

de huellas o marcas en los árboles, postes, cercos o casas y, ciertamente, en la memoria de los lugareños. Para los efectos del cálculo de caudales se debe tener presente que durante una avenida hay un cambio importante en la sección transversal del río, causado por los procesos de erosión y sedimentación (degradación y agradación, respectivamente) que se producen en el cauce. Este concepto es útil para calcular la altura del tablero de un puente y la de los diques de encauzamiento asociados al puente. No siempre ocurre que al aumentar el caudal aumente el nivel de la superficie libre. Esto se debe a que con las grandes avenidas suelen presentarse intensos fenómenos de socavación generalizada (degradación).

- b) Por la extensión del área inundada. Cuando la avenida excede la capacidad del cauce y se desborda, la extensión inundada es variable, aun para avenidas iguales, y depende del estado del cauce, de las defensas e, indudablemente, de la pendiente de las áreas ribereñas. Si ella es muy pequeña el área inundada puede ser muy extensa. En realidad, lo que se mide de esta manera no es la avenida, sino la inundación resultante. Muchas veces la medición así realizada puede ser engañosa, pues una gran inundación puede corresponder a una avenida pequeña. Para efectos de la evaluación de los daños agrícolas interesa conocer el tiempo que dura la inundación, pues determinados cultivos pueden soportar un cierto tiempo bajo el agua, pasado el cual se pierden. Los daños en las casas de adobe también dependen del tiempo que dure la inundación.
- c) Por la descarga máxima instantánea. Para su determinación se requiere aforos cuidadosos y aparatos registradores (limnógrafos). Este valor es muy importante para el diseño de puentes, defensas y aliviaderos. Las experiencias ganadas con el estudio de la ocurrencia de grandes lluvias nos enseñan que cuando ellas se presentan con características de Meganiño, en realidad hay un Hidrograma de Crecidas, de Avenidas, caracterizado por un tren de ondas. Estos temas se estudian en los dos capítulos siguientes.
- d) Por el volumen descargado. Para determinados fines este valor puede ser más descriptivo que la descarga máxima instantánea, pues está asociado a la forma del Hidrograma de Crecidas e incluye, por lo tanto, el concepto de duración de la avenida. Las avenidas pueden ser de muy corta duración, casi instantáneas, o de larga duración. El conocimiento del volumen descargado es importante para el diseño de embalses de control de avenidas.

A las cuatro formas anteriores puede añadirse una más, válida para muchos ríos de la costa norperuana.

- e) Por las características del Hidrograma de Crecidas. Durante los grandes Niños se presentan avenidas de larga duración y picos sucesivos, que pueden eventualmente extenderse a lo largo de varias semanas o meses, como se aprecia en la Figura N° 8.1 del Capítulo 8. Los picos sucesivos solían conocerse en la costa norperuana como “puntas” y “repuntas”. Estas avenidas tienen un carácter destructivo muy grande y, usualmente, no se toman en cuenta en los cálculos, lo que trae consecuencias negativas considerables. Pueden deberse o no a lo que internacionalmente se la conoce como Fenómeno El Niño.

6.2.2 Medición de las avenidas

En el Perú tenemos muy escasa información sobre mediciones de las grandes avenidas. Esto ocurre también en otros países, pero en el nuestro es un problema particularmente grave. Esta circunstancia no puede ser ignorada en el diseño de las obras de ingeniería que interactúan con ríos. La baja o nula confiabilidad de los registros de máximas avenidas se debe a varias circunstancias, entre las que están las siguientes:

- a) No todos los ríos, y prácticamente ninguna quebrada, tienen estaciones de aforo.
- b) Las estaciones de aforo no siempre están operativas durante las crecidas de los ríos.
- c) En general, no tenemos instalaciones y condiciones para mediciones de las avenidas, salvo en uno u otro río en el que haya una estructura especial, como una presa o una bocatoma, convenientemente equipada y operada para tal efecto.
- d) En el mejor de los casos, lo que se viene haciendo es extrapolar la validez de la curva altura-caudal, obtenida para gastos pequeños, y considerar que la sección transversal del río es invariable, lo que trae grandes errores, pues se olvida los procesos de agradación y degradación que suelen presentarse en los cursos fluviales durante las avenidas.
- e) Muchas veces simplemente alguien calcula “al ojo” la magnitud de la riada y ese dato se toma como cierto y todos lo repiten.
- f) En general, en la costa norperuana existe una tendencia generalizada a aumentar el tamaño de las avenidas y una tendencia histórica a disminuir la magnitud de los estiajes. La exageración, que a veces ocurre, en la apreciación de la magnitud de las avenidas hace que sea más impactante el pedido de ayuda. La agudización de los estiajes dramatiza la escasez de agua.

La experiencia nacional de los últimos años (por la ocurrencia del Fenómeno de El Niño) nos indica la necesidad, para fines de diseño, de caracterizar una avenida de la costa norperuana por un Hidrograma de Crecidas.

6.3 Predicción de máximas avenidas

Para el aprovechamiento de un río mediante la construcción de obras en contacto con el cauce, para ocupar sus zonas aledañas, para diseñar una bocatoma o un puente, es necesario conocer las avenidas que pueden presentarse. Dicho en otras palabras, lo que se requiere conocer es la probabilidad de ocurrencia de avenidas de una magnitud dada durante la vida del proyecto. La ocurrencia de avenidas mayores que las previstas puede tener para una obra determinada dos tipos de consecuencias negativas:

- a) Imposibilidad de que la obra cumpla a cabalidad la función para la que fue diseñada.
- b) Daños o destrucción de la obra.

Para predecir la ocurrencia de avenidas se recurre a métodos probabilísticos, los que parten del procesamiento de la información existente. Así por ejemplo, durante un periodo de observaciones instrumentales, de cincuenta o cien años, se registra las avenidas ocurridas (máximos valores instantáneos anuales). Se hace luego un análisis estadístico de frecuencia de los caudales medidos y se determina la ocurrencia de avenidas con una cierta probabilidad. Recordemos que se ha dicho que “Esperando un tiempo suficientemente largo, en cualquier río puede presentarse cualquier avenida” y también que “Es imposible que lo improbable no ocurra jamás”.

Los datos instrumentales o sistemáticos antes mencionados son aquellos que han sido obtenidos con cierta rigurosidad, como por ejemplo a partir de la medición de velocidades con correntómetros, o de la carga sobre el vertedero de una presa. En el Perú, las mediciones instrumentales usualmente cubren parcialmente las últimas décadas, en los casos más favorables. Pero, hay datos más antiguos, menos precisos, que se extienden mucho más en el tiempo; son los datos históricos, que se obtienen a partir de testimonios, informes, crónicas, artículos en revistas o libros. Los datos históricos describen lo ocurrido en los últimos siglos. De allí surge la Climatología Histórica. Así por ejemplo, no tenemos mediciones instrumentales de las descargas del río Zaña en el siglo XVIII, pero a partir de la información histórica sabemos de las grandes avenidas ocurridas, como la que causó la destrucción de la ciudad y el valle de Zaña el 15 de marzo de 1720.

A esta información histórica se añade, últimamente, la información “paleohidrológica”, o quizás mejor “paleohidrométrica”, como por ejemplo la correspondiente a los anillos de los árboles. En una investigación realizada por

Saito, Biondi, José D. Salas y otros se señaló que un hecho atractivo de la reconstrucción de series hidrológicas mediante consideraciones dendroclimáticas reside en el hecho de que la información sobre las variaciones de los anillos de los árboles es mucho más extensa que la de las mediciones instrumentales (e históricas, podría añadirse) de los caudales. Esto permite cuantificar periodos secos y húmedos con duración, magnitud y picos alcanzados correspondientes a periodos muy antiguos.

6.3.1 Avenida Máxima Probable

Cuando se construyen obras muy importantes (grandes presas, o eventualmente, un puente estratégico) sobre el lecho fluvial es necesario determinar la Avenida Máxima Probable (A.M.P.), que como lo señala Ven Te Chow en su "Handbook of Hydrology", corresponde a la mayor avenida cuya aparición tiene una razonable expectativa de ocurrencia, dentro de la era climática que vivimos. Es la crecida que puede esperarse que ocurra alguna vez, como consecuencia de una severa combinación de factores meteorológicos e hidrológicos, sin estar vinculada a un periodo de retorno determinado. Es muy rara, pero puede ocurrir en cualquier momento.

Para la determinación de la A.M.P. se requiere partir de la medición de las precipitaciones máximas probables en varias estaciones de la cuenca que tengan condiciones climáticas diversas y de allí generar la escorrentía. El cálculo de la A.M.P. supone la presencia simultánea de factores que determinen que la máxima lluvia dé lugar a la máxima escorrentía. Diversos autores, entre ellos Ven Te Chow, señalan que la A.M.P. es una avenida muy grande que rara vez se usa en los diseños, salvo que se trate de aliviaderos de grandes presas, en las que una falla causaría pérdida de vidas humanas y grandes daños económicos. Por lo tanto, para una gran presa no puede dejar de evaluarse y actualizarse la Avenida Máxima Probable.

A modo de ejemplo se podría recordar que en el Estudio de CGR Ingeniería sobre la "Hidrología de la Cuenca Puyango-Tumbes" (1990) se determinó en la estación "El Caucho" Precipitaciones Máximas Probables en 24 horas tan altas como 776 mm. La Avenida Máxima Probable para la zona baja de la cuenca (donde se ubicarían las presas de Cazaderos y Ucumares, según los estudios de esa época) resultó estar alrededor de 24 300 m³/s. La avenida decamilenaria calculada fue de 26 500 m³/s.

La Organización Meteorológica Mundial tiene importantes recomendaciones para este tipo de cálculos, entre ellas que la longitud de las series pluviométricas no sean inferiores a 20 años. Sin embargo, en la costa norperuana puede haber un periodo de 20 años, o de muchos años más, sin que se presente un evento cálido extremo; por lo tanto, la longitud de la serie debería ser bastante mayor.

6.4 La avenida de diseño

La Avenida de Diseño es el caudal que se escoge, mediante diversas consideraciones, para dimensionar una obra (o una parte de ella). Para su determinación se usa la información básica proporcionada por el estudio hidrológico (Probabilidad de Ocurrencia de Avenidas) y se incorporan los conceptos correspondientes a riesgo, vulnerabilidad, importancia y costo de la obra y muchos otros más, como por ejemplo el tipo de río, área de la cuenca y características de las estructuras. En países como en el Perú, en los que además de escasez de datos hay baja calidad de las mediciones, juegan un papel muy importante la experiencia y el buen tino del ingeniero proyectista para escoger la Avenida de Diseño.

Cuando un río aluvial no ha sufrido la acción humana, es decir, que no tiene defensas ni encauzamientos, su ancho puede extenderse muchísimo al presentarse una descarga fluvial grande. En consecuencia, para construir una obra sobre el lecho fluvial o en sus inmediaciones es indispensable garantizar la estabilidad fluvial mediante una obra de encauzamiento que puede extenderse a lo largo de varios kilómetros.

La Avenida de Diseño debe escogerse de modo de garantizar la estabilidad del río y de las obras de ingeniería construidas en su lecho o en sus inmediaciones y debe tener en cuenta la evaluación de los daños potenciales involucrados en una eventual falla. Ven Te Chow dice que la selección de la Avenida de Diseño es un problema "hidroeconómico". Son, pues, muchas las consideraciones para escoger la Avenida de Diseño.

Los daños resultantes de una falla de la estructura al ser excedida la Avenida de Diseño pueden expresarse en función de un valor económico, estratégico o humano. La posibilidad de pérdida de vidas humanas debe examinarse en primer lugar al escoger la Avenida de Diseño.

La Avenida de Diseño es el máximo caudal que una determinada estructura puede soportar, sin sufrir daños significativos. Dicho en otras palabras, es el máximo caudal que puede escurrir en un río, sin producir la falla de una determinada estructura. Si se presentase una avenida superior a la de diseño, no habría la seguridad de que la estructura permanezca estable y funcionando correctamente. Es, pues, el caudal representativo del río para equilibrar la relación estructura-naturaleza.

Cuando se dice que una cierta avenida tiene un periodo de retorno de 10 años, eso significa que es muy probable que en un lapso de 100 años puedan presentarse 10 avenidas iguales o mayores a esa cierta avenida.

Usualmente se ha venido considerando valores instantáneos, tanto para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de avenidas como para definir la

Avenida de Diseño. Pero, no siempre es así. Como se verá más adelante, la Avenida de Diseño puede, y en algunos casos debe, definirse como un Hidrograma de Diseño.

El principio general de la selección de la Avenida de Diseño es que mientras más graves sean las consecuencias de la falla de la estructura, mayor debe ser su valor, es decir, su probabilidad de no excedencia. Por lo tanto, debe examinarse el riesgo de que la Avenida de Diseño, sea excedida durante la vida del proyecto.

Naturalmente, que si se tratase, por ejemplo de un puente, la selección de la Avenida de Diseño (asociada a un periodo de retorno) no puede dejar de tener en cuenta la importancia del puente, las consecuencias de su falla y, ciertamente, las características del río y la confiabilidad de la información básica, entre otros factores. En muchos países hay reglamentos que ayudan a escoger el periodo de retorno, que no puede ser igual para todos los puentes ni para todos los ríos.

Desgraciadamente, en la mayor parte de los ríos del Perú las series disponibles de datos hidrológicos son muy cortas y de baja calidad, lo que no permite calcular con un razonable grado de confiabilidad las avenidas (o las sequías) correspondientes a determinados periodos de retorno, especialmente si estos son grandes. En algunos lugares existe información sobre lluvias y, a partir de ella, se genera los valores correspondientes de la escorrentía. Por eso no se puede hacer recomendaciones generales sobre la adopción de determinados periodos de retorno para la selección de la Avenida de Diseño, como se hace en otros países.

La selección de la Avenida de Diseño no puede corresponder a la Ingeniería Básica, pues es parte inherente del diseño. Corresponde a su esencia y debe ser determinada por el Jefe del Estudio con la participación de los ingenieros especialistas y del propietario del Proyecto. No es un cálculo hidrológico. Muchas veces la abundancia e imprecisión de términos que se usan para referirse a los caudales, terminan por omitir el de Avenida de Diseño, que es el que interesa comúnmente. Así por ejemplo, ¿Qué es una “avenida máxima”?, ¿Qué es una avenida extraordinaria?

La selección apropiada de la Avenida de Diseño es muy importante. Si se sobredimensiona, los costos aumentarán mucho. Caso contrario, el riesgo aumenta. Para la protección de carreteras usualmente los periodos de retorno escogidos están comprendidos entre 25 y 100 años. Pero, no hay una regla fija.

A lo anterior debe añadirse que luego de los últimos Meganiños ha surgido la necesidad de introducir en determinados diseños el concepto de Hidrograma de Diseño, que se desarrolla más adelante, en el Capítulo 8.

Conviene acá recordar a Sun Tzu quien en “El arte de la guerra” dice: “La victoria siempre se puede predecir, pero no se puede garantizar” y, parodiándolo libremente podríamos decir que las máximas avenidas siempre se pueden calcular, pero no se pueden garantizar.

6.5 Control de avenidas

Una avenida ocurre, generalmente, como consecuencia de una combinación de eventos hidrometeorológicos incontrolables. Por lo tanto, nuestras acciones deben estar encaminadas a mitigar sus efectos. En primer lugar debe estar la determinación del cauce fluvial durante las avenidas, el establecimiento de las áreas que deben reservarse para ser ocupadas por las avenidas (Faja Marginal) y la correspondiente planificación del uso de la tierra. La prevención, así entendida, resulta ser fundamental. En lo que respecta a medidas infraestructurales para el control de avenidas existen varias opciones, señaladas por diversos autores, entre los que están Linsley y Franzini. Ellas son:

- a) **Construcción de presas.** Mediante la construcción de una o más presas ubicadas aguas arriba de la zona a protegerse se crea uno o más embalses con el objeto de realizar la redistribución temporal de la avenida. El agua de la crecida se almacena y luego se libera en un tiempo más largo, con caudales menores. Se disminuye así el valor máximo instantáneo de la avenida. Son, pues, embalses que se dedican exclusivamente al control de avenidas. Esta es una solución costosa que no se ha usado en el Perú.

También se puede usar embalses que tengan otros propósitos, que pudieran ser riego o energía, y dedicar una parte del volumen total para el control de avenidas. Así por ejemplo, el embalse de Gallito Ciego del Proyecto Jequetepeque-Zaña se proyectó con un volumen total de 571 millones de metros cúbicos (MMC) de los cuales 85 MMC correspondían al control de avenidas, 86 MMC al Volumen Muerto (por sedimentación) y 400 MMC al volumen útil. En cambio, la presa de Poechos no tiene ningún volumen especialmente previsto para el control de avenidas; sin embargo, es inevitable que dado su gran volumen de embalse (inicial) tenga un efecto laminador sobre las crecidas. Este embalse no fue concebido para controlar avenidas, sino para eliminarlas lo más rápidamente posible a través del sistema de alivio. En consecuencia, el embalse no debería operarse a un nivel bajo, que si bien generaría un mayor efecto regulador, implicaría que una gran cantidad de sedimentos proveniente de los depósitos de aguas arriba depositase dentro de él.

El efecto regulador de un embalse es mayor en la medida en la que su volumen lo sea. La acertada operación de un embalse para el control de avenidas permite la protección de las zonas ubicadas aguas abajo. Esta es una solución que se emplea en otros países; sin embargo, para tener alta

eficiencia se requiere grandes volúmenes de almacenamiento y también altas capacidades de los conductos de descarga, a fin de lograr el rápido abatimiento del embalse y dejarlo así preparado para la siguiente crecida. A veces ocurre que el río ubicado aguas abajo de la presa no tiene la capacidad suficiente para contener las descargas de alivio de la presa. El problema es complejo, debe ser visto de un modo integral y debe tenerse en cuenta los aspectos técnicos y económicos.

- b) **Encauzamiento.** El encauzamiento de los ríos permite que éstos se mantengan dentro del cauce. El diseño de un encauzamiento es un difícil problema de Hidráulica Fluvial. Muchas veces se combina el efecto de un embalse de control de avenidas y un encauzamiento aguas abajo. El embalse permite, hasta un cierto valor del caudal entrante, que el caudal saliente no exceda de un cierto valor, que es el que corresponde a la capacidad de encauzamiento de aguas abajo. También se puede facilitar el tránsito de la avenida mediante la rectificación del cauce, es decir, eliminando algunas curvas y meandros. Muchas veces resulta conveniente usar espigones para formar un encauzamiento. El encauzamiento, como control de avenidas, puede estar, eventualmente, vinculado al diseño de un puente o de un camino cercano al río y es fundamental para asegurar su estabilidad.
- c) **Mejoramiento del cauce.** Para facilitar el tránsito de una avenida conviene que el cauce se encuentre en las mejores condiciones hidráulicas posibles. Esto significa que la resistencia al escurrimiento debe ser mínima. Por lo tanto, la rugosidad debe ser baja. Debe eliminarse cuerpos y elementos extraños. El cauce debe mantenerse limpio y en las mejores condiciones para el paso de las aguas. Lamentablemente, es frecuente que no se realice la limpieza de cauces y, por el contrario, se arroje desperdicios y basuras, y aun desmonte, que disminuyen notablemente su capacidad de descarga. Los puentes y, especialmente, sus accesos pueden constituir serios obstáculos para el tránsito de las avenidas, especialmente, si el cauce no está en buenas condiciones.
- d) **Desvío u obras de alivio.** A veces resulta conveniente desviar las aguas hacia un cauce secundario, o de alivio, con lo que se logra proteger el valle principal. Un caso muy interesante, aunque poco conocido, es el que se presentó hace muchos años en el río Chancay- Lambayeque. Vale la pena recordarlo en una versión resumida. El texto completo se encuentra en una de las Referencias al tratar las lluvias de 1925 en el departamento de Lambayeque. El valle de Lambayeque es un gran delta, o mejor, un abanico fluvial, constituido por los ríos Lambayeque y Reque y el canal Taymi. Dentro de este sistema hidráulico existía un complejo sistema de canales y acequias que partían de los cursos de agua antes mencionados. Al ocurrir las grandes y sostenidas descargas de 1925 (y de 1926) este sistema fluvial y de abastecimiento de agua se convirtió en una trampa

mortal que conducía grandes cantidades de agua hacia las zonas agrícolas y urbanas, donde se desbordaba y causaba graves inundaciones. Los pueblos quedaron aislados por destrucción de la red vial.

La ciudad de Lambayeque había sufrido varias inundaciones en el pasado. En 1925 la situación era tan grave que el presidente Leguía pidió al ingeniero Charles W. Sutton, por ese entonces Jefe de la Comisión de Irrigación de Piura y Lambayeque, es decir, del antiguo Proyecto Olmos, que de acuerdo con las autoridades locales procediese a defender con preferencia el pueblo, zona o comunidad cuyo peligro fuese mayor. Las autoridades acordaron concentrar sus esfuerzos en la defensa de la ciudad de Lambayeque.

Ante el peligro que existía de falla de las defensas de la ciudad de Lambayeque, la población pedía que desde aguas arriba se desviase el río Chancay-Lambayeque hacia el cauce del río Reque (margen izquierda) mediante la ejecución de la llamada quiebra El Santeño. La ejecución de esta quiebra (desvío de las aguas) significaría una gran protección para Lambayeque, pero, a su vez, implicaba el peligro de que se quedasen en seco varias ciudades y zonas de riego y que otros lugares del valle como Chiclayo, Reque, Monsefú y Eten, y sus respectivas zonas de riego, quedasen inundados por la incapacidad del cauce del río Reque de contener grandes caudales.

Ante el peligro de la inundación de Lambayeque la situación fue evaluada por quienes en ese momento constituían las máximas autoridades políticas y del control de las aguas. En los días siguientes prosiguieron las lluvias y las grandes descargas y era muy grande el peligro de que cediesen las defensas de la ciudad. Cuatrocientos hombres dirigidos personalmente por el ingeniero Sutton procedieron aceleradamente con los trabajos de defensa de Lambayeque.

Fue entonces cuando se pensó seriamente en efectuar la quiebra de aguas arriba (El Santeño), para lo cual se hizo un reconocimiento de campo, pero se encontró que los caudales eran de tal magnitud que se hacía muy difícil actuar sobre ellos. Finalmente, se decidió no efectuar la quiebra por la injusticia que representaba.

El 18 de marzo una fuerte crecida produjo la quiebra natural, según parece, del río Lambayeque al Reque, la que destrozó totalmente el cauce de este último "ensanchándolo desmesuradamente". El río Lambayeque quedó totalmente en seco. Como puede verse, el desvío de un río hacia otro cauce es una decisión que debe tomarse cuidadosamente por las enormes implicancias que puede tener. Como consecuencia de las lluvias antes mencionadas se produjo en el departamento de Lambayeque la

interrupción de las comunicaciones por la destrucción de puentes, vías férreas y caminos.

- e) **Uso de las áreas de inundación.** Frecuentemente los ríos tienen un cauce principal que es por donde generalmente escurre el agua, y un cauce secundario constituido por las áreas de inundación. Las áreas de inundación sólo son ocupadas eventualmente por el agua y, casi siempre, son áreas de gran riqueza y de importante valor urbano o agrícola. Hidráulicamente es difícil el manejo de una gran avenida sin recurrir al uso de las áreas de inundación descritas en el capítulo anterior. Sin embargo, muchas veces ocurre que por falta de una planificación adecuada se olvida que estas áreas constituyen potencialmente cauce del río, se construye en ellas y se les da un uso que no corresponde, lo que trae como consecuencia que al producirse una gran crecida los daños sean muy grandes. El otro extremo sería el de pretender que las áreas de inundación sean intangibles y sin uso alguno. Entre ambos extremos está la posibilidad de planificar su uso y utilizarlas para parques y jardines; en ningún caso para la construcción de viviendas. El uso de las áreas de inundación se combina con uno o más de los métodos de protección antes descritos. En el Capítulo 5 se ha presentado el concepto de faja marginal, cuyos alcances caen dentro del manejo de las áreas de inundación.

En todo caso debe tenerse presente que las obras de defensa por medio de encauzamientos, rectificación de cauces y otras acciones, implican cambios fundamentales en las condiciones del escurrimiento, especialmente en lo que a transporte sólido se refiere; por lo tanto, debe esperarse que como consecuencia de dichas acciones se produzcan cambios fluviomorfológicos importantes. Podría añadirse otro tipo de medidas para el control de los efectos de las avenidas: el anuncio temprano (alerta temprana). El Instituto Geofísico del Perú ha instalado un sistema de Alerta Temprana de Detección de Huaicos para proteger el Radio Observatorio de Jicamarca que está peligrosamente ubicado muy cerca de dos quebradas (Río Seco y Huaycoloro).

Una de las formas de luchar contra las inundaciones reside, desde hace varios años, en el conocimiento de los caudales que se presentarán en las próximas horas o días. En numerosos países se usa ampliamente este método (Alerta temprana) el que normalmente forma parte del manejo y administración de una cuenca y que consiste en la teletransmisión de datos desde la parte alta de ella. Estos datos pueden ser de precipitaciones y de caudales. Es posible, a partir de datos de lluvia, desarrollar para una cuenca determinada un modelo precipitación-escorrentía, que debe ser cuidadosamente calibrado. De modo que con los datos de lluvia se puede predecir los caudales que se presentarán en el río. Es una valiosa herramienta para la defensa de las zonas vulnerables. Así se ha hecho, por ejemplo, recientemente para el río Piura. Con motivo del Meganiño de 1878 la población de Lambayeque se constituyó en lo que ahora llamaríamos Defensa Civil y se usó, con las limitaciones de la época, la

teletransmisión de datos. En efecto, el subprefecto de la provincia de Lambayeque, a cargo de la defensa de la ciudad, consigna que el 21 de febrero de 1878 recibió un telegrama del prefecto del departamento “avisando que había mucho agua en la hacienda Pátapo y que nos preparásemos”.

Los daños causados por las avenidas son de dos tipos. Unos causados por la fuerza de la corriente durante una crecida y que se deben, por lo tanto, a una acción dinámica. Ejemplo típico sería la erosión de la base de una estructura, como un puente. El otro tipo de daños se origina en el desbordamiento de las aguas, las que al salirse de su cauce producen inundaciones.

6.6 El transporte de sólidos

Durante las avenidas se produce un aumento notable del transporte sólido fluvial que se debe tener presente en el planeamiento y diseño de las obras viales que interactúan con ríos. ¿Por qué es importante para las obras viales conocer el transporte de sólidos? Entre las razones más importantes están:

- a) Porque es parte de los estudios de Hidráulica Fluvial.
- b) Para tener información acerca de las grandes cantidades de sólidos que podrían eventualmente incorporarse a los cursos de agua.
- c) Para evaluar mejor los procesos de agradación y degradación.
- d) Para conocer mejor la movilidad fluvial.
- e) Para el diseño de un sistema de espigones.
- f) Para el diseño de las protecciones contra la socavación en puentes, pilares y estribos.

En el Capítulo 11 se presenta algunos “Conceptos Básicos sobre Transporte de Sedimentos”.

6.7 Las quebradas

Los acontecimientos hidrometeorológicos ocurridos en el Perú en los últimos años han obligado a replantear los estudios sobre la determinación de descargas y el tratamiento integral de las numerosas quebradas existentes en el país. A lo anterior debe añadirse que, coincidentemente, en las últimas décadas se ha producido en muchos lugares del territorio nacional una expansión urbana desordenada y acelerada que ha ocupado caóticamente áreas ribereñas pertenecientes a los cursos de agua. Como si todo esto fuese poco hay que añadir la tendencia general que existe de invadir los cauces fluviales y los de las quebradas con obras de ingeniería, lo que incluye por cierto a las viales. La cuenca del río Rímac es un caso dramático. El tema de las invasiones viales está desarrollado en el Capítulo 5.

Como consecuencia de lo anteriormente señalado ha habido daños a diversas instalaciones, atribuidos al comportamiento de las quebradas. Pero, el

problema es mucho más complejo y merece un análisis detenido a fin de conocer el verdadero origen de los desastres ocurridos. El estudio de las quebradas es complejo. Al mencionarlas en este capítulo se busca llamar la atención para que no se considere que se trata simplemente de “colocar una alcantarilla”.

6.7.1 Enfoque general del problema de las quebradas

Una de las características esenciales de las quebradas es su tendencia a activarse súbitamente, luego de haber permanecido un largo tiempo sin descargar, es decir, que se comportaban como “quebradas secas”. En realidad, no existen “quebradas secas”, ni “ríos secos”. Al pasar varios años sin que descargue una quebrada se produce, en muchos lugares, la invasión y el estrechamiento de su cauce, en el más amplio sentido del término, por la construcción de urbanizaciones, casas, fábricas, centros de recreación, obras viales, estructuras hidráulicas y de todo tipo, depósitos de basura y desmonte, etc. lo que agravará los daños cuando alguna vez descargue la quebrada.

Otra de las características de las quebradas es que sus descargas consisten en avalanchas de agua y sólidos, los que muchas veces son de gran tamaño. Hay también quebradas costeñas que aparecen súbitamente, no tienen gran pendiente y sus descargas van acompañadas de material relativamente fino. Las descargas de las quebradas no son cíclicas, sino eventuales y, por lo general, son de muy corta duración. El Manejo de Quebradas es un reto técnico y económico. La mejor forma de iniciarlo y realizarlo es respetando la Naturaleza y teniendo en cuenta que las quebradas tienen su propia dinámica y comportamiento y que no podemos tratarlas con las fórmulas clásicas de la hidráulica y del Transporte de Sedimentos.

En términos muy generales podría decirse que los problemas involucrados en el manejo de una quebrada están asociados a lo siguiente: a) características de su cuenca, b) grado y tipo de ocupación, c) pendiente, d) transporte sólido y, e) en gran medida, al número de eventos desastrosos ocurridos en el pasado, para lo cual es necesario remontarse, por lo menos, a la información histórica. En las quebradas la información instrumental es prácticamente inexistente.

Las quebradas tienen una tendencia a repetir su comportamiento y a que, en algún momento, nuevamente se presenten sus súbitas descargas. Muchas veces sólo tomamos en cuenta las descargas de las quebradas cuando causan daños. En realidad, esas mismas quebradas han tenido descargas importantes en el pasado, pero pasaron desapercibidas porque no había ocupación de su cauce, lo que sí ocurre en los últimos años.

A fines del 2001 al temerse la aparición de fuertes lluvias el Concejo Provincial de Trujillo mediante una Resolución Municipal dió una serie de recomendaciones a la población para el cuidado y mejora de sus viviendas y

pidió que “los que tienen sus casas en las quebradas (por ejemplo, las de León y San Ildefonso) deben abandonarlas y reubicarse en zonas más altas”. Lamentablemente, el tema de la ocupación de los cauces de las quebradas es recurrente en diversas partes del país. Ya en 1891, y mucho antes también, había habido descargas de las quebradas sobre la ciudad de Trujillo.

La base conceptual de cualquier acción de la ingeniería debe ser guardar el máximo respeto por la Naturaleza e interferir al mínimo en el curso natural de las quebradas. Los problemas originados por las quebradas vienen siendo estudiados por diversos ingenieros e investigadores peruanos, pues se han presentado en diversos lugares del territorio nacional y constituyen una expresión de las consecuencias de la escasez del recurso tierra y de la falta de planificación de su uso.

La eventual ocurrencia de lluvias fuertes en las pequeñas cuencas, la escorrentía resultante, las grandes velocidades alcanzadas y el transporte sólido intenso que ocurre muchas veces, son eventos naturales no controlados por el hombre. Pretender contrarrestar estos efectos, aun para cuencas muy pequeñas, implica no sólo una inversión muy grande, sino un reto técnico importante. De acá la importancia de la prevención.

6.7.2 Vulnerabilidad y riesgo

Como consecuencia de las características antes señaladas las quebradas representan un riesgo natural previsible muy grande, que debe ser reconocido como tal. Previsible viene de prever que significa “Ver con anticipación”, “Conocer, conjeturar por algunas señales o indicios lo que ha de suceder”, “Disponer o preparar medios contra futuras contingencias”. “Previsible” no implica conocer la oportunidad en la que ocurrirá un suceso.

En general, un riesgo como el antes mencionado tiene que examinarse asociado a la vulnerabilidad de un lugar determinado. El cauce de la quebrada, con el ancho que cada evento determine, y la faja marginal correspondiente, son zonas altamente vulnerables, especialmente en la parte más baja de la quebrada, cercana a su desembocadura, donde puede haber influencia de los niveles extraordinarios del río principal, eventualmente aumentados por los depósitos provenientes de la quebrada. Este tipo de fenómenos ha ocurrido muchas veces. Violentas descargas de una quebrada, pequeña y aparentemente inofensiva, han interrumpido el curso del río al que desembocan y se ha formado un represamiento natural con serias consecuencias para todo lo que está ubicado cerca del río. A lo anterior se añade que la quebrada cerca de la desembocadura tiende a formar un delta y su recorrido se vuelve inestable, por lo que sería un pésimo lugar para ubicar un puente.

La vulnerabilidad reside en que por lo general las quebradas no tienen lo que hidráulicamente llamaríamos una sección transversal definida. La gran

velocidad del agua y la presencia de sólidos de gran tamaño determinan que la quebrada tenga durante sus eventuales descargas un ancho mayor que el aparente y que un área anexa a lo que restrictivamente se llama “el cauce de la quebrada” resulte sumamente peligrosa. Esta vulnerabilidad de las construcciones, obras diversas, urbanizaciones, caminos y puentes ubicados junto a las quebradas tiene generalmente un origen antrópico, por la mala ocupación del territorio.

En consecuencia, el gran riesgo de una quebrada, que es propio de la Naturaleza, y la gran vulnerabilidad de las construcciones y de la ocupación realizada como consecuencia de las acciones humanas, traen como consecuencia la posibilidad de la repetición de desastres ocurridos en muchos lugares. Es decir, que la amenaza para las zonas mencionadas es grande porque el riesgo lo es.

6.7.3 Sobre el transporte sólido de las quebradas

Recordemos que hay quebradas que tienen pendientes elevadas con valores que pueden llegar y exceder fácilmente el 20, 30 ó 40%. No se dispone de fórmulas para calcular la capacidad de transporte de sólidos (sedimentos) de una quebrada, mucho menos del gasto sólido. El flujo torrencial no se produce ya como un flujo a dos fases. El fluido es no newtoniano y está formado por bolonería en una matriz de lodo.

Es el examen de la cuenca lo que puede darnos información acerca del potencial de sólidos que bajo determinadas condiciones podría incorporarse a la quebrada. Una de las características de las quebradas es que sus descargas de agua y de sólidos, se producen en un tiempo muy breve. Podría tratarse de sólo unas horas de descarga y habría que esperar años hasta que se repita el fenómeno. Así ocurre, por ejemplo, con el Rímac, que más que un río es una gran quebrada.

A veces ocurre que al presentarse una súbita descarga de agua y piedras en una quebrada de gran pendiente es perfectamente posible, como ha ocurrido en la realidad y como ha sido señalado en algunos informes, que grandes piedras salgan disparadas fuera del “cauce”. Estas “piedras voladoras” se han visto, por ejemplo, en el río Rímac (algunas piedras “aterrizaron” sobre el antiguo puente colgante de Chosica) y también se han visto en la quebrada Alcamayo, Cusco. En realidad esta circunstancia es una de las que obliga a una nueva definición del ancho de la quebrada y al establecimiento y respeto riguroso de la faja marginal.

En el Manejo de Quebradas se debe favorecer de tránsito de agua y sólidos hacia agua abajo. Es decir, no se debe crear obstáculos. Dentro de esta idea, los puentes, tanto en lo que respecta a sus pilares como a su superestructura, no deben dificultar el flujo. Así por ejemplo, si hubiese un puente ubicado cerca

de la desembocadura de una quebrada, que es una zona de sedimentación (agradación), y el tablero estuviese muy bajo el puente correría peligro.

Como ya se dijo, no existen elementos que permitan cuantificar el caudal sólido de una quebrada, pero sí debe obtenerse amplia información acerca de las potenciales fuentes de material sólido que existan en la cuenca y elaborar un Mapa de Deslizamientos (o información similar) en la cuenca, cuando el caso lo justifique. Se debe también identificar la información que exista sobre derrumbes y erosionabilidad de la cuenca. Todo esto lleva a concluir que si bien no es posible cuantificar los sólidos transportados por la quebrada, sí puede haber evidencia de su gran cantidad y del peligro que representan. El conocimiento de las características de las quebradas nos ayuda para no proyectar una obra que tendría dificultades por el gran transporte sólido de la quebrada. No debería proyectarse, por ejemplo, una bocatoma sumergida (alpina o caucasiana).

6.7.4 Manejo de las quebradas

En las quebradas generalmente no hay mediciones, pero hay dos o tres fuentes de información complementarias a un análisis regional que debemos aprovechar al máximo. La visita de campo es utilísima. El conocimiento de la cuenca nos dice mucho acerca de la quebrada. Tampoco debe ignorarse la información histórica, es decir, las noticias que se tengan sobre eventuales descargas de la quebrada ocurridas en el pasado. Y, por último, pero no por ello menos importante, está el examen de la Hidronimia, que es la parte de la Toponimia que estudia el origen y significación de los nombres de los cuerpos de agua (ríos, arroyos, lagos, lagunas y mares). Así por ejemplo, podemos no tener información sedimentológica sobre una quebrada, pero su nombre nos dice mucho, tal sería el caso de la “Quebrada Pedregal” (en la cual, evidentemente, hay muchas piedras). Hay muchas quebradas y cursos de agua que reciben el significativo nombre de “Río Seco” o “Quebrada Seca”. La Hidronimia también nos informa sobre la irregularidad de las descargas, sus súbitos incrementos y la variación del curso fluvial. Es así como tenemos en muchos lugares un “Río Loco” y en Chíncha el “Río Matagente”. En Zamora, España, existe un río que por algo ha recibido el nombre de “Río Malo”. La presencia de materiales en suspensión contribuye notablemente a la Hidronimia: en muchos lugares hay un “Río Blanco”, un “Río Negro”, un “Río Bermejo” o un “Río Colorado”; en China está el “Río Amarillo” y en Medellín se encuentra la quebrada “La Bermejala”. En México el nombre de un río denota su gran transporte sólido, se trata del “Río Puerco”. Es también muy conocido lo relativo a los colores del río Nilo. A lo anterior podría añadirse las alusiones a la calidad del agua: “Río Salado”.

La importancia de la Hidronimia ha sido reconocida; así por ejemplo el Gobierno Regional de Loreto, Perú, viene trabajando la Hidronimia en sus Servicios de Información Geográfica. En Cuba existe la Comisión Nacional de

Nombres Geográficos de la República, uno de cuyos cinco grupos de trabajo se dedica a la Hidronimia.

Dentro del contexto general de escasez de información antes mencionado, los principios fundamentales en torno al manejo de las quebradas deberían basarse en:

- a) Buscar la mayor información histórica sobre el comportamiento de la quebrada en el pasado, incluyendo el origen de su nombre, cuando esto sea posible.
- b) Reconocer la cuenca y apreciar sus características generales, incluyendo erosionabilidad, deforestación y ocupación humana (colonos).
- c) Recordar que no hay “quebradas secas” y que es “imposible que lo improbable no ocurra jamás” y que en la Naturaleza lo que ocurrió alguna vez volverá a suceder.
- d) No producir estrechamientos.
- e) No invadir el cauce.
- f) Respetar un ancho razonable para la quebrada.
- g) Definir y mantener la faja marginal.
- h) Realizar la ocupación urbana y agrícola en las zonas aledañas de acuerdo a un Plan compatible con la faja marginal.
- i) Reconocer que dadas las características del flujo no es posible aplicar las fórmulas clásicas de la Hidráulica.
- j) Reconocer que muchas de las fórmulas de Transporte de Sedimentos no son aplicables. Es un fluido no newtoniano.
- k) Tener especial cuidado, por su gran movilidad y peligrosidad, en las zonas próximas a la desembocadura de la quebrada.

Como corolario de todos estos puntos se debe tener muy presente que el control y tratamiento de un curso de agua es un proceso lento que se desarrolla paulatinamente y que requiere, dentro de una metodología de aproximaciones sucesivas, la participación de todas las partes vinculadas al curso de agua.

En general, el cálculo de máximas avenidas de cualquier curso de agua supone disponer de información básica confiable y en cantidad suficiente. Estos son los conceptos que se aplican para la mayor parte de las cuencas, en las que por su propia naturaleza se pueda usar los diferentes modelos hidrológicos e hidráulicos existentes.

Pero, en las pequeñas cuencas las avenidas tienen características especiales que no pueden dejar de tomarse en cuenta. Las grandes crecidas, determinantes de los daños, tienen gran cantidad de material sólido; su enorme tamaño, crea condiciones especiales de flujo.

De otro lado, debemos recordar que en las pequeñas cuencas no hay estaciones de mediciones y, por lo tanto, los cálculos se basan en

extrapolaciones y suposiciones que finalmente conducen a la obtención de un valor numérico para el caudal (caudal líquido) que no siempre corresponde necesariamente a la realidad. Esto se hace aún más evidente cuando se trata de usar, por ejemplo, la fórmula de Manning (u otra similar), cuyo campo de aplicación corresponde a condiciones totalmente diferentes de las que se presentan en numerosas quebradas.

Entre las razones para la no aplicabilidad de la fórmula de Manning, u otra similar, a las quebradas de fuerte pendiente podría mencionarse las siguientes:

- a) El flujo no es permanente ni uniforme.
- b) El flujo es una mezcla de agua y sedimentos (eventualmente gruesos) que no corresponden a las condiciones de deducción de la fórmula.
- c) La altísima pendiente está fuera del rango de aplicación de la fórmula.
- d) Ante la ausencia de mediciones, cualquier estimación de la “n” de Kutter (Manning) es una adivinanza.

Se pueden hacer consideraciones similares con respecto a otros cálculos de Hidráulica Fluvial presentados usualmente en los estudios de encauzamiento, que constituyen un notable esfuerzo por intentar racionalizar los resultados, pero que en realidad no tienen suficiente confiabilidad a causa de la naturaleza de las fórmulas existentes.

Muchas veces el buen criterio del ingeniero, la información obtenida y las observaciones de campo realizadas constituyen la más valiosa herramienta de diseño.

6.7.5 Algunos casos

Hay numerosas quebradas que amenazan ciudades, pueblos y asentamientos humanos. En realidad la población invade el cauce de la quebrada.

Los ejemplos de quebradas que han causado daños o que pueden causarlos serían interminables. Se podría recordar la amenaza de la “Quebrada Sin Nombre” sobre la bocatoma del proyecto CHAVIMOCHE, las quebradas no solo secas, sino aparentemente inexistentes que se activaron el año 1983 causando enormes daños al canal “Daniel Escobar” del Proyecto Chira-Piura, las descargas de la quebrada Huaycoloro y muchísimas otras más.

La quebrada Alcamayo

El 10 de abril del 2004 se presentó en la quebrada Alcamayo-Cusco la descarga de una masa de lodo y piedras de considerable tamaño que ocasionó fuertes daños en las zonas urbanizadas de Aguas Calientes y que provocó la muerte de cinco personas, la desaparición de otras seis, diversos daños en casas e instalaciones urbanas cercanas a la quebrada y la destrucción de los

dos puentes ferroviarios que permitían el tránsito de vagones hacia la estación Aguas Calientes y a la Central Hidroeléctrica de Machupicchu. Otra de las serias consecuencias de lo ocurrido fue la interrupción del flujo turístico hacia el Santuario de Machupicchu. Numerosos turistas se quedaron a mitad de camino y la noticia repercutió negativamente en todo el mundo.

Resulta especialmente grave que lo ocurrido el 10 de abril del 2004 no fuese sino la repetición de eventos similares sucedidos en el pasado. Es así como se sabe que el 5 de marzo de 1995 ocurrió lo que las autoridades llamaron un gran aluvión proveniente de las quebradas de los ríos Aguas Calientes y Alcamayo, “que puso en grave peligro la vida de los pobladores de la capital del distrito de Machupicchu, arrastró grandes piedras, parte de bosques y destruyó ocho viviendas, dos puentes vehiculares, una playa de estacionamiento y las instalaciones de los Baños Termales...”. “También causó la inundación del colegio y otras viviendas y originó la acumulación de material en el cauce del río en la zona donde se ubica la población, cubriendo parcialmente la línea férrea...”, según lo manifestado por el Distrito de Riego de La Convención. Se sabe también la ocurrencia de otros aluviones en diciembre de 1995 y en enero de 1996.

De acuerdo a lo sucedido en la quebrada Alcamayo en varias oportunidades, debidamente reportadas hasta llegar al 10 de abril del 2004, y en concordancia con los informes de reconocimientos de campo y los estudios efectuados por varias personas e instituciones, es a todas luces claro que la quebrada representa un riesgo natural considerable. Un riesgo es “un fenómeno de origen natural o humano que signifique un cambio en el medio ambiente que ocupa una comunidad determinada, que sea vulnerable a ese fenómeno.” (Maskrey).

La pequeña cuenca de Alcamayo, caracterizada por su gran pendiente y alta producción de sólidos asociados a súbitas descargas, y su elemento natural de drenaje que es la quebrada del mismo nombre, con un cauce no bien definido, y en la que es muy difícil cuantificar sus descargas de líquidos y de sólidos, es un riesgo natural comprobado y previsible. Tampoco debe descartarse la posibilidad de ocurrencia de un huaico durante el paso de los trenes por los puentes. Diversos estudios y observaciones indican que el tramo urbano de la quebrada está estrangulado por la expansión urbana, lo que es muy frecuente en diversos lugares del país.

Canales de riego en la costa peruana

En la costa norte las descargas eventuales de quebradas son fenómenos que ocurren en años extraordinarios como los de lluvias bajas, que pueden deberse a la aparición del Fenómeno El Niño.

La súbita activación de las quebradas, mal llamadas secas, es uno de los efectos más preocupantes de las lluvias que aparecen con gran fuerza durante los grandes Niños en las partes bajas de las cuencas. Los proyectos hidráulicos y viales de la costa norte peruana han sufrido daños por descargas de las “quebradas secas”, tanto en 1983 como en 1998. Prácticamente, ninguno ha escapado de los daños a sus canales. Así ha sido con el canal de la margen izquierda del río Tumbes, con el canal “Miguel Checa”, con el canal de derivación “Daniel Escobar”, con los canales de derivación de los proyectos CHAVIMOCHIC y CHINECAS y muchos otros más.

Los cruces de quebradas con canales son numerosos. Cuando se identifica la existencia de una quebrada se proyecta la estructura de cruce respectiva. El problema reside en que muchas veces no es posible identificar la existencia de una quebrada o que las descargas que ocurren son mayores que las previstas.

Un canal tan largo como el del Proyecto CHAVIMOCHIC cruza numerosos cursos de agua, algunos de ellos conocidos por descargar agua con cierta frecuencia, y otros, que se consideran “secos”, porque no hay registros, huellas, ni memoria de la última vez que tuvieron una descarga. Durante 1997-98 hubo descargas de numerosas quebradas que irrumpieron en el canal de derivación CHAVIMOCHIC. En muchos casos excedieron la capacidad de las canoas construidas para tal efecto.

Todo esto nos hace pensar en la enorme importancia que tiene el trazo de canales y obras viales. Indudablemente, que uno de los criterios de trazo debe ser el de crear las mejores condiciones para el cruce de quebradas. El dimensionamiento de las obras de cruce (de canales y obras viales) como canoas, alcantarillas u otras no debe determinarse en función de la sección hidráulica requerida, sino en función de los sólidos y cuerpos extraños presentes en dichas descargas eventuales.

