



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA
Y CIENCIAS DEL AGUA**

**“ANÁLISIS DEL EFECTO DEL ACABADO SUPERFICIAL
PARA REDUCIR LA SOCAVACIÓN LOCAL DE UN GRUPO
DE PILAS DE PUENTES EMPLEANDO CFD”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO CIVIL**

PRESENTAN:

**JORGE LUIS FUENTES CASTILLO
MAURICIO LÓPEZ PATIÑO**

ASESOR

DR. HUMBERTO SALINAS TAPIA

CO-ASESOR

M. EN C.A. ANGÉLICA LIZBETH ÁLVAREZ MEJÍA

**TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO
NOVIEMBRE, 2023**

RESUMEN

En el marco del desarrollo económico de una nación, la infraestructura vial y, en particular, los puentes, desempeñan un papel crucial en la integración de sectores sociales y en la facilitación del intercambio de bienes y servicios. Sin embargo, la vulnerabilidad de las pilas, especialmente en lechos fluviales a fenómenos de socavación presenta un desafío sustancial para ingenieros y planificadores de infraestructuras.

Esta investigación se aborda de manera integral esta problemática, centrándose en la relación de la distancia entre las pilas y la aplicación de acabados superficiales para reducir la profundidad de socavación. Destacando que, la introducción de casquetes hexagonales como rugosidad superficial en las pilas de puente, altera el campo hidrodinámico de flujo, reduciendo los vórtices de herradura y de estela contribuyendo así en la reducción de la profundidad de socavación.

Si bien, la metodología adoptada implica el uso del software FLOW 3D para realizar simulaciones numéricas, se destaca su uso en la simulación de un caso real analizando diferentes secciones transversales de las pilas, permitiendo realizar comparaciones en la reducción de vórtices herradura y de estela tanto para pilas lisas como con acabados, proporcionando un contexto concreto para la aplicación de las estrategias propuestas.

Los resultados y discusiones, núcleo esencial de la investigación, desglosan la complejidad de la influencia de la distancia entre pilas y los acabados superficiales en la reducción de vórtices y profundidad de socavación. Estos hallazgos, alineados con la hipótesis planteada, no solo enriquecen el conocimiento existente, sino que también ofrecen perspectivas prácticas para la ingeniería civil. Destacan la importancia de considerar cuidadosamente la disposición de las pilas y los acabados superficiales en el diseño de puentes para mitigar eficazmente los efectos de la socavación local.

ABSTRACT

In the context of the economic development of a nation, road infrastructure, and particularly bridges, play a crucial role in integrating social sectors and facilitating the exchange of goods and services. However, the vulnerability of bridge piers, especially in riverbeds prone to erosion, poses a substantial challenge for infrastructure engineers and planners.

This research comprehensively addresses this issue by focusing on the relationship between the distance between piers and the application of surface finishes to reduce the depth of local scour. It emphasizes that the introduction of hexagonal caps as surface roughness on bridge piers alters the hydrodynamic flow field, reducing horseshoe and wake vortices, thus contributing to the reduction of depth local scour.

While the adopted methodology involves the use of the FLOW 3D software for numerical simulations, its application in simulating a real case is highlighted, analyzing different cross-sectional profiles of the piers. This allows for comparisons in the reduction of horseshoe and wake vortices for both smooth and finished piers, providing a concrete context for the application of the proposed strategies.

The results and discussions, the essence of the research, break down the complexity of the influence of the distance between piers and surface finishes on vortex reduction and local scour depth. These findings, in line with the hypothesized assumptions, not only enrich existing knowledge but also offer practical insights for civil engineering. They underscore the importance of carefully considering the arrangement of piers and surface finishes in bridge design to effectively mitigate the effects of local scour

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	VIII
ÍNDICE GENERAL.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
ACRÓNIMOS	XVIII
NOMENCLATURA.....	XIX
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.1.1 Estudios de socavación para pilas en grupo.....	4
1.1.2 Influencia de la separación entre pilas.....	5
1.1.3 Medidas de protección y mitigación contra socavación.	6
1.1.4 Acabado superficial en pilas de puentes.	8
1.1.5 Dinámica de fluidos computacional (CFD).	11

1.2 Planteamiento del problema	13
1.3 Justificación	14
1.4 Hipótesis	17
1.5 Objetivos	17
1.6 Estructura de la tesis	18
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	19
2.1 Ingeniería de Ríos	19
2.2 Erosión y Sedimentación	20
2.2.1 Erosión.....	20
2.2.3 Métodos empíricos para el cálculo de la profundidad de socavación local.....	25
2.3 Modelación numérica	25
2.3.1 Dinámica de fluidos computacional	26
2.3.2.1 Ecuaciones gobernantes de Flow 3D	32
2.3.2.2 Modelo de transporte de sedimentos en FLOW 3D.....	33
CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS	40
3.1 Recursos disponibles	40
3.2 Método	42
3.2.1 Etapa I: Recopilación de información: análisis y síntesis.....	43
3.2.1.1 Caso de estudio.....	43
3.2.2 Etapa II: Definición de Variables.....	47
3.2.3 Etapa III: Simulación con FLOW 3D.....	48
3.2.3.1 Proceso de Simulación con FLOW 3D.....	48
3.2.3.2 Simulación Hidrodinámica.....	54
3.2.3.3 Simulación de la socavación.....	57
3.2.3.3 Análisis de resultados (Postproceso).....	61

CAPÍTULO 4 RESULTADOS	63
4.1 Análisis hidrodinámico.	63
4.1.1 Análisis hidrodinámico para pilas aisladas con acabado liso.	64
4.1.2 Análisis hidrodinámico de pilas lisas en grupo.....	70
4.1.3 Análisis hidrodinámico de pilas aisladas con acabado hexagonal.	85
4.1.4 Análisis hidrodinámico de pilas en grupo con acabado hexagonal.	88
4.2. Análisis del proceso de socavación.	94
4.2.1 Análisis de la socavación en pilas unitarias con acabado liso.	94
4.2.2 Análisis de socavación en pilas lisas agrupadas	95
4.2.3 Análisis de la socavación en pilas unitarias con acabado superficial.	98
4.2.4 Análisis de la socavación en pilas agrupadas con acabado superficial.....	98
4.2.5 Análisis en la profundidad de socavación.....	103
 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	 107
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. <i>Modelos de pilas utilizados por Jiménez Pérez et al., (2006). a) pila lisa; b) pila con grecas; c) pila con casquete cónico.</i>	9
Figura 1.2. <i>Modelos de pilas de puentes con diferentes acabados hidrodinámicos a escala 1:20 (Díaz González, 2016).</i>	10
Figura 1.3. <i>Pilas con acabado: a) Casquetes esféricos y b) Casquetes hexagonales (Álvarez Mejía, 2022).</i>	11
Figura 2.1. <i>Vórtices de herradura alrededor de una pila (Nieves Rinaudi, 2016).</i>	23
Figura 2.2. <i>Presencia de vórtices de estela en el fenómeno de socavación local (Nieves Rinaudi, 2016).</i>	24
Figura 3.1. <i>Aplicaciones de FLOW 3D en diferentes casos de estudio; a) Modelo de un canal con secciones intermedias, b) Simulación hidráulica del túnel de desvío de presa, c) Simulación CFD de procesos químicos y d) Modelo de un puente vehicular sobre un río.</i>	41
Figura 3.2. <i>Metodología general de las actividades.</i>	42
Figura 3.3. <i>Ubicación del puente del “Congreso-San Nicolás, Municipio de Teziutlán, Puebla.</i>	44
Figura 3.4 <i>Datos generales del puente del “Congreso-San Nicolás, Municipio de Teziutlán, Puebla, México.</i>	45
Figura 3.5. <i>Hidrogramas de estudio con diferentes periodos de retorno (Álvarez Mejía, 2022).</i>	46
Figura 3.6. <i>Geometría de las pilas. a) Pila Circular, diámetro 1.2 m; b) Pila Rectangular, Lado Largo=1.0 m, Lado corto= 0.8 y c) Pila Hidrodinámica eje largo 1.8 m, eje corto 0.8 m.</i>	49
Figura 3.7. <i>Separación entre pilas, a) separación S1=1.2 m, b) separación S2=3.6 m y c) separación S3=6.0 m.</i>	49
Figura 3.8. <i>Ejemplo de acabado superficial a base de casquetes hexagonales para tres tipos de pilas; a) Pila de sección circular, b) Pila de sección rectangular y c) Pila de sección hidrodinámica.</i>	50

Figura 3.9. Diagrama de flujo del proceso de simulación hidrodinámica en FLOW 3D.	51
Figura 3.10. Construcción del modelo geométrico del tramo de río en QGIS y SolidWorks; a) Modelado y tratamiento de la superficie de elevaciones, b) Importación de la superficie a.wrl (Virtual Reality Modeling Language) del cauce, c) Conformación del sólido de malla, (d) Refinamiento del modelo y (e) Modelo STL final.	52
Figura 3.11. Modelo en FLOW 3D; a) Mallado en bloque, b) Vista frontal de la sección del cauce y c) Condiciones de Frontera.	53
Figura 3.12. Esquema de Análisis de sensibilidad de malla.	54
Figura 3.13. Esquema de análisis hidrodinámico para una sola pila.	56
Figura 3.15. Diagrama de flujo del proceso de simulación de erosión.	58
Figura 3.16. Diagrama de configuraciones para el análisis de la erosión.	59
Figura 3.17. Configuración para el análisis de la erosión con acabado superficial en pilas.	59
Figura 3.18. Modelo del cauce con incorporación de sedimentos; a) Vista Frontal de pilas agrupadas, b) Vista en planta de la sección del cauce, terreno natural y c) Vista Lateral del terreno natural del cauce.	60
Figura 3.19. Interacción entre flujo, sedimentos y pilas agrupadas.	61
Figura 4.1. Campos de velocidad; a) pila de sección rectangular, b) pila de sección circular y c) pila de sección hidrodinámica.	65
Figura 4.2. Campos de energía cinética de turbulencia alrededor de la pila; a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección rectangular y c) pila de sección circular	66
Figura 4.3. Campos de vorticidad en pilas lisas aisladas; a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección rectangular y c) pila de sección circular.	67
Figura 4.4. Zonas recirculación del flujo en un plano intermedio a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección rectangular y c) pila de sección circular.	68

Figura 4.5. Zonas recirculación del flujo en un plano cercano al lecho a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección rectangular y c) pila de sección circular	68
Figura 4.6. Estructuras vórtice en pilas lisas aisladas a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección rectangular y c) pila de sección circular	69
Figura 4.7. Energía Cinética de turbulencia alrededor de la pila; a) sección hidrodinámica, b) sección rectangular y c) sección circular	70
Figura 4.8. Velocidad para grupo de pilas de sección circular lisa con diferente separación; a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.2$ m, c) Separación $S3=6.0$ m	72
Figura 4.9. Energía cinética de turbulencia en grupo de pila de sección circular; a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m, c) Separación $S3=6.0$ m	73
Figura 4.10. Vorticidad para grupo de pilas de sección circular con diferente separación; a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m, c) Separación $S3=6.0$ m	74
Figura 4.11. Zonas de recirculación de flujo en pilas agrupadas de sección circular lisa; a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m, c) Separación $S3=6.0$ m	76
Figura 4.12. Trayectorias de flujo en pilas de sección circular lisa; a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m, c) Separación $S3=6.0$ m	77
Figura 4.13. Velocidad para grupo de pilas de sección rectangular lisa con diferente separación; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m, c) Separación $S3=5.0$ m	78
Figura 4.14. Vorticidad y separación del flujo en un grupo de pilas de sección rectangular con diferente separación; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m, c) Separación $S3=5.0$ m	79
Figura 4.15. Vorticidad y descensos de flujo en un grupo de pilas de sección rectangular con diferente separación; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m, c) Separación $S3=5.0$ m	80
Figura 4.16. Energía Cinética de turbulencia en un grupo de pilas de sección rectangular lisa con diferente separación; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m, c) Separación $S3=5.0$ m	81

