



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación del estado del arte de los paneles sumergidos para el control fluvial

José Ángel Moreno Calderón

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C., Colombia
2019

Evaluación del estado del arte de los paneles sumergidos para el control fluvial

José Ángel Moreno Calderón

Trabajo Final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director:

I.C. Mg. Carlos Eduardo Cubillos Peña

Línea de investigación:

Hidráulica Fluvial

Grupo de investigación:

GIREH

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C., Colombia

2019

A María del Mar

Agradecimientos

Agradezco a Dios por esta oportunidad de avanzar en mi camino académico y profesional; al profesor Carlos Eduardo Cubillos Peña, por sus consejos y conocimientos brindados durante la maestría; a mis compañeros de clase Pedro, Jaime, Sergio por su colaboración a lo largo de todas las materias cursadas; a mi esposa, María del Mar por su apoyo y motivación inquebrantable durante estos años; a mi familia por su entusiasmo constante; a la empresa Servinc, por permitirme los espacios para asistir a clases; a todos muchas gracias.

Resumen

El conocimiento en hidráulica fluvial e ingeniería de ríos ha logrado identificar variables a nivel hidrosedimentológico, geomorfológico y geológico, importantes tanto en la comprensión natural del cauce y su valle, como en el diseño y construcción de obras de ingeniería. Las estructuras evaluadas en el presente trabajo final a la luz de dicho conocimiento, son los paneles sumergidos, los cuales son estructuras orientadoras del flujo, diseñadas para modificar el patrón de flujo cercano al lecho y redistribuir el flujo y el transporte de sedimentos dentro de la sección transversal del canal. Sus principales usos son la estabilización de las bancas y el lecho del río, la estabilización de alineamientos de canales fluviales y el control de los sedimentos en las tomas de agua o desviaciones.

La evaluación realizada fue de tipo teórico, es decir, no se realizó trabajo directo en campo o laboratorio; se cubrieron aspectos teóricos, pruebas de laboratorio, ejercicios computacionales y casos reales de aplicación para los paneles sumergidos. Producto de esta evaluación, se encontró que en general los paneles sumergidos se han desempeñado de buena manera de acuerdo con los propósitos para los cuales han sido diseñados y construidos; protegiendo las bancas contra la socavación provocada por el flujo, o permitiendo realineamientos en los cauces, ente otros. No obstante, se considera que su conocimiento está aún en desarrollo y se requiere que estas estructuras sean evaluadas para diferentes condiciones de flujo, así como estudiar otras posibles formas de dimensionamiento y posicionamiento de estas estructuras en el cauce.

Palabras clave: Paneles sumergidos, hidráulica fluvial, ingeniería de ríos.

Abstract

The knowledge in fluvial hydraulics and river engineering has managed to identify variables at the hydro-sedimentological, geomorphological and geological level, important both in the natural understanding of the channel and its valley, and in the design and construction of engineering works. The structures evaluated in the present final work in light of this knowledge, are the submerged vanes, which are flow orienting structures, designed to modify the flow pattern close to the bed and redistribute the flow and transport of sediments within the cross section of the channel. Its main uses are the stabilization of banks and the river bed, the stabilization of alignments of fluvial channels and the control of sediments in water intakes or diversions.

The evaluation was theoretical, that is, no direct work was done in the field or laboratory; Theoretical aspects, laboratory tests, computational exercises and real cases of application for submerged vanes were covered. As a result of this evaluation, it was found that, in general, the submerged panels have performed well in accordance with the purposes for which they have been designed and constructed; protecting the banks against the scour caused by the flow, or allowing realignments in the channels, among others. However, it is considered that their knowledge is still in development and it is required that these structures be evaluated for different flow conditions, as well as studying other possible ways of sizing and positioning these structures in the channel.

Keywords: submerged vanes, fluvial hydraulics, river engineering

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Abstract	VIII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XIV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XV
Introducción	1
1. Objetivos y Alcances	3
1.1 Objetivo general.....	3
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Alcance.....	3
2. Metodología	5
2.1 Consulta bibliográfica y recopilación de información	5
2.2 Clasificación de la información.....	5
2.3 Criterios de evaluación	7
2.4 Evaluación del estado del arte	7
3. Estado del arte	9
3.1 Aspectos teóricos	9
3.2 Ensayos de laboratorio	20
3.2.1 Metodología para el desarrollo de los ensayos de laboratorio	21
3.2.2 Objetivos de los ensayos de laboratorio considerados	22
3.2.3 Características geométricas de los canales utilizados	23
3.2.4 Características del flujo	24
3.2.5 Características de los sedimentos.....	25
3.2.6 Características de los paneles ensayados	26
3.2.7 Resultados relevantes de los ensayos	30
3.3 Ejercicios computacionales.....	32
3.3.1 Objetivos de los ejercicios computacionales considerados	33
3.3.2 Métodos y software utilizado	33
3.3.3 Resultados relevantes.....	34
3.3.4 Validación de los resultados.....	37
3.4 Casos reales de aplicación	38
3.4.1 Características del cauce	38

3.4.2	Características del sistema de paneles.....	40
3.4.3	Resultados de las instalaciones en campo	41
4.	Criterios de evaluación.....	55
4.1	Geología.....	56
4.1.1	Formaciones duras	56
4.1.2	Ciclo geomorfológico y geomorfología fluvial	56
4.1.3	Estado	57
4.2	Sedimentología	58
4.2.1	Granulometría.....	58
4.2.2	Peso	58
4.2.3	Tamaño	58
4.2.4	Depositación.....	59
4.2.5	Socavación	59
4.3	Hidrología.....	59
4.3.1	Caudal a banca llena	59
4.3.2	Caudal de diseño.....	59
4.4	Hidráulica	60
4.4.1	Formas de lecho	60
4.4.2	Transporte de sedimentos	61
4.4.3	Cauce en equilibrio	62
4.4.4	Flujo en curvas	63
4.4.5	Características de un cauce natural.....	63
4.5	Criterios establecidos	64
5.	Análisis.....	65
5.1	Aspectos teóricos	65
5.2	Ensayos de laboratorio.....	67
5.3	Ejercicios computacionales	69
5.4	Casos reales de aplicación.....	70
6.	Conclusiones y recomendaciones	73
6.1	Aspectos teóricos	73
6.2	Ensayos de laboratorio.....	73
6.3	Ejercicios computacionales	75
6.4	Casos reales de aplicación.....	76
6.5	Consideraciones finales	77
	Bibliografía	79

Lista de figuras

	Pág.
Figura 3-1 Representación esquemática de la circulación inducida por los paneles. Tomado de Figura 2-1 (Odgaard, 2009)	9
Figura 3-2 Cambio inducido por los paneles en el perfil del lecho. Tomado de Figura 2-2 (Odgaard, 2009)	10
Figura 3-3 Valores calculados del factor de interacción de paneles, λ . Fuente: Tomado de Figura 2-5 (Odgaard, 2009)	11
Figura 3-4 Definición de variables para diseño de paneles. Fuente: Tomada de figura 2-6 (Odgaard, 2009)	14
Figura 3-5 Estabilización de un lecho de río. El esquema muestra variables de diseño principal y secciones de flujo en (a) instalación, (b) flujo de diseño posterior y (c) flujo subsiguiente bajo. Fuente: tomada de la figura 2-12 de (Odgaard, 2009)	16
Figura 3-6 Esquema de las principales cantidades y conceptos asociados con el flujo a través de una curva de meandro, incluido el desfase para la profundidad máxima del flujo Tomado de Figura 2-19 (Odgaard, 2009)	17
Figura 3-7 Longitud de onda del meandro dominante y retardo de fase para los rangos típicos a banca llena de Número de Froude de sedimentos, relación ancho-profundidad y factor de fricción. Tomado de Figura 2-20 (Odgaard, 2009)	17
Figura 3-8 Máximo incremento en el nivel del lecho al utilizar tres paneles por arreglo. Tomada de Figura 2-21 (Odgaard, 2009)	19
Figura 3-9 Máximo incremento en el nivel del lecho al utilizar dos paneles por arreglo. Tomada de Figura 2-22 (Odgaard, 2009)	19
Figura 3-10 Tomada de Figura 2-23 (Odgaard, 2009)	20
Figura 3-11 Detalle de las formas de panel utilizados en el laboratorio L6. Fuente: tomado y adaptado de la Figura 3 de (Barani, 2013).....	27
Figura 3-12 Ilustración de la forma y ubicación del collarín. Fuente: tomado y adaptado de las Figuras 2 y 3 del artículo original (Gupta et al., 2010).	28
Figura 3-13 Posicionamiento de los paneles en el laboratorio L6. Fuente: tomado y adaptado de las Figuras 4 y 5 de (Barani, 2013).	30
Figura 3-14. Perfiles del lecho d/d_0 (n/b) inducidos por un sistema de 2 paneles con $\delta/L = 0.5$ y un sistema de 3 paneles con $\delta/L = 0.25$ para $H_0/L = 0.5$. $\alpha = 20^\circ$. Tomado de Figura 5 (H T Ouyang, Lai, Yu, & Lu, 2008).....	36
Figura 3-15 Cambio en el nivel del lecho cercano a la banca inducido por el panel vs H_0/d_0 para diferentes valores de F_D (panel rectangular, $L/d_0 = 1$, $\alpha = 20^\circ$). Tomado de Figura 9 (Huei-tau Ouyang, 2009)	36

Figura 3-16 Cambio en el nivel del lecho cercano a la banca inducido por el panel vs H_0/d_0 para diferentes valores de α (panel rectangular, $L/d_0 = 1$, $F_D = 6$). Tomado de Figura 10 (Huei-tau Ouyang, 2009).....	36
Figura 3-17 Cambios en el lecho en varias secciones transversales de canales para el diseño de paneles en tres filas paralelas. Tomado de Figura 5 (Behbahan, 2011).....	37
Figura 3-18 Comparación de las predicciones del modelo y datos experimentales: a. canal curvo, b. canal recto. Tomado de Figura 6 (H. Ouyang & Lu, 2016)	37
Figura 3-19 Evolución del cauce, años 1972, 1977 y 1985. Fuente:tomada de (A. J. Odgaard & Mosconi, 1987)	42
Figura 3-20 Detalle del panel y la instalación sobre el cauce. Fuente. Tomado de (A. J. Odgaard & Mosconi, 1987)	43
Figura 3-21 Medidas de la sección transversal antes y después de la instalación de los paneles. Tomado de la Figura 8 de (A. J. Odgaard & Mosconi, 1987)	44
Figura 3-22 Fotografía aérea curva de estudio. Fuente tomada de la figura 5-5 de (Odgaard, 2009).....	44
Figura 3-23 Implantación del diseño y evolución de la línea de banca. Fuente: tomada de la figura 5-12 de (Odgaard, 2009)	45
Figura 3-24 Comparativo de la curva antes de la instalación y 2 años después de la misma. Fuente: tomado y adaptado de las figuras 5-6 y 5-11 de (Odgaard, 2009)	45
Figura 3-25 Implantación de paneles en el sitio 16.4. Tomado de (Fitzpatrick, F.A., Pepler, M.C., Schwar, H.E., Hoopes, J.A., Diebel, 2005).	47
Figura 3-26 Implantación de paneles en el sitio 12.2. Tomado de (Fitzpatrick, F.A., Pepler, M.C., Schwar, H.E., Hoopes, J.A., Diebel, 2005).	48
Figura 3-27 Tomado de (Fitzpatrick, F.A., Pepler, M.C., Schwar, H.E., Hoopes, J.A., Diebel, 2005).	49
Figura 3-28 Localización del sistema de paneles en la curva Maoerding, flujo de derecha a izquierda. Tomado de Figura 5-16 (Odgaard, 2009).....	49
Figura 3-29 Diseño de los paneles en la curva Maoerding. Tomado de Figura 5-17 (Odgaard, 2009).....	50
Figura 3-30 Vista aguas abajo de los paneles un año después de instalados en la curva Maoerding, año 2007. Tomado de Figura 5-20 (Odgaard, 2009).	50
Figura 3-31 Implantación de la excavación para el enderezamiento del cauce. Tomado de Figura 5-22 (Odgaard, 2009).....	51
Figura 3-32 Fotografías aéreas: (izq) antes de la instalación (1984) y (der) cinco años después de la instalación de los paneles (1989). Fuente tomado y adaptado de Figura 5-24 (Odgaard, 2009).....	52
Figura 4-1 Planta y sección transversal de un cauce trenzado. Tomado de Figura 2.2 (Martín Vide, 2003)	57
Figura 4-2 Cauce meandriforme: morfología (planta y secciones transversales vistas en el sentido de la corriente) y evolución ideal (derecha). Tomado de Figura 2.2 (Martín Vide, 2003)	57
Figura 4-3 Formas de fondo: rizos (a), dunas (b), antidunas (c), rápidos y pozos (d). Tomado de Figura 3.9 (Martín Vide, 2003).....	60

Figura 4-4 Barras alternadas en un cauce recto, ancho y somero (arriba) y su relación con la morfología meandriforme (abajo). Tomado de Figura 3.12 (Martín Vide, 2003) ...	61
Figura 4-5 Rápidos y pozos en relación con la morfología meandriforme. Tomado de Figura 3.13 (Martín Vide, 2003).....	61
Figura 4-6 Clasificación del transporte de sedimentos. Tomado de Figura 3.6 (Martín Vide, 2003).....	62
Figura 4-7 Corriente secundaria (sección, planta y perspectiva de una trayectoria helicoidal). Tomado de Figura 3.29 (Martín Vide, 2003)	63

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1 Ensayos de laboratorio considerados.....	21
Tabla 3-2 Características geométricas del canal de ensayo.....	24
Tabla 3-3 Características del flujo	25
Tabla 3-4 Características de los sedimentos.....	26
Tabla 3-5 Características del panel.....	27
Tabla 3-6 Ejercicios computacionales considerados	33
Tabla 3-7 Características del cauce: ubicación y geometría.....	39
Tabla 3-8 Características del flujo	39
Tabla 3-9 Características del sistema de paneles	40

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo Término

b	Ancho del canal
c_a, c_s	Coefficientes de arrastre y de sustentación
d	Profundidad del flujo
F_a, F_s	Fuerzas de arrastre y de sustentación inducidas por los paneles
F_{sed}	Número de Froude de los sedimentos
f	Factor de fricción de Darcy-Weisbach
g	Aceleración de la gravedad
H	Altura del panel
L	Longitud del panel
κ	Constante de von Karman
ℓ	Longitud del canal, medida sobre su eje central
m	Coefficiente de resistencia
N	Número de paneles
R	Radio hidráulico
r	Radio de curvatura
S	Pendiente del flujo
u	Velocidad de flujo promediada en profundidad

Símbolos con letras griegas

Símbolo Término

α	Ángulo de ataque del panel
α_e	Ángulo de ataque efectivo
α_a	Ángulo de ataque geométrico
α_i	Ángulo de ataque inducido

Símbolo Término

β_n, β_s	Factores de promedio de área
λ	Factor de interacción entre paneles
ΔS	Variación de la pendiente de energía del flujo
ϕ_{sed}	Diámetro del sedimento
ρ	Densidad del fluido
δ_n	Distancia de separación transversal entre paneles
δ_s	Distancia de separación longitudinal entre paneles
θ	Ángulo incluido del segmento del canal
τ_{vn}, τ_{vs}	Esfuerzos de corte del lecho inducidos por los paneles
Γ	Circulación horizontal inducida por el panel

Introducción

El estudio de los ríos con el propósito de realizar obras de ingeniería es un reto especial, pues el cauce, al ser un elemento de la naturaleza, tiende a ser dinámico en el tiempo y en el espacio, dinámica que varía en función del tipo de río; por consiguiente, es probable que los efectos producidos por una obra de ingeniería en un cauce no sean los mismos que en otro. De otra parte, los desarrollos del conocimiento en hidráulica fluvial e ingeniería de ríos han logrado identificar variables importantes a tener en cuenta tanto en la comprensión del cauce natural y su valle, como al momento de diseñar y construir obras de ingeniería; estas variables se pueden clasificar principalmente a nivel hidrológico, hidráulico, sedimentológico, geomorfológico y geológico.

Dentro de las obras de control fluvial se encuentran los paneles sumergidos, los cuales son pequeñas estructuras (láminas) orientadoras del flujo, diseñadas para modificar el patrón de flujo cercano al lecho y redistribuir el flujo y transporte de sedimentos dentro de la sección transversal del canal. La función de los paneles es la generación de circulación secundaria en el flujo; la circulación altera la magnitud y dirección del esfuerzo de corte en el lecho y causa un cambio en la distribución de velocidad, profundidad, y transporte de sedimentos en el área afectada por los paneles. Como resultado, el lecho del río se sedimenta en una porción de la sección transversal del canal y se erosiona en la otra (García, 2006).

Algunos de los usos de estas estructuras son: estabilizar las bancas y el lecho del río, controlar los sedimentos en las tomas de agua o desviaciones, entre otras, puesto que, como producto de su instalación se genera depositación en un costado de la sección transversal y socavación en la otra (Odgaard, 2009). No obstante, para un mejor uso de esta infraestructura, se hace necesario profundizar en su estudio a la luz de criterios proporcionados por la hidráulica fluvial e ingeniería de ríos, con el fin de obtener un mejor conocimiento sobre su utilidad, eficiencia, coherencia y limitaciones.

La estructura dada por la geología permite diferenciar dos tipos de ríos, aquellos que están controlados geológicamente y los cauces aluviales, *“cuya forma, dimensiones y pendiente obedecen a cambios en los parámetros hidráulicos del flujo, y cuya característica principal es la de fluir en canales formados por el mismo material que transporta la corriente”* (Ordóñez, 1979). El presente trabajo final de maestría se enfocará de manera especial en las características de los cauces aluviales, pues son los que presentan una mayor dinámica en fenómenos de interés ingenieril, como la socavación y la depositación de sedimentos. El análisis a realizar es netamente teórico, es decir, se basa en la revisión de la bibliografía existente únicamente, tanto de paneles sumergidos, como de hidráulica fluvial e ingeniería de ríos; mas no se realizarán modelaciones físicas ni numéricas.

La metodología empleada en el desarrollo de este Trabajo Final de Maestría, consistió en primer lugar, en la recopilación, revisión y clasificación de la información disponible en la literatura acerca de los paneles sumergidos, identificando los tópicos principales contenidos en ella; (por ejemplo ensayos de laboratorio o implementación en tramos de ríos, ejercicios computacionales, problemática a resolver, supuestos de diseño, entre otros) con lo que se establece el estado del arte de estas estructuras. Posteriormente, se estudió la literatura técnica en hidráulica fluvial e ingeniería de ríos, los conocimientos sobre el comportamiento natural de los cauces, y los lineamientos para el desarrollo adecuado de obras de ingeniería en los ríos. El estudio de esta literatura, permitió extraer unos criterios de evaluación básicos para juzgar las bases sobre las cuales se ha desarrollado el diseño y funcionamiento de los paneles sumergidos.

Una vez establecido el estado del arte en que se encuentran los paneles sumergidos, y definidos los criterios de evaluación, se realizó una evaluación teórico-conceptual de dicho estado del arte, contrastando lo que recomiendan los conocimientos de la hidráulica fluvial e ingeniería de ríos, con los supuestos de diseño actualmente propuestos para los paneles sumergidos; estableciendo así, el grado de desarrollo del diseño y el conocimiento que actualmente se tiene del desempeño de los paneles sumergidos, así como de sus posibles limitaciones o falencias.

1. Objetivos y Alcances

1.1 Objetivo general

Establecer el estado del arte de los paneles sumergidos respecto de su utilidad para el control fluvial, en casos como el control de la erosión de las márgenes del río, mejoras en la navegabilidad y la evolución del cauce (desplazamientos laterales).

1.2 Objetivos específicos

- Estudiar las bases teóricas y empíricas sobre las cuales se fundamentan las formulaciones matemáticas y criterios para el diseño e instalación de los paneles sumergidos.
- Identificar y aplicar criterios de evaluación para juzgar el grado de desarrollo del conocimiento que se tiene sobre el desempeño de los paneles sumergidos.
- Determinar las limitaciones y/o falencias en la formulación de estas estructuras las cuales se deben tener en cuenta para su aplicación.

1.3 Alcance

Este trabajo final se ha fundamentado en la revisión de la literatura técnica disponible sobre paneles sumergidos, más no incluyó labores específicas de trabajo directo en campo o laboratorio. A partir de la información extractada en dicha revisión, se han definido cuatro usos para estos: i. estabilización de las bancas del río; ii. estabilización del lecho del río; iii. estabilización de alineamientos de canales fluviales y iv. control de sedimentos en tomas de agua o desviaciones. El alcance del presente trabajo final se centra en los tres primeros usos, puesto que el control fluvial se considera sobre los procesos que tienen su desarrollo en el cauce principal, más no sobre obras laterales como bocatomas o desviaciones de flujo. Así mismo, el presente trabajo se limita al análisis del desempeño de los paneles respecto al tipo de flujo (agua y sedimentos) y tipo de canal (ya sea laboratorio o real) para

los cuales se ha analizado dichas estructuras, así como al dimensionamiento de su geometría y ángulo de ataque respecto al flujo.

2. Metodología

El trabajo final consiste en establecer el estado del arte del conocimiento sobre el desempeño y dimensionamiento de los paneles sumergidos, para lo cual, a partir de los conocimientos y experiencias reportados en la literatura técnica, para lo cual se desarrollaron las siguientes actividades:

2.1 Consulta bibliográfica y recopilación de información

La consulta bibliográfica inició con el Manual de Sedimentos de los Estados Unidos (García, 2006), donde, en el capítulo x, se encontró un pequeño aparte respecto al tema de los paneles sumergidos, a partir del cual se identificaron los documentos citados en su bibliografía para su posterior consecución; y así, de manera sucesiva se realizó la búsqueda de los documentos presentados en la bibliografía de los ahora hallados, con lo cual se conformó un banco numeroso de documentos.

2.2 Clasificación de la información

Una vez recopilado el material bibliográfico disponible, se realizó una lectura rápida de los mismos, identificando los tópicos principales en torno a estas estructuras, dentro de los cuales se encuentran ensayos de laboratorio, casos reales de aplicación en tramos de ríos, ejercicios computacionales, desarrollos teóricos sobre su funcionamiento hidráulico, supuestos y lineamientos de diseño, entre otros. A partir de esta discriminación, se realizó la clasificación del material bibliográfico para el desarrollo del presente trabajo final, lo que permitió establecer un marco del estado del arte sobre el desempeño de los paneles sumergidos.

Luego de definir los grupos de clasificación del material bibliográfico, se procedió a elaborar tablas, donde producto de la lectura detallada de los artículos, se consignan los aspectos más importantes y en lo posible comunes a todos los artículos, respecto al funcionamiento

y dimensionamiento de los paneles sumergidos. Dentro de estos aspectos se encuentran principalmente, las características geométricas de los canales utilizados, el tipo de material en que está construido, características del flujo y sedimentos, y por último, las características geométricas del panel, material en que está construido y su ángulo de ataque (posicionamiento) respecto al flujo. En algunos casos, y si los datos consignados en los artículos objeto de revisión lo permitían, el autor del presente trabajo final, complementó la información a registrar en ciertos campos de las tablas, mediante cálculos hidráulicos. Adicional a lo anterior, se realizó un análisis de los resultados obtenidos en cada una de las publicaciones, identificando y contrastando semejanzas y diferencias dentro de lo encontrado al utilizar estas estructuras.

La presentación de la información consignada en las tablas se realizó de manera cronológica, iniciando con la publicación más antigua hasta la más reciente. De otra parte, para identificar los diferentes artículos con los cuales se elaboraron las tablas anteriormente descritas, y a manera de nemotecnia para el lector, se establecieron las siguientes convenciones:

- Artículos de ensayos de laboratorio se denominan con la letra L seguido del número consecutivo, ejemplo L7.
- Artículos de casos reales de aplicación se denominan con las letras CR seguido del número consecutivo, ejemplo CR2.
- Artículos de supuestos teóricos y empíricos y lineamientos de diseño, se denominan con la letra T seguido del número consecutivo, ejemplo T3.
- Artículos de ejercicios computacionales se denominan con la letra EC seguido del número consecutivo, ejemplo EC1.

Por último, en aras de tener un indicador de la importancia de los artículos consultados para la realización del presente análisis, se utilizó la identificación del cuartil en el que se encuentra clasificada la revista (journal) en la cual ha sido publicado el artículo, tomada de la página web del ranking Scimago Journal & Country Rank (www.scimagojr.com).