En el Capítulo 7 se detalla los daños causados por las quebradas a las obras viales.

6.7.6 Conclusiones sobre las quebradas

- a) Hay numerosas quebradas que representan un Alto Riesgo Previsible, para las instalaciones urbanas, viales y de cualquier otro tipo ubicadas en sus inmediaciones y sobre su cauce.
- b) En las quebradas debe establecerse y respetarse la faja marginal como una acción imprescindible para su manejo, el que está muy vinculado al sistema de defensas planeado. Las fajas marginales son áreas intangibles, cuyo uso para fines agrícolas y asentamientos humanos está prohibido.

- c) Debe favorecerse el libre curso del agua y de los sólidos a lo largo de la quebrada.
- d) Debe estudiarse las consecuencias que puedan resultar de un incremento de los niveles que pueda alcanzar el río principal, al que descarga la quebrada, como consecuencia de sus propios caudales y del remanso que podría producirse por los materiales sólidos que seguramente acarrearán la quebrada.
- e) La ocupación territorial de un centro poblado ubicado junto a la quebrada debe hacerse de acuerdo a un Plan de Ordenamiento Urbano que respete las características de la quebrada, su faja marginal y zonas aledañas, así como los niveles que pueda alcanzar el río principal.
- f) Las obras viales, los puentes específicamente, no deben constituir obstáculos para el libre flujo de agua y sólidos que eventualmente acarrea la quebrada, lo que obliga a que una obra definitiva respete el ancho total fijado para la quebrada.
- g) Si se tratase de obras provisionales debería establecerse su duración y admitir y evaluar la posibilidad de daños y el riesgo involucrado durante ese lapso.
- h) Debe reconocerse que la información hidrológica disponible acerca de las quebradas es mínima y que por su propia naturaleza no se dan las condiciones usuales para un cálculo confiable de máximas avenidas y de sus correspondientes niveles.
- i) Debe reconocerse que para la caracterización de las quebradas no son aplicables las fórmulas de la Hidráulica General ni de la Hidráulica Fluvial usualmente empleadas.
- j) Durante los Meganiños las fuertes lluvias eventuales se agudizan los problemas presentados por las quebradas.

En el capítulo siguiente se estudia la interacción del comportamiento fluvial y las obras viales durante los Meganiños.

Referencias

1. ARANCIBIA SAMANIEGO Ada. **Criterios para manejo de quebradas y su aplicación en el diseño de obras civiles**. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, 1998, Lima - Perú.
2. BLAIKIE Piers et al. **Vulnerabilidad. El entorno social, político y económico de los desastres**. La RED-ITDG. Bogotá, Colombia. 1996.

3. CASTILLO NAVARRO Leonardo y otros. **Modelación de Flujo de Escombros en la Quebrada Paihua Modelo FLO-2D: Impacto en la ciudad de Matucana**, Lima. XIII Congreso Peruano de Geología. Lima, 2006.
4. CELMI CORAL Jessica. **Aplicación del MCA en la Planificación para la mitigación de inundaciones en la parte baja del Río Chillón**. IMEFEN. UNI.
5. CGR Ingeniería. **Hidrología de la Cuenca Puyango-Tumbes**. 1990.
6. COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ. **Simpósio Deslizamientos (Huaicos) e Inundaciones**, Lima 1972.
7. FRANCO Eduardo. **La gestión de los riesgos de desastre ENSO desde una perspectiva social**. I Encuentro de Universidades del Pacífico Sur. Piura 1999.
8. GÁLVEZ Ángela G. **Modelamiento de una Quebrada con Fines de Control de Erosión**. IMEFEN. UNI.
9. GEOLOGICAL SURVEY. **Aspectos Hidráulicos e Hidrológicos en la Planificación de las Planicies de Inundación**.
10. LINSLEY Ray E. y FRANZINI J. B. **Ingeniería de los Recursos Hidráulicos**. Compañía Editorial Continental S. A. Barcelona, 1967.
11. LOPARDO Raúl A. y SEOANE Rafael. **Algunas reflexiones sobre las Crecidas e Inundaciones**. Ingeniería del Agua, Vol. 7 N° 1, marzo 2000.
12. MANSÉN VALDERRAMA Alfredo. **Rehabilitación de obras civiles afectadas durante el Fenómeno El Niño- Caso quebrada Collana**. Revista "El Ingeniero Civil" N° 134, julio 2004.
13. MARTICORENA DE GARCÍA REGAL Delia. **Estudio Hidro-Geodinámico de Huaycos en la cuenca del río Rímac con el fin de mitigar sus efectos**. Simposium Nacional de Prevención y Mitigación de Desastres Naturales, 1, Lima, 1-3 junio 1987.
14. MARTÍNEZ VARGAS Alberto y MARTÍNEZ DEL ROSARIO José. **Defensas Ribereñas en el río Rímac**. Boletín M. I. G. N° 8. May.-Ago. 2003.
15. MARTINEZ VARGAS Alberto. **Huaycos e Inundaciones**. Chosica Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. Sección de Post Grado. Lima 2001.
16. MASKREY Andrew. **Los desastres no son naturales**. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED), Bogotá, Colombia, 1993.
17. PALOMINO VELAPATIÑO Zuly y CAMPAÑA Toro Roberto (Asesor). **Medidas para la atenuación de avenidas en la parte baja del río Chillón**. Tesis de Grado. IMEFEN. UNI.
18. REPUBLICA DEL PERU. **Plan Nacional de Ordenamiento de los Recursos Hidráulicos – Bases Técnicas y Económicas para su Formulación**. INP, Lima, Junio 1978.
19. REVESZ Bruno. **Los castigos de Piura**. En: ¿Qué hacer? N° 22, DESCO Lima, 1983.
20. ROCHA Arturo y VELÁSQUEZ José. **Depósitos en el cauce de la quebrada Yanango**. EDEGEL. Mayo 1998.
21. ROCHA FELICES Arturo. **Las lluvias de 1925 en el departamento de Lambayeque y sus implicancias en el proyecto Olmos**. Informativo ICG N° 572 - 07 Mayo 2012.

22. ROCHA FELICES Arturo. **Problemática de las inundaciones y huaicos en el Perú**. Primer Symposium "Inundaciones y Huaycos". Instituto para la Mitigación de los efectos del Fenómeno de El Niño. IMEFEN. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, marzo 2007.
23. ROCHA FELICES Arturo. **El Niño: ¿Un desastre o un Fenómeno?** Revista PUENTE N° 4, Colegio de Ingenieros del Perú, marzo 2007.
24. ROCHA FELICES Arturo. **Revisión de los estudios del encauzamiento y de los puentes ferroviarios en la quebrada Alcamayo-Cuzco**. Instituto de Recursos Naturales (INRENA), diciembre 2004.
25. ROCHA FELICES Arturo. **La inundación de Zaña de 1720 y las fallas en la planificación del uso de la tierra**. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Iquitos, 2003.
26. ROCHA FELICES Arturo. **La ingeniería civil ante el Fenómeno de El Niño**. Conferencia Inaugural. Primer Congreso Panamericano de Ingeniería Civil y Planificación. CIP-UPADI. Lima, 1998.
27. ROCHA FELICES Arturo. **Introducción a la Hidráulica Fluvial**. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 1998.
28. ROCHA FELICES Arturo. **Recursos Hidráulicos**. Colegio de Ingenieros del Perú, Libro 16. Lima, 1993.
29. ROCHA FELICES Arturo. **El Desembalse de Poechos**. Revista El Ingeniero Civil, N° 81, Nov.-Dic. 1992.
30. ROMERO Gilberto y MASKREY Andrew. **Cómo entender los desastres naturales**, en el libro **Los desastres no son naturales**. La RED. Bogotá, Colombia, 1993.
31. SAITO Laurel, BIONDI Franco, SALAS Jose D., PANORSKA Anna K. y KOZUBOWSKI Tomasz J. **A watershed modeling approach to streamflow reconstruction from tree-ring records**. Environmental Research Letters 3, April-June 2008.
32. SALAS José D. **Sobre la Reconstrucción de Datos Hidrológicos Mediante Índices de Anillos de Árboles con Aplicaciones al Río Colorado**. Conferencia de Incorporación a la Academia de Ingeniería de México. México, Noviembre, 2008.
33. SUN TZU. **El arte de la guerra**. Editorial Biblioteca Nueva, S. I., Madrid 2000.
34. VALDERRAMA Patricio, CASTILLO NAVARRO Leonardo y otros. **Mapa de peligros y simulación del flujo FLO-2D en la quebrada Runtumayo (Cusco): Alud y flujo de detritos del 12 de octubre del 2005**. XIII Congreso Peruano de Geología. Lima, 2006.
35. VELÁSQUEZ DÍAZ Juan José. **Hidrología del río Rímac**. Foro "Problemas en el Manejo de Ríos en Áreas Urbanas", Colegio de Ingenieros del Perú, Consejo Departamental de Lima, Capítulo de Ingeniería Civil, publicado en la revista Ingeniería Civil año 09-2011.
36. VEN TE CHOW. **Handbook of Applied Hydrology**. Mc Graw-Hill 1964.
37. WILCHES-CHAUX Gustavo. **La Vulnerabilidad Global**. En el libro **Los desastres no son naturales**. La RED. Bogotá, Colombia, 1993.
38. VILLANUEVA RUIZ Fernando. **Alerta temprana de detección de huaicos**. Instituto Geofísico del Perú.

CAPÍTULO 7

INTERACCIÓN DEL COMPORTAMIENTO FLUVIAL Y LAS OBRAS VIALES DURANTE LOS MEGANIÑOS

7.1 Presentación del tema

Las obras viales en general, sean urbanas o carreteras, ferrocarriles y puentes, son muy vulnerables, según el caso, al exceso de lluvia, a la escorrentía superficial, a las crecidas fluviales, al dinamismo de los ríos, a los huaicos y a diversos fenómenos de geodinámica externa como aluviones, deslizamientos, derrumbes y avalanchas y, ciertamente, a las acciones humanas. Estas últimas suelen ser muy destructivas.

Toda acción externa que se presenta en una sección fluvial tiene efectos sobre el río, los que pueden manifestarse aguas abajo y/o aguas arriba de dicha sección. Esas acciones externas pueden ser de origen natural, como un derrumbe o la fuerte descarga de un afluente, o de origen humano (antrópico) como la construcción de una presa o de un puente. Sin embargo, debe quedar claro que así como las acciones humanas inciden sobre el comportamiento fluvial también ocurre que los ríos lo hacen sobre las obras hechas por el hombre. De acá que lo más apropiado sea hablar de una interacción entre las obras de ingeniería y la Naturaleza.

La vulnerabilidad de las obras de ingeniería se ve agravada por la aparición eventual de un cambio generalizado del clima que en la costa norperuana dura algunas semanas o meses. Las lluvias son entonces excepcionalmente fuertes, así como las descargas de los ríos. Este Fenómeno se presenta con intervalos variables, más adelante señalados, y puede deberse o no a lo que internacionalmente se conoce como Fenómeno El Niño (FEN). Algunas veces ocurre como un Fenómeno local (no mundial) y se debe a causas diferentes, aunque siempre vinculadas a la temperatura del mar. En cualquiera de las dos posibilidades el fenómeno puede ser de pequeña o de gran magnitud. Para efectos del presente trabajo se llama Meganiño al Fenómeno de cambio del clima dominante de gran magnitud, que corresponda o no a lo que internacionalmente se conoce como Fenómeno El Niño (FEN), pero que se llama así por su magnitud e intensidad en la costa norperuana. Si bien es cierto que el fenómeno compromete básicamente la costa norte, también lo es que algunas veces se siente sus efectos en la costa central. De modo que la palabra Meganiño designa tanto al FEN (mundial) como al de la Costa Norperuana.

Al respecto bastaría con recordar que durante el Meganiño 1997-98, que fue un Fenómeno El Niño, se produjeron en el Perú daños en la infraestructura vial de

numerosas ciudades y centros poblados. En lo que respecta a carreteras, 843 km quedaron destruidos (115 km correspondieron a carreteras asfaltadas, 394 a afirmadas y 334 a vías sin afirmar y trochas); además, colapsaron 58 puentes y sufrieron daños otros 28, totalizando casi 5 km de puentes que quedaron fuera de servicio. En cambio, durante el Meganiño de 1925 se produjeron fuertes lluvias, a las que se refiere Basadre en su “Historia de la República del Perú” al señalar que fueron una “verdadera catástrofe que causó gravísimos daños”; sin embargo, no se ha encontrado evidencia de que este Meganiño haya correspondido a un Fenómeno El Niño. Se habría tratado de un Meganiño de la Costa Norperuana.

La intensidad de los daños y su significado social y económico nos indican la enorme importancia que tiene el estudio de los Meganiños. Esto obliga a prevenir y amenguar sus efectos negativos sobre las obras de ingeniería en general y sobre las viales en particular.

Los daños producidos (a los que se llama intensidad del evento) tienen diversos orígenes, según que se trate de obras urbanas o no. La mala ubicación de centros poblados y de las obras viales, la falta de planeamiento, el mal uso de la tierra, el mal drenaje, la no consideración del comportamiento de ríos y quebradas, la inconveniente ubicación de las estructuras y el diseño inadecuado para las condiciones presentadas, son las causas más comunes de las fallas observadas. Esto es muy claro, por ejemplo, en el comportamiento de los puentes. Prácticamente, la totalidad de las fallas que se produjeron durante los dos últimos Meganiños se originaron por problemas de Hidráulica Fluvial, y no por problemas estructurales. Miremos, pues, el problema desde esta perspectiva. En el Capítulo 10 se presenta datos estadísticos sobre los orígenes de las fallas en puentes. La causa principal se encuentra en no haber considerado adecuadamente el comportamiento de ríos y quebradas. Al respecto es siempre conveniente insistir que no hay “ríos secos” ni “quebradas secas”.

En este capítulo se empieza por señalar someramente los aspectos pertinentes del Fenómeno El Niño (FEN) y de las lluvias excepcionalmente fuertes, se deban al FEN o no, con el objeto de mostrar la gran transformación climática que representan y su enorme impacto sobre las infraestructuras. A esto se agrega que la aparición de un Meganiño no es tan remota como a veces se piensa. En los últimos cinco siglos ha habido unos once Meganiños que han afectado, principalmente, la costa norperuana. Luego se examina el impacto de la Naturaleza sobre las obras viales y cómo es que la aparición eventual de los Meganiños agrava este impacto. Después de desarrollar algunos aspectos del comportamiento fluvial, muy relacionados con las obras viales, como son el dinamismo de los ríos aluviales y la interacción naturaleza-estructura, se pasa a exponer el panorama general de los daños ocurridos recientemente y en el pasado. Se termina con una reflexión sobre el tema tratado y sus implicancias para la elaboración de proyectos viales.

7.2 El Fenómeno El Niño (FEN)

A continuación se presenta un resumen y actualización del trabajo del autor titulado “La Ingeniería frente al Fenómeno de El Niño”, publicado en la revista de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

El impacto fuertemente negativo de los Meganiños sobre la vida, la salud, el bienestar y la economía de una porción importante de la población nacional es innegable. Los Meganiños pueden corresponder o no a lo que internacionalmente se conoce como Fenómeno El Niño. El conocimiento científico de las circunstancias vinculadas a la enorme complejidad meteorológica-oceanográfica constituida por el FEN, que se desarrolla en una parte significativa del planeta, es muy importante. Desde hace varios años se viene trabajando en el análisis y desarrollo de métodos para el pronóstico de su ocurrencia a corto plazo.

Sin embargo, el pronóstico es sólo un aspecto del problema. El presente capítulo está centrado en una visión del Fenómeno basada en el modo de actuar del ingeniero proyectista. Nos interesa conocer la probabilidad de ocurrencia de eventos de determinada magnitud para su consideración en la planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de las obras de ingeniería.

Nuestro conocimiento del Fenómeno El Niño, como un fenómeno mundial, ha aumentado significativamente en los últimos años. Por lo tanto, es importante considerar sus implicancias sobre las infraestructuras en general y sobre las obras viales en particular, y buscar un mejor conocimiento de sus efectos desde el punto de vista de la ingeniería, como una introducción a la forma de mitigar sus efectos negativos y obtener criterios de diseño apropiados. Esta búsqueda es una necesidad imperiosa, puesto que el Estado no afronta hasta el momento la realización de un estudio integral de este Fenómeno, pesar de los enormes daños que han causado los dos últimos Meganiños (1982-83 y 1997-98) y de las grandes cantidades de dinero que permanentemente se asigna por el Estado y por los particulares para nuevas obras de desarrollo infraestructural, las que, sin embargo, están expuestas al Fenómeno. Eventualmente, el Estado dedica, generalmente a última hora, grandes cantidades de dinero para las llamadas obras de emergencia, no siempre exitosas, para intentar paliar los efectos negativos del Fenómeno.

7.2.1 El FEN como manifestación climática en un clima árido

El Fenómeno de El Niño se manifiesta como una fuerte modificación del clima dominante en un lugar determinado. Dado que el clima es el conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región y en torno de las cuales se organiza la vida y sus actividades económicas, resulta evidente el gran impacto que puede producir dicha modificación climática. En general, son

varias las condiciones atmosféricas determinantes del clima. Entre ellas están la presión barométrica, la humedad relativa, los vientos, la nubosidad, la temperatura del aire y las precipitaciones. Como la temperatura actúa sobre el ciclo vital resulta ser uno de los elementos más característicos del clima.

Los acontecimientos climáticos de los últimos años han mostrado la gran vulnerabilidad de segmentos poblacionales numéricamente significativos, así como de muchas estructuras que, lamentablemente, han fallado, como ha ocurrido con numerosos puentes y obras viales en general. Las obras viales han sufrido el impacto de los últimos Meganiños, de acá la necesidad de estudiarlos y tenerlos en cuenta.

La experiencia vivida ha mostrado que los daños causados por los Meganiños han sido generalmente muy grandes. Una parte importante de nuestra reflexión sobre el tema tiene que estar encaminada al esclarecimiento de las causas que motivan la gran intensidad de dicho impacto. Ellas son básicamente cuatro:

- a) La magnitud de la alteración climática producida.
- b) La gran separación entre algunos Meganiños (Intermeganiño).
- c) La pobreza que existe de manera crónica en gran parte de la población afectada.
- d) La falta de planificación en la ocupación territorial y en el desarrollo de las infraestructuras.

En consecuencia, los daños causados por los Meganiños tienen que ser analizados a partir del concepto de vulnerabilidad, entendida como: “Las características de una persona o grupo desde el punto de vista de su capacidad para anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza natural” (Piers Blaikie et al.).

Para comprender la naturaleza del Fenómeno El Niño y sus efectos e impacto en un lugar determinado es indispensable analizar las circunstancias relativas al clima de ese lugar. En consecuencia, y pensando por ejemplo en las lluvias, hay en un extremo regiones áridas y semiáridas y, en el otro, lugares en los que el clima es húmedo y aun hiperhúmedo.

La aparición del Fenómeno El Niño significa una violenta e inusual manifestación climática y, por eso, todo el desarrollo biológico y económico de la zona afectada sufre un enorme impacto. El FEN se caracteriza en la costa norperuana, desde el punto de vista hidrometeorológico, principalmente, por un aumento generalizado de la temperatura ambiental y por la ocurrencia de fuertes e inusitadas lluvias de gran duración e intensidad, que traen como consecuencia un notable incremento de las descargas de los ríos y quebradas.

Las lluvias que ocurren durante el FEN son copiosas y el gran volumen que representa su valor acumulado, que suele expresarse como una altura en milímetros, llega en los Meganiños a valores extraordinariamente altos. Se produce, pues, una tropicalización temporal del clima. Como en el mismo lugar hay periodos de gran sequía, resulta que lo más característico del FEN es el contraste entre valores altos y bajos de las lluvias.

En una región determinada hay un clima persistente que es el que está presente la mayor parte del tiempo y que da a esa región sus características típicas para el desarrollo de la vida y de las actividades económicas conexas. Las condiciones climáticas se describen usualmente por valores medios a los que suele llamarse normales. Así, la temperatura normal en un lugar determinado se define como la temperatura media de los últimos veinte o treinta años. El clima dominante determina muchos aspectos cotidianos, como por ejemplo nuestro modo de vestir, las características de nuestras ciudades, de nuestras viviendas, la arquitectura, los materiales de construcción, las áreas de esparcimiento, el tipo de agricultura y, en general, todo aquello vinculado a la vida y a las actividades económicas.

El clima de la costa norperuana está fuertemente determinado por la temperatura del mar. Para los efectos de este capítulo interesa demostrar que desde muy antiguo ha habido entre la población la convicción de la sequedad de la costa, pero no como clima dominante, sino como si éste fuese el clima permanente e inalterable. Este hecho ha tenido enormes repercusiones en la ocupación territorial, en el desarrollo físico de los últimos siglos y, especialmente, en la concepción y diseño de muchas estructuras.

Por lo expuesto, resulta claro que en el planeamiento y diseño de las obras viales no puede dejar de considerarse la aparición eventual de grandes lluvias y avenidas que correspondan o no a lo que internacionalmente se conoce como Fenómeno El Niño, pero que por su magnitud puedan considerarse Meganiños. De acá que en cualquier Manual o Reglamento sobre obras viales no puedan dejar de considerarse.

7.2.2 Fuertes lluvias

Es en este contexto climático de gran aridez de la costa peruana que se producen eventualmente fuertes lluvias. Durante los Meganiños las lluvias de la costa norperuana se caracterizan por su gran cantidad, que puede acumular algunas veces valores tan altos como 2000 ó 3000 mm, o más, en pocos meses. Es típica también su larga duración y sus notables intensidades.

No debe olvidarse que estos valores se presentan en zonas consideradas como áridas. Las lluvias, y su incremento notable dan origen a la escorrentía que es una de las causas de la erosión de las cuencas. Las fuertes lluvias y los

desbordes fluviales causan inundaciones, las que producen el aislamiento de los pueblos y de las estructuras.

Algunos ejemplos resultan muy ilustrativos. Durante 1983 en Tumbes, en la Estación El Tigre, llovió 3000 mm; sin embargo, el promedio anual de los 19 años precedentes era de 256 mm; es decir, que en 1983 llovió una cantidad equivalente a 12 veces el promedio histórico. Hasta antes de las lluvias de 1983 la precipitación anual máxima en la citada Estación era de 562 mm (1972) y la mínima era cero (1968). Al presentarse el Meganiño de 1982-83, en la zona de Piura y Catacaos la lluvia anual fue casi 38 veces el promedio histórico. En la estación pluviométrica Miraflores, ubicada en la parte baja de la cuenca del río Piura a una altitud de 30 msnm, se tiene registros de precipitación para un periodo bastante largo. Si se obtuviese la precipitación media anual considerando únicamente los 30 años anteriores a 1972 se obtendría un valor de 50 mm. Pero, si se tomase una serie de 30 años a partir de 1972 se obtendría para la precipitación media anual un valor de 202 mm. Lo que sucede es que en el periodo 1972-2000 ocurrieron dos Meganiños (1983 y 1998) y otro conocido como “Niño Fuerte” (en 1972, aunque no corresponde a lo que internacionalmente se conoce como Fenómeno El Niño), lo que trajo como consecuencia una elevación del valor medio. En estos fuertes contrastes reside la característica pluvial del FEN. En la Figura N° 7.1 se observa un ejemplo de la gran variabilidad de las lluvias a lo largo de 52 años en la Estación Piura. Con esa serie de mediciones no era posible predecir una lluvia como la que se presentó en 1983 (2402 mm, en seis meses).

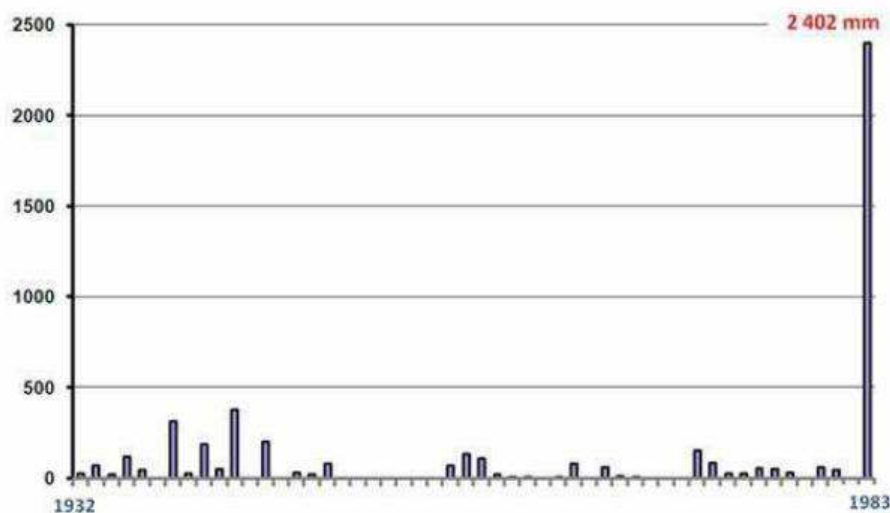


Figura N° 7.1 Variación anual de la precipitación (en milímetros) de la Estación Piura (1932-1983). Se observa el impacto que significó en la serie histórica la aparición de las lluvias del Meganiño 1982-83.

Otra de las características de las lluvias correspondientes al FEN es su gran duración. Se desarrollan a lo largo de semanas o meses. Una de las lluvias de

más larga duración de las que se tiene registro y mediciones fue la que ocurrió en Piura y Tumbes entre diciembre de 1982 y junio de 1983. La gran duración de las lluvias en lugares habitualmente secos tiene un enorme impacto económico y social. En estas condiciones las infraestructuras en general y las viales en particular se ven sumamente afectadas.

Durante el FEN llama la atención las altísimas intensidades que se registran. La intensidad es la cantidad de lluvia que cae en un tiempo determinado. Durante los Meganiños se ha observado precipitaciones muy intensas. Así por ejemplo, el 18 de enero de 1998 en Sullana llovió 216 mm; este es un valor extraordinariamente alto en cualquier parte; lo es más todavía en un lugar donde usualmente la precipitación de todo un año no alcanza ni remotamente ese valor. En Chulucanas, en enero de 1983, hubo un día en el que llovió 203 mm. En la Estación Miraflores (Piura) se ha registrado un máximo diario de 174 mm y en Morropón, de 171 mm. Durante los últimos Meganiños se alcanzó en algunos lugares habitualmente secos, intensidades de lluvia del orden de 100 mm por hora. En el pasado también ocurrió lo mismo; el 16 de febrero de 1925 en Zorritos, Tumbes, en una sola noche, la lluvia alcanzó los 375 mm.

Por lo tanto, lo característico de los Meganiños es el contraste entre el clima habitual (muy seco) y la aparición circunstancial de un nuevo clima (transitorio y muy húmedo). Las grandes y excepcionales lluvias dan lugar a escorrentías de las mismas características. En otros lugares del planeta el FEN se caracteriza por la aparición de severas sequías (Australia, India).

Las fuertes lluvias son también causa directa de huaicos e inundaciones que hacen daño a las obras viales, tanto urbanas, como carreteras y vías férreas, en diversos lugares de nuestro país, como se detalla más adelante.

7.2.3 Fuerte incremento de las descargas de los ríos y quebradas

Es indispensable mencionar como características del Fenómeno las grandes avenidas en la costa norperuana. Las avenidas, y eventualmente, las consiguientes inundaciones, son los fenómenos que afectan a un mayor número de personas en nuestro planeta.

Las descargas de los ríos de la costa son muy variables en el tiempo. Hay una variación estacional muy marcada, y variaciones, también muy fuertes y de gran irregularidad, de un año a otro. Hay años muy secos en los que los caudales pueden llegar a cero. Eventualmente, hay avenidas de corta duración. Con menor frecuencia y como consecuencia del cambio de clima característico de los Meganiños y del incremento de las lluvias por cualquier otra causa, las descargas de los ríos aumentan inusitadamente. Se producen así las grandes avenidas.

Las crecidas fluviales que ocurren en la costa norte durante los Meganiños son de larga duración, (a diferencia de lo que ocurre en el sur) y, por lo tanto, implican un gran volumen descargado. Esa es una de sus características esenciales al compararlas con las avenidas ordinarias. Al respecto conviene presentar como ejemplo lo ocurrido en el río Piura. En 1982-83 la crecida tuvo una duración de siete meses y el volumen total descargado fue superior a la suma de las descargas registradas en la misma estación a lo largo de los 18 años precedentes. En 1998, año de otro importante Meganiño, las fuertes descargas del río Piura duraron cuatro meses y representaron 8928 millones de metros cúbicos, cantidad superior a la suma de las descargas ocurridas desde el anterior Meganiño de 1983.

La otra característica importante de las avenidas asociadas a los Meganiños es que tienen no sólo un valor máximo muy alto, sino una sucesión de picos. Así, en 1983 el río Piura tuvo una crecida que duró seis meses y que alcanzó un valor máximo de $3200 \text{ m}^3/\text{s}$, pero en tres oportunidades excedió los $2500 \text{ m}^3/\text{s}$, en cinco oportunidades los $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ y diez veces los $1600 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que el contraste mayor se encuentra en las masas descargadas y no en los picos alcanzados. Así por ejemplo, el máximo pico de 1983 (Meganiño) fue de $3200 \text{ m}^3/\text{s}$ y el de 1972 ("Niño Fuerte") fue de $1600 \text{ m}^3/\text{s}$; es decir, fue el doble; pero, si comparamos las masas descargadas se encuentra que la relación fue de 6,8. Nótese también que el valor correspondiente a la máxima descarga de 1972 ($1600 \text{ m}^3/\text{s}$) ocurrió diez veces durante 1983 como se aprecia en la Figura N° 7.3.

En resumen, pues, las avenidas que ocurren durante los Meganiños se caracterizan, tanto por su larga duración como por alcanzar valores instantáneos muy altos y repetidos. Todo esto es sumamente dañino. Ocurren también descargas inusitadas de quebradas, consideradas erróneamente como secas, las que pueden llegar a caudales sumamente grandes, pero que no pueden apreciarse debidamente por no existir registros. Sin embargo, se sabe que en muchas de estas quebradas su descarga habitual es cero, como se expuso en el Capítulo 6.

Las descargas extraordinarias de los ríos van acompañadas de aumento del transporte sólido, de alteraciones fluviomorfológicas como erosión y sedimentación, y de diversas manifestaciones de la dinámica fluvial, como formación de brazos o cambios de recorrido, cuya presentación y análisis está fuera de las características hidrometeorológicas y escapa a los objetivos de este capítulo. En las Figuras N° 7.2 y 7.3 se aprecia varios ejemplos del contraste que significa en las descargas la aparición de los grandes Niños.

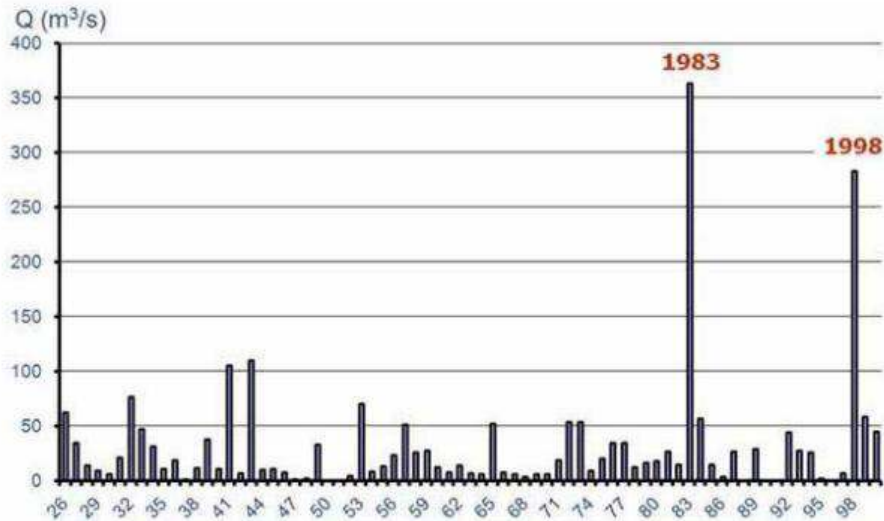


Figura N° 7.2 Notable contraste que significaron los Meganiños de 1982-83 y 1997-98 dentro de los caudales medios anuales del río Piura en el periodo 1926-2000.

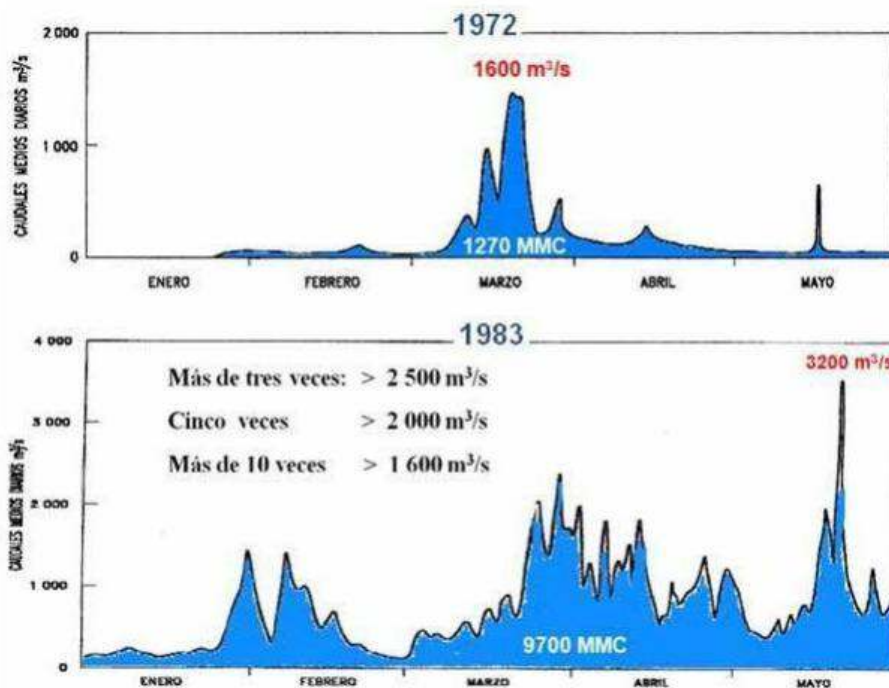


Figura N° 7.3 Descargas medias diarias del río Piura (Estación Puente Sánchez Cerro) en los años 1972 y 1983. Se observa la sucesión de picos de las descargas medias diarias para el año 1983.

7.2.4 Magnitud e intensidad del FEN

Cuando recordamos los Niños, o las grandes lluvias del pasado, surge inmediatamente la idea de compararlos. Profundizando aún más, cabría la pregunta ¿Qué significa que un Meganiño sea mayor o menor que otro?

Frecuentemente los fenómenos naturales que producen desastres se miden o caracterizan por su intensidad, es decir, por la gravedad de los daños ocurridos. Sin embargo, también podrían medirse por la magnitud intrínseca del Fenómeno, independiente de la intensidad de los daños que produzca. Esta diferencia entre intensidad y magnitud de los Meganiños está inspirada en la forma en la que se estudian los sismos. Veamos un ejemplo. Si con ocasión de la aparición de grandes avenidas fallase un puente importante, esto no significaría necesariamente que la magnitud del fenómeno natural haya sido muy grande, puesto que la falla podría haber sido causada por un error de diseño o a una combinación local extremadamente rara de determinados fenómenos naturales. Una determinada avenida en un río puede dar lugar a lo largo de su curso a daños de diversa intensidad.

La intensidad del FEN en un lugar determinado podría apreciarse por los daños producidos. Así por ejemplo, cuando se dice que el Meganiño de 1891 produjo en el Perú 2000 muertos, o que el Meganiño de 1998 provocó la caída de 58 puentes, se está hablando de la intensidad del Fenómeno. Los daños se pueden manifestar en la pesca, en la actividad agropecuaria, los transportes, la vivienda, los centros poblados y, sobre todo, en la pérdida de vidas humanas, que por su carácter de irreparables constituyen lo más dramático de los desastres.

En las obras de ingeniería civil la intensidad del fenómeno podría medirse por el impacto económico de los daños a las infraestructuras, tanto en lo que respecta al costo de reposición como al de interrupción del servicio. Un Meganiño de determinada magnitud suele presentarse con intensidad variable según el lugar considerado. La intensidad con la que se manifiesta un Meganiño en cada lugar y en cada momento depende no sólo de su magnitud, sino de diversos factores vinculados fundamentalmente al grado de desarrollo físico alcanzado, tanto en lo que respecta a la cantidad y a la calidad de las infraestructuras, como a la eficacia de las acciones de protección, prevención y capacidad de resistir y recuperarse del evento extraordinario que ha ocurrido.

Las características intrínsecas del Fenómeno, que son las determinantes de su magnitud, pueden medirse de varias maneras: aumento de la temperatura del mar, extensión y profundidad en el océano de dicha elevación de temperatura, disminución de la salinidad de las aguas marinas, variaciones en el nivel de la superficie del mar, variaciones de la presión atmosférica, elevación de la temperatura del aire, aumento de las precipitaciones y de las descargas de los ríos y de su duración en el tiempo, y algunos otros parámetros que pudieran considerarse y compararse con los valores históricos usuales (a los que se llama valores normales), independientemente de los efectos que puedan producir.

Desde el punto de vista del ingeniero proyectista las manifestaciones de la magnitud del Fenómeno están dadas fundamentalmente por los incrementos

de lluvia, escorrentía y caudales de sólidos arrastrados por las corrientes fluviales. Así por ejemplo, en la cuenca del río Piura durante el año 1998, la lluvia acumulada en los cuatro primeros meses alcanzó el valor de 21 600 millones de metros cúbicos, valor equivalente a unas 24 veces el volumen total (inicial) del embalse de Poechos. La descarga máxima del río Piura fue de unos 3200 m³/s. Estas son medidas de la magnitud del fenómeno. Para una apreciación más amplia del FEN es necesario considerar su extensión y su duración. Muchas veces la extensión del Fenómeno es tal que compromete una parte importante del planeta.

La intensidad de los daños que se experimenta ante el Fenómeno de El Niño depende de la vulnerabilidad de la zona afectada. Un fenómeno natural extraordinario, aunque sea de gran magnitud, no tiene que producir necesariamente un desastre. En todo caso, los desastres producidos por muchos fenómenos naturales se deben al desconocimiento de la Naturaleza, a la falta de planificación y de previsión en el diseño y construcción de las infraestructuras, a la falta de mantenimiento, a la irresponsabilidad o a la pobreza, pero nada de esto implica que se trate necesariamente de “desastres naturales.”

Muchas veces se hace un uso ambiguo o inadecuado de la expresión “desastres naturales.” Se suele considerar, por ejemplo, que una ciudad construida en las orillas de un río que no tenga defensas ni encauzamiento, que es invadida por las aguas provenientes del desborde fluvial, ha sufrido un desastre natural como consecuencia de un “castigo divino”, de la “furia del río”, de la “fuerza de las aguas” o “del rigor de la Naturaleza”. Últimamente se diría que la destrucción se debió al “Fenómeno de El Niño”. Estas explicaciones no permiten avanzar mucho en el esclarecimiento de la causa de lo ocurrido. De igual manera, no es cierto decir que la destrucción por la lluvia de casas de quincha con techo de cartones, ubicadas en una hondonada sin drenaje natural, sea una expresión de las fuerzas de la Naturaleza y que lo ocurrido constituya un desastre natural causado por el Fenómeno de El Niño. Es un desastre, pero de pobreza, de ignorancia y de irresponsabilidad.

El mal manejo de la expresión desastres naturales intenta soslayar el meollo del asunto. Los errores en la ubicación de una carretera, un puente o un centro poblado, la falta de defensas en un río, la precariedad de las viviendas, la vulnerabilidad de las infraestructuras, la pobreza general y la falta de planeamiento, todo ello es un desastre. El Fenómeno de El Niño no es un desastre natural, es un fenómeno natural cuya aparición convierte en desastrosa la disimulada realidad que se vivía.

En la costa norperuana puede ocurrir que se presenten grandes lluvias y avenidas y no se trate de un Fenómeno El Niño. También, lo contrario que haya un Fenómeno de El Niño y no se presenten lluvias excepcionales.

7.2.5 Daños causados por el FEN

Es muy útil describir y sistematizar los diferentes daños que ocurren o pueden ocurrir durante los grandes Niños. Esto es importante porque el conocimiento de los daños causados, o que pueden causar los Meganiños, debe ser el punto de partida en el planeamiento de las acciones para contrarrestar sus efectos negativos. Los principales aspectos involucrados en los daños asociados a los Meganiños se refieren al hombre y su hábitat, a la Naturaleza en general, a la infraestructura, a la agricultura y la ganadería, a la pesquería y la fauna marina, a las instalaciones, industrias y servicios varios, y a las actividades económicas y comerciales.

La intensidad con la que se manifiesta el FEN en cada lugar y en cada momento depende no sólo de su magnitud, sino de diversos factores vinculados fundamentalmente al grado de desarrollo físico alcanzado, tanto en lo que respecta a la cantidad y a la calidad de las infraestructuras, como a la eficacia de las acciones de protección y prevención.

Si bien el objeto de este capítulo está referido a los Meganiños, no debemos olvidar que en nuestro país es frecuente que aun con lluvias y avenidas no excepcionalmente grandes se produzcan daños importantes. Esto se debe, lamentablemente, a nuestra sistemática falta de prevención. Mientras no la superemos, los daños serán cada vez mayores. Un solo ejemplo sería suficiente, el 23 de febrero del 2013 se produjo la falla del puente de la avenida Universitaria sobre el río Rímac (Bella Unión). No hubo Niño, no hubo una gran crecida; hubo muchísimo descuido en el mantenimiento del cauce fluvial (Capítulo 10).

7.2.6 Los Meganiños de los últimos cinco siglos

Es importante mencionar, aunque sea muy brevemente, datos del pasado que demuestran que la ocurrencia de fuertes y esporádicas lluvias, debidas al Fenómeno El Niño o no, es una constante en la casi siempre árida costa del norte del Perú. Uno de los aspectos fundamentales para la evaluación del impacto de los Meganiños es el conocimiento de su probabilidad de ocurrencia. Para ello necesitamos datos. Las mediciones son muy escasas y muy recientes y, en general, de mala calidad. La información del pasado es importante porque nos permite establecer, aunque sea rudimentariamente, series históricas lo suficientemente largas como para inferir el periodo de retorno del Fenómeno. Las fuentes de que se dispone para el conocimiento de las lluvias del pasado en la costa norte del Perú son diversas y variadas.

La identificación y estudio de los Meganiños del pasado forma parte de una amplia investigación que está realizando el autor, de la que se adelanta algunos resultados, tal como puede verse en el Cuadro N° 7.1 “Relación de Meganiños (1532-2012)”. Como ya se ha dicho, para los efectos de esa

investigación y para el contenido de este libro, se llama Meganiño a una alteración violenta y transitoria del clima dominante que puede deberse, o no, a lo que internacionalmente se conoce como Fenómeno de El Niño.

El objetivo de la investigación mencionada es establecer con un razonable grado de seguridad los Meganiños ocurridos en los últimos cinco siglos a partir del registro histórico iniciado en 1532 con la llegada de los españoles. El recuento se refiere exclusivamente a aquellos Fenómenos que por su magnitud pueden considerarse Meganiños, es decir, grandes Niños. Para identificarlos se ha partido de los datos existentes en diversas fuentes y se ha establecido las alteraciones climáticas ocurridas en la costa norte del Perú con las siguientes características:

- a) Lluvias en una gran extensión; es decir, se excluye las lluvias locales y sólo se considera aquéllas que cubrieron un área importante de la costa norperuana, lo suficientemente grande como para inferir la presencia de lluvias generalizadas en la región.
- b) Gran duración de las lluvias; es decir, se excluye aquellos años en los que las lluvias se presentaron por pocos días y sólo se considera aquellos años en los que se sabe que las lluvias tuvieron duraciones expresables en semanas.
- c) Aumento de la temperatura ambiental; este es un dato prácticamente imposible de obtener en forma directa de las fuentes históricas muy antiguas, pero se puede inferir a través de ciertos indicadores, tales como los daños sufridos por las plantas o la aparición de plagas, y
- d) Avenidas y desbordes de ríos; este es un dato muy incierto y que tiene que interpretarse a la luz de la realidad hidráulica existente en cada momento.

El manejo de estos elementos, junto con muchos otros, permite establecer en qué oportunidades se presentaron Meganiños. Se tiene así que en los cuatrocientos ochenta años comprendidos entre 1532 y el 2012 se habrían presentado once Meganiños. El último de ellos ha sido el de 1997-98.

Los daños causados por el FEN 1998 fueron muy grandes en el Perú. El Colegio de Ingenieros del Perú frente a la gravedad de la situación presentada publicó un libro titulado “El Fenómeno del Niño 1997-1998”, que contiene las enseñanzas dejadas por los hechos ocurridos. La parte correspondiente a Obras Viales presenta diversas recomendaciones de diseño y se incluye como Anexo 7-A de este capítulo.

**CUADRO N° 7.1
RELACIÓN DE MEGANIÑOS (1532-2012)**

Año	Intervalo	Características
1578	142	Fuertes lluvias en Lambayeque durante cuarenta días. Copiosas lluvias en Ferreñafe, Túcume, Íllimo, Pacora, Jayanca, Cinto, Chiclayo, Chicama, Chocope, Trujillo y Zaña. Desborde de ríos. Destrucción de canales. Gran daño a la agricultura. Epidemias. Plaga de langostas. No hay mediciones, pero sí numerosas descripciones. Sólo hay información del Perú.
1720	8	Copiosas lluvias en Trujillo, Piura y Paita. Desborde de ríos. Destrucción de Zaña. Enormes daños económicos a la agricultura, especialmente en Lambayeque. No hay mediciones, pero sí numerosas descripciones. Sólo hay información del Perú.
1728	63	Muy próximo al anterior. Lluvias en Piura (hubo relámpagos y truenos), Paita, Zaña (doce días), Chocope, Trujillo (40 días, corrieron ríos de agua por las calles). Desborde de ríos. Reubicación de Sechura. Ruina económica de la agricultura en Lambayeque.
1791	37	Fuertes lluvias en Piura, Paita, Lambayeque, Chiclayo y en otros lugares de la costa norte. Daños a la agricultura en Lambayeque. Fuertes lluvias entre Chincha y Pativilca.
1828	49	Importantes lluvias entre Trujillo y Piura (14 días). Tempestades. Desbordes de ríos. Inundación de Lambayeque y ruina de la agricultura del departamento. Formación de un río en Sechura. Todavía no se tiene valores del Índice de Oscilación Sur (IOS).
1877-1878*	13	Periodo húmedo de dos años seguidos. Fuertes lluvias en la costa norte. Grandes daños en el departamento de Lambayeque: fue la ruina total de la agricultura. Impacto mundial. El Índice de Oscilación Sur se volvió negativo durante diecinueve meses, casi continuos. Junio 1877: (-16,8); Febrero 1878: (-21,1).
1891	34	Torrenciales lluvias en toda la costa norte. En Piura, Trujillo y Chiclayo llovió dos meses. Chimbote, Casma y Supe quedaron en ruinas. 2000 muertos, 50 000 damnificados. Desbordes del río Rímac. Fue el primero que empezó a estudiarse científicamente en el Perú. El Índice de Oscilación Sur no adquirió valores negativos.
1925	1	Fortísimas lluvias en todo el norte. En Tumbes llovió 1524 mm. Cuenca baja del río Chancay-Lambayeque llovió 1000 mm. El río Rímac alcanza los 600 m ³ /s. Desborde de ríos. Lluvias hasta Pisco. Aumento de la temperatura del mar (frente al Callao fue de 10 °C) y del ambiente. Plagas epidemias y enfermedades. Grandes daños económicos. El Índice de Oscilación Sur no adquirió valores negativos durante el verano de la costa norperuana. En octubre llegó a -12.9.
1926	57	Fortísimas lluvias en todo el norte durante tres meses. En Tumbes llovió 1265 mm. Plagas epidemias y enfermedades. El Índice de Oscilación Sur se volvió negativo: Febrero (-14,5). El bienio 1925-26 tuvo dieciséis meses seguidos de IOS negativo.