Figura 4.17. Recirculación del flujo en un grupo de pilas de sección rectangular con diferente separación; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m, c) Separación $S3=5.0$ m.	81
Figura 4.18. Velocidad del flujo en grupo de pilas de sección hidrodinámica lisa con diferente separación; a) Separación $S1=1.8$m, b) Separación $S2=5.4$ m, c) Separación $S3=9.0$ m.	83
Figura 4.20. Energía Cinética de turbulencia de un grupo de pilas de sección hidrodinámica con diferente separación; a) Separación $S1=1.8$ m, b) Separación $S2=5.4$ m y c) Separación $S3=9.0$ m.	84
Figura 4.21. Zonas de recirculación del flujo en un grupo de pilas de sección hidrodinámica con diferente separación; a) Separación $S1=1.8$ m, b) Separación $S2=5.4$ m y c) Separación $S3=9.0$ m.	85
Figura 4.22. Comportamiento de la velocidad; a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección circular y c) pila de sección rectangular.	86
Figura 4.23. Vorticidad en pilas con acabado (parte frontal); a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección circular y c) pila de sección rectangular.	87
Figura 4.24. Vorticidad en pilas con acabado hexagonal (parte posterior); a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección circular y c) pila de sección rectangular.	87
Figura 4.25. Vorticidad en grupo de pilas de sección circular con acabado hidrodinámico a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m, c) Separación $S3=6.0$ m.	89
Figura 4.26. Energía cinética de turbulencia en grupo de pilas de sección circular con acabado hidrodinámico a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m, c) Separación $S3=6.0$ m	90
Figura 4.27. Vorticidad en pilas de sección rectangular; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m y c) Separación $S3=5.0$ m.....	91
Figura 4.28. Energía cinética de turbulencia en pilas de sección rectangular; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m y c) Separación $S3=5.0$m.....	92
Figura 4.29. Vorticidad en grupo de pilas de sección hidrodinámica con diferentes separaciones; a) Separación $S1=1.8$ m, b) Separación $S2=5.4$ m y c) Separación $S3=9.0$ m.	93

Figura 4.30. Profundidad de socavación en pilas unitarias con acabado liso; a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección circular y c) pila de sección rectangular.	95
Figura 4.31. Profundidad de socavación en grupo de pilas de sección circular con acabado liso; a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m y c) Separación $S3=6.0$m.	96
Figura 4.32. Profundidad de socavación para grupo de pilas de sección rectangular; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m y c) Separación $S3=5.0$ m.	97
Figura 4.33. Profundidad de socavación para grupo de pilas de sección hidrodinámica; a) Separación $S1=1.8$ m, b) Separación $S2=5.4$ m y c) Separación $S3=9.0$ m.	99
Figura 4.34. Profundidad de socavación en pilas unitarias con acabado superficial; a) Sección rectangular, b) Sección circular y c) Sección hidrodinámica.	100
Figura 4.35. Profundidad de socavación para grupo de pilas de sección circular con acabado superficial; a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m y c) Separación $S3= 6.0$ m	101
Figura 4.36. Profundidad de socavación para grupo de pilas de sección rectangular con acabado superficial; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m y c) Separación $S3= 5.0$ m	102
Figura 4.37. Profundidad de socavación para grupo de pilas de sección hidrodinámica con acabado superficial; a) Separación $S1=1.8$ m, b) Separación $S2=5.4$ m y c) Separación $S3= 9.0$ m	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. <i>Análisis de los métodos para el cálculo de socavación local en pilas de puentes (Modificado de Rodríguez y Bustillos, 2015).</i>	27
Tabla 3.1. <i>Datos generales del puente Congreso-San Nicolas (Urrutia Piña, 2010)</i>	44
Tabla 3.2. <i>Características físicas e hidráulicas de la sección del puente (Díaz González, 2016).</i>	46
Tabla 3.3. <i>Valores de la separación entre pilas.</i>	47
Tabla 3.4. <i>Factores geométricos de casquete hexagonal (Álvarez Mejía,2022).</i>	50
Tabla 3.5. <i>Condiciones de contorno del sólido, paredes del cauce.</i>	53
Tabla 3.6. <i>Número de elementos de cada malla analizada.</i>	55
Tabla 4.1 <i>Profundidad máxima de socavación en pilas lisas aisladas</i>	104
Tabla 4.2 <i>Profundidad máxima de socavación en grupos de pilas con acabado liso</i>	104
Tabla 4.3 <i>Profundidad máxima de socavación en pilas aisladas con acabado hexagonal</i>	105
Tabla 4.4 <i>Profundidad máxima de socavación en pilas agrupadas con acabado hexagonal</i>	105
Tabla 4.5 <i>Comparativo en profundidad máxima de socavación entre escenarios</i>	106

ACRÓNIMOS

- **SCT:** Secretaría de Comunicaciones y Transporte
- **CFD:** Dinámica computacional de Fluidos
- **2D:** Bidimensional
- **3D:** Tridimensional
- **HEC-18:** Circular de ingeniería Hidráulica No. 18
- **FHWA:** Administración Federal de Carreteras
- **CSU:** Universidad Estatal de Colorado
- **CPU:** Unidad Central de Procesamiento
- **RANS:** Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds
- **LES:** Simulación de remolino a gran escala
- **GMRES:** Método Residual Mínimo Generalizado

NOMENCLATURA

SÍMBOLO	TÉRMINO	UNIDAD
g	Aceleración de la gravedad	$\frac{m}{s^2}$
k_s	Altura de rugosidad de Nikuradse	mm
A	Ancho de pila	m
B	Ancho del canal	m
α_*	Ángulo de colisión entre los granos	°
β'	Ángulo de pendiente del lecho	°
ϕ_n	Ángulo de reposo definido como el ángulo de la pendiente antes que los granos se deslicen por sí mismos	°
φ'	Ángulo entre la dirección de la pendiente ascendente y el flujo adyacente al lecho inclinado	°
A_H	Área hidráulica	m^2
Q	Caudal	$\frac{m^3}{s}$
q	Caudal unitario	$\frac{m^3}{s - m}$
k_ϕ	Coefficiente de ángulo de ataque del flujo	Adimensional
C_d	Coefficiente de arrastre	Adimensional
B_n	Coefficiente de carga de fondo	Adimensional
K_C	Coefficiente para pilas cilíndricas	Adimensional
K_f	Coefficiente que depende de la forma de la pila	Adimensional
K_g	Coefficiente que depende de la relación tirante	Adimensional

u_i	Componente de la velocidad del flujo en la dirección i	$\frac{m}{s}$
$C_{s,n}$	Concentración de sedimento en suspensión	$\frac{kg}{m^3}$
k	Constante de Von Karman	Adimensional
\forall	Constante de Yaroslavtziev	Adimensional
s_{ij}	Delta de Kronecker	
ρ	Densidad del fluido	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_n	Densidad del sedimento	$\frac{kg}{m^3}$
S	Densidad relativa	Adimensional
S_n	Densidad relativa de las partículas de sedimento	Adimensional
d_n	Diámetro característico de sedimento	mm
D	Diámetro de la pila	m
D_{50}	Diámetro medio.	mm
D	Difusividad	Adimensional
d_f	Distancia al fondo	m
k	Energía cinética de turbulencia	$\frac{m^2}{s^2}$
τ_{cr}	Esfuerzo cortante critico de Shields	$\frac{N}{m^2}$
τ_b	Esfuerzo cortante de fondo	$\frac{N}{m^2}$
τ	Esfuerzo de cizallamiento cerca del lecho	$\frac{N}{m^2}$
h_n	Espesor de la capa de la carga de fondo	m
K_σ	Factor de corrección por degradación del sedimento	Adimensional
K_i	Factor de corrección por intensidad del flujo	Adimensional
K_D	Factor de corrección por tamaño del sedimento	Adimensional

a'	Factor de seguridad	Adimensional
\dot{U}_i	Fluctuación de la velocidad del fluido en la dirección i	$\frac{m}{s}$
c_b	Fracción de volumen asociada al diámetro característico de las partículas	%
L	Longitud del canal	m
Fr	Número de Froude	Adimensional
N_s	Número del sedimento	Adimensional
τ_*	Parámetro adimensional de Shields	Adimensional
f_4	Parámetro en función del ángulo de ataque del flujo	Adimensional
f_3	Parámetro que depende de la forma de la pila	Adimensional
f_2	Parámetro que depende de la relación entre el tirante del flujo y el ancho de la pila	Adimensional
f_1	Parámetro que depende de la relación entre la velocidad media del flujo y la velocidad crítica	Adimensional
P	Presión	Pa
k_h	Profundidad de la corriente aguas arriba luego de la socavación general	m
d_s	Profundidad de socavación	m
Y	Profundidad del flujo	m
n'	Rugosidad debida a las partículas	Adimensional
N	Rugosidad total de Manning	Adimensional
S3	Separación equivalente a cinco veces el diámetro de la pila	m
S2	Separación equivalente a tres veces el diámetro de la pila	m
S1	Separación equivalente a una vez el diámetro de la pila	m
d_*	Tamaño de grano	Adimensional
y	Tirante	m

n_b	Vector normal hacia el exterior de la superficie del lecho	Adimensional
V_c	Velocidad crítica	$\frac{m}{s}$
w_s	Velocidad de caída de las partículas	$\frac{m}{s}$
u_t	Velocidad de cizallamiento	$\frac{m}{s}$
u	Velocidad media del flujo	$\frac{m}{s}$
$u_{s,n}$	Velocidad de sedimentación	$\frac{m}{s}$
$u_{E,n}$	Velocidad de sedimentación de los granos	$\frac{m}{s}$
\bar{u}	Velocidad del fluido promediada en profundidad	$\frac{m}{s}$
$u_{s,n}$	Velocidad del sedimento de la especie n	$\frac{m}{s}$
u	Velocidad media del flujo	$\frac{m}{s}$
ν	Viscosidad cinemática del fluido	$\frac{m^2}{s}$
ν_t	Viscosidad de turbulencia	$\frac{m^2}{s}$

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico de un país está vinculado con su infraestructura carretera, a través de ella se logra enlazar a los diferentes sectores de la sociedad y fomentar el intercambio de productos y mercancías, movimiento de personas y solventar necesidades de servicios de toda la población (SCT, 2018).

Dentro de los elementos que componen el sistema de movilidad se encuentran los puentes, los cuales tienen gran importancia ya que cumplen diversas funciones, por ejemplo, conectar tanto a ciudades como a comunidades las cuales pueden estar separadas por un río, o por terrenos accidentados.