2.3 Criterios de evaluación

Por su parte, la literatura técnica en hidráulica fluvial e ingeniería de ríos presenta, por un lado, conocimientos sobre el comportamiento natural de los cauces, y por otro, una serie de lineamientos y guías para el desarrollo adecuado de obras de ingeniería en los cauces. El estudio de esta literatura, permitió extractar unos criterios de evaluación básicos para juzgar el desempeño y funcionamiento de los paneles sumergidos. Los criterios de evaluación establecidos se enmarcan dentro de las áreas de conocimiento de la hidráulica general y fluvial, hidrología, sedimentología y geología; dado que el funcionamiento de cualquier estructura hidráulica depende del tipo de cauce y las condiciones de flujo de agua y sedimentos.

2.4 Evaluación del estado del arte

La elaboración del estado del arte de los paneles sumergidos, permitió establecer la gama de condiciones de río, hidráulicas y sedimentológicas para las cuales se tiene experiencia acerca de su desempeño; como requisito para la evaluación del grado de conocimiento que se tiene sobre el desempeño y dimensionamiento de estas estructuras.

3.Estado del arte

El estado del arte aquí presentado se ha dividido en cuatro ejes temáticos que se consideran importantes para un mejor entendimiento de lo referente a los paneles sumergidos. En primera instancia se abordará la teoría básica y sus modificaciones, posteriormente los trabajos de laboratorio, seguido de Los ejercicios computacionales, y finalmente, algunos casos reales de aplicación de estas estructuras.

3.1 Aspectos teóricos

Los desarrollos teóricos de los paneles sumergidos datan de los años 80, en este capítulo se exponen los principales aspectos mencionados en la literatura. Los paneles sumergidos son pequeñas estructuras orientadoras de flujo, diseñadas para modificar su patrón cercano al lecho y redistribuirlo junto con el transporte de sedimentos dentro de la sección transversal del canal; funcionan generando circulación secundaria en este, como se muestra en la Figura 3-1.

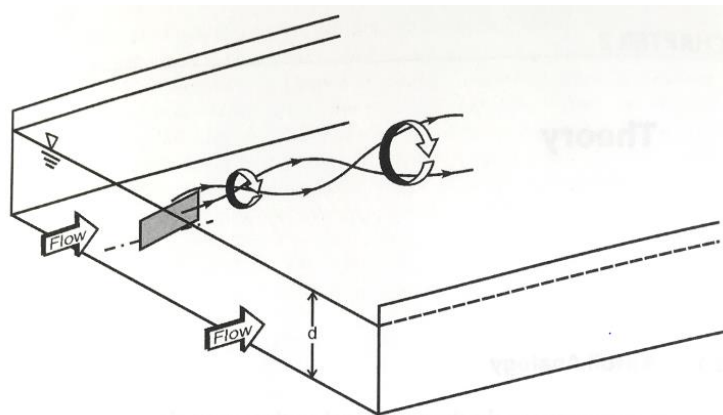


Figura 3-1 Representación esquemática de la circulación inducida por los paneles. Tomado de Figura 2-1 (Odgaard, 2009)

La circulación altera la magnitud y dirección del esfuerzo de corte del lecho y causa un cambio en la distribución de la velocidad, profundidad y transporte de sedimentos en el área afectada por los paneles. Como resultado, el lecho del río sedimenta en una porción de la sección transversal del canal y socava en la otra (ver Figura 3-2). Esta redistribución es causada por vorticidad.

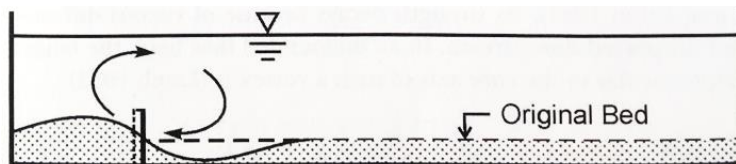


Figura 3-2 Cambio inducido por los paneles en el perfil del lecho. Tomado de Figura 2-2 (Odgaard, 2009)

En la reseña realizada al libro “River Training and Sediment Management with Submerged Vanes”, realizada por Radspinner, R. R., & Diplas, P, se afirma que este libro representa un primer intento de crear una guía de diseño de paneles sumergidos que puede ser usado por ingenieros e investigadores hidráulicos; y que adicionalmente, por su trabajo en investigación y desarrollo de paneles sumergidos, Odgaard recibió la Medalla de Estructuras Hidráulicas de la ASCE en 2001 (Radspinner & Diplas, 2010). En dicho libro de Odgaard, se presenta de manera detallada el desarrollo teórico de los paneles sumergidos, condensando según este autor, los conocimientos desarrollados a 2009 para la base teórica de fundamento del diseño de estas estructuras.

De acuerdo con Odgaard (Odgaard, 2009), el soporte teórico se presenta dependiendo de la cantidad de paneles a utilizar. Consecuentemente con lo anterior, al desarrollo teórico de un panel, se le incorpora un coeficiente de interacción entre paneles para el caso de dos paneles, debido a que el flujo alrededor de un panel afecta el flujo alrededor del otro. Así mismo, para explicar el caso de un arreglo de varias filas y varios paneles en cada una, se tiene en cuenta el área ocupada por el arreglo de paneles y el número de paneles instalados. A manera de convención, el sistema de coordenadas utilizado es curvilíneo: el eje s se encuentra a lo largo de la línea central del canal, positivo en la dirección del flujo, el eje n es perpendicular al eje s , positivo hacia la banca cóncava; y el eje z está verticalmente hacia arriba desde el lecho. Las componentes de velocidad (promediadas en el tiempo y en la profundidad) en las direcciones s , n y z se denominan u , v y w ,

respectivamente. Teniendo en cuenta que, en casos reales de aplicación, el uso de paneles sumergidos se hace mediante arreglos de varias filas de paneles y a su vez, varios paneles por fila; a continuación, se resume lo mencionado por Odgaard al respecto.

La circulación horizontal Γ , inducida por un panel está dada por:

$$\Gamma = \frac{\pi \alpha L u}{1 + \frac{L}{H}} \quad (1)$$

Donde L : longitud del panel, H : altura del panel, α : ángulo de ataque del panel y, u : velocidad de flujo promediada en profundidad. Al utilizar dos paneles se debe determinar su distancia de separación transversal, denominada δ_n , la cual debe ser tal que permita la formación de un vórtice que no disminuya la efectividad de los paneles de manera individual. Para esto se utiliza el modelo de interacción para arreglos de paneles, cuyo resultado es un factor de interacción, λ , que relaciona la circulación asociada con una serie de paneles con la circulación generada por un panel aislado. El factor λ es una función del espaciamiento y las dimensiones del panel, como se puede observar en la Figura 3-3

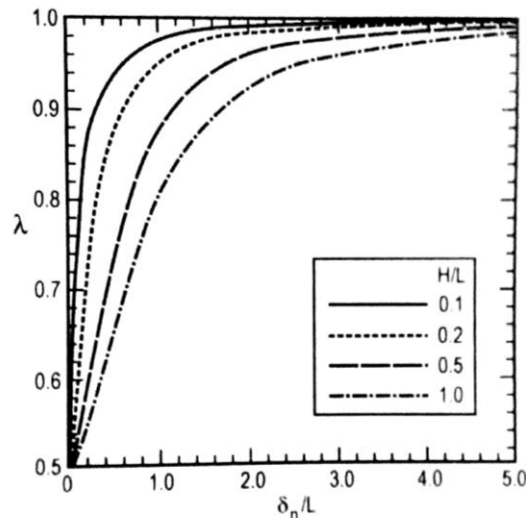


Figura 3-3 Valores calculados del factor de interacción de paneles, λ . Fuente: Tomado de Figura 2-5 (Odgaard, 2009)

Por último, para mantener el efecto aguas abajo de la circulación inducida y el esfuerzo de corte del lecho inducido, el conjunto de paneles debe repetirse a intervalos en la dirección

aguas abajo, con una distancia entre filas denominada δ_s ; la cual depende del objetivo de diseño. Dentro de un campo de paneles que consta de paneles de igual tamaño e igual espaciamiento, los esfuerzos de corte del lecho inducidos promediados en el área son:

$$\tau_{vn} = \lambda \beta_n \frac{F_s}{A_v} \quad (2)$$

Y

$$\tau_{vs} = \lambda \beta_s \frac{F_a}{A_v} \quad (3)$$

en las cuales $A_v = \delta_n * \delta_s$, y β_n, β_s : factores que surgen del proceso de promedio de área (Wang 1990). Si el campo del panel cubre un área A , y el número total de paneles es N , entonces $A_v = A/N$. F_s es la fuerza de sustentación y F_a es la fuerza de arrastre inducidas por los paneles, definidas como:

$$F_s = \frac{1}{2} c_s \rho L H u^2 \quad (4)$$

$$F_a = \frac{1}{2} C_a \rho L H u^2 \quad (5)$$

Donde ρ : densidad del fluido y los respectivos coeficientes de sustentación y de arrastre son:

$$c_s = \frac{2\pi\alpha}{1 + \frac{L}{H}} \quad (6)$$

$$c_a = \frac{1}{2\pi} \frac{L}{H} c_s^2 \quad (7)$$

El impacto de un sistema de arreglos de paneles en la pendiente de energía del flujo se estima utilizando la ecuación (8). Suponiendo que se instala un sistema de N paneles en el canal en una longitud de ℓ y el ancho del canal es b , el aumento de la pendiente de energía inducido por paneles es aproximadamente:

$$\Delta S = \lambda \beta_s \frac{NF_a}{b \ell \rho g R} \quad (8)$$

en el cual g : aceleración de la gravedad, y R : radio hidráulico. En canales abiertos muy anchos, $R = d$, la profundidad de flujo.

Los esfuerzos de corte inducidos por el sistema de paneles se introducen en las ecuaciones para la conservación de la masa (agua y sedimentos) y momento; para calcular el efecto de los paneles en el flujo y la topografía del lecho en un canal aluvial. Las suposiciones de las que se parte son: la profundidad del flujo, d , es pequeña en comparación con el ancho, b ; el radio de curvatura, r , es más grande que el ancho; y el flujo está completamente desarrollado, obteniendo finalmente las siguientes dos ecuaciones:

$$u^2 = \frac{m^2}{\kappa^2} \left(g S d - \frac{\tau_{vs}}{\rho} \right) \quad (9)$$

$$\frac{d(d)}{dn} = 2cM F_{sed} \frac{d}{r} - \frac{2cm}{\rho u^2} F_{sed} \tau_{vn} \quad (10)$$

Donde S : pendiente del flujo y m : coeficiente de resistencia, relacionado con el factor de fricción de Darcy-Weisbach f , como $m = k\sqrt{(8/f)}$, κ : constante de von Karman (0.4 aproximadamente).

$$m = \frac{\kappa u}{\sqrt{g S d}} \quad (11)$$

$$M = \frac{(2m + 1)(m + 1)}{m(m + 1 + 2m^2)} \quad (12)$$

El valor de c es del orden de 1.0. y el Número de Froude de los sedimentos es:

$$F_{sed} = \frac{u}{\sqrt{g\phi_{sed}}} \quad (13)$$

Odgaard y Wang solucionaron las ecuaciones usando un esquema de diferencias finitas. En la Figura 3-4 se presentan las distancias descritas anteriormente.

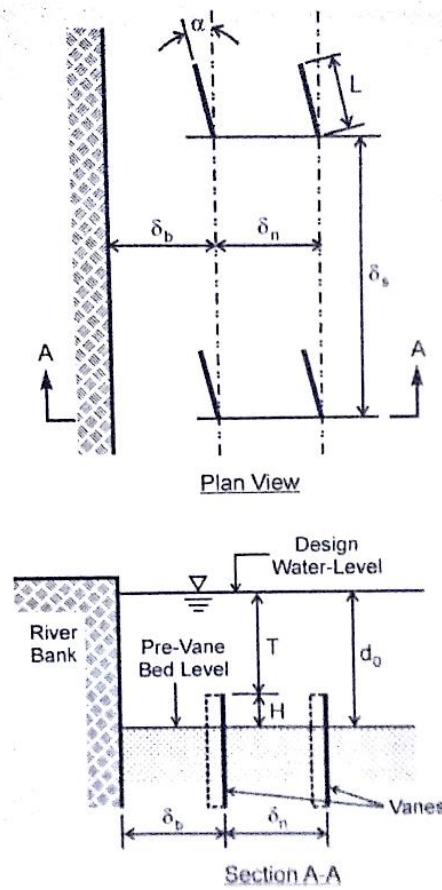


Figura 3-4 Definición de variables para diseño de paneles. Fuente: Tomada de figura 2-6 (Odgaard, 2009).

Adicional a lo anteriormente expuesto, Odgaard detalla en su libro las particularidades a tener en cuenta según el objetivo de diseño. Cuando el objetivo de diseño es la estabilización de la banca del río, para los flujos de curvas desarrolladas, este objetivo se puede formular a través de un equilibrio de torsión (A. Jacob Odgaard & Kennedy, 1983). Los paneles sumergidos se instalan para ejercer un torque en el flujo que contrarresta el torque inducido centrífugamente. La relación de diseño para la eliminación completa del torque inducido centrífugamente en un flujo de curva completamente desarrollado sobre un segmento de canal de longitud $r\theta$ (a. J. Odgaard & Mosconi, 1987) es:

$$\frac{NLH}{r\theta b} = \frac{2d}{c_s r} F \quad (14)$$

donde N : número de paneles independientes requeridos, θ : ángulo incluido del segmento del canal, c_s : coeficiente de sustentación para la fuerza ejercida sobre el flujo por cada panel, dada por la ecuación (6), y

$$F = \left(\frac{d}{H}\right)^{2/m} \left[(m+1) - (m+2)\frac{H}{d}\right]^{-1} \quad (15)$$

La función F tiene su mínimo con respecto a H en $H/d = 2(m+1)/(m+2)^2$:

$$F_{min} = \frac{m+2}{m(m+1)} \left[\frac{2(m+1)}{(m+2)^2}\right]^{-2/m} \quad (16)$$

Con base en estas ecuaciones, Odgaard indica que los paneles funcionan casi de manera óptima en una amplia gama de etapas fluviales (es decir, un amplio rango de caudales), y que el caudal no es un parámetro de diseño primario, pues se usa solo para la determinación de m (Odgaard, 2009). Puesto que de acuerdo con la ecuación (11), m varía con el caudal.

De otra parte, cuando el objetivo de diseño es la estabilización del lecho del río, esto podría lograrse haciendo que los paneles desarrollen y mantengan un canal compuesto, es decir, un canal con bermas a lo largo de cada banca, (Odgaard, 2009), como se muestra en la Figura 3-5.

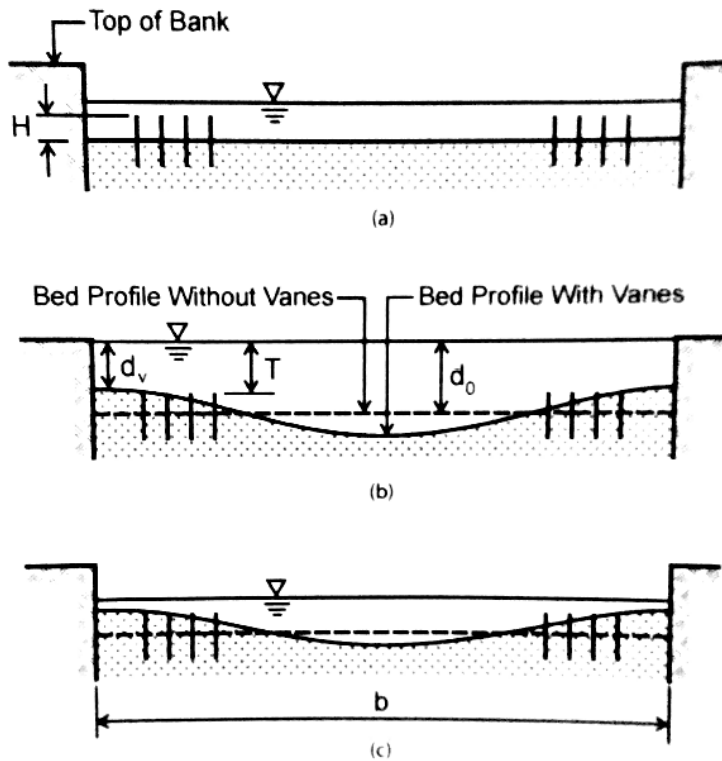


Figura 3-5 Estabilización de un lecho de río. El esquema muestra variables de diseño principal y secciones de flujo en (a) instalación, (b) flujo de diseño posterior y (c) flujo subsiguiente bajo.
Fuente: tomada de la figura 2-12 de (Odgaard, 2009)

Finalmente, cuando el objetivo es la estabilización de la alineación del canal del río (y reconstituir el meandro) se requiere información sobre las características de alineación natural del canal. El sistema de paneles debe estar diseñado para ser consistente con la tendencia natural del río para alcanzar y mantener cierta forma meándrica, es decir, el sistema de paneles debe diseñarse e instalarse para preservar la longitud de onda dominante calculada por el análisis de estabilidad. El desfase calculado daría la distancia desde el punto de cruce hasta el punto donde debería instalarse el primer conjunto de paneles, es decir, el punto de donde inicia la erosión en la banca externa (Odgaard, 2009). Los anteriores conceptos se ilustran en la Figura 3-6, y el cálculo de longitud de onda dominante y desfase; para flujo a banca llena, se muestra en la Figura 3-7.

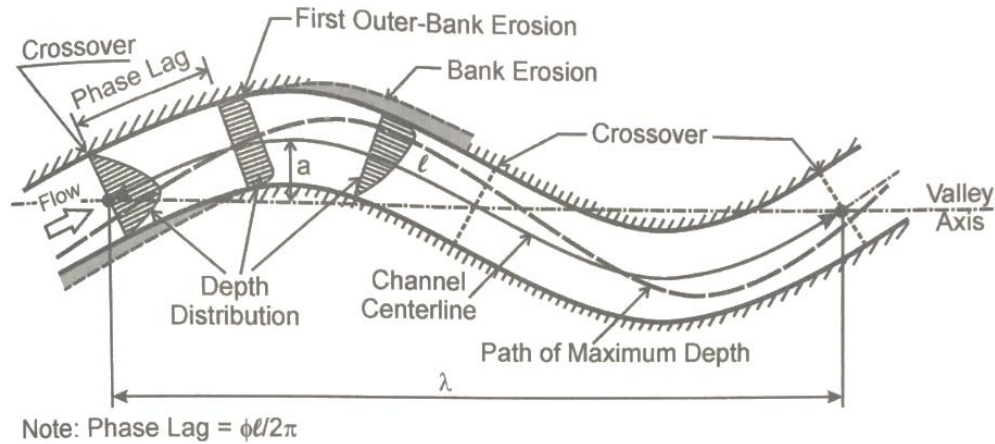


Figura 3-6 Esquema de las principales cantidades y conceptos asociados con el flujo a través de una curva de meandro, incluido el desfase para la profundidad máxima del flujo Tomado de Figura 2-19 (Odgaard, 2009)

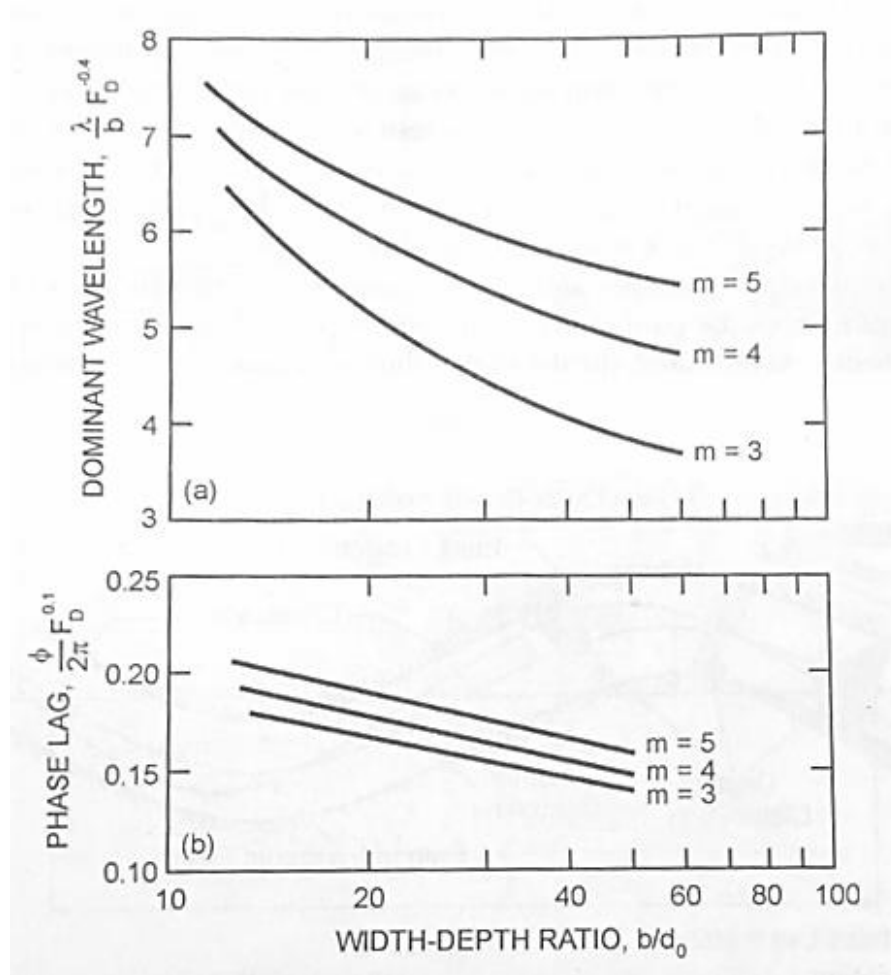


Figura 3-7 Longitud de onda del meandro dominante y retardo de fase para los rangos típicos a banca llena de Número de Froude de sedimentos, relación ancho-profundidad y factor de fricción. Tomado de Figura 2-20 (Odgaard, 2009)

En el año 2003, se plantea un análisis matemático donde se introduce el concepto de ángulo de ataque efectivo para usarlo en lugar del ángulo geométrico de ataque, en la predicción de la velocidad cercana al lecho (Islam, 2003), comprobando según este autor, su efectividad basado en los resultados de ensayos experimentales llevadas a cabo por Zijlstra y Zwol¹. Lo anterior debido a que en un estudio realizado por Jongeling y Folkstra² se determinó que la ecuación propuesta por Odgaard para predecir la velocidad transversal cercana al lecho no era lo suficientemente precisa como para predecir la velocidad real del flujo aguas abajo del panel. Según los autores de este análisis, al utilizar estas correcciones, la desviación entre la velocidad transversal real y la estimada se reduce sustancialmente, pero se considera necesaria la validación en un prototipo, para aceptarla como una solución definitiva (Islam, 2003). Las ecuaciones son:

$$\alpha_e = \alpha_a + \alpha_i \quad (17)$$

$$\alpha_i = \frac{\pi u_s \sin \alpha}{6 \left(1 + \frac{H_v}{L_v}\right)} \quad (18)$$

Donde:

α_e : ángulo de ataque efectivo

α_a : ángulo de ataque geométrico

α_i : ángulo de ataque inducido.

u_s : velocidad del flujo

Finalmente, a continuación, se presentan las gráficas de diseño presentadas por (A. Jacob Odgaard, 2009), las cuales son producto de los aspectos teóricos arriba expuestos. Estas pueden ser utilizadas una vez conocida las características del flujo y la geometría del canal. Con lo cual, se evalúa la cantidad de paneles a utilizar en el caso de estudio.

¹ (Islam, 2003) hace referencia al siguiente estudio: Zijlstra, R. and Zwol, J.A, "Measuring Report, Experimental Study on Bottom Vanes", WL| Delft Hydraulics and TUDelft, the Netherlands, 2003

² (Islam, 2003) hace referencia al siguiente estudio: BUET/DC, "Capacity Building in the Field of Water Resources Engineering and Management in Bangladesh, Review Report," Dhaka, 2002.