Año	Intervalo	Características
1983	15	Fuertes y largas precipitaciones en toda la costa norte. Llovió durante seis meses en Piura y Tumbes. (2500 mm en Piura) Interrupción de carreteras. Fuertes pérdidas en la pesquería. Gran impacto mundial. Información abundante. El Índice de Oscilación Sur se volvió fuertemente negativo: Febrero (-33.3).
1998	?	Grandes lluvias en todo el norte. Fuertes descargas de los ríos. Cuantiosas pérdidas. Cayeron 58 puentes. Plaga de langostas. Grandes pérdidas económicas. Gran impacto mundial. Amplia información. El Índice de Oscilación Sur se volvió fuertemente negativo. Marzo: (-28.5)
Intervalo Medio (1578-1998)	42 años	Arturo Rocha (Junio 2013)

* Se ha considerado como que 1877-1878 ha sido un solo evento; no así en lo que respecta a 1925 y 1926, que se han considerado como dos eventos independientes.

7.3 El Impacto de la Naturaleza sobre las obras viales

El exceso de agua ejerce un impacto negativo que debe conocerse y tomarse en cuenta de un modo preferencial en el planeamiento y diseño de las obras en general y de las obras viales en particular.

7.3.1 El dinamismo de los ríos aluviales

En el Capítulo 2 se estudió las diferentes formas que toman los ríos aluviales. La proximidad entre las obras viales y los ríos nos obliga a estudiar muy bien otra de las características muy importantes del comportamiento fluvial: su movilidad. Los ríos son por su propia naturaleza fundamentalmente dinámicos. Este dinamismo se exagera durante los Meganiños, como se ha demostrado muchas veces en el Perú. Son varias las causas de dicha movilidad fluvial, entre las que puede mencionarse:

- a) Factores geológicos.
- b) Presencia o desaparición de vegetación (en las márgenes).
- c) Factores hidrológicos: Magnitud y variabilidad de las descargas.
- d) Las características geométricas del álveo.
- e) Las características hidráulicas (tirantes, pendientes, velocidades).
- f) Transporte sólido.
- g) Acciones humanas.
- h) Otras.

Las características geológicas favorables y la presencia de vegetación tienden a fijar las márgenes. La irregularidad de las descargas de los ríos, especialmente la alternancia de avenidas y sequías extremas, es causa

importantísima de la movilidad fluvial y de sus consecuencias para la estabilidad de las obras construidas en contacto con los ríos o en sus inmediaciones. En la Figura N° 7.4 se aprecia variaciones importantes en el recorrido del río Tumbes que afectaron diversas instalaciones. Se aprecia la migración de un meandro y la amenaza que representa para un camino.

Las sequías (en realidad, debería decir la disminución de caudales, puesto que sequía es un término de connotaciones económicas) significan en la presente exposición la ausencia de descargas en los ríos y quebradas, eventualmente durante largos periodos y se caracterizan por:

- a) Escasez de lluvias.
- b) Disminución o desaparición de las descargas de los ríos.
- c) Larga duración.
- d) Aparición de ríos y quebradas "secas".
- e) Aparente reducción del álveo.

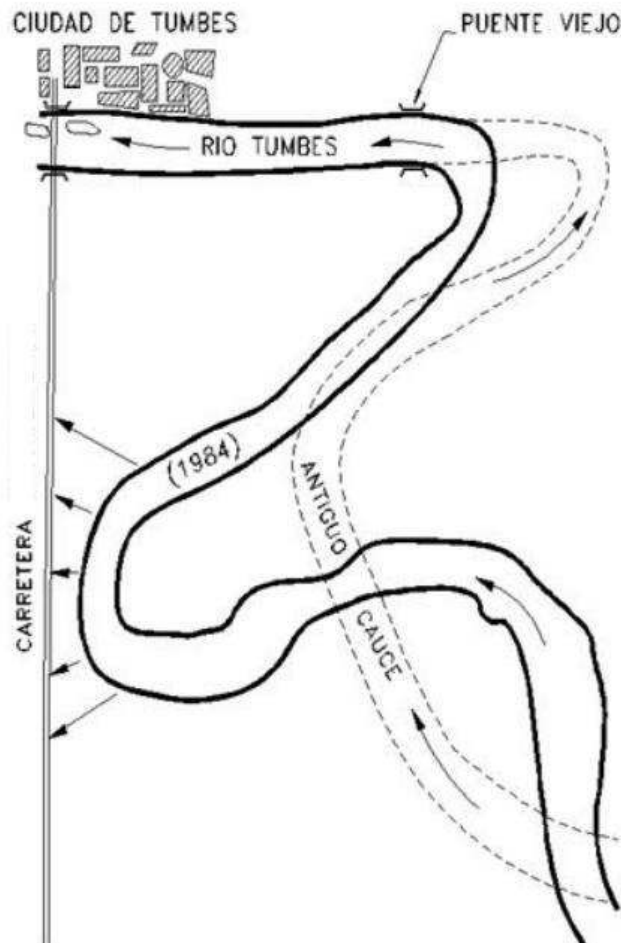


Figura N° 7.4 Variación del recorrido del río Tumbes luego del Meganiño 1982-83 y la amenaza a una importante carretera por migración de un meandro. (ARTURO ROCHA INGENIEROS ASOCIADOS S.A., 1984).

Las sequías también tienen influencia en la determinación y variación del curso de los ríos. Es conveniente subrayar que todos estos problemas de forma y apariencia de los ríos son muy diferentes en las zonas húmedas y en las zonas áridas y semiáridas. La secuencia de grandes avenidas y de disminución notable o desaparición de caudales, es en esencia el factor determinante de la movilidad y configuración fluvial. Si, luego de un largo periodo seco se presentan lluvias que dan lugar a caudales no necesariamente extraordinarios, el cauce de los ríos, el álveo específicamente, pueden encontrarse disminuido de tamaño u ocupado como consecuencia de diversas acciones humanas (construcciones) o naturales. Esto suele dar lugar a desbordes y daños que impactan negativamente sobre las obras viales. Eventualmente puede producirse un cambio del recorrido fluvial, como se aprecia en la Figura N° 7.5. Luego de una larga sequía el cauce del río Piura próximo a su desembocadura (bocana) fue invadido por arenas eólicas (dunas). Al presentarse una crecida el río buscó un nuevo cauce y se dirigió hacia la izquierda desembocando en la laguna Ramón. Se observa el antiguo cauce (paleocauce).

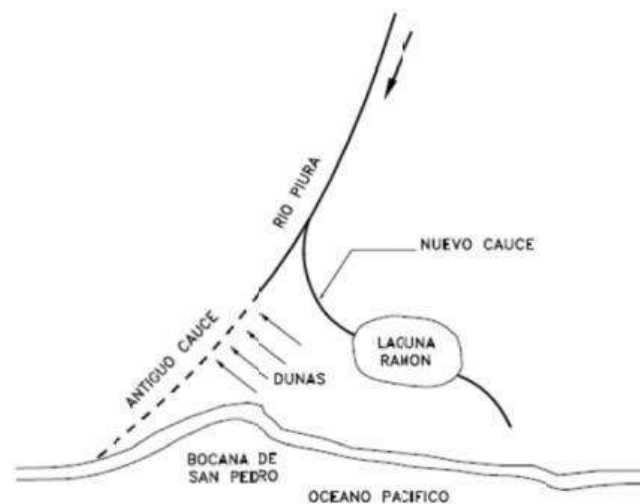


Figura N° 7.5 Representación esquemática del cambio de curso del río Piura.

Todo esto muestra la necesidad de realizar un estudio de Hidráulica Fluvial lo suficiente profundo como para prever y controlar dichos efectos. Veamos algunos ejemplos. En el río Piura el caudal máximo registrado en la Estación Sánchez Cerro-Los Ejidos ocurrió en 1998 y alcanzó aproximadamente 3200 m³/s. Sin embargo, en 1950 y en 1951 el caudal del río había sido prácticamente cero. La ocurrencia de estos caudales extremos repercute fuertemente en el comportamiento fluvial. En la costa peruana la aparición de los Meganiños origina grandes crecidas de los ríos, especialmente en las

partes bajas de los valles, lo que contribuye a causar importantes cambios en la geometría fluvial.

Para el estudio de estos efectos nos interesan las máximas avenidas, pero generalmente los registros son muy cortos y no incluyen la medición de eventos extremos. Por eso, muchas veces tiene que recurrirse a métodos indirectos. La información histórica y la tradición oral son muy importantes. En la costa peruana los Meganiños han sido decisivos para la configuración del curso de los ríos. Este es un tema de enormes posibilidades de exploración y estudio.

El transporte sólido, que es otro de los factores determinantes de la movilidad fluvial, no puede predecirse en función únicamente de las descargas o del tamaño de la cuenca. El transporte sólido depende fundamentalmente de las posibilidades de erosión que puedan desarrollarse en la cuenca. La intensidad del transporte sólido y su desarrollo en el tiempo son factores muy importantes en la variabilidad del curso fluvial. El gasto sólido, que en ocasiones puede ser muy fuerte, es un factor importante en las variaciones de curso y de sección transversal de los ríos. Todo lo que ocurre en la cuenca, deforestación por ejemplo, que es una de las causas del aumento de la erosión, repercute aguas abajo en el comportamiento fluvial. En las zonas áridas y semiáridas las avenidas son generalmente de corta duración. Al disminuir, posteriormente, el caudal y por consiguiente la capacidad de transporte sólido aparece el atarquinamiento (colmatación o agradación) de los cauces. Todo esto causa muchos problemas en los puentes.

Las deformaciones del lecho fluvial pueden tener diversos orígenes, dentro de los que están:

- a) Desplazamientos laterales.
- b) Creación de nuevos brazos.
- c) Migración de meandros.
- d) Activación de quebradas.
- e) Influencia de mareas.

El dinamismo fluvial, es decir, la gran tendencia que tienen los ríos al cambio tiene que estudiarse detenidamente cuando se va a construir obras viales cerca de ellos. Esta reflexión es particularmente importante cuando se trata de un río meándrico. Uno de los factores que incide más intensamente en el comportamiento fluvial está constituido por las acciones humanas. La construcción de presas, barrajes, encauzamientos, caminos, puentes, obras de defensa y otras, producen alteraciones intensas en el escurrimiento fluvial, las que se manifiestan con mayor intensidad durante las grandes crecidas. Estos efectos pueden ser generalizados o locales, inmediatos o mediatos, y aparecen en forma de erosión o sedimentación, y en el cambio del recorrido fluvial.

Los ríos reaccionan violentamente frente a las obras construidas sobre su cauce o junto a ellos y sufren cambios que pueden ser lentos o rápidos, locales o generalizados, leves o graves. La alteración del equilibrio fluvial como consecuencia de las acciones humanas, es decir de las obras construidas, puede conducir a serias modificaciones fluviomorfológicas que implican procesos de agradación y degradación, de difícil pronóstico y, muchas veces, de graves consecuencias. El contacto entre una obra vial y un río sólo puede definirse en tanto que el río sea estable. De acá que la solución a dicho contacto sea en realidad un problema de Hidráulica Fluvial y no sólo de vialidad.

Existen diversas manifestaciones del comportamiento fluvial que dan lugar a interacción con diversas obras de ingeniería, especialmente las viales. Entre ellas están:

- a) La inestabilidad propia de los ríos.
- b) La formación de un abanico fluvial.
- c) El efecto de curva.
- d) Los estrechamientos.
- e) La degradación.
- f) El azolvamiento (agradación).

7.3.2 Panorama general de los daños en las obras viales

A fin de tener una visión panorámica de los daños que sufren las obras viales con ocasión de los Meganiños es conveniente distinguir entre las obras urbanas y las que están ubicadas fuera de dicho ámbito. Las obras viales urbanas suelen presentar graves daños. Esto se hace evidente en importantes ciudades de la costa norte. El exceso de lluvia directa y las inundaciones resultantes provenientes de ríos y quebradas próximas producen la destrucción de muchos de los elementos materiales constitutivos de una ciudad, tales como viviendas, edificaciones diversas, sistemas de servicios públicos (agua, alcantarillado, energía) y, por cierto, las pistas y veredas.

También se ven afectados los elementos de servicio de la ciudad, es decir de la población, y que muchas veces le dan el carácter de tal, como por ejemplo centros educativos, de salud, de cultura, de protección social, de distracciones y de transporte y comunicación. En una ciudad o centro poblado afectado por una inundación, las pistas y veredas suelen sufrir importantes daños. Las calles sin pavimentar quedan totalmente destruidas. Las viviendas, según el material y características de su construcción, especialmente las de adobe, sufren daños o destrucción. Es también frecuente que en algunas ciudades las casas estén construidas a un nivel inferior al de la vereda y la calzada. Dichas viviendas resultan, pues, sumamente vulnerables.

Cuando se presentan grandes lluvias sobre un centro poblado y no hay condiciones naturales de drenaje se requiere un sistema de evacuación de aguas pluviales. Es decir, de un sistema de drenaje urbano. Esto permite que las aguas colectadas se eliminen por gravedad a un cauce ubicado a un nivel inferior, o por medio de bombeo, según las características topográficas, y siempre que la capacidad de las bombas lo permitan. Durante los Meganiños se producen lluvias tan intensas que para drenar un área de regular tamaño se requeriría una gran capacidad de bombeo, lo que no siempre es posible. Por lo tanto, se prefiere el sistema de drenaje por gravedad, siempre que ello sea posible.

Hay ciudades y, en general, asentamientos humanos en los que por el relieve del terreno es de vital importancia disponer de un sistema de evacuación de aguas pluviales. Hay lugares en los que a consecuencia del exceso de agua de lluvia no eliminada los daños son muy grandes. Así ha ocurrido, por ejemplo, en Tumbes, Sullana, Piura y muchísimos lugares más, tanto en los Meganiños más antiguos de que se tiene noticia como en los más recientes. Hay barrios y urbanizaciones ubicados en zonas urbanas, sin ninguna condición natural de drenaje. Allí, naturalmente, el problema es más grave. Hace años era frecuente ver en numerosas ciudades de la costa peruana que a lo largo de las calles había canaletas colectoras de agua de lluvia, las que hoy han desaparecido. Para resolver este problema de las inundaciones, agravado por la expansión urbana de las últimas décadas y por la desordenada ocupación territorial, se ha hecho varios avances de los que se menciona algunos a modo de ejemplo.

En Tumbes se presentan usualmente durante los Meganiños graves problemas de inundación urbana por exceso de agua de lluvia y falta de condiciones de drenaje. Así, durante el Meganiño 1997-98 fue lamentable la inundación total del barrio de San José, con 4000 viviendas afectadas y 22 000 pobladores damnificados. En la ciudad de Tumbes el problema es tan grave que alguna vez se estudió la construcción de una presa de retención en la quebrada de Los Tumpis, dentro de la ciudad misma. El río Tumbes y varias quebradas han producido inundaciones urbanas.

En la ciudad de Piura se ha construido varios sistemas de drenes troncales. En Sullana se construyó luego del Meganiño 1982-83 una interesante obra: el canal-vía de 5 km de longitud que resultó ser muy efectivo. En época de lluvias debía conducir el exceso de aguas superficiales hacia el río Chira. Cuando no hubiese lluvia, es decir, la mayor parte del tiempo, funcionaría como una vía para el tránsito vehicular. A mediados del 2001 se terminó la construcción del Sistema de Evacuación Pluvial de la ciudad de Morropón, con lo que debía evitarse la inundación de los sectores urbanos ubicados al Sudeste de la ciudad.

Sin embargo, no basta con la construcción de un sistema de evacuación de aguas pluviales, sino que debe dársele adecuado mantenimiento. Los largos

periodos secos, a veces con una duración de varios años sin lluvias importantes, agravan el problema del abandono de los sistemas de evacuación de aguas pluviales, los que se llenan de basura, escombros y desperdicios. Al presentarse una lluvia fuerte en esas condiciones suele suceder que el sistema de drenaje esté bloqueado y, por lo tanto, inútil. Como parte de un adecuado sistema de mantenimiento, el sistema de drenaje debe ser revisado y reparado con la frecuencia necesaria y debe mantenerse constantemente limpio y operativo. Lo mismo podría decirse con respecto a los cauces fluviales.

El canal-vía de Sullana, antes mencionado, sufrió importantes daños durante el FEN 1997-98, especialmente en su tramo final y en la entrega al río Chira. El 19 de enero de 1998 el nivel del agua subió 2 metros por encima del canal y se desbordó. Murieron tres personas y se destruyeron unas 100 viviendas cercanas al canal. 4000 pobladores debieron ser “reubicados” en las afueras de Sullana, en un lugar al que se le llamó Nuevo Sullana. En una visita hecha a mediados del 2001 se pudo apreciar el mal estado de la vía, varios tramos rotos, la entrega al río Chira destrozada y gran cantidad de basura y escombros a lo largo de la vía.

Las obras viales ubicadas fuera del ámbito urbano como las carreteras, los ferrocarriles y los puentes han sufrido importantes daños con ocasión de los últimos Meganiños. Como sabemos los daños en las vías de transporte tienen un significado muy importante, tanto por la magnitud de los costos de reposición como por las implicancias de la interrupción del servicio, las que pueden ser de tipo económico, social, político o estratégico.

La interrupción del tránsito vial causa diversos perjuicios, tanto a las actividades comerciales como a la población. Dicha interrupción tiene mucho que ver, por ejemplo, con la escasez y encarecimiento de los alimentos. En las últimas décadas el transporte en la costa norte depende básicamente de la Carretera Panamericana. Antes era muy importante el cabotaje. Las vías terrestres han resultado ser muy vulnerables: terraplenes, puentes y alcantarillas son lugares peligrosos. La carretera Panamericana es de alguna manera transversal al curso de muchos ríos y quebradas y sufre el embate de sus eventuales descargas.

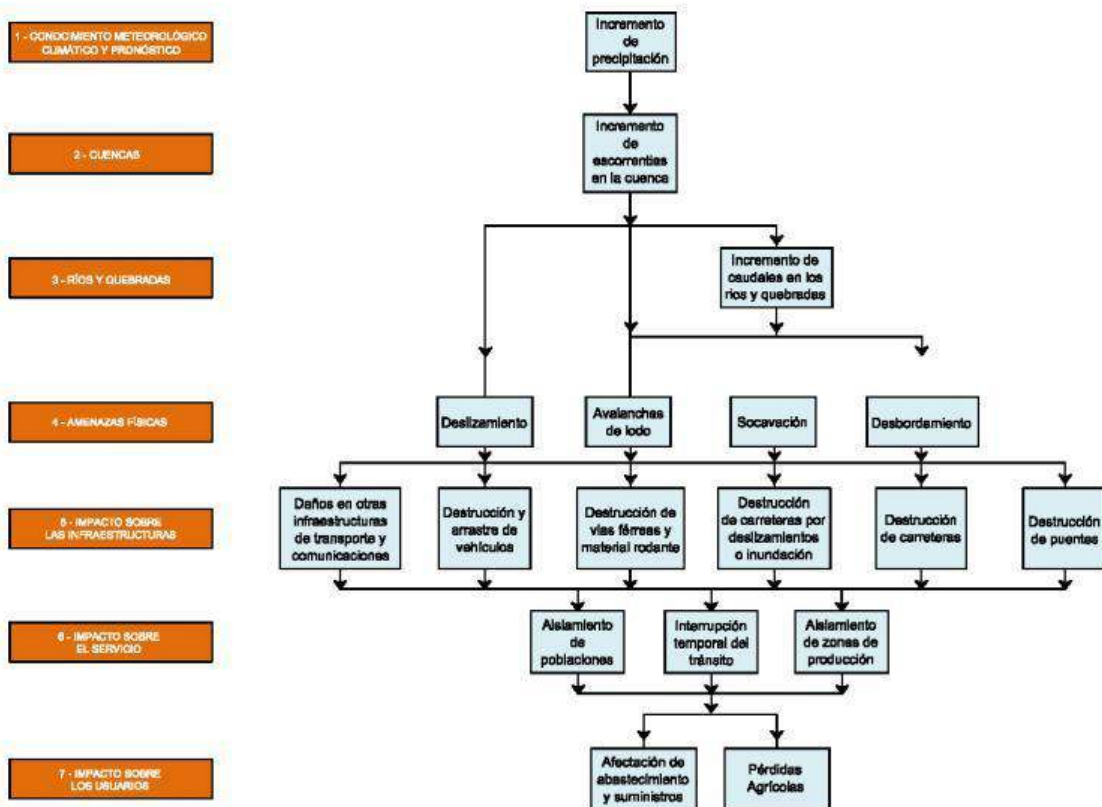
Otro aspecto muy importante relacionado a los daños que sufren las obras viales es el aislamiento de los pueblos. Así por ejemplo, en una época tan antigua como la correspondiente al Meganiño de 1578, uno de los grandes daños que se produjo fue la interrupción total de los caminos. Las consecuencias de este aislamiento fueron terribles. Las poblaciones afectadas se quedaron sin alimentos y sin posibilidad de recibir ayuda alguna durante largas semanas. Hasta ahora en el siglo XXI la interrupción de caminos durante las grandes lluvias es un problema muy serio. Los daños en los caminos rurales también son muy importantes y su impacto sobre el aislamiento de los pueblos es sumamente grave.

La Corporación Andina de Fomento (CAF) publicó el libro “Las lecciones de El Niño- Volumen V: Perú” en el que señaló los principales daños causados por el Meganiño 1997-98 a las obras viales. En el Cuadro N° 7.2 se presenta esquemáticamente lo que el libro de la CAF llamó “Encadenamiento de efectos del Fenómeno El Niño sobre el sector vialidad y transporte”.

El libro de la CAF incluye una relación detallada de las diversas afectaciones en la red vial nacional producidas por el Fenómeno El Niño 1997-98, la que se presenta en el Cuadro N° 7.3.

CUADRO N° 7.2

**ENCADENAMIENTO DE EFECTOS DEL FENÓMENO EL NIÑO
SOBRE EL SECTOR VIALIDAD Y TRANSPORTE**
(“Las lecciones de El Niño- Volumen V: Perú”. CAF)



CUADRO N° 7.3

PERÚ. IMPACTO SOBRE LA RED VIAL EN LOS DEPARTAMENTOS Y CUENCAS AFECTADAS POR EL FENÓMENO EL NIÑO 1997-98

("Las lecciones de El Niño- Volumen V: Perú". CAF)

Departamento	Cuencas	Tipo de afectaciones	Localización de afectaciones
Tumbes	Río Zarumilla	Rotura y hundimiento de puente	Quebrada Grande CP
		Colapso de puente	Puente Bolsico CP
		Erosión de las bases	Puente Piedritas CP
	Río Tumbes	Anegamiento y erosión de vías	Carreteras vecinales
	Río Bocapán	Colapso de puente	Puente Bocapán CP
	Zorritos	Erosión de puente	Puente Héroes del Cenepa, Km 1271 CP
		Pista semi-destruida por lodo	Quebrada San Isidro, Km 1256 CP
		Deslizamiento de arena y lodo en varios tramos	CP Km 1242-1254
		Erosión de puente	Pontón Huacura CP Km 1223
		Erosión de puente	Pontón Cancas CP Km 1201
		Erosión de puente	Pontón El Anma CP Km 1298
		Destrucción de pista en varios tramos	Punta Mero, Puente El Rubio, Acapulco CP Km 1175-1190
	Piura	Talara	Destrucción de pista en 10 tramos
Alcantarilla destruida			Quebrada Pasamayito CP Km 1060
Erosión de pista y puente			Puente Quebrada Devora CP Km 1034
Erosión de puentes			Puentes Pariñas I y II CP Km 1098
Erosión de puentes			Puentes Carrillo y Fernández Quebrada Cólera y San Eduardo CP Km 1169
Erosión de bases de puente			Puente Taboada - La Brea
Erosión de carretera			Negritos - Talara
Caída de taludes en carretera			Los Organos - Talara
Erosión de bases de puente			Puente Piura - Talara
Sullana		Pista destruida	CP Km 1034-1035
		Puente destruido	CP Km 1039
		Pista destruida y puente erosionado	CP Km 1042
		Alcantarilla destruida	Puente el Mocho CP Km 1043
		Colapso de Alcantarilla	Quebrada Pichichaco CP Km 1047
		Derrumbes y cangrejas en pista	Sullana - Tambogrande
		Erosión de carretera	Ignacio Escudero - Tamarindo
		Erosión y colmatación	Sullana - Cansas varios pontones
Paita		Erosión y cangrejas en pista	Piura - Paita
		Erosión y cangrejas en pista	Cruce Paita - Sullana - Pueblo Nuevo de Colán

Departamento	Cuencas	Tipo de afectaciones	Localización de afectaciones	
		Erosión de carretera	El Arenal-Cruce Pueblo Nuevo de Colán	
		Carretera erosionada	Paita - La Isilla	
	Sechura	Erosión de vía	Piura - Sechura	
	Río Chira	Destrucción de pista	Quebrada Nómara	
			Erosión de carretera	Sullana - Tambogrande
			Erosión, caída de taludes y bloqueos	Tambogrande - Puente Mácara
			Erosión de carretera	Marcavelica Santa Sofía
			Erosión y cortes de la vía	Desvío Sajinos - Ayabaca
			Erosión de carretera	Sullana - Chilaco
	Río Piura		Alcantarillas y puentes destruidos	Quebrada Las Monjas CP
			Erosión de base de puente	Puente Independencia
			Colapso de puente	Puente Carrasquillo
			Carretera destruida en varios tramos	Piura - Morropón
			Carretera erosionada y anegada	Piura - La Arena - Sullana
			Caída de plataforma, erosión	Tambogrande - Chulucanas
			Erosión de carretera	Carrasquillo - Morropón
			Caída de taludes, derrumbes, erosión	Morropón - Huancabamba
			Caída de taludes, erosión de carretera	Chulucanas - Frías
			Colapso de Puentes	Puente Jilli y Timbes (Ayabaca)
			Colapso de puente en ciudad de Piura	Puente Simón Rodríguez
			Colapso de puente en ciudad de Piura	Puente Bolognesi
			Colapso de puente en ciudad de Piura	Puente San Miguel de Piura
			Colapso por erosión de puente	Puente Sojo
			Cortes, bloqueos y erosión	Morropón - Cascajal - Motupe
	Colapso por erosión de puente	Puente Salitral		
	Lambayeque	Río Cascajal	Erosión de puente	Puente Cascajal
		Río Motupe - La Leche	Erosión y colapso	Puente Motupe
Erosión de puente			Puente Zurita	
Erosión de puente			Puente Morrope	
Erosión de puente			Puente Salas	
Erosión de puente			Puente Anchovira	
Erosión de puente			Alcantarillas Motupe I, II y otras	
Colmatación y erosión			Puente Vilela	
Chancay-Lambayeque		Carretera erosionada	Chicalayo - Puente Chumbill	
		Carretera erosionada	Pomalca - Sipán	
		Carretera erosionada	Chicalayo - Ferreñafe	

Departamento	Cuencas	Tipo de afectaciones	Localización de afectaciones
		Erosión y bloqueos en la vía	Ferrañafe - Incahuasi
		Colapso de puente	Puente Reque CP
		Erosión de puente	Puente Virú CP
	Río Zaña	Erosión de taludes	Cayaltí - Oyotún
La Libertad	Río Jequetepeque	Erosión de carretera, caída de taludes, caída de huayco, corte de vía	Pacasmayo - Tembladera
	Río Chicama	Erosión de carreteras	Chocope - Ascope - otros pueblos
	Río Moche	Erosión de carretera	Otuzco - Quiruvilca
		Erosión de carretera	Otuzco - Usquin
Río Virú	Erosión de carretera	Saraque - Huasapongo - Uringambal	
Ancash	Río Santa	Erosión de carretera	Santa - Huallanca
	Río Lacramarca	Erosión de carreteras	Carreteras vecinales de Chimbote
	Río Nepeña	Erosión de carretera. Caída de puentes	Nepeña - Jimbe - Pamparomas
		Colapso de puente	Puente Huambacho
	Río Casma	Erosión y caída de taludes carretera	Yaután - Pariacoto - Pira
	Río Culebras	Erosión de carretera	Culebras - Huanchay - Pampas
Río Huamey	Erosión y caída de taludes carretera	Carretera Malvas - Aija	
Lima	Río Pativilca	Caída de taludes y erosión de la vía	Carretera Pativilca - Cochas - Gorgor
		Erosión de taludes	Pativilca - Chasquitambo - Catac
	Río Huaura	Caída de taludes y huaycos	Carretera Supe - Pílica - Ambar
	Río Chancay	Caída de taludes de plataforma, erosión, caída de huaycos	Sayán - Churín - Oyón y otras vías vecinales
	Río Chillón	Carretera erosionada, caída de taludes, erosión de plataforma	Yangas - Canta y otras vías rurales
	Río Rimac	Carretera bloqueada por caída de huaycos, caída de taludes, erosión de pistas	Carretera Central: Quebrada Viso, San Mateo - Chicla
	Río Lurín	Carretera erosionada, corte en tramos, bloqueo por huaycos, erosión de taludes	Cieneguilla - Antioquía - Langa - Quinte
	Río Mala	Erosión de carretera, caída de taludes	Calango - Minay
Río Cañete	Erosión de vía, caída de taludes	Lunahuaná - Yauyos - Huantan - Laraos	
Ica	Río Topará	Erosión de carretera	Chincha - San Juan de Yanac
	Río Chincha	Erosión de bases de puente	Puente Cruz Verde - Tambo de Mora
		Erosión y caída de taludes	San Clemente - Castrovirreyna
	Río Pisco	Caída de taludes, erosión de vías	Pisco - Humay - Huancaro
Río Ica	Caída de huaycos, cortes de vía en varios tramos	Ica - Los Molinos - Trapiche	

Departamento	Cuencas	Tipo de afectaciones	Localización de afectaciones
		Caída de taludes, cortes en la vía, bloqueo, erosión	Ica - Aquijes - Pampahuasi - Santiago
	Río Grande	Caída de taludes, erosión	Huac Huas - Llauta - Palpa
		Caída de taludes, erosión, bloqueos	Palpa - Ocaña - Laramate
		Destrucción de vía en varios tramos	Changuillo - Coyungo
		Bloqueo de vía en ciertos tramos	CP Pampas de Nazca
Cajamarca	Río Jequetepeque	Caída de taludes, bloqueo y cortes	Chilite-Contumazá - Cascas (vía a Ascope)
	Río Jequetepeque	Bloqueo por caída de taludes y de huaycos, erosión de plataforma y cortes en la vía	Tembladera - Chilite - Cajamarca
	Río Chancay-Lambayeque	Caída de taludes, bloqueos, erosión de plataforma	Chongoyape - Llamas - Santa Cruz (vía hacia Chiclayo)
	Río La Leche-Río Chamaya	Erosión de vía, derrumbes	Jaén - Ocalli
	Río Chinchipe	Erosión de vía, caída de taludes	Jaén - San Ignacio
Amazonas	Río Alto Marañón	Erosión, bloqueos, cortes por caída de huaycos	Mesones Muro - Jaén
San Martín	Alto Mayo	Erosión, caída de taludes y plataforma, bloqueos por huaycos, anegamiento de carretera	Tarapoto - Moyobamba
Cuzco	Vilcanota	Destrucción total de carretera	Santa Teresa - Quillabamba 30 km
		Arrasamiento y desaparición de vía férrea, plataforma y puentes	Central Hidroeléctrica Machu Picchu-Quillabamba (70 km), km 122-192
	Río Yavero-Río Alto Madre de Dios	Caída de taludes, erosión, bloqueo por huaycos y cortes de la vía en varios tramos	Carretera Cuzco - Quincemil

La CAF señaló en su libro lo que llamó lecciones aprendidas y líneas de política para reducir las vulnerabilidades físicas del sector transporte en el Perú. Ellas son:

- Políticas para mejorar el conocimiento climático.
- Políticas para reducir la vulnerabilidad de las cuencas.
- Políticas para el conocimiento y manejo de las amenazas.
- Políticas para facilitar respuestas del servicio frente a situaciones de contingencia.
- Políticas para reducir las vulnerabilidades de las infraestructuras.

7.3.3 El impacto de los Meganiños sobre los cauces fluviales y las estructuras hidráulicas

Durante los Meganiños se producen los eventos hidrometeorológicos antes descritos, que traen como consecuencia un notable incremento de la producción de sólidos (sedimentos), cuya incorporación a los cursos de agua y transporte consiguiente dan lugar a alteraciones fluviomorfológicas (erosión y sedimentación) y a importantes daños a diversas estructuras hidráulicas.

La consideración de la presencia de sedimentos es de primerísima importancia para el éxito de numerosas estructuras hidráulicas. Los estudios de Transporte de Sedimentos requieren el conocimiento de las series hidrológicas que se presentaron en el pasado, además, ciertamente, de mediciones y observaciones sedimentológicas durante un periodo suficientemente largo de la historia del río. Las mayores cantidades de sólidos se presentan junto con las grandes avenidas. De acá la importancia de conocerlas y predecir su probabilidad de ocurrencia durante la vida de las estructuras.

Las numerosas obras construidas en el intento de encauzar los ríos, y las que por diversas razones de aprovechamiento hidráulico, expansión urbana, vialidad y otro tipo se han ejecutado, han significado en muchos casos una agresión a la Naturaleza.

En épocas pasadas no había grandes estructuras hidráulicas de modo que la idea básica en su diseño era que sólo funcionasen sin la presencia de eventos extremos. Al presentarse las avenidas, las estructuras simplemente desaparecían y debían ser reconstruidas. Eran, pues, esencialmente temporales. Al iniciarse en la segunda mitad del siglo XX la construcción de grandes obras de infraestructura, de las que depende el éxito de importantes proyectos, se vio la necesidad de considerar avenidas de diseño con un periodo de retorno bastante grande.

Luego de la aparición de dos Meganiños en un lapso de 15 años (1983 y 1998), con características meteorológicas, hidrológicas y sedimentológicas extraordinarias, se ha obtenido algunas enseñanzas que tendrán que reflejarse en los futuros diseños. De un lado, la probabilidad de aparición de grandes avenidas es un fenómeno mucho más próximo de lo pensado hasta hace pocos años. De otro lado, se ha visto que las avenidas que se producen durante los Meganiños se caracterizan por la amplitud de su hidrograma, el cual ya no debe considerarse más como un valor puntual e instantáneo, sino como una serie de grandes descargas a lo largo de un tiempo importante.

7.3.4 Incremento de la erosión de las cuencas y del transporte sólido fluvial

Los fenómenos de geodinámica externa en forma de huaicos, avalanchas y deslizamientos suelen ser intensos durante los Meganiños. Además del daño local que producen al arrasar centros poblados y estructuras, significan la incorporación de grandes cantidades de sólidos al cauce de los ríos. Una consecuencia importante de los Meganiños, aún no evaluada debidamente, es la gran erosión que se produce en las cuencas y el consiguiente arrastre de sedimentos por los ríos y quebradas. Las defensas fluviales que no fallan totalmente quedan debilitadas.

El 27 de febrero de 1998 a las 3:45 de la tarde se produjo una avalancha proveniente del nevado Salccantay en el Cusco. La masa desprendida de piedras y lodo corrió por la quebrada Aobamba y llegó a su confluencia con el río Vilcanota, inmediatamente aguas abajo de la sala de máquinas de la C.H. Machupicchu, la que quedó inundada. Como consecuencia de la avalancha, el cauce del río Vilcanota fue interrumpido por un dique de 70 m de alto, que cubrió el río en una longitud de 1400 m hacia aguas abajo del punto de caída y unos 800 m hacia aguas arriba, totalizando unos 2200 m. Este gran dique natural alcanzó en su corona un ancho de 300 m. Su volumen fue estimado en 28 millones de m³. La causa principal de esta avalancha estuvo en los deshielos que vienen ocurriendo en algunas partes de los Andes, atribuidos al aumento global de la temperatura. En la Cordillera Blanca también existe esta tendencia.

El gran arrastre sólido durante las crecidas de los ríos llega finalmente a su curso bajo, donde hay una menor pendiente, y, por consiguiente, una menor capacidad de transporte. Se producen entonces desbordes por incapacidad de la caja fluvial (cauce) para contener las descargas del río. A lo anterior debe añadirse la agradación generalizada del curso bajo de los ríos, lo que trae como consecuencia que pasadas las grandes avenidas exista un grave peligro de desbordes e inundaciones, aun con descargas relativamente pequeñas, dado que en general las defensas se encuentran en muy mal estado y la sección transversal del río notablemente disminuida por las razones expuestas. Las grandes descargas sólidas, y las altísimas concentraciones que suelen presentarse, dificultan y, eventualmente, imposibilitan el funcionamiento de muchas estructuras hidráulicas.

7.4 El impacto de las obras viales sobre la Naturaleza

La construcción de obras viales es parte del progreso y muchas veces resulta inevitable que haya un impacto de dichas obras sobre la Naturaleza. Lo ideal sería que este impacto fuese el menor posible. En todo proyecto se debe buscar la forma de contrarrestar los efectos negativos resultantes del impacto

de las obras sobre las condiciones naturales. La invasión de cauces fluviales por obras viales está tratada en el Capítulo 5.

7.5 Reflexión final

La conclusión general es que la planificación y el diseño de las obras viales en contacto con ríos tienen que reposar en estudios básicos de tipo multidisciplinario: Geología, Geomorfología, Geodinámica, Hidrología e Hidráulica Fluvial. No cabe la menor duda de que las obras viales son muy vulnerables al exceso de agua, sea en la forma de lluvia o de escorrentía.

Frente a los fenómenos naturales que constituyen amenazas para las infraestructuras viales, y que pueden eventualmente constituir desastres, el ingeniero proyectista se interesa por conocer fundamentalmente su magnitud y su probabilidad de ocurrencia. Magnitud y probabilidad de los eventos extremos son dos elementos asociados en el diseño. El conocimiento anticipado de la oportunidad en la que ocurrirá un determinado evento, es decir el pronóstico, es importante para el manejo de otros aspectos del comportamiento de las infraestructuras, así como para contrarrestar determinados daños producidos por el fenómeno en otras actividades humanas.

La información existente de los últimos cinco siglos nos lleva a la conclusión de que el periodo de retorno de los Meganiños en la costa norte peruana es del orden de 42 años. Investigaciones más detenidas permitirán una mejor precisión; sin embargo, la que se ha obtenido hasta la fecha es lo suficientemente confiable para obligarnos a su consideración en los diseños.

En consecuencia, la actitud de la ingeniería frente a los Meganiños debe ser la de considerarlos como eventos con los que tenemos que convivir. Nada podemos hacer para impedir que ocurran, pero sí mucho para atenuar sus efectos negativos.

La planificación y la correcta consideración de los aspectos hidráulicos de las obras viales son sumamente importantes. No debemos olvidar la profunda interacción que existe entre las obras viales y la Naturaleza. De acá la conveniencia de examinar en el capítulo siguiente algunas consideraciones de diseño de estructuras hidráulicas sometidas a los Meganiños.

ANEXO 7-A

Informe del fenómeno El Niño 1997-1998: Colegio de Ingenieros del Perú - Consejo Nacional

LAS CARRETERAS Y PUENTES EN EL PERÚ. RECOMENDACIONES PARA COSTA, SIERRA Y SELVA

1. INTRODUCCIÓN

El territorio peruano, sumamente accidentado, se encuentra dividido en tres regiones, debido a la Cordillera de Los Andes que lo recorre longitudinalmente, siendo éstas: Costa, Sierra y Selva.

La Cordillera de Los Andes, la más joven del planeta y en constante movimiento y calentamiento, verificado por el retiro de la línea de las nieves perpetuas, es el más grande obstáculo para el desarrollo nacional.

Por la presentación de distintos ecosistemas, pese a ser su división geográfica en tres regiones, se acepta una diferenciación en cinco, para identificar mejor sus condiciones de alojar un camino carretero. Esta apreciación está basada en su ubicación sobre el nivel del mar y su posición en la cordillera.

Las divisiones son las siguientes:

<i>Divisiones</i>	<i>m.s.n.m. (metros)</i>	<i>Ubicación</i>
<i>1) Costa</i>	<i>0 a 1500</i>	<i>Occidental</i>
<i>2) Sierra</i>	<i>1500 a 4000</i>	<i>Central</i>
<i>3) Puna</i>	<i>4000 a 5000</i>	<i>Central Oriental</i>
<i>4) Ceja de Selva</i>	<i>1800 a 300</i>	<i>Oriental</i>
<i>5) Selva</i>	<i>300 a menos</i>	<i>Oriental</i>

Las características que corresponden a cada una de estas regiones son:

- 1) Costa.-** *Terrenos planos, divisorias de 2do. orden. - ríos caudalosos en avenidas, zonas sedimentadas por los ríos. - pendientes en las partes bajas reducidas, ya que se trata de conos de deyección, terrenos de alto valor agrícola. - pocas lluvias. - puentes sobre cauces abiertos. - facilidades para la construcción de carreteras. - presencia de algunos ríos caudalosos.*

- 2) **Sierra.-** Terrenos comprendidos en esta zona son permanentemente erosionados por las lluvias. - laderas de fuertes pendientes, fuertes lluvias. - presencia de avenidas laterales o huaycos, hasta 2500 m.s.n.m. - quebradas laterales con poca luz de puentes, debido a lo corto de las cuencas. - carecen de vegetación. - buenos terrenos para cimentación de puentes.
- 3) **Punas.-** Vegetación con sólo Icchu y Quinual.- topografía suave.- laguna de nacimiento de ríos.- facilidad para el trazado del camino carretero.- presencia de aguajales, dificultad para drenajes.- cauces abiertos.- ríos sin pendientes.
- 4) **Ceja de Selva.-** Terreno quebrado y arcilloso.- abundante vegetación.- en permanente erosión.- necesidad de exponerlo lo menos posible a la acción directa de las lluvias.- la vegetación en las laderas es sostenida solamente por las raíces de los árboles.- posibilidad de grandes derrumbes al romperse el equilibrio.- puentes con luces grandes y tablero alto por el arrastre de palizadas y árboles. Es la zona más lluviosa del país.
- 5) **Selva.- Bosque Tropical.-** ríos caudalosos con grandes luces: separación de cuencas solo por tomadas o colinas.- terreno sedimentario de humus y arcilla. Pantano.- zonas sujetas a inundaciones de los ríos en crecientes.- estudio topográfico difícil por la tupida vegetación.- defensa permanente de la vegetación.- falta de material seco y duro para pavimentos.- dificultad de drenaje vertical y horizontal.

2. EL TRANSPORTE TERRESTRE - HISTORIA

El transporte en la época del Incario era longitudinal preferentemente, por encontrarse las mayores agrupaciones humanas y las mejores tierras de cultivo, entre los valles interandinos de la Sierra, los mismos que permitían mantener alimentada una población superior a los 10 millones de habitantes. Con la llegada de los Conquistadores sufrió una modificación pasando de longitudinal a transversal, ya que ello permitía la exportación hacia España de las riquezas del país. Si bien los españoles trajeron al Perú la rueda y los equipos, no fue muy útil para el transporte de carga en carros, utilizándose estos preferentemente en las ciudades.

Con la llegada del ferrocarril, en todas las quebradas laterales productivas de la costa, se estableció este sistema masivo de transporte terminando en un muelle de lanchonaje, lo que generó agrupaciones humanas en sus cercanías, que hoy constituyen las mayores ciudades del país. Al llegar el automóvil, en el año de 1920, comienza la decadencia del ferrocarril, llegando al punto más bajo en el año de 1925, donde muchas líneas, que por su escasa longitud eran antieconómicas, fueron sustituidas por el camino carretero.

Para adaptarse a las condiciones de las condiciones de los sistemas orográficos anteriormente descritos, se tienen diferentes sistemas de trabajo y ubicación de ejes de carreteras.

Lo difícil de nuestro territorio no permite la utilización de normas generales para el diseño de las vías terrestres, ya que la ubicación del eje debe obedecer a las características zonales. Al producirse la caída del Presidente Leguía en el año de 1929, existían en el Perú 18000 Km. de carreteras, de los cuales solamente 1800 Km. eran afirmados, habiéndose ejecutado la mayoría de ellos, por el trabajo forzado de la Ley de Conscripción Vial, obligatoria 15 días al año para todo ciudadano entre 19 y 50 años, y cuya aplicación había sido confiada a "comisarios que eran los hacendados, los mismos que habían ejecutado trochas tratando de integrar sus haciendas o lograrlas conectar con los centros poblados.

El trabajo ejecutado constituía una serie de trochas inconexas. En un período de 4 años se había pasado de 4000 A 18000 Km. con la aplicación de dicha Ley. Trabajo notable fue la construcción de la Carretera Mejorada Pampa La Quinua, de 180 km, en 9 meses de trabajo incluyendo la construcción de 4 puentes metálicos. Fue inaugurada para el aniversario de la Batalla de Ayacucho.

En el año de 1931 se fijaron LAS NORMAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS y se hizo un programa de 77 proyectos con una longitud de 7714 Km., dictándose la disposición que solamente se podía construir, como máximo dos de ellas, en cada Departamento.

En el año de 1933 se inicia un Plan Vial bajo el control del Ing. Don Federico Basadre quien ordena la utilización de todos los tramos construidos bajo la Ley de Conscripción Vial, razón por la cual, si bien existe un Reglamento de Normas de Construcción, este no es rápidamente cumplido, ya que los Ingenieros se ven ante una sabia disposición que permite conectar todo el país a bajos costos y en base a trabajos a mano. La necesidad de adecuar los proyectos al uso exclusivo de la mano de obra generó una sólida red vial, que hasta la fecha con conservación muy limitada, continúa prestando servicios sin mayores interrupciones.

En el año de 1950, el Gobierno preparó el Plan Vial de los 1000 millones de soles, principalmente para la ampliación de la vía al Centro Lima- Oroya- Tarma, La Merced, la Huánuco- Pucallpa, la Olmos- Marañón y el asfaltado de parte de la Carretera Panamericana de la Costa; así como también para la adquisición de Equipo Mecánico.

En los años 60 vienen Misiones Extranjeras y se formula una nueva NORMA DE DISEÑO DE CARRETERAS, cuya aplicación bajo la supervisión de compañías consultoras extranjeras ha generado algunos problemas.

Las normas americanas, que son aplicadas por los consultores, fueron calificadas como inapropiadas por los países latinoamericanos en el Congreso realizado en el año 1975 en San José de Costa Rica, proponiéndose la formulación de unas Normas Generales, más de acuerdo a la economía de los países integrantes de C.O.P.A.C.A., las mismas que fueron presentadas y aprobadas en el Congreso de Caracas, efectuándose su distribución en el Congreso del año 1986 en ciudad de México.

En los últimos años se realiza un programa de reconstrucción y rehabilitación de carreteras a nivel nacional con préstamos del BID y el Banco Mundial con participación de empresas peruanas y extranjeras.

3. RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS VÍAS EN EL PERÚ

Zona de Costa

- *Tenerse un concepto definido de las alturas de los terraplenes o de los drenajes verticales, para evitar la contaminación del pavimento por las aguas de regadío al atravesar los valles cultivados.*
- *Buscarse los mejores suelos, pese a que ello obligue a flexibilizar la ubicación del eje.*
- *Estudiar los sistemas de drenajes y ser más exigentes en su buena construcción, para evitar la formación de depósitos de lluvias.*
- *En las zonas áridas, uno de los principales problemas es que en épocas de lluvias extraordinarias, se generen interrupciones del tráfico por la descarga de aguas que atraviesa la carretera.*
- *Una buena solución es la construcción de badenes y si existiera una pequeña descarga permanente, diseñar dejando en el vértice central del badén, la altura suficiente para construir una alcantarilla.*
- *Esta solución permitirá que el agua de la creciente, que por lo general dura horas, pase sobre la losa del badén, paralizándose el tráfico pero no afectándose la economía del transporte, por ser este relativamente reducido.*
- *Se deberá considerar la construcción de tramos alternativos de emergencia mediante estos badenes o aceptar que estos se ubiquen en el mismo trazo principal, dependiendo de la demanda del tráfico.*
- *En otros casos será imprescindible construir un sistema de alcantarillas continuas o de puentes, a pesar que estos sean más costosos.*
- *Es recomendable en los rellenos construir bordillos con descargas por canoas en puntos determinados y proceder a impermeabilizar todas las bermas.*
- *Se debe modificar los criterios de diseño actual de obras de cruce de quebradas, donde predominan los criterios de trazo para mantener la velocidad directriz, la búsqueda del menor movimiento de tierras y menor envergadura de obras de arte en detrimento de las precauciones contra el comportamiento del flujo de quebradas, lo cual incide en optar por el estrechamiento del cauce, todo*

lo cual agrava los problemas erosivos y obstruye generalmente el pase de la riada.

En la Zona de Sierra

- *En esta zona, el eje deberá de ubicarse en corte, evitando, en todo lo posible, los rellenos en las laderas, ya que estos se deslizan debido a la fuerte pendiente.*
- *Será interesante recomendar, preferentemente buscar la mejor ubicación para el cruce de las quebradas, en cuanto al material de la cimentación de los puentes, pudiendo posteriormente ejecutar el trazado de la vía sobre puntos fijos. Este sistema fue aplicado con éxito en el Perú entre los años de 1933 a 1950.*
- *En las quebradas estrechas y deterioradas, como el caso de la del río Rímac, trasladar el trazado de la vía fuera de las vegas del río, elevándolo, debiendo de hacerse el cambio de ladera, sólo por viaductos, cuando la pendiente de la quebrada sea excesiva.*
- *En las quebradas difíciles, por la presencia de huaycos, deslizamientos, etc., deberá de estudiarse la posibilidad de hacer los sentidos de tráfico, independientes, uno por cada ladera, lo que permitiría el tráfico sin ninguna interrupción, y una menor inversión en la construcción de la vía, teniendo presente que para una ladera de 45° pasar de una plataforma de 4m a 7m, represente triplicar el movimiento de tierras, que siempre constituye en nuestras carreteras de sierra el 70% o más del costo de la vía.*
- *Usar badenes en todas las quebradas laterales con descargas eventuales, ya que normalmente la inclinación de terreno no permite construcción de alcantarillas o pontones los mismos que son mucho más caros que los badenes. El costo por m.l. de un badén representa solamente el 10% del costo de un puente.*
- *Evidentemente la construcción de badenes implica gran cantidad de señales, para evitar accidentes de vehículos que se desplazan a velocidad.*

En la Zona de Selva

- *La ubicación del eje se hará, en todo lo posible, tanto longitudinal como transversalmente, según la topografía.*
- *Se eliminarán, en todo lo posible, los cortes cerrados, grandes rellenos, en especial en las laderas, por los deslizamientos.*

- *Se deberá de ser cuidadoso en los drenajes, tanto del piso como en las laderas. La destrucción de los taludes en los cortes cerrados trae como consecuencia el cierre de la carretera por derrumbes y la generación de estos al estar los cerros sostenidos solamente por las raíces de árboles.*
- *Es preferible construir un muro para completar la plataforma que destruir un talud generando un derrumbe que se aprecia donde comienza, más no donde termina.*
- *Para todos los cortes en roca, sea cual fuere la zona, deberá de hacerse obligatorio el uso del sistema del pre corte, siendo muy exigente en las voladuras, prohibiendo la utilización de los calambucos, autorizándolos sólo para canteras. No deberá de permitirse el acabado de taludes con máquinas salvo el caso de cortes en tierra donde la aplicación de la motoniveladora es la solución apropiada.*

4. EL PROBLEMA EN LOS RÍOS Y PUENTES

Dentro de los principales problemas observados en los puentes, se tienen:

A) SOCAVACIÓN

El incremento del caudal de los ríos genera una socavación y erosión, debido al incremento del tirante hidráulico que es función del caudal, de la sección transversal y de la pendiente del cauce. Muchas veces la sección transversal de los ríos es angostada por acumulación de basura y desmonte, lo cual evidentemente genera un aumento del tirante.

En este Fenómeno del Niño, la mayoría de puentes que han colapsado, lo han hecho por problemas de socavación del lecho del río, lo cual ha ocasionado que las fundaciones de los pilares o estribos hayan perdido su sustentación, habiéndose inclinado o colapsado totalmente.

En algunos ríos del norte del país los niveles de socavación han sido muy superiores a los esperados y calculados. Sobre este tema existen diversas teorías y recomendaciones para el cálculo de la posible socavación, en base a la cual se determina el nivel de la cimentación, que sin embargo en este Fenómeno del Niño han sido superados, ocasionándose las fallas antes indicadas.

El problema para la ingeniería es como predecir los caudales máximos de un nuevo Fenómeno del Niño y los niveles de socavación máximos.

Como los primeros no se conocen y los segundos requieren de la elaboración de modelos hidráulicos, estos deben hacerse y paralelamente adoptar medidas extremas de seguridad.

Entre estas se tienen el profundizar los niveles de cimentación, aumentar las defensas de los pilares o eliminar pilares intermedios; la solución final en cada caso se deberá tomar en función de las características del suelo y evaluando los costos comparativos de las diversas soluciones.

B) LONGITUD DE LOS PUENTES

Otro de los problemas importantes observados a raíz de este Fenómeno del Niño y en anteriores, es el ocasionado por puentes de menor longitud a la necesaria para eventos extraordinarios.

En Tumbes podemos indicar, como ejemplo de lo señalado, el denominado Puente Franco, ubicado en el poblado 'Pampas de Hospital', que todavía no había sido inaugurado, y que ha colapsado en uno de sus tramos y en una extensión considerable de su acceso, que era una plataforma de relleno.

En este caso es evidente que la ubicación del puente no era la adecuada y que se hubiera requerido (para esa ubicación) una longitud de puente 3 o 4 veces superior a la proyectada y construida.

El problema de este tipo de errores es ocasionado por la falta de estudios hidráulicas y por presiones de hacer obras de bajo costo. En muchos casos interesará adicionalmente la información propia de los lugareños, que ya han vivido directamente los efectos de los Fenómenos del Niño anteriores, puesto que si no hay referencias estadísticas, la información de los propios pobladores es fundamental.

El problema de los puentes de menor luz ha originado que los rellenos de acceso hayan colapsado, quedando muchas veces solo las alcantarillas proyectadas o implemente la huella de lo que fue parte del relleno.

Parte del problema es la forma como se contratan los estudios y diseño de los puentes, donde no se define la longitud y no se cuenta con información completa de orden hidráulico.

En el capítulo final sobre recomendaciones y conclusiones se hacen comentarios específicos sobre este problema.

C) ESTUDIOS DEL CAUCE AGUAS ARRIBA Y ABAJO DE LOS PUENTES

Para el diseño y mantenimiento de los puentes interesa estudiar y monitorear el flujo del río aguas arriba y abajo del puente.

Un caso ilustrativo de los problemas que se pueden presentar por perturbaciones existentes antes o después de los puentes, es el caso de la ciudad de Piura, donde adicional a los problemas de socavación se tiene el espigón denominado "La Peñita",

entre el puente “Viejo” y el puente Bolognesi, y el sifón existente entre el puente Bolognesi y el puente Grau.

Durante este Fenómeno del Niño estas estructuras ocasionaron perturbaciones en el flujo, ocasionando que la corriente cambie de dirección y genere olas importantes que afectaron finalmente a las defensas y a los puentes propiamente dichos. Estas perturbaciones probablemente no se pensaron al momento de realizar estas construcciones.

Igualmente los angostamientos o estrangulaciones del cauce ocasionan problemas de erosión y socavación.

D) BORDE LIBRE SUPERIOR

Los puentes deben ser diseñados con un borde libre, suficiente para permitir el pase libre de los caudales líquidos como de los materiales de arrastre y los flotantes (árboles, arbustos y eventualmente animales), de manera de evitar el cierre parcial o total del vano de descarga bajo la estructura.

La obstrucción puede resultar en la sobreelevación del nivel del agua del río y eventualmente en el sometimiento de la estructura a cargas hidráulicas no previstas, debiéndose estimar el borde libre en base a la composición y dimensiones probables de los materiales flotantes.

E) DEFENSAS

Uno de los factores que influyen en el buen comportamiento de los puentes son las obras de defensa. Entre las medidas de protección de un puente contra la erosión de sus pilares y estribos se consideran como los más prácticas y seguras la protección local con enrocamientos y la construcción de diques de encauzamiento.

Deben evitarse los encauzamientos que no tienen “uña de cimentación” y los que se hacen con piedras de poco tamaño y peso. Por el contrario han dado buen resultado, como es lógico, las obras de encauce y defensa realizadas con rocas pesadas para la uña y con concreto.

Referencias

1. ARTURO ROCHA INGENIEROS ASOCIADOS S.A. **Estudio Integral del Control de Avenidas en el río Tumbes**. Tumbes, 1984.
2. BLAIKIE Piers et al. **Vulnerabilidad. El entorno social, político y económico de los desastres**. La RED-ITDG. Bogotá, Colombia. 1996.
3. CORPORACIÓN ANDINA DE FOMENTO. **Las lecciones de El Niño**. Volumen 5: PERÚ. Caracas, octubre 2000.
4. CHECA EGUIGUREN Alfredo. **La sequía en el valle regado por el río Piura**. Conferencia. Club Departamental Piura, 1926. Lima.
5. COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ. **Informe del Fenómeno del Niño 1997-1998**. Consejo Nacional. Lima, junio 1998.
6. CONSORCIO CLASS-SALZGITTER. **Estudio Definitivo para la reconstrucción y rehabilitación del sistema de defensas contra inundaciones del Bajo Piura**. Enero 2001.
7. DOMÍNGUEZ TALAVERA Iris V. **Entwurfsoptimierung städtischer Abwasserentsorgungsnetze**. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (T H), Karlsruhe, Heft 218, 2002.
8. EGUIGUREN Víctor. **Las lluvias en Piura**. Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima, Boletines N° 7, 8 y 9, diciembre 1894.
9. FRANCO Eduardo. **La gestión de los riesgos de desastre ENSO desde una perspectiva social**. I Encuentro de Universidades del Pacífico Sur. Piura 1999.
10. FRANCO Eduardo. **El Niño ¿Prevención de desastres o gestión del riesgo?** Exposición con motivo de la presentación de la Página Web sobre El Niño, de CEPES, el 18 de julio de 1997.
11. MASKREY Andrew. **Los desastres no son naturales**. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED), Bogotá, Colombia, 1993.
12. MUGICA M. Ramón. **El fenómeno de El Niño**. Piura, 1983.
13. QUINN William H. NEAL Victor, ANTUNEZ DE MAYOLO Santiago E. **El Niño Occurrences Over the Past Four and a Half Centuries**. Journal of Geophysical Research Vol. 92, N° C13 December 1987.
14. RAMÍREZ Susan. **Patriarcas Provinciales. La tenencia de la tierra y la economía del poder en el Perú Colonial**. University of New Mexico Press. Alianza Editorial, Madrid, 1991.
15. RICHARDSON E.V., SIMONS D.B. y otros. **Highways in the River Environment**.
16. ROCHA FELICES Arturo. **El dinamismo fluvial y la seguridad de las obras viales durante el Fenómeno El Niño**. Seminario "Reducción de la Vulnerabilidad de la Red Vial del País por Desastres Naturales". MTC, octubre 2005.
17. ROCHA FELICES Arturo. **Revisión de los estudios del encauzamiento y de los puentes ferroviarios en la quebrada Alcamayo-Cuzco**. Instituto de Recursos Naturales (INRENA). Diciembre 2004.
18. ROCHA FELICES Arturo. **Caracterización hidrometeorológica de los Meganiños en la costa norte peruana**. Revista "El Ingeniero Civil" N° 135, Lima, Set.-Oct. 2004.
19. ROCHA FELICES Arturo. **Consideraciones de diseño de estructuras hidráulicas sujetas al Fenómeno de El Niño**. Revista COSTOS Construcción, Arquitectura e Ingeniería. Año 09 Edición 118. Lima, enero 2004.

20. ROCHA FELICES Arturo. **Aspectos sedimentológicos del Manejo de Cuencas en zonas áridas sujetas al Fenómeno de El Niño**. II Simposio Latinoamericano de Control de la Erosión. Lima, 2004.
21. ROCHA FELICES Arturo. **Problemas en el diseño de estructuras hidráulicas a la luz del Fenómeno de El Niño y de la escasez de mediciones**. Conferencia. Comité Peruano de Grandes Presas. Lima, 2004.
22. ROCHA FELICES Arturo. **La inundación de Zaña de 1720 y las fallas en la planificación del uso de la tierra**. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Iquitos, octubre 2003.
23. ROCHA FELICES Arturo. **El impacto del Fenómeno de El Niño en las obras de ingeniería**. Conferencia. Colegio de Ingenieros del Perú. Consejo Departamental Ancash-Chimbote, agosto 2003.
24. ROCHA FELICES Arturo. **Interacción del comportamiento fluvial y las obras viales durante el Fenómeno de El Niño**. II Congreso Nacional de Obras de Infraestructura Vial. ICG. Lima, agosto 2003.
25. ROCHA FELICES Arturo. **La ingeniería frente al Fenómeno de El Niño**. "Segundo Curso Internacional sobre Mitigación de los efectos del Fenómeno de El Niño". Conferencia inaugural. CISMID. UNI. (2002). Reproducido en la Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Civil - UNI, Año 01 N° 1, Lima, 2003.
26. ROCHA FELICES Arturo. **El riesgo sedimentológico (ERS) en los proyectos de embalse**. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Iquitos 2003.
27. ROCHA FELICES Arturo. **Asesoría a la Supervisión del Estudio del Afianzamiento de la Presa Derivadora Los Ejidos, Proyecto CHIRA-PIURA**-Junio 2002.
28. ROCHA FELICES Arturo. **El Meganiño de 1578 y el pago de impuestos**. Revista del Capítulo de Ingeniería Civil del Consejo Departamental de Lima del Colegio de Ingenieros del Perú. Año 6, Número 28, Lima, 2002.
29. ROCHA FELICES Arturo. **El impacto del Fenómeno de El Niño en las estructuras hidráulicas**. Primer Foro Regional de Ingeniería Civil del Norte Peruano. Colegio de Ingenieros del Perú. Trujillo, junio 2000.
30. ROCHA FELICES Arturo. **La ingeniería civil ante el Fenómeno de El Niño**. Primer Congreso Panamericano de Ingeniería Civil y Planificación. Conferencia Inaugural. CIP-UPADI. Lima, noviembre 1998.
31. ROCHA FELICES Arturo. **Recursos Hidráulicos**. Colección del Ingeniero Civil. Colegio de Ingenieros del Perú, Libro 16. Lima, noviembre 1993.
32. RODRÍGUEZ BORRIES Rafael. **Las presas peruanas y el Fenómeno El Niño**. Comité Peruano de Grandes Presas. Boletín N° 39, septiembre-octubre 2001.
33. ROMERO Gilberto y MASKREY Andrew. **Como entender los desastres naturales**, en el libro **Los desastres no son naturales**. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (La RED). Bogotá, Colombia, 1993.
34. SCHWEIGGER Edwin. **El litoral peruano**. Lima, 1964.
35. WILCHES-CHAUX Gustavo. **La Vulnerabilidad Global**, en el libro **Los desastres no son naturales**. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (La RED). Bogotá, Colombia, 1993.

CAPÍTULO 8

CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS SUJETAS A LOS MEGANIÑOS

8.1 Introducción

Como ya se ha dicho, para efectos del presente libro se denomina Meganiño de la Costa Norperuana al cambio violento, transitorio y muy fuerte del clima dominante en la costa norte del Perú y, algunas veces, en menor medida en la costa central, aunque no siempre corresponda a lo que internacionalmente se conoce como Fenómeno El Niño (FEN), a pesar de tener localmente un comportamiento similar.

Hace años los principales daños ocasionados por las grandes lluvias, específicamente por los Meganiños, correspondían a la vida y la salud de las personas. Así por ejemplo, el Meganiño de 1891 causó en el Perú 2000 muertes. A medida que el tiempo pasa, que el progreso se manifiesta, y que se construyen más y mayores infraestructuras, éstas vienen sufriendo importantes daños al presentarse un Meganiño; en consecuencia, surge la necesidad de ampliar nuestro conocimiento acerca de las manifestaciones meteorológicas e hidrológicas de los Meganiños, así como del comportamiento de las estructuras, lo que incluye analizar sus fallas y obtener información útil para los futuros diseños. Debe recordarse que el estudio de las fallas ocurridas en las obras de ingeniería es una fuente importante de conocimiento.

Cuando en el año hidrológico 1982-83 se presentó con gran fuerza un Meganiño se pensó en los círculos especializados de la época que se trataba de un evento absolutamente extraordinario, cuya probabilidad de repetición era muy baja. En algunas publicaciones técnicas de la época se mencionó que las lluvias ocurridas tendrían un periodo de retorno de “400 a 500 años”. Sin embargo, quince años después en 1997-98 se presentó nuevamente el FEN, también con características de Meganiño. En ambas oportunidades los efectos negativos fueron cuantiosos. Numerosas estructuras sufrieron daños importantes. A esto debe añadirse que en los últimos cinco siglos han ocurrido en la Costa Norperuana unos once Meganiños que han causado pérdidas de vidas humanas, destrucción de ciudades, de carreteras, de puentes y de las más diversas estructuras, incluyendo por cierto, las hidráulicas. Se trata, pues, de un Fenómeno altamente recurrente y perjudicial para la red vial nacional.

Lo expuesto en los párrafos precedentes sería motivo más que suficiente para añadir al estudio científico del Fenómeno la necesidad de hacerlo desde el punto de vista de la ingeniería, con aplicación específica al diseño de las estructuras. En varios trabajos de los últimos años el autor ha desarrollado

algunos aspectos concernientes al estudio del Fenómeno desde esta perspectiva. Sin embargo, no existe un estudio sistemático acerca del efecto de los Meganiños sobre las infraestructuras. El tema es difícil y la respuesta tendrá que encontrarse mediante un proceso de aproximaciones sucesivas.

Investigaciones recientes han permitido establecer que los Meganiños son eventos con periodos de retorno relativamente bajos. A partir del procesamiento de la información disponible de los últimos cinco siglos el autor ha calculado que en la costa norperuana su periodo de retorno podría ser del orden de 42 años (Capítulo 7). Como los Meganiños son eventos hidrometeorológicos estadísticamente atípicos, es decir, diferentes a los que usualmente se presentan en la serie de máximas precipitaciones y avenidas, ha sido necesario estudiarlos específicamente y determinar sus características con la ayuda de la Climatología Histórica.

La Climatología Histórica es una especialidad paleoclimática, que algunos autores consideran muy reciente, pero que en el Perú no lo es. Consiste en la obtención e interpretación de información sobre el clima del pasado a partir de fuentes documentales históricas, tales como las que se encuentran en informes de diverso tipo, periódicos, revistas, testimonios, correspondencia, crónicas de viajes, informes oficiales, libros de contabilidad, documentos notariales, diarios de navegación, relatos de viajeros, etc.

De lo expuesto y de lo observado en los últimos años ha surgido la necesidad de esbozar, aunque sea preliminarmente, algunas consideraciones de diseño para las estructuras sujetas a los Meganiños. Ese es el tema del presente capítulo.

8.2 El diseño

El diseño de una estructura no es su simple dimensionamiento. El diseño es la concepción de la estructura, el análisis de sus funciones y objetivos, de su estabilidad, de sus problemas, de sus costos, de sus alternativas, de la forma en la que va a ser construida, operada y mantenida y del impacto ambiental que va a causar y de la manera de contrarrestarlo o disminuirlo. El diseño no es la aplicación de un conjunto de fórmulas, ni mucho menos de un programa o de una norma. El diseño es el acto creativo por excelencia del ingeniero.

Las herramientas de que dispone el ingeniero proyectista son cada vez mayores y más poderosas. A lo largo del siglo XX se ha introducido el uso de la computación, los programas, los sistemas y métodos numéricos, el uso de modelos, etc. Sin embargo, en el caso particular de las estructuras que están en contacto con el agua, uno de los aspectos más críticos del diseño es la determinación de la interacción entre la estructura y la Naturaleza; entre la obra hecha por el hombre y el agua. A este último punto se refiere este libro. Podría acá recordarse nuevamente unas palabras de Albert Einstein, citadas en el

Capítulo 3: “En los momentos de crisis, sólo la imaginación es más importante que el conocimiento”.

Los Meganiños representan un cambio fundamental de las condiciones naturales existentes. Hay un cambio radical, aunque temporal, del clima dominante. Se podría decir que es un “cambio climático” transitorio. Se trata de un fenómeno natural. No es necesariamente un desastre. Puede ser un desastre en la medida en la que nuestra ocupación del territorio y nuestras obras sean vulnerables. La mayor parte de las veces, no se trata de un “desastre natural”, sino un desastre de improvisación, de pobreza y de acumulación de errores.

La primera consideración de diseño tendría que ser la aceptación de que los Meganiños son una realidad. Son una manifestación de la Naturaleza con la que tenemos que convivir. Ante la imposibilidad de desaparecerlos o atenuarlos como tales, debemos aumentar el grado de seguridad de nuestras obras, es decir, debemos disminuir su vulnerabilidad. La disminución de la vulnerabilidad de las infraestructuras puede implicar aumento de costos, lo que debe ser evaluado, como se hace de ordinario en cualquier acción de la ingeniería, pero muchas veces la disminución de la vulnerabilidad es sólo materia de hacer las cosas mejor con la misma inversión.

Obsérvese que desde el punto de vista del diseño lo fundamental no es el pronóstico del Fenómeno, al que se viene dedicando tantos esfuerzos para otros efectos, sino la determinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento de determinada magnitud, que es el dato que se introduce en los cálculos y diseños. Sin embargo, para fines de operación y mantenimiento, planeamiento de las obras, acciones de emergencia y otros aspectos, son muy importantes los estudios que se vienen haciendo para el anuncio a corto plazo de las grandes avenidas. En la cuenca del río Piura se implementó, hace unos años un sistema de anuncio temprano de las avenidas.

La observación del comportamiento de las estructuras durante los Meganiños nos lleva al convencimiento de que otra importante consideración de diseño debe ser la correcta ubicación de las estructuras, en la más amplia acepción del término. La selección de la mejor ubicación no implica necesariamente un mayor costo. El uso adecuado del suelo y la planificación resultan fundamentales para la ubicación de centros poblados, caminos, puentes y todo el conjunto de obras que realiza la ingeniería en busca de mejores condiciones de vida para la población. Zaña fue destruida en 1720 por su mala ubicación con respecto al río. La urbanización San Diego, en pleno siglo XXI, sufre las consecuencias de su mala ubicación junto al río Chillón.

8.3 Manuales y códigos

En los diseños de ingeniería se suele tener en cuenta y usar Manuales y Códigos. Por lo tanto, es necesario tener claro lo que significan ambos conceptos. ¿Qué es un manual? Es un libro en el que se compendia lo más sustancial de una materia. En cambio, las normas son las reglas que se deben seguir o a las que se deben ajustar las conductas, tareas y otras actividades. En ingeniería, las normas son las reglas que se debe cumplir para realizar una determinada actividad. Generalmente, se agrupan en los llamados códigos o reglamentos, de obligatorio cumplimiento. Las normas establecen los criterios y requisitos mínimos para un diseño y crean derechos y responsabilidades, pues son de orden público e interés social. No es, pues, lo mismo un manual que un conjunto de normas. A veces parece existir una confusión entre los conceptos de manual y código, como se verá a continuación.

En la Resolución del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del año 2003 aprobatoria del Manual de Diseño de Puentes se señaló que su objetivo era: “Definir las normas que rijan el diseño de las estructuras que conforman los puentes para beneficio de los usuarios de la infraestructura vial”. Se menciona también que el Manual debe ser aplicado a nivel nacional y que contiene: “las normas técnicas fundamentales, pautas y lineamientos básicos para el planeamiento, análisis y diseño de puentes”. Según esto, al ser obligatorio, más parecería un código (o Reglamento) que un manual.

En los Comentarios del autor sobre los Estudios de Hidrología e Hidráulica, contenidos en el referido Manual, citados en las Referencias, se señala que si ellos fuesen parte de un manual deberían informar acerca de lo sustancial de la materia, lo que no sucede. Si fuesen un conjunto de normas (es decir, un código o un reglamento), deberían dar criterios y requisitos mínimos de cumplimiento obligatorio, lo que tampoco ocurre.

En la práctica profesional de la Hidrología e Hidráulica (presas, bocatomas, canales, defensas ribereñas, puentes, etc.), a diferencia de lo que sucede, por ejemplo, con la ingeniería sismorresistente, no hay en el Perú normas ni códigos y el ingeniero desarrolla libremente sus diseños sin requisitos mínimos. Hay, sí, como en todo el mundo, numerosos manuales para el diseño hidráulico, lo que es algo distinto. La preparación de códigos de diseño no es una tarea fácil, pues en gran medida restringe y limita la creatividad y posibilidades del ingeniero diseñador.

Al respecto, el distinguido ingeniero Héctor Gallegos afirma lo siguiente: “Los códigos forman parte de marco legal en el que se ejerce la ingeniería. En esencia, ellos deben exigir solo las condiciones mínimas indispensables para lograr la debida seguridad de los objetos en el contexto de un riesgo predefinido. En el proceso de diseño y fabricación, los ingenieros deben necesariamente respetar esas condiciones mínimas - no hacerlo es ilegal, y

merece una pena - y, si su juicio profesional lo considera necesario, superarlas.”

Un código no podría, por su propia naturaleza, contemplar todos los problemas que plantea la interacción entre un río y un puente. Hay puentes grandes y pequeños, complejos y simples y cuando interactúan con un río, se debe agregar la existencia de diferentes tipos de ríos.

8.4 La información

Para el diseño se requiere información. Uno de los mayores problemas que enfrenta el diseñador de estructuras hidráulicas es la necesidad de mediciones, datos y observaciones. La información proveniente del agua tiene una peculiaridad: el dato que no se tomó en su oportunidad se perdió para siempre. El pequeño número de estaciones de observación, la falta de calidad en la toma de datos, la ausencia de operadores, todo ello crea un vacío de información imposible de recuperar y que, desgraciadamente, corresponde a la realidad que estamos viviendo.

El diseñador enfrenta un grave problema. Tiene que diseñar en el presente, con datos del pasado, para que la estructura funcione en el futuro. Tradicionalmente, sólo se ha considerado como información aquella que provenía de una medición, a pesar de que sabíamos que podía estar mal hecha. ¿Qué hacer para ampliar nuestra base de datos? Lo único que nos queda es no considerar únicamente los datos medidos. Debemos incluir los referenciales. Las series de mediciones de que disponemos en la mayor parte de los proyectos son cortas, incompletas y de baja confiabilidad. No son pocas las oportunidades en las que, precisamente, las grandes avenidas destruyen las estaciones de medición y éstas quedan fuera de servicio durante varios años.

Para considerar el efecto de las grandes avenidas deberíamos abandonar la idea de que los únicos datos que existen son los medidos o los calculados. Hay muchas fuentes de información que nos permiten conocer, aunque sea aproximadamente, la ocurrencia de eventos extraordinarios en el pasado.

El Meganiño de 1982-83 creó un desconcierto desde el punto de vista del análisis de las series hidrometeorológicas por entonces existentes. Además, ciertamente, de la gran magnitud del Fenómeno, el desconcierto se debió a que no había mediciones de los Meganiños anteriores, lo que se interpretó como falta de datos. Pero, no es lo mismo falta de mediciones que ausencia de datos. Sin embargo, las preocupaciones con respecto a la Información no se refieren sólo a la escasez de mediciones, sino a su baja calidad. Por eso, en general debemos desconfiar de la información que se nos alcanza.

En los ríos peruanos casi ninguna avenida ha sido medida. De acá que un estudio hidrológico serio debe incluir necesariamente la verificación de la información existente, hasta donde ello sea posible. En lo que respecta a las mediciones de sólidos (sedimentos) la escasez es mayor. Sin embargo, en el diseño no podemos confiar en series muy cortas, pues las posibilidades de error serían muy grandes.

8.5 Recurrencia de los Meganiños

Lo más característico que para fines de diseño podemos señalar en la actualidad acerca de los Meganiños es el hecho de que se trata de eventos cuya probabilidad de repetición en la costa norperuana es relativamente alta.

Los Meganiños son recurrentes; es decir, que después de un cierto tiempo (Intermeganiño) vuelven a presentarse. Esto es sumamente importante para efectos de diseño de las estructuras hidráulicas en general y, de aquellas obras viales comprometidas con el agua.

Estos Fenómenos no son cíclicos ni periódicos; son estocásticos. Lo estocástico es lo perteneciente o relativo al azar; se refiere a los procesos cuya evolución en el tiempo es aleatoria, tal como la secuencia de las tiradas de un dado. Los Meganiños ocurren en cualquier momento, a veces con intervalos muy grandes y, otras, muy pequeños. El carácter estocástico de ellos tiene que examinarse desde el punto de vista de la ingeniería y a la luz de la oceanografía, la meteorología y la hidrología. Usualmente un Meganiño puede empezar en cualquier momento, se desarrolla a lo largo del año hidrológico que empieza en septiembre u octubre y termina al año siguiente. Por eso suelen designarse con un bienio, es decir, dos años sucesivos. Usualmente, por simplicidad, se designa al Fenómeno sólo con el año correspondiente al segundo (que, a veces, es el único).

Los intervalos entre Meganiños (Intermeganiños) tienen que apreciarse conjuntamente con la longitud usual de nuestras series de mediciones meteorológicas, hidrológicas y sedimentológicas, las por lo general, como ya se dijo, son muy cortas. La mayor parte de las veces no incluyen la aparición de grandes eventos, ya sea porque estos no ocurrieron durante la época en la que se tomaron los registros o porque, simplemente, no se midieron. Pero, no podemos ignorar la realidad, pues todo indica que tenemos evidencia de que en el pasado existieron grandes lluvias en numerosas oportunidades. Los Meganiños no pueden, pues, ser ignorados. Como el cálculo de los valores máximos probables es muy sensible a la longitud del registro se debe tener y usar la mayor cantidad posible de información.

A partir del análisis de los datos mencionados en el Cuadro N° 7.1 “Relación de Meganiños (1532-2012)”, del capítulo anterior, se concluyó que en los últimos cinco siglos el Fenómeno se ha presentado en el Perú unas once veces con una

magnitud importante e ingentes daños materiales y económicos y, lo que es más lamentable, con pérdida de vidas humanas, y ha constituido lo que para los fines de este libro se denomina Meganiños. De los once Meganiños aludidos, cinco de ellos han ocurrido en los últimos 122 años, con un intervalo medio (Intermeganiño) de casi 27 años, lo que justifica ampliamente la actualidad e importancia regional y nacional del estudio del impacto del Fenómeno de El Niño y de la manera de atenuar su impacto social y económico. Para los once Meganiños identificados entre 1532 y 2012 su intervalo medio es de 42 años.

Las mediciones disponibles cubren sólo de un modo parcial los eventos ocurridos en las últimas décadas, pero la realidad hidrometeorológica es mucho más amplia. Por lo tanto, en el momento de elaborar las series meteorológicas, hidrológicas y sedimentológicas, de ninguna manera debería ignorarse o dejarse de lado las referencias a la ocurrencia de Meganiños en el pasado. Son datos no descartables. Del examen de la serie hidrológica completa, incluyendo los Meganiños, se obtendrá la información que servirá de base, junto con las consideraciones de proyecto, para establecer las condiciones de diseño de cada estructura.

Naturalmente que hay un serio problema de confiabilidad. Al referirse por ejemplo a las avenidas, podría argumentarse con razón que no hay datos de los siglos anteriores y que sólo se tiene descripciones de lo que pudo haber ocurrido. Esto es cierto, pero también lo es que en la actualidad, a pesar del progreso existente, prácticamente no existen mediciones de las grandes avenidas de los ríos peruanos.

8.6 Los cambios durante el FEN

Las consideraciones de diseño para estructuras hidráulicas sujetas al FEN tienen que partir de lo observado con respecto a la nueva realidad meteorológica e hidrológica que se presenta durante los Meganiños. Lo más relevante de los cambios que se presentan durante los Meganiños y que tienen relación con lo que se viene tratando son:

- a) Aumento generalizado de la temperatura.
- b) Fuertes e inusuales lluvias de gran extensión, duración e intensidad.
- c) Fuerte incremento de las descargas líquidas y sólidas de los ríos y quebradas.
- d) Incremento de niveles de los ríos y del mar.

Cada una de estas manifestaciones, como se verá a continuación, tiene una marcada influencia en el diseño de las estructuras hidráulicas.

8.7 El impacto de las fuertes lluvias

En el capítulo anterior (Punto 7.2.2) se ha examinado las características de las fuertes lluvias que se presentan durante los Meganiños. Su incremento notable nos interesa desde varios puntos de vista. La lluvia y las grandes descargas fluviales generadas por ellas producen la caída de puentes, la interrupción de los caminos, el aislamiento de los pueblos y de las estructuras y muchos otros daños más.

Desde el punto de vista del diseño y del comportamiento de las estructuras es necesario tener en cuenta que durante los Meganiños las grandes lluvias ocurren preferentemente en las partes bajas de las cuencas. Este hecho es particularmente grave, porque usualmente en las partes bajas de las cuencas muchas de las estructuras, y centros poblados, se conciben erróneamente como si estuviesen ubicadas en una zona seca, "sin lluvias". La expresión "parte baja de una cuenca" no tiene un significado preciso. Puede variar de una cuenca a otra, pero para fines prácticos y descriptivos podría pensarse en una altitud de muy pocos cientos de metros (300 o 400 m). Esto no significa que en el resto de la cuenca no llueva. Lo que ocurre es que al aumentar la altitud más allá de esa cota va disminuyendo lo extraordinario, hasta llegar a una altura de 2000 ó 3000 metros en la que es muy pequeña la influencia del Meganiño.

Las lluvias de gran volumen, duración e intensidad afectan un área importante y dificultan o impiden las labores de operación y mantenimiento de las diversas estructuras. Los caminos de acceso se vuelven intransitables. El aislamiento de los pueblos es notable y debe ser tomado en cuenta para efectos de construcción, diseño, operación y mantenimiento de las estructuras.

El hecho de que las grandes lluvias ocurran en mayor cantidad en las partes bajas de las cuencas tiene desde el punto de vista de la consideración de los aspectos sedimentológicos del diseño un significado adicional. Durante ellas, la erosión y el transporte sólido no tienen las características usuales. Son muy intensos; grandes cantidades de sedimentos se incorporan a las corrientes. Sus propiedades físicas pueden ser diferentes a las que caracterizaban al material sólido en las mediciones hasta ese momento realizadas, en cuanto los sedimentos provenían fundamentalmente de las partes medias y altas de la cuenca. Las lluvias bajas dan lugar también a la aparición de nuevos cauces, a la "activación de quebradas" y a diversos fenómenos de geodinámica externa que resultan muy perjudiciales para los canales y las obras viales.

En muchos lugares las grandes lluvias crean problemas de drenaje agrícola y, principalmente, urbano. Es conocido que hay urbanizaciones construidas en depresiones, en lugares sin condiciones naturales de drenaje y en las que instalar un sistema de evacuación de aguas por bombeo sería sumamente costoso.

En la planificación de obras ubicadas en zonas generalmente secas, pero sujetas a los Meganiños, debe considerarse la posibilidad de ocurrencia de lluvias excepcionales durante el estiaje. La aparición del FEN, con características de Meganiño, puede implicar daños a los equipos, a la obra en ejecución e interrupción de los trabajos durante varios meses.

8.8 El Hidrograma de Diseño

En el Capítulo 6 (Punto 6.4) se ha presentado los conceptos fundamentales sobre la Avenida de Diseño. Usualmente se ha venido considerando en los diseños un valor instantáneo puntual. Sin embargo, la diferencia más notable entre una avenida ordinaria y una avenida asociada a un Meganiño, no está esencialmente en las magnitudes de los máximos valores instantáneos, sino en el hecho de que la avenida asociada a un Meganiño se caracteriza por su larga duración, el gran volumen descargado y la aparición de muchos "máximos", como se aprecia en la Figura N° 8.1 y también en la Figura N° 7.3, del capítulo anterior. Es decir, que la acción que sufre la estructura es muy intensa.

Por tanto, a la luz de lo observado en los últimos años resulta evidente que la Avenida de Diseño correspondiente a un Meganiño debe caracterizarse por un tren de ondas, en realidad por un Hidrograma de Diseño, y no por un valor puntual. La consideración de un Hidrograma de Diseño tiene grandes repercusiones en la deformación del lecho fluvial, lo que obliga muchas veces a un estudio en modelo hidráulico.

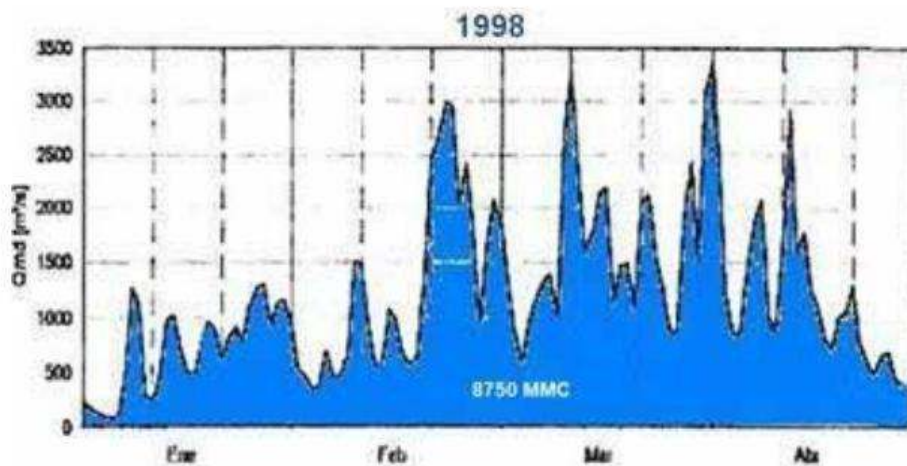


Figura N° 8.1 Tren de ondas: avenidas y picos sucesivos durante 1998 en el río Piura.

Ahora bien, si pensamos en el cálculo habitual de máximas avenidas a partir de una serie histórica y de la aplicación de un método probabilístico quedará muy claro que el resultado será sumamente sensible a la longitud de la serie

disponible. Así por ejemplo, el río Piura, bastante más estudiado que otros ríos, tenía cuando se hizo el “Estudio Definitivo para la Rehabilitación y Reconstrucción del Sistema de Defensas contra Inundaciones en el Bajo Piura”, una larga serie de datos de caudales máximos anuales (instantáneos). Para el periodo 1926-1976 la avenida centenaria calculada era de 2000 m³/s. Años después, al generarse más información se obtuvo para el periodo 1926-2001 que la avenida centenaria era de 3750 m³/s. La gran diferencia no está sólo en los valores máximos, sino en los volúmenes. La explicación es muy sencilla y bastante ilustrativa: entre 1926 y 1976 no hubo ningún Meganiño; en cambio entre 1926 y 2001 hubo dos Meganiños y el llamado “Niño Fuerte” (1972).

Las estructuras hidráulicas, que son aquellas que están en contacto con el agua, sufren el embate de las crecidas extraordinarias que caracterizan al Fenómeno de El Niño. Estas avenidas extraordinarias tienen que comprenderse a la luz del hecho antes señalado de ser nuestro país, en las zonas donde golpea el FEN, de carácter árido y, aun, hiperárido. No se trata, pues, solamente de grandes descargas, sino que ellas ocurren en cauces que muchas veces han estado secos durante años o en los que sólo ha habido, en los últimos años, descargas pequeñas. Lo más característico de El Niño, según hemos visto, es el cambio generalizado del clima y el hecho de que una región hiperárida se convierta de pronto en hiperhúmeda.

Las estructuras hidráulicas que usualmente preocupan son las presas de almacenamiento o derivación, las obras de toma, los canales, las defensas fluviales y otras, como los sistemas de agua y alcantarillado. Resulta fundamental que se considere a los puentes que interactúan con ríos dentro de las estructuras vulnerables a las fuertes crecidas fluviales. El diseño y el mantenimiento de esos puentes tienen que ser labores multidisciplinarias.

La ocurrencia de los dos últimos Meganiños hace que en la actualidad una serie de caudales aparentemente larga, resulta estar conformada por dos poblaciones estadísticas: una muy breve, la de los años con grandes Niños y otra, más larga, para los años restantes. Esta circunstancia es un desafío para el establecimiento de una curva de frecuencia de caudales y, por tanto, para la determinación de la Avenida de Diseño.

8.9 Transporte sólido durante los Meganiños

Lo expuesto en el punto anterior sobre la Avenida de Diseño y, en especial, sobre la necesidad de considerar un Hidrograma de Diseño, tiene enormes repercusiones en diversos aspectos vinculados al transporte sólido fluvial. Durante los Meganiños se intensifican notablemente la erosión de la cuenca, el gasto sólido y la degradación de los cauces fluviales. Eventualmente, se produce agradación (sedimentación) del cauce, lo que contribuye a los desbordes e inundaciones. Si, como se señaló anteriormente, las mediciones de las avenidas son escasas, lo son todavía más las de los sólidos. Tampoco

existen mediciones de los fenómenos asociados como, por ejemplo, los niveles, los perfiles longitudinales de los ríos y las variaciones de la sección transversal durante las grandes avenidas.

El incremento notable del transporte sólido tiene un gran impacto en los embalses, pues se acelera notablemente la pérdida de su volumen de almacenamiento. Al respecto se recuerda la necesidad de manejar el concepto de Unidad Hidrológica y Sedimentológica de la Cuenca y de efectuar el Estudio de Riesgo Sedimentológico (ERS) para establecer finalmente la Factibilidad Sedimentológica de un Proyecto.

Durante los dos últimos Meganiños, cuando ya había grandes estructuras hidráulicas en operación, se observaron intensos procesos de erosión de cauces fluviales, que causaron, o podrían causar en el futuro, la falla de diversas estructuras. En las estructuras grandes e importantes que se ha construido en las últimas décadas las características antes señaladas del Hidrograma de Crecidas nos alejan cada vez más de las fórmulas existentes para el cálculo de socavaciones y degradaciones. La investigación en modelos hidráulicos ha resultado ser sumamente útil como valiosa herramienta de diseño en estos casos.

Los grandes caudales, con las características señaladas, y que además tienen un caudal sólido importante producen la abrasión de las estructuras. Esto obliga al estudio y selección de nuevos materiales para los revestimientos.

8.10 Incremento de niveles

Durante los grandes Niños se produce un transporte sólido intenso. Sin embargo, al disminuir las descargas suele aparecer en las partes bajas de los cursos fluviales una sedimentación generalizada. Los lechos quedan agradados. Esto trae como consecuencia un hecho que debe ser tomado en cuenta en los diseños: Hay un incremento de niveles por colmatación (agradación) del cauce.

En algunos cursos de agua ocurre también un incremento de niveles en sus cursos bajos como consecuencia de la sobre elevación transitoria de la superficie del mar, hecho característico de los Meganiños, que algunas veces llega a varios decímetros. Cuando la agradación del cauce y la sobreelevación del nivel del mar coinciden, el efecto negativo de una avenida aumenta notablemente. Eventualmente, puede presentarse coincidentemente marea alta con lo que el resultado puede ser desastroso. Por lo tanto, todo esto debe ser tomado en cuenta en los diseños.

8.11 Consideraciones de diseño

Al llegar al final de este tema y antes de plantear algunas consideraciones de diseño, podríamos preguntarnos: ¿Es que todas las estructuras deben ser diseñadas para condiciones de Meganiño? Evidentemente que no. Sólo debe hacerse para estructuras que por su costo, importancia o consecuencias de su falla o destrucción, lo merezcan. Pero, también es cierto que muchas veces sin tener mayores sobrecostos podría tomarse en el diseño de muchas estructuras algunas medidas que aseguren su funcionamiento, aun en condiciones hidrometeorológicas extraordinarias. Es decir, la ocupación del territorio debe hacerse pensando y aceptando que la sequedad ambiental observada no es permanente y que en algún momento y, eventualmente, por varias semanas o aun meses, se producirá la tropicalización de la zona y su transformación de un área hiperseca a un área hiperhúmeda.

Las consideraciones que podrían tomarse en cuenta para el diseño de estructuras hidráulicas sometidas a los Meganiños son:

- I. Debemos aceptar que los Meganiños son fenómenos naturales con los que tenemos que convivir. Nada podemos hacer para atenuar la fuerza de ellos (es decir, su magnitud), pero si mucho para disminuir sus efectos negativos (es decir, su intensidad). Por lo tanto, debemos aspirar a disminuir la vulnerabilidad de nuestras estructuras.
- II. En la costa norperuana los Meganiños no son fenómenos extraordinariamente raros y, por lo tanto, deben tomarse en cuenta para el diseño de una estructura de mediana o gran importancia. Su periodo de retorno en la costa norte podría ser del orden de 42 años.
- III. La planificación de la ocupación de la tierra es fundamental. La correcta ubicación de una ciudad, un camino, un puente, una presa, una bocatoma, o cualquier estructura, es decisiva para disminuir su vulnerabilidad.
- IV. Desde el punto de vista de diseño nos interesa conocer la probabilidad de ocurrencia de un evento de determinada magnitud. Es en tal sentido que debemos encaminar nuestros esfuerzos. El pronóstico, en cambio, interesa para otros aspectos
- V. En las cuencas en las que haya infraestructuras importantes debería disponerse, como ya ocurre en algunas, de un sistema de alerta temprana, el que a partir de un adecuado modelo precipitación-escorrentía permita el anuncio oportuno de las grandes descargas fluviales.