1.1 Antecedentes

La construcción de este tipo de estructuras es fundamental para el desarrollo y comunicación de una localidad. La mayoría de estas estructuras son soportadas con de pilas y/o estribos y desplantadas sobre zapatas y/o pilotes, ya sea en grupo o de forma aislada. Cuando se trata de pilas como soportes, estas se construyen sobre lechos móviles que interactúan con la corriente del flujo de tal forma que, la planeación, diseño, construcción y mantenimiento, resulta ser todo un desafío ingenieril (Toapaxi et al., 2015).

De acuerdo con Rocha (2013), cuando un puente cruza un río debe considerarse como una estructura hidráulica. Así, un puente consta de una superestructura y una subestructura formada por estribos, pilas y cimentación. Según García Guillen (2019), la estructura de un puente, principalmente cuando los soportes (pilas) se encuentran en el cauce, estas son afectadas por el fenómeno de socavación, que es ocasionado por la acción erosiva del agua que arranca, y acarrea material del lecho y las márgenes del río.

Por otra parte, Jiménez Pérez et al. (2006), detallan que la colocación de una pila de puente en una corriente la convierte en un obstáculo para el flujo, cambiando las condiciones hidráulicas de la sección, principalmente cambiando el régimen de flujo (aumento de velocidad) lo que provoca se incremente la capacidad de arrastre de sólidos. Si esta capacidad supera localmente el aporte de sólidos aguas arriba, ocurrirá lo que se conoce como socavación local al pie de la pila. El fenómeno de socavación local en pilas es un fenómeno que se comporta en tres dimensiones, ya que debido a la presencia del objeto se generan vórtices responsables del fenómeno, denominados vórtices de herradura y vórtices de estela (Salgado Maldonado et al., 2017).

Mientras que, Fouli & Elsebaie (2016), mencionan que la socavación local en las pilas de los puentes es uno de los problemas más serios, muchos puentes que cruzan cauces a nivel mundial fallan no por razones estructurales, sino por el fenómeno de socavación. De ahí que, el estudio de la socavación en pilas permite identificar los fenómenos y condiciones a considerar para, llevar a cabo un diseño óptimo y lograr aumentar la vida útil de estas estructuras.

También, Bao & Liu (2017), consideran que la socavación local es la principal causa por la que los puentes colapsan y terminan con su vida de servicio. Por otro lado, Rodríguez Pérez & Yataco Manrique (2021), mencionan que cuando la socavación en un puente es alta, se considera como la causa por la que, los puentes requieran de gastos elevados de reparación, y cuando se produce el colapso provocan el aislamiento de poblaciones e incluso pérdidas humanas.

Ahora bien, Vite Moreno (2019), menciona que en México existe una amplia diversidad de fenómenos naturales que causan daños a la infraestructura carretera, por ejemplo, los fenómenos hidrometeorológicos en los que se incluyen lluvias, inundaciones, ciclones tropicales, vientos fuertes y tormentas severas; así como los geológicos tales como sismos o deslizamientos. *“Estos fenómenos naturales han provocado daños de socavación local en puentes y la mayoría de los puentes en México no son atendidos* (Campa Rodríguez & Bustillos Astorga, 2015).

“Además, en México se carecen de estudios relacionados con la problemática del fenómeno de socavación en pilas de puentes, sin embargo, con los casos atendidos en diversas dependencias relacionadas con la infraestructura de las vías terrestres, permite estimar que la socavación es la causa del 90% de los colapsos de los puentes” (Solares, 1989).

Si bien, existen diversos métodos para el cálculo de la socavación en pilas, la mayoría están basados en datos de laboratorio, con limitaciones y condiciones ideales (Torres Suarez, 2019). Los métodos más usados para calcular la profundidad de socavación general y local pueden dividirse en: **General**, Método de Lischtván–Levediev (2016) y Método de Laursen (1962); **Local**, Método de Laursen y Toch (1953, 1956), Método de Maza – Sánchez (1968), Método de Melville y Sutherland (1988) y uno de los más utilizados el Método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU-HEC18).

De acuerdo con los métodos establecidos la profundidad de socavación depende de varios factores tales como: *“La densidad del agua, densidad del sedimento, viscosidad cinemática, velocidad media de la corriente, profundidad del flujo, diámetro característico del sedimento, desviación estándar geométrica del sedimento, aceleración debido a la fuerza de la gravedad, ancho de la pila, ángulo de ataque del flujo, tiempo de duración del proceso erosivo, tipo de sedimento (granular o cohesivo), estratificación del lecho del río, configuración del cauce, presencia de hielo y basura; tamaño y posición de la cimentación”* (Rodríguez Pérez & Yataco Manrique, 2021).

Si bien, en el diseño la cimentación de las pilas de un puente, la socavación se deja a criterio del ingeniero, muchas veces se subestima la socavación debido a las fórmulas aplicadas, lo que provoca grandes fallas en la cimentación y por consiguiente en la estructura de los puentes.

1.1.1 Estudios de socavación para pilas en grupo.

Estudiar el comportamiento de la socavación en pilas en grupo resulta un tanto compleja por la forma en que se presenta el fenómeno. De acuerdo con Ataie-Ashtiani & Aslani-Kordkandi, (2013), realizaron un estudio para analizar el comportamiento de una pila circular simple y un tándem de pilas circulares (2 pilas), la separación entre estas fue de 3 veces el diámetro de la pila (3D), demostrando que entre las dos pilas se forma un flujo ascendente más fuerte y considerable, pero una deflexión transversal más débil en comparación con la región detrás del único pilar. Para las pilas en tándem se forma un régimen de reinsertión en el nivel cercano de la profundidad media y un régimen de desprendimiento cerca del lecho.

En estudios realizados por Amini et al. (2012) y (Ataie-Ashtiani & Beheshti, 2006), se observó que la separación entre pilas menores de 1.15 veces el diámetro de la pila, el grupo de pilas se vuelve como un solo cuerpo, mientras que cuando la separación entre pilas supera 5 veces el diámetro de la pila, la agrupación de pilas no cambia la profundidad de socavación.

Mientras que, Bateni et al. (2019), realizaron estudios sobre la influencia de la geometría de pilas complejas, la configuración de los grupos de pilotes, el espesor de la cabeza del pilote, el ancho de la columna en la profundidad, y la forma del foso de socavación. Los estudios demostraron que el diámetro de los pilotes tiene mayor efecto sobre la profundidad de la socavación.

Okhravi et al. (2023), realizaron un estudio donde establecen un modelo numérico no hidrostático tridimensional (3D) para investigar la socavación local alrededor de cuatro pilotes circulares, alineados en mezclas de sedimentos uniformes y no uniformes, con la finalidad de proporcionar información para mejorar el diseño de contramedidas de socavación. Los resultados revelan los efectos significativos del espaciamiento de las pilas en el campo de flujo y los patrones de formación de los fosos de socavación y deposición de sedimentos.

En general, una menor separación entre pilotes resulta en mayor socavación aguas arriba del pilote(s) frontal(es) y desplaza la deposición hacia aguas abajo, esto debido a la existencia de una mayor energía en la región de la estela de los pilotes para ambos tipos de sedimento.

1.1.2 Influencia de la separación entre pilas

Distintas investigaciones mencionan que la construcción de los cruces de puentes bajo una influencia de grupo de pilas ha tomado gran relevancia ya que, se han utilizado ampliamente en puentes que cruzan el mar o puentes en aguas profundas debido a la eficiencia estructural, la facilidad de construcción y el bajo costo (Zhang et al., 2020). La forma, profundidad y tamaño de la socavación del grupo de pilas de un puente difieren de la socavación de una sola pila, es decir, se forma una socavación local y cuando fluye alrededor de un grupo de pilas se forma adicionalmente una socavación general (Voskoboinick et al., 2021).

De tal forma que, la ubicación, la distancia entre las pilas y la disposición angular toman un papel importante en el proceso de la socavación alrededor de la estructura del grupo de pilas del puente. Si las pilas o pilares están ubicados a poca distancia entre sí, entonces los vórtices de herradura y los vórtices de estela de cada pila y sus socavaciones locales interactúan, lo que provoca que el flujo entre las pilas se acelere debido a la contracción del flujo por las pilas adyacentes (Voskoboinick et al., 2021).

De la misma forma Ataie-Ashtiani & Beheshti, (2006), realizaron investigaciones experimentales de la socavación alrededor de un grupo de pilotes, especialmente dos pilares en tándem y proporcionaron un factor de corrección para mejorar la precisión de las ecuaciones existentes para la predicción de la profundidad de la socavación máxima, concluyendo que el proceso de socavación en grupos de pilotes es más complejo que en pilas simples. La profundidad de socavación disminuye al aumentar la separación $S=D$ debido a una disminución progresiva de la influencia de los pilotes vecinos en el desarrollo de la socavación

1.1.3 Medidas de protección y mitigación contra socavación.

En la actualidad se han desarrollado mecanismos para tratar de mitigar los efectos de la socavación local en las pilas de puente, han impulsado el desarrollo de investigaciones de obras de protección y control de la erosión. A lo largo del tiempo, se han propuesto diversos métodos y técnicas para reducir la socavación local en pilas, donde se han aplicado los modelos físicos como la principal herramienta y en los últimos años el uso de métodos numéricos a través de la aplicación de la dinámica de fluidos computacional (CFD). Con ello, se han planteado diferentes alternativas que han permitido reducir la profundidad de socavación.

Moncada et al. (2007), planteo un modelo físico con diferentes anillos alrededor de una pila circular y la perforación de una ranura como dispositivos para controlar la profundidad de socavación, demostrando que el tamaño del anillo influye directamente en la profundidad de socavación. Para el caso de la ranura, se encontró que la posición más favorable para disminuir la socavación local es colocándola cerca del fondo.

Mientras que, Kumar et al. (1999), realizaron estudios a diferentes pilas colocando ranuras de diferentes longitudes y en diferentes ángulos de ataque, además de utilizar collares circulares en diferentes tamaños y a diferentes alturas, demostrando que una ranura es efectiva para reducir la socavación, particularmente si la ranura se extiende dentro del lecho.

También, Zarrati et al. (2004), realizaron un estudio colocando pilares alineados y sesgados a 5° y 10° con respecto al flujo y con collares de diferentes anchos y en varias elevaciones, donde los collares fueron efectivos en dos pilas en línea con el flujo y los collares independiente tuvieron una mejor eficiencia en comparación con los collares continuos. Una combinación de collar continuo y escollera causo la mayor reducción de la profundidad de socavación de alrededor del 50% y considerando collares independientes y continuos redujeron la profundidad de socavación en el pilar delantero en aproximadamente un 30 y 25% respectivamente.

Por su parte, Jaramillo-Mejía y Reyes-Salazar (2019), analizaron paramentos a distintas inclinaciones concluyendo que los paramentos con reducción de sección en las partes bajas presentan mayor concentración de esfuerzos en el fondo y velocidades mayores. Del mismo modo, Gautam et al. (2019), compararon el campo de flujo que produce una pila simple y una compuesta concluyendo que una pila simple es más proclive a socavarse, particularmente debido al efecto del espesor del cabezal de una pila compuesta y además podría emplearse como medida de control.