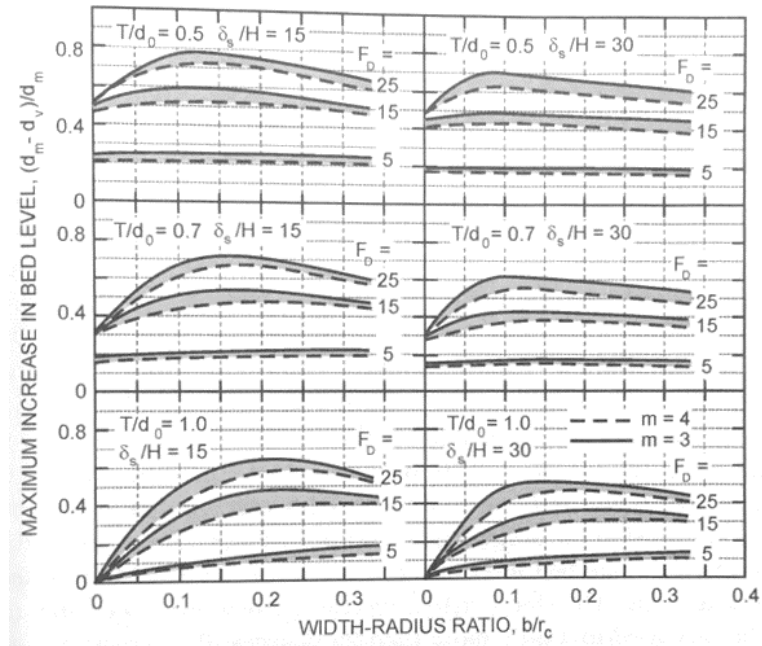


Figura 3-8 Máximo incremento en el nivel del lecho al utilizar tres paneles por arreglo. Tomada de Figura 2-21 (Odgaard, 2009)

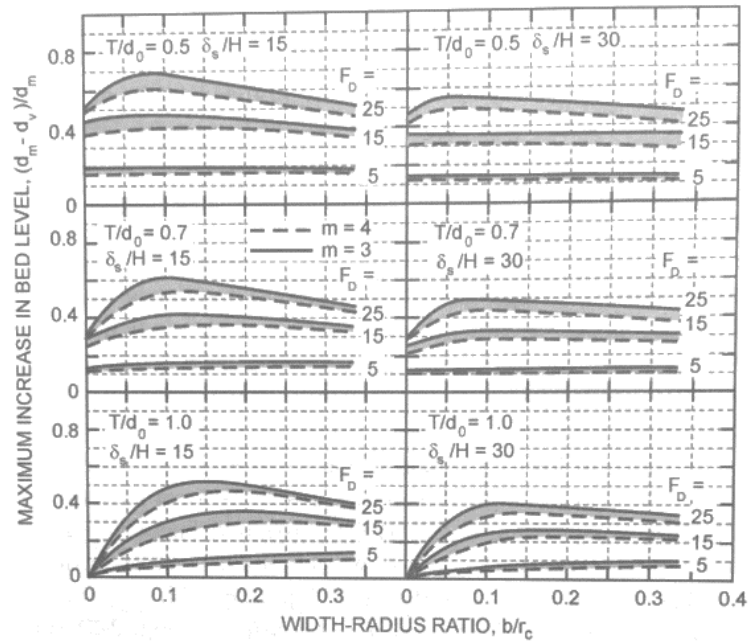


Figura 3-9 Máximo incremento en el nivel del lecho al utilizar dos paneles por arreglo. Tomada de Figura 2-22 (Odgaard, 2009)

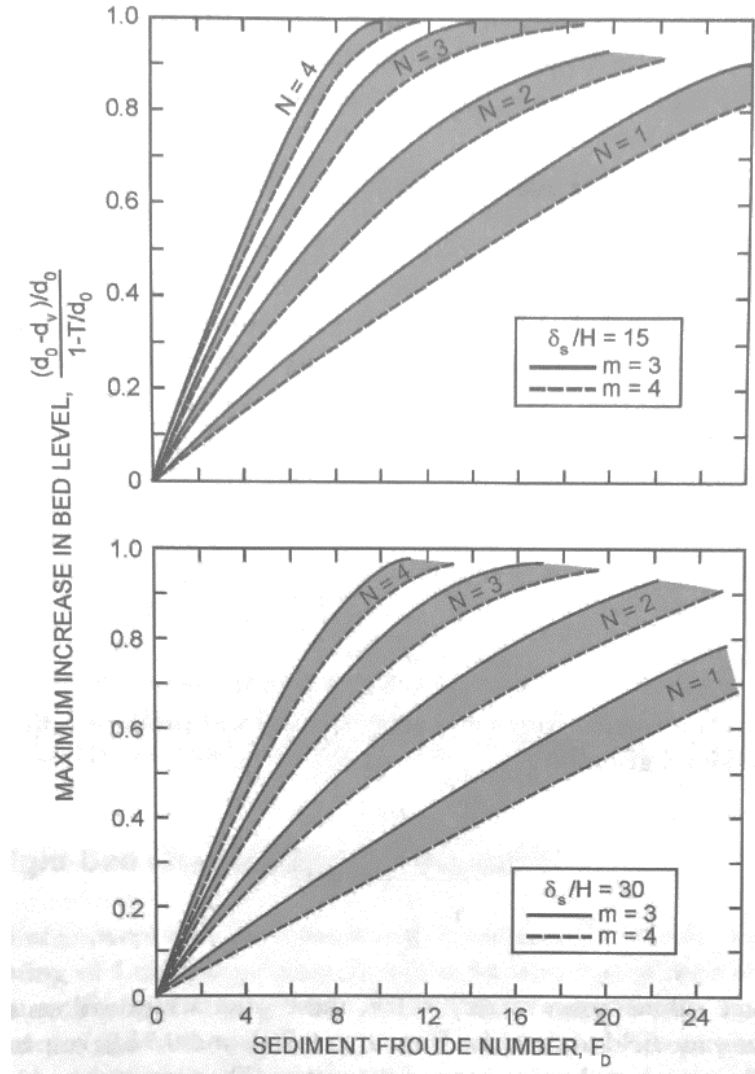


Figura 3-10 Tomada de Figura 2-23 (Odgaard, 2009)

3.2 Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio llevados a cabo para el estudio de los paneles sumergidos han sido desarrollados para diferentes condiciones de formas del canal, tipo de sedimentos, dimensiones del panel y ángulo de ataque. En la Tabla 3-1 se presenta el listado de referencias bibliográficas de los ensayos consideradas en el presente trabajo final. En la columna "No.", se adopta la convención "L" para indicar que se trata de un artículo de laboratorio, seguido de un número consecutivo. Así mismo, la columna "Cuartil", indica la clasificación de la revista en la cual ha sido publicado el artículo, tomada de la página web del ranking Scimago Journal & Country Rank (www.scimagojr.com) como es un indicador de la importancia de los artículos consultados para la realización del presente análisis.

Tabla 3-1 Ensayos de laboratorio considerados

Id.	Año	Nombre del Artículo	Cuartil	Autor
L1	1983	River-Bend Bank Protection by Submerged Vanes	Q1	Odgaard, A. J., & Kennedy, J. F.
L2	2001	Use of Vanes for Control of Scour at Vertical Wall Abutments	Q1	Johnson, P. A., Hey, R. D., Tessier, M., & Rosgen, D. L.
L3	2005	Flow Structure and Sediment Motion around Submerged Vanes in Open Channel.	Q1	Tan, S.-K., Yu, G., Lim, S.-Y., & Ong, M.-C.
L4	2010	Bank-Attached Vanes for Bank Erosion Control and Restoration of River Meanders	Q1	Bhuiyan, F., Hey, R. D. R. D., & Wormleaton, P. R. P. R.
L5	2010	Enhancing utility of submerged vanes with collar.	Q1	Gupta, U., Ojha, C., & Sharma, N.
L6	2013	Experimental Investigation of Submerged Vanes' Shape effect on river-bend stability	----	Barani, G.
L7	2015	Effects of submerged sheet pile vanes on mobile river beds.	Q2	Boniforti, M. A., Guercio, R., & Magini, R.

Producto de la lectura de los artículos mencionados, de la Tabla 3-2 a la Tabla 3-5, se presentan las características principales de los ensayos, en cuanto a geometría del canal, flujo, geometría del panel y resultados relevantes.

3.2.1 Metodología para el desarrollo de los ensayos de laboratorio

De manera general, se puede indicar que el desarrollo de los ensayos de laboratorio consiste en una secuencia de pasos los cuales se resumen a continuación:

- a. Se establece una geometría adecuada para el canal, es decir, sus dimensiones en planta, perfil y sección transversal.
- b. Se coloca sobre el fondo del canal los sedimentos con los cuales se va a trabajar en los diferentes ensayos, creando un lecho liso. De estos sedimentos se conoce el material, gravedad específica, granulometría, entre otros aspectos.
- c. Por medio de un sistema mecánico, es decir mediante bombas, se ponen en circulación caudales constantes preestablecidos de agua y sedimentos a través del canal, los cuales recirculan hasta tener un lecho que no presente variaciones significativas en su forma.
- d. El punto anterior se logra mediante la comparación de mediciones consecutivas del lecho en diferentes secciones transversales del mismo, a lo largo del canal.

- e. Una vez se tiene un lecho estable, se procede a instalar los paneles sobre el lecho en las zonas objeto de estudio, ya sea en la margen externa de la curva, aguas arriba de un pilote de puente, etc.
- f. Posteriormente a la instalación de los paneles, se mide el efecto que estos provocan en la sección transversal inicial estable. Es decir, se miden las profundidades de las secciones transversales aguas arriba y aguas debajo de los paneles, manteniendo la recirculación de agua y sedimentos en el canal a un caudal constante.
- g. Con estas mediciones se determina la efectividad de los paneles, consistente en la reducción de la socavación en la margen externa de los cauces o en la protección de los pilares de puentes, entre otros usos.
- h. Esta efectividad se relaciona para un ángulo de instalación y dimensiones del panel, con lo cual se determinan sus dimensiones y ángulo de instalación óptimo en función de la mayor eficiencia producto de los diferentes ensayos realizados.
- i. La duración de los ensayos varía de cuatro horas a tres semanas según la complejidad del ensayo, lo cual depende de las condiciones iniciales de ensayo y la disposición de los paneles, así como también, de las condiciones finales, hasta no apreciar cambios significativos durante un intervalo de tiempo de medición razonable.

El ángulo de instalación, también conocido como ángulo de posicionamiento del panel, hace referencia al ángulo respecto a la dirección de la corriente del flujo aguas arriba del panel. En un arreglo de paneles, se instala una fila a lo largo de un mismo radio de curvatura del canal, o con un sesgo al mismo, como se aprecia en la instalación en zigzag de la referencia L6, que se detalla más adelante.

Se observó que los ensayos considerados, en general se realizan con un único caudal para todo el ensayo, lo cual restringe analizar el comportamiento de los paneles respecto a la variación de caudales que se presenta en los cauces naturales.

3.2.2 Objetivos de los ensayos de laboratorio considerados

Los ensayos de laboratorio considerados tienen como propósito usar los paneles para:

- Referencia L1: protección contra la socavación de la margen externa en una curva (A. Jacob Odgaard & Kennedy, 1983).
- Referencia L2: protección contra la socavación para los pilares de puentes de una sola luz (Johnson, Hey, Tessier, & Rosgen, 2001). Consecuentemente, los paneles son instalados aguas arriba del pilar a proteger.
- Referencia L3: evaluar la redistribución de sedimentos en las inmediaciones del panel en un canal recto (Tan, Yu, Lim, & Ong, 2005).
- Referencia L4: protección contra la socavación de la margen externa en curvas (Bhuiyan, Hey, & Wormleaton, 2010).
- Referencia L5: evaluar el uso de un collarín para la socavación local producida en el borde inferior de aguas arriba del panel (Gupta, Ojha, & Sharma, 2010).
- Referencia L6: protección contra la socavación de la margen externa en curvas (Barani, 2013).
- Referencia L7: evaluar la redistribución de sedimentos en las inmediaciones del panel en un canal recto (Boniforti, Guercio, & Magini, 2015).

3.2.3 Características geométricas de los canales utilizados

En la Tabla 3-2 se presenta las características principales de los canales utilizados en los ensayos de laboratorio considerados, siendo de principal interés su geometría y materiales empleados en su construcción. La forma del canal utilizado en la referencia L1 es compuesta, iniciando en el fondo con una sección transversal trapezoidal seguida de una rectangular. En la referencia L4, el autor del presente trabajo final estimó una longitud del canal de 63 m, y un radio de curvatura de 4.7 m. basado en la información presentada en la Figura 1 del artículo. Así mismo, en la referencia L6 se tiene que una forma en planta compuesta, iniciando con un tramo recto, seguida de un cuarto de círculo (curva de 90°), luego un tramo recto seguido de medio círculo (curva de 180°) y finalmente un tramo recto. Para los canales semicirculares, el radio indicado es medido al centro del canal (eje).

Tabla 3-2 Características geométricas del canal de ensayo

Id.	Sección Transversal			Planta			Pendiente Long.	Material
	Forma	Base [m]	Altura [m]	Forma	Longitud [m]	Radio [m]		
L1	Trapezoidal + Rectangular	B. mayor 2.44 B. menor 1.45	Trapezio 0.3302 + Rectángulo 0.2794 = Total 0.6096	Semicircular	41.17	13.11	----	Madera contrachapada
L2	Rectangular	1.50	0.90	Recta	15.00	N.A.	0.0020	
L3	Rectangular	6.00	0.60	Recta	30.00	N.A.		
L4	Trapezoidal	1.60		Meándrica	63**	4.7**	0.0013	
L5	Rectangular	0.50	0.50	Recto	11.00	----	0.0455	Vidrio acrílico transparente
L6	Rectangular	0.73	0.35	Tramo 1: Recta Tramo2: Curva de 90° Tramo 3: Recta 6.2 m Tramo 4: Curva de 180° Tramo 5: Recta 7.0 m	110.00	C90°: r = 4.665 C180°: r = 2.735	0.0020	Concreto
L7	Rectangular	0.40		Recta	12.00	----		

Respecto a la sección transversal del canal, la forma predominante es la rectangular con un 71% del total de los casos, seguida de la forma trapezoidal con el 29% restante. Esto probablemente es debido a su facilidad constructiva. Así mismo, el 57% presenta una forma recta en su planta, no obstante, se resalta la referencia L4 donde se trabaja una forma meándrica, procurando asemejarse a lo ocurrido en los cauces naturales. Los materiales utilizados son convencionales, pero se evidencia tres tipos diferentes (madera, acrílico y concreto).

3.2.4 Características del flujo

En la Tabla 3-3 se presentan las características del flujo, como caudal y número de Froude. En la referencia L1, se menciona adicionalmente una pendiente longitudinal del flujo de 0.0013 y un coeficiente de Darcy Weisbach de 4.1. En el caso de la referencia L2, se realizó un número importante de ensayos; variando los rangos de profundidad entre 0,15 y 0,28 m, velocidad entre 0,223 y 0,321 m/s, caudal entre 0,021 y 0,081 m³/s, y número de Froude entre 0,13 y 0,22. En la referencia L5, se indica que la velocidad del flujo es el 90% de la

velocidad crítica para el movimiento de sedimentos del lecho, pero no se observa un dato numérico.

Tabla 3-3 Características del flujo

No.	Profundidad d [m]	Velocidad [m/s]	Caudal [m ³ /s]	Froude	Observaciones
L1	0.144		0.154	0.46*	
L2	a) 0.15 - 0.28	a) 0.239 - 0.339	a) 0.021 - 0.084	a) 0.18 - 0.22	Información tomada y agrupada de la Tabla 1 de la respectiva referencia.
	b) 0.15 - 0.28	b) 0.238 - 0.329	b) 0.024 - 0.070	b) 0.18 - 0.21	
	c) 0.15 - 0.28	c) 0.223 - 0.336	c) 0.026 - 0.067	c) 0.17 - 0.22	
	d) 0.22 - 0.28	d) 0.288 - 0.333	d) 0.047 - 0.081	d) 0.20 - 0.21	
	e) 0.22 - 0.28	e) 0.278 - 0.317	e) 0.047 - 0.075	e) 0.13 - 0.19	
	f) 0.22 - 0.28	f) 0.304 - 0.344	f) 0.049 - 0.079	f) 0.13 - 0.19	
	g) 0.28	g) 0.321	g) 0.70	g) 0.19	
	h) 0.28	h) 0.276	h) 0.072	h) 0.17	
	i) 0.28	i) 0.289	i) 0.073	i) 0.17	
	j) 0.28	j) 0.287	j) 0.072	j) 0.17	
	L3	0.385	0.128		
L4			0.097		El caudal es a banca llena
L5				0 a 0.25	
L6		C90° ; 0,533 m/s C180° ; 0,480 m/s	0.35		
L7	0.150	0.36	0.022	0.30*	

* Datos estimados a partir de la información suministrada en la respectiva referencia bibliográfica.

Según la información recopilada, el flujo en la mayoría de los casos es uniforme, lo que presenta una limitante en los resultados de los paneles, teniendo en cuenta que en cauces reales se presenta otro tipo de flujos como el gradual y el rápidamente variado. En la referencia L4, se resalta el uso del caudal a banca llena, puesto que según la literatura es este caudal el encargado de definir la geometría del cauce. Respecto al número de Froude, el cual define el régimen de flujo, éste se indica de manera explícita sólo en 2 casos, y en ambos, se identifica que se está trabajando en flujo subcrítico.

3.2.5 Características de los sedimentos

Respecto al material utilizado para el lecho, en la Tabla 3-4 se exponen las características principales del mismo. En el caso de la referencia L3, para el material plástico su forma era cilíndrica.

Tabla 3-4 Características de los sedimentos

No.	Material	Diámetro [mm]	peso específico kg/m ³
L1	arena	0.30	2.65*
L2	Arena uniforme	1.00	2.65*
L3	• 4 m: grava • 26 m: plástico	Grava: 10 - 20 Plástico: 2.8	Grava: 2.85**
L4	Arena	0.06 a 5 mm d ₅₀ = 1,5 mm d ₈₅ = 3,0 mm	2.65*
L5	Arena	• d ₅₀ = 0.225 mm desviación estándar geométrica 1.42 • d ₅₀ = 0.405 mm desviación estándar geométrica 1.37	2.65
L6	Arena	medio: 1.6 mm desviación estándar geométrica 3.88	2.65*
L7	Arena uniforme	d ₉₀ = 0.5 mm	2.65

* Datos estimados a partir de la información suministrada en la respectiva referencia bibliográfica.

Los sedimentos predominantemente utilizados son arenas con un 85% del total de casos, en donde en 2 casos su tamaño es uniforme. Las partículas tienen un tamaño entre 0.06 y 5.00 mm, correspondientes a arenas y gravilla, tamaños muy similares a los de los lechos fluviales; no obstante, no se observan ensayos con partículas de mayor tamaño, o con una granulometría extendida.

3.2.6 Características de los paneles ensayados

Por último, en la Tabla 3-5 se ilustran las principales características de los paneles, como su ubicación dentro del canal, geometría y número de elementos utilizados en los diferentes ensayos realizados. Los detalles requeridos para ilustrar lo consignado en esta tabla se describen en párrafos posteriores.

Las alturas del panel registradas en la referencia L3, corresponden a 1/8, 1/5, 1/4 y 1/3 de la profundidad, d , por encima del lecho móvil. Para una mayor claridad de las formas del panel utilizadas en la referencia L6, en la Figura 3-11 se presentan las mismas, tomadas de la Figura 3 de (Barani, 2013).

Tabla 3-5 Características del panel

No.	Ubicación en el canal	Material	Forma		Dimensiones		
			Planta	Perfil	Base [m]	Altura [m]	Espesor Pared [mm]
L1	Mitad exterior de la curva	Acero galvanizado	Rectangular	Rectangular	0.354	0.034 = d/3	0.38
L2	Junto a la banca del estribo	Madera contrachapada marina			0.18 – 0.27	0.09 = H del Qbanca llena	
L3	centro del canal	Acero	Rectangular	Rectangular	2.00	0.05 - 0.08 - 0.10 - 0.15	10.00
L4	Junto a la banca externa	Madera contrachapada marina	Rectangular	Triangular		Altura banca llena	10.00
L5		Plástico	Rectangular	Rectangular		0.06	4.00
L6	Curva exterior	Placa galvanizada	a. Recta b. Quebrada c. Curvada	a. Rectangular b. Rectangular c. Rectangular	a. 0.15 b. 0.075 + 0.075 (ángulo 22°) c. 0.075 + 0.075 (r = 0.05 m)	a. 0.135 b. 0.135 c. 0.135	a. 0.55 b. 0.55 c. 0.55
L7	Centro del canal	Aluminio	a. Rectangular Plana b. Rectangular en tablestaca	c. Rectangular Plana d. Rectangular en tablestaca	a. 0.17 y 0.25 b. 0.17 y 0.25	a. 0.05 - 0.075 b. 0.05 - 0.075	a. 5.00 b. 5.00

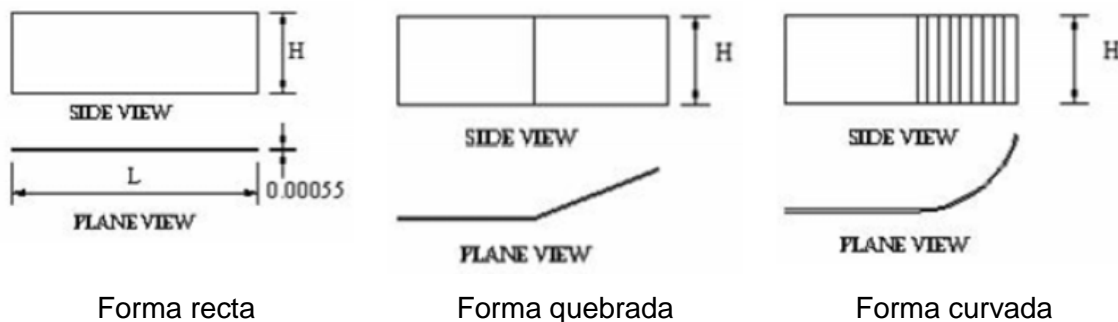


Figura 3-11 Detalle de las formas de panel utilizados en el laboratorio L6. Fuente: tomado y adaptado de la Figura 3 de (Barani, 2013).

En la referencia L5, se trabajó en la utilización de un collarín (lámina plana sujeta al panel de manera no especificada) a instalar en la parte aguas arriba del panel en su base junto al lecho, con el propósito de disminuir la socavación local que se produce en este punto cuando se trabaja a ángulos de ataque de alrededor de 40°. Por tanto, en esta referencia L5 no se indican medidas óptimas de panel, sino de diseño del collarín, (ver Figura 3-12) (Gupta et al., 2010).

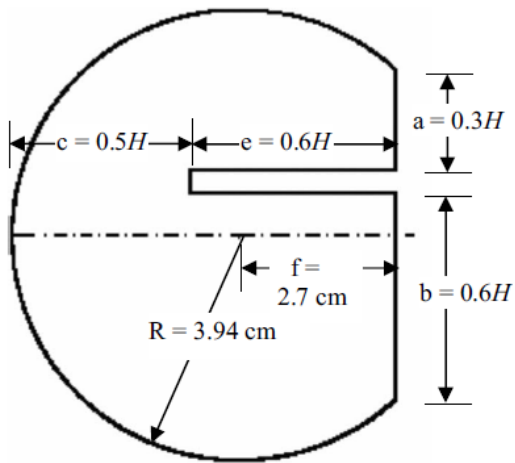


Fig. 2. Collar R-1 at $F=0.13$

Forma del collarín

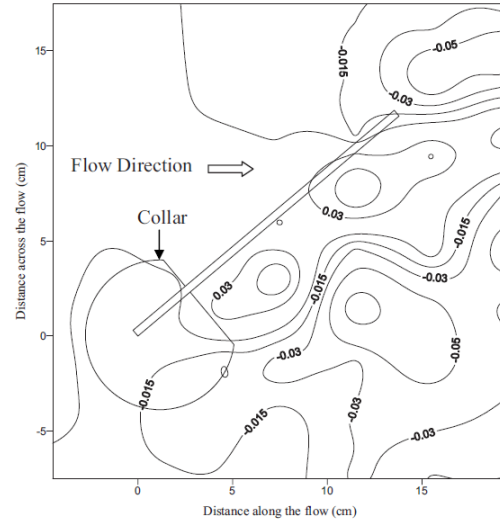


Fig. 3. Scour pattern for a rectangular vane with Collar R-1 ($F=0.13$, $\alpha=40^\circ$, $d_{50}=0.225$ mm, dimensionless contour interval)

Ubicación del collarín en el panel

Figura 3-12 Ilustración de la forma y ubicación del collarín. Fuente: tomado y adaptado de las Figuras 2 y 3 del artículo original (Gupta et al., 2010).