- VI.** En general, debemos aceptar que el cálculo de eventos extremos es de baja confiabilidad, puesto que, además de las limitaciones teóricas, la información proveniente de “mediciones” es escasa y de baja calidad. En consecuencia, la regla debe ser la de desconfiar de la información que se nos alcanza, verificar su consistencia y tomar con mucha prudencia los resultados obtenidos.
- VII.** No debemos olvidar que muy pocas de las avenidas que aparecen en los registros de los ríos peruanos han sido medidas con un razonable grado de confiabilidad. Muchas veces no se ha hecho medición alguna. La mayor parte de los datos sobre ellas son sólo estimaciones, susceptibles de grandes errores.
- VIII.** Las series muy cortas correspondientes a mediciones meteorológicas, hidrológicas y sedimentológicas pueden inducirnos a graves errores. Para apreciar la longitud de una serie hay que recordar que para que ésta sea representativa debe incluir la ocurrencia de eventos extremos. Como el periodo medio de retorno de los Meganiños es de 42 años y, alguna vez, como es de suponer el intervalo es mayor, se requeriría series lo suficientemente largas como para cubrir estos eventos.
- IX.** En el momento de elaborar las series meteorológicas, hidrológicas y sedimentológicas que servirán de base para el cálculo probabilístico de eventos extremos, no se debe considerar únicamente los datos provenientes de mediciones, pues las series de que disponemos en la mayor parte de los casos son cortas, incompletas y poco confiables. Existen muchas fuentes de información que nos permiten conocer, aunque sea aproximadamente, la ocurrencia de eventos extraordinarios en el pasado. Últimamente ha tomado mucho auge la Climatología Histórica.
- X.** Las avenidas no deberían caracterizarse sólo por su valor máximo instantáneo, como es tradicional, sino por medio de un hidrograma. Se debe considerar que durante los Meganiños las avenidas tienen gran duración y aparecen picos sucesivos, por lo que es más propio hablar de una “onda de avenidas” y de un Hidrograma de Crecidas.
- XI.** Para diversos aspectos vinculados al diseño se debe tener en cuenta que durante los Meganiños una parte importante de la escorrentía se genera en la parte media y baja de la cuenca, habitualmente seca.
- XII.** Es imprescindible considerar que durante los Meganiños se incrementará notablemente el transporte sólido fluvial. Debe verificarse si la ley gasto líquido-gasto sólido, que pueda existir, incluye mediciones realizadas durante las grandes avenidas. Lamentablemente, la información es por lo general muy escasa.

- XIII. Considerar que durante los Meganiños se incrementarán notablemente los fenómenos de erosión y sedimentación y que para los proyectos importantes deberá hacerse una Evaluación del Riesgo Sedimentológico involucrado.
- XIV. Durante los Meganiños se suele presentar en determinados tramos una degradación (o, eventualmente, una agradación) de los cauces fluviales, para cuya predicción hay que tener en cuenta las peculiaridades del Hidrograma de Crecidas propio de los Meganiños, lo que influye en el comportamiento y estabilidad de numerosas estructuras y en la curva altura-caudal.
- XV. Como las fórmulas para el cálculo de la socavación no consideran el efecto del Hidrograma de Crecidas se debe, para estructuras importantes, recurrir a estudios en modelo hidráulico, en los que es posible reproducir un hidrograma convenientemente esquematizado.
- XVI. Considerar que durante los Meganiños en determinados tramos de ciertos ríos puede haber una sobre elevación de los niveles de la superficie libre como consecuencia de las bajas pendientes, la agradación del lecho, el aumento del nivel de la superficie del mar y de la marea alta.
- XVII. Considerar, desde el punto de vista de la operación y mantenimiento de las estructuras, que durante los Meganiños suele haber lluvias de gran extensión, duración e intensidad y que en estas condiciones muchas estructuras quedan inaccesibles.

Referencias

1. CONSORCIO CLASS-SALZGITTER. **Estudio definitivo para la reconstrucción y rehabilitación del sistema de defensas contra inundaciones en el Bajo Piura**. Enero 2001.
2. GALLEGOS Héctor. **La Ingeniería. Fallas**. GCAQ Fondo Editorial. Lima, noviembre 2005.
3. GALLEGOS Héctor. **El papel de los Códigos de Construcción en la Ingeniería Civil**. Conferencia Interamericana sobre Reducción de los Desastres Naturales. Cartagena, Colombia. Marzo 1994.
4. MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES. **Manual de Diseño de Puentes**. Fondo Editorial ICG, Segunda Edición, noviembre 2005.
5. ROCHA FELICES Arturo. **Interacción de la dinámica fluvial y el desarrollo urbano**. Foro "Problemas en el Manejo de Ríos en Áreas Urbanas", Colegio de Ingenieros del Perú, Consejo Departamental de Lima, Capítulo de Ingeniería Civil, publicado en la revista "Ingeniería Civil" año 09-2011.

6. ROCHA FELICES Arturo. **El impacto del Fenómeno de El Niño en zonas urbanas**. Foro “Problemas en el Manejo de Ríos en Áreas Urbanas”, Colegio de Ingenieros del Perú, Consejo Departamental de Lima, Capítulo de Ingeniería Civil, publicado en la revista “Ingeniería Civil” año 09-2011.
7. ROCHA FELICES Arturo. **Comentarios sobre aspectos hidráulicos del Manual de Diseño de Puentes**. IV Congreso Internacional Ingeniería Estructural, Sísmica y Puentes-ICG. Lima, junio 2010.
8. ROCHA FELICES Arturo. Revisión del estudio **Evacuación de descargas del aliviadero de emergencia y evaluación de daños a producirse en el río Chira por inundaciones** (Presa de Poechos), por encargo del proyecto Chira-Piura. Piura, 2007.
9. ROCHA FELICES Arturo. **La inundación de Zaña de 1720 y las fallas en la planificación del uso de la tierra**. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Iquitos. Octubre 2003.
10. ROCHA FELICES Arturo. **Evaluación del Riesgo Sedimentológico de los proyectos de embalse**. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Iquitos, octubre 2003.
11. ROCHA FELICES Arturo. **Aspectos sedimentológicos del Manejo de Cuencas en zonas áridas sujetas al Fenómeno de El Niño**. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Iquitos, octubre 2003.
12. ROCHA FELICES Arturo. **Caracterización hidrometeorológica de los Meganiños de la costa norte peruana**. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Iquitos, octubre 2003.
13. ROCHA FELICES Arturo. **El impacto del Fenómeno de El Niño en las obras de ingeniería**. Colegio de Ingenieros del Perú. Consejo Departamental Ancash-Chimbote. Agosto 2003.
14. ROCHA FELICES Arturo. **La ingeniería frente al Fenómeno de El Niño**. Segundo Curso Internacional sobre “Mitigación de los efectos del Fenómeno de El Niño”. Conferencia inaugural. CISMID. UNI. (2002). Reproducido en la revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Civil-UNI. Año 01, N° 1, 2003.
15. ROCHA FELICES Arturo. **Estudio de la precipitación pluvial ocurrida en el área del Proyecto Marca III en febrero de 1999**. Por encargo de la Compañía de Seguros La Positiva. Lima, 1999.

CAPÍTULO 9

DEFENSAS FLUVIALES CON ESPIGONES

9.1 Las defensas fluviales

Como consecuencia de la inestabilidad fluvial y de la necesidad de aprovechar los ríos y sus áreas próximas surgió la necesidad, desde épocas muy antiguas, de construir defensas en casi todas partes del mundo. Es muy común el comportamiento de los ríos jóvenes, caracterizados por su gran dinamismo e inestabilidad, que traen como consecuencia que no tengan un cauce estable y definido y que adquieran diversas formas, como se ha expuesto en los Capítulos 2 y 4.

Esta circunstancia dificulta y encarece el aprovechamiento fluvial y la ocupación de sus áreas próximas, por lo general de gran valor económico, pero que requieren que el río sea estable para poder desarrollarse. El Perú no es ajeno a esta situación, pues tenemos numerosos problemas no resueltos de movilidad e inestabilidad fluvial y las consecuentes inundaciones que tantos daños causan. Los ríos viejos o maduros, como por ejemplo el Rin, tienen un sistema de defensas desarrollado durante muchísimas décadas y siglos, lo que permite el aprovechamiento del río para la navegación y para el establecimiento de asentamientos humanos e industriales en sus áreas próximas. Al respecto es conveniente tener presentes las definiciones dadas en el Capítulo 5 sobre cauces, riberas y fajas marginales.

Una de las formas de defendernos de esos cambios fluviales, es decir, de controlar la inestabilidad fluvial y de manejar un río, es construir defensas ribereñas, las que eventualmente pueden constituir un encauzamiento. Su diseño se plantea como un problema de Hidráulica Fluvial. El encauzamiento, entendido como parte de un concepto más amplio que es el manejo del río, puede referirse, por ejemplo, a fijar los márgenes para impedir su desplazamiento lateral y para disminuir las probabilidades de inundación originadas en grandes descargas, a fijar una caja fluvial (álveo) compatible con la Avenida de Diseño y que permita el desarrollo de una adecuada Capacidad de Transporte para conducir los sólidos hacia aguas abajo, a obtener determinadas profundidades de la corriente (calados) requeridas por la navegación, o también, por ejemplo, al control de la migración de un meandro. En determinados problemas del manejo de un río, como por ejemplo la protección de riberas, se recurre a la construcción de obras de defensa para detener el progreso de la erosión lateral.

El manejo del río debe permitir contrarrestar las consecuencias de la intervención humana en una o más partes de la cuenca. Existen numerosos tipos de defensas ribereñas que, como se verá más adelante, varían mucho

según el objetivo específico que tengan. En cada tramo fluvial, en cada región, en cada país, se usa un determinado tipo de defensas ribereñas, cuya selección proviene de un análisis en el que se considera, entre otros, aspectos técnicos, económicos y legales.

Las defensas fluviales pueden ser continuas o discontinuas. Las defensas continuas, también llamadas marginales o longitudinales, se apoyan sobre el lecho y el talud y, como su nombre lo indica, constituyen un contacto permanente con la orilla fluvial, cuyo contorno siguen. Pueden ser diques de tierra con taludes protegidos, muros de concreto, tablestacados y otros sistemas para los que se debe resolver el grave problema de diseñar una cimentación adecuada dependiente de las profundidades de erosión (degradación) que pueda alcanzar el río.

En cambio, las defensas discontinuas llamadas también transversales están formadas por elementos aislados, separados uno del otro, pero que están diseñados de tal manera que cumplan armoniosamente su función protectora. Es decir, que trabajan en secuencia. La elección entre una protección continua o una discontinua debe resolverse mediante la consideración de múltiples factores entre los que están el conocimiento y naturaleza del río, los objetivos buscados, los riesgos aceptables, los materiales disponibles y los costos involucrados. La solución típica de defensa discontinua está constituida por un sistema de espigones, que es el tema de este capítulo. Los espigones son estructuras esencialmente ribereñas, transversales a la corriente, que penetran dentro de ella y que forman parte de un sistema de defensa que, en determinados ríos y circunstancias, resulta muy conveniente para la fijación de márgenes u otros objetivos. Hay también sistemas mixtos: unos sectores fluviales con defensas longitudinales y otros con defensas transversales (espigones). No se recomienda la instalación de espigones cuando la pendiente del río sea muy grande, pues las altas velocidades atentan contra su estabilidad. Algunos autores mencionan no usar espigones con pendientes mayores del 2%, pero esto tiene que examinarse en función de la totalidad de las características hidráulicas involucradas.

9.2 Los espigones

A continuación se examina algunas definiciones generales sobre los espigones y se presenta los objetivos, funciones, formas, ventajas y desventajas de este sistema de defensas fluviales.

9.2.1 Definiciones

Los espigones son elementos que arrancan de la orilla fluvial, a la que pueden estar “empotrados” o no, y penetran dentro de la corriente. Esto los hace bastante vulnerables a la fuerza del agua. El Diccionario de la Real Academia (DRAE) define el espigón como un “Macizo saliente que se construye a la orilla

de un río o en la costa del mar, para defender las márgenes o modificar la corriente”. Los espigones pueden tener variados objetivos y funciones que se examinan más adelante. El cuerpo del espigón puede estar constituido por diversidad de materiales. En la Figura N° 9.1 se aprecia una disposición típica de espigones.



Figura N° 9.1 Espigones en el río Chira.

En la Figura N° 9.2 se observa la representación de un espigón, a partir de un diseño efectuado para el río Tumbes, en el que se distingue varias partes:

- a) Una parte, llamada de empotramiento o de anclaje, cuya longitud se designa como L_E y que está dentro del terreno natural. Sirve para evitar o disminuir la posibilidad de que se establezca un flujo detrás del espigón. La longitud de anclaje permite que si durante el proceso constructivo, o durante la etapa inicial de funcionamiento de los espigones, ocurriese una erosión adicional, el espigón no quede separado del terreno natural constituyente de la margen.
- b) Otra parte del espigón, que está dentro del río, a la que se le llama efectiva o de trabajo. Su longitud se designa como L_T y es muy importante para el éxito del sistema. La longitud total del espigón es simplemente la suma de L_E y L_T . En ciertos espigones con el paso del tiempo una parte de la longitud que era originalmente de trabajo puede convertirse en longitud de empotramiento. El eje del espigón tiene pendiente decreciente hacia el río.
- c) La “cabeza”, “punta” o “nariz” es el extremo del espigón. Puede ser robusta o tener algún grado de protección porque en sus alrededores se produce socavación. Su elevación sobre el lecho fluvial debe ser pequeña.
- d) La cresta se desarrolla longitudinalmente desde la orilla hasta la punta del espigón; determina la altura del espigón, el que puede estar sumergido o no.

- e) Fundación, en realidad es una transición entre el cuerpo del espigón (convenientemente profundizado en el fondo del río) y el lecho fluvial. Puede estar constituida por grava en bolsas de polipropileno.

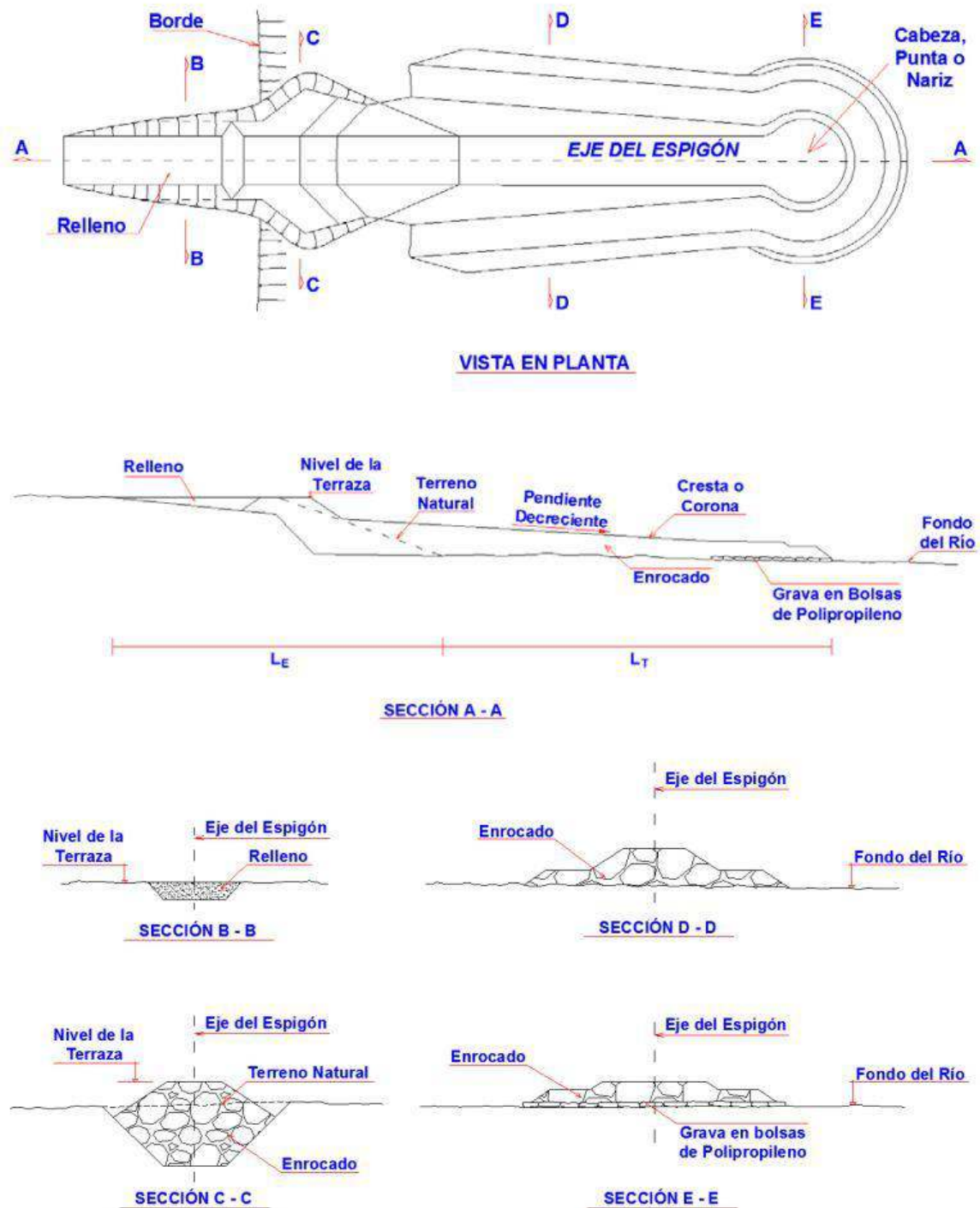


Figura N° 9.2 Esquema de un espigón típico, a partir de un diseño para el río Tumbes.

Los espigones, como estructuras ribereñas que forman una orilla virtual, deben verse como una secuencia o conjunto de elementos armoniosamente vinculados unos a otros. Los espigones no deben verse como elementos aislados, salvo que su función sea la de un deflector, como podría ocurrir en una bocatoma con efectos especiales. El comportamiento de un espigón aislado se ha examinado en estructuras especiales o con fines de investigación en trabajos de campo, investigaciones de laboratorio y modelos matemáticos (simulaciones numéricas). Así por ejemplo, los investigadores japoneses Ishii, Asada y Kishi realizaron ensayos de laboratorio de un espigón aislado no sumergido con el objeto de conocer mejor la compleja zona de separación que se produce aguas abajo de cada espigón.

9.2.2 Objetivos

Un sistema de defensas con espigones puede tener los objetivos siguientes:

- a) Defensa de las márgenes contra la erosión. A estos espigones se les llama generalmente retardadores (del flujo).
- b) Formación de un cauce más profundo, con fines de navegación. A estos espigones se les llama deflectores.
- c) Desvío u orientación de la corriente. Se usan en problemas especiales.

Puede haber también espigones que cumplan los dos primeros objetivos. Se les llama retardadores-deflectores.

9.2.3 Funciones

Las funciones de los espigones dependen del objetivo que se busque, pero en líneas generales pueden ser las siguientes:

- a) Reducir la velocidad de la corriente cerca de la orilla.
- b) Desviar, es decir, alejar, la corriente de la orilla.
- c) Prevenir la erosión de las márgenes.
- d) Establecer y mantener un ancho previamente fijado para el río.
- e) Fijar las márgenes, es decir, estabilizar el cauce fluvial.
- f) Controlar la migración de meandros.
- g) Crear un efecto de curva en una obra de toma.

h) Otras, como por ejemplo, las vinculadas a aspectos ecológicos.

9.2.4 Forma de los espigones

Los espigones pueden tener formas muy diversas. Se presenta a continuación esquemáticamente las de algunos de ellos:

a) Rectos con cabeza redondeada. La cabeza o punta del espigón es más robusta y tiene algún sistema de protección contra la socavación que se desarrolla en sus alrededores.



b) Sección transversal variable con cabeza redondeada.



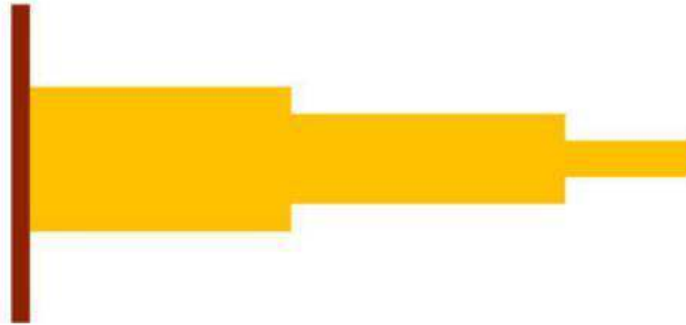
c) En forma de L (Martillo), la que actúa como protección contra la socavación. Tienen mayor capacidad para el depósito de sólidos entre los espigones. Un ejemplo de estos espigones se aprecia en la Figura N° 9.17.



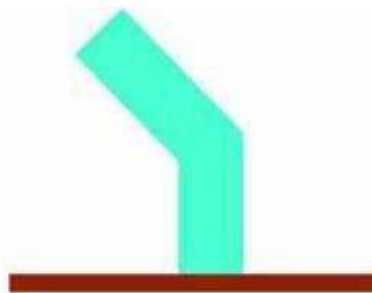
d) En forma de T, que generalmente es a 90° con respecto al espigón.



e) Forma mixta.



f) De doble ángulo.



g) Curvados, tipo "Hockey".



h) Otras.

9.2.5 Sus ventajas y desventajas

Las ventajas generales que ofrece un sistema de defensas con espigones, comparado con una defensa continua son las siguientes: Facilidad de construcción, bajo costo, facilidad de reparación luego de una crecida, posibilidad de usar diversidad de materiales, posibilidad de introducir mejoras y perfeccionar el diseño, uso de la experiencia y la mano de obra locales, construcción por etapas, y no requerimiento de mano de obra altamente especializada. Además, el sistema tiene la ventaja de ser flexible y, en general, es más económico que una defensa continua.

La ventaja de una defensa continua es que puede considerarse una estructura definitiva, en cuanto algún sistema de defensas fluviales pueda considerarse definitivo.

En algunos proyectos un sistema de protección con espigones tiene frente a una defensa continua la desventaja de disminuir el área hidráulica del cauce. Una desventaja manifiesta de los espigones es que, al igual que los pilares y estribos de puentes, constituyen elementos extraños dentro de la corriente y, por lo tanto, causan diversas formas de erosión y sedimentación en el lecho fluvial. Una de sus desventajas más importantes se refiere a la socavación que se produce en los alrededores de la punta de cada espigón como consecuencia de los vórtices y corrientes secundarias. Todo esto debe ser tenido en cuenta en el diseño.

9.3 Espigones permeables e impermeables

En general, los espigones pueden ser permeables e impermeables. Ambos tipos son muy usados en diversas partes del mundo. El uso de uno u otro depende de varios factores que se señalan más adelante.

9.3.1 Espigones permeables (Retardadores)

Los espigones permeables, es decir los que permiten que el agua pase a través de ellos con pequeña velocidad, son útiles cuando se desea favorecer la sedimentación y la formación de playas entre los espigones. Generalmente trabajan sumergidos. Producen menor perturbación en la corriente que los espigones impermeables. La “permeabilidad” es una medida de la proporción de vacíos que tiene el cuerpo del espigón en la dirección de la corriente y se puede expresar como un porcentaje. Estos espigones pueden ser de alta o de baja permeabilidad. Su función es la de retardar el flujo y disminuir la velocidad cerca de las márgenes. Por eso a veces se les llama “retardadores”. Generalmente están más espaciados que los impermeables. Los espigones permeables se caracterizan por lo siguiente:

- a) El agua, cargada de sedimentos finos, debe pasar a través de ellos.
- b) El espacio comprendido entre un espigón y otro debe irse relleno con el depósito de los sedimentos finos en suspensión que trae el río. Posteriormente, debe favorecerse el desarrollo de la vegetación.
- c) Protegen y robustecen la orilla fluvial; en realidad, contribuyen a la formación de una “orilla virtual” como consecuencia de lo señalado en los dos puntos anteriores.
- d) Se pueden ir modificando y adaptando a las circunstancias que se presenten.

- e) Los requerimientos de construcción son simples. Se usa los materiales existentes en el área y debe buscarse siempre aprovechar la experiencia local.

En general, con un sistema de espigones permeables se logra disminuir la velocidad de la corriente. Por cierto, para pensar en espigones permeables sumergidos la corriente debe tener transporte de sólidos finos en suspensión (T_s) que puedan depositar entre los espigones (Capítulo 11). En la Figura N° 9.3 se aprecia la formación de una orilla virtual al pasar el flujo de agua y sedimentos sobre los espigones.

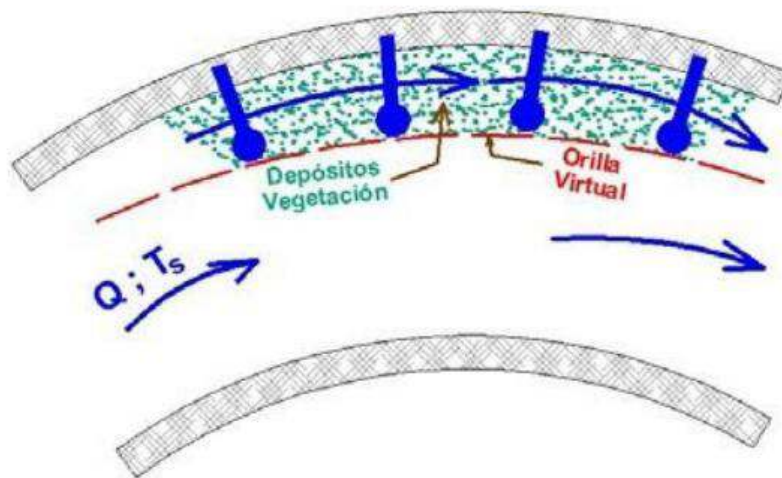


Figura N° 9.3 Formación de una orilla virtual.

9.3.2 Espigones impermeables (Deflectores)

Los espigones impermeables se pueden considerar deflectores, es decir, que modifican la dirección o la trayectoria de la corriente. Generalmente no son sumergidos y producen en la corriente una mayor perturbación que los espigones permeables. Se usan preferentemente en ríos navegables en los cuales se busca mantener una sección hidráulica central con un determinado calado. Se caracterizan por lo siguiente:

- Su función esencial es lograr que la corriente se aleje de la orilla.
- Son fundamentalmente deflectores (Figura N° 9.4).
- Con ellos se busca un estrechamiento del cauce y un aumento del calado (profundización), lo que implica un aumento de la velocidad de la corriente.
- Los procedimientos constructivos son más complejos.

- e) Se trata por lo general de “estructuras definitivas”.
- f) Favorecen la navegación, pues con ellos se aumenta el calado (Figuras N° 9.5 y 9.6).

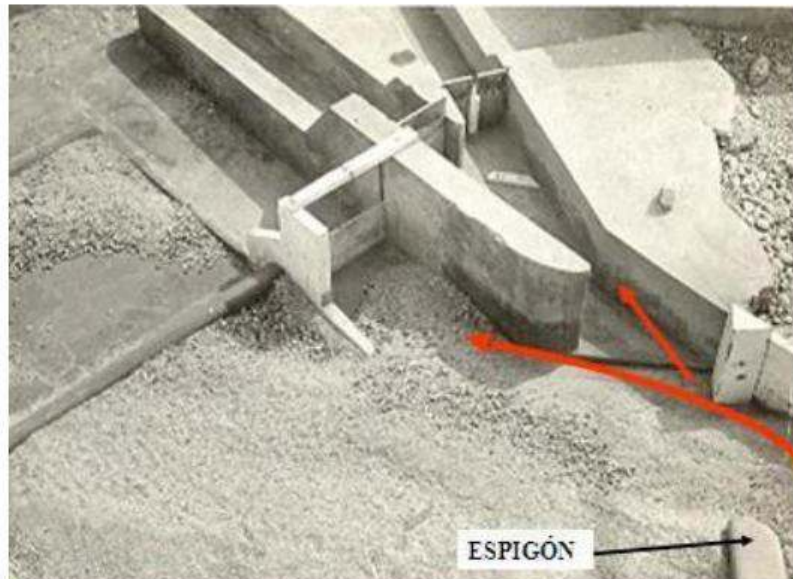


Figura N° 9.4 Se observa un espigón que actúa como deflector para crear un efecto de curva en una bocatoma.

Martín-Vide señala que en el siglo XIX se tenía en Europa el problema de ríos muy anchos, entrelazados, con zonas pantanosas (de pequeña velocidad), que constituían problemas sanitarios, pues “eran origen de enfermedades infecciosas”. Se decidió usar espigones para estrechar el cauce y por consiguiente profundizarlo y permitir que la corriente tenga mayor velocidad. A la vez, el mayor calado obtenido facilitaba la navegación.

En la Figura N° 9.6 se aprecia un sistema de espigones cuyo objetivo es angostar el río. Se observa en dicha figura que se plantea la posibilidad de construir los espigones por etapas. Es decir, inicialmente construirlos cortos y luego de observar su comportamiento alargarlos según resulte necesario.

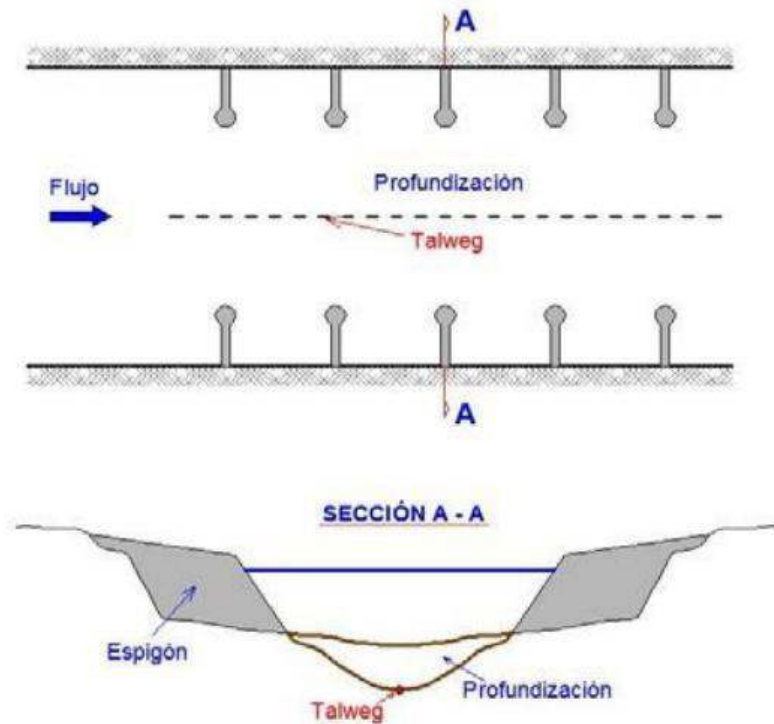


Figura N° 9.5 El conjunto de espigones permite un estrechamiento del cauce y un aumento del calado, para favorecer la navegación.

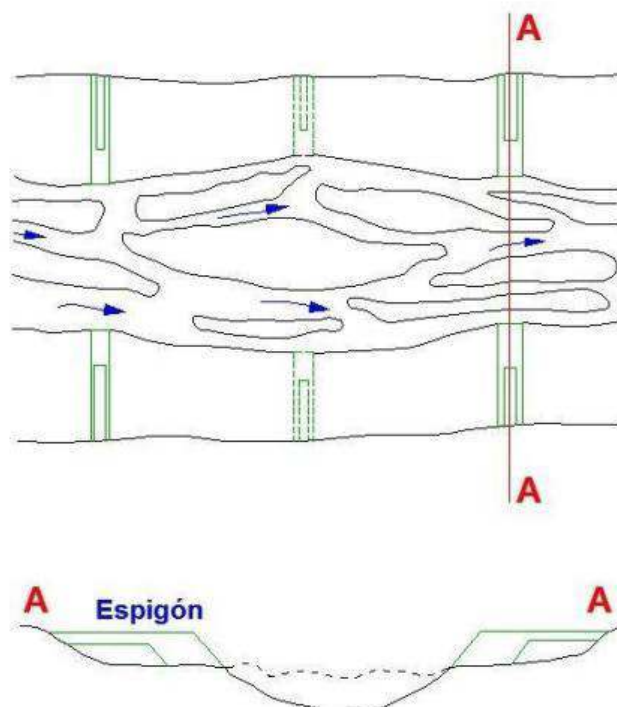


Figura N° 9.6 Se observa un río entrelazado en el que se trata de reducir su ancho mediante un sistema de espigones (Martín-Vide).

9.3.3 Comparación del funcionamiento de espigones permeables e impermeables y elección del tipo

Dentro de los factores que determinan la elección del tipo de espigón están los siguientes:

- a) La función que deben desempeñar.
- b) Las características generales del río.
- c) Las características hidráulicas y sedimentológicas del tramo fluvial comprometido.
- d) La disponibilidad de materiales de construcción.
- e) Los costos involucrados.
- f) Las restricciones que pudiera haber en el mantenimiento.
- g) La experiencia local.
- h) El tiempo disponible.
- i) Otros.

Hay también espigones de tipo intermedio, pues combinan ambas funciones. Un grupo de investigadores de la Universidad de Kyoto y de Bangladesh realizó un estudio de laboratorio, que publicaron bajo el título "Flow and Bed Deformation around a series of Impermeable and Permeable Spur Dykes", con el objetivo de comparar el comportamiento de los espigones permeables e impermeables en lo que respecta a su influencia sobre la red de corriente y las deformaciones del fondo (socavación). Este es un tema que ha interesado a muchos investigadores de diversas partes del mundo. Las pruebas se realizaron en un canal de laboratorio de 20 m de largo, 0,99 m de ancho y 0,30 m de profundidad, en el Laboratorio de Hidráulica Ujigawa de la Universidad de Kyoto. La pendiente fue de 1/3000. La arena del fondo móvil tenía un diámetro de 0,196 mm. En cada una de las márgenes se colocó 10 espigones perpendiculares a ellas. Se realizaron sucesivamente, bajo las mismas condiciones, dos series de ensayos: una, con espigones impermeables que estaban formados por elementos cúbicos y otra con espigones permeables formados a base de varillas de sección circular que daban lugar a un espigón de 50% de permeabilidad. Todos trabajaban como no sumergidos, para los caudales ensayados. No hubo incorporación de material sólido, por lo tanto se usó agua limpia. Como era de esperar los resultados mostraron un comportamiento bastante diferente para cada tipo de espigón.

Los espigones impermeables significaron una reducción notable de la sección transversal y, por lo tanto, produjeron una mayor perturbación en el flujo. A causa del estrechamiento mencionado la velocidad en el canal central aumentó. Se observaron vórtices horizontales muy complejos en los alrededores de la cabeza del espigón, lo que dio lugar a erosiones generales grandes y a severas socavaciones en los alrededores de la cabeza del espigón (especialmente, en el primero de aguas arriba). En los espigones permeables se observó un comportamiento cualitativamente similar, pero mucho menos intenso; la máxima erosión observada fue menos de la mitad de la que se presentó con los espigones impermeables. Como era de suponer se concluyó que cuando se quiere poner énfasis en el alejamiento de la corriente de la margen comprometida conviene que los espigones sean impermeables.

Otras interesantes conclusiones de ese estudio se refieren a que se podría combinar espigones permeables e impermeables y que la complejidad de lo observado indicaba que todavía faltaba mucho para disponer de modelos matemáticos (métodos numéricos) que pudiesen reemplazar a los modelos físicos, por lo que los autores de la investigación recomendaron su aplicación sólo en problemas muy específicos. Sin embargo, debe precisarse que las investigaciones en modelo físico para este tipo de fenómenos (vórtices, corrientes secundarias, distribución de velocidades, etc.) requieren instrumental de laboratorio bastante sofisticado. Hay, sin embargo, algunos valiosos intentos como los de Zhang, Nakagawa, Ishigaki y Muto, de la Universidad de Kyoto, por establecer métodos numéricos útiles. Ellos estudiaron la predicción del flujo tridimensional y la erosión local alrededor de espigones no sumergidos y encontraron una "razonable concordancia" en la predicción del campo de velocidades y la socavación mediante el modelo matemático y un modelo físico, para las condiciones en las que realizaron el estudio. Queda abierto un gran campo de análisis e investigación.

9.3.4 Materiales y elementos empleados

Los espigones se construyen con variados elementos, los que a su vez pueden estar formados de diversos materiales. Entre los elementos y materiales están los siguientes: roca, madera o bambú, gaviones, concreto, elementos prefabricados, tetrápodos, hexápodos, geotubos rellenos de material, acero (pilotes), fajina, sacos de concreto, sacos de mortero (bolsacreto), sacos de arena y muchos otros más.

Las piedras pueden colocarse al volteo o en gaviones. Maza menciona que en el río Papaloapán (México) utilizaron "bolsacreto", es decir bolsas rellenas con mortero de cemento y arena en la proporción 1:10. En la Figura N° 9.7 se aprecia diversos elementos para constituir espigones. El principio básico es usar los materiales existentes en la zona.

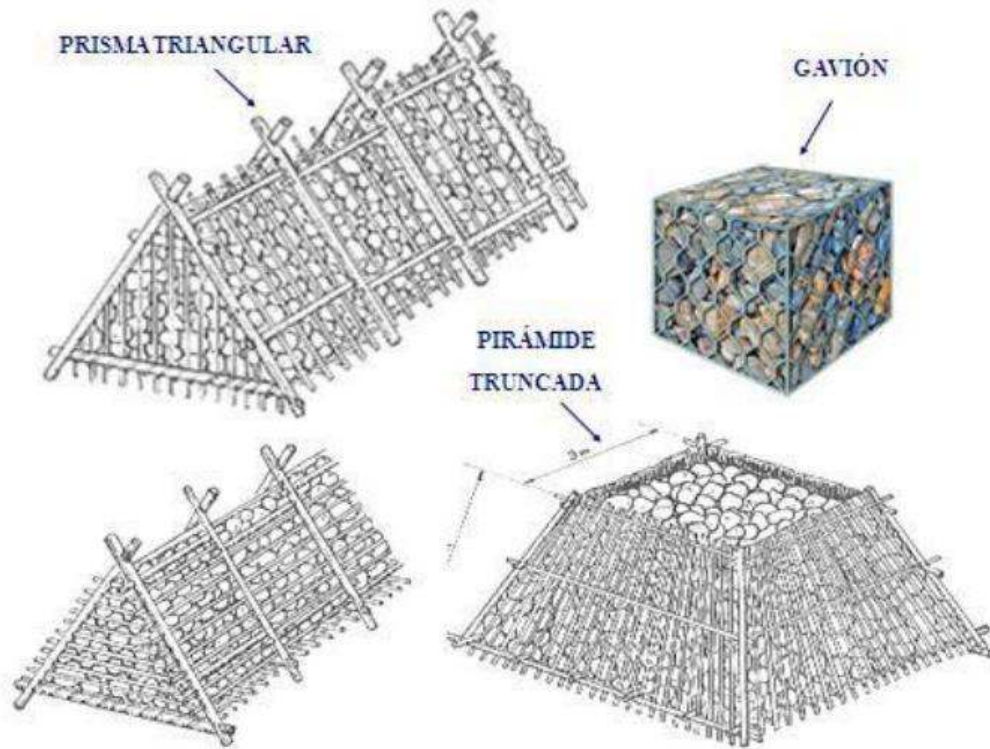


Figura N° 9.7 Diversos elementos para formar espigones (Bendegom L. Van, Zanen A. y otros)

9.3.5 Mantenimiento

Las defensas formadas por espigones requieren de mantenimiento continuo, especialmente después de cada avenida importante. Una de las ventajas de este sistema de defensas es que el diseño puede irse mejorando como parte de las labores de mantenimiento y como consecuencia de las observaciones que se realicen de su funcionamiento. La reparación y el mantenimiento de los espigones se hacen durante el estiaje.

9.4 Diseño del sistema de defensa

9.4.1 Concepción del sistema

El diseño de un sistema de espigones se basa en consideraciones teóricas y en la experiencia proveniente de la observación y estudio de sistemas en operación. Muchas veces son de gran utilidad los modelos hidráulicos y matemáticos y las investigaciones genéricas en laboratorio. Sin embargo, no debe perderse de vista que la mayor parte de las investigaciones corresponden a situaciones específicas o locales, por lo que se debe tener mucho cuidado al pretender extrapolar los resultados a otros ríos o países. Para el diseño de los espigones es necesario tener en cuenta diversos aspectos, que van desde consideraciones de Hidráulica Fluvial y de Transporte de Sedimentos hasta el examen de los materiales disponibles. Uno de los puntos más importantes a tenerse en cuenta es la determinación de la longitud de las márgenes que deben protegerse.

El diseño de un sistema de espigones no tiene fórmulas ni reglas rígidas. El ingeniero proyectista debe basarse en su experiencia y sentido común y aprovechar, lo mejor posible, lo que ha aprendido en problemas similares. Naturalmente, que antes de pensar en el diseño de un sistema de espigones debe conocerse las características del río y del transporte sólido fluvial, porque los espigones interactúan con el transporte sólido de un modo que debe ser previsto en los diseños.

La idea fundamental que no debe perderse de vista es que al construir un sistema de espigones se limita los grados de libertad del río. Se crea un “nuevo río” que debe ser compatible con la Avenida de Diseño. Pero, esto debe hacerse sin producir un estrechamiento excesivo y sin tratar de introducir modificaciones que vayan en contra de las leyes de la Hidráulica Fluvial. Es decir, que el “nuevo río” debe ser compatible con la tendencia natural que tiene un curso de agua de adquirir su propio ancho, su propio tirante, su propia pendiente y, eventualmente, de desarrollar curvas y un cierto número de brazos, en función del gasto líquido, del gasto sólido y de la granulometría del material sólido.

El método de Blench que está presentado en el Capítulo 4 da los lineamientos generales para fijar los valores del ancho, tirante y pendiente que permiten que el río aluvial adquiera su “Autoajuste”. Si como expresión de su propia dinámica el río desarrolla meandros, el sistema de defensas debe mantener determinados radios de curvatura que no impliquen o impongan condiciones demasiado exigentes para el río. Debe mantenerse la tendencia del río a formar curvas y, debe conservarse, en la medida de lo posible, sus radios de curvatura. Las curvas que se introduzcan deben de ser suaves y, de preferencia, de varios radios de curvatura. Sólo excepcionalmente, y por razones muy justificadas, se debe forzar la formación de tramos artificialmente

rectos. Generalmente ocurre que la mayor tendencia a desplazamientos laterales se presenta en las curvas.

Como consecuencia del análisis fluvial y de la determinación de la Avenida de Diseño se calcula el ancho medio B (en los tramos rectos) que debe tener el “nuevo río” luego de haber construido el sistema de defensa. Los radios de curvatura R que se impongan deben guardar cierta relación con el ancho B del río. Al respecto es conveniente recordar la condición dada por José Antonio Maza Álvarez en el importante trabajo titulado “Diseño de Espigones” que presentó al VI Congreso Latinoamericano de Hidráulica y que año siguiente (1975) publicó, con ligeras mejoras, en la revista “Recursos Hidráulicos”, donde señala que para los cauces formados por arenas y limos, los radios de las curvas, medidos hasta el eje del río, deben cumplir la siguiente condición:

$$2,5 B < R < 8 B$$

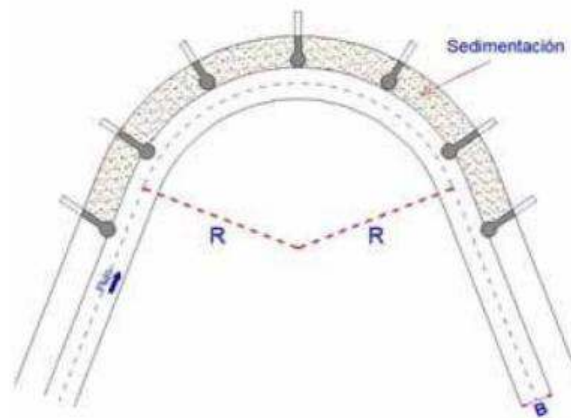


Figura N° 9.8 Relación entre el radio de curvatura y el ancho del río.

Sobre este tema el profesor Maza añade que: “Al respetar los radios anteriores, la defensa que se haga en base a espigones trabajará eficientemente. Si los radios de curvatura son menores, la separación de los espigones disminuye y económicamente es preferible construir una defensa marginal apoyada en la orilla. Si los radios son mayores, el río tiende a formar un cauce con menores radios dentro de la curva y no todos los espigones trabajan eficientemente”.

En cualquiera de los casos y para examinar las características del “nuevo río” debe fijarse una Avenida de Diseño, que guarde correspondencia con la descarga dominante, tal como se define en Hidráulica Fluvial. No debe perderse de vista que en algunos lugares del Perú sometidos al Fenómeno El Niño es importante pensar en un Hidrograma de Diseño.

La investigación del ingeniero Maza Álvarez fue realizada a partir del estudio de tres ríos en México (Suchiate, Santiago y San Pedro), en los que hizo observaciones y modificaciones. Hubo también pruebas de laboratorio y ensayos en modelos, todo lo cual le permitió establecer los criterios de diseño que venimos mencionando. Sin embargo, su estudio no ofrece las características de dichos ríos (pendientes, caudales, material sólido, etc.), pues Maza consideró que las “recomendaciones eran de tipo totalmente general”, pero añadió “que los mejores resultados se obtienen en ríos que arrastran arena”.

Jaime Suárez Díaz, a partir de la importante publicación antes mencionada de J. A. Maza, ha enumerado los puntos más importantes que se deben tener en cuenta para el diseño de un sistema de espigones. Ellos son: localización en planta, radios de las curvas, longitud de las tangentes, ancho estable del río, longitud de los espigones, elevación de la cresta, espaciamiento entre espigones, número de espigones, pendiente de la corona, ángulo de orientación respecto a la orilla, taludes laterales de los espigones, permeabilidad del espigón, características y tamaños de los materiales para la construcción de los espigones, determinación de las condiciones de flujo alrededor de los espigones, cálculo de las socavaciones en la curva y en la cabeza de los espigones. A lo largo de esta exposición se examina la mayor parte de los puntos mencionados, aunque no necesariamente en el mismo orden, y se añaden otros.

9.4.2 Orientación con respecto a la corriente (Ángulo)

Como se ha señalado, los espigones arrancan de la orilla y penetran dentro de la corriente formando un cierto ángulo con la orilla (o con la corriente), cuya elección depende de varios factores. La orientación del espigón se define como el ángulo α formado hacia aguas abajo por el eje del espigón y la tangente a la margen en el punto de arranque del espigón tal como se aprecia en la Figura N° 9.9.

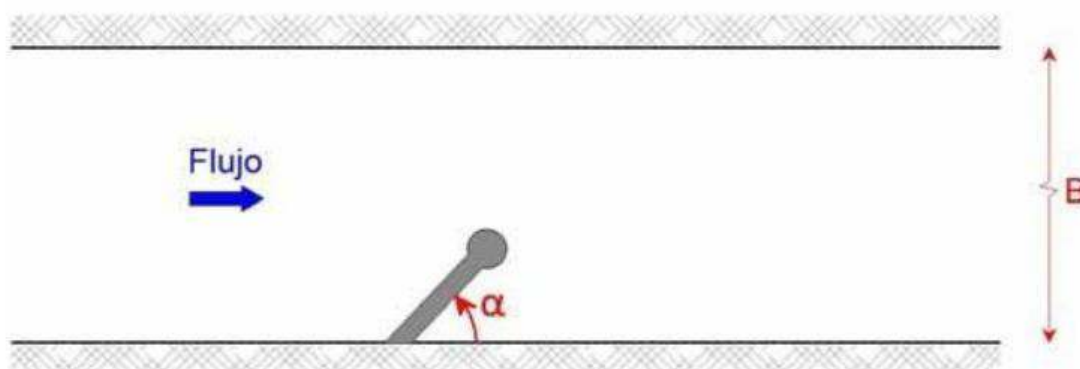


Figura N° 9.9 Definición del ángulo de orientación de los espigones.

Otros autores definen el ángulo con respecto a la dirección de aguas arriba. Esta diferencia, meramente convencional, no tiene ninguna importancia, pero debe tenerse en cuenta al leer a diversos autores. La orientación (ángulo) del espigón influye decididamente en la sedimentación que se busca que ocurra entre los espigones. Desde el punto de vista de la orientación del espigón hay tres posibilidades:

Espigón a ángulo recto	$(\alpha = 90^\circ)$
Espigón orientado hacia aguas arriba	$(\alpha > 90^\circ)$
Espigón inclinado hacia aguas abajo	$(\alpha < 90^\circ)$

Espigón a ángulo recto ($\alpha = 90^\circ$)

Se usan generalmente como espigones impermeables para favorecer la formación de un canal central de navegación en un río. Pueden ser normales a la orilla o a la dirección de la corriente. Son más económicos. En la Figura N° 9.10 se aprecia la perturbación que producen en el flujo, cerca de la cabeza del espigón, y la zona en la que se produce socavación (erosión local).