Akib et al. (2014), investigaron el efecto producido por dos medidas de protección local en las pilas, la primera fue colocando collares alrededor de la pila de diferentes materiales (acero, aluminio y Perpex), y la segunda fue usado una geobag (bolsa rellena de concreto triturado y cascaras de palma). Por otra parte, Vijayasree et al. (2019), realizaron experimentos alrededor de pilas con diferentes formas sobre un lecho de sedimentos, identificando que las pilas con forma rectangular tenían más profundidad de socavación mientras que, las pilas con forma lenticular presentaban la socavación mínima. Por otra parte, Reyes-Ramírez & Reyes-Ramírez (2020), al realizar una investigación definieron que al aplicar mejoramiento del subsuelo mediante adición de aditivos redujo la profundidad de socavación en magnitudes de hasta un 40%, la desventaja principal de los métodos es el costo de implementación. Otros estudios desarrollados por Vijayasree et al. Akib et al. (2014), investigaron el efecto producido por dos medidas de protección local en las pilas, la primera fue colocando collares alrededor de la pila de diferentes materiales (acero, aluminio y Perpex), y la segunda fue usado una geobag (bolsa rellena de concreto triturado y cascaras de palma). Por otra parte, Vijayasree et al. (2019), realizaron experimentos alrededor de pilas con diferentes formas sobre un lecho de sedimentos, identificando que las pilas con forma rectangular tenían más profundidad de socavación mientras que, las pilas con forma lenticular presentaban la socavación mínima. Por otra parte, Reyes-Ramírez & Reyes-Ramírez (2020), al realizar una investigación definieron que al aplicar mejoramiento del subsuelo mediante adición de aditivos redujo la profundidad de socavación en magnitudes de hasta un 40%, la desventaja principal de los métodos es el costo de implementación. Otros estudios desarrollados por Vijayasree et al. (2019), realizaron un análisis experimental del campo de flujo en pilares con diferentes formas identificando estructuras de

socavación para cada una, contribuyendo a la emisión de recomendaciones en los mecanismos de reducción asociados con cada forma.

1.1.4 Acabado superficial en pilas de puentes.

Otra alternativa para la reducción de la profundidad de socavación en pilas de puente es el uso de acabados superficiales (incremento de la rugosidad) en la pila. El acabado superficial en las pilas de puentes ha sido tratado por diferentes autores, donde se ha estudiado una rugosidad en las superficies, la rugosidad se refiere a una serie de irregularidades geométricas que se extienden aleatoria o uniformemente sobre una superficie lisa, que afectan la resistencia y dinámica del flujo cuando este incide en la superficie de forma positiva o negativa (Álvarez Mejía, 2022).

Se ha demostrado que, el uso de rugosidades artificiales en campos de la ingeniería permite reducir la resistencia aerodinámica e hidrodinámica. Uno de los ejemplos claros son el efecto que tiene la rugosidad en la superficie de las pelotas de golf mediante unas oquedades, las cuales han mejorado el rendimiento de estos objetos al reducir el efecto de las estelas de turbulencia.

Es conveniente mencionar que el empleo de rugosidad como mecanismo para reducir la fuerza de arrastre en cilindros, ha sido abordado por diferentes autores como Butt & Egbers, (2016), quienes estudiaron la estructura de los vórtices generados en un cilindro con cavidades hexagonales cóncavas concluyendo que reducen en un 35% los valores del coeficiente de arrastre en comparación con un cilindro liso.

Por su parte, Shahsavari (2017) propuso un acabado en forma de espiral en una pila circular para analizar su efecto en la profundidad de socavación, para ello realizaron un modelo experimental, en el cual demostraron que este tipo de acabado reduce en 47% la profundidad de socavación local de una pila circular. Por su parte, Abdelhaleem (2019) abordó la presencia de rugosidad a diferentes alturas en la superficie de pilares comprobando efectividad en la disminución de socavación. Además, desarrollaron una fórmula para estimar la altura máxima de socavación en pilares rugosos.

Un de las investigaciones que se han tomado como referencia para analizar los efectos de diferentes acabados superficiales en pilas es el desarrollado por Jiménez Pérez et al., (2006), donde analizaron el efecto de diferentes acabados en la profundidad de socavación en pilas, tomaron en cuenta los siguientes acabados: lisa, grecas, casquete cónico. En la figura 1.1 se muestran los modelos de las pilas con los diferentes acabados. Los resultados obtenidos y las observaciones realizadas durante los ensayos de la investigación llevaron a la conclusión de que la forma de la rugosidad artificial interviene en el comportamiento del flujo alrededor de la pila; siendo la más favorable la rugosidad con casquete cónico ya que presentó un volumen de socavación del 54%, con respecto al volumen socavado de la pila lisa.

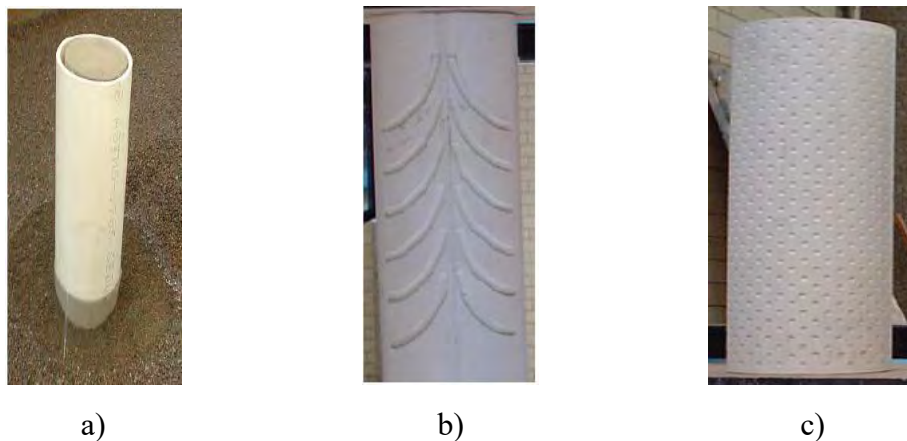


Figura 1.1. Modelos de pilas utilizados por Jiménez Pérez et al., (2006). a) pila lisa; b) pila con grecas; c) pila con casquete cónico.

Mientras que, Díaz-González (2016), realizó un análisis experimental de la socavación local de pilas de puente con diferentes acabados superficiales, el análisis se realizó con el empleo de técnicas ópticas no invasivas (Particle Image Velocimetry PIV), obteniendo el comportamiento hidrodinámico del flujo alrededor de las pilas del puente con diferente acabado superficial (Figura 1.2). Además, demostró que la inclusión de un acabado hidrodinámico a las pilas de puentes tiene un efecto positivo sobre el flujo, reduciendo la vorticidad aguas arriba y aguas abajo de la estructura, respecto a una pila sin acabado hidrodinámico.

De acuerdo con la investigación se afirma que los acabados hidrodinámicos de una pila de puente reducen la profundidad de socavación de acuerdo con el modo en que interactúan con el

flujo. El empleo del acabado de “casquetes hexagonales” en una pila reduce la profundidad de socavación hasta un 39% para valores de Froude altos, sin embargo, empleando un acabado de pila “v invertida” también se logra hasta un 25% de reducción. De lo cual, se comprueba que la propuesta del acabado de “casquetes hexagonales”, resultando ser el acabado que reduce en mayor medida la profundidad de socavación.

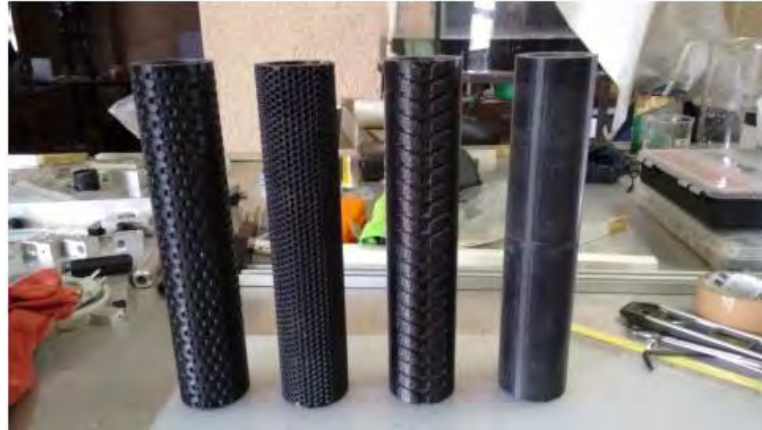


Figura 1.2. Modelos de pilas de puentes con diferentes acabados hidrodinámicos a escala 1:20 (Díaz González, 2016).

Por otra parte, Álvarez Mejía (2022) realizó una investigación empleando CFD donde contempla el estudio de la socavación local en pilas de puente y como la implementación de acabados superficiales altera el flujo y por consecuencia la reducción de la profundidad de la socavación, contemplando dos tipos de acabados esférico y hexagonal (Figura 1.3). Así mismo, menciona que el grado de rugosidad que aportan los parámetros geométricos asociados con patrones hexagonales y esféricos, alteran el campo hidrodinámico alrededor de pilas de puentes, reduciendo así la profundidad de socavación local.

Álvarez Mejía (2022), determinó que la interferencia de la rugosidad tiene mayor impacto en presencia de números de Reynolds bajos, los diámetros de casquete de mayor tamaño asociados con el parámetro geométrico $a_1=0.2$ (a_i es un factor de escala asociado a “a” donde a es el diámetro del casquete) reducen el desprendimiento de vórtices a los costados de la pila en un 40%, sin embargo, intensifican la producción de vórtices herradura al favorecer el descenso. En

contraste la relación para con la separación entre casquetes de 0.03 para sección hexagonal y 0.05 para la sección esférica reducen en un 42% el descenso del flujo en la componente vertical.

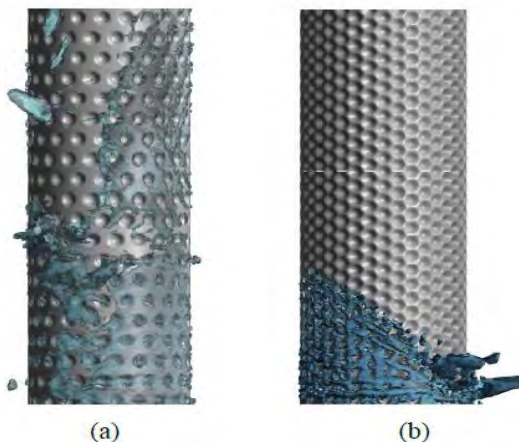


Figura 1.3. *Pilas con acabado: a) Casquetes esféricos y b) Casquetes hexagonales (Álvarez Mejía, 2022).*

1.1.5 Dinámica de fluidos computacional (CFD).

Dado que el fenómeno de socavación es en efecto bastante complejo, gran parte de ello se debe al número de variables que interfieren, destacando que la mayoría de los estudios se centran en el empleo de modelos físicos (Farooq & Ghumman, 2019). Sin embargo, por el alto costo, en los últimos años una alternativa es la modelación numérica, específicamente la aplicación de la CFD, sin embargo, se requieren de datos para validar los modelos (Fernández y Pérez, 2015; Álvarez -Mejía, 2022).