En la referencia L7, la rugosidad del aluminio es de 0.05 mm, y la altura del panel de 0.05 m. correspondiente a una relación de $T/d_0 = 0,7$ (donde T es la altura de la lámina de agua por encima del panel y d_0 es la altura total de la lámina de agua); para la altura del panel de 0.075 m, la relación es de $T/d_0 = 0,5$.

Se observa en la Tabla 3-5 que 3 de las 7 experiencias de laboratorio realizadas posicionan los paneles hacia la banca exterior del canal, lo cual indica un interés especial en el uso de estas estructuras en la prevención de la socavación de la banca; fenómeno natural ocurrido principalmente en los cauces de tipo meándrico. El tipo de materiales utilizados guarda correspondencia con los probables materiales con los que se pudieran construir estas estructuras en casos reales, en especial el concreto, usado tradicionalmente. El tipo de material del panel puede influir en la adherencia de las partículas del lecho a la estructura, no obstante, no se evidencia que dentro de un mismo ensayo se hayan utilizado materiales diferentes para probarlos en igualdad de condiciones de flujo (agua y sedimentos) e instalación dentro del canal. Respecto a la forma del panel, el 71% de los ensayos utilizó paneles rectangulares, donde para todos los casos se observa una relación ancho/altura > 1 . Se entiende la preferencia por esta forma debido a las facilidades en los procesos constructivos que esta ofrece (placas planas).

Tabla 3-5 Características del panel (continuación)

No	PANEL						
	Arreglo		Ángulo de ataque	Separaciones			
	Paneles por fila	No. de Filas		δ_b [m]	δ_n [m]	δ_{es} [m]	δ_s [m]
L1	2	26	15°	0.572	0.508	N.A.	1.979 1.292*
L2	1 para todos los ensayos	a. 1 b. 1 c. 1 d. 1 e. 1 f. 2 g. 2 h. 3 i. 1 j. 1	a. 20° b. 25° c. 30° d. 25° e. 25° f. 25° g. 25° h. 25° i. 35° j. 45°	0		a. 0.94 b. 0.94 c. 0.94 d. 0.41 e. 1.25 f. 0.94 / 0.94 g. 1.25 / 1.25 h. 1.25*3 i. 1.25 j. 1.25	0.09
L3	1	1	15°, 30°, 45°, 60° y 90°			N.A.	
L4	1 y 4		20°, 30° y 60°	0		N.A.	
L5	1	1	40°			N.A.	
L6	1, 2, 3 (en paralelo o zigzag)			1 panel: 0.175 2, 3 paneles: 0.095	0.095	N.A.	0.50
L7			10° y 20°			N.A.	

* Datos estimados a partir de la información suministrada en la respectiva referencia bibliográfica.

En la tabla anterior, los campos de separaciones corresponden a:

- δ_b : distancia del panel a la banca a proteger.
- δ_n : distancia de separación entre dos paneles de una misma fila.
- δ_{es} : para el caso del laboratorio L2, esta distancia representa la distancia del primer panel aguas arriba del estribo del puente.
- δ_s : distancia de separación entre filas de paneles.

Para ejemplificar lo anterior, en la Figura 3-4 se ilustran estas distancias.

De la Tabla 3-5 (continuación), se observa que la cantidad de paneles utilizados en los ensayos va de 1 a máximo 4 por fila, con un número de filas de 1 a 26, no obstante, la mayoría de ensayos incluyó un rango de 1 a 3 filas por ensayo. El número de filas es directamente proporcional a la longitud erosionada de la banca exterior. Complemento a lo anterior, se observa que cuando se dispone más de un panel por fila, sólo se realizó un ensayo con dos disposiciones distintas en planta (L6), el cual presenta disposiciones en paralelo y en zig-zag (ver Figura 3-13 para una mejor explicación).



Instalación en paralelo



Instalación en zig zag

Figura 3-13 Posicionamiento de los paneles en el laboratorio L6. Fuente: tomado y adaptado de las Figuras 4 y 5 de (Barani, 2013).

El ángulo de ataque varía entre los 10° y 60° , excepto un posicionamiento perpendicular al flujo en la referencia L3, (90°). Las referencias consideradas no presentan un registro completo de las diferentes separaciones entre los paneles arriba indicadas, lo cual daría mayor precisión sobre su posicionamiento en el cauce.

3.2.7 Resultados relevantes de los ensayos

De manera general, el objetivo de los ejercicios de laboratorio considerados ha sido el de reducir los problemas de socavación presentados en la banca externa del canal, socavación cercana a las pilas de los puentes, o la socavación local que se produce en el borde aguas arriba del mismo panel (referencia L5); por tanto, los resultados se enfocan en el dimensionamiento y posicionamiento de los paneles en el canal que logren los objetivos de cada caso. Las variables a las cuales se les presta una mayor atención dentro del presente análisis, son el ángulo de instalación del panel respecto a la dirección del flujo y su geometría, y los cambios que estos producen en la sección transversal y longitudinal del canal. A continuación, se detalla los resultados más importantes de los ensayos de laboratorio anteriormente descritos, para cada uno de estos aspectos.

Sección transversal

Como se sabe, la sección transversal de los cauces tiene formas diferentes según el segmento en el que se encuentre ubicada. En un segmento recto, la sección transversal

tiende a ser simétrica, mientras que en un segmento de curva, debido a la fuerza centrífuga percibida por el flujo, la sección transversal se sedimenta en la margen interna y se socava en la margen externa.

Los resultados de la referencia L1 indican que, producto de la instalación de los paneles la sección transversal cambió de una forma representativa de curva a una forma representativa de un segmento recto, presentándose una reducción en la velocidad cercana a la orilla externa y así mismo, un cambio en la profundidad de un 25% de incremento en la barra de punto, y con ello disminución en la profundidad del foso de erosión. Para el caso de la referencia L2, se indica dentro de sus resultados, que con el uso de los paneles se logra una reducción en la socavación del estribo de hasta un 95% respecto a la inicialmente presentada (Johnson et al., 2001). La referencia L4, concluye para este aspecto, que el uso de los paneles redistribuye los sedimentos en la sección transversal, creando secciones transversales más simétricas.

Los resultados de la referencia L6 en la curvatura de 180°, indicaron que tres paneles curvados en arreglo de zigzag son más efectivos en la protección de la banca, seguidos de tres paneles rectos en arreglo de zigzag; con una profundidad máxima de erosión de 17,5 mm a 3 cm de distancia de la banca para ambas formas, y profundidades de erosión promedio de 9 mm y 8 mm respectivamente. Para los tres paneles curvados en una fila en zigzag, las proporciones de la profundidad máxima de erosión en la banca externa de la curva a un panel en una fila fue de 62%, a dos paneles en una fila en paralelo de 38%, a dos paneles en zigzag de 16.7%, y a tres paneles en una fila en paralelo de 28.6%. Así mismo, los resultados de la referencia L6 en la curva de 90°, evidenciaron que la instalación de tres paneles en una fila, en comparación con dos o un panel por fila, genera un mejor rendimiento en la protección de la banca; siendo de mayor rendimiento la forma curvada en paralelo.

Sección longitudinal

En la referencia L1, se menciona que los cambios en las profundidades medias, pendiente longitudinal de la superficie del agua y velocidades a través del canal se consideraron insignificantes. Esta misma apreciación respecto a la pendiente longitudinal es indicada en la referencia L4, donde se señala que después de instalar los paneles en la curva, la

pendiente media longitudinal (0.00133) no cambió significativamente. De otra parte, la referencia L7, indica que el área influenciada en planta por la acción de los paneles sumergidos, no se extiende en una longitud de más de seis veces el nivel del agua en sentido longitudinal aguas abajo del panel, por lo cual se puede afirmar que su efecto es local.

Ángulo de ataque

La mayoría de los resultados de laboratorio sugieren un ángulo de ataque óptimo respecto a la dirección del flujo, teniendo en cuenta la reducción de la socavación obtenida en los diferentes ensayos realizados. La referencia L1, menciona un ángulo entre los 10° y 17°, para una reducción de la profundidad cercana al 25%. La referencia L2 un ángulo de 25° a 30°, logrando una reducción en la socavación del estribo de hasta un 95%. Las referencias L3 y L4 un ángulo de 30°. Por último, la referencia L5 sugiere un ángulo de 40°, con el cual la profundidad de erosión en el borde delantero del panel era cero; recordando que este último laboratorio desarrolla el collarín como un aditamento al panel para reducir la socavación local que se produce en su borde aguas arriba.

3.3 Ejercicios computacionales

Los ejercicios computacionales llevados a cabo para el estudio de los paneles sumergidos han sido desarrollados para diferentes condiciones de formas del canal, dimensiones del panel y ángulo de ataque. En la Tabla 3-6 se presenta el listado de referencias bibliográficas objeto de análisis en el presente trabajo final. En la columna "Id.", se adopta la convención "EC" para indicar que se trata de un artículo de ejercicio computacional, seguido del número consecutivo. Así mismo, la columna "Cuartil", indica la clasificación de la revista en la cual ha sido publicado el artículo, tomada de la página web del ranquin Scimago Journal & Country Rank (www.scimagojr.com), como un indicador de la importancia de los artículos consultados para la realización del presente análisis.

Tabla 3-6 Ejercicios computacionales considerados

Id.	Año	Nombre del Artículo	Cuartil	Autor
EC1	2008	Interaction between submerged vanes for sediment management	Q1	H T Ouyang, Lai, Yu, & Lu
EC2	2009	Investigation on the Dimensions and Shape of a Submerged Vane for Sediment Management in Alluvial Channels	Q1	Huei-tau Ouyang
EC3	2011	Laboratory Investigation of Submerged Vane Shapes Effect on River Banks Protection	Q4	Behbahan
EC4	2013	Design Optimization of a Submerged Vane with Streamlined Profile for Sediment Management in Rivers	Q3	Huei Tau Ouyang & Lai
EC5	2016	Optimization of submerged vane parameters	Q2	Sharma, Jain, & Ahmad
EC6	2016	Optimizing the Spacing of Submerged Vanes across Rivers for Stream Bank Protection at Channel Bends	Q1	H. Ouyang & Lu

3.3.1 Objetivos de los ejercicios computacionales considerados

Se identificaron diferentes propósitos en la realización de los ejercicios computacionales considerados, los cuales se resumen a continuación:

- Referencia EC1: explicar la interacción entre los paneles sumergidos para el manejo de los sedimentos, en un canal curvo.
- Referencia EC2: investigar la efectividad en el control de sedimentos de un panel en función de su tamaño y forma, en un canal recto.
- Referencia EC3: estudiar el efecto de las formas de los paneles sumergidos en la protección de riberas, en un canal recto.
- Referencia EC4: trabajar en la optimización del diseño del perfil del panel, respecto a su forma, para el control de sedimentos, en un canal curvo.
- Referencia EC5: obtener parámetros óptimos de diseño de paneles para arreglos simples y múltiples, referentes al ángulo de ataque, longitud y altura del panel, y separación longitudinal entre filas de paneles; lo anterior, en un canal curvo.
- Referencia EC6: determinar la distribución espacial óptima de los paneles sumergidos situados en una curva de un cauce fluvial, para protegerla de la erosión.

3.3.2 Métodos y software utilizado

La referencia EC1 menciona que las formulaciones propuestas en ese trabajo se resolvieron usando el software MATLAB. La referencia EC2 se desarrolló utilizando un

esquema de diferencias finitas. Por su parte, la referencia EC3 realizó la modelación utilizando software ANSYS y SURFER3. Respecto a la referencia EC4, el procedimiento de optimización desarrollado se basó en un algoritmo genético. Así mismo, la referencia EC5 utiliza la dinámica de fluidos computacional en el desarrollo de sus análisis.

3.3.3 Resultados relevantes

Los resultados extraídos de las referencias arriba indicadas se agrupan en los siguientes tópicos, exaltando que todas las referencias fueron validadas con los trabajos de otros autores, excepto la referencia EC4; no obstante, esta última también se considera un aporte al conocimiento de los paneles.

Separación lateral

La referencia EC1 señala que el intervalo de trabajo apropiado para la separación lateral entre paneles, es decir, la separación entre paneles de una misma fila, es de aproximadamente 0,6 a 1,5 veces su longitud. Lo anterior, para un sistema de tres paneles por fila. Por su parte, la referencia EC5 indica que, con el fin de generar la estructura de un vórtice coherente, los paneles deben ser colocados en un arreglo a una distancia transversal de dos veces la altura de los mismos. Así mismo, la referencia EC6 menciona que la distribución espacial óptima de los paneles está relacionada principalmente con el radio de la curva del canal y la anchura del mismo.

Altura del panel

La referencia EC2, en la cual se estudió un único panel instalado en un ángulo de ataque de 25°; señala que, para un panel rectangular, la altura óptima de los paneles está dentro 0.58 a 0.70 veces la profundidad del agua. Por su lado, la referencia EC5 indica una altura óptima del panel $H = 0,4$ veces la profundidad de flujo.

³ SURFER es un programa de mapeo basado en cuadrícula que interpola datos XYZ espaciados irregularmente en una forma de rejilla espaciada de manera regular. Las cuadrículas también se pueden importar de otras fuentes, como la United States Geological Survey (USGS). La cuadrícula se utiliza para producir diferentes tipos de mapas, incluidos el contorno, el relieve de color y Mapas de superficie 3D entre otros (Guía de Usuario Surfer).

Longitud del panel

En la referencia EC5 se indica que en el ejercicio con un único panel, la longitud del mismo no puede ser optimizada, debido a que a mayor área de contacto, se obtuvo una mayor sustentación.

Ángulo de ataque

En la referencia EC2 se trabajó un ángulo de ataque de 25°. De otra parte, la referencia EC5 señala un ángulo óptimo de 30° para un panel único.

Forma del panel

Los resultados de la referencia EC3 muestran que los paneles curvados y angulados en comparación con los paneles planos son más eficaces en la protección de las bancas en un 35% y 20%, respectivamente.

Sección transversal del canal y topografía del lecho

La referencia EC2 señala que los cambios en la topografía del lecho afectados por un único panel son pequeños. Por su parte, la referencia EC3 menciona que se lograron cambios significativos en la profundidad sin causar cambios mayores en el área de la sección transversal, la pendiente de la energía y el transporte de sedimentos aguas abajo.

Respecto a cuánto aumentó el nivel del lecho una vez utilizados los paneles sumergidos, de la referencia EC1 se puede deducir que el panel quedó cubierto alrededor de un 50% de su altura, ver Figura 3-14. En la referencia EC2 se reportan aumentos del lecho de máximo 60%, como se puede observar en la Figura 3-15 y en la Figura 3-16.

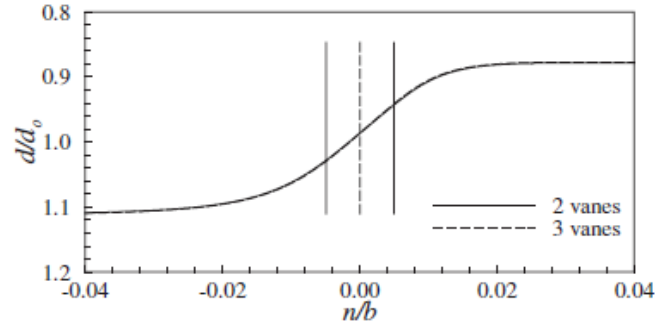


Figura 3-14. Perfiles del lecho d/d_0 (n/b) inducidos por un sistema de 2 paneles con $\delta/L = 0.5$ y un sistema de 3 paneles con $\delta/L = 0.25$ para $H_0/L = 0.5$. $\alpha = 20^\circ$. Tomado de Figura 5 (H T Ouyang, Lai, Yu, & Lu, 2008)

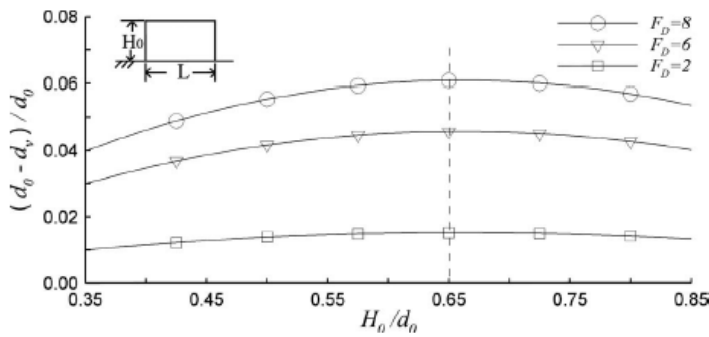


Figura 3-15 Cambio en el nivel del lecho cercano a la banca inducido por el panel vs H_0/d_0 para diferentes valores de F_D (panel rectangular, $L/d_0 = 1$, $\alpha = 20^\circ$). Tomado de Figura 9 (Huei-tau Ouyang, 2009)

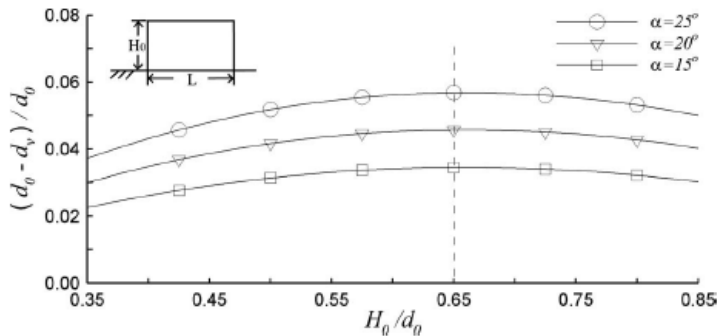


Figura 3-16 Cambio en el nivel del lecho cercano a la banca inducido por el panel vs H_0/d_0 para diferentes valores de α (panel rectangular, $L/d_0 = 1$, $F_D = 6$). Tomado de Figura 10 (Huei-tau Ouyang, 2009)

Para el caso de la referencia EC3, se registra un aumento del nivel del lecho entre un 20% y 35%, a manera de ejemplo se presenta la Figura 3-17. Para la referencia EC4 y EC5 no se encontró una gráfica que permitiera identificar la evolución del lecho. Para el caso de la

referencia EC6 se registra en la validación del ejercicio, que los datos son similares con los realizados por Odgaard, obteniéndose una elevación del lecho similar a la encontrada por Odgaard, ver Figura 3-18.

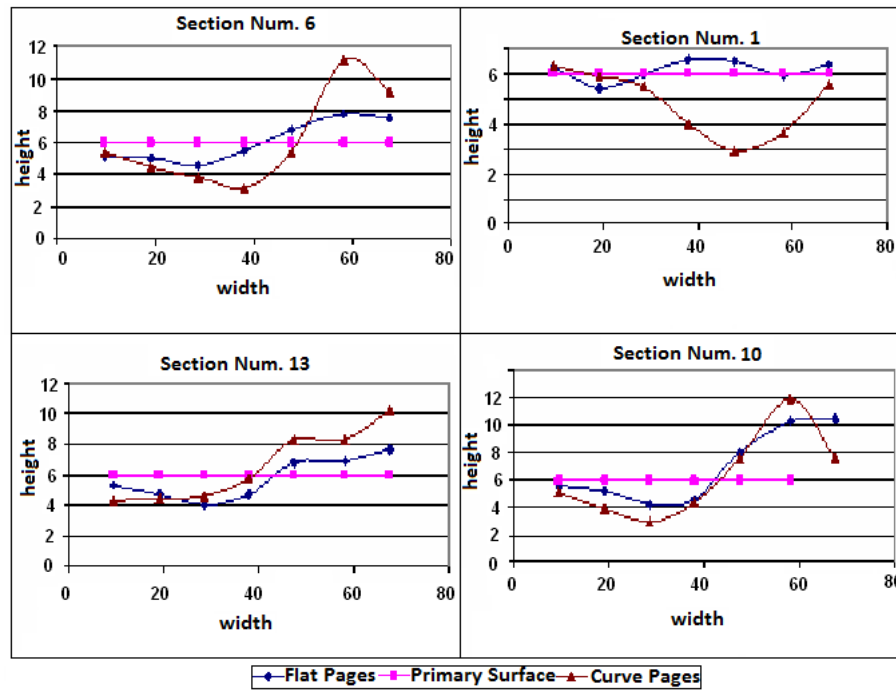


Figura 3-17 Cambios en el lecho en varias secciones transversales de canales para el diseño de paneles en tres filas paralelas. Tomado de Figura 5 (Behbahan, 2011)

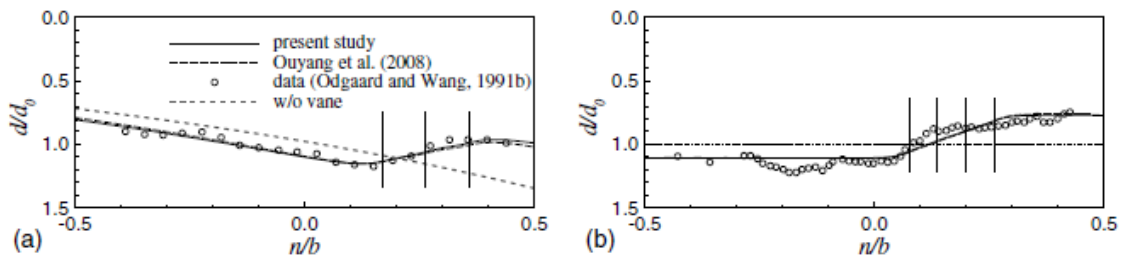


Figura 3-18 Comparación de las predicciones del modelo y datos experimentales: a. canal curvo, b. canal recto. Tomado de Figura 6 (H. Ouyang & Lu, 2016)

3.3.4 Validación de los resultados

En el caso de la referencia EC1, el modelo se verificó comparando los perfiles de lechos transversales calculados con datos experimentales de Odgaard y Wang (1991b), obteniendo una coherencia importante con los mismos (H T Ouyang et al., 2008). Así mismo para la referencia EC2, sus resultados se contrastaron con Odgaard y Spoljaric

(1986) y Wang (1991), teniendo una buena concordancia (Huei-tau Ouyang, 2009). Por su parte, los resultados del ejercicio computacional de la referencia EC3 se confirmaron con los resultados del laboratorio físico de la Universidad de Shahid Bahonar de Kerman, Irán, (Behbahan, 2011). Por su parte, los resultados de la referencia EC5 fueron comparados con los resultados obtenidos por Wang y Odgaard (Wang & Jacob Odgaard, 1993), encontrándose que eran concordantes (Sharma, Jain, & Ahmad, 2016). Finalmente, en la referencia EC6 se indica que el modelo desarrollado se verificó mediante comparaciones con datos de medición de (Odgaard y Wang, 1991b) y Ouyang et al.(2008), siendo acordes (H. Ouyang & Lu, 2016). En la referencia EC4 (Huei Tau Ouyang & Lai, 2013), no se indica una validación de sus resultados, por tanto, se considera como un caso general que no representan un caso real ya sea de laboratorio o instalación en campo. Las demás referencias, como se explicó anteriormente, se consideran como casos particulares que fueron validados por sus autores.

3.4 Casos reales de aplicación

Los casos de aplicación considerados corresponden a la protección contra la socavación en curvas, específicamente en la banca externa (estabilización de la banca), estabilización del lecho y estabilización de la alineación del canal. A continuación, se presentan las características principales, tanto del cauce como de los paneles instalados. Al igual que en los ensayos de laboratorio se utiliza como método de identificación de los casos reales de aplicación la sigla “CR”, seguida del número consecutivo, ejemplo CR1. Las tablas presentadas en este numeral tienen como base las tablas 5-1, 5-2 y 5-3 de (Odgaard, 2009), esta información se complementó con columnas adicionales cuyo encabezado termina con el símbolo *.