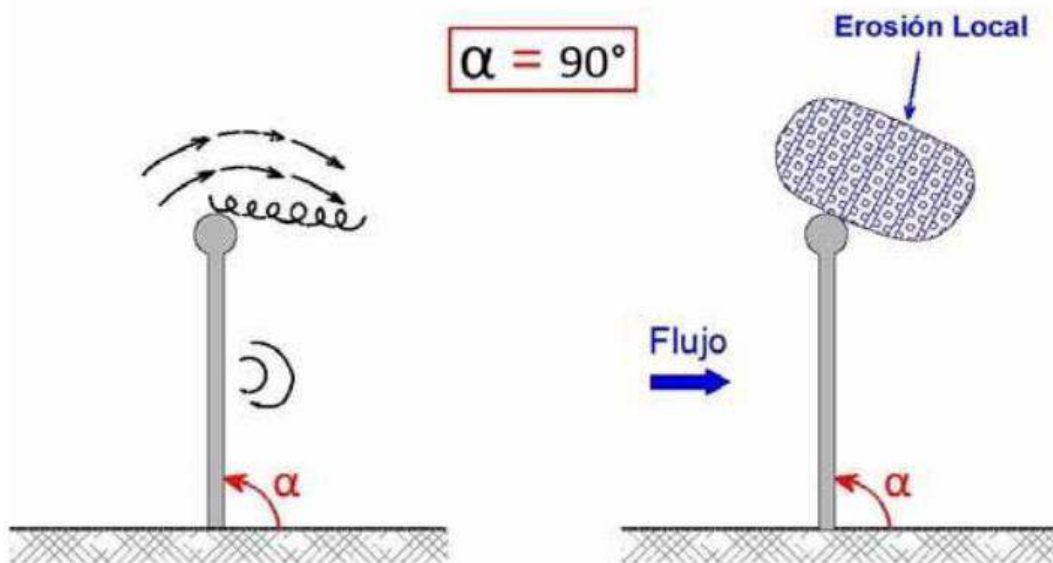


Figura N° 9.10 Perturbación del flujo y zona de socavación local producida por un espigón recto.

Espigón orientado hacia aguas arriba ($\alpha > 90^\circ$)

Los espigones orientados hacia aguas arriba, es decir, contra la corriente, son los más usados en la protección de orillas. Generalmente son más cortos y cambian la dirección del flujo. Producen mejor efecto que los normales a la

orilla en lo que respecta a la sedimentación de sólidos y al desvío de la corriente. Los ángulos más recomendados están entre 100° y 120° . Maza señala que para ángulos mayores de 90° la separación entre los espigones tendría que ser menor y añade haber obtenido malos resultados con un ángulo de 120° . La orientación que tengan los espigones influye en su espaciamiento y en su efectividad. La selección del ángulo depende de varios factores. Como consecuencia de experiencias en la construcción de 5000 espigones en el río Rin, que como se sabe tiene muy baja pendiente, Frijlink señaló que el ángulo depende fundamentalmente del costo y de la experiencia local.

Espigón inclinado hacia aguas abajo ($\alpha < 90^\circ$)

Respecto a esta orientación para los espigones, en el sentido de la corriente, hay muchas opiniones que están bastante divididas. Los espigones inclinados hacia aguas abajo atraen el flujo hacia la orilla y, según Suárez Díaz citando a Przedwojski, nunca deben colocarse en la parte cóncava de las orillas. Por eso se afirma que los espigones inclinados hacia aguas abajo deben estar más próximos porque su construcción pondría en peligro la orilla. Sin embargo, José Antonio Maza hace la siguiente recomendación: "En un tramo recto, en una curva regular, conviene que los espigones formen un ángulo de 70° con la dirección de la corriente. Si la curva es irregular y, aún más, si tiene un radio de curvatura menor de $2,5 B$, los ángulos de orientación serán menores de 70° y pueden alcanzar valores hasta de unos 30° ". En la Figura N° 9.11 se observa la orientación de dos espigones y sus efectos sobre el flujo (líneas de corriente) y el lecho fluvial (erosión local).

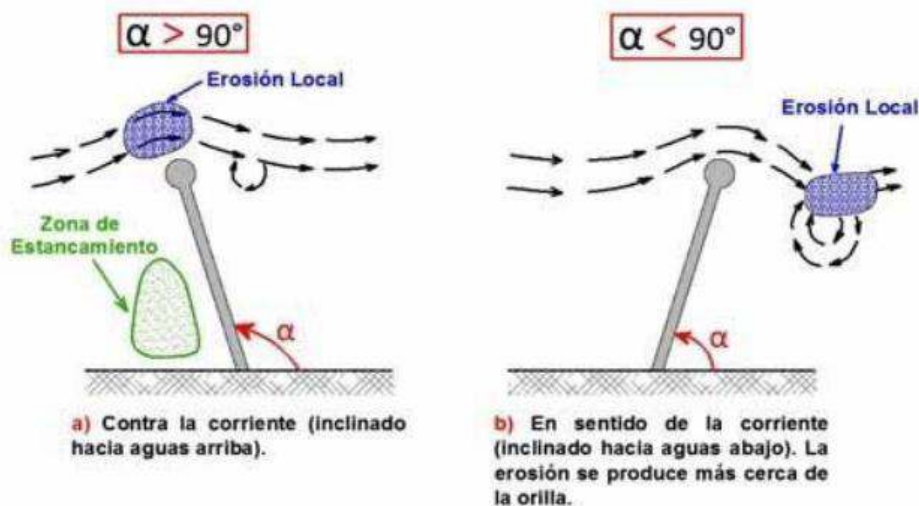


Figura N° 9.11 Orientación de los espigones (Farraday y Charlton).

9.4.3 Apreciaciones generales sobre la orientación de los espigones

Podría señalarse que cuando los espigones tienen la función principal de alejar la corriente de la orilla, es decir, cuando son deflectores, es importante el estudio y determinación del ángulo. En cambio, en los espigones permeables cuya función es diferente, el ángulo no tiene mayor importancia y, por razones económicas, suele escogerse el ángulo recto. Es necesario señalar que no existe unanimidad de criterios respecto a cuál es el ángulo óptimo que deben tener los espigones que forman parte de un encauzamiento fluvial. Sin embargo, el primero de ellos, ubicado hacia aguas arriba, debe ser muy tendido y de pequeña longitud para “que la transición sea gradual”. Por eso, dependiendo de varios factores, entre ellos la geometría fluvial, los espigones ubicados aguas arriba tienen un diseño especial en lo que respecta a su longitud, inclinación y separación, pues se busca una transición muy suave entre la zona sin espigones y la zona que sí los tiene.

9.4.4 Socavación

Como el espigón es un cuerpo extraño dentro de la corriente causa alteraciones en el flujo y en el transporte sólido. La cabeza causa una perturbación local importante por la aparición de vórtices y corrientes secundarias complejas que producen erosión local (socavación). La localización y profundidad de esta socavación varía con la orientación del espigón, como puede verse en las Figuras N° 9.10 y 9.11. Así por ejemplo, en un espigón orientado en el sentido de la corriente ($\alpha < 90^\circ$) la socavación se produce hacia aguas abajo y más cerca de la orilla, que en uno orientado hacia aguas arriba. Además, en este último la socavación es mayor. Por sus propias características los espigones son estructuras flexibles que se adaptan a las socavaciones que ocurren en el lecho fluvial. En la Figura N° 9.12 se aprecia cómo es que cada espigón se acomoda a la degradación del lecho.

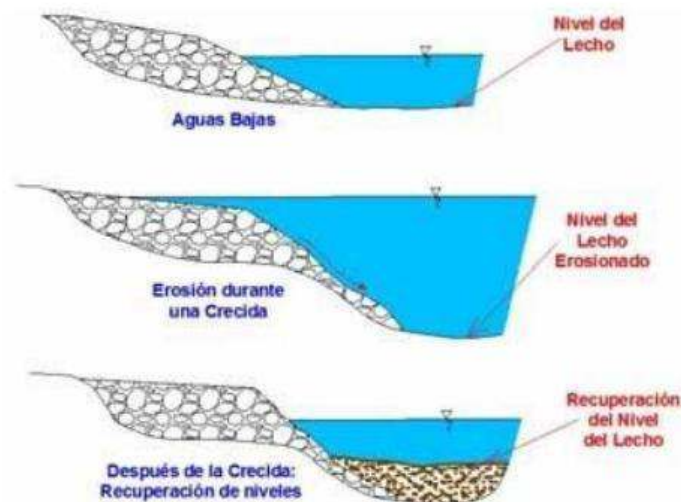


Figura N° 9.12 Acomodo del espigón a la socavación del lecho (Brown).

9.4.5 Longitud de los espigones

El diseño de un sistema de espigones está íntimamente vinculado a las características del tramo fluvial comprometido, así como a una determinada Avenida de Diseño (o, eventualmente, a un Hidrograma de Diseño) que debería interpretarse en función del concepto de Descarga Dominante, que implica el establecimiento de un ancho fluvial que es sumamente importante para determinar la longitud de los espigones. En principio, cada espigón tiene su propia longitud que depende de las peculiaridades del cauce. La longitud total, como ya se dijo, está formada por la suma de la longitud de trabajo y la de empotramiento. Es frecuente que los espigones se construyan inicialmente con una longitud menor que la que pueda haberse calculado para ellos y, luego de observar su comportamiento, se alarguen en la medida en la que sea necesario, tal como se aprecia en la Figura N° 9.6.

No hay una fórmula o criterio simple para determinar la longitud de los espigones. Depende mucho del tipo de espigón, el que a su vez corresponde a su función. En los espigones impermeables suele ser más fácil determinar su longitud, pues por lo general lo que se busca con ellos es disminuir el ancho del río de modo de formar un canal central que para un determinado caudal produzca el calado (tirante) requerido por la navegación (Figura N° 9.6). De esta consideración se obtiene la longitud de los espigones. En cambio, cuando se trata de espigones permeables, cuyo objetivo es disminuir la velocidad de la corriente en las inmediaciones de las márgenes con fines de protección de orillas, el asunto es más complicado. En principio, hay dos posibilidades: una, que se trate de un tramo fluvial singular, como por ejemplo una curva y, la otra, que se trate de un tramo fluvial largo cuyo encauzamiento se busca.

La primera posibilidad ha sido bastante usada en el tratamiento de ríos con meandros, donde la idea fundamental es que la longitud de los espigones (de cada uno de ellos) está dada por la distancia entre la orilla existente (desprotegida y erosionada) y la orilla virtual que se creará por medio de espigones. Uno de los conceptos más sencillos y claros al respecto, aunque referencial, es el establecido por la Federal Highway Administration de los Estados Unidos cuando señala que según ensayos de laboratorio no se obtiene mayores ventajas cuando la longitud de los espigones es mayor que el 20% del ancho del río ($0,2 B$). Añade también que se han obtenido buenos resultados en diversos ríos con valores de la longitud de los espigones comprendidas entre el 3% y el 30% del ancho del río. Cualquiera que sea la longitud de los espigones no hay que perder de vista que su longitud afecta o determina las características de la socavación en sus extremos. También hay que comparar la longitud de espigones con la longitud de la margen protegida por ellos.

Para la segunda posibilidad, José Antonio Maza Álvarez estudió la longitud de trabajo a lo largo de la corona de los espigones y recomendó que estuviese comprendida entre el valor del tirante y la cuarta parte del ancho medio del río y

señaló que cuando se requiriese anclaje (empotramiento), lo que no siempre es necesario, éste no debería ser mayor de $L_T/4$. En todo caso, la longitud de los espigones debe ser suficiente para que la erosión local (socavación) que se produce cerca de la punta o nariz esté suficientemente alejada de la orilla para garantizar su estabilidad.

9.4.6 Separación entre los espigones

El espaciamiento de los espigones (S_E) es la distancia que hay entre uno y otro, medida a lo largo de la orilla. Un aspecto importante y determinante a tenerse en cuenta para calcular la separación de los espigones es el ángulo β de divergencia del flujo al pasar de una zona contraída, por la presencia de los espigones, a una zona de mayor sección. El ángulo β de expansión del flujo depende de varios factores, principalmente de la permeabilidad del espigón y de la relación entre la longitud del espigón y el ancho del río (L_T/B).

Existen, sin embargo, varios factores que influyen en la separación entre espigones, por ejemplo, los correspondientes al río: el ancho B y la velocidad y la dirección de la corriente. En cuanto a las características de los espigones son varios los factores que influyen en la separación: su finalidad, que es variable según las circunstancias y que está asociada a su grado de permeabilidad, su longitud y su orientación. Se acostumbra expresar la separación entre espigones (S_E) como un múltiplo de su longitud. Son variadísimas las opiniones y recomendaciones sobre la separación entre los espigones. Richardson recomendó una separación comprendida entre 1,5 y 6 veces la longitud de trabajo del espigón de aguas arriba. Cuando se trata de espigones para profundizar el calado y favorecer la navegación su separación podría ser de 1,5 a 2 veces su longitud. En la Figura N° 9.13 se aprecia un tramo fluvial recto en el que a partir de un espigón de longitud de trabajo L_T se trata de encontrar la separación S_E que debe tener el siguiente espigón.

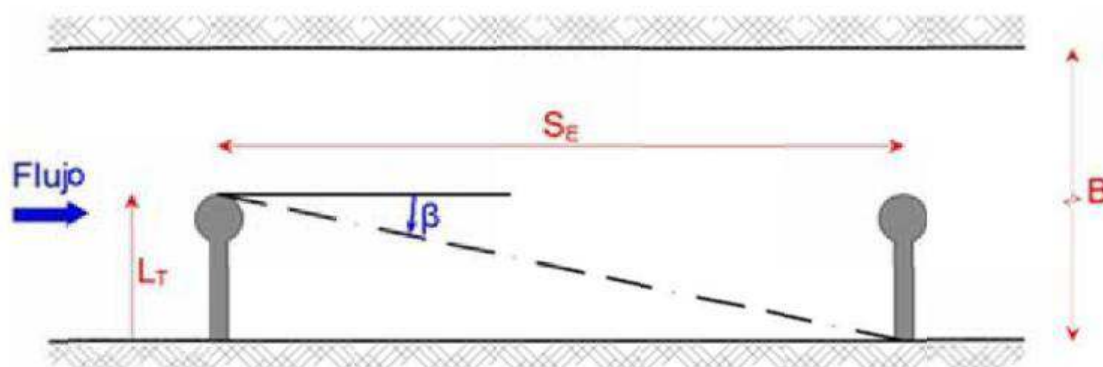


Figura N° 9.13 Separación de espigones en un tramo recto.

De la observación de la figura se obtiene que:

$$S_E = L_T \cot \beta$$

Hay varios autores que usan, de acuerdo a sus propias observaciones y circunstancias, diversos valores para el ángulo β . Así por ejemplo, José Antonio Maza considera un ángulo, al que llama de desviación, comprendido entre 9° y 11° lo que indudablemente da la siguiente separación entre espigones:

$$\text{Para } \beta = 11^\circ \quad S_E = 5,1 L_T$$

$$\text{Para } \beta = 9^\circ \quad S_E = 6,3 L_T$$

En consecuencia, en tramos rectos, sin empotramiento, para ángulos comprendidos entre 70° y 90° la separación entre espigones debe ser 5,1 a 6,3 veces la longitud de trabajo L_T (Maza, 1975). Para un ángulo de 60° la separación puede ser algo menor (5 a 6 veces la longitud de trabajo). Javier Suárez recomienda un ángulo de desviación comprendido entre 9 y 14° .

Si los espigones no estuviesen a ángulo recto, su separación se obtendría añadiendo a los conceptos anteriores algunas consideraciones geométricas, como se aprecia en la Figura N° 9.14. La separación S_E se calcula con la siguiente expresión:

$$S_E = L_T \csc \beta \sin (\alpha + \beta)$$

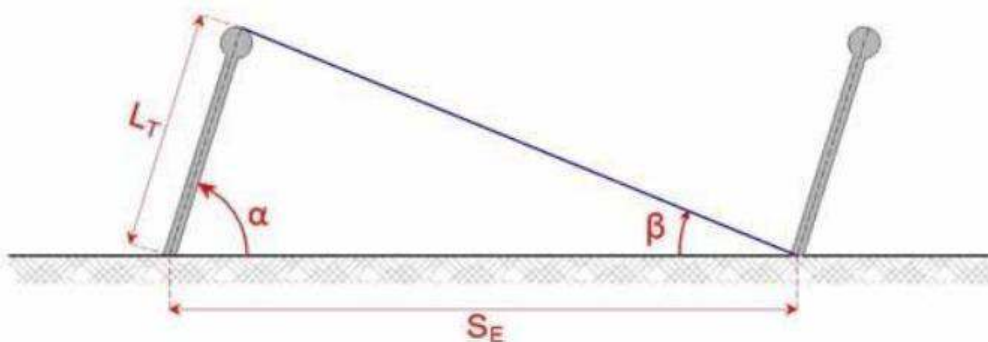


Figura N° 9.14 Cálculo de la separación entre espigones inclinados.

Para tramos en curva se parte de los mismos conceptos y se recomienda recurrir a un método gráfico para hallar la longitud. En tramos curvos, muy expuestos a la erosión (en su margen cóncava), la separación podría ser la mitad que en un tramo recto. Si la separación resultase muy pequeña sería preferible una protección continua.

Como puede verse fácilmente no hay un modo universalmente aceptado para determinar la separación entre espigones. Hay autores que mencionan que la separación entre los espigones debe estar comprendida entre 4 y 12 veces su

longitud. Frijlink menciona experiencias exitosas en el río Rin con una separación menor a 3 o 4 veces la longitud de los espigones.

L. van Bendegon, de Delft, plantea sobre estos temas lo siguiente:

- a) Los espigones permeables pueden estar más espaciados que los impermeables.
- b) El tipo de construcción afecta el espaciamiento S_E .
- c) En las curvas convexas S_E puede ser igual a 2 a 2,5 veces su longitud.
- d) En las curvas cóncavas el espaciamiento puede ser igual a su longitud.

La permeabilidad de los espigones es un factor importante en la determinación de su espaciamiento (Ángulo β). Los investigadores dan diferentes valores, según las circunstancias de cada río estudiado. Brown estudió el problema en función de dos factores: a) la permeabilidad del espigón, y b) la relación entre la longitud de trabajo del espigón y el ancho B del río (L_T/B) y obtuvo el gráfico que se aprecia en la Figura N° 9.15. Del análisis de esta figura se obtiene la siguiente información:

- a) Para espigones impermeables el ángulo β es casi constante e igual a 17° . Es decir, que el ángulo prácticamente no cambia con la variación de L_T/B .
- b) Al aumentar la permeabilidad del espigón, el ángulo de expansión β aumenta para un mismo valor de L_T/B .
- c) Al aumentar la relación L_T/B el ángulo de expansión crece rápidamente, (exponencialmente, dice Brown).

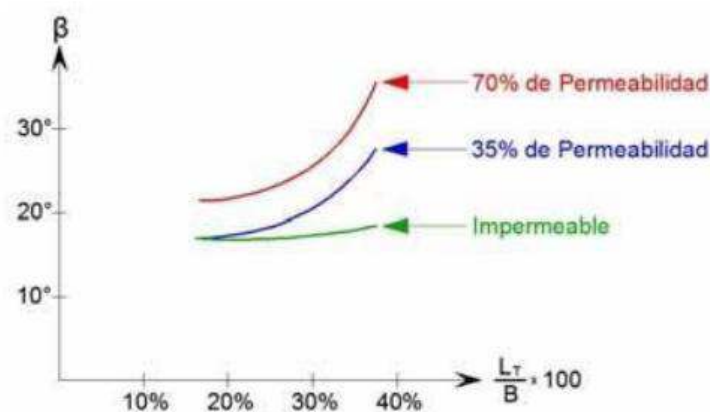


Figura N° 9.15 Ángulo de expansión β en función de la permeabilidad del espigón y de su longitud relativa al ancho del río (Brown).

En consecuencia, según las investigaciones de Brown la separación S_E entre espigones impermeables, o de una permeabilidad hasta del 35%, y con valores de relación de L_T/B hasta de 0,18 sería:

$$S_E = L_T \cot 17^\circ = 3,3 L_T$$

$$S_E = 3,3 L_T$$

Naturalmente, que en ensayos de laboratorio es fácil definir y obtener una permeabilidad para el espigón. En la práctica no es tan sencillo.

Todo lo expuesto en este punto es una ratificación más de que en el diseño de un sistema de defensas con espigones no hay reglas fijas ni fórmulas rígidas.

9.4.7 Otros aspectos del diseño

Altura de los espigones

Para un determinado caudal los espigones pueden estar sumergidos o no. Maza señala que la altura máxima del espigón en la nariz o cabeza debería ser de 0,50 metros.

En los espigones sumergidos es importante la relación que existe entre la altura del espigón y la de la corriente. Este tema ha sido estudiado, entre otros, por Tominaga, Ijima y Nakano del Instituto Tecnológico de Nagoya, quienes establecieron que: "En los espigones sumergidos los vórtices verticales causados por el flujo lateral y los vórtices transversales causados por el flujo superficial crean un campo muy complejo". Concluyen que en los espigones sumergidos los vórtices son más intensos que en los no sumergidos.

Pendiente de la corona

Los espigones deben tener a lo largo de ellos una pendiente hacia el eje del río (Figura N° 9.2). Lo señalado por Maza en el punto anterior, al tratar de la altura de los espigones, guarda correspondencia con pendientes comprendidas entre 0,05 y 0,25. Señala el autor antes referido que los espigones con pendientes de 0,1 o más, favorecen bastante la sedimentación y resultan más económicos. Señala también que las ventajas de construir los espigones con una pendiente hacia el eje del río son las siguientes:

- a) "No existe prácticamente socavación local en el extremo (cabeza) del espigón.
- b) Si el espigón se construye con paredes verticales (tablestacado) sólo hay una ligera erosión en su cara de aguas arriba.

- c) Si se construye con caras inclinadas (pedraplén) y sus taludes son de 1.5:1, se produce un depósito inmediato y adyacente a su cara de aguas abajo que protege al mismo espigón.
- d) Cada espigón necesita para ser construido entre 40 y 70% del material requerido para construir un espigón con corona horizontal. Los mayores ahorros se tienen en espigones construidos con pedraplén o gaviones.
- e) El depósito de material arenoso, entre espigones, se efectúa más rápidamente que con un talud horizontal.
- f) No se han tenido problemas de flanqueo de ningún espigón construido con estos taludes y separados entre sí 4 veces su longitud de trabajo. Sólo se han probado en curvas”.

9.5 Control de la migración de un meandro

Las curvas fluviales son altamente inestables. El río tiende a producir erosión en la margen exterior (cóncava) y sedimentación en la margen interior (convexa), tal como se aprecia en la Figura N° 9.16. Una de las formas más usadas de controlar la movilidad de un meandro fluvial es la de construir un sistema de espigones en la margen exterior tal como se aprecia en las Figuras N° 9.3 y N° 9.17.

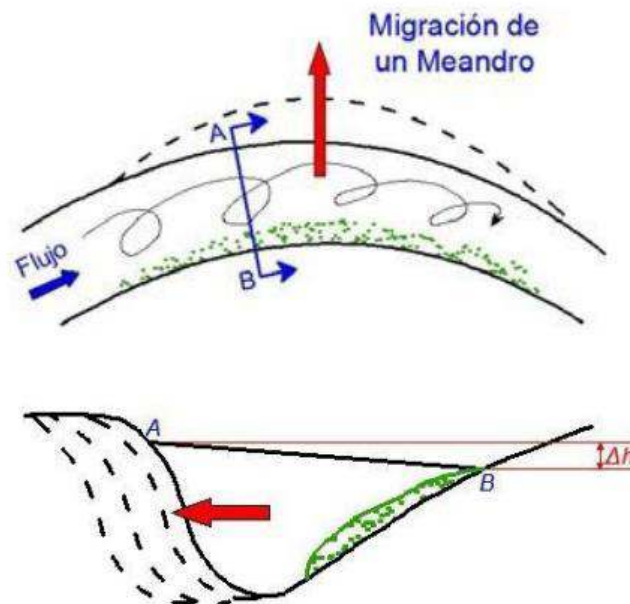


Figura N° 9.16 Erosión y sedimentación en un tramo en curva.

Un caso interesante es el que aparece en la Figura N° 9.17 que refiere al control de la migración de un meandro en el río Piura mediante espigones en L (También llamados tipo martillo).

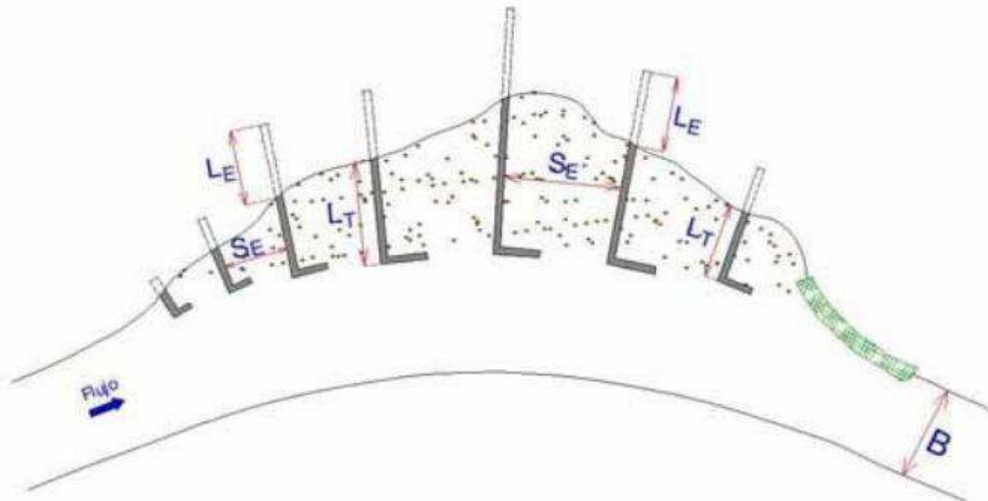


Figura N° 9.17 Tratamiento con espigones en L de una curva erosionada.

En la Figura N° 9.18 se presenta la mínima longitud de curva que debe ser protegida para evitar la migración de un meandro, según las investigaciones del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE). Esta figura debe ser considerada meramente referencial y debe ser verificada en el campo. Se observa que se trata de una curva de radio de curvatura pequeño. Los autores mencionan que la extensión de la protección hacia aguas abajo de la curva es muy importante.



Figura N° 9.18 Recomendaciones para la protección de la margen exterior de un tramo en curva (Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos). USACE, 1981

Referencias

1. ARTURO ROCHA INGENIEROS ASOCIADOS. Programa de Rehabilitación y Reconstrucción del departamento de Tumbes, luego del Fenómeno de El Niño 1983: **Protección de la margen izquierda del río Tumbes. Diques complementarios en la bocatoma La Peña. Defensas del río Zarumilla. Obras de defensa de San Juan de la Virgen, Puerto Pizarro, Zorritos y La Cruz.** 1985
2. ARTURO ROCHA INGENIEROS ASOCIADOS. **Revisión del Estudio de Encauzamiento del Río Rímac.** Por encargo de INVERMET, 1984
3. ARTURO ROCHA INGENIEROS ASOCIADOS. **Estudio integral del control de avenidas en el río Tumbes.** INADE, 1983.
4. BENDEGON L. van y ZANEN A. **Lectures Notes on Revetments.** International Course in Hydraulic Engineering, Delft, Holanda.
5. BENITO ROJAS Hugo Miguel. **Rectificación de cauce con espigones de rocas en el puente Reque.** II Congreso Obras de Saneamiento, Hidráulica, Hidrología y Medio Ambiente. HIDRO 2007. ICG. Lima, Junio 2007.
6. BLENCH, T. **Mobile-Bed Fluviology.** Edmonton, Alberta, Canadá, 1966.
7. BROWN S.A. **Design of Spur-Type Streambank Stabilization Structures.** Federal Highway Administration, Washington D. C. 1985.
8. FARRADAY R. V. y CHARLTON F. G. **Hydraulic factors in bridge design.** Hydraulics Research Wallingford, Oxfordshire, 1983.
9. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Stream Stability at Highway Structures.** U.S. Department of Transportation, U. S. A.
10. FRIJLINK H. C. **Introduction to River Engineering.** Delft, Holanda.
11. ISHII Chimataro, ASADA Hiroshi y KISHI Tsutomu. **Shape of separation region formed behind a groyne of non-overflow type in rivers.** I.A.H.R. XX Congress, Moscú, 1983.
12. KUHNLE Roger A., ALONSO Carlos V. y SHIELDS F. Douglass Jr. **Local Scour Associated with Angled Spur Dykes.** Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, No. 12, December 2002.
13. LI Hua, KUHNLE Roger y BARKDOLL Brian D. **Spur Dikes as an abutment scour countermeasure.** Michigan Tech University.
14. LILA Arun, CHAUDARI Mahendra y KORULLA Minamol. **River Training Structures: - Groynes.** Workshop at CWPRS Organized by CWPRS & ISH, 2009.
15. MARTÍN-VIDE, Juan P. **Ingeniería Fluvial** Ediciones UPC, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2000.
16. MAZA ALVAREZ José Antonio. **Diseño de Espigones.** VI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Bogotá 1974 y revista "Recursos Hidráulicos", Vol. IV, 1975 N° 2.
17. MAZA ALVAREZ José Antonio. **Diseño de Espigones.** Intervenciones. Memorias Post Congreso. VI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Bogotá 1974.
18. NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. **Design of stream barbs.** Technical Note 23. U.S. Department of Agriculture, April 2005.

19. NÚÑEZ VALDIVIA José. **Obras de corrección hidrológica y de contención de terrenos inestables con estructuras de gaviones.** "El Ingeniero Civil", N° 50 y 52, 1988.
20. RICHARDSON E.V., SIMONS D. B. y JULIEN P. Y. **Highways in the River Environment.** Colorado State University, 1990.
21. ROCA C. Marta, HELENO C. Antonio, MARTIN V. Juan P. y BATEMAN Allen. **Influencia del ángulo de orientación de estribos y espigones en los procesos de erosión local.** Ingeniería del Agua. Volumen 7, N° 3 Septiembre 2000.
22. ROCHA FELICES Arturo. **Consideraciones sobre las defensas fluviales con espigones.** XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Arequipa 2007.
23. ROCHA FELICES Arturo. **Revisión de los Estudios Básicos del Encauzamiento y de los puentes ferroviarios en la quebrada Alcamayo-Cusco.** INRENA, Diciembre 2004.
24. ROCHA FELICES Arturo. **Informe de asesoría sobre la presa derivadora de Sullana y diques de defensa del río Chira,** Tercera Etapa del Proyecto Chira-Piura. 1999.
25. ROCHA FELICES Arturo. **Diseño definitivo de las defensas ribereñas del río Tumbes en el tramo Puente Viejo - Puerto El Cura.** 1998.
26. ROCHA FELICES Arturo. **Introducción a la Hidráulica Fluvial.** Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, 1996.
27. ROCHA FELICES Arturo. **Informe de Asesoría al Proyecto Chira-Piura en la toma de decisiones sobre aspectos de ingeniería hidráulica de la Tercera Etapa del proyecto (diques de defensa, bocatoma, canales y sistemas de distribución)** 1991.
28. ROCHA FELICES Arturo. **Informe de Asesoría al Proyecto Chira-Piura en la formulación del proyecto denominado Segunda Etapa del proyecto Chira-Piura, en especial, el encauzamiento y defensas de los ríos Chira y Piura.** 1981.
29. SPANNRING M. **Degradation of the River Bed after Building of Groynes.** Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München. Alemania
30. SUÁREZ DÍAZ Jaime. **Control de erosión en zonas tropicales.** Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2001.
31. TOMINAGA A., IJIMA K. y NAKANO Y. **Flow Structures around Submerged Spur Dikes with various Relative Height.** Nagoya Institute of Technology, Japón.
32. ZHANG Hao, NAKAGAWA Hajime, ISHIGAKI Taisuke y otros. **Flow and Bed Deformation around a series of Impermeable and Permeable Spur Dykes.** International Conference on Monitoring, Prediction and Mitigation of Water-Related Disasters. Kyoto, enero, 2005.
33. ZHANG Hao, NAKAGAWA Hajime, ISHIGAKI Taisuke y MUTO Yasunori. **Prediction of 3D Flow Field and Local Scouring around Spur Dykes.** Annual Journal of Hydraulic Engineering JSCE, Vol. 49 Febrero 2005.

CAPÍTULO 10

EROSIÓN EN PILARES Y ESTRIBOS DE PUENTES

10.1 Aspectos generales

Los puentes tienen una importancia social innegable, pues su esencia es la de unir lo que está separado. Precisamente, uno de los étimos de la palabra Pontífice es el de “constructor de puentes”, de puentes entre los hombres y Dios. La importancia y profundo significado de la palabra puente ha sido recogida por el Colegio de Ingenieros del Perú a través de la publicación de una revista dedicada a la Ingeniería, Sociedad y Cultura, la que tiene el significativo nombre de PUENTE, pues con ella se busca establecer un “diálogo fluido entre la ingeniería y la sociedad”.

Cuando el puente forma parte de una carretera o de un ferrocarril tiene que diseñarse para que cumpla sus objetivos viales. Pero, cuando el puente cruza un río es inevitable considerarlo, además, como una estructura hidráulica. Entre el puente y el río hay una profunda interacción en la que cada uno trata de influir sobre el otro.

Para efectos del mejor conocimiento de los problemas antes señalados se entiende como Estudios Hidráulicos los relativos al conocimiento y manejo del río y su interacción con el puente. Corresponden a la Hidrología, Hidráulica Fluvial, Transporte de Sedimentos y al Diseño en los aspectos pertinentes. Precisamente, se llama Hidráulica de Puentes a los aspectos de la Hidráulica General aplicados al Diseño de Puentes.

A fin de garantizar la estabilidad de los puentes el ingeniero tiene que participar en una labor multidisciplinaria. Un puente que interactúa con un río es una estructura hidráulica y debe ser concebida y diseñada como tal, de modo que produzca la menor perturbación posible en el escurrimiento fluvial y, a un costo razonable, cumpla adecuadamente con los fines buscados. Cuando el río y el puente se cruzan, cada uno trata de influir sobre el otro. El puente, como toda estructura necesita estabilidad y permanencia en el tiempo frente a la agresividad fluvial. El río, en cambio, por su propia naturaleza es esencialmente dinámico y cambiante y, además, sufre la acción de las actividades humanas.

Para asegurar la estabilidad de los puentes que interactúan con ríos el ingeniero tiene una enorme tarea ante sí. Tanto la ubicación conveniente del puente, como el cálculo de las profundidades de socavación producidas por pilares y estribos en su interacción con el río, así como otros aspectos, son parte del diseño de estos puentes. Se trata de una labor en la que la Hidráulica Fluvial es fundamental. En realidad, es una tarea multidisciplinaria en la que

intervienen aspectos de Vialidad, Transporte de Sedimentos (Capítulo 11), Hidrología, Geología, Geotecnia, Análisis Estructural, Modelos Hidráulicos, Costos, Procedimientos de Construcción y otras especialidades de la ingeniería.

En general, en un puente se distingue la superestructura, constituida por el tablero, y la infraestructura formada por los pilares, los estribos y la cimentación. Los pilares, conocidos en casi todas partes con el nombre de pilas, aunque no en el Perú, son los apoyos intermedios cuando el puente tiene más de un tramo. Los estribos se ubican en los extremos y empalman con los terraplenes de aproximación al puente. Los cimientos transmiten al lecho fluvial el peso de la estructura. Los pilares y estribos, al igual que los espigones tratados en el capítulo anterior, son elementos extraños dentro de la corriente. El choque del flujo contra ellos produce corrientes vorticosas que causan la erosión local, tal como se aprecia esquemáticamente en las Figuras N° 10.1 y 10.2. Más adelante se verá que las características de la perturbación local producida por un pilar dependen, entre numerosos factores, del transporte de sólidos (sedimentos) de la corriente.

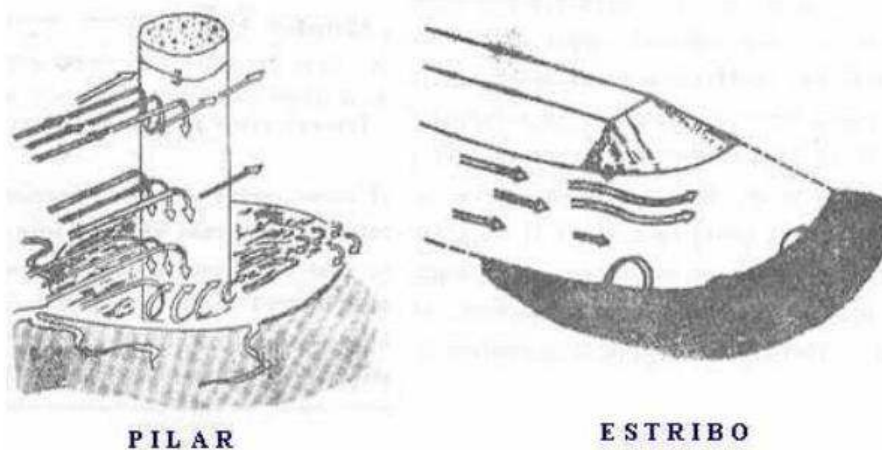


Figura N° 10.1 Los pilares y estribos son elementos extraños dentro de la corriente y producen corrientes vorticosas como las mostradas esquemáticamente en la figura. (Richardson E. V. y otros).

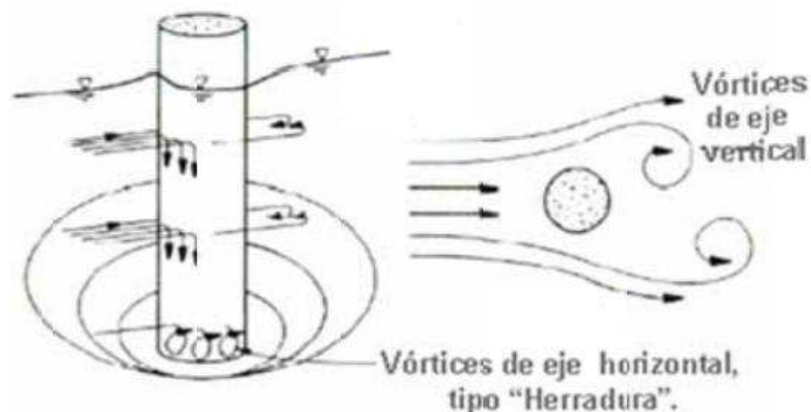


Figura N° 10.2 Vórtices alrededor de un pilar cilíndrico (HEC-18).

No se trata de presentar en este capítulo una amplia colección de fórmulas, sino de incidir en los conceptos fundamentales que sirven para establecerlas. Se examina algunos aspectos imprescindibles de la Hidráulica Fluvial aplicada al diseño de puentes, a la que algunos autores han llamado simplemente Hidráulica de Puentes, lo que permitirá estar en mejores condiciones para evaluar la erosión local producida por pilares y estribos. En lo anteriormente expuesto se fundamenta la necesidad de presentar a continuación las causas más frecuentes de las fallas ocurridas en puentes de todo el mundo.

10.2 Fallas en puentes

¿Por qué es tan importante el aspecto hidráulico en el diseño de puentes que cruzan ríos? La respuesta la encontramos en las numerosas fallas ocurridas. El estudio de las fallas que se presentan en las estructuras es una fuente importante de conocimiento. Para intentar responder a la pregunta de por qué fallan los puentes es conveniente presentar información estadística. Afortunadamente, se dispone de diversas investigaciones sobre las causas de las fallas más comunes ocurridas en puentes de diversos tipos en varios países. Las causas varían mucho según el tipo de puente y de río, y nos sirven como un marco referencial para luego apreciar lo que ocurre en el Perú. Las causas que se mencionan más adelante pueden ocurrir aislada o simultáneamente. Diversos estudios señalan de un modo general que entre las causas más comunes de fallas de puentes están principalmente las siguientes:

- a) Choque de cuerpos extraños (palizadas, embarcaciones, bloques de hielo y otros).
- b) Comportamiento fluvial (socavación y diversas manifestaciones de la dinámica fluvial).
- c) Acción del viento.
- d) Sismos.

En un estudio muy detallado titulado “Bridge failures” que realizó D. W. Smith sobre el número de fallas, de acuerdo a su origen, ocurridas en 143 puentes de todo el mundo obtuvo los siguientes resultados:



Se observa que según la investigación de Smith prácticamente el 50% de las fallas (70) tuvo su origen en las grandes descargas presentadas. Cuando los fenómenos externos actuantes son lo suficientemente grandes como para afectar la estabilidad de un puente se les llama “eventos extremos”. A ellos se refiere el National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) en su Reporte 489 en el que da importantes criterios para su consideración. Naturalmente, que la probabilidad de que ocurran dos o más eventos con su máxima intensidad y en forma simultánea es remota, aunque no imposible. Su probabilidad de ocurrencia, aislada o conjunta, debe examinarse cuidadosamente para no exagerar los costos de la estructura.

Según estudios de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) publicados en 1994 se sabe que: “La mayor parte de los puentes que han fallado, en USA y en todo el mundo, ha sido a causa de la socavación”. Shirole y Holt en 1991 estudiaron 1000, de los 600 000 puentes existentes en Estados Unidos, que habían fallado a lo largo de un periodo de 30 años y encontraron que el 60% de las fallas se originó por problemas de socavación. Wardhana y Hadipriono estudiaron 500 fallas ocurridas entre 1989 y el 2000 en 500 puentes de los Estados Unidos y encontraron que el 53% se debió a las avenidas y a la socavación.

En Colombia realizaron estudios sobre fallas de puentes para los periodos 1996-1997 y 2001-2002 y encontraron que alrededor del 73% de las fallas se debió a la erosión fluvial.

Desde Argentina, Lopardo y Seoane señalan que: “Debe tenerse presente la habitual minimización de las tareas hidráulicas por parte de los responsables de la ingeniería vial, al menos en nuestra región. En general, las autoridades viales nacionales y provinciales siempre han menospreciado los aspectos hidráulicos por lo que puede ser interesante hacer notar la importancia de los problemas que causa el agua sobre las estructuras viales.” En la Figura N° 10.3 se observa una falla típica de un pilar aislado.

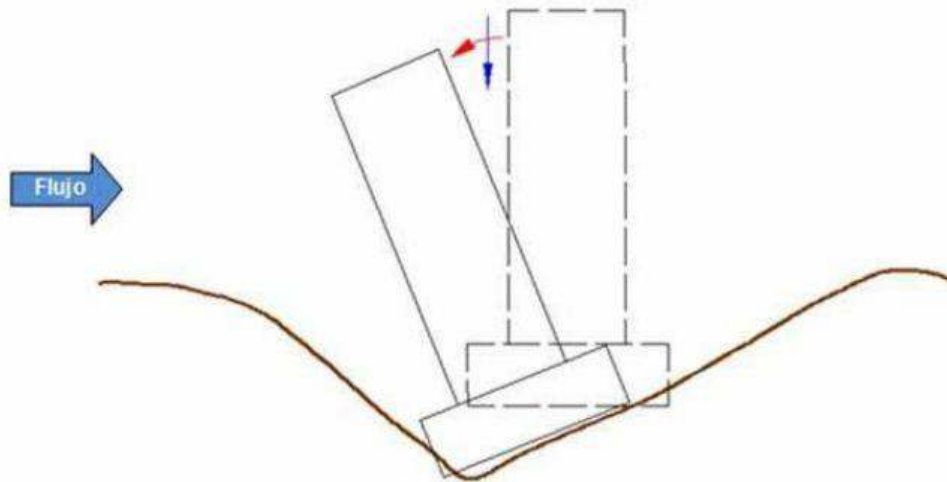


Figura N° 10.3 Falla típica de un pilar por erosión local (Martín-Vide).

En lo que respecta al Perú la situación es aún más grave. Los dos últimos Meganiños (1982-83 y 1997-98) causaron daños considerables a la infraestructura vial, especialmente a los puentes. Se podría mencionar, por ejemplo, que durante el Meganiño 1982-83, caracterizado por fuertes crecidas fluviales especialmente en la costa norte, resultaron afectados o destruidos 55 puentes. Con ocasión del Meganiño 1997-98, de similares características al antes mencionado, los daños en la infraestructura vial fueron también considerables. En el Informe que preparó el Colegio de Ingenieros del Perú sobre el tema, que aparece como Anexo 7-A del Capítulo 7, se señaló que en 1998 hubo 58 puentes destruidos y 28 afectados. Prácticamente, la totalidad de las fallas ocurridas en ambos Meganiños tuvo su origen en problemas de Hidráulica Fluvial. En la Figura N° 10.4 se observa la caída de un puente sobre el río Reque (Departamento de Lambayeque). En la Figura N° 10.5 se aprecia cómo quedó el puente Dueñas, luego de la profundización de su cauce.

Es, pues, indudable que la experiencia nacional y mundial indica que la acción del agua es la causa principal de las fallas en los puentes que interactúan con ríos. Esto es evidente, puesto que las grandes avenidas intensifican los conflictos entre las funciones naturales de un río y las acciones humanas. Cuando se trata de puentes importantes, o con problemas especiales, en áreas sujetas al Fenómeno de El Niño debe considerarse sus efectos mediante un

adecuado Hidrograma de Crecidas (Avenidas). En consecuencia, los Estudios Hidráulicos resultan sumamente importantes para la prevención de fallas de puentes en el Perú y en todo el mundo.



Figura N° 10.4 Caída del puente sobre el río Reque (1998).



Figura N° 10.5 Puente Dueñas (Río Rímac). Se observa la profundización del cauce (1983).

Los daños en las vías de transporte tienen un significado muy importante. En general pueden implicar pérdida de vidas humanas, daños a las propiedades y la interrupción del servicio, lo que significa imposibilidad o dificultad en la comunicación terrestre, aislamiento de los pueblos, perjuicio a las actividades comerciales, escasez y encarecimiento de alimentos, de artículos de primera

necesidad, y daños que afectan aspectos de la Defensa Nacional. El panorama general de daños significa tener que afrontar los costos sociales, políticos y estratégicos.

Como se ha expuesto, los daños que sufren los puentes tienen diversos orígenes, pero fundamentalmente provienen del comportamiento de ríos y quebradas, de la mala ubicación de las obras y, en general, de su inadecuada concepción para las condiciones presentadas. Asimismo, provienen de la falta de mantenimiento del puente y del cauce fluvial. Prácticamente, la totalidad de las fallas ocurridas en las últimas décadas en los puentes del Perú se ha producido por problemas de Hidráulica Fluvial y no por los llamados “problemas estructurales”. Es, pues, indispensable mirar el problema desde esta perspectiva y hacer algunas reflexiones sobre el comportamiento de los ríos y su interacción con los puentes.

10.3 El comportamiento fluvial

Un río tiene fundamentalmente tres funciones naturales: a) Evacuar el agua generada en la cuenca como consecuencia de la precipitación, b) Evacuar los sólidos producto de la erosión de la cuenca y, c) Evacuar el hielo en los lugares en que éste se presenta. Podría añadirse una función adicional, “no natural”, pero muy frecuente en nuestro país y que está vinculada a las acciones humanas: eliminar y evacuar desperdicios, basura, troncos de árboles, ramas, animales muertos, palizadas, bolsas, botellas de plástico y otros cuerpos extraños. En no pocos casos el lecho fluvial se usa como botadero de desmonte y desperdicios, lo que trae graves perjuicios al escurrimiento fluvial, por estrechamiento del cauce, como se verá más adelante.