Existen diferentes modelos de CFD tanto en 2D como en 3D que permiten simular el fenómeno de socavación. Las ventajas que proporciona el análisis mediante la aplicación de CFD se pueden resumir en: reducción sustancial de tiempo y costos tanto computacionales como en la elaboración de los modelos físicos y por ende la posibilidad de analizar sistemas con condiciones muy complejas de analizar experimentalmente, y un nivel de detalle prácticamente ilimitado.

En los últimos años diversos investigadores han invertido en el análisis y reproducción del fenómeno de socavación utilizando CFD. Walsh (2018), utilizó un modelo hidrodinámico de

volumen finito con un modelo de turbulencia κ - ε para simular el flujo 3D alrededor de una pila, logrando reproducir el proceso de socavación y la forma del foso bajo un esquema fluido-sedimento combinado.

Respecto al análisis de la rugosidad superficial, Dierich & Nikrityuk (2013) realizaron un estudio numérico bidimensional de la influencia de la rugosidad de la superficie en el flujo de calor y fluido alrededor de una partícula cilíndrica, estudiaron numéricamente la influencia de la rugosidad en el coeficiente de arrastre y el número de Nusselt promediado en superficie en el rango de los números de Reynolds $10 \leq Re \leq 200$, el análisis de las simulaciones numéricas mostró que el impacto de la rugosidad en el coeficiente de arrastre es insignificante en comparación con el número de Nusselt promedio de la superficie.

Miau et al. (2018), realizaron experimentos para examinar el efecto de la rugosidad aerodinámica de diferentes materiales textiles instalados en un cilindro circular 2D, realizando la prueba a 38 materiales textiles, encontrando como resultado que el coeficiente de arrastre en el régimen crítico son sensibles a la rugosidad del textil. Islam & Mohany (2020), ejecutaron un estudio considerando tres cilindros realizando simulaciones numéricas, utilizando el modelo de turbulencia de grandes remolinos, estudio que permitió tener nuevos conocimientos sobre la física del flujo en el canal y su efecto en el desarrollo del flujo tridimensional, concluyendo que la tipología y la separación del flujo conduce a la formación de vórtices en los bordes de la corriente, lo que induce un flujo descendente en la estela cercana a los cilindros.

Álvarez Mejía (2022), realizó una investigación de la socavación local en pilas de puentes, mediante el uso de técnicas CFD incorporando mecanismos de alteración del flujo, con la inclusión de acabados superficiales en pilas con diferentes patrones geométricos como los son casquetes esféricos y hexagonales, logrando determinar la altura de la rugosidad (k_s) del acabado superficial como una función asociada con la profundidad, separación y diámetro del casquete hexagonal o semiesférico, esto permitió reducir los tiempos de cómputo en un 63% para el modelo Flow 3D y en un 86% en el modelo de Iber.

1.2 Planteamiento del problema

Los puentes al ser estructuras con un papel importante en la comunicación están expuestas a peligros naturales, tal es el caso de encontrarse en el cauce de un río. Estas representan un obstáculo en la corriente del agua, provocando una alteración en las condiciones de flujo, según la forma de la pila, alineación, cantidad de pilas o apoyos y la separación de estos.

El río por su propia naturaleza es esencialmente dinámico y cambiante además de que se encuentra bajo los efectos de la actividad humana, por lo que las condiciones del suelo, las propiedades del material del fondo como tamaño y peso específico influyen directamente en el problema de socavación, condicionando si pueden ser desprendidos o no.

La socavación representa un problema que ha sido estudiado en las últimas décadas. La predicción de las características de socavación es uno de los principales problemas de la ingeniería hidráulica e hidrológica (Sharafati et al, 2019).

Estimar con precisión la profundidad de socavación representa un desafío debido a la complejidad de los patrones de flujo que se desarrollan alrededor de las estructuras hidráulicas. En los últimos años, los modelos físicos se han empleado como un método básico en el comportamiento del flujo y las investigaciones de socavación local.

Sin embargo, estudios realizados exponen que las principales variables al abordar el tema se centran en las características geométricas de la pila, propiedades granulométricas del fondo de los cuces y el comportamiento alrededor de la pila. Hoy en día los métodos numéricos permiten realizar el análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) que permite estudiar estas características en conjunto para estimar y predecir el comportamiento del fenómeno de una manera aproximada.

El comportamiento de un flujo alrededor de un objeto ha sido punto de análisis en diferentes áreas de la ingeniería con especial interés en la estabilización de los campos de flujo y disminución de la resistencia obtenida al golpear un objeto (Álvarez Mejía, 2022). Existen estudios que plantean la modificación de la superficie de contacto incorporando un acabado superficial a las pilas con el fin de reducir la socavación.

Otros autores mencionan que la forma de pila alargada reduce sustancialmente la socavación, mientras que otros hacen referencia a la separación que debe existir entre las pilas del puente para poder disminuir la socavación local. Estas tres consideraciones aplicadas al problema en cuestión pretenden controlar las condiciones hidrodinámicas alrededor de un grupo de pilas, mediante la modificación de la rugosidad de la superficie, la separación entre las pilas y la forma de estas, para controlar condiciones hidrodinámicas, dando respuesta a las siguientes interrogantes:

- ❖ ¿En qué grupo de pilas se presentan menores alteraciones de las condiciones hidrodinámicas?
- ❖ ¿Con que separación entre pilas se tiene mayor eficiencia como medida de control ante la socavación?
- ❖ ¿Qué pila y con que acabado superficial ofrece la mayor eficiencia como medida de control?
- ❖ ¿Cuál combinación de pilas, separación y acabado disminuye significativamente la socavación?

1.3 Justificación

Actualmente se está enfrentando un problema de calentamiento global, que incide directamente en las condiciones climatológicas, que provocan eventos extraordinarios que no se tienen previstos al realizar el diseño del puente, eventos extraordinarios que derivan en el aumento del flujo en ríos y arroyos que afectan directamente a las pilas de los puentes debido a flujo que estos transportan.

La presente investigación se centró en el principio de las pelotas de golf, principalmente en su acabado para ser implementado como acabado superficial en las pilas de puente. Se ha demostrado que en pelotas lisas se tiene una mayor resistencia al flujo, mientras que en pelotas con hoyuelos o imperfecciones disminuye la resistencia en el flujo.

También, se ha demostrado que el acabado superficial en pilas interviene directamente en el comportamiento del flujo alrededor de la pila lo que provoca una menor socavación en comparación con una pila lisa (Jiménez et al., 2006; Diaz González, 2016; Álvarez -Mejía, 2022). Sin embargo, los estudios solo han sido aplicados para una sola pila con forma circular, aunque se han aplicado diferentes rugosidades artificiales estos fueron evaluados con modelación física y numérica (Alvarez-Mejia, 2022), lo que limita el número de configuraciones de acabados.

Bajo esta premisa, resulta importante el uso de la CFD para evaluar el comportamiento hidrodinámico del flujo en pilas con diferentes acabados, resultando un análisis más completo y con ello se puede determinar los alcances y limitaciones del uso de la rugosidad superficial incluso en diferentes tipos de pilas. De acuerdo con la investigación desarrollado por Alvarez-Mejia (2022) quien demostró que la implementación de rugosidades artificiales en las pilas reduce la socavación local y que, con el uso de la CFD es posible determinar los efectos de la rugosidad y también la relación de los parámetros para plantear coeficientes de rugosidad equivalentes para ser utilizados en modelos en 2D. Sin embargo, en la investigación solo se analizó para una pila de sección circular.

De ahí que, la importancia del presente trabajo radica en el análisis del efecto hidrodinámico del acabado superficial para un grupo de pilas, y para tres diferentes tipos sección transversal de la pila como son circular, rectangular e hidrodinámica. Se contemplo la evaluación de la separación óptima entre pilas en dirección del flujo y su efecto en la reducción de vórtices de herradura y estela con la finalidad de demostrar que las pilas en grupo pudieron reducir y/o aumentar la profundidad de socavación.

También se evaluó la relación de los diferentes parámetros geométricos tanto de la pila como del acabado superficial y separación entre grupos, situación que no se ha presentado en la literatura y son datos que comúnmente se encuentran en los puentes construidos. Todo esto se realizó mediante la modelación tridimensional y/o bidimensional (CFD), con la finalidad de obtener las configuraciones ideales que presenten la mayor reducción de la profundidad de socavación.

La presente investigación aborda el estudio de la problemática planteada, mediante la aplicación de técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional mediante una serie de simulaciones bajo distintos requerimientos en procesos hidrodinámicos, de transporte de sedimentos y de turbulencia a micro y macro escala en 3D, con la implementación de las rugosidades como una forma de mitigación ante el fenómeno de la socavación.

El uso de técnicas CFD en el análisis de la socavación local en pilas de puentes, en el estudio del movimiento de los fluidos, es la factibilidad económica en el diseño hidráulico de componentes en diversas áreas de la ingeniería, tomando en cuenta la facilidad de manipulación de escenarios de operación e identificación de parámetros que influyen en el rendimiento y/o eficiencia.

La simulación permitió realizar el análisis con un grupo de pilas con diferentes rugosidades, implementando doble rugosidad y/o combinación de acabados (características geométricas) en una misma sección de pila, además de cambiar las variables de influencia como lo son forma de la pila, granulometría de fondo, analizando la influencia del acabado superficial (rugosidades) en el efecto de la socavación lo que permitió disminuir el foso de socavación, así como la configuración de pilas.

También se evaluó la colocación de pilas auxiliares tanto aguas arriba como aguas abajo para reducir las velocidades de flujo y observar el comportamiento para diferentes escenarios con el objetivo de identificar las combinaciones ideales que permitieron reducir la socavación.

1.4 Hipótesis

La distancia entre pilas de puente ligado a la combinación de acabados superficiales, permiten una reducción de los vórtices de herradura y de estela y, por consecuencia, la reducción de la profundidad de socavación local.

1.5 Objetivos

Objetivo general

- Analizar la propagación del efecto hidrodinámico del acabado superficial en grupos de pilas en la reducción de la socavación local, mediante el uso de técnicas CFD, para establecer alternativas de implementación bajo diferentes configuraciones de acabados y tipos de pilas.

Objetivos específicos

- Recopilar y analizar la información teórica-experimental de los diferentes métodos para determinar la socavación local para diferentes tipos pilas y las diferentes técnicas para su reducción, con la finalidad de identificar las condiciones que producen la mayor profundidad de socavación.
- Analizar el efecto hidrodinámico del flujo que presenta la separación entre pilas de sección transversal circular, rectangular y elíptica, para analizar su influencia en el proceso de socavación.
- Definir un grupo de combinaciones de acabados superficiales en las pilas considerando la separación, sección transversal y tipo de acabado en pilas, con el fin de identificar los escenarios viables para realizar la simulación de la profundidad de socavación.
- Analizar el efecto del acabado superficial y la separación entre pilas, en la reducción de la profundidad de socavación en pilas de sección transversal circular, rectangular e hidrodinámica, para identificar la combinación que presente una mayor reducción.
- Formular con base en los resultados de la simulación, alternativas que permitan disminuir el foso de socavación en función de la geometría y distancia de las pilas.

1.6 Estructura de la tesis

La presente investigación hace uso de las técnicas de simulación numérica mediante la aplicación de CFD, analizando un problema que afecta a los puentes que se encuentran sobre un cauce, cuyo principal problema es la socavación en pilas.