3.4.1 Características del cauce

A continuación, se presentan las características del cauce en el cual se realizaron instalaciones de paneles sumergidos:

Tabla 3-7 Características del cauce: ubicación y geometría

No.*	Nombre Río	País*	Estado*	Tipo de cauce*	Ancho de sección Transversal [m]	Forma en Planta*
CR1	East Nishnabotna	USA	Iowa	Meándrico	60	Curva
CR2	Wapsipinicon	USA	Iowa	Meándrico	80- 100	Curva
CR3	North Fish Creek	USA	Wisconsin	Meándrico	15	Curva
CR4	Feng-Shan Creek	China	Taiwan	Meándrico	180	Curva
CR5	West Fork Cedar	USA	Iowa	Meándrico	30-40	Recta

Se observa en la anterior tabla que la mayoría de casos documentados se presentan en USA, principalmente en Iowa, porque allí fue donde Odgaard desarrolló sus postulados teóricos, protocolos de diseño, ensayos de laboratorio y posteriores instalaciones de campo. Se tienen evidencias de instalación desde el año 1984. El ancho de los canales tiene un amplio rango, desde 15 hasta los 180 metros. La mayoría de instalaciones se realizaron en curvas de cauces meándricos. Así mismo, en la Tabla 3-8, se observa que las pendientes longitudinales de los cauces van desde 0.00049 hasta 0.007, correspondientes a cauces de llanura. La profundidad máxima registrada para el diseño fue de 4.5 metros. El rango de caudales también resultó amplio, desde los 26 hasta los 1500 m³/s. Los números de Froude del sedimento ($u_0/\sqrt{g\phi_{sed}}$) representan un rango amplio desde 5.0 hasta 20.

Respecto a los sedimentos, se tienen que el material del lecho en la mayoría de los casos correspondió a arena, con diámetro promedio de 0.45 mm. Sólo se presenta un caso con lechos de grava, y un caso con un lecho mixto entre guijarros, grava y arena.

Tabla 3-8 Características del flujo

No.*	Pendiente Longitudinal del canal*	AGUA				SEDIMENTOS		
		Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	Caudal [m ³ /s]	Parámetro de Resistencia, m	Número de Froude F _{sed}	Material Lecho*	Tamaño [mm]
CR1	0.00065 - 0.00070	2.4	1.3	180	4	20	Arena	0.4
CR2	0.00053	3.5	1.1-1.4	400	3-4	16-20	Arena	0.5
CR3	0.0070	1.4	1.2	26	1.5	1.1**	Arena	0.06 – 256**
CR4	0.0015	3.68	2.26	1500	4.5	5.0	Grava	21.2
CR5	0.00049	1.9-2.1	1.2-1.8	100	4	13	Arena	0.5

Para el caso CR3, debido a que se indica que la composición de tamaños es ampliamente variada, desde guijarros hasta arenas, el autor del presente trabajo final ha diligenciado este campo de "Tamaño" con valores aproximados, solamente como un indicativo de referencia. Acto seguido, y definido este rango de valores para el tamaño de los sedimentos, se calcula el número de Froude de los sedimentos, con el valor promedio de tamaños (128 mm), obteniendo un valor de 1.1, el cual se diligencia en el campo correspondiente.

3.4.2 Características del sistema de paneles

A continuación, se realiza la descripción de las características principales de los paneles utilizados en las diferentes instalaciones: la mayoría de los casos es para lograr una estabilización de las bancas externas, seguido de la estabilización del lecho. Se tiene diversidad de materiales de fabricación del panel, como madera, concreto y acero (en tablestacas).

Tabla 3-9 Características del sistema de paneles

No.*	Fecha instalación*	Propósito de la obra	Sumersión de paneles T/d _o	Material*	Forma*	Profundidad Hincada soporte [m]*
CR1	Jul-sep/1985	Estabilización de la banca	1.0	Madera	Rectangular	
CR2	May/1988	Estabilización de la banca	0.7	Concreto reforzado	Trapezoidal	4.6
CR3	Ago/2000	Estabilización de la banca	0.6	Polietileno de alta densidad	Rectangular	1
CR4	2006	Estabilización de la banca	0.4-0.6	Acero	Tablestaca	4.4 - 3.4
CR5	1984	Estabilización del lecho	0.7	Acero	Tablestaca	

Respecto a sus dimensiones, no se supera en longitud los 3.7 m y en altura los 2.6 m. En general el número de paneles por fila es de 3 y en las instalaciones más grandes se tienen 33 filas, lo anterior según la dimensión del lugar afectado. El ángulo de ataque esta entre los 20 y 30 grados.

Tabla 3-9 Características del sistema de paneles (continuación)

No.*	Dimensiones			Arreglo			Ángulo de ataque*	Separaciones*		
	Longitud [m]	Altura [m]	Espesor [m]*	Paneles por fila*	No. de paneles	Filas*		δ_b [m]	δ_n [m]	δ_s [m]
CR1	3.66	0.91	0.076	2 y 3	77	33	20	6.1	3.7	
CR2	2.7	0.9		2	28	14	20			
CR3	0.91	0.43	0.01	3 x sitio	45	15 x sitio			0.91	4-5
CR4	3.2-5.2	1.6-2.6		2	16	8	25	5.5	3.7	27.6
CR5	3.7	0.6		3	12	4	30			

3.4.3 Resultados de las instalaciones en campo

A continuación, se presenta una síntesis de los resultados obtenidos por los autores de los casos considerados, en función del propósito para el cual se realizó la instalación de los paneles sumergidos en los diferentes cauces.

Estabilización de la banca

En el caso de la referencia CR1 es preciso mencionar que tiene como antecedente el estudio en un modelo físico de laboratorio en el cual se evaluaron diferentes condiciones de flujo y sedimentos, allí se valoró la eficacia de los paneles en la reducción de la profundidad y velocidad del flujo en la banca externa en una curva del cauce aluvial (A. Odgaard & Lee, 1984). Dentro de las conclusiones más importantes respecto a las variables de diseño a las cuales llegaba este ensayo de laboratorio, se tiene que el sistema de paneles debe ser dimensionado para condiciones de banca llena. La altura del panel, H , debe elegirse tal que la relación H/d permanezca dentro del rango $0.2 < H/d < 0.5$ en todos los caudales que causan erosión; la longitud del panel, L , debe ser del orden de cuatro veces su altura; los paneles deben formar un ángulo de 10 a 15 grados con la dirección del flujo y el espaciamiento lateral δ_n de los paneles individuales debe ser menor o igual a dos veces la profundidad del agua. Respecto a los resultados obtenidos, (A. Odgaard & Lee, 1984) señalan que los experimentos de laboratorio demostraron que un sistema de paneles sumergidos diseñados según los principios desarrollados en dicho estudio puede eliminar totalmente el flujo secundario, y su consecuencia (socavación de la banca), no obstante, y debido a las condiciones idealizadas del modelo de laboratorio, no era posible establecer hasta qué punto el sistema de paneles podía prevenir la erosión de la banca en el prototipo (realidad).

Sobre la base de las directrices generales desarrolladas en los estudios de laboratorio del Instituto de Investigación Hidráulica de Iowa (IIHR por sus siglas en inglés) mencionados anteriormente, se diseñó un sistema de paneles para cubrir una longitud de 560 m en la curva del río East Nishnabotna, Iowa. Esta curva, previamente a la instalación de los paneles estaba migrando aguas abajo y hacia un lado, a una velocidad casi constante de 6-9 m por año (ver Figura 3-19).

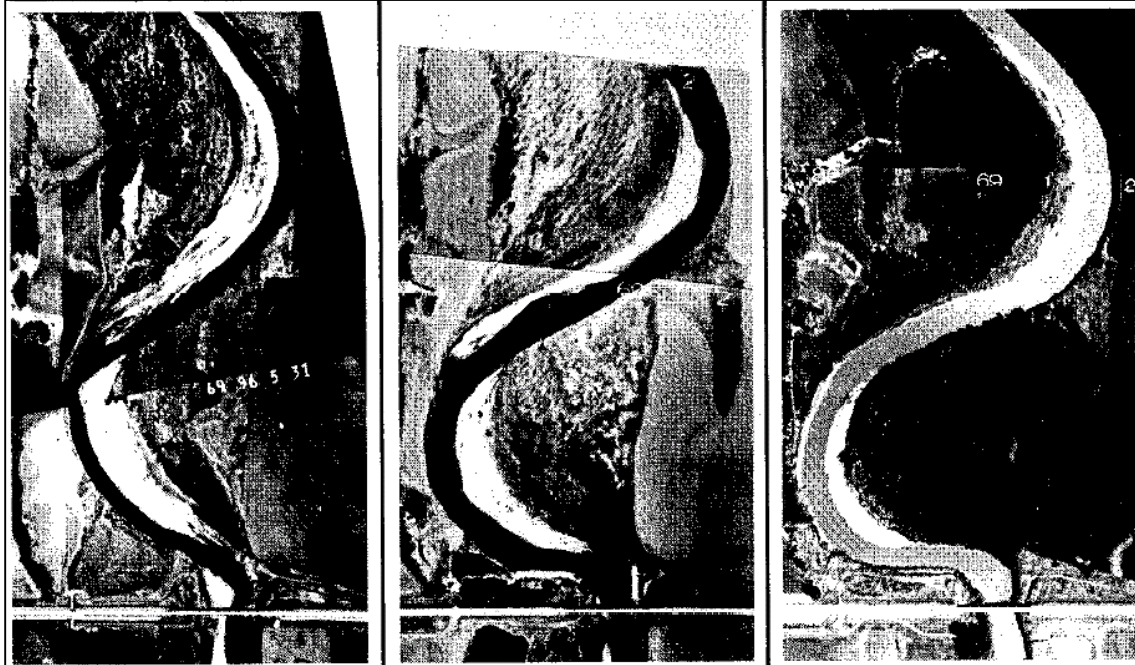


Figura 3-19 Evolución del cauce, años 1972, 1977 y 1985. Fuente: tomada de (A. J. Odgaard & Mosconi, 1987)

Una vez instalado el sistema de paneles con las características mencionadas en las tablas anteriores (ver Figura 3-20), se evaluó su rendimiento en la primavera de 1986, encontrándose que, a pesar de la inusualmente alta escorrentía, la margen exterior de la curva retrocedió a menos de 1 - 2 m durante el periodo de evaluación. También se menciona que el diseño produjo una reducción de la pendiente transversal del lecho de al menos un 50% y una reducción de la velocidad cerca de la orilla de 10% a 20%, trasladando la velocidad máxima hacia el centro del canal (A. J. Odgaard & Mosconi, 1987). Un ejemplo del cambio generado en la sección transversal del cauce se presenta en la Figura 3-21.

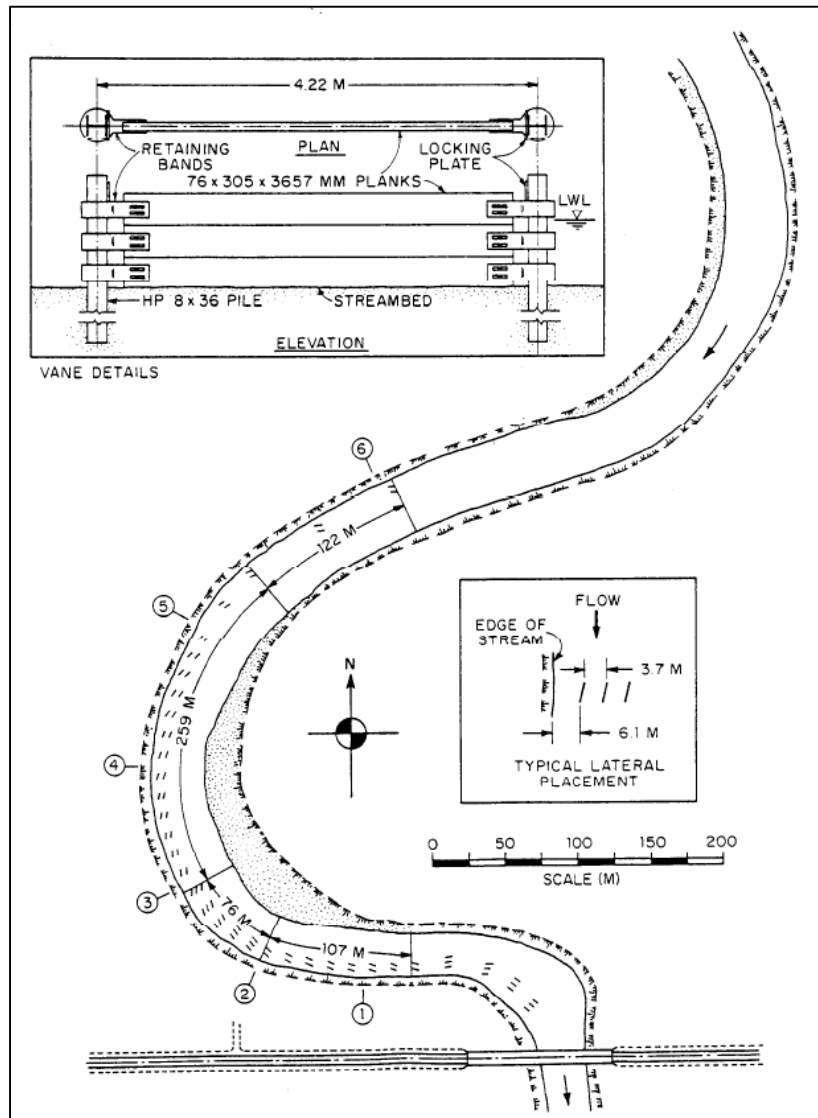


Figura 3-20 Detalle del panel y la instalación sobre el cauce. Fuente. Tomado de (A. J. Odgaard & Mosconi, 1987)

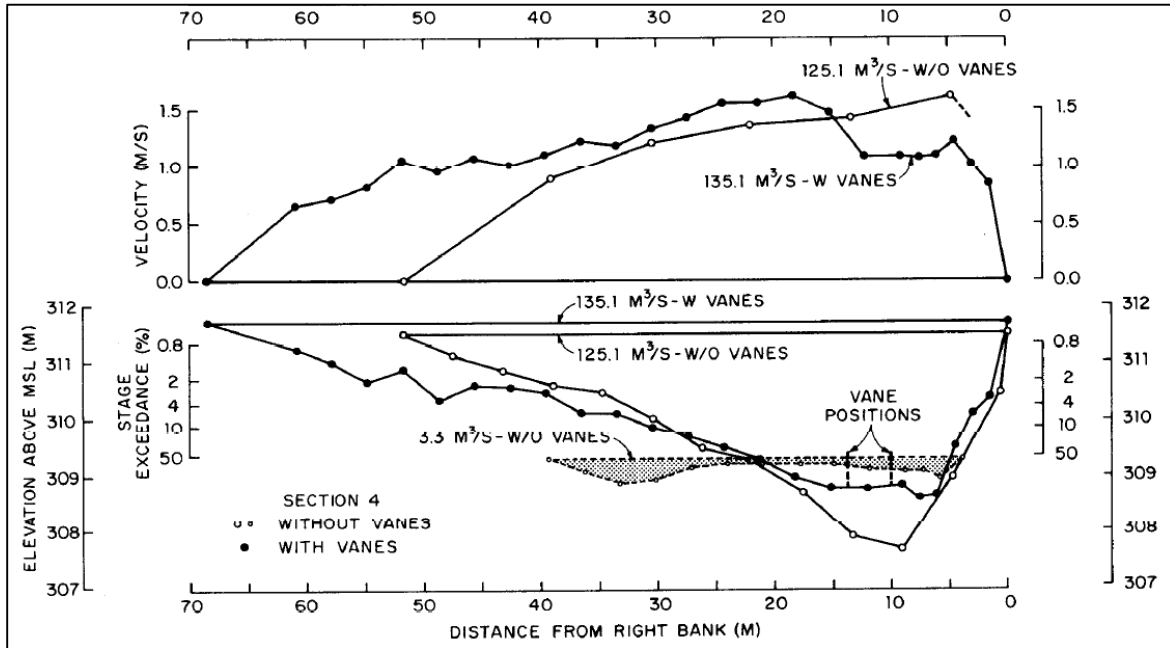


Figura 3-21 Medidas de la sección transversal antes y después de la instalación de los paneles. Tomado de la Figura 8 de (A. J. Odgaard & Mosconi, 1987)

Para el caso CR2, la curva objeto de estudio se estaba moviendo a una tasa promedio de 3 m/año hacia un camino rural, poniendo en consecuente peligro la estructura de un puente (ver Figura 3-22).



Figura 3-22 Fotografía aérea curva de estudio. Fuente tomada de la figura 5-5 de (Odgaard, 2009)

Se decidió proteger el primer tercio aguas arriba de la curva. Se menciona que una vez instalados los paneles, los años 1988 y 1989 fueron secos, sin amenazas de mayor erosión, mientras que 1990 fue un año muy húmedo con inundaciones significativas. La

porción de la curva protegida con paneles no mostró movimiento y, de hecho, mostró evidencia de depositación en el borde de la banca exterior, mientras que la porción de banca no protegida retrocedió hasta 13 m durante los flujos de 1990 (Odgaard, 2009). A manera de comparación en la Figura 3-23 y Figura 3-24, se ilustra la condición antes y después de la instalación de los paneles de la curva del cauce.

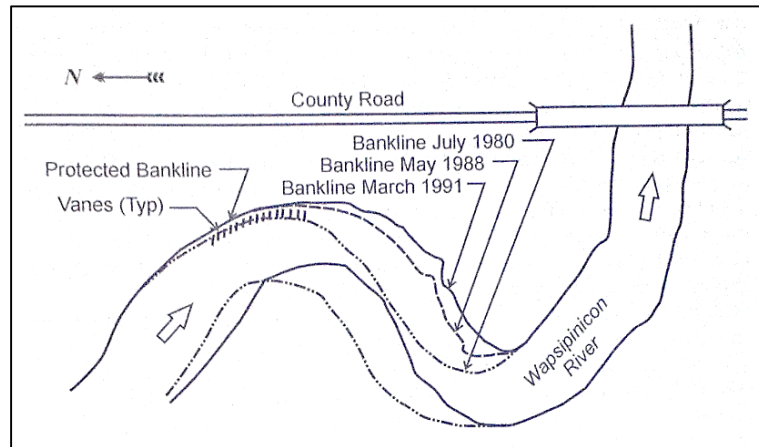


Figura 3-23 Implantación del diseño y evolución de la línea de banca. Fuente: tomada de la figura 5-12 de (Odgaard, 2009)

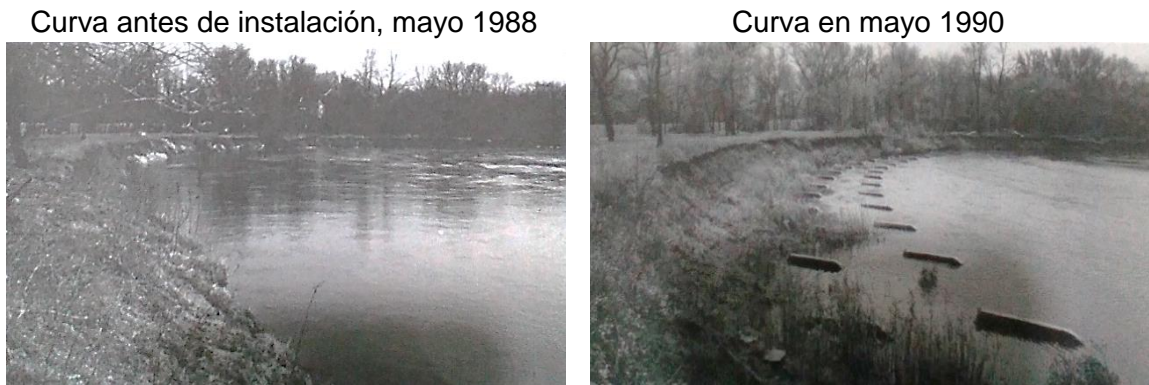


Figura 3-24 Comparativo de la curva antes de la instalación y 2 años después de la misma. Fuente: tomado y adaptado de las figuras 5-6 y 5-11 de (Odgaard, 2009)

En el caso CR3, y a manera de contexto, según los autores del artículo, las fallas en el acantilado ocurrían episódicamente y estaban relacionadas con eventos de inundación, ciclos de congelación/descongelación o períodos de intensa lluvia o deshielo. Durante las inundaciones, la base del acantilado se erosionaba por el agua, haciendo que la parte superior del mismo finalmente fallara. Se consideró que los paneles podrían ser

ambientalmente menos intrusivos porque la banca se dejaría en su estado natural y los paneles se instalarían a mano, minimizando la compactación y la perturbación propia de grandes equipos de movimiento de tierra, teniendo en cuenta que allí había zonas de desove de trucha (Fitzpatrick, F.A., Peppler, M.C., Schwar, H.E., Hoopes, J.A., Diebel, 2005). En la Figura 3-25 y Figura 3-26, se ilustra la implantación de la instalación de los paneles en los dos sitios intervenidos.

Como conclusiones del CR3, se tiene que en el sitio denominado "16.4" los datos de la sección transversal del canal entre los años 2000 a 2003 indican que los paneles provocaron que el thalweg se alejara de la base del acantilado (fuera de la curva) hacia la barra puntual (dentro de la curva), permitiendo la depositación en la base del acantilado, de aproximadamente 300 m³; y por el contrario, en el lado izquierdo del canal, el lecho y una barra se erosionaron (ver Figura 3-27). Se resalta que, gran parte del cambio de la morfología del canal resultó de la inundación de abril de 2001, por tanto los autores consideraron que los paneles constituyen una técnica útil para reducir la erosión del acantilado en flujos de alta energía y serpenteantes (Fitzpatrick, F.A., Peppler, M.C., Schwar, H.E., Hoopes, J.A., Diebel, 2005).

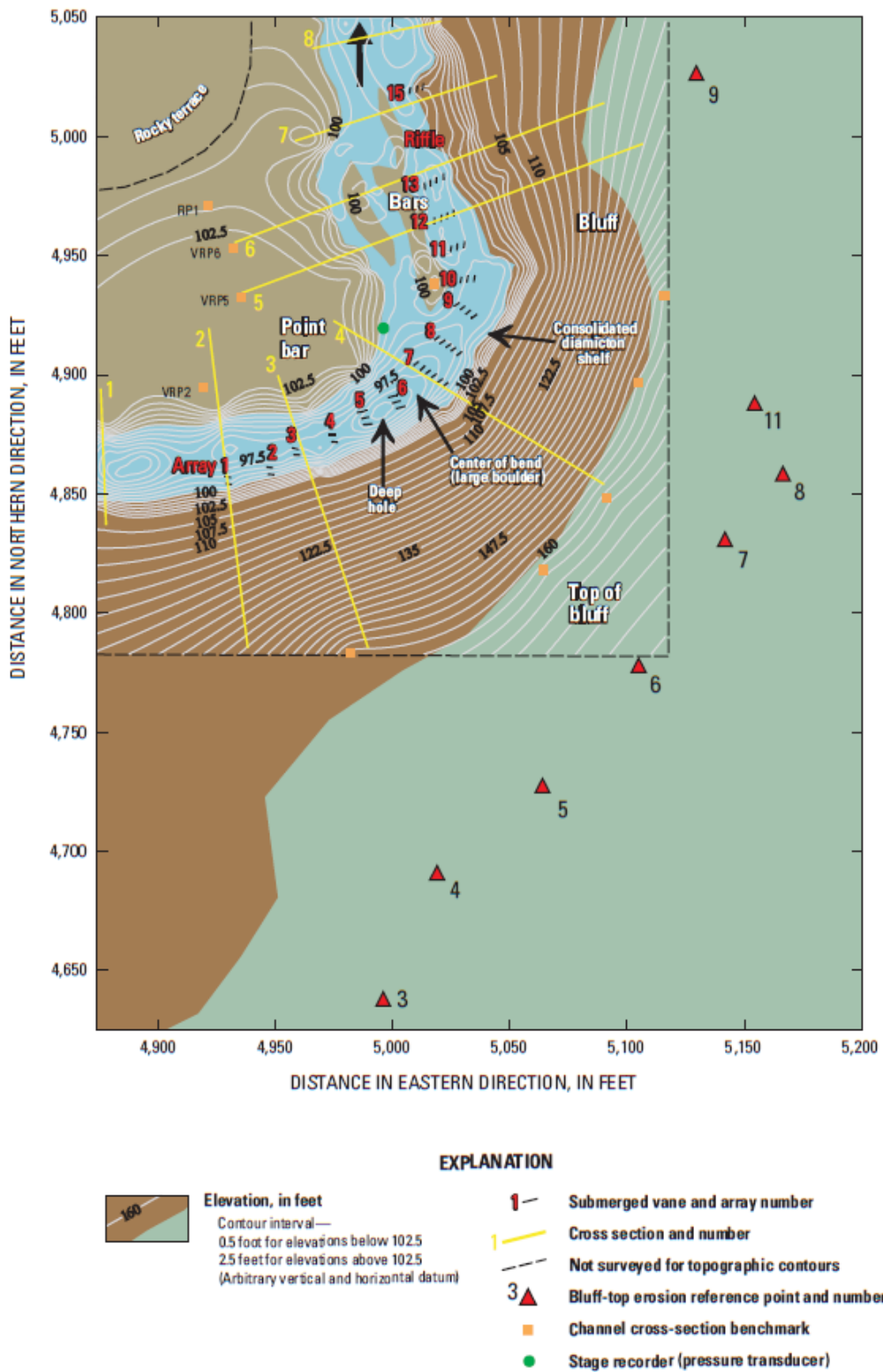


Figura 3-25 Implantación de paneles en el sitio 16.4. Tomado de (Fitzpatrick, F.A., Peppler, M.C., Schwar, H.E., Hoopes, J.A., Diebel, 2005).