En los ríos de la vertiente del Pacífico se presentan las dos primeras funciones naturales señaladas y, por cierto, la correspondiente a cuerpos extraños, tal como sucede en otras partes del país. Eventualmente, como cuando ocurre el Fenómeno El Niño, aumentan notablemente las descargas de los ríos, especialmente en sus cursos bajos. Ocurre lo mismo con las descargas de sólidos (sedimentos), por la mayor erosión en la cuenca y también hay una mayor cantidad de cuerpos extraños, los que resultan ser el parámetro principal en el dimensionamiento de las alcantarillas y de algunas otras estructuras hidráulicas, y no el caudal líquido como se ha venido haciendo en algunos proyectos.

Entre las funciones naturales de un río y las acciones humanas aparecen conflictos que se vuelven graves cuando ocurren las grandes descargas fluviales. Las acciones humanas se manifiestan de muchas maneras. Una de ellas es construyendo estructuras. Se hacen entonces evidentes los binomios conflictivos tales como: río-puente, río-carretera, río-canal, río-ferrocarril y muchos otros más. Todos ellos son expresión de la compleja relación entre el Hombre y la Naturaleza. En consecuencia, resulta sumamente importante el

estudio de la Hidráulica Fluvial aplicada al diseño de puentes. De acá que sea necesario tener en cuenta algunos aspectos relevantes del comportamiento de los ríos.

Los ríos son por su propia naturaleza elementos fundamentalmente dinámicos. Los ríos aluviales están cambiando constantemente de posición y forma. No podemos perder de vista que los ríos que corren sobre un material aluvial adquieren por un mecanismo que ha sido llamado de “Autoajuste”, la pendiente, el ancho y el tirante correspondientes al gasto líquido, al gasto sólido y a la composición granulométrica de los sedimentos que arrastran, tal como ha sido presentado en el Capítulo 4.

Este principio general de la Hidráulica Fluvial sigue siendo válido cuando se presentan las eventuales grandes descargas sólidas y líquidas. En consecuencia, el río manifiesta su tendencia natural a adquirir un nuevo ancho, un nuevo tirante y una nueva pendiente, lo que a veces implica cambio de recorrido. Es entonces cuando se hace evidente el conflicto entre el río y las obras, especialmente cuando en su diseño no se hubiese tenido en cuenta la posibilidad de ocurrencia de esos grandes caudales y la intensificación de los procesos fluviomorfológicos de erosión y sedimentación.

La irregularidad de las descargas de los ríos, especialmente la alternancia de avenidas y sequías extremas, es causa importantísima de la movilidad fluvial y de sus consecuencias para la estabilidad de las obras construidas junto a los ríos. Veamos algunos ejemplos. En el río Piura el caudal máximo registrado en Los Ejidos ocurrió en 1998 y alcanzó los 3200 m³/s. Sin embargo, en 1950 y en 1951 el caudal fue prácticamente cero. La ocurrencia de los grandes caudales extremos repercute fuertemente en el comportamiento fluvial. En la costa peruana la aparición del Fenómeno de El Niño da lugar a grandes crecidas de los ríos, especialmente en las partes bajas de los valles, lo que contribuye a que se produzcan importantes cambios en la geometría y en el recorrido fluvial.

En el diseño de puentes es, pues, importantísimo realizar un estudio de Hidráulica Fluvial lo suficientemente profundo como para prever y controlar los efectos antes descritos. De acá que sea necesario examinar a continuación, aunque sea someramente, algunos aspectos hidráulicos del diseño de puentes.

10.4 Aspectos hidráulicos en el diseño de puentes

Son numerosos los aspectos que deben tenerse en cuenta en el diseño de un puente y, en especial, en el cálculo de la profundidad de cimentación de pilares y estribos. Como sería una tarea enorme examinar exhaustivamente cada uno de ellos se presenta a continuación un breve comentario sobre los aspectos más importantes vinculados a la hidráulica de puentes.

a) El conocimiento del río

El conocimiento del río en el que se va a construir una obra es fundamental. Lo primero debe ser la determinación del tipo de río de que se trata. Es así como puede haber ríos casi rectos (en cortos tramos), con meandros y entrelazados, cada uno de los cuales ofrece dificultades propias (Capítulo 2). La concepción de las obras hidráulicas fluviales en general, y de los puentes en particular, tiene que realizarse en función del tipo de río de que se trate. Debe entenderse que la expresión tipo de río se refiere al tramo fluvial comprometido. Un río, a lo largo de su recorrido, tiene varios tramos cada uno de los cuales posee sus peculiaridades.

El diseño en general y la selección del emplazamiento de un puente deben responder a las características de cada tramo fluvial. Así por ejemplo, no es lo mismo diseñar para un lecho arenoso, de baja pendiente, que para un lecho de grava, de mayor pendiente, o para una quebrada de grandes piedras y muy fuerte pendiente. La estabilidad del tramo fluvial asociado al puente es fundamental para la seguridad de la estructura. Es imposible que un puente sea estable, si no lo es el tramo fluvial comprometido. El río es por naturaleza esencialmente móvil y cambiante. El puente y el río interactúan: el puente es para el río un elemento extraño y, en ocasiones, reacciona violentamente. La estabilidad fluvial, lograda durante cientos o miles de años, puede verse seriamente alterada por la construcción de un puente.

Sin encauzamiento no hay posibilidad de asegurar la estabilidad del puente. Por eso en muchas oportunidades el encauzamiento y el puente tienen que estudiarse conjuntamente. Ese estudio debe comprender las consideraciones de aproximación del río al puente, que puede requerir estructuras especiales. El diseño de un puente que cruza un río tiene que empezar y basarse en un riguroso estudio de Hidráulica Fluvial, el que debe tratarse en coordinación con otros aspectos como los hidrológicos y sedimentológicos, a la luz de las diversas disciplinas antes mencionadas.

Pero, la profundidad del estudio hidráulico tiene que depender de ciertas características del puente en particular, como podrían ser: su importancia dentro de la red vial, consecuencias de su falla, costo, tipo de estructura, riesgos aceptables, etc., a las que debe añadirse las correspondientes al río. Los alcances del estudio no pueden ser los mismos para un puente de pocos metros de luz, sobre un pequeño río, en una carretera muy poco transitada, que un puente de gran luz, de estructura compleja, que cruza un río de grandes caudales y que forma parte de una importante vía.

b) La Avenida de Diseño

En el Capítulo 6 (Punto 6.4) se ha presentado los conceptos generales sobre la Avenida de Diseño y en el Capítulo 8 (Punto 8.8) sus particularidades cuando se presenta un Meganiño.

En el planeamiento y diseño de un puente la selección de la, o las Avenidas de Diseño, es una decisión importante que corresponde al jefe de proyecto en estrecha colaboración con los diversos especialistas que intervienen y con el propietario del proyecto. La selección de la Avenida de Diseño implica la aceptación de un riesgo y, por consiguiente, de una falla. Es el propietario del proyecto quien está en mejores condiciones de decidir, con el asesoramiento correspondiente, qué riesgo de falla puede aceptar.

La Avenida de Diseño para un puente está asociada al comportamiento del tramo fluvial comprometido, a la sección en la que está el puente, a las socavaciones previstas y, ciertamente, a la importancia y costo de la obra.

La American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) recomienda como Avenida de Diseño para un puente la correspondiente a la avenida centenaria, o aquella que siendo menor alcance el nivel del tablero. Para el cálculo de la socavación recomienda el procedimiento de la Federal Highway Administration (FHWA) Manual "HEC-18" (Hydraulic Engineering Circular N° 18: Evaluating Scour at Bridges). Cabe precisar que el HEC-18 está basado en modelos hidráulicos de lechos arenosos.

Las crecidas fluviales que ocurren en la costa norperuana durante los Meganiños son de larga duración (a diferencia de lo que ocurre en el sur) y, por lo tanto, implican un gran volumen descargado. Esa es otra de las diferencias esenciales con respecto a las avenidas ordinarias. La consideración de un Hidrograma de Diseño tiene grandes repercusiones en la deformación del lecho fluvial, lo que obliga muchas veces a un estudio en modelo hidráulico.

Como se mencionó antes, para el cálculo de la erosión debe recordarse que las avenidas asociadas a los Meganiños tienen no sólo un valor "máximo" muy alto, sino una sucesión de ellos.

c) El emplazamiento del puente

El emplazamiento del puente tiene que determinarse considerando tanto las necesidades viales como las hidráulicas, en el más amplio sentido de los términos. Richardson et al. señalan la importancia de los aspectos de la morfología fluvial, el alineamiento del río, las variaciones del cauce fluvial en el tiempo, el material constituyente del lecho y de las márgenes, los costos del eventual encauzamiento y, ciertamente, las características hidrológicas, así como la longitud del puente (luz), los problemas de expropiaciones, los costos

de mantenimiento, los procedimientos de construcción y muchos otros más. Tanto los aspectos hidráulicos como los viales pueden dar lugar a varias alternativas, de las que se escogerá con ayuda de un análisis económico la más conveniente.

d) La alineación del puente respecto de la corriente

La corriente fluvial tiene por lo general una dirección predominante. Los pilares deben estar alineados en esa dirección de modo que el ángulo de ataque sea cero. Sin embargo, ocurre eventualmente que la dirección de la corriente cambia. Esta posibilidad debe ser tomada en cuenta en el diseño. La influencia del ángulo de ataque sobre la erosión local en el pilar es muy grande y ha sido estudiada experimentalmente. Su fuerte influencia es una de las razones para preferir pilares circulares, cuya socavación es independiente del ángulo de ataque, como se verá más adelante.

e) Luz y altura del tablero

No siempre una avenida muy grande es la más desfavorable. Debe verificarse que con avenidas menores, con las que pudiera no haber una socavación tan importante, exista suficiente capacidad de descarga. Las avenidas deben poder transitar con el pelo de agua debajo del tablero. Se debe tomar en cuenta eventuales agradaciones (sedimentaciones). La presencia de cuerpos extraños, como las palizadas, pueden dar lugar a la falla del puente por lo que debe considerarse su posibilidad en el momento de determinar las luces y la altura del tablero.

Son, pues, numerosos los factores a considerarse en el cálculo de la erosión local en pilares y estribos. Sin embargo, no debe perderse de vista que previamente a su cálculo se debe determinar, mediante otras consideraciones, los otros tipos de erosión que ocurren en un río, es decir, las diversas manifestaciones de la degradación fluvial.

10.5 Manifestaciones de la degradación fluvial

En la zona del río donde se ubicará un puente hay tres circunstancias que determinan la profundización del lecho fluvial para las condiciones de diseño. Ellas son las siguientes:

- a) Socavación por variación del perfil longitudinal, causada por el comportamiento fluvial (Erosión generalizada: degradación).
- b) Socavación (eventual) por contracción de la sección transversal (debida al estrechamiento creado, precisamente para construir el puente).
- c) Erosión local debida a los pilares y estribos.

Durante las grandes crecidas se produce un aumento de la sección transversal del río, uno de cuyos elementos es la profundización generalizada del lecho fluvial por aumento de la fuerza tractiva. Esta profundización también puede deberse a cambios fluviomorfológicos de cualquier origen. Se trata de una erosión generalizada que recibe el nombre de degradación y que se desarrolla, casi siempre, de un modo más lento y en una extensión mayor que las dos que se mencionan a continuación. Es, pues, una erosión que se produce independientemente de la ejecución de las obras correspondientes al puente. La degradación representa las variaciones (desplazamientos verticales) que en el largo plazo experimentará el lecho fluvial y que se manifiesta como una profundización del cauce. De modo, pues, que el primer paso en este aspecto del diseño es conocer las características que tendrá la sección transversal del río durante la Avenida de Diseño, o, mejor, durante el Hidrograma de Diseño, como consecuencia del "Autoajuste" que sufrirá.

Es también frecuente, lamentablemente, que para construir un puente y acortar su longitud se realice un estrechamiento exagerado de la sección transversal del río (que puede deberse a un encauzamiento o a los terraplenes de acceso al puente), lo que aumenta la profundización del lecho por incremento de la velocidad y de la fuerza tractiva sobre el fondo. También puede haber, en algunos casos, una disminución de la sección transversal como consecuencia de que hubiese un número grande de pilares y/o que el ancho de estos fuese excesivo. Esta degradación puede originarse también por el cambio de alguna de las condiciones de aguas abajo. Recuérdese que las condiciones de aguas abajo pueden dar lugar al fenómeno contrario: agradación. Una situación particular se presenta en los tramos fluviales sujetos a mareas, es decir, cuando hay flujo en dos direcciones.

Finalmente, además de las dos circunstancias antes señaladas, se debe tener en cuenta la socavación producida por los pilares y estribos de un puente, de la que se trata más adelante, y que es la que generalmente se produce más rápidamente. La socavación, o erosión local, puede presentarse al mismo tiempo que otros fenómenos sedimentológicos. La suma de las tres socavaciones constituye la socavación total. La socavación avanza hasta llegar a una situación de equilibrio sedimentológico, pues no es indefinida sino que tiene un límite. El conocimiento de la profundidad de socavación es muy importante para determinar la profundidad de cimentación.

La socavación es causa principal de la falla de numerosos puentes. Debería realizarse un estudio muy detallado de la erosión generalizada (degradación), de la erosión eventual como consecuencia de un estrechamiento fluvial (que debería estudiarse cuidadosamente) y, finalmente, de la erosión local causada por pilares y estribos. Las fórmulas conocidas sobre erosión local en pilares y estribos de puentes se han determinado con los valores instantáneos de los caudales. Para considerar el efecto del Fenómeno de El Niño y el de las

avenidas de larga duración se hace indispensable el Hidrograma de Diseño y, eventualmente, el estudio en un modelo físico.

10.6 Cálculo de la profundidad de socavación

Una vez calculada la socavación general y, si fuese el caso, la producida por un eventual estrechamiento del cauce, se procede a determinar la erosión local originada por pilares y estribos, que es el tema de este capítulo. La erosión local, o socavación, es la remoción que realiza el agua del material sólido constituyente del lecho fluvial en los alrededores de ciertas estructuras como los pilares y estribos. En los estudios de un puente es importante efectuar un cálculo, lo más preciso posible, acerca de la profundidad de la erosión local producida por pilares y estribos, pues ella determinará la de la cimentación, la que debe estar debajo de la máxima profundidad de socavación. En algunas publicaciones, como las mexicanas, a la profundidad de socavación se le llama “profundidad de desplante”. Desplantar significa arrancar de raíz. Una subestimación de la máxima profundidad de socavación podría conducir a la falla de la estructura y, en cambio, una sobrestimación llevaría a costos innecesariamente altos. En los ríos que tienen áreas de inundación no se debe descartar la posibilidad de que el río, mediante un desplazamiento lateral, altere su curso y ataque los pilares ubicados en ellas por lo que su profundidad de cimentación debe prever este caso.

La socavación, o erosión local, que se produce en el lecho fluvial como consecuencia de los pilares y estribos se debe a que aparecen velocidades locales mucho mayores que la velocidad media de la corriente y a la generación de vórtices en diferentes direcciones del escurrimiento. Los vórtices desplazan el material constituyente del lecho, aun cuando la velocidad media de la corriente, o la fuerza tractiva, no fuesen suficientemente grandes para hacerlo. Naturalmente que la socavación tiene características particulares según se trate de lechos cohesivos o no cohesivos. En los lechos de arena o grava la socavación puede producirse muy rápidamente, a veces en sólo unas horas. En cambio, en los lechos cohesivos la erosión es más lenta, pero puede alcanzar finalmente valores tan altos como aquellos de los lechos no cohesivos. A continuación se examina el desarrollo de la erosión local en los lechos no cohesivos (granulares).

Puede ser que para un caudal determinado no se produzca desplazamiento de las partículas del fondo, pero al colocar un pilar (es decir, un obstáculo) aparezcan corrientes vorticosas que muevan las partículas del lecho y se presente la socavación. La erosión local se desarrolla en el tiempo, muy rápidamente, y avanza hasta llegar a una situación de equilibrio sedimentológico. Como se dijo antes, la socavación no es indefinida. Richardson y otros autores han señalado que a pesar de que se tenga un flujo permanente (sin variaciones en el tiempo), la profundidad de la erosión local fluctúa con el tiempo en los lechos arenosos en los que el fondo se encuentre

en la fase de dunas, especialmente si éstas son grandes. Cuando la cresta de una duna llega al pilar se detiene o disminuye la socavación. Pero, cuando la cresta de la duna pasa y está aguas abajo del pilar, el aporte sólido local disminuye y se profundiza la socavación.

Richardson y otros autores llaman “profundidad de equilibrio” (“*equilibrium scour depth*”) al promedio de las dos profundidades de socavación antes mencionadas y señalan que según experiencias de laboratorio la profundidad máxima de socavación es 30% mayor que la profundidad de equilibrio. La máxima socavación es difícil de observar en la naturaleza; su valor puede ser instantáneo, pero suficiente para causar la falla de una estructura. Se habla también de profundidad de erosión en agua con sedimentos y sin ellos. De acá que la erosión deba estudiarse conjuntamente con el transporte sólido.

La erosión local se origina en los vórtices, los que son de eje horizontal y vertical, tal como puede verse en las Figuras N° 10.6 y 10.7.

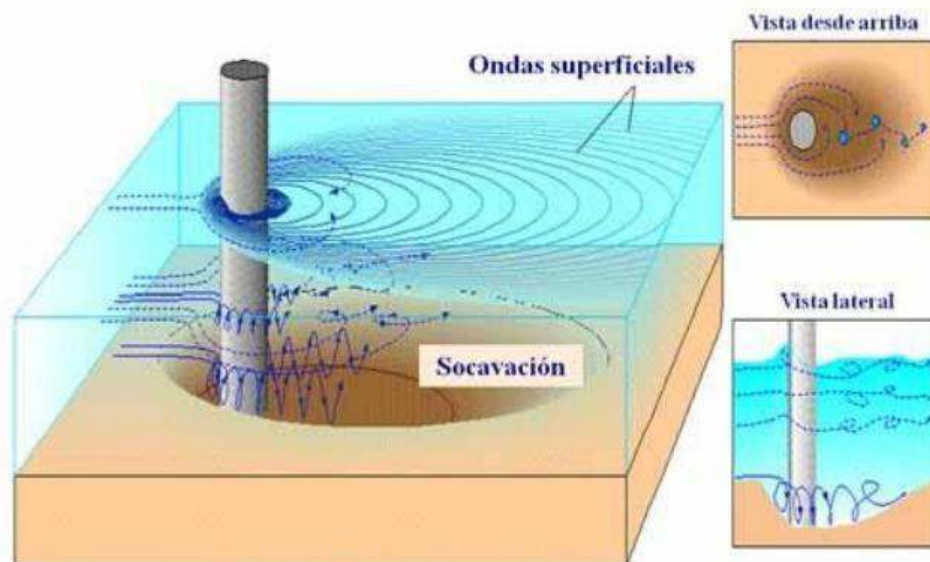


Figura N° 10.6 Vórtices alrededor de un pilar cilíndrico (USGS).

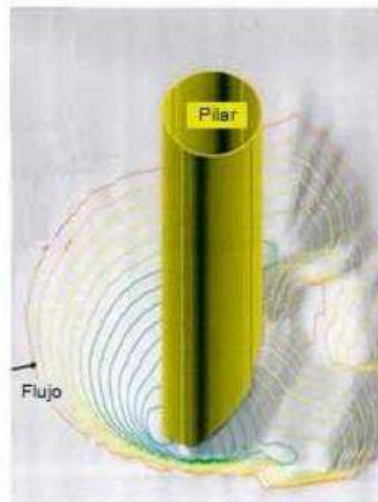


Figura N° 10.7 Simulación de la socavación al pie de un pilar de puente (Modelo CCHE3D).

Los vórtices de eje horizontal (torbellinos), llamados de herradura (“*horseshoe vortex*”), están muy asociados a la forma de la sección transversal del pilar. Jensen, citando a Shen, ha expresado que este torbellino de núcleo proviene de la vorticidad de la capa límite del escurrimiento en el fondo del canal y que a él se debe la máxima socavación, en la mayoría de los casos. Estos vórtices de herradura tienen una naturaleza tridimensional muy complicada de analizarse y no se ha podido establecer una relación matemática entre su desarrollo y el de la socavación.

En cambio, los vórtices de eje vertical (*wake-vortex*) se generan por separación de la capa límite del contorno del pilar y son muy importantes cuando el pilar es muy ancho. Como la socavación se origina en los vórtices podría pensarse que es necesario partir de su estudio para determinar la socavación. Pero, esto no ha sido posible hasta ahora por lo que la socavación se estudia del modo que se señala a continuación.

La profundidad y_s de la socavación originada por un pilar se calcula a partir de varios factores que se deben principalmente a las características de la corriente, del material sólido transportado, de la geometría del pilar, de la dirección de la corriente con respecto al pilar y de la configuración del fondo. Dentro de las características de la corriente se encuentran el tirante, la velocidad media y el Número de Froude (F), inmediatamente aguas arriba del pilar. Las características de la erosión son diferentes, según que se trate de flujos subcríticos o supercríticos. La determinación de la profundidad de la socavación originada por los pilares y estribos de puentes es una labor esencialmente multidisciplinaria.

El transporte sólido está formado por las partículas en suspensión y por las de fondo. En lo que respecta a este último modo de transporte, y para efectos de la erosión local, es muy importante la curva de distribución granulométrica de las partículas que lo constituyen. Es así como una distribución granulométrica extendida protege de la erosión. Por el contrario, la granulometría casi uniforme, como la de una arena fina, aumenta el peligro de erosión. En general, en el cálculo de la profundidad de socavación en lechos arenosos, no influye el tamaño de los granos. Cuando hay partículas mayores puede producirse, para un cierto caudal, el acorazamiento del lecho, lo que implicaría la disminución de la socavación. Esto fue considerado por Richardson en la fórmula de Colorado State University (CSU) mediante un coeficiente, que se examinará más adelante.

El ancho **D** del pilar es sumamente importante en el cálculo de la socavación. Se sabe que mientras mayor sea el ancho **D** del pilar (entendiendo como tal su dimensión en el sentido normal al de la corriente), mayores serán las posibilidades de una socavación más intensa. De acá que haya que preferir pilares delgados. La dirección de la corriente con respecto al pilar tiene una importancia decisiva en la profundidad de socavación, como se verá más adelante.

El estudio de la erosión local se ha hecho fundamentalmente en ensayos de laboratorio, para determinadas condiciones. Existen numerosas fórmulas para el cálculo de la socavación originada por pilares y estribos, cuyos resultados difieren notablemente. Muchas de ellas tienen refinamientos excesivos, incompatibles con la realidad fluvial a la que se enfrenta el ingeniero. Martín-Vide y otros autores realizaron una investigación bibliográfica sobre fórmulas para el cálculo de la socavación en pilares y encontraron unas 70 fórmulas, que se referían sólo a lechos granulares con Números de Froude menores que 1, cuyos resultados diferían tanto como 1:8.

10.7 Profundidad de socavación en pilares circulares

En el apartado anterior se ha mencionado que existen numerosas fórmulas para el cálculo de la socavación en pilares y estribos. A continuación se examinan las de Shen y Laursen, obtenidas para pilares circulares. Los pilares circulares tienen la ventaja de que la socavación es independiente del ángulo de ataque de la corriente, pues la sección es simétrica en todas direcciones. Para pilares no circulares y condiciones más complejas se recomienda la fórmula de Colorado State University (CSU), que se presenta más adelante.

Fórmulas de Shen

Las fórmulas de Shen se refieren al cálculo de la profundidad de socavación producida por pilares circulares de puentes en lechos arenosos, con flujos

subcríticos, cuyos Números de Froude estén comprendidos entre 0,5 y 0,8. Para flujos sin transporte de sedimentos la fórmula de Shen es:

$$y_s = 1,17 V^{0,62} D^{0,62} \quad (10.1)$$

Para flujos con transporte de sedimentos la fórmula de Shen es:

$$y_s = 1,59 V^{0,67} D^{0,67} \quad (10.2)$$

Expresiones en las que y_s es la socavación debida (exclusivamente) al pilar, V es la velocidad media del escurrimiento correspondiente a la Avenida de Diseño y D es el diámetro del pilar. Todas las dimensiones están en metro .

Fórmula de Laursen

Esta fórmula se originó en las investigaciones realizadas en Iowa por E. M. Laursen y A. Tosch. En una de sus versiones para pilares circulares la fórmula tiene la forma siguiente:

$$y_s = 1,11 y^{0,5} D^{0,5} \quad (10.3)$$

Expresión en la que y_s es la socavación debida (exclusivamente) al pilar, y es el tirante del escurrimiento y D es el diámetro del pila . Todas las dimensiones están en metros. La fórmula de Laursen fue establecida para flujos netamente subcríticos, con Números de Froude inferiores a 0,5, y lechos arenosos con transporte sólido de fondo. Si dividimos ambos miembros de la fórmula de Laursen por el diámetro D se obtiene:

$$\frac{y_s}{D} = 1,11 \left(\frac{y}{D} \right)^{0,5} \quad (10.4)$$

Se establece así una relación entre dos Parámetros Adimensionales. Si, además de transporte sólido de fondo, hubiese transporte sólido en suspensión la socavación sería algo mayor. Obsérvese que en la fórmula de Laursen, para diámetro constante del pilar, la profundidad de socavación depende sólo del tirante.

Nalluri, Saldarriaga y Plata, de la Universidad de Los Andes, Colombia, en la revisión que efectuaron con el objeto de verificar la confiabilidad de las fórmulas que predicen la socavación local alrededor de Pilas de Puentes, examinaron críticamente 18 métodos para el cálculo de la erosión local en

pilares de puentes y ajustaron los valores con los que obtuvieron en sus propias mediciones de campo y ensayos de laboratorio. Es así como ajustaron la ecuación de Laursen y obtuvieron la siguiente expresión:

$$\frac{y_s}{D} = 1,15 \left(\frac{y}{D} \right)^{0,45} \quad (10.5)$$

Como las diferencias entre los resultados de aplicar una u otra fórmula son mínimas se puede considerar, para fines prácticos, que las mediciones y ensayos realizados por los investigadores de la Universidad de Los Andes son una ratificación de la fórmula de Laursen.

10.8 Profundidad de socavación bajo diversas condiciones

En el apartado anterior se ha presentado algunas fórmulas que bajo determinadas condiciones podrían utilizarse para el cálculo de la socavación en pilares circulares. Sin embargo, muchas veces los pilares no son circulares, la corriente presenta un ángulo con respecto al pilar, el transporte sólido tiene ciertas características que deben tomarse en cuenta y, eventualmente, puede producirse el acorazamiento del lecho. A partir de los trabajos de un grupo de investigadores de Colorado State University (CSU) se estableció una importante fórmula, de carácter bastante general, que tiene una sólida base teórica y que está sustentada en investigaciones de laboratorio, la que puede aplicarse en lechos no cohesivos (arenosos), con Números de Froude menores que 0,8. Esta fórmula de CSU es la que se usa en el HEC-18. La fórmula de CSU cubre la posibilidad de diversas secciones transversales del pilar y otras condiciones particulares, como se ve más adelante. Ella es:

$$\frac{y_s}{y} = 2 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{D}{y} \right)^{0,65} F^{0,43} \quad (10.6)$$

Expresión en la que cada uno de los valores de **K** corresponde a lo siguiente: **K₁** a la forma de la sección transversal del pilar, **K₂** al ángulo de ataque de la corriente, **K₃** a la condición del lecho y **K₄** a la posibilidad de acorazamiento. **y_s** es la profundidad máxima de socavación, **y** es el tirante inmediatamente aguas arriba del puente, sin considerar la erosión local, **F** es el Número de Froude del escurrimiento, **D** es la dimensión del pilar, medida transversalmente a la corriente.

La fórmula de CSU también se escribe de la siguiente forma:

$$\frac{y_s}{D} = 2 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{y}{D} \right)^{0,35} F^{0,43} \quad (10.7)$$

El coeficiente K_1 se refiere a la influencia de la forma de la sección transversal del pilar en la socavación producida. La más frecuente es la sección circular para la que K_1 es igual a 1,0. A medida que el perfil sea más hidrodinámico disminuye, aunque sea levemente, la intensidad de la erosión local. En una sección rectangular el valor de K_1 es igual a 1,1, para una relación L/D igual a 2. En la Figura N° 10.8 se aprecia otros valores del coeficiente K_1 . Se observa que no hay grandes diferencias entre los valores de K_1 para diferentes secciones transversales.

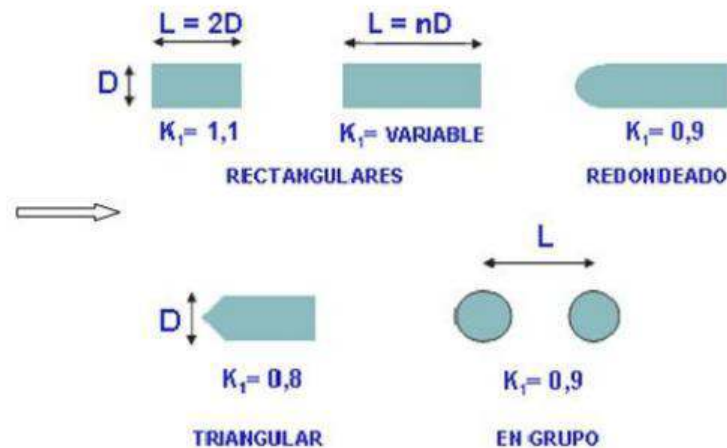


Figura N° 10.8 Algunos valores del coeficiente K_1

En algunos proyectos se usan grupos de pilares, en cuyo caso hay que considerar apropiadamente los coeficientes. Para pilares de sección circular ($K_1 = 1$), y si no tomamos en cuenta algunas particularidades ($K_2 = K_3 = K_4 = 1$), se obtiene una versión simplificada de la fórmula de CSU:

$$\frac{y_s}{y} = 2 \left(\frac{D}{y} \right)^{0,65} F^{0,43} \quad (10.8)$$

Obsérvese que la fórmula es adimensional. Si de ella se despeja y_s se obtiene:

$$y_s = 2 D^{0,65} y^{0,35} F^{0,43} \quad (10.9)$$

De donde, al reemplazar la expresión correspondiente al Número de Froude (en el sistema métrico) se llega a:

$$y_s = 1,22 D^{0,65} y^{0,135} V^{0,43} \quad (10.10)$$

Obsérvese que, a diferencia de lo que ocurre con las fórmulas de Shen y Laursen, cada una de las cuales sólo considera dos factores, la fórmula de Colorado State University toma en cuenta por lo menos tres (en realidad, siete). Por eso es una fórmula más completa y es la que se usa para adicionar el efecto de factores como la forma de la sección transversal del pilar, la dirección de la corriente (ángulo de ataque) y algunos aspectos del transporte sólido de fondo.

El coeficiente K_2 es muy importante y se refiere a la influencia del ángulo de ataque de la corriente, que es uno de los factores más importantes en la determinación de la profundidad de socavación. Esta influencia no se da en las secciones circulares, puesto que, como ya se dijo, son simétricas en todas direcciones. En cambio, por ejemplo, en los pilares de sección rectangular, la influencia del ángulo de ataque en la socavación puede ser muy fuerte, en la medida en que el ángulo sea mayor y en que lo sea la relación entre la longitud L del pilar a lo largo de la corriente y el ancho D del pilar, transversal a la corriente. En la Figura N° 10.9 se presenta valores del coeficiente K_2 en función del ángulo de ataque θ y de la relación L/D .

Ángulo θ	$L/D = 4$	$L/D = 8$	$L/D = 12$
	Valores de K_2		
0°	1,0	1,0	1,0
15°	1,5	2,0	2,5
30°	2,0	2,5	3,5
45°	2,3	3,3	4,3
90°	2,3	3,9	5,0

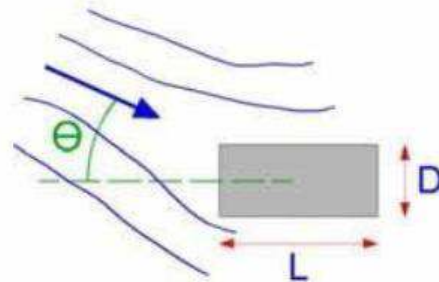


Figura N° 10.9 Valores del coeficiente K_2 .

El coeficiente K_3 se refiere a la condición del lecho, específicamente a la fase del transporte sólido por influencia de las dunas. Cuando el transporte de fondo es inexistente o se produce con un lecho plano, o con dunas de pequeña altura, comprendida entre 0,60 y 3 m (2 y 10 ft) el valor de K_3 es igual a 1,1. Para dunas de altura mediana, comprendida entre 3 y 10 m (10 y 30 ft), el valor de K_3 varía entre 1,1 y 1,2. Para dunas grandes, mayores de 10 m, el valor de K_3 es de 1,3. El coeficiente K_4 depende de la granulometría y se refiere a la posibilidad de que el lecho esté acorazado. El acorazamiento disminuye la profundidad de socavación y entonces K_4 es igual o menor que 1. En una situación extrema puede ser tan bajo como 0,4.

Para Números de Froude mayores que 0,8 es recomendable recurrir a modelos hidráulicos, si la importancia y costo del puente lo justifican.

En la Figura N° 10.10 se compara las profundidades de socavación, medidas y calculadas, usando la fórmula de CSU, según las investigaciones de Thamer, Ahmed, Mohamed y otros. En la Figura N° 10.11 se aprecia, referencialmente, la extensión de la socavación (HEC-18).

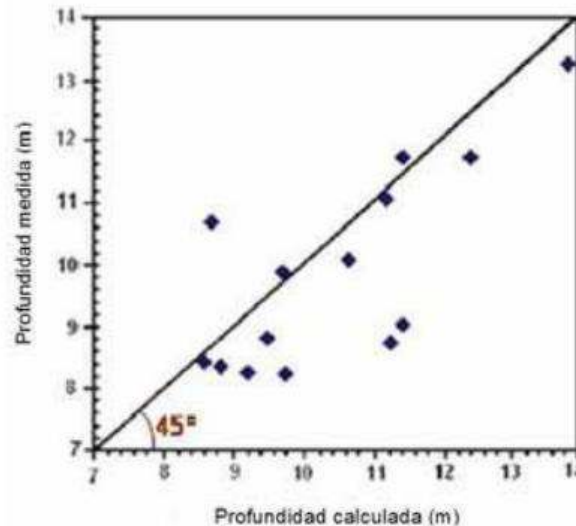


Figura N° 10.10 Comparación entre profundidades de socavación medidas y calculadas usando la fórmula de CSU (Thamer Ahmed Mohamed y otros).

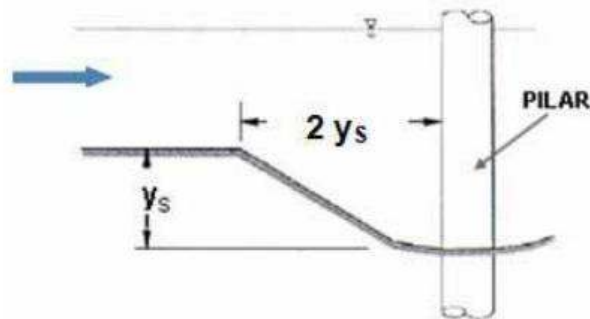


Figura N° 10.11 Extensión de la socavación (HEC- 18).

A la profundidad de socavación calculada se le aplicará un coeficiente de seguridad para obtener la profundidad de cimentación.

Los modelos hidráulicos (modelos reducidos) son de gran ayuda; a veces constituyen el único modo de obtener información útil. Los modelos matemáticos se aplican en condiciones restringidas.

En un estudio en modelo hidráulico del Puente Nuevo de Mora de Ebro realizado por Martín-Vide y Dolz Ripollés se señala que la investigación en modelo reducido fue sumamente útil para conocer las características de la socavación, pues: “Todo lo anterior se sabe gracias a la experimentación en

laboratorio, donde es posible observar los fenómenos. Las medidas de campo son raras, por la ocasionalidad de los sucesos de más importancia (avenidas) y la dificultad de medir o de siquiera ver el fondo. El examen de la pila tras la avenida no indica la erosión alcanzada, pues lógicamente el foso se rellena durante la fase de descenso de caudal. Durante la avenida probablemente haya existido una erosión general del fondo, ya que la circulación de un caudal mayor implica una mayor capacidad de arrastre, erosión también invisible más tarde”.

10.9 Socavación en estribos

Los estribos son, igual que los pilares, elementos extraños dentro de la corriente e implican generalmente una reducción del ancho del río. Esta circunstancia debe ser tomada en cuenta cuidadosamente. Durante las grandes avenidas los ríos aluviales tratan de adquirir el ancho que les corresponde y entonces pueden ocurrir graves fallas en los puentes. En la Figura N° 10.12 se aprecia el sistema de vórtices durante la erosión en un estribo, según Martínez Marín y otros, en sus trabajos sobre el tema. En la Figura N° 10.13 se observa la modificación del lecho fluvial en los alrededores de un estribo (modelo hidráulico).

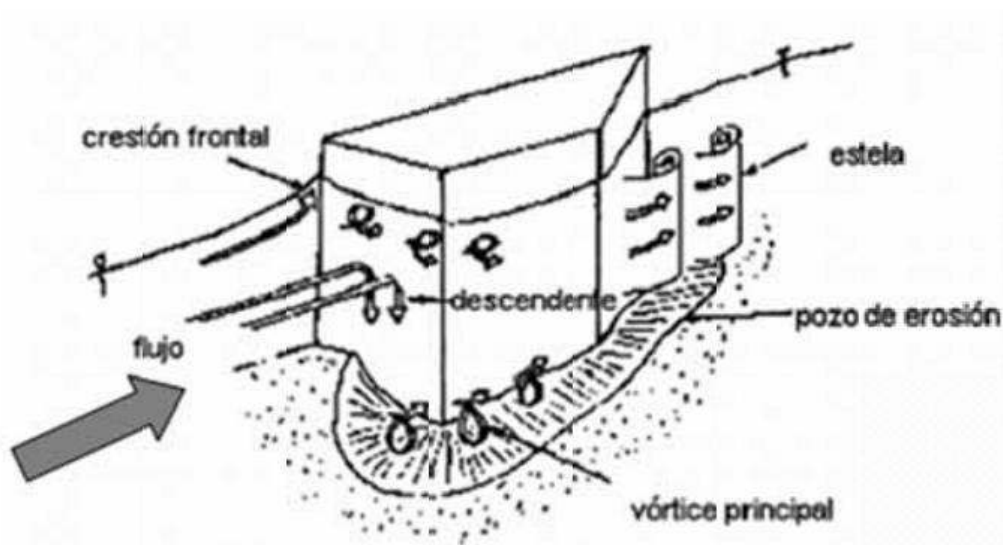


Figura N° 10.12 Sistema de vórtices durante la erosión en un estribo (Martínez Marín y otros).



Figura N° 10.13 Modificación del lecho fluvial en los alrededores de un estribo (José Daniel Brea y otros).

Es muy frecuente, desgraciadamente, que para “economizar” en el costo del puente (o para ganar una licitación) se acorte su longitud, lo que implica el aumento de la longitud de los terraplenes de acceso, los que, en realidad, resultan ubicados dentro del cauce fluvial, constituyendo lo que se llama una invasión vial. Consultar al respecto lo señalado en el Capítulo 5 (Punto 5.7). Esto es frecuente en los llamados ríos de llanura y ha sido estudiado experimentalmente, entre otros, por investigadores de Laboratorio Nacional de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina. En consecuencia, es conveniente encargar por separado el diseño y la construcción de un puente y evitarse los llamados contratos “llave en mano”.

En general, la erosión en estribos se ha estado dando menos que la de los pilares. En un estudio realizado por la Administración de Carreteras de los Estados Unidos en 383 puentes, el 25% de las fallas se originó en los pilares y el 72% en los estribos, según señala Martínez Marín. Una forma de interpretar estos resultados es que los cálculos relativos a los estribos tienen menor confiabilidad que los de los pilares. El mismo autor señala que los factores que determinan la socavación en estribos son:

- a) La distribución granulométrica.
- b) El tamaño de los granos.
- c) El flujo.
- d) La longitud del estribo (es muy importante).
- e) La inclinación del estribo con respecto a la corriente.
- f) La relación ancho/longitud del estribo.

Es particularmente importante la longitud a del estribo medida normalmente a la orilla. Interesa especialmente la relación a/y . Es así como se distingue tres tipos de relación:

- Corta $a/y < 1$
- Media $1 < a/y < 25$
- Larga $a/y > 25$

Si, a/y es mayor que 25 la profundidad de socavación es independiente de a/y .

Para el cálculo de la socavación en estribos existen numerosas fórmulas. Se puede usar, por ejemplo, la fórmula de Liu, en la cual para $0 < a/y < 25$.

$$\frac{y_s}{y} = 1,1 \left(\frac{a}{y} \right)^{0,40} F^{0,33} \quad (10.11)$$

El coeficiente (que aparece como 1,1) varía según el talud del estribo. El Número de Froude corresponde a la condición de aguas arriba.

Para $a/y > 25$ la fórmula se reduce a la expresión

$$\frac{y_s}{y} = 4,0 F^{0,33} \quad (10.12)$$

De lo expuesto sobre el cálculo de las profundidades de socavación en los pilares y estribos de puentes que interactúan con ríos se concluye que es muy intensa la influencia de la dinámica fluvial.

10.10 Medidas de protección

Las medidas de protección contra la socavación en pilares y estribos, que sólo se tratan someramente en este capítulo, corresponden tanto a la fase de planeamiento y diseño del puente como a la de su operación y mantenimiento. Dado que en los estudios, como se ha visto, es difícil prever con exactitud la socavación que se producirá como consecuencia de la profunda interacción entre las estructuras y el río, es necesario considerar los indispensables coeficientes de seguridad. A lo anterior debe añadirse que como consecuencia de la gran movilidad fluvial las condiciones de diseño pueden cambiar, por lo que se hace indispensable las inspecciones y medidas de control periódicas y eventuales, luego de eventos hidrometeorológicos extraordinarios. Todo ello es de vital importancia para la vida del puente y se aplica a la estructura y al río.

Conceptualmente, y en general, hay varios tipos de medidas de protección que pueden considerarse contra la socavación. Una de ellas podría ser impedir o disminuir el desarrollo de vórtices, que son la causa de la erosión local. Para

ello se puede recurrir al tratamiento de aspectos hidrodinámicos, puesto que en la medida en la que el pilar tenga una sección transversal más adecuada y una menor dimensión transversal a la corriente, la socavación será menor. Se debe disminuir la presencia de todo aquello que cause vórtices o corrientes secundarias. En algunos proyectos también se ha intentado disminuir la erosión mediante la colocación de barreras aguas arriba del pilar. Sólo como ejemplo podría mencionarse las investigaciones de A. K. Gupta, que consisten en colocar delante del pilar al nivel del lecho fluvial un elemento hidrodinámico tipo “Ala Delta” con el objeto de disminuir la acción ejercida por los vórtices de herradura sobre el lecho, como se aprecia en la Figura N° 10.14.

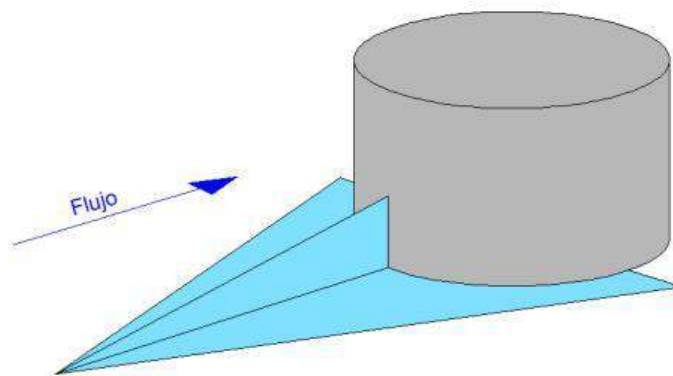


Figura 10.14 Ensayos de Gupta “Ala Delta” (Plata, Nalluri, y otros).

Otra forma de disminuir o controlar la socavación es buscar la protección del lecho, para lo cual puede recurrirse a la colocación sobre él de un rip-rap de material grueso, tal como se observa en la Figura N° 10.15. Se ha ensayado también la colocación de “repisas” en el pilar, tal como se observa en la Figura N° 10.16.



Figura 10.15 Protección de un pilar (Confederation Bridge).

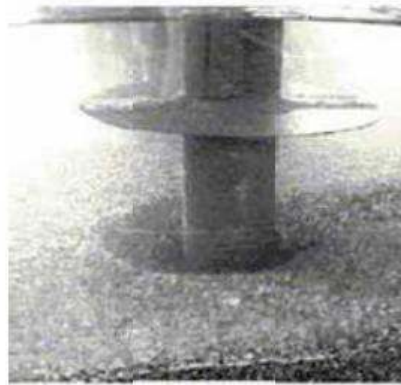


Figura 10.16 Desarrollo de la **socavación** alrededor de un **pilar** protegido (Alix T. Oncada M., Julián Aguirre Pe y otros).

A pesar de que se han investigado diversos dispositivos para controlar la socavación, la forma más segura de contrarrestar sus efectos es la profundización de la fundación de pilares y estribos mediante un adecuado balance de los aspectos económicos y de aceptación de riesgos.

En lo que respecta a la Operación y Mantenimiento son muy importantes las inspecciones de campo. La observación del río, de las alteraciones fluviomorfológicas (erosión y sedimentación) que puedan haber ocurrido, los niveles alcanzados y la variaciones de las condiciones de aproximación, son fundamentales para evaluar el riesgo de falla del puente y para realizar oportunamente las medidas correctivas.

En el Perú no puede independizarse la inspección y mantenimiento de los puentes del examen del estado del cauce fluvial. No sólo son las invasiones viales, y de otro tipo, las que alteran el cauce, sino también la mala práctica de usar los cauces como botaderos de basura y desmonte. Este problema se presenta en muchos lugares del Perú. La irregularidad de las descargas causa que los cauces estén secos varios meses al año.

Esto ocurrió en 1998 con la inundación de la ciudad de Ica, originada por la colmatación de cauces.

El problema del cauce cotidiano del Rímac fue analizado el año 2011 con motivo del Foro “Problemas en el Manejo de Ríos en Áreas Urbanas”, organizado por el Capítulo de Ingeniería Civil del Consejo Departamental de Lima del Colegio de Ingenieros del Perú, cuyas Conclusiones y Recomendaciones se presentan en Anexo 5-B, Capítulo 5. En ellas hay aspectos muy importantes aplicables a los puentes.

En el Foro se concluyó que “Hay ríos como el Rímac que en realidad son torrentes, de régimen muy irregular, escasos de agua, con mucho transporte de sólidos y gran contaminación, en los que preocupa los estrechamientos

causados por acciones humanas que provocan aumento de la velocidad de la corriente y la peligrosa degradación del cauce. Preocupa también la erosión de la cuenca, la irregularidad de las descargas Resulta claro que el maltrato creciente que viene sufriendo el Rímac no puede continuar.”

Y se recomendó lo siguiente:

“Debe detenerse el maltrato creciente que vienen sufriendo muchos ríos, especialmente el Rímac. Debe impedirse nuevos estrechamientos de los cauces fluviales. Por lo tanto, deben fortalecerse las labores de conocimiento del río, la medición de caudales, la preservación de la cuenca, el afianzamiento de caudales, la recuperación del ancho fluvial y la disminución de la contaminación, para acercarnos así a la restauración fluvial”.