En el capítulo 1, se da una introducción de los términos básicos para comprender el fenómeno de la socavación y el planteamiento del marco metodológico de la investigación; el capítulo 2 “*Marco teórico*” engloba los fundamentos de la socavación, los principales métodos para estimar la socavación para una sola pila, los estudios realizados para las pilas en grupo y las ecuaciones que gobiernan en el programa Flow 3D, así como las generalidades del programa.

En el capítulo 3 se brinda una descripción sobre los materiales y métodos empleados, del caso de estudio, las secciones de las pilas estudiadas, las propiedades geométricas de los casquetes hexagonales para el acabado superficial, así como la metodología empleada para la realización de las simulaciones. Por su parte en el capítulo 4 se presentan los resultados y discusión respectivamente. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Este capítulo aborda el fenómeno de socavación local, así como ideas relacionadas con la hidrodinámica que controla el movimiento de un fluido, particularmente alrededor de objetos. Se abordan los preceptos matemáticos que guían el modelo de simulación numérica utilizado en la dinámica de fluidos computacional. El uso de la rugosidad artificial y su impacto en los flujos turbulentos se discuten desde una perspectiva teórica y práctica.

2.1 Ingeniería de Ríos

La ingeniería de ríos, también conocida como Hidráulica Fluvial, se enfoca en el estudio de los cursos de agua a cielo abierto que son susceptibles a erosionarse. Este campo se concentra en analizar los cauces naturales que no han sido revestidos, ya que forman parte esencial del sistema de drenaje de una cuenca hidrológica. Estos cauces pueden experimentar diversos problemas como erosión, desbordamiento, acumulación y transporte de sedimentos, modificación en su geomorfología, formación de meandros, cambio del lecho entre otros (Benjamín et al., 2018).

En términos geomorfológicos, los cauces de agua desempeñan un papel fundamental como agentes de erosión y transporte de sedimentos. Estos cursos movilizan cantidades considerables de material sólido desde las zonas elevadas de las cuencas hidrográficas hacia las áreas más bajas y finalmente hacia el mar, como lo han señalado López Bermúdez et al., (1992).

El transporte de sedimentos a lo largo de los ríos desempeña un papel importante en todas las etapas de planificación, diseño y operación de proyectos relacionados con la gestión del agua. Para evaluar de manera correcta los impactos del transporte de sedimentos y determinar las acciones necesarias para su regulación, se requiere un profundo conocimiento técnico de los procesos de erosión, transporte y depósito de sedimentos.

Es esencial comprender como estos procesos interactúan con las dinámicas hidrológicas que tienen lugar en las cuencas de captación (Mendoza López, 2014).

La Hidráulica Fluvial es un componente vital para gestionar de manera efectiva los sistemas fluviales, por ejemplo:

- Estabilidad de cauces
- Obras de protección
- Medidas de control y gestión de inundaciones
- Socavación

2.2 Erosión y Sedimentación.

2.2.1 Erosión.

La erosión del suelo, según lo planteado por Duque Escobar & Escobar Potes, (2016), es la remoción y transporte de las partículas superficiales por acción del agua. Este proceso adquiere energía cuando se presentan las precipitaciones y escorrentías, superando la resistencia del suelo (fricción o cohesión), generándose así la erosión. En el caso de una cuenca, una vez que el agua vence la resistencia de las partículas de suelo, está se encarga de movilizar, transportar y depositar los sedimentos a lo largo del cauce, dando lugar a problemas que pueden afectar el funcionamiento del cauce. Por ejemplo, la modificación de la sección transversal debido a erosión y/o depósito de los sedimentos, situación que conlleva en algunas situaciones a desbordamientos, causando inundaciones.

Los sedimentos en los cauces naturales están constituidos por una gran variedad de partículas de distintos tamaños, forma y densidad. Por su resistencia a ser arrastrados y su comportamiento al ser transportados por la corriente de agua se dividen principalmente en dos clases: cohesivos y no cohesivos (Jiménez Pérez et al., 2006).

El transporte de sedimentos se refiere al movimiento del material sedimentario que está en movimiento en un río. Según diferentes criterios existen dos clasificaciones comunes del transporte: una basada en el modo de transporte (fondo, suspensión y lavado) y otra según el origen del material (hídrico y eólico) (Heredia Ligorria, 2017).

Álvarez Mejía (2022) señala que, en el transporte de fondo los sedimentos después de ser arrastrados también pueden ser transportados por la corriente a cierta altura sobre el lecho, lo que se conoce como transporte en suspensión. Otro fenómeno que ocurre durante el transporte de sedimentos en los cauces es la deposición o sedimentación, la cual ocurre cuando las partículas en suspensión se depositan sobre el lecho debido al efecto combinado de la gravedad, la flotabilidad, turbulencia y la fricción.

Así, la erosión y la deposición son dos procesos contrapuestos que ocurren simultáneamente y se combinan para determinar la tasa neta de intercambio entre sedimentos en reposo y suspendidos. En conjunto, estos procesos desempeñan un papel fundamental en la evolución del cauce, ya que debido a estos dos fenómenos se produce el fenómeno de socavación.

2.2.2 Socavación

La socavación es un tipo de erosión hídrica que se refiere a la pérdida de material en el lecho y márgenes de un cauce, así como por la presencia de estructuras dentro del mismo, la cual está asociada a la capacidad de transporte de sedimentos durante una avenida. Cualquier cauce natural experimenta procesos de socavación debido al flujo de una corriente de agua, sobre todo cuando se presentan caudales superiores a los valores medios de escurrimiento, tal es el caso de avenidas atípicas. Existen diferentes tipos de socavación (Jiménez Pérez et al., 2006), los cuales se enlistan a continuación:

- **Socavación General:** es la consecuencia de descenso que experimenta el lecho del río cuando se produce un aumento en el caudal líquido que transita por este. Esta es provocada por la mayor capacidad de transporte de material sólido que adquiere la corriente al incrementarse el caudal y se presenta en toda la sección del río.

- **Socavación por estrechamientos:** se deriva de la reducción del área de la sección transversal del río, esto genera un aumento de velocidad, cambio de la pendiente y por consecuencia mayor arrastre de sólidos.
- **Socavación en curvas:** la presencia de una curva genera mayor velocidad en la parte exterior provocando socavación en curvas, el grado de socavación depende del radio de la curva.
- **Socavación transversal:** producida en forma transversal a la sección del río, producto de una contracción del flujo.
- **Socavación aguas abajo de grandes embalses:** los cambios que sufre un cauce por efecto de la construcción de un embalse, de tal manera que los sedimentos que normalmente transporta el río, son retenidos en el vaso del embalse, y aguas abajo de este se descarga agua con poco o nulo sedimento, provocando un descenso del fondo del cauce.
- **Socavación local:** este fenómeno se presenta generalmente alrededor de las diferentes estructuras que se encuentran dentro de la sección del cauce, y que están totalmente rodeadas de agua, como son las pilas de puente o sus estribos.

Es de destacar que uno de los principales problemas que sufre la infraestructura de puentes es la erosión local en sus pilas, la cual se origina debido a las altas velocidades del flujo durante una avenida. Las altas velocidades generan un conjunto de vórtices, tanto frontales como laterales conocidos como vórtices de estela, que se forman en las cercanías de las pilas durante las crecidas (Muñoz Lozano, 2018). Así mismo, las avenidas que transitan por un cauce juegan un papel crucial en el fenómeno de la socavación, ya que al llevar consigo volumen, caudal y velocidad altos, estos tienen el poder de reconfigurar la geometría del cauce debido a la alta erosión que se genera. Este proceso no solo modifica la sección transversal del cauce, también transporta grandes cantidades de sedimentos, incluso flora y fauna durante el tiempo que dura la avenida.

La erosión local es producida por el desplazamiento del material del fondo de un cauce, al existir algún elemento físico o natural, como son las pilas de puente que se encuentran dentro del cauce. La erosión local engloba el proceso de movilización, transporte y sedimentación del material de fondo, dando como consecuencia la socavación local en estructuras que son desplantadas en el cauce.

Una característica clave de fenómeno de socavación local de pilas, es el sistema de vórtices que se generan, ya que constituyen un mecanismo esencial en la erosión local. La formación de estos vórtices está en función del tipo de pila y las condiciones de flujo en las que se encuentren. Entre los tipos de vórtices generados, se destacan los siguientes:

Vórtices de herradura, los cuales surgen cuando el flujo del agua impacta contra la pila, concentrándose en la zona de ataque debido al campo de presiones inducido por la pila. En situaciones de alta presión, la capa límite experimenta una separación tridimensional, y se enrolla delante de la pila, originando así los vórtices de herradura (Muñoz Lozano, 2018). En la figura 2.1 se pueden apreciar los vórtices de herradura en la sección longitudinal del flujo alrededor de una pila y en planta alrededor de una pila.

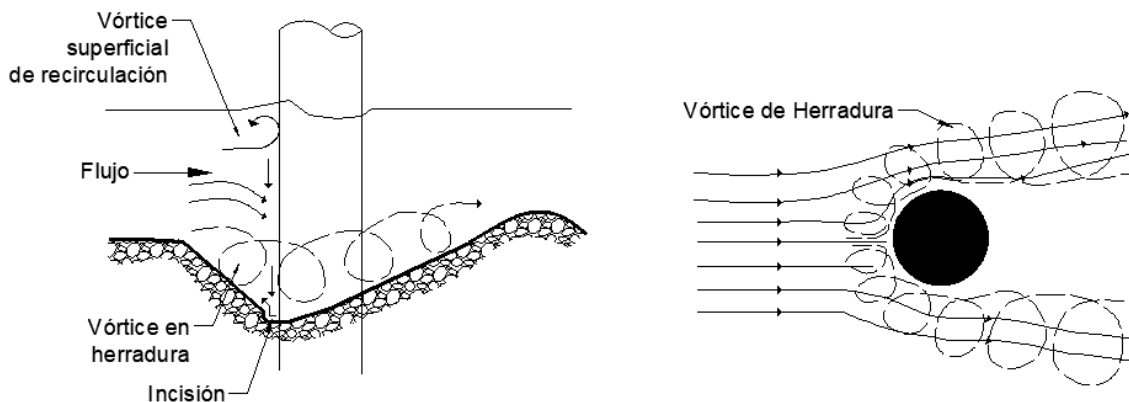


Figura 2.1. *Vórtices de herradura alrededor de una pila (Nieves Rinaudi, 2016).*

Vórtices de Estela, estos se generan aguas abajo de la pila, cuando la capa límite se separa de la pila y se enrolla a partir de la línea de separación a cada lado de la pila. Se presentan principalmente en flujos a alta velocidad (fuertes avenidas), estos vórtices se desprenden alternativamente en ambos lados de la pila dirigiéndose hacia aguas abajo, mientras arrastra consigo los sedimentos en dicha dirección, generando así el foso de socavación (Muñoz Lozano, 2018). En la figura 2.2, se presenta de manera esquemática la formación de pequeños vórtices de estela que emergen desde el lecho y se extienden hasta la superficie libre del agua. Esto provocan la suspensión del sedimento del fondo, los cuales posteriormente son llevados fuera del entorno de la pila.