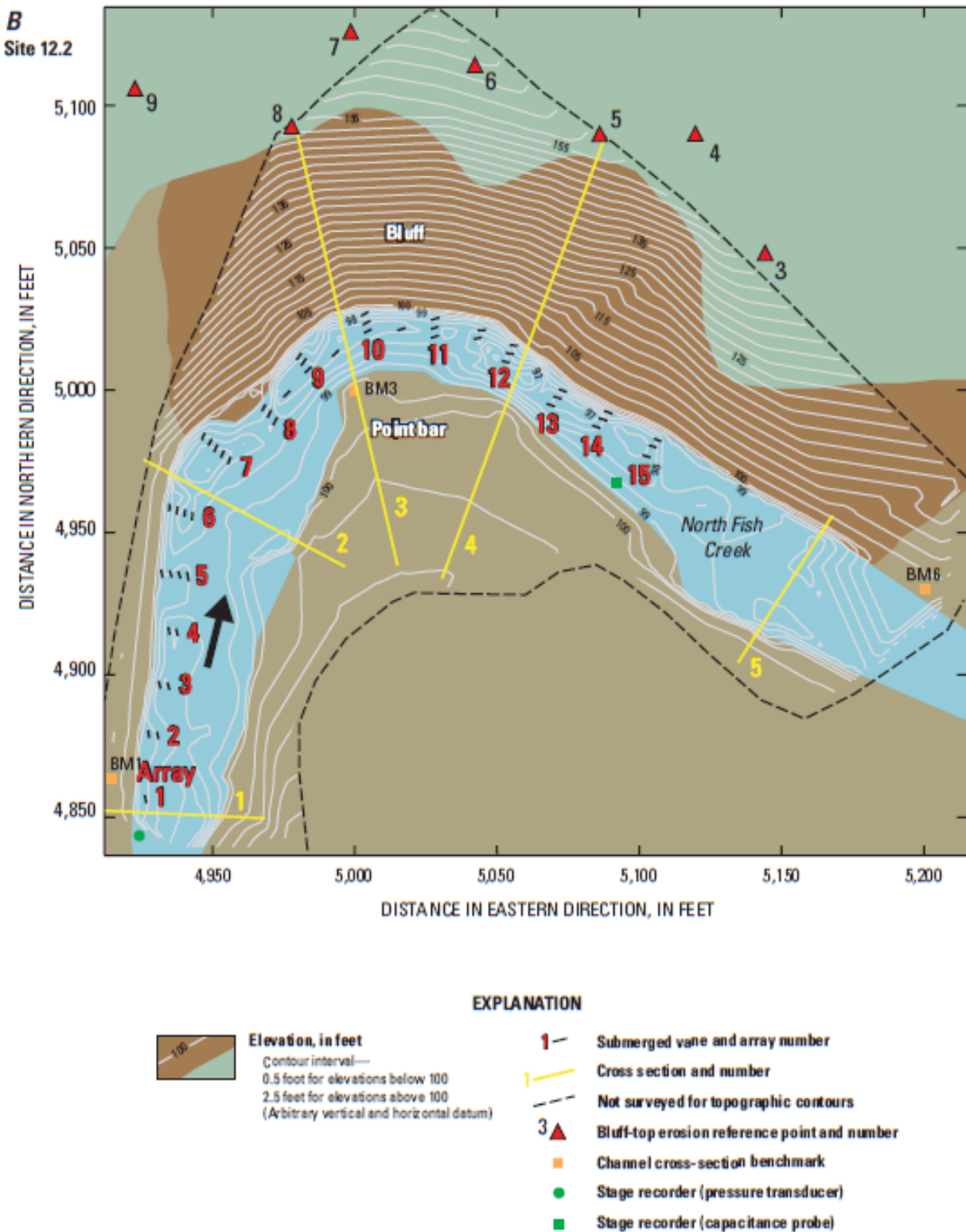


Figura 3-26 Implantación de paneles en el sitio 12.2. Tomado de (Fitzpatrick, F.A., Peppler, M.C., Schwar, H.E., Hoopes, J.A., Diebel, 2005).

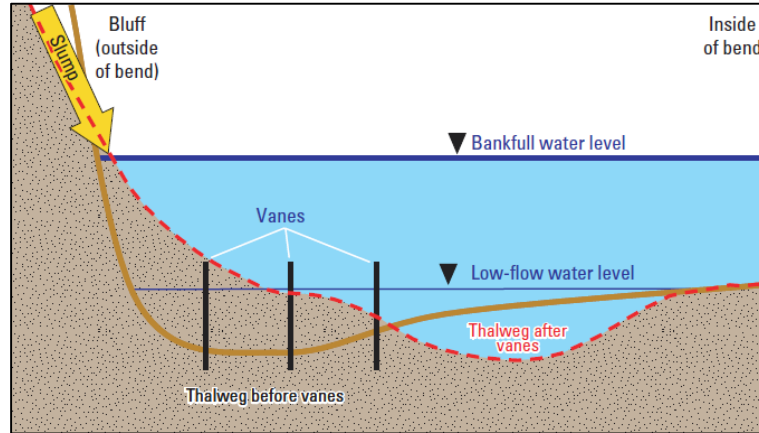


Figura 3-27 Tomado de (Fitzpatrick, F.A., Peppler, M.C., Schwar, H.E., Hoopes, J.A., Diebel, 2005).

Respecto del caso CR4, los paneles fueron instalados en tres curvas consecutivas (Geokang, Maoerding y Baidi). La información registrada en las tablas al inicio de este capítulo hace referencia a la curva Maoerding, cuyo radio de curvatura mínimo era de 356 m. El sistema de paneles fue diseñado para una inundación de 10 años de periodo de retorno, cuyo caudal de diseño se menciona en la Tabla 3-8. En la Figura 3-28 y en la Figura 3-29 se puede apreciar en planta la localización y detalle de la disposición de paneles en la curva.



Figura 3-28 Localización del sistema de paneles en la curva Maoerding, flujo de derecha a izquierda. Tomado de Figura 5-16 (Odgaard, 2009).

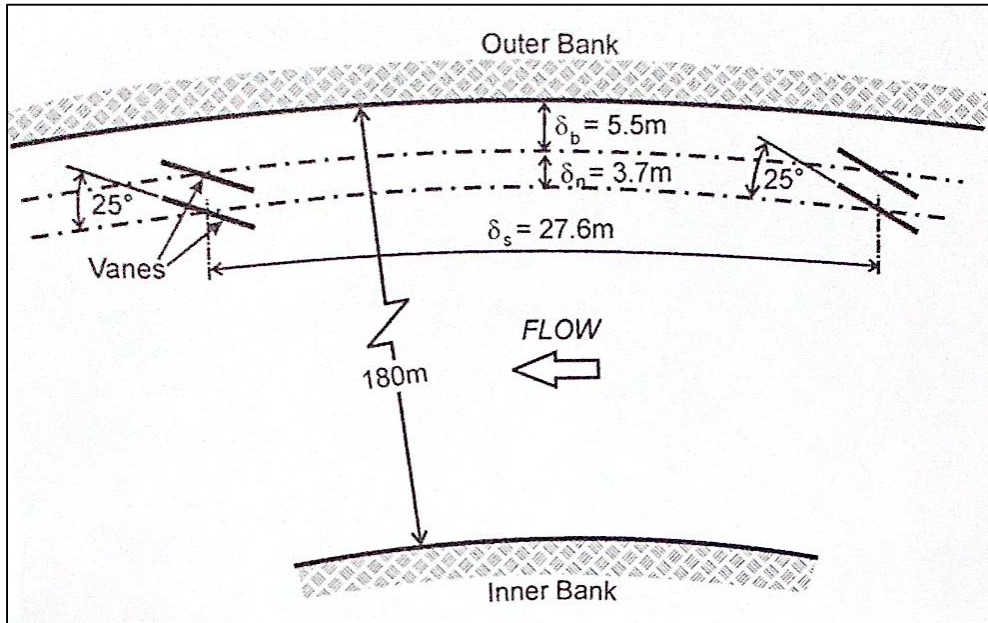


Figura 3-29 Diseño de los paneles en la curva Maoerding. Tomado de Figura 5-17 (Odgaard, 2009).

En el informe original se menciona que debido a la extrema erosión, antes de la instalación de los paneles, la banca se estabilizó con gaviones. Durante el año siguiente a la instalación, los paneles fueron sometidos a por lo menos una condición de flujo a banca llena. Según el reporte, los paneles fueron muy eficaces para mantener una berma protectora a lo largo de la banca e incluso brotó vegetación abundante sobre la misma, hecho que proporciona una protección adicional a la banca. (Odgaard, 2009).

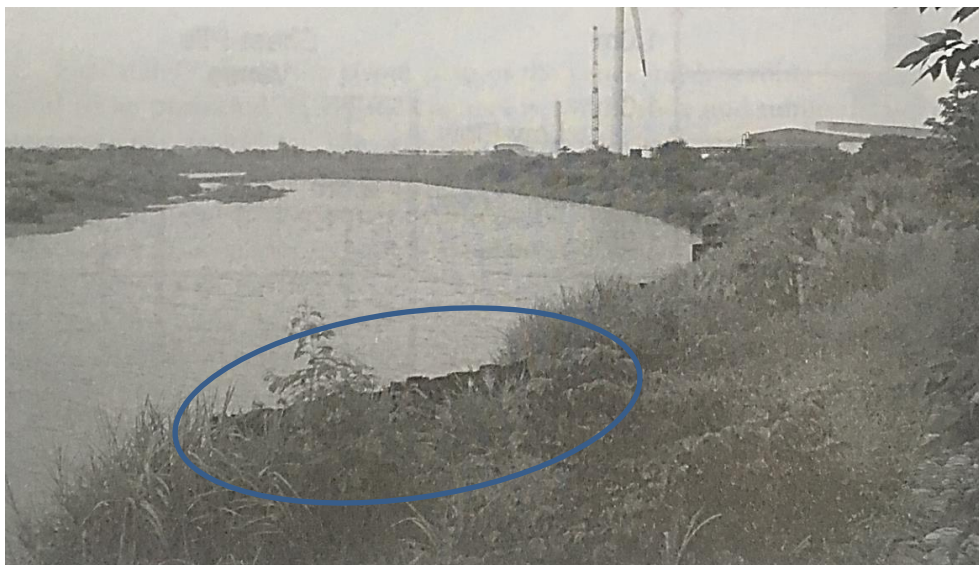


Figura 3-30 Vista aguas abajo de los paneles un año después de instalados en la curva Maoerding, año 2007. Tomado de Figura 5-20 (Odgaard, 2009).

Finalmente, para el caso CR5 se tiene un problema presentado después de un enderezamiento y ensanchamiento del río por efecto de la construcción de un puente en el año 1970. Este enderezamiento eliminó dos meandros y acortó el segmento del canal en 482 m (desde 1189 m hasta 707 m), resultando en un aumento del 69% en la pendiente local del cauce, pasando de 0.00049 a 0.00083. Se dejó un canal de 10 m de ancho, que corre paralelo a la carretera que conecta el antiguo canal con el nuevo (Ver Figura 3-31).

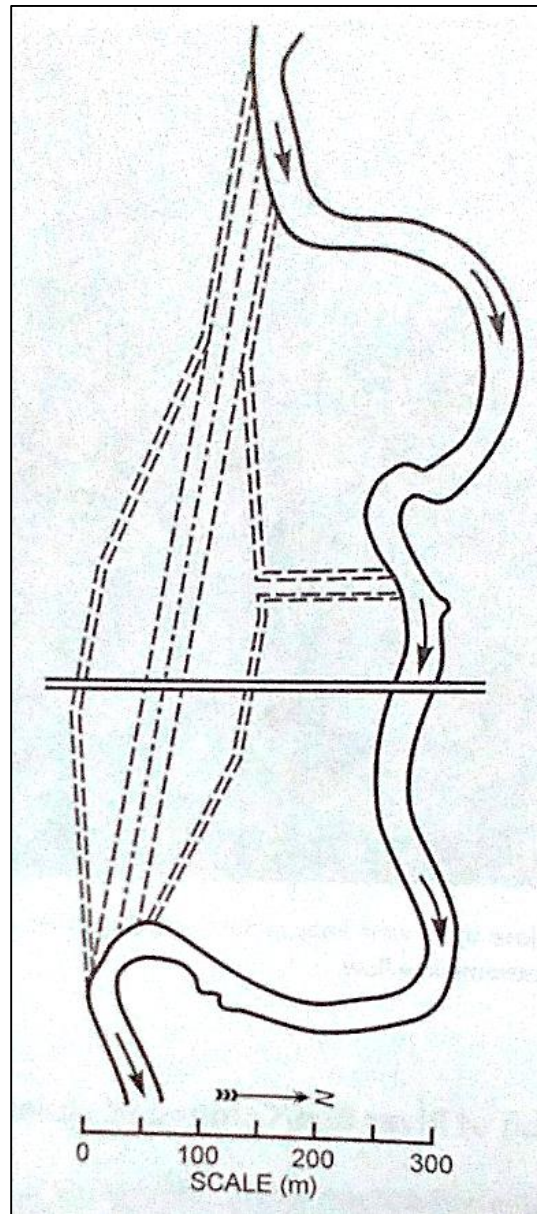


Figura 3-31 Implantación de la excavación para el enderezamiento del cauce. Tomado de Figura 5-22 (Odgaard, 2009).

En el año 1984 se registró la aparición de un depósito de arena a lo largo de la orilla izquierda, el cual ocupó cuatro de las seis luces del puente, lo que provocó que el flujo se lanzara hacia el pilar derecho del mismo, donde socavó y erosionó la banca. Por tanto, se diseñó un sistema de paneles se diseñó para que la profundidad y la velocidad del flujo disminuyeran a lo largo de la orilla derecha y aumentaran a lo largo de la línea central del cauce, lo cual se logró una vez instalados (ver Figura 3-32), manteniendo un perfil de lecho transversal similar al diseñado cuando se construyó el puente. (Odgaard, 2009).

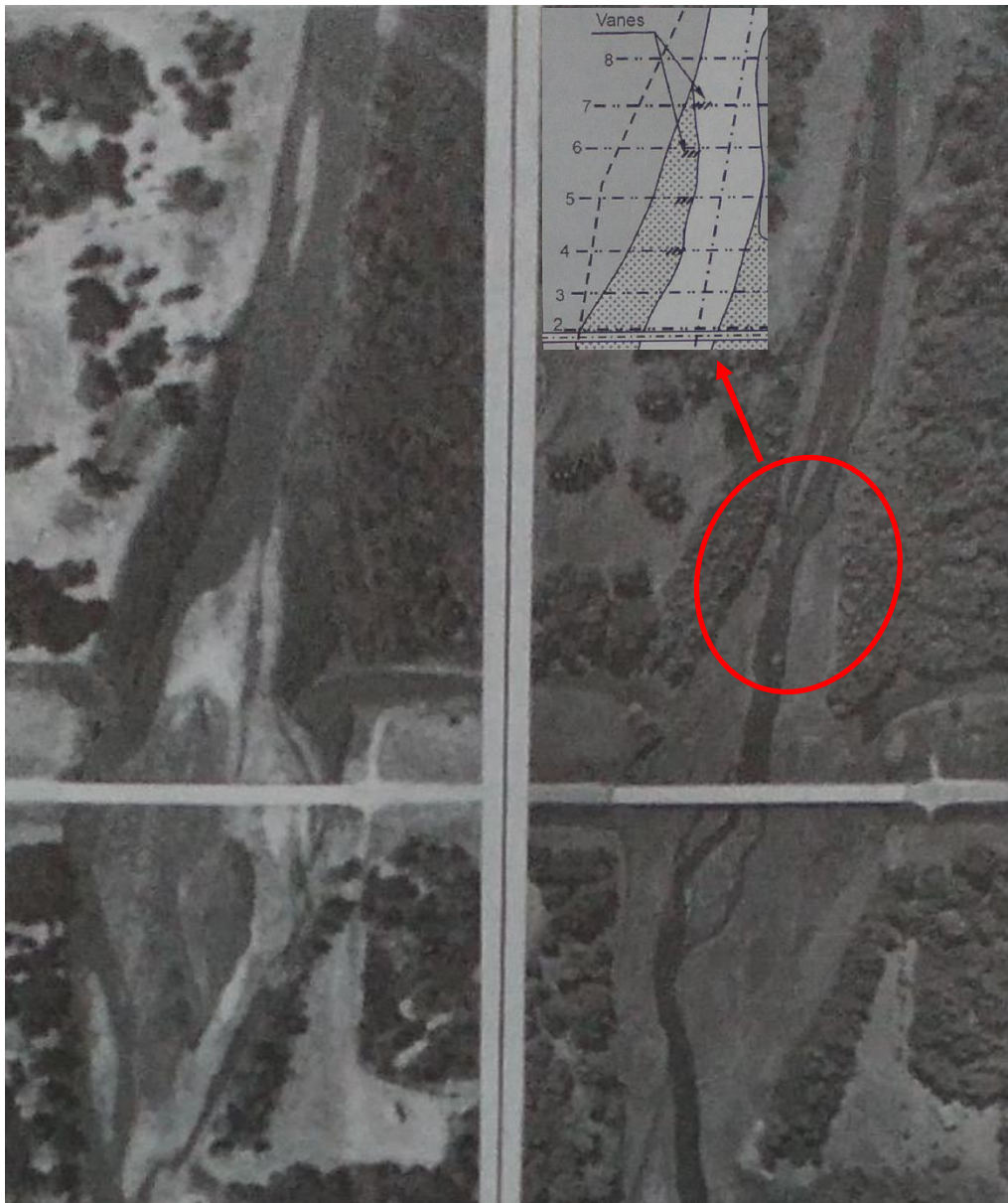


Figura 3-32 Fotografías aéreas: (izq) antes de la instalación (1984) y (der) cinco años después de la instalación de los paneles (1989). Fuente tomado y adaptado de Figura 5-24 (Odgaard, 2009).

Pendiente longitudinal

Según los autores del artículo CR1, el sistema de paneles sumergidos no produce ningún cambio medible en la pendiente longitudinal de la superficie del agua y por tanto, no debe interferir con el equilibrio de sedimentos y estabilidad global del canal (A. J. Odgaard & Mosconi, 1987).

Costo de instalación

Según los autores, el costo de la instalación del sistema de paneles sumergidos (a precios de 1984) para el río East Nishnabotna fue de \$ 174 por metro de banca (es decir \$ 53 por pie). En comparación, el costo de una estructura de escollera (a precios de 1984) era de \$341 por metro de banca (\$104 por pie), aproximadamente dos veces el valor de la instalación de los paneles (A. J. Odgaard & Mosconi, 1987).

Los autores del caso CR3, consideraron los paneles como una alternativa económica frente a las estructuras tradicionales de endurecimiento de bancas u otras técnicas de reducción de picos de inundación como las cuencas de detención (Fitzpatrick, F.A., Pepler, M.C., Schwar, H.E., Hoopes, J.A., Diebel, 2005).

Para el caso CR5, El costo de instalación fue de \$ 5,000 (en 1984) y, hasta el 2008 no ha sido necesario realizar (Odgaard, 2009).

Labores de seguimiento

En 1988 se presenta un artículo (A. J. Odgaard, 1988) en el cual se evalúa los resultados más relevantes producto de la instalación del caso CR1, indicando que la instalación de campo fue monitoreada durante un período de 2 años, de septiembre de 1985 a octubre de 1987, encontrándose que el sistema funcionaba satisfactoriamente. No obstante, dicho estudio indica que debido a la sensibilidad de los paneles al ángulo de flujo de aproximación, para mejorar su rendimiento se debería haber instalado más paneles hacia aguas arriba para mantener el ángulo de aproximación correcto, o mejor aún, haber estabilizado toda la curva, puesto que le precedía un segmento casi recto. Así mismo, se identificó como el mayor inconveniente de la aplicación de esta técnica en el sitio, la exposición de los paneles una gran parte del año, ya que alrededor del 50% del tiempo el caudal del río es igual o inferior a 4 m³/s y esta exposición, los convierte en un peligro para

los usuarios del río; principalmente motos de nieve, barcos de hielo y otras embarcaciones (A. J. Odgaard, 1988).

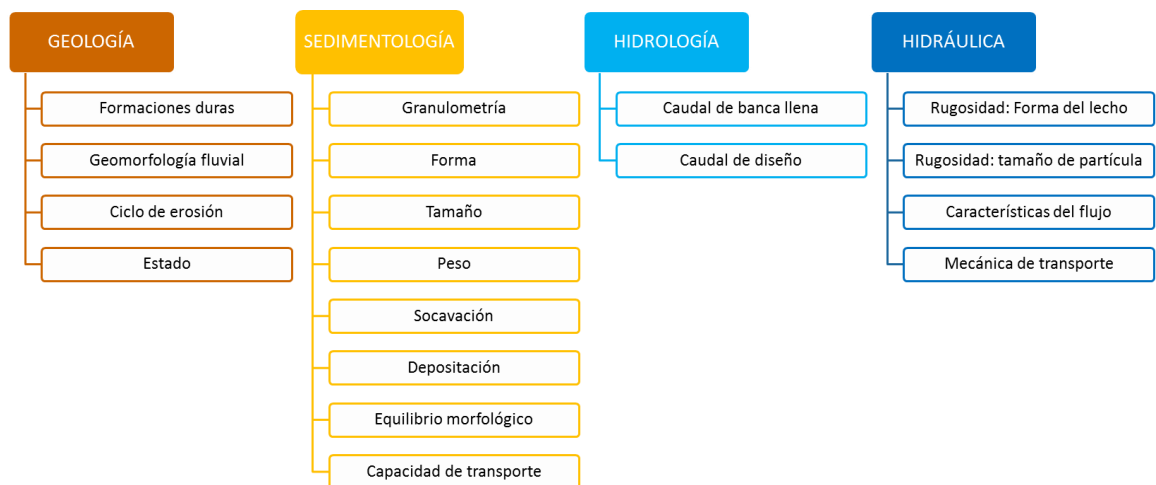
Para el caso CR3, se menciona que buena parte del cambio de la morfología del canal y su migración, resultó de grandes inundaciones, con cambios mínimos o pequeños durante los flujos a banca llena. Así mismo, los paneles del sitio 16.4 resistieron una inundación récord con solo daños menores (Fitzpatrick, F.A., Peppler, M.C., Schwar, H.E., Hoopes, J.A., Diebel, 2005).

Respecto del caso CR5, en agosto de 1989 se realizó un levantamiento de terreno para cuantificar los cambios inducidos en la topografía del lecho. Los perfiles del lecho se tomaron en diez secciones aguas arriba del puente y una corriente abajo. La depositación inducida por los paneles resultó mejor de lo previsto, probablemente por la vegetación que aumenta la resistencia al flujo en la berma y hace que la capacidad de transporte de sedimentos disminuya por debajo de lo predicho por la teoría. La vegetación siguió aumentando en el área protegida y en 2008 el sistema aún era completamente funcional (Odgaard, 2009).

4. Criterios de evaluación

Una vez expuestos en el Capítulo 3 los principales trabajos realizados sobre paneles sumergidos, tanto teóricos, como prácticos (ensayos de laboratorio e instalaciones en campo), se puede tener una visión del sustento sobre el cual estas estructuras han sido concebidas, dimensionadas y construidas, así como de su funcionamiento.

A continuación se exponen los principales conceptos desarrollados por la geología, sedimentología, hidrología e hidráulica que permiten evaluar el dimensionamiento y funcionamiento de los paneles. Para una mejor comprensión, los conceptos considerados en el presente capítulo se muestran en el siguiente esquema, resaltando que el presente trabajo está enfocado a los cauces aluviales; por tanto, la exposición de los conceptos en lo posible se enmarcara bajo esta premisa.