Como ejemplos de lo anteriormente señalado bastaría con lo siguiente: El puente Balta sobre el río Rímac sufrió daños el año 2002 como consecuencia de la basura y desperdicios acumulados en el cauce fluvial, como se aprecia en la Figura N° 10.17.

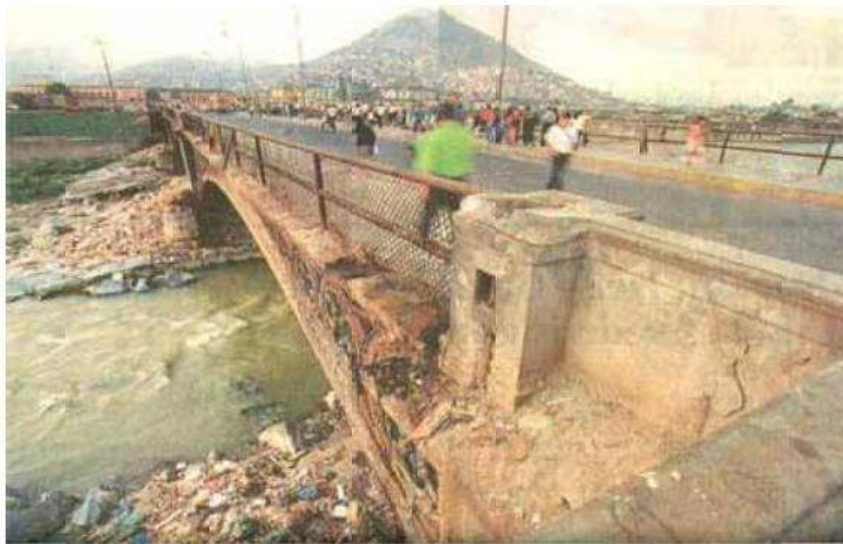


Figura 10.17 Se observa la basura y materiales extraños depositados en el cauce fluvial (Puente Balta, 2002).

El año 2013 el puente de la avenida Universitaria sobre el río Rímac (Bella Unión) sufrió, además del estrechamiento fluvial originado en su encauzamiento, las consecuencias de un estrechamiento adicional de su cauce por el depósito de desmorte, como se aprecia en la Figura N° 10.18. En la Figura N° 10.19 se observa el detalle del desmorte depositado en el cauce del río Rímac (puente Bella Unión) y la socavación producida.



Figura 10.18 Desmonte acumulado en el cauce del río Rímac, bajo el Puente Bella Unión (2013).



Figura 10.19 Detalle del desmonte acumulado en el cauce del río Rímac, bajo el Puente Bella Unión.

El Sistema de Administración de Puentes de Colombia estudió el problema de socavación con los siguientes alcances:

- a) Predicción de las necesidades de mantenimiento y de los fondos requeridos.
- b) Elaboración de listados de puentes por prioridades de rehabilitación.
- c) Identificación de puentes con restricciones o limitaciones de servicio.
- d) Búsqueda de la mejor alternativa de rehabilitación desde el punto de vista técnico y de costo-beneficio.
- e) Cuantificación de los costos de inversión por puente.

- f) Determinación de la capacidad de carga de los puentes y sus restricciones.

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, a través de la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, elaboró la Directiva para la Inspección de Puentes en la que se señala que su objeto es: “Proporcionar pautas para realizar la inspección apropiada de los componentes de los puentes del Sistema Nacional de Carreteras del Perú a través de procedimientos técnicos estandarizados para el cumplimiento y aplicación obligatoria por parte de los entes ejecutores de la red vial correspondiente”.

Para la adecuada conservación de los puentes es necesario realizar inspecciones periódicas y eventuales y darles un adecuado mantenimiento.

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú elaboró el año 2003 un Manual de Diseño de Puentes, cuyos aspectos hidráulicos fueron comentados por el autor.

Referencias

1. AGUIRRE PE Julián. **Hidráulica de Sedimentos**. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
2. AGUIRRE PE Julián y FLOREZ LÓPEZ Isabel. **Socavación alrededor de pilas circulares en flujo torrencial**. VIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR, Quito, Ecuador, 1978.
3. ALABI Patrick Dare. **Time Development of Local Scour at a Bridge Pier Fitted with a Collar**. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canadá, 2006.
4. AYALA R. Luis, y otros. **Socavación en estribos fundados en lechos finos no cohesivos**. IX Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR, Mérida, Venezuela, 1980.
5. BHATT V. P. y SHAH B. P. **Interaction between aggrading river and constricted bridge**. XX I.A.H.R. Congress, Moscú, 1983.
6. BREA José Daniel y otros. **Erosión local en Estribos de Puentes-Estudio Experimental**. Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina.
7. CAMPAÑA TORO Roberto. **Procesos morfológicos en ríos relevantes en el diseño de puentes**. IMEFEN, UNI
8. CHOI G. W. y otros. **Rip Rap Equation for Protecting the Local Scour al Bridge Piers**. University of Incheon, Corea.
9. COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERU. **Conclusiones y Recomendaciones del Foro “Problemas en el Manejo de Ríos en Áreas Urbanas”**, Consejo Departamental de Lima, Capítulo de Ingeniería Civil, publicado en la revista “Ingeniería Civil”, Edición 46, año 09-2011.
10. COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ. **Informe del Fenómeno del Niño 1997-1998**. Consejo Nacional. Lima, junio 1998.
11. COTTA Roberto Diego y JENSEN Pedro Diego. **Dispositivo para anular la erosión en lechos móviles provocada por pilares interpuestos**. II Congreso Latinoamericano de Hidráulica, I.A.H.R. Caracas, Venezuela, 1966.

12. DE SOUZA PINTO Nelson Luis. **Mecanismo de erozao ao redor de pilares de ponte**. Primer Congreso Latinoamericano de Hidráulica, I.A.H.R. Rio Grande do Sul, Brasil, 1964.
13. DHI ESPAÑA. **Estudio del riesgo potencial de erosión en pilas y estribos de puentes de ferrocarriles**. Enero, 2007.
14. FARIAS Héctor Daniel y otros. **Erosión General en Ríos con Lechos Arenosos**. Instituto de Recursos Hidráulicos, Santiago del Estero, Argentina.
15. FARRADAY R. V. y CHARLTON F.G. **Hydraulic Factors in Bridge Design**. Hydraulic Research Station, Wallingford, Londres, 1983.
16. GREAT BRITAIN DEPARTMENT FOR TRANSPORT. **Design Manual for Roads and Bridges**. Volume 1, 1994.
17. GUPTA A. K. **Hydrodynamic Modification of the Horseshoe Vortex at Vertical Pier Junction with Ground**. American Institute of Physics. Abril, 1987.
18. HI-CHONG, Kim y DONG-SOO, Shin. **Study on the Clear Water Scour around Pier in an Open Channel Flow**. Fifth Congress Asian and Pacific Regional Division I.A.H.R. Seúl, Corea, 1986.
19. JENSEN Pedro Diego. **Evolución de la socavación en pilas**. V Congreso Latinoamericano de Hidráulica, I.A.H.R. Lima, Perú, 1972.
20. KELLER R. J. y JAMES B. **Analytical and Experimental Investigation of General Scour at Bridge Sites**. Fifth Congress Asian and Pacific Regional Division I.A.H.R. Seúl, Corea, 1986.
21. KNIGHT D. W. **A Laboratory Study of Local Scour at Bridge Piers**. XVIth Congress I.A.H.R. Sao Paulo, Brasil, 1975.
22. KUROIWA ZEVALLOS Julio. **Consideraciones iniciales para reducir la socavación en puentes**. Revista El Ingeniero Civil N° 115 Marzo-Abril 2000.
23. KUROIWA Julio M., MANSEN Alfredo J. y RODRÍGUEZ Edgar. **Uso de rampa de rocas para protección de puentes-Caso Puente Dueñas**. Lima, Perú. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Iquitos 2003.
24. LLERAS M. Germán. **Erosión local en pilas de puentes**. VII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, I.A.H.R. Santiago de Chile, Octubre 1976.
25. MAGGIOLO O. O. y BORGHI J. **Sobre la evolución en el tiempo del proceso de socavación**. Primer Congreso Latinoamericano de Hidráulica, I.A.H.R. Rio Grande do Sul, Brasil, 1964.
26. MARTÍN-VIDE Juan P. **Ingeniería de Ríos**. Universidad Politécnica de Cataluña Barcelona, 2007.
27. MARTÍN-VIDE Juan P. **Ingeniería Fluvial**. Universidad Politécnica de Cataluña Barcelona, setiembre 2000.
28. MARTÍN-VIDE Juan P. y DOLZ RIPOLLÉS José. **Modelo reducido del Puente Nuevo de Mora de Ebro**. Universitat Politécnica de Catalunya. Revista de Obras Públicas N° 3.328. Año 141. Enero 1994.
29. MARTÍNEZ MARÍN, Eduardo y FERNÁNDEZ PRETINI, Sandra. **Erosión Local en Estribos de Puentes. Situación Actual y Metodologías de Cálculo**. Revista de Obras Públicas, N° 3396, Madrid marzo 2000.
30. MAZA ÁLVAREZ José Antonio y SÁNCHEZ BRIBIESCA José Luis. **Socavación y protección al pie de pilas de puente**. II Congreso Latinoamericano de Hidráulica, I.A.H.R. Caracas, Venezuela, 1966.

31. MAZA ÁLVAREZ José Antonio y SÁNCHEZ BRIBIESCA José Luis. **Contribución al estudio de la erosión local en pilas de puentes**. Primer Congreso Latinoamericano de Hidráulica, I.A.H.R. Rio Grande do Sul, Brasil, 1964.
32. MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES. **Guía para Inspección de Puentes**. Directiva N° 01-2006-MTC/14, Resolución Directoral N° 012-2006/14, MTC/14, 14 de marzo 2006, Lima Perú.
33. MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES. **Manual de Diseño de Puentes**. Lima, Julio, 2003, Lima Perú.
34. MIRELES CALDERON Mario L. **Erosión en pilares de Puentes: Análisis comparativo en base a mediciones de Campo**. En **Hidráulica PT-45**. Segunda Edición. Instituto de la Construcción y Gerencia. Mayo 2011.
35. MISSOURI WATER SCIENCE CENTER. **Evaluation of potential bridge scour in Missouri**.
36. MONCADA Alix, AGUIRRE PE Julián y otros. **Experimental study about scour protection at circular piers**. CHIDRA, Universidad de Los Andes, 2007.
37. NAKAGAWA Hiroji y SUZUKI Koichi. **An application of stochastic model of sediment motion to local scour around a bridge pier**. XVIth Congress I.A.H.R. Sao Paulo, Brasil, 1975.
38. NALLURI Chandra SALDARRIAGA Juan G y PLATA, Francisco. **Revisión de Ecuaciones que predicen la Socavación Local alrededor de Pilas de Puente**. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Colombia.
39. NATIONAL RESEARCH COUNCIL CANADA. **Coasts, Rivers, Ports & Offshore**. Confederation Bridge. 2002.
40. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Design of Highway Bridges for Extreme Events**. NCHRP Report 489. Transportation Research Board, Washington D. C. 2003.
41. PLATA Francisco, NALLURI, Chandra y SALDARRIAGA Juan G. **Medidas de Protección contra la Erosión Local en Pilas de Puentes**. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Colombia.
42. QADAR A. y otros. **Pier Froude Number, a Criterion for Local Scour**. Fifth Congress Asian and Pacific Regional Division I.A.H.R. Seúl, Corea, 1986.
43. RICHARDSON E. V. y otros. **Highways in the River Environment. Hydraulic and Environmental Design Considerations**. Federal Highways Administration, USA.
44. RICHARDSON E. V. y DAVIS S. R. **Evaluating Scour at Bridges**. Federal Highway Administration. Hydraulic Engineering Circular N° 18 (HEC-18), Washington, USA, 1995.
45. ROCHA FELICES Arturo. **Erosión en Pilares y Estribos de Puentes**. IV Congreso Internacional de la Construcción- ICG. Lima diciembre 2008.
46. ROCHA FELICES Arturo. **Comentarios sobre aspectos hidráulicos del Manual de Diseño de Puentes**. IV Congreso Internacional Ingeniería Estructural, Sísmica y Puentes-ICG. Lima, junio 2010.
47. ROCHA FELICES Arturo. **La morfología fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales**. VIII Congreso Internacional Obras de Infraestructura Vial. ICG. Lima. Diciembre 2009.

48. ROCHA FELICES Arturo. **Revisión de los estudios del encauzamiento y de los puentes ferroviarios en la quebrada Alcamayo-Cuzco**. Instituto de Recursos Naturales (INRENA) Diciembre 2004.
49. ROCHA FELICES Arturo. **Interacción del comportamiento fluvial y las obras viales durante el Fenómeno de El Niño**. II Congreso Nacional de Obras de Infraestructura Vial. ICG. Lima, agosto 2003.
50. ROCHA FELICES Arturo. **Consideraciones de Diseño de Estructuras Hidráulicas Sujetas al Fenómeno de El Niño**. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Iquitos 2003.
51. ROCHA FELICES Arturo. **Introducción a la Hidráulica Fluvial**. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1998.
52. SANTORO Vincenza, JULIEN Pierre y otros. **Velocity Profiles and Scour Depth Measurements around Bridge Piers**. Colorado State University.
53. SCACCHI Graciela, SCHREIDER Mario y FUENTES AGUILAR Ramón. **Erosión en estribos de puentes aliviadores y su interacción con la distribución de caudales**. Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos.
54. SEUNG HO Hong. **Interaction of Bridge Contraction Scour and Pier Scour in a Laboratory River Model**. Georgia Institute of Technology, U.S.A. Diciembre, 2005.
55. SHEPPARD Max. **A Methodology for obtaining Design Pier Scour Depths**. FHWA Western Hydraulic Engineers Conference, April 2003.
56. SMITH, D.W. **Bridge Failures**. Proceedings Institution of Civil Engineers. 1, 1976.
57. THAMER AHMED MOHAMED y otros. **Validation of Some Bridge Pier Scour Formulae Using Field and Laboratory Data**. Universiti Puti Malaysia. American Journal of Environmental Sciences 1 (2): 119-125, 2005.
58. THE SCOTTISH OFFICE DEVELOPMENT DEPARTMENT y otros. **The Design of Highways Bridges for Hydraulic Action**. Mayo, 1994.
59. THIELER, H. **Contribution to an Estimation of the Scour Depth Near Bridge Piers for an Attack Non-Parallel to the Axis**. XX I.A.H.R. Congress, Moscú, 1983.
60. TSAN-WEN WANG y WAHYUDI TRIWEKO R. **Maximun Depth of Scour around Bridge Piers**. Fifth Congress Asian and Pacific Regional Division I.A.H.R. Seúl, Corea, 1986.
61. YANMAZ A. Melih y ÜSTIÜM İsmail. **Generalized Reliability Model for Local Scour around Bridge Piers of Various Shapes**. Middle East Technical University Ankara Turquía, Marzo 2001.
62. WARDHANA Kumalasari y HADIPRIONO Fabian C. **Analysis of Recent Bridge Failures in the United States**. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, Agosto 2003.
63. ZEGARRA CIQUERO Luis. **¿Por qué se caen los puentes?** Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima 2013.

CAPÍTULO 11

CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

11.1 Sedimentos

Los sedimentos, también llamados sólidos, se originan en la erosión de la cuenca. La erosión de cuencas es un proceso natural que se debe a la acción de agentes externos como el agua, viento y heladas. La cantidad de sólidos resultante de la erosión se expresa en unidades de peso o volumen por unidad de área y de tiempo ($t/km^2/año$, $m^3/ha/mes$, etc.). Como los ríos son los elementos de drenaje de la cuenca, el agua que llevan arrastra los sedimentos provenientes de la erosión de la cuenca.

Las cuencas ubicadas en zonas áridas y semiáridas, sujetas además a la aparición eventual de grandes lluvias y avenidas, que podrían corresponder o no al Fenómeno El Niño, suelen tener graves problemas originados por la fuerte erosión que sufren, cuya consecuencia es una gran producción de sedimentos que resultan sumamente perjudiciales para numerosas estructuras hidráulicas que forman parte de diversos proyectos como los viales, irrigaciones, centrales hidroeléctricas y de abastecimiento de agua poblacional. Además, en esas circunstancias se incrementa notablemente el transporte de cuerpos extraños, lo que aumenta las dificultades.

Sedimento es una palabra que tiene diferentes significados en diferentes ciencias. En Hidráulica Fluvial se entiende por sedimento (sólido) cualquier material granular más pesado que el agua que es transportado en algún momento por la corriente y luego depositado.

En general, los sedimentos fluviales están constituidos por materiales no cohesivos (granulares), que pueden ser limos, arenas, gravas y, a veces, piedras. A los sedimentos así entendidos también se les denomina sólidos. En consecuencia, en Hidráulica Fluvial la palabra sedimento se aplica tanto a una enorme roca como a una partícula muy fina. Referencialmente, se puede señalar que las arenas de los ríos son cuarzosas y que su peso específico es alrededor de 2650 kg/m^3 (Kilogramos fuerza). Por lo tanto, su peso específico sumergido es 1650 kg/m^3 y su peso específico relativo es 2,65.

Los sedimentos pueden ser naturales, como los descritos en el párrafo anterior, y artificiales. En los estudios en modelos hidráulicos en los que se trata de reproducir el transporte de los sólidos se usa, algunas veces, partículas artificiales que tienen un peso específico menor que el de los sedimentos naturales. Se usa, por ejemplo, baquelita, que pesa alrededor de 1300 kg/m^3 .

Pero, siempre son partículas más pesadas que el agua y cumplen la definición dada para sedimentos.

11.2 Propiedades físicas de los sólidos

Las partículas sólidas se pueden clasificar en cohesivas y no cohesivas. Las primeras son las que están adheridas unas a otras, lo cual representa para el transporte una fuerza adicional que se conoce como fuerza de cohesión. Los materiales cohesivos pueden encontrarse entre las arcillas y los limos. En cambio, los materiales no cohesivos (granulares) carecen de esta fuerza adicional, y para no ser arrastrados sólo ofrecen la resistencia proveniente de su propio peso y de su forma.

En el presente texto consideramos sólo el comportamiento de las partículas no cohesivas. Las propiedades físicas de las partículas sólidas que más nos interesan son: tamaño y forma, composición mineralógica, peso específico y velocidad de caída. Estas propiedades se refieren a las partículas individuales y no al conjunto de ellas, como sería el caso de la porosidad o el peso específico aparente.

11.2.1 Tamaño

La propiedad más característica de los sólidos es su tamaño. Existen diferentes clasificaciones para identificar a una partícula de tamaño determinado. En el Cuadro 11.1 se presenta una perteneciente a la American Geophysical Union (A.G.U.), confeccionada en base al diámetro de las partículas.

El tamaño de los cantos rodados y guijarros se puede medir directamente. El de las gravas y arenas se mide mediante mallas, y el de limos y arcillas se determina por medio de sedimentación o con microscopio. Para la determinación de la curva de distribución granulométrica de muestras muy pequeñas de arena se usa el tubo de acumulación visual. La equivalencia de mallas y aberturas es la que aparece en el Cuadro 11.2

Cuadro N° 11.1
CLASIFICACIÓN DE PARTÍCULAS DE ACUERDO A LA AMERICAN
GEOPHYSICAL UNION (A.G.U.)

1) Cantos rodados (250-4000 mm)	muy grandes grandes medianos pequeños	4000-2000 mm 2000-1000 mm 1000-500 mm 500-250 mm
2) Guijarros (64-250 mm)	grandes pequeños	250-125 mm 125-64 mm
3) Gravas (2-64 mm)	muy gruesa gruesa media fina muy fina	64-32 mm 32-16 mm 16-8 mm 8-4 mm 4-2 mm
4) Arenas (0,062-2 mm)	muy gruesa gruesa media fina muy fina	2-1 mm 1-0,5 mm 0,5-0,25 mm 0,25-0,125 mm 0,125-0,062 mm
5) Limos (4 a 62 μ) = (0,004 a 0,062 mm)		
6) Arcillas (0,24 a 4 μ) = (0,00024 a 0,004 mm)		

1 μ = 10^{-3} mm

Cuadro N° 11.2
EQUIVALENCIA DE MALLAS Y ABERTURAS

Malla	Abertura (mm)
0,742"	18,850
0,525"	13,330
0,371"	9,423
# 4	4,760
# 5	4,000
# 8	2,380
# 10	2,000
# 18	1,000
# 20	0,840
# 30	0,590
# 35	0,500
# 40	0,420
# 50	0,297
# 60	0,250
# 100	0,149
# 200	0,074

11.3 Número de Froude

El efecto de la mayor o menor influencia de las fuerzas gravitacionales sobre las condiciones del escurrimiento se expresa por el parámetro adimensional denominado Número de Froude. El Número de Froude (F) tiene por expresión:

$$\overline{F}$$

Siendo:

- V : Velocidad media de la corriente.
- g : Aceleración de la gravedad.
- L : Longitud característica.

El Número de Froude se utiliza en canales y generalmente se considera como longitud característica el tirante hidráulico d. Por tanto:

$$\overline{F}$$

Siempre que el escurrimiento se produzca con superficie libre, es decir que alguna zona de la corriente no esté delimitada por el contorno, habrá influencia de la gravedad sobre todo el escurrimiento.

El Número de Froude representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales. Los valores altos del Número de Froude corresponden a una pequeña influencia de la gravedad.

11.4 Transporte de sedimentos fluviales

Se denomina así al proceso de erosión, iniciación del movimiento, transporte, depósito y compactación de las partículas sólidas. La teoría se refiere a las partículas no cohesivas.

Yalin señala que si un material granular está bien graduado puede ser considerado como homogéneo e isotrópico. En realidad, esta es la hipótesis que generalmente se hace, como consecuencia de la cual las "propiedades estadísticas del material son independientes de la posición y la dirección".

Para la mejor comprensión general de la teoría del Transporte de Sedimentos es conveniente tener siempre presente los párrafos siguientes, cuyo autor es Hans A. Einstein, quien fue estudioso de los problemas de transporte de sedimentos y autor de una conocida fórmula para el cálculo del gasto sólido de fondo.

“Toda partícula sólida que pasa a través de una sección de un río debe satisfacer las dos condiciones siguientes:

- a) Debe provenir de la erosión de un punto de la cuenca situado aguas arriba de la sección considerada,
- b) Debe haber sido transportada por la corriente desde el punto de erosión hasta la sección considerada.

Cada una de estas dos condiciones limita la cantidad de sedimentos a través de la sección considerada en función de la disponibilidad de sólidos en la cuenca y la capacidad de transporte de la corriente”.

11.5 Modos de transporte

Las partículas sólidas transportadas por un río lo hacen con las siguientes modalidades: transporte sólido de fondo, transporte sólido en suspensión y transporte por “saltación”.

11.5.1 Transporte sólido de fondo (Arrastre)

El material de arrastre está constituido por las partículas de mayor tamaño, que van permanentemente en contacto con el fondo del río y que ruedan o se deslizan. La velocidad de una partícula sólida transportada como material de fondo es en general inferior a la correspondiente velocidad de la corriente. Generalmente se asocia al ruido de la corriente.

11.5.2 Transporte sólido en suspensión

El transporte sólido en suspensión está constituido por las partículas más finas, las que prácticamente se hallan distribuidas en toda la sección transversal. La velocidad con la que avanza una partícula sólida en suspensión es prácticamente igual a la de la corriente en ese punto. Generalmente se asocia al color del agua.

No es fácil establecer y definir un límite claro y nítido entre los dos modos de transporte antes señalados. Cualquier alteración que ocurra en la velocidad de la corriente puede determinar de inmediato un cambio en la modalidad de transporte. Un estrechamiento fluvial produce un aumento de la velocidad media de la corriente, lo que puede traer como consecuencia que las partículas de fondo entren en suspensión. Las leyes que rigen y describen cada uno de estos modos fundamentales de transporte son en principio diferentes.

11.5.3 Transporte por “Saltación”

Algunas partículas se transportan de un modo peculiar: a saltos. A esta modalidad se le denomina transporte por “saltación”. En la Figura 11.1 se aprecia esquemáticamente los modos de transporte.

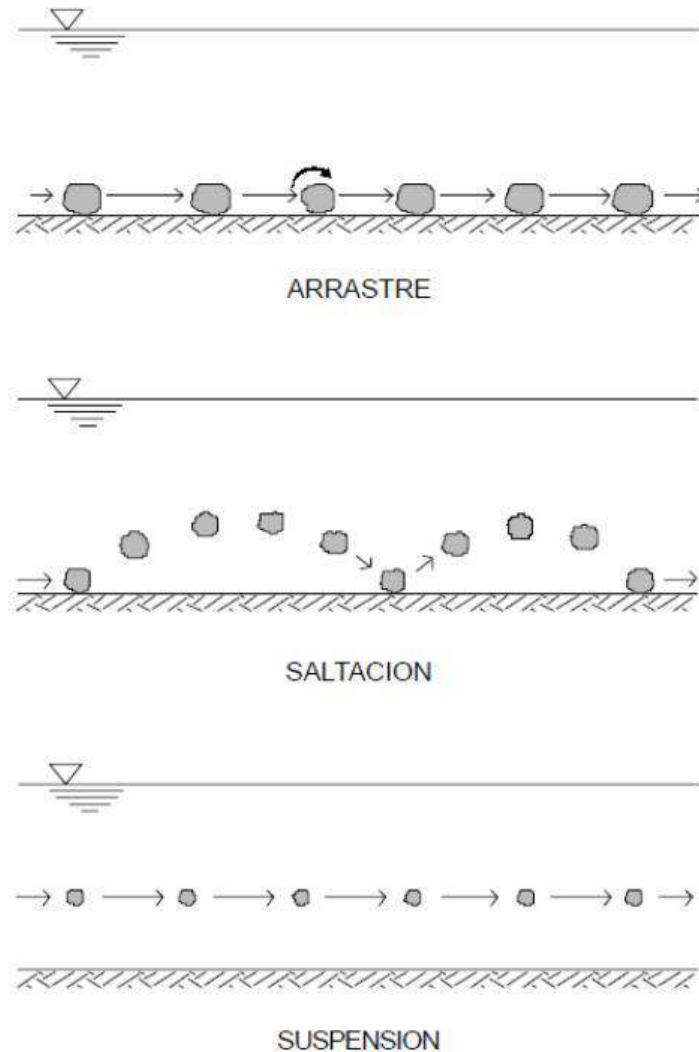


Figura N° 11.1 Modos de transporte.

11.6 Flujo a dos fases (bifásico)

En un río se llama flujo a dos fases al movimiento simultáneo del agua y de los sólidos arrastrados por la corriente. El agua constituye la fase líquida y los sedimentos, la fase sólida. Son dos movimientos interdependientes que no deben ser tratados separadamente. Las dos fases tienen que ser estudiadas conjuntamente. El estudio de una no puede ignorar la otra. Usualmente recibe varios nombres: movimiento bifásico, fenómeno de dos fases o fenómeno del transporte sólido.

Para efectos del estudio del Transporte de Sedimentos en un curso de agua a pelo libre (un río) se considera que el flujo es permanente y uniforme y que puede ser descrito como un flujo bidimensional.

11.7 Gasto sólido

Se denomina gasto sólido, de fondo (T_F) o de suspensión (T_S), a la cantidad de partículas, en unidades de peso o de volumen, que pasa por una sección determinada del río en la unidad de tiempo. Las unidades que se usan frecuentemente para el gasto sólido son: N/s, kg/día, t/mes, m^3 /año, etc. El gasto sólido puede expresarse también por unidad de ancho, del río o canal, y entonces se llama gasto sólido específico (t_F).

La determinación del gasto sólido fluvial está fuertemente relacionada, en primer lugar, con las características de la cuenca. Específicamente, con su erosionabilidad, y por lo tanto, con la producción de sedimentos. De acá que la cuantificación del gasto sólido debe empezar por el conocimiento de la cuenca.

Como se sabe, la erosión de las cuencas es un fenómeno de intensidad variable, en el tiempo y en el espacio. Ésta es una de las causas por las que el gasto sólido es tan variable en el tiempo. El conocimiento de esta variabilidad, y de su origen, es fundamental para la evaluación del gasto sólido fluvial.

Evidentemente que si no existe erosión de la cuenca, tampoco existirá transporte sólido en el río. Esto ocurre frecuentemente en los ríos, en algunas épocas del año. Por el contrario, si como consecuencia de los factores ya conocidos, la erosión de la cuenca es grande, también lo será el gasto sólido. Esta es la situación que se presenta en los meses lluviosos.

La determinación del gasto sólido está también relacionada con las características del río. Como consecuencia de estas características (pendiente, velocidad, tirantes, rugosidad, etc.), de la granulometría y de otras propiedades del material sólido, éste se transportará como de fondo o de suspensión.

No existe una proporción definida entre la cantidad de material sólido transportado por el fondo y aquella transportada en suspensión. La distinción entre material de fondo y de suspensión sólo puede hacerse en función de la velocidad de la corriente en un momento dado. Por lo general, el gasto sólido en suspensión es mayor que el gasto sólido de fondo.

Los resultados de investigaciones y mediciones indican que en algunos casos de torrentes la proporción entre ambos modos de transporte puede acercarse a uno. En la interpretación de estos resultados debemos tener en cuenta que, precisamente, los torrentes se caracterizan por transportar en corto tiempo gran cantidad de sólidos que generalmente no pueden ser medidos. De acá que

probablemente la estimación de la masa anual transportada en suspensión por los torrentes sea menor que la verdadera. Por el contrario, en los grandes ríos de pequeña pendiente, la masa transportada en suspensión es varias veces mayor que la transportada por el fondo.

La distinción entre ambas modalidades de transporte es importante. Desde el punto de vista metodológico corresponde a una condición natural, que puede verse modificada por la construcción de una obra, tal como un encauzamiento o una presa.

El transporte sólido en suspensión se caracteriza mediante la concentración. Se llama concentración media c a la cantidad de partículas sólidas, expresadas como peso seco, por unidad de volumen de la mezcla agua-sedimento. El producto de la concentración media por el caudal es igual al gasto sólido en suspensión:

$$T_s = c Q$$

Teóricamente la concentración puntual es mínima en la superficie y máxima cerca del fondo. La curva de distribución vertical de concentraciones es logarítmica, como se ve en la Figura 11.2. También lo es la de velocidades, pero el valor máximo está en la superficie. La distribución del corte es lineal y el máximo está en el fondo.

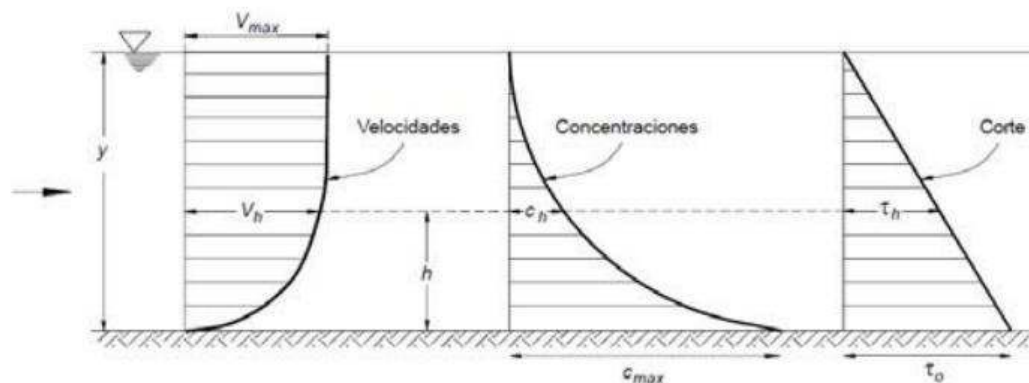


Figura N° 11.2 Distribución vertical típica de velocidades, concentraciones y fuerza de corte.

En la práctica es usual que en los ríos en los que la corriente tiene alta velocidad (en los que la turbulencia se encuentra plenamente desarrollada), la concentración sea prácticamente la misma en toda la sección transversal, siempre que las partículas sean muy pequeñas.

El conocimiento de las características del transporte sólido en suspensión (cantidad, granulometría) es importante para la consideración de un sistema de defensas con espigones, como se ve en el Capítulo 9.

El gasto sólido de fondo, en cambio, se determina con base en cálculos y algunas mediciones. La suma de ambos constituye el gasto sólido total (T_T).

En los ríos como el Chira se ha estimado que los sólidos en suspensión constituyen alrededor del 95% del total anual de sólidos. Esta proporción es comprensible, pues durante las avenidas, que es cuando se transporta la mayor cantidad de sólidos, las altas velocidades determinan la puesta en suspensión de los sólidos, trasladándose solamente por el fondo el material muy grueso, que pudiera haber.

Debemos tener presente que la determinación de los gastos sólidos es un problema muy difícil, principalmente por las siguientes circunstancias:

- a) Gran variabilidad de los fenómenos, tanto en el espacio como en el tiempo.
- b) Elevado y no bien determinado número de variables que intervienen.
- c) Dificultad de comprobar en la Naturaleza los resultados obtenidos.

Cada una de las dos modalidades principales de transporte sólido tiene determinadas implicancias en el comportamiento de las estructuras en contacto con el río.

11.8 Fuerza tractiva

La distribución vertical del esfuerzo de corte en un canal muy ancho con movimiento uniforme y flujo bidimensional se describe mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_h = \gamma (y - h)S$$

y es el tirante, S es la pendiente, h es la distancia del fondo a la que se está calculando el esfuerzo de corte τ_h , el que obviamente es variable con la distancia del fondo. El esfuerzo de corte sobre el fondo corresponde a la condición $h=0$ y constituye su valor máximo. Se designa como τ_o .

$$\tau_o = \gamma y S$$

En la superficie, para $h=y$, el corte es cero. Dentro de los dos extremos mencionados la variación es lineal (Figura N° 11.2). En una sección transversal de forma cualquiera el esfuerzo de corte medio sobre el fondo es:

$$\bar{\tau}_o = \gamma R S$$

Si tenemos en cuenta que RS es igual a V^2/C^2 (lo que resulta evidente a partir de la ecuación de Chezy), se concluye que el esfuerzo de corte sobre el fondo es proporcional al cuadrado de la velocidad media:

—

que puede expresarse así:

$$\tau_0 \propto V^2$$

τ_0 representa la fuerza actuante, es decir la fuerza unitaria que ejerce el flujo sobre el fondo; es la fuerza tractiva o tractriz. Su acción explica la existencia de un lecho móvil. Se le llama también tensión cortante o cizallante.

A la relación entre el esfuerzo de corte sobre el fondo y la densidad del fluido, elevada a la potencia un medio, que es dimensionalmente una velocidad, se le designa convencionalmente como velocidad de corte V_* .

—

Naturalmente que también existe una distribución transversal del esfuerzo de corte en la sección de un río o de un canal.

11.9 Fuerza tractiva crítica

El movimiento de las partículas constituyentes del lecho empieza cuando la fuerza tractiva es mayor que la fuerza tractiva crítica $(\tau_0)_c$. Se denomina fuerza tractiva crítica a la fuerza mínima necesaria para poner en movimiento las partículas constituyentes del lecho. Por lo tanto, para que haya movimiento de fondo se requiere que:

$$\tau_0 > (\tau_0)_c$$

Caso contrario, cuando $\tau_0 < (\tau_0)_c$ el lecho no presenta movimiento y se comporta como si fuese un lecho rígido.

La condición $\tau_0 = (\tau_0)_c$ corresponde a la iniciación del movimiento de las partículas del fondo, definida en términos de la fuerza tractiva.

Un valor que se denomina $(\tau_0)'_c$, corresponde al valor de τ_0 para el que las partículas se pongan en suspensión y viajen distribuidas en la sección transversal. Por lo tanto, para que haya transporte sólido de fondo se requiere que:

$$(\tau_0)_c < \tau_0 < (\tau_0)'_c$$

11.10 El concepto de iniciación del movimiento

Para el estudio de la teoría del Transporte de Sedimentos y para la solución de numerosos problemas de ingeniería fluvial es necesario conocer las condiciones de iniciación del movimiento de las partículas constituyentes del lecho.

El conocimiento de las condiciones de iniciación del movimiento permite calcular el gasto sólido de fondo (el arrastre), así como dimensionar canales estables, diseñar sistemas de protección contra la erosión y resolver numerosos problemas de Hidráulica Fluvial.

Hay dos formas de aproximarse al estudio de la iniciación del movimiento. Una de ellas, ya mencionada, se refiere a la acción del esfuerzo de corte, o fuerza tractiva. El movimiento de las partículas del fondo empieza cuando la fuerza actuante τ_0 (es decir, la fuerza tractiva) sobre el fondo es igual a la fuerza tractiva crítica τ_c o con mayor precisión $(\tau_0)_c$, que es propia de cada material constituyente del fondo.

La otra forma es la determinación de la velocidad crítica V_c . Se denomina velocidad crítica de arrastre a la velocidad media de la corriente a la cual empieza el movimiento (el arrastre) de las partículas constituyentes del lecho. El gasto correspondiente a la iniciación del movimiento se denomina gasto crítico de iniciación del movimiento, o gasto crítico de arrastre, y se designa como Q_0 . Es igual al producto del área de la sección transversal por la velocidad crítica V_c .

La iniciación del movimiento no sólo es difícil de determinarse, sino también de definirse. En un lecho natural hay partículas de la más diversa granulometría. En principio, cada partícula tiene su propia velocidad crítica. En un lecho constituido por un material de granulometría uniforme todas las partículas no son exactamente iguales, ni sufren de la misma forma la acción de la turbulencia. En consecuencia, la iniciación del movimiento es un fenómeno esencialmente probabilístico.

11.11 Capacidad de Transporte

Se denomina Capacidad de Transporte a la máxima cantidad de material sólido de fondo, de una cierta granulometría, que una corriente puede transportar con un gasto dado. La Capacidad de Transporte constituye un máximo, que un río no siempre alcanza. Toda corriente posee una Capacidad de Transporte sólido de fondo determinada. Lo que, en otras palabras, significa que un río no tiene una capacidad ilimitada para arrastrar sólidos.

El gasto sólido que lleva un río en un momento determinado puede ser menor que su Capacidad de Transporte. Así, un río que escurre sobre un fondo

constituido por piedras de gran tamaño puede tener como consecuencia de su velocidad una gran Capacidad de Transporte, pero en realidad pudiera no haber transporte sólido (a causa del gran tamaño de las piedras que constituyen el lecho). En un caso como este se dice que el río se encuentra en estado de erosión latente. Este caso es frecuente en ciertos torrentes. Cuando un río transporta su máxima capacidad de sólidos se dice que se halla en estado aluvional o de saturación.

11.12 Función Transporte

Anteriormente hemos expuesto que existe una vinculación entre el gasto líquido y el gasto sólido. A esta vinculación suele llamársele ley gasto líquido-gasto sólido. Se le llama también Función Transporte. En la Figura 11.3 se representa esquemáticamente la Función Transporte.

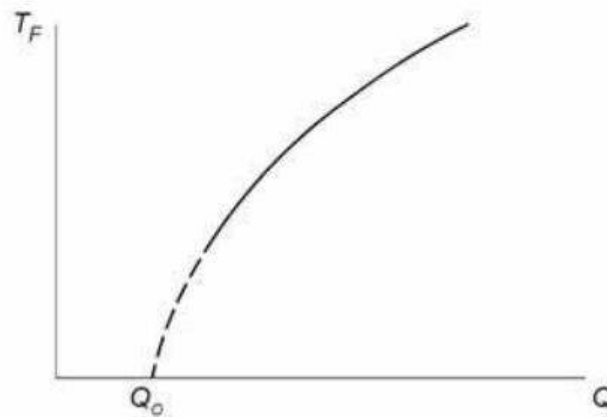


Figura N° 11.3 Función Transporte.

Se observa con toda claridad que para $Q < Q_0$ no hay transporte de fondo. Lo que buscan las diferentes fórmulas que existen para el cálculo del gasto sólido de fondo es la determinación de la Función Transporte. Acá es conveniente insistir en que la Función Transporte no indica la cantidad de sólidos que transporta una corriente líquida, sino la máxima cantidad que podría transportar; es decir, las fórmulas nos dan la capacidad de transporte.

A veces interesa conocer la duración de caudales de fondo. Entonces debe combinarse la curva de duración de caudales con la Función Transporte.

11.13 Fases del Transporte Sólido

Para un flujo de velocidad gradualmente creciente se tiene que la configuración del fondo es variable y pasa por varios estados que son función de la velocidad media de la corriente. Dichos estados son los que se ven en la Figura 11.4.

Fondo Plano. Es una etapa inicial que corresponde a una velocidad pequeña. Se observa movimientos aislados e intermitentes de las partículas más finas constituyentes del fondo; las más pequeñas entran eventualmente en suspensión.

Rizos. Al incrementarse la velocidad aparecen en el fondo ondulaciones de pequeña amplitud. Hay un aumento de resistencia. (Aumento del coeficiente de Manning y disminución del de Chezy). El Número de Froude es menor que 1.

Dunas. La fase siguiente representa un cambio en la forma de los rizos. Adquieren hacia aguas arriba una pendiente suave en la que se produce erosión y hacia aguas abajo una pendiente fuerte que es igual a la tangente del ángulo de reposo. Hay un aumento de la resistencia. Eventualmente las dunas pueden alargarse hasta concentrarse en barras. El Número de Froude es menor que 1. En ciertos ríos pueden haber dunas muy grandes (digamos, de más de un metro de altura) cuya consideración es indispensable para estudiar la erosión en pilares, como se ve en el Capítulo 10. En algunos casos, la no consideración de la altura de las dunas ha llevado a resultados equivocados con respecto a la medición de la profundidad de la corriente.

Antidunas. Representan una inversión de las dunas. Suelen ser más simétricas. El Número de Froude es mayor que 1.

Fondo Plano. Aparece nuevamente para altas velocidades.

Los rizos y las dunas se distinguen entre sí por su tamaño. Se mueven en la dirección de la corriente, pero con una velocidad menor que la del flujo. No producen perturbaciones en la superficie libre. En cambio, las antidunas pueden moverse en cualquier dirección o ser estacionarias. Producen perturbación en la superficie libre del escurrimiento. Aunque no se muestra en la figura ocurre que entre las fases de dunas y antidunas puede presentarse nuevamente un fondo plano.

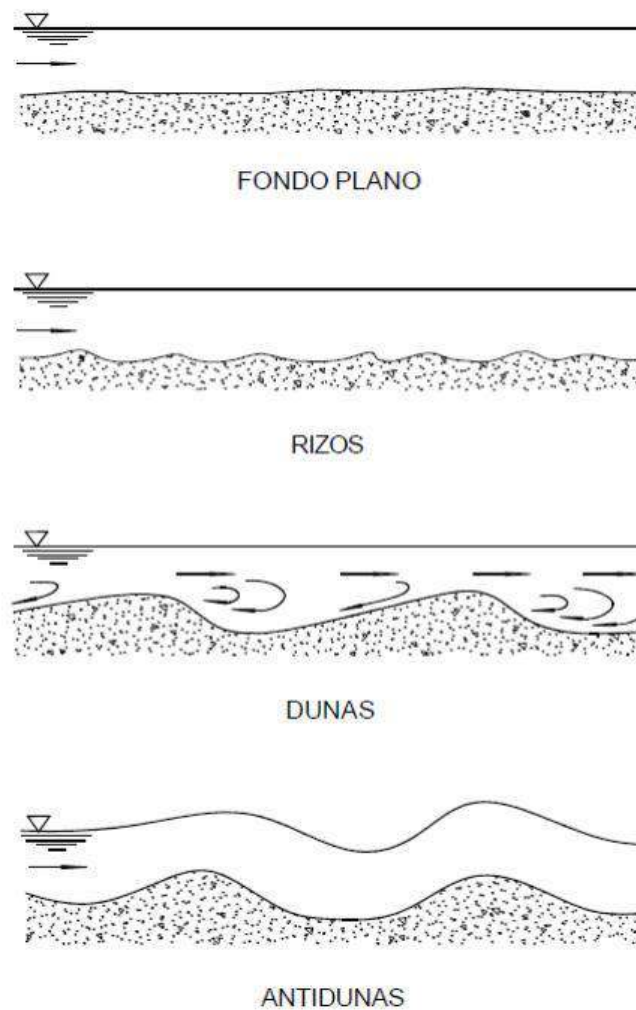


Figura N° 11.4 Fases del Transporte.

11.14 Acorazamiento del lecho fluvial

El acorazamiento es un fenómeno natural que bajo determinadas circunstancias se presenta en un lecho móvil. Imaginemos el fondo de un río constituido por partículas de diversa granulometría. En principio, como sabemos, cada partícula empieza a moverse cuando la fuerza tractiva de la corriente iguala y luego excede la fuerza tractiva crítica de iniciación del movimiento, que es propia de cada partícula.

Como consecuencia de lo anterior resulta que para el flujo creciente, sobre un lecho móvil, en el que no haya aporte de sólidos de aguas arriba (como pudiera ser en un tramo fluvial ubicado aguas abajo de un embalse o en un canal de laboratorio) se pondrán en movimiento sucesivamente las partículas empezando por las más finas, luego las medianas y así hasta llegar al máximo tamaño de partículas que puede ser movida por el caudal existente. Al llegar a

este momento se tendrá que la capa superficial del lecho fluvial sólo estará constituida por las partículas más gruesas, pues las más finas fueron arrastradas por la corriente: decimos entonces que el lecho está acorazado, tal como se ve en la Figura 11.5.

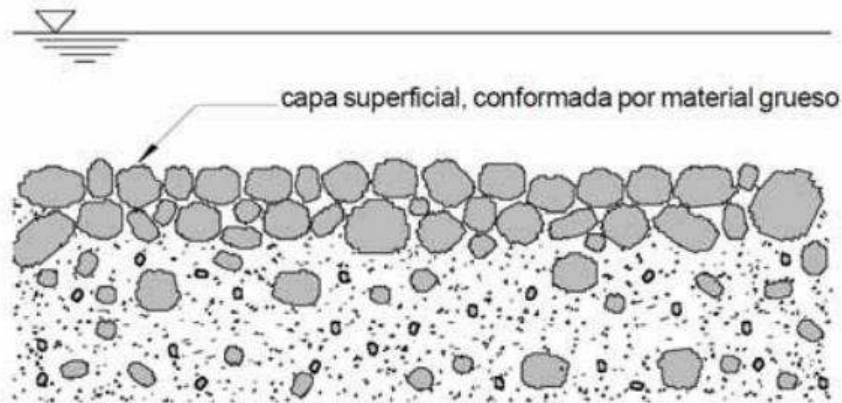


Figura N° 11.5 Acorazamiento del lecho fluvial.

Naturalmente que debajo de la capa superficial de acorazamiento estará el lecho fluvial con la granulometría correspondiente a las condiciones originales. Si se presentase posteriormente un caudal mayor, entonces, al fluir éste sobre el lecho acorazado llegará un momento en el que empiece a transportar las partículas más gruesas constituyentes de la coraza, hasta llegar a la ruptura de ésta. Aparece entonces nuevamente el lecho con su granulometría original y con las correspondientes condiciones de transporte.

Desde el punto de vista práctico el acorazamiento significa que una fracción (la más gruesa) de los sólidos de fondo actúa como elemento protector contra la erosión. El desconocimiento del fenómeno del acorazamiento puede llevar a una interpretación equivocada de los fenómenos observados. De acá que debemos tener presente la posibilidad de acorazamiento.

Referencias

1. ROCHA FELICES Arturo. **Hidráulica de Tuberías y Canales**. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, 2007.
2. ROCHA FELICES Arturo. **Introducción a la Hidráulica Fluvial**. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, noviembre 1998.