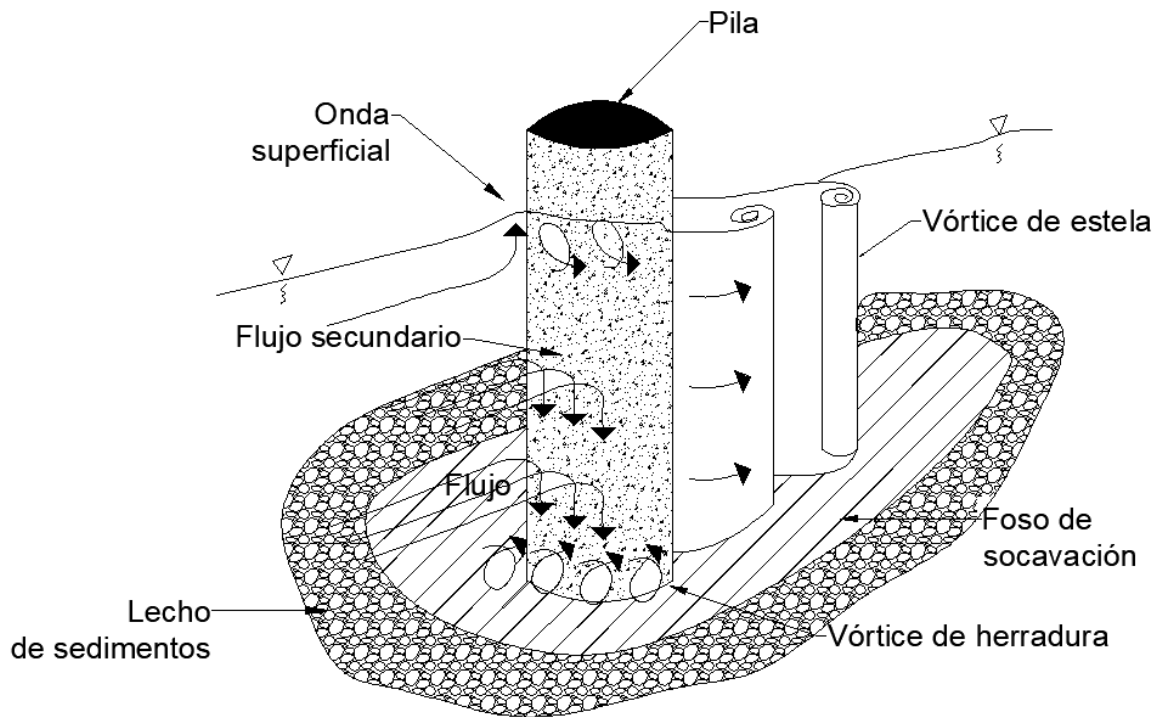


Figura 2.2. Presencia de vórtices de estela en el fenómeno de socavación local (Nieves Rinaudi, 2016).

2.2.3 Métodos empíricos para el cálculo de la profundidad de socavación local

Para estimar la profundidad máxima de socavación alrededor de una pila para condiciones de lecho vivo y agua clara, existen numerosos estudios de diferentes investigadores (Laursen y Toch, 1956; Larras, 1963; Shenet al., 1969; Breusers et al., 1977; Melville y Sutherland, 1988; Melville y Chiew, 1999;). En la tabla 2.1 se presentan algunos de ellos, también se presentan ecuaciones para estimar la socavación máxima en pilas individuales junto con sus procedimientos de corrección. Debido a que la mayoría de las ecuaciones y procedimientos se utilizan para estimar la socavación para pilas individuales, para predecir la profundidad de socavación alrededor de un grupo de pilas (pilotes) se utiliza la ecuación HEC-18 con algunas adecuaciones (Richardson y Davis, 2001).

2.3 Modelación numérica

En el área de la mecánica de fluidos, la modelación numérica ha presentado un gran avance en los últimos tiempos, gracias a los progresos en la capacidad de los sistemas de cómputo, permitiendo así la disminución del tiempo de simulación y contribuyendo de forma eficiente en las investigaciones.

Los modelos numéricos resuelven ecuaciones matemáticas que describen el fenómeno en estudio; sin embargo, en muchos problemas las ecuaciones no están disponibles o no hay consenso general sobre su uso. El transporte de sedimento es un ejemplo, donde distintas ecuaciones proporcionan resultados diferentes, por ejemplo, un modelo numérico dará también resultados disímiles según la fórmula que emplee, dejando la decisión subjetiva del usuario la elección de cual adoptar (Vásquez, 2003).

2.3.1 Dinámica de fluidos computacional

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se define como la técnica computacional que se emplea para la simulación del movimiento de los fluidos. Las principales ventajas de la técnica de CFD sobre otro tipo de estudios en mecánica de fluidos son la reducción sustancial de tiempo y costos en la modelación física y experimental, la posibilidad de analizar sistemas o condiciones muy difíciles de simular experimentalmente (Fernández Tena & Casan Clarà, 2015).

En los últimos años, la CFD se ha convertido en una herramienta útil en el análisis de sistemas de interés práctico, que incluyen fenómenos físicos y químicos involucrados con el movimiento de fluidos. Con tales fenómenos se puede transferir masa, cantidad de movimiento, energía y especie química (que puede reaccionar o no) de una región a otra, o de un tiempo inicial a otro tiempo (William et al., 2018).

Tabla 2.1. Análisis de los métodos para el cálculo de socavación local en pilas de puentes (Modificado de Rodríguez y Bustillos, 2015).

AUTOR	MODELO	CONDICIONES	VENTAJAS Y DESVENTAJAS
Laursen y Toch (1956)	$ds = k_f k_g k_\phi A$	Se aplica en condiciones de flujo subcrítico, números de Froude < 0.5. Válido únicamente para el caso de erosión local con arrastre generalizado de sedimento. Solo para arenas, no está claro si se puede aplicar para gravas.	Ventajas: Considera la influencia de la geometría de la pila y su orientación con respecto al flujo. Considera otras formas de pilas además de la circular Desventajas: No considera ningún parámetro geotécnico del material del cauce.
Método de Larras (1963)	$ds = 1.05 k_f k_\phi A^{0.75}$	El máximo absoluto de la profundidad de socavación es distinto al del equilibrio. Es independiente del tirante y del diámetro del sedimento. La profundidad de socavación solo está en función de las características de la pila (resultados conservadores). Aplicable solo en el caso general de alturas de agua superiores a 30 o 40 veces del diámetro del sedimento y de secciones con menos del 10% de contracción	Ventajas: Es de uso práctico, cálculo rápido y sencillo que considera varias formas de pila. Desventajas: resultados conservadores, al considerar solo las características de la pila,
Método de Carsten (1966)	$ds = 0.546a \left(\frac{N_s - 1.25}{N_s - 5.02} \right)^{\frac{5}{6}}$	No considera la existencia de una profundidad de equilibrio en ausencia de aporte de sedimentos.	Ventajas: Introduce el diámetro del sedimento como variable. Considera cuando existe aporte de sedimentos y cuando no hay aporte de sedimentos. Desventajas: solo para pilas circulares.
Método de Maza Sánchez (1968)	$\frac{ds}{b} = k_f k_c \frac{v^2}{g} - \frac{30 dn}{b}$	Para números de Froude menores de 0.6. No toma en consideración el diámetro del sedimento, ningún parámetro geotécnico. Es aplicable solo para arenas y gravas, resultando valores mayores que los obtenidos experimentalmente.	Ventajas: la socavación es obtenida a partir de curvas para partículas con diámetro medio entre 0.17 mm y 0.56 mm. Desventajas: no es aplicable para diámetros fuera del rango.

Tabla 2.1. Análisis de los métodos para el cálculo de socavación local en pilas de puentes (Continuación...)

AUTOR	MODELO	CONDICIONES	VENTAJAS Y DESVENTAJAS
Método de Yaroslavtziev (1969)	$ds = k_f k_v (\nabla + k_H) \frac{v^2}{g} - 30d_n$	<p>Propone dos ecuaciones distintas, uno para materiales no cohesivos y otro para materiales cohesivos (la presentada), en suelos cohesivos es muy probable que no se llegue a alcanzar la profundidad total de socavación obtenida mediante este cálculo, debido a que un suelo cohesivo se demora más en erosionar que un suelo arenoso (muy conservador).</p>	<p>Ventajas: Es uno de los primeros autores que consideró las diferencias entre un suelo cohesivo y no cohesivo, presentando dos fórmulas distintas para cada caso. Considera el diámetro d_{85} de los granos del sedimento.</p> <p>Desventajas: Niega la existencia de la profundidad de equilibrio de socavación sugerida por Laursen y Toch. Posibilidad de errores cuando $Y_n/a < 2$ y la pila desviada respecto a la corriente, y cuando la relación $Y_n/a < 1.5$.</p>
Método de Melville y Sutherland (1988)	$ds = Ak_i k_h k_D k_\sigma k_f k_\phi$	<p>No se conoce en qué condiciones y supuestos han sido deducidas estas fórmulas. Las ecuaciones incluyen la importante observación sobre la dependencia normalizada de la profundidad de socavación local de a/D_{50} en incrementos hasta que el valor de a/D_{50} sea igual a 40, en el que el punto de dependencia comienza a disminuir</p>	<p>Ventajas: Melville es uno de los pocos autores que analizan la importancia del acorazamiento, para este autor el acorazamiento tiende a reducir la socavación.</p> <p>Desventajas: Se desconoce el rango de validez de estas ecuaciones.</p> <p>Considera los tres grupos de variables que son: geométricos, hidráulicos y geotécnicos. Es una metodología complicada de aplicar.</p>
Método de Froehlich (1991)	$ds = 0.32K_f (a')^{0.62} h^{0.47} Fr^{0.22} D_{50}^{-0.09} + A$	<p>Para pilas con punta circular alineadas con el flujo se tiene: $d_s = 2.4a$; $F_r < 0.8$; $d_s = 3.0A$; $F_r > 0.8$</p>	<p>Ventajas: considera el diámetro de los sedimentos del cauce, combinado las propiedades hidráulicas y geométricas de las pilas.</p> <p>Desventajas: solo para pilas alineadas con el flujo.</p>

Tabla 2.1. Análisis de los métodos para el cálculo de socavación local en pilas de puentes (Continuación...)