Complemento a lo ilustrado en el esquema anterior, se tiene que, “dentro de la composición de un cauce aluvial, agua, sedimentos y vegetación son las tres componentes básicas de un cauce natural. Su continuada presencia en el canal y su competencia por el predominio

sobre el mismo, son la causa natural del comportamiento peculiar de los ríos, su variabilidad y su naturaleza rebelde” (Ordóñez, 1979).

4.1 Geología

Los conceptos seleccionados de esta ciencia para el presente trabajo son la geomorfología y el ciclo de la erosión.

4.1.1 Formaciones duras

Las características estructurales de la geología de una cuenca dan lugar a la presencia de rocas duras, cuya incidencia sobre los cauces determina su comportamiento de acuerdo a dos grupos bien diferenciados: ríos controlados por las formaciones geológicas duras, y los ríos aluviales. En los ríos cuyo cauce por roca, el material de las bancas y del lecho determina la forma del canal (Ordóñez, 1979); estos ríos de lecho rocoso suelen ser encajados o incisos en los valles (Martín Vide, 2003). En los ríos aluviales; su forma, dimensiones y pendiente obedecen a las condiciones del flujo, y su característica principal es la de fluir en canales formados por el mismo material que transporta la corriente (Ordóñez, 1979). También se reconoce a los ríos aluviales como aquellos que discurren por materiales sedimentarios modernos, cuyo lecho tiene un cierto espesor de material granular prácticamente suelto; siendo común que los materiales aluviales ocupen una mayor extensión horizontal que la del cauce actual, formando unas llanuras ocasionalmente inundables denominadas llanuras de inundación, sobre las cuales el río puede evolucionar generando cambios importantes en el cauce (Martín Vide, 2003).

4.1.2 Ciclo geomorfológico y geomorfología fluvial

El ciclo geomorfológico es entendido como el ciclo de erosión - transporte - depositación de materiales sólidos bajo el influjo de agentes naturales como el aire y el agua, se diferencia del ciclo hidrológico por ser un ciclo abierto, ya que los materiales sólidos erosionados nunca vuelven a su lugar de origen como sí sucede con el agua (Ordóñez, 1979).

De otra parte, se puede distinguir dos morfologías fluviales características, por la forma en planta del cauce. La primera morfología es el cauce trenzado, asociado a un gran abastecimiento de sedimentos, con un cauce muy ancho, compuesto por una multiplicidad

de cauces menores entrelazados, que dejan depósitos entre sí; y son inestables en el sentido de que una crecida los puede cambiar significativamente. La segunda morfología corresponde al cauce meándrico, el cual tiene un único canal que forma curvas (meandros), cuya sección transversal presenta un calado mayor junto a la orilla cóncava o exterior y menor junto a la orilla convexa o interior. Los meandros son dinámicos debido a la posibilidad de tener dos movimientos: un desplazamiento en dirección aguas abajo y una profundización a costa de las orillas, en dirección perpendicular a la anterior (Martín Vide, 2003).

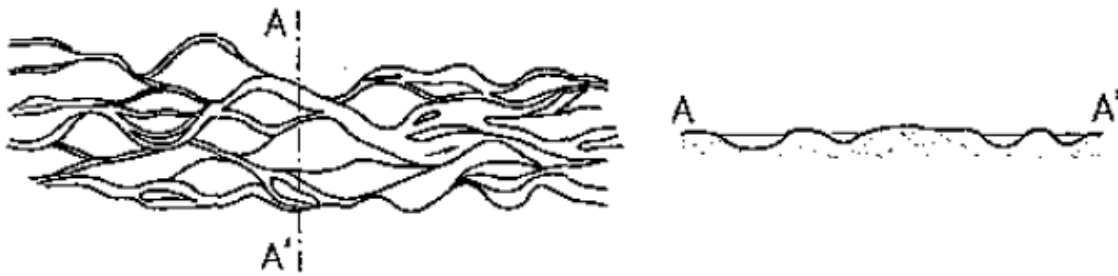


Figura 4-1 Planta y sección transversal de un cauce trenzado. Tomado de Figura 2.2 (Martín Vide, 2003)

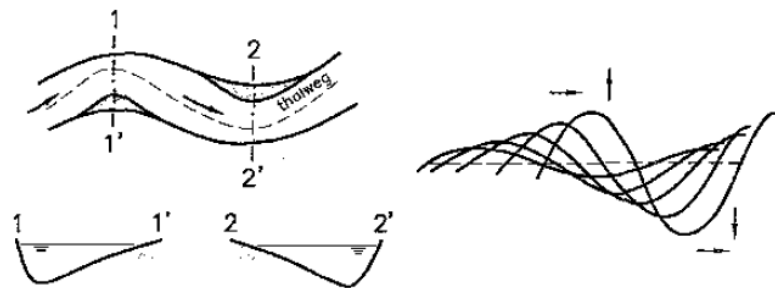


Figura 4-2 Cauce meándrico: morfología (planta y secciones transversales vistas en el sentido de la corriente) y evolución ideal (derecha). Tomado de Figura 2.2 (Martín Vide, 2003)

4.1.3 Estado

De acuerdo con su estado dentro del ciclo geomorfológico, los ríos se clasifican como jóvenes, maduros o viejos. En el estado juvenil se encuentran ríos en activo proceso de erosión de su cauce, con escasos tributarios y una sección profundamente disectada en forma de V. En la madurez, se tiene un patrón de drenaje mejor definido y un cauce en estado de equilibrio dinámico. En un cauce en estado de madurez avanzado se pueden distinguir tres porciones bien diferenciadas: el tramo de montaña, en las cabeceras,

reflejando las mismas características de un cauce joven; el tramo del valle, con pendiente moderadas y un cauce más ancho; y finalmente la zona baja inundable rematando en el delta o estuario, área inferior de deposición, donde el cauce divaga, en meandros móviles y tramos trenzados cuya expresión superficial histórica son las huellas de meandro cortados y depósitos estratificados a todo lo ancho del valle donde el cauce ha estado en periodos anteriores. El cauce viejo forma valles muy anchos y se caracteriza por un paisaje de escaso relieve a consecuencia de la finalización del ciclo erosivo (Ordóñez, 1979).

4.2 Sedimentología

La mayoría de los ríos arrastran sedimentos de muy variadas características, tanto en su origen mineralógico como en su densidad y tamaño. Es lógico por consiguiente, esperar que los procesos de sedimentación presenten una aguda diferenciación de acuerdo con el tipo de material y las condiciones del flujo que los transporta.

4.2.1 Granulometría

Los lechos de los ríos pueden ser granulares o cohesivos. El lecho granular está constituido por partículas sueltas de distintos tamaños, a este tipo de lecho están asociados los ríos aluviales, puesto que discurren por materiales transportados por el propio río (Martín Vide, 2003).

4.2.2 Peso

Según (Martín Vide, 2003) el peso propio es la propiedad individual de las partículas de un lecho granular que más importancia tiene. Los cauces naturales están formados por partículas de roca y minerales cuyo peso específico tiene poca variación, con un valor medio de peso específico relativo de 2.65.

4.2.3 Tamaño

Las partículas menores que 0.004 mm (4 micras) se llaman arcillas. Entre 0.004 mm y 0.062 mm se llaman limos. Entre 0.062 mm y 2.00 mm se llaman arenas. Entre 2.0 mm y 64 mm se llaman gravas (Martín Vide, 2003). Los lechos granulares están frecuentemente compuestos por una mezcla de tamaños que van desde finos hasta gruesos. Con frecuencia, la distribución granulométrica de los lechos naturales de arena y grava siguen

una distribución log-normal y los lechos de arenas finas uniformes una distribución normal (Martín Vide, 2003).

4.2.4 Depositación

La depositación se produce dinámicamente por la inhabilidad del agua para transportar sedimentos por encima de una cierta capacidad límite, que es función de su velocidad, la turbulencia y otros parámetros hidráulicos del flujo.

4.2.5 Socavación

Se puede definir por el exceso de energía presente en el flujo cuando su carga de sedimentos está por debajo de su capacidad de transporte.

Los dos procesos anteriormente mencionados son los principales fenómenos a tratar mediante obras hidráulicas de diferente tipo.

4.3 Hidrología

Los conceptos más importantes a tener en cuenta en el presente trabajo final son:

4.3.1 Caudal a banca llena

Es el caudal que da lugar a la geometría y dimensiones del cauce, el cual llena a rebosar la sección transversal (Martín Vide, 2003).

4.3.2 Caudal de diseño

En ingeniería civil, el caudal de diseño es aquel utilizado para el dimensionamiento de las estructuras a diseñar y construir. Este caudal de diseño por lo general está asociado a un periodo de retorno, cuya magnitud a su vez está asociada a la envergadura de la obra a realizar. Por ejemplo, se requiere un menor periodo de retorno para dimensionar una alcantarilla o box culvert que para diseñar un puente sobre un cauce.

4.4 Hidráulica

4.4.1 Formas de lecho

La importancia de las formas del lecho se debe a su participación en el transporte de sedimentos e intervención en la resistencia al flujo, se presentan mayormente en lechos de arena mientras que en ríos de grava o ríos con granulometría extendida se presentan formas de mayor tamaño. Al iniciar el movimiento de un lecho de arena e ir aumentando la velocidad se presentan las formas del lecho en el siguiente orden: rizos, dunas, lecho plano, antidunas y rápidos y pozos. Los rizos y dunas son de régimen subcrítico, el lecho plano coincide aproximadamente con el régimen crítico (número de Froude del flujo = 1) y las antidunas y los rápidos y pozos, con el régimen supercrítico (Martín Vide, 2003).

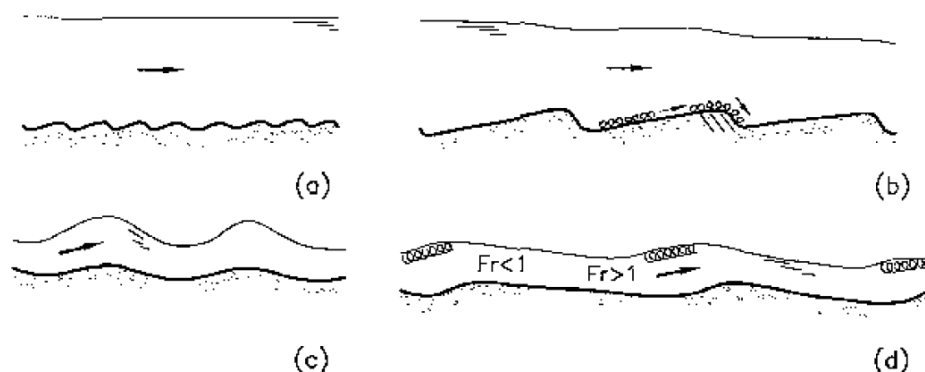


Figura 4-3 Formas de fondo: rizos (a), dunas (b), antidunas (c), rápidos y pozos (d). Tomado de Figura 3.9 (Martín Vide, 2003)

De otra parte, dentro de las formas de gran escala se tienen las barras alternadas, las cuales tienen relación con el ancho y la curvatura del río; que como lenguas de arena ocupan alternativamente una y otra orilla, migrando hacia aguas abajo. Se forman en flujo muy somero y ancho, y con régimen lento. Los rápidos y pozos también se pueden relacionar con la morfología en planta; en cauces trenzados los pozos corresponden a los lugares de mayor curvatura de la forma sinuosa (hoyas) y los rápidos a los tramos rectos con puntos de inflexión (vados), lo cual ocurre particularmente en lechos de grava (Martín Vide, 2003).

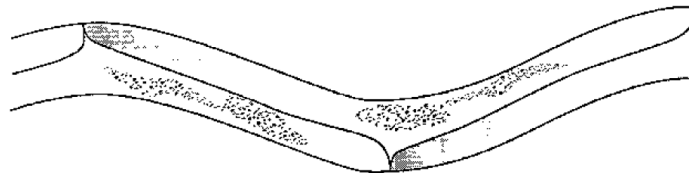
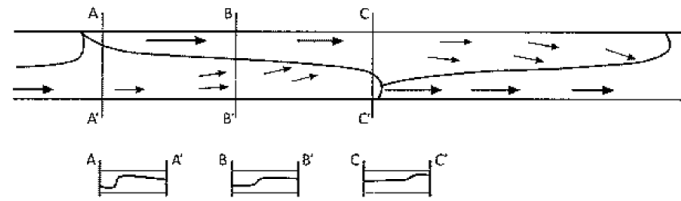


Figura 4-4 Barras alternadas en un cauce recto, ancho y somero (arriba) y su relación con la morfología meandriforme (abajo). Tomado de Figura 3.12 (Martín Vide, 2003)

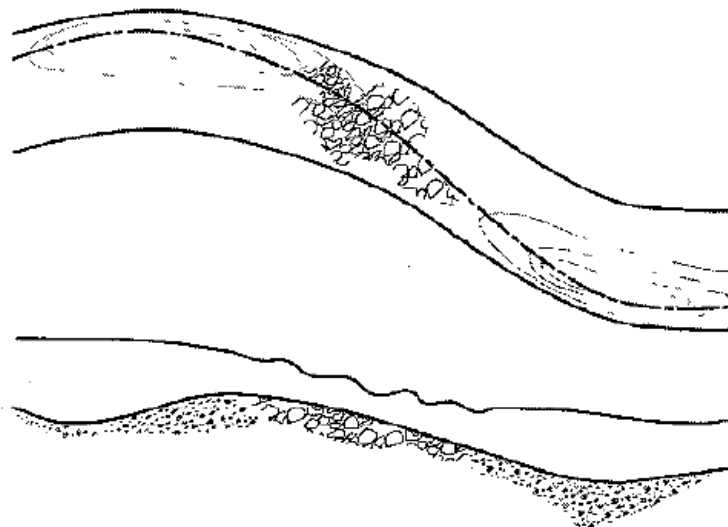


Figura 4-5 Rápidos y pozos en relación con la morfología meandriforme. Tomado de Figura 3.13 (Martín Vide, 2003)

4.4.2 Transporte de sedimentos

El transporte de materiales sólidos por una corriente de agua es función de las características de los materiales, la velocidad y la turbulencia de la corriente. La característica fundamental del material sólido es sin duda su peso propio. El agua interviene en el proceso de dos maneras: una como simple mecanismo de transporte, acarreado con su flujo las partículas que se encuentran en suspensión dentro de su masa,

y otra, más dinámica, como agente removedor de las partículas depositadas en el lecho y en las bancas del canal.

Los sedimentos gruesos se mueven preferencialmente por arrastre sobre el fondo de las corrientes, y su transporte disminuye rápidamente con cualquier reducción de la intensidad del flujo. Los sedimentos finos, cuya velocidad de asentamiento es mucho menor, viajan preferiblemente en suspensión en el agua y están totalmente sustentados por el flujo, aún para velocidades muy bajas (Ordóñez, 1979).

El transporte en suspensión puede representar el 90% o más de todo el transporte sólido de un río, especialmente de un río grande, mientras que el transporte de fondo (10% restante) tiene la mayor repercusión morfológica sobre el río mismo, porque su desequilibrio causa modificaciones morfológicas, erosiones y sedimentaciones (Martín Vide, 2003).

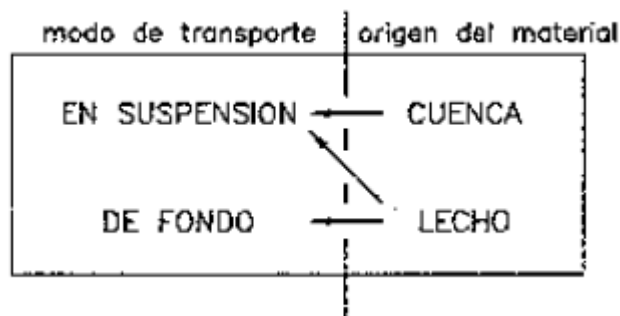


Figura 4-6 Clasificación del transporte de sedimentos. Tomado de Figura 3.6 (Martín Vide, 2003)

Por su parte, la pendiente de un río establece la característica más importante en cuanto al régimen hidráulico, pues determina la velocidad del flujo y la capacidad de transporte de sedimentos.

4.4.3 Cauce en equilibrio

“Un cauce en equilibrio es aquel en el cual, durante un periodo largo de años, la pendiente se ha ajustado delicadamente para proveer a cada caudal dado, exactamente la velocidad necesaria para transportar la totalidad de la carga de sedimentos aportada por la cuenca”. “Si se introduce una perturbación dentro de un sistema dinámico en equilibrio, el sistema reacciona desplazándolo en la dirección que tiende a absorber el efecto de la perturbación introducida” (Mackin - Concept of the Graded River).

4.4.4 Flujo en curvas

En una curva la corriente no es paralela a la orilla, sino que se dirige hacia ella a la entrada de la curva y se aleja de ella a la salida, existiendo una concentración del caudal hacia la curva, es decir, un flujo hacia la orilla. En la curva, debido a la fuerza centrífuga se genera la corriente secundaria, a la cual se atribuye la modelación de la sección transversal de la curva de un río, que explica que el lado exterior sea más hondo por efecto del descenso de la corriente secundaria, mientras que el lado interior sería una suave pendiente por efecto de la corriente ascendente. La trayectoria de una partícula de agua, como combinación del flujo principal y la corriente secundaria, es helicoidal o en espiral (Martín Vide, 2003).

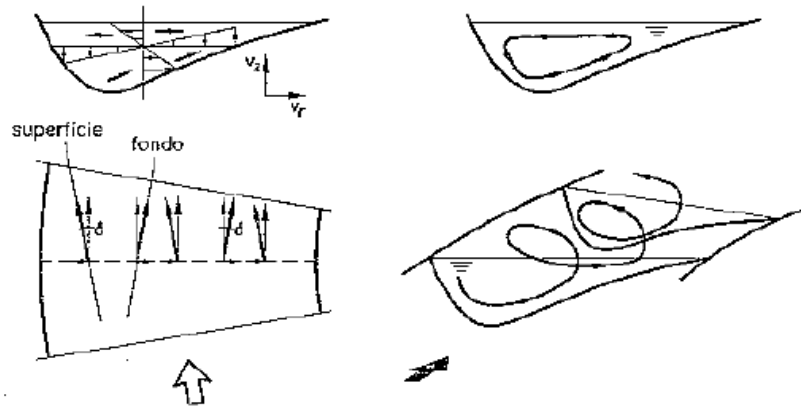


Figura 4-7 Corriente secundaria (sección, planta y perspectiva de una trayectoria helicoidal). Tomado de Figura 3.29 (Martín Vide, 2003)

4.4.5 Características de un cauce natural

De acuerdo con (Ordóñez, 1979), dentro de las características principales de un cauce natural se tienen:

- Su sección transversal es irregular, no prismática.
- La pendiente y rugosidad varían dentro de una misma sección y a lo largo de su curso.
- Su condición natural es tender a ser sinuoso, no rectilíneo.
- Está en constante interacción con su canal y con su cuenca.
- Siempre transporta sedimentos.
- La relación de profundidad a ancho es mucho menor que en un canal artificial.
- El flujo en un río es por lo general no-uniforme y no-permanente.

- La sección transversal varía considerablemente en curvas y en cercanías a obstáculos.
- La pendiente del fondo no es uniforme, existen rápidas y fosas, barreras y obstáculos.
- El cauce del río puede variar su posición en periodos muy cortos de tiempo.
- Muchas veces no es fácil saber inicialmente qué tanto del ancho de un valle corresponde al cauce activo del río.

4.5 Criterios establecidos

De los conceptos anteriormente expuestos, se consideran como criterios principales para evaluar el conocimiento que se tiene sobre el desempeño de los paneles sumergidos los siguientes: desde el punto de vista hidrológico el caudal de banca llena, puesto que da lugar a la geometría y dimensiones del cauce; así como también el caudal de diseño para estas estructuras. Dentro de la hidráulica, se consideró como criterio las formas del lecho, pues están relacionadas con el tipo de flujo y la dinámica presente en el cauce. También se considera importante el número de Froude del flujo, pues determina el régimen en que se encuentra el cauce.

En el campo sedimentológico, se tiene en cuenta en el presente trabajo final los procesos de socavación y depositación que puede generar el panel; así como las características propias del sedimento como su tamaño, tipo de suelo, peso y granulometría. La pendiente del flujo también es considerada. En el campo de la geología, a nivel geomorfológico, tener como criterio el tipo de cauce es clave para evaluar eficacia de los paneles según el cauce donde se instale, acotado a cauces aluviales y su estado, según lo visto en el numeral 4.1. Respecto al panel propiamente dicho, es importante identificar sus dimensiones, separaciones entre éstos, y ángulos de posicionamiento típicos, así como el segmento en el cual se instala, ya sea una curva o un segmento recto.

De manera transversal, como criterio de la importancia de la información consultada, se tiene la clasificación tomada de la página web del ranquin Scimago Journal & Country Rank (www.scimagojr.com).

5. Análisis

Teniendo en cuenta que la información recolectada que se muestra en el capítulo 3 se ha discriminado en aspectos teóricos, laboratorio, ejercicios computacionales y casos reales; a continuación se presenta su análisis, estableciendo los aspectos más relevantes identificados en cada uno de ellos.

5.1 Aspectos teóricos

Al analizar las suposiciones realizadas en los lineamientos teóricos descritos por Odgaard, se tiene que la profundidad del flujo, d , se asume pequeña en comparación con el ancho, b ; es decir, se trabaja sobre cauces muy anchos ($b/d \geq 10$). Lo anterior, permitiría realizar un primer acotamiento de los posibles tipos de ríos donde se podrían utilizar los paneles sumergidos, es decir, los ríos donde se cumpla $b/d \geq 10$. Por lo anterior, para cauces en estado juvenil, cuya sección es profundamente disectada en forma de V, la suposición de $b/d \geq 10$, no aplica, generando un diseño cuyo desempeño real distaría de lo propuesto teóricamente. No obstante, y teniendo en cuenta que, dentro de las características de un cauce natural de media y baja pendiente con un caudal importante se tiene que la relación de profundidad a ancho es pequeña; es posible decir que los paneles sumergidos aplicarían a un rango amplio de cauces naturales.

Otro de los supuestos es que el radio de curvatura, r , es más grande que el ancho b ; lo cual es cierto en los cauces naturales anteriormente mencionados, por tanto, resulta una suposición lógica y adecuada.

De otra parte, la teoría se desarrolla suponiendo una constante de von Karman $k = 0.4$, lo cual implica concentraciones normales de sedimentos en suspensión, lo cual ocurre en la mayoría de los cauces.

Respecto al dimensionamiento de los paneles y el espaciamiento de éstos dentro de un arreglo, se tiene como supuesto que el campo de paneles consta de elementos de igual tamaño y espaciamiento uniforme; lo cual se entiende por la necesidad de generar un diseño estándar, sencillo de construir e instalar.

El desarrollo teórico en el que se fundamenta el análisis del desempeño de los paneles, se supone flujo ideal. Dentro de las características del flujo ideal, se tiene su no viscosidad e incompresibilidad, por lo cual no existen discontinuidades o vacíos entre el fluido y las fronteras sólidas (Streeter & Wylie, 1981). No obstante, en el caso de los paneles, se presenta una separación del fluido, la cual, como menciona Odgaard, no es significativa para ángulos α pequeños.

La Figura 3-8 presentada en el numeral 3.1 de este documento, permite identificar que el rango de máximo incremento en el nivel del lecho producto del uso de los paneles está entre 0.5 y 0.8; para una relación de ancho/radio de curvatura (b/r_c) entre 0.07 y 0.2. Por su parte, en la Figura 3-9 se aprecia que el rango de máximo incremento en el nivel del lecho producto del uso de los paneles esta entre 0.4 y 0.7; para una relación de ancho/radio de curvatura (b/r_c) entre 0.05 y 0.1. En las dos gráficas es posible identificar que el incremento en el nivel del lecho es a su vez, directamente proporcional al número de Froude de los sedimentos $F_{\phi_{sed}}$; y que el rango para la relación b/r_c , está entre 0 y 0.34. Estos rangos, son un indicador útil de la eficacia esperada al usar los paneles, una vez conocida la relación b/r_c para el cauce objeto de estudio. Se debe recordar que estas gráficas son para un ángulo de ataque de 20° y que sus valores crecen o decrecen en un 3% al aumentar o disminuir en 1° dicho ángulo.

Por su parte, la Figura 3-10 indica que, a mayor cantidad de paneles sumergidos utilizados por fila, para un mismo $F_{\phi_{sed}}$, mayor incremento en el nivel del lecho al utilizar los paneles sumergidos. Adicionalmente, concuerdan los resultados de esta gráfica respecto a las dos gráficas comentadas en el párrafo anterior, respecto a que el incremento del lecho es directamente proporcional a $F_{\phi_{sed}}$. Por tanto, se puede concluir que el tamaño del sedimento es una variable clave en el posible desempeño de los paneles en el cauce.

5.2 Ensayos de laboratorio

Se evidenció en las referencias consultadas en relación con ensayos de laboratorio, que, en general, un mismo ensayo se realiza con un único caudal durante toda la duración del ensayo, lo cual restringe el análisis del comportamiento de los paneles respecto a la variación de niveles que se presenta en cauces naturales. No obstante, son ensayos que permiten aproximarse de manera importante al comportamiento de los paneles, entendiéndose la complejidad técnica que requeriría variar el caudal para un mismo ensayo. De realizarse ensayos con variación de caudal líquido y sólido, se debe tener en cuenta que la variación del caudal líquido se ve reflejada en el ensayo de manera más rápida que la variación del caudal sólido, lo cual resultaría en un evento no sincrónico, como resultado del trabajo con caudales variables.

Del total de referencias de ensayos de laboratorio consideradas, tres estudian la eficiencia de los paneles para el manejo de la socavación en curvas; dos evalúan la redistribución y el movimiento de sedimentos en un canal recto al usar los paneles; en una se experimenta el posible efecto de protección contra la socavación en los pilares de puentes de una sola luz; y la última, evalúa el uso de un collarín como aditamento para la reducción de la socavación local producida en el borde inferior de aguas arriba del panel, para optimizar su diseño.

Respecto a la geometría en planta de los meandros, por lo general su curvatura no es definida por un único radio, sino que puede estar compuesta por diferentes radios, por lo cual para futuros ensayos de laboratorio sería recomendable investigar el comportamiento de los paneles sumergidos en curvaturas compuestas, las cuales se asemejan más a la realidad que una curva con un único radio.

Se evidencia que esta técnica es utilizada para cauces meándricos, en el manejo de la socavación generada en las curvas. Lo cual no se produce en cauces de tipo trenzados o semirectos; acotando así el uso de los paneles sumergidos a cauces meándricos.

Respecto a la pendiente longitudinal obtenida para el canal, en las diferentes referencias consultadas, se observa que sólo en la referencia L5 se tiene una condición similar a un río de tipo torrencial, es decir con una pendiente mayor a 1,5%, recordando que el objetivo

de este ensayo fue evaluar el uso de un collarín en la reducción de la socavación local producida en el borde inferior de aguas arriba del panel. Las demás referencias mencionan una pendiente longitudinal menor al 1,5%; por lo cual, evaluar la eficiencia de los paneles en ensayos de laboratorio con pendientes longitudinales mayores a las aquí expuestas, permitiría conocer más sobre su comportamiento.

Dentro de las características del flujo contenidas en las referencias estudiadas, se tiene que los números de Froude del flujo corresponden a condiciones de flujo subcrítico únicamente, entre 0,07 y 0,46; por lo cual, es conveniente evaluar el comportamiento de los paneles sumergidos para números de Froude mayores a 0.5 (condiciones próximas a flujo crítico y condiciones supercríticas).

Con la información expuesta en las referencias estudiadas, es posible calcular el parámetro de sumergencia de los paneles, conforme se explicó su cálculo en el numeral 3.2.6 del presente documento, obteniéndose los siguientes valores para T/d :

No.	Profundidad d [m]	Altura panel H [m]	$T = d - H$ [m]	T/d
L1	0,144	0,034	0,110	0,764
L2	0,150	0,090	0,060	0,400
	0,220	0,090	0,130	0,591
	0,280	0,090	0,190	0,679
L3	0,385	0,050	0,335	0,870
	0,385	0,080	0,305	0,792
	0,385	0,100	0,285	0,740
	0,385	0,150	0,235	0,610
L4	Banca llena	banca llena	0,000	N.A.
L7	0,150	0,050	0,100	0,667
	0,150	0,075	0,075	0,500

Lo anterior significa que la altura de la lámina de agua por encima del panel está en un rango entre el 40% y el 87% del total de la profundidad, excepto para la referencia L4 donde la altura del panel es igual a la altura de la lámina de agua. En las referencias L5 y L6 no se realizó este cálculo pues no se cuenta con la profundidad del flujo.

Respecto al tipo de sedimento utilizado en los ensayos de las referencias consultadas, se tiene que seis de las siete utilizan arena, incluso dentro de estas seis, dos de ellas con granulometría uniforme. Por tanto, es posible profundizar en investigaciones con granulometrías más extendidas, es decir con una mayor variedad de tamaños; puesto que el proceso de sedimentación está relacionado con los tipos de sedimentos presentes en el canal, lo anterior debe guardar correspondencia con el tipo de cauce simulado en el laboratorio.

5.3 Ejercicios computacionales

Como se mencionó al inicio del presente trabajo final, los paneles tienen cuatro posibles usos relevantes, por tanto, se hace necesario diversificar estos ejercicios computacionales a todos los posibles usos de los paneles, validando dichos ejercicios con los casos reales de aplicación ya existentes y ensayos de laboratorio físicos efectuados.

En general, se observa que en los ejercicios computacionales se busca la optimización del diseño de los paneles, respecto a su forma, dimensionamiento y ubicación en el cauce, en función de mejorar la eficiencia de estos respecto de la problemática a resolver; llamando la atención nuevamente, al igual que en los ensayos de laboratorio, que el mayor número de ejercicios se desarrolla para flujo en curvas y protección contra la socavación de las mismas.

Respecto a la optimización de la forma del panel, tales ejercicios deben ser consecuentes con la viabilidad de construcción e instalación, puesto que se debe tener en cuenta que los cauces no solo transportan agua y sedimentos finos, sino que en ciertos periodos de tiempo, en especial en caudales altos, transportan vegetación de tamaño considerable como troncos de árboles los cuales pueden impactar las estructuras, causando un eventual daño de la estructura o modificación en su posicionamiento. Por lo anterior, se considera que las estructuras deben ser lo suficientemente resistentes para soportar este tipo de situaciones, dependiendo de sus materiales de construcción. A propósito de esta situación, el hecho de que tales materiales vegetales puedan acumularse en la parte aguas arriba de los paneles, esto genera muy seguramente un incremento del área expuesta al flujo, lo cual puede llegar a modificar su comportamiento hidráulico, y por ende, la conformación del depósito sedimentológico adyacente.

5.4 Casos reales de aplicación

Al analizar los reportes de los casos reales considerados en el presente trabajo, se encuentra que los ríos en los cuales se han realizado las instalaciones son todos aluviales y de tipo meándrico, lo que confirma el interés en evaluar el desempeño de los paneles sumergidos en ríos con bajo número de Froude, con el propósito de mitigar los efectos de su migración.

Se observa que la descripción del cauce se limita a las condiciones locales del lugar de instalación de los paneles, mas no se describen de manera detallada las condiciones aguas arriba y aguas abajo del lugar de instalación o del meandro a tratar, lo cual permitiría relacionar el comportamiento de los paneles frente a la dinámica del cauce en el que se instalan.

El tipo de sedimento predominante en los casos considerados es la arena, que de acuerdo a la bibliografía tiene una gravedad específica de poca variación de alrededor de 2.65, por cuanto resultaría interesante evaluar el funcionamiento de los paneles sumergidos en cauces con otro tipo de lechos con granulometrías extendidas.

En relación con los fenómenos de socavación y depositación, los casos considerados indican el cambio en la forma de la sección transversal del cauce en la zona de instalación de los paneles como protección contra la socavación en la banca externa, y para el caso de rectificación del cauce. Lo anterior implica la modificación de la localización del thalweg del cauce.

De otra parte, se encontró que las condiciones de flujo consideradas para el dimensionamiento de los paneles corresponden al caudal a banca llena, lo cual resulta coherente con los principios de la hidráulica fluvial, puesto que se considera que el caudal a banca llena es el responsable de dar forma a la geometría de la sección transversal del cauce, y permite precisar definitivamente las condiciones de sumergencia bajo las cuales operarán las obras. Ahora bien, lo anterior se podría complementar indagando sobre el comportamiento de los paneles respecto a los diferentes caudales que puede tener el río, desde caudales bajos hasta los provocados por avenidas extraordinarias; lo cual implicaría un seguimiento frecuente, una vez realizada la instalación.

La relación ancho / profundidad (b/d) utilizadas en los diseños observados, fueron 25, 26, 11, 49, 18 en las referencias CR1 a CR5, respectivamente. Se observa que para la referencia CR4 ($b/d = 49$) se presenta el mayor valor de esta relación, el cual prácticamente duplica la magnitud de los valores restantes; lo cual también se observa en los valores de la velocidad del flujo, donde el valor de velocidad para la referencia CR4 es aproximadamente el doble que para las demás referencias expuestas. Adicionalmente el caso CR4 corresponde al lecho más grueso. Por tanto, a partir de esta información, un lecho más grueso tiende a formar cauces de mayor ancho, respecto a los de lecho más fino.

Teniendo en cuenta los datos suministrados en las diferentes referencias consultadas, se ha estimado el número de Froude del flujo utilizando la expresión $F_D \approx v/\sqrt{g * d}$, donde v : velocidad del flujo, d : profundidad del flujo; válida para cauces muy anchos, obteniéndose los siguientes resultados:

Referencia No.	Número de Froude F_D
CR1	0,3
CR2	0,2
CR3	0,3
CR4	0,4
CR5	0,3

Los resultados obtenidos del número de Froude, muestran que para todos los casos corresponde al régimen subcrítico, como se había anticipado.

6. Conclusiones y recomendaciones

Al igual que en los análisis del numeral anterior, a continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones para cada uno de los grupos de información considerados en el numeral 3 del presente documento.

6.1 Aspectos teóricos

Se evidencia que el supuesto de diseño de canal muy ancho, adoptado por Odgaard referente a que la profundidad del flujo, d , es pequeña en comparación con el ancho, b ; lo cual significa una relación de $b/d \geq 10$, da un primer marco de referencia de aplicación de los paneles sumergidos; por tanto, sería interesante desarrollar ejercicios de laboratorio e instalaciones reales en campo para otro tipo de cauces, como cauces de montaña o en estado geomorfológico juvenil. Los resultados que arrojen estos ejercicios podrían aportar al conocimiento de los efectos que producen estas estructuras, ampliando así el grado de conocimiento de los paneles sumergidos.

Respecto al diseño estándar deducido de los supuestos teóricos, donde se recomiendan paneles de igual tamaño y distanciamiento entre ellos, se podrían realizar ejercicios de laboratorio que investiguen el efecto de combinar diferentes formas y tamaños de paneles, así como diferentes separaciones en un mismo arreglo; para diferentes condiciones hidrológicas, hidráulicas y geomorfológicas.

6.2 Ensayos de laboratorio

De los usos experimentados para los paneles, se destaca la protección contra la socavación en canales curvos; teniendo en cuenta que es uno de los principales problemas que se presentan en los cauces. No obstante, también es importante profundizar en el

estudio de los paneles como medida de protección a los pilares de los puentes que atraviesan los cauces.

Se considera novedosa e importante la investigación realizada con aditamentos que permitan disminuir la socavación local producida por el mismo panel, producto de su inserción en el flujo, puesto que el uso de estos aditamentos permite instalar el panel con un mayor ángulo de ataque sin comprometer su estabilidad estructural; y consecuentemente, obtener una mayor eficiencia en los resultados esperados para estas estructuras. Por tanto, se sugiere profundizar en la investigación para el desarrollo de estos aditamentos tipo collarín o de otro tipo que pudieran llegar a ser utilizados en casos reales, teniendo en cuenta factores como la facilidad en su construcción e instalación.

De otra parte, las experiencias de laboratorio que investigan la distribución y movimiento de los sedimentos al usar los paneles, pueden ser de gran ayuda para profundizar en la investigación de las formas del lecho; las cuales como se explicó en el capítulo 4 de criterios de evaluación, están relacionadas con los tipos de flujo que se pueden presentar en el cauce: subcrítico, crítico o supercrítico. Por tanto, realizar este tipo de investigaciones permitiría estudiar el efecto de los paneles sumergidos sobre las formas de lecho antes y después de su instalación, dependiendo del tipo de flujo.

Una vez evaluada la geometría de los canales utilizados en los laboratorios, tanto en planta como en su sección transversal y pendiente longitudinal, se observa que es posible explorar el desempeño hidrosedimentológico de los paneles en otras configuraciones de canal. Adicionalmente se puede trabajar en canales cuya curvatura sea de radio variable pues tienen una mayor semejanza con los meandros, y en cauces trenzados cuyo lecho no sea muy grueso.

La revisión de los resultados de los ensayos permite concluir que los paneles son estructuras que mitigan la socavación general en la banca externa de una curva, o en la socavación local de un tramo recto, al introducir, por ejemplo, pilares de puentes u otras obstrucciones al flujo.

Teniendo en cuenta la divagación natural de los cauces, meándricos principalmente, es preciso ahondar en los ensayos en los que se varíe el direccionamiento del flujo aguas

arriba de las estructuras, lo cual generaría un ángulo variable sobre el panel. Lo anterior, en concordancia con el estado en que se pueden encontrar los cauces (juvenil, maduro o senil). Así mismo, evaluar el efecto de utilizar diferentes formas de disposición, y no solamente paneles paralelos.

En general, los materiales en los que se construye el canal en los ensayos de laboratorio son rígidos, ya sea concreto, madera o acrílico. Esta rigidez en las márgenes del canal implica de una parte, una limitación en el desplazamiento de las mismas por efecto de la socavación durante la realización del ensayo, y de otra, un favorecimiento en la acumulación de sedimentos en la banca o estructura a proteger contra la socavación. Si bien es complejo, sería interesante realizar ensayos de laboratorio con paneles sumergidos en canales con márgenes móviles, permitiendo la divagación natural de estas y evaluando de manera más real, aunque necesariamente cualitativa, los resultados del uso de los paneles.

Al evaluar la altura de los paneles desde el punto de vista de la sumergencia de estos dentro del canal, se puede decir que la altura empleada registrada en las referencias consultadas es variable en comparación a la profundidad de la lámina de agua, puesto que se obtuvieron valores de sumergencia entre el 40% y 87% de lámina de agua, lo cual constituye una limitación del conocimiento sobre el desempeño de los paneles.

6.3 Ejercicios computacionales

Los ejercicios computacionales realizados tienen aquí una mayor importancia cuando se realizan como validación de resultados, ya sea comparándolos con resultados obtenidos en ensayos de laboratorio físico o con casos reales de aplicación, como es el caso de las referencias EC1, EC2, EC3, EC5 y EC6; lo cual permite tener un mayor grado de confianza en los resultados obtenidos en estos ejercicios. Así mismo, las validaciones de los resultados obtenidos, permiten evaluar la capacidad de los software o códigos desarrollados para representar los fenómenos hidrosedimentológicos que ocurren en las inmediaciones de estos dispositivos.

Las elevaciones del lecho generadas en los diferentes ejercicios computacionales, se encuentran dentro de los rangos establecidos en las Figura 3-8 y Figura 3-9 comentadas

en el numeral 3.1 de este documento. Esta comparación se considera válida pues se encuentran en condiciones similares de ángulo de ataque entre otros.

6.4 Casos reales de aplicación

Los resultados de los casos considerados demuestran, en general, la eficacia de los paneles respecto al propósito para el cual se instalaron, como se puede observar en las Figura 3-23, Figura 3-24, Figura 3-27, Figura 3-30 y Figura 3-32. No obstante, es interesante el caso de la referencia CR4, la cual indica que fue necesaria la utilización de una protección adicional a los paneles mediante el uso de muros en gaviones, debido a la severidad de la erosión presentada en la banca de la curva de este cauce. Se debe tener presente que la erosión de las bancas del cauce se produce de una parte por el flujo y de otra, por inestabilidad geotécnica propia de los materiales que la conforman; los paneles tienen como objeto contrarrestar la erosión generada por el flujo únicamente. Esto implica la investigación respecto a la eficacia de los paneles según la causa y el grado de severidad de erosión en la curva objeto de intervención; relacionándolo con la caracterización detallada de las bancas.

Se encuentra una limitante importante respecto a la estabilidad que se debe garantizar aguas arriba del área de instalación de los paneles, debido a que se requiere garantizar un cierto ángulo de ataque de diseño para estas estructuras en relación con la dirección del flujo. De lo anterior se deduce que el estudio del cauce no debe limitarse a la zona de instalación de los paneles, sino que se requiere el estudio de un tramo más amplio aguas arriba y abajo. Adicionalmente, de acuerdo con los principios de la ingeniería de ríos, las soluciones locales suelen ser insuficientes; por tanto, es importante la investigación de la dinámica del río, dentro de la cual debe estar incluido el estudio del cinturón de meandros, entre otros aspectos. Así como también, es importante ahondar en la investigación de la eficacia de los paneles sumergidos respecto a su posición a lo largo del cauce, ya sea en la parte alta, media o baja de la cuenca.

Como se indicó anteriormente, todos los casos presentan flujo subcrítico, con números de Froude menores a 0.5; se considera conveniente ampliar el conocimiento del desempeño de estas estructuras mediante su aplicación a condiciones hidráulicas con números de Froude mayores a 0.5.

La experiencia reportada del seguimiento posterior a la instalación de los paneles en casos reales indica que se generó una depositación, pero que puede ser necesario la reposición de los paneles dependiendo de los efectos observados. Sin duda el seguimiento de los casos permitirá ver el funcionamiento para diferentes condiciones de flujo. Se resalta la importancia de realizar labores de seguimiento a los paneles, porque también permitirá evaluar aspectos claves como la disminución en la velocidad de desplazamiento de los meandros o su detención por completo según sea el caso.

6.5 Consideraciones finales

Teniendo en cuenta que dentro de la ingeniería de ríos se consideran de gran importancia el agua, los sedimentos y la vegetación; se sugiere desarrollar ejercicios que tengan en cuenta este último factor, puesto que la vegetación actúa de diferentes formas, tanto en la protección y estabilización de las orillas, así como aquella que se transporta dentro del flujo, como troncos, los cuales pueden impactar a los paneles, o quedar enredada dentro del arreglo de los paneles propuesto, y deben idearse dispositivos que eviten este último efecto.

Se requiere estudiar el comportamiento de los paneles para números de Froude próximos a flujo crítico y supercrítico, puesto que las referencias aquí estudiadas hacen alusión a flujo subcrítico. Así mismo, respecto a la granulometría del flujo, es importante el estudio de granulometrías más extendidas, y ensayos de laboratorio donde se realice un aumento progresivo del tamaño del sedimento para evaluar hasta que rango de sedimentos funcionan los paneles sumergidos, previo a producirse el acorazamiento del lecho. Los ensayos de laboratorio también pueden ser enriquecidos con el uso de bancas móviles, para evaluar la tendencia del comportamiento de los paneles a lo largo de la duración del ensayo. Respecto a los caudales a utilizar en el laboratorio, resulta interesante desarrollar ensayos donde se realice la sucesión de diferentes niveles y caudales con la correspondiente variación del transporte sedimentológico.

Los ángulos de ataque oscilan alrededor de los 20°, puesto que valores mayores generan socavación local en la estructura misma, lo cual puede ser contrarrestado con aditamentos

adicionales al panel, o se pueden realizar estudios que evalúen una forma del panel que produzcan la socavación mínima posible.

Bibliografía

- Barani, G. (2013). Experimental Investigation of Submerged Vanes ' Shape effect on river-bend stability. *Journal of Hydraulic Structures*, 1(1), 35–41.
- Behbahan, T. S. (2011). Laboratory Investigation of Submerged Vane Shapes Effect on River Banks Protection. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(12), 1402–1407.
- Bhuiyan, F., Hey, R. D. R. D., & Wormleaton, P. R. P. R. (2010). Bank-Attached Vanes for Bank Erosion Control and Restoration of River Meanders. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(9), 583–596.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000217](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000217)
- Boniforti, M. A., Guercio, R., & Magini, R. (2015). Effects of submerged sheet pile vanes on mobile river beds. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 16(3), 182–193. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1400336>
- Fitzpatrick, F.A., Peppler, M.C., Schwar, H.E., Hoopes, J.A., Diebel, M. W. (2005). Monitoring channel morphology and bluff erosion at two installations of flow-deflecting vanes, North Fish Creek, Wisconsin, 2000-03. *Scientific Investigations Report*, 42 p. Retrieved from <http://pubs.water.usgs.gov/sir20045272/>
- García, M. H. (2006). ASCE Manual of Practice 110 — Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice. In *World Environmental and Water Resource Congress 2006* (pp. 1–4). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40856\(200\)94](https://doi.org/10.1061/40856(200)94)
- Gupta, U., Ojha, C., & Sharma, N. (2010). Enhancing utility of submerged vanes with collar. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(9), 651–655.
<https://doi.org/10.1061/?ASCE?HY.1943-7900.0000212>

- Islam, R. (2003). Modification of Hydrodynamic Equation of Vane, (415), 1–8.
- Johnson, P. A., Hey, R. D., Tessier, M., & Rosgen, D. L. (2001). Use of Vanes for Control of Scour at Vertical Wall Abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(9), 772–778. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:9\(772\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:9(772))
- Martín Vide, J. P. (2003). *Ingeniería de Ríos*. Barcelona.
- Odgaard. (2009). *River Training and Sediment Management with Submerged Vanes*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784409817>
- Odgaard, a. J., & Mosconi, C. E. (1987). Streambank Protection by Submerged Vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(4), 520–536. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1987\)113:4\(520\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:4(520))
- Odgaard, A. J. (1988). Construction and Evaluation of Submerged Vanes for Stream Control, (321), 64.
- Odgaard, A. J., & Mosconi, C. E. (1987). *Streambank Protection By Iowa Vanes*.
- Odgaard, A. Jacob, & Kennedy, J. F. (1983). River-Bend Bank Protection by Submerged Vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(8), 1161–1173. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:8\(1161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:8(1161))
- Odgaard, A., & Lee, H. (1984). Submerged vanes for flow control and bank protection in streams, (279). Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1125066>
- Ordóñez, J. I. (1979). Introducción a la hidráulica fluvial (p. 47). Bogotá D.C.
- Ouyang, H., & Lu, C. (2016). Optimizing the Spacing of Submerged Vanes across Rivers for Stream Bank Protection at Channel Bends. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(12), 04016062. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001210](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001210)
- Ouyang, H T, Lai, J. S., Yu, H., & Lu, C. H. (2008). Interaction between submerged vanes for sediment management. *Journal of Hydraulic Research*, 46(5), 620–627. <https://doi.org/10.3826/jhr.2008.3160>
- Ouyang, Huei-tau. (2009). Investigation on the Dimensions and Shape of a

- Submerged Vane for Sediment Management in Alluvial Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(3), 209–217. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2009\)135:3\(209\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:3(209))
- Ouyang, Huei Tau, & Lai, J. S. (2013). Design optimization of a submerged vane with streamlined profile for sediment management in rivers. *Journal of Marine Science and Technology (Taiwan)*, 21(3), 325–332. <https://doi.org/10.6119/JMST-012-0606-1>
- Radspinner, R. R., & Diplas, P. (2010). Review of “River Training and Sediment Management with Submerged Vanes” by A. Jacob Odgaard “River Training and Sediment Management with Submerged Vanes” ASCE Press \$75.00. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(1), 90–91. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000159](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000159)
- Sharma, H., Jain, B., & Ahmad, Z. (2016). Optimization of submerged vane parameters. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 41(3), 327–336. <https://doi.org/10.1007/s12046-016-0477-8>
- Streeter, V., & Wylie, E. (1981). *Mecánica de los fluidos*. Bogotá D.C.
- Tan, S.-K., Yu, G., Lim, S.-Y., & Ong, M.-C. (2005). Flow Structure and Sediment Motion around Submerged Vanes in Open Channel. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 131(June), 132–136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2005\)131:3\(132\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:3(132))
- Wang, Y., & Jacob Odgaard, A. (1993). Flow control with vorticity. *Journal of Hydraulic Research*, 31(4), 549–562. <https://doi.org/10.1080/00221689309498877>