AUTOR	MODELO	CONDICIONES	VENTAJAS Y DESVENTAJAS
Método de la Universidad Estatal de Colorado (FHWA)(1995)	$\frac{ds}{y} = k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43}$	<p>La ecuación general tiene los siguientes límites: $ds = 2.4A$ para $Fr < 0.8$ $ds = 3.0A$ para $Fr > 0.8$ El coeficiente k_a toma en cuenta el acorazamiento, pero se aplica solo cuando $D_{50} > 60$ mm. Además, para su cálculo se requieren velocidades difíciles de determinar en campo. Para pilas muy anchas la fórmula del FHWA da valores muy superiores a los reales.</p>	<p>Ventajas: introduce un nuevo factor, en donde considera la rugosidad general del cauce. Considera el acorazamiento introduciendo el diámetro d del material del cauce. Es el método más usado en los Estados Unidos (HEC-18, 1993), fue presentado como norma de diseño por Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA) y es uno de los dos métodos que usa el programa HEC-RAS (1998) Desventajas: Se requieren velocidades difíciles de determinar en campo. Para pilas muy robustas la fórmula del FHWA sobrestima los valores.</p>
Método de Sheppard y Miller (2006)	$\frac{ds}{a} = 2.5f_1 \left(\frac{h}{a}\right) f_2 \left(\frac{v}{v_c}\right) f_3 \left(\frac{a}{D_{50}}\right)$	<p>Las ecuaciones incluyen la importante observación sobre la dependencia normalizada de la profundidad de socavación local de a/D_{50} en incrementos hasta que el valor de a/D_{50} sea igual a 40, en el que el punto de dependencia comienza a disminuir</p>	<p>Ventajas: Este método es el más reciente. Considera los tres grupos de variables que son: geométricos, hidráulicos y geotécnicos. Es una metodología complicada de aplicar.</p>

Donde: d_s profundidad de socavación, K_f coeficiente que depende de la forma de la pila, K_g coeficiente que depende de la relación tirante, k_ϕ coeficiente de ángulo de ataque del flujo, A Ancho de pila, q caudal unitario, N_s número del sedimento, K_C Coeficiente para pilas cilíndricas, \forall Constante de Yaroslavtziev, k_h profundidad de la corriente aguas arriba luego de la socavación general, V_c Velocidad crítica, f_1 parámetro que depende de la relación entre la velocidad media del flujo y la velocidad crítica, f_2 parámetro que depende de la relación entre el tirante del flujo y el ancho de la pila, f_3 parámetro que depende de la forma de la pila, f_4 parámetro en función del ángulo de ataque del flujo, K_I factor de corrección por intensidad del flujo, K_D factor de corrección por tamaño del sedimento, K_σ factor de corrección por degradación del sedimento, a' factor de seguridad, Fr Número de Froude y D_{50} Diámetro medio.

El que, la simulación con CFD haya evolucionado a pasos agigantados, se debe a que cada día se tienen equipos de cómputo cada vez con mayor capacidad en la velocidad de procesamiento, almacenamiento y memoria a un costo accesible para el usuario. Lo que ha generado que también se desarrollen algoritmos y modelos que permitan representar de manera confiable los fenómenos presentes en el flujo de fluidos (William et al., 2018). Además, de que el análisis con esta herramienta resulta ser más económico que el desarrollo de diversos modelos físicos.

Sin embargo, su uso sigue siendo mayoritariamente complementario, ya que, en determinado momento se tienen que validar las predicciones con datos experimentales o hacer una verificación con datos de correlaciones, ya que no siempre se puede tener mediciones detalladas de parámetros físicos y químicos del sistema.

Por otro lado, el estudio del flujo bidimensional y tridimensional en canales abiertos ha experimentado recientemente mayor interés en la aplicación de la CFD aplicado a la hidráulica fluvial, y en particular a problemas geomorfológicos (Ma et al., 2002). La CFD ha demostrado ser una herramienta invaluable para desarrollar modelos capaces de analizar a detalle la dispersión de partículas en los ríos (Modenesi et al., 2004).

Existen diferentes herramientas informáticas CFD de uso comercial para simular el proceso de socavación local. Ansys Fluent es un Software de simulación aplicado al análisis de fenómenos vinculados con la mecánica de fluidos, acopla la solución de las ecuaciones que describen el movimiento de fluidos mediante la discretización de las ecuaciones de momentum y continuidad acoplando los modelos que la física del fenómeno requiere. El cual representa tridimensionalmente la dinámica del flujo alrededor de los pilares, permitiendo visualizar las líneas de corriente y velocidades (Jaramillo-Mejía, P., & Reyes-Salazar, J., 2019).

Otro software más específico para la simulación de fenómenos hidráulicos es Flow 3D, este software emplea el desarrollo de técnicas numéricas para resolver las ecuaciones que describen el movimiento de fluidos en estado transitorio en 3D. Maneja una discretización de cuadrículas rectangulares de fácil manejo y almacenamiento debido a su naturaleza regular (estructurada).

El método de solución de la ecuación está basado en el método del volumen finito el cual se deriva directamente de la forma integral de las leyes de conservación. Jalal & Hassan (2020), mencionan que el problema de la socavación local en pilas ha sido estudiado numéricamente mediante CFD empleando Flow 3D con el cual han logrado representar la evolución de la socavación y la profundidad máxima del foso de socavación.

Por otra parte, Alasta et al. (2022), investigaron el rendimiento del modelo Flow 3D para simular la profundidad de socavación local, y concluyen que, los resultados proporcionan una buena concordancia entre los modelos numéricos y experimentales. El modelo CFD imita con aceptación la profundidad de socavación, el flujo y la velocidad alrededor de la pila de un puente.

Otro modelo de uso libre se Iber, modelo numérico para la simulación de flujo no estacionario turbulento en superficie libre y procesos en hidráulica fluvial en dos dimensiones (Iberaula, 2022). Los campos de aplicación hidrodinámica son: la evaluación de zonas de inundación, cálculo de transporte de sedimentos y flujo de oleaje en estuarios. Trabaja con mallas estructuradas y no estructurada de volumen finito formada por elementos triangulares o cuadriláteros (Álvarez Mejía, 2022). Iber tiene diversos campos de aplicación, mediante se puede estimar la profundidad de socavación empleando el módulo de procesos de erosión y sedimentación por transporte de material granular (Bladé et al., 2014).

2.3.2 Modelo Flow 3D

FLOW 3D es un software de CFD que proporciona una plataforma de simulación del flujo de fluidos y transporte de sedimentos, así como análisis del flujo en estructuras hidráulicas. Se considera como un software de simulación completo y versátil para ingenieros que investigan el comportamiento dinámico de líquidos y gases en una amplia gama de aplicaciones de sistemas hidráulicos y procesos físicos. Se centra en aplicaciones de superficie libre y flujos multifásicos, sirviendo a una amplia gama de industrias, incluyendo la microfluídica, dispositivos biomédicos, infraestructura hidráulica, entre otras muchas aplicaciones (Flow Science, 2020).

Jalal & Hassan (2020), mencionan que Flow **3D** cuenta con unidades especiales para su aplicación en la ingeniería hidráulica, ya que utiliza técnicas numéricas que resuelven las ecuaciones de movimiento de fluidos transitorios y tridimensionales para obtener problemas de flujo multifásico a múltiples escalas. FLOW-3D se ha utilizado para simular el proceso de socavación alrededor de las pilas de puente y tiene una poderosa capacidad para determinar la hidrodinámica de problemas transitorios de superficie libre y transporte de sedimentos.

2.3.2.1 Ecuaciones gobernantes de Flow 3D

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido son la ecuación de continuidad y las ecuaciones de conservación del momento. Estas ecuaciones son conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes. Las ecuaciones de Navier-Stokes para líquidos viscosos no compresibles tienen la forma:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.1)$$

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2.2)$$

Para analizar el efecto promedio de las cantidades turbulentas (Drikakis, 2003) en un flujo de fluidos, se emplean las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en Reynolds (RANS) para fluidos newtonianos no compresibles esta es:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} \quad (2.3)$$

Con

$$\sigma_{ij} = 2 \nu S_{ij} \quad (2.4)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.5)$$

$$\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} S_{ij} \kappa \quad (2.6)$$

Donde:

u_i es la componente de la velocidad del fluido en la dirección i , u'_i es la fluctuación de la velocidad del fluido en la dirección i , P es la presión, S_{ij} es el tensor de velocidad de cizallamiento, $\overline{u'_i u'_j}$ tensor de esfuerzos de Reynolds, ρ es la densidad del fluido, ν es la viscosidad cinemática del fluido, ν_t es la viscosidad de turbulencia, k es la energía cinética turbulenta y S_{ij} es la delta de Kronecker ($S_{ij} = 1, i = j; S_{ij} = 0, i \neq j$)

Para acoplar los efectos de la turbulencia a las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos existen tres enfoques principales:

- Las ecuaciones promediadas en una escala mayor a la de turbulencia (modelo RANS)
- Ecuaciones de Navier-Stokes con los esfuerzos de Reynolds promediados en la escala temporal (modelos de Simulación de grandes remolinos- LES)
- Solución de las ecuaciones de Navier-Stokes sin ninguna simplificación (Simulación numérica directa - DNS)

2.3.2.2 Modelo de transporte de sedimentos en FLOW 3D

El modelo de transporte de sedimentos de FLOW 3D se puede utilizar para evaluar la erosión y la deposición, donde los componentes de flujo tridimensionales están impulsando el proceso de socavación. El modelo hidrodinámico de FLOW 3D resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes no hidrostáticas promediadas por Reynolds que describen la física del flujo. El solucionador hidrodinámico está completamente acoplado con un módulo de transporte de sedimentos que simula la carga de lecho y el transporte de sedimentos suspendidos, el arrastre y la erosión para suelos no cohesivos (Wei et al., 2014).

Las relaciones empíricas utilizadas en los procesos de carga de lecho, arrastre y sedimentación son totalmente personalizables, y se pueden definir hasta 10 especies de sedimentos diferentes (diferentes propiedades como el tamaño de grano, la densidad y el esfuerzo cortante crítico). FLOW 3D es ideal para simular la socavación local en escalas de tiempo cortas.

Capacidades del modelo:

- Modelado de cama móvil 3D inestable
- Carga de lecho y transporte de sedimentos suspendidos
- Sedimento no cohesivo
- 10 fracciones individuales de tamaño de grano
- Sedimentación y arrastre de sedimentos en suspensión
- Ángulo crítico de reposo

Aplicaciones:

- Morfodinámica fluvial y costera
- Socavación de pilares y estribos de puentes
- Socavación local en estructuras hidráulicas
- Cuencas de sedimentación
- Lavado del depósito

El software de simulación hidrodinámica está integrado con un módulo de transporte de sedimentos con condiciones de suelo no cohesivas que simulan la carga de fondo y el transporte, arrastre y corrosión de sedimentos suspendidos. FLOW 3D resuelve el transporte de sedimentos empleando diversos conceptos de hidráulica fluvial.

a) Esfuerzo cortante del lecho

De acuerdo con Coles (1956), el esfuerzo cortante de fondo es aquel aplicado por el fluido sobre la superficie del lecho, se puede calcular con la ecuación.

$$\tau_b = u_t \left[\frac{1}{k} \ln \left(\frac{Y}{\frac{u}{u_t} + k_s} \right) \right] \quad (2.7)$$

Donde:

τ_b esfuerzo cortante de fondo, u es la velocidad media del flujo, u_t la velocidad de cizallamiento calculada con $\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$, τ es el esfuerzo de cizallamiento cerca del lecho, ρ es la densidad del fluido, Y es la profundidad del flujo, $k = 0.4$ es la constante de Von Karman y k_s es la altura de rugosidad de Nikuradse.

En flujos de aguas poco profundas, Brethour (2003) detalla que el esfuerzo cortante de fondo se puede estimar utilizando la ley de fricción cuadrática definida por:

$$\tau = \rho C_d \bar{u} |\bar{u}| \quad (2.8)$$

Donde:

\bar{u} es la velocidad del fluido promediada en profundidad, C_d es el coeficiente de arrastre que algunos autores lo consideran igual a 0.0026, pero también puede ser definido en función de la rugosidad de Nikuradse (k_s).

b) Parámetro adimensional de Shields

El parámetro adimensional de Shields (1936) permite cuantificar el esfuerzo cortante del lecho que recibe su nombre “parámetro adimensional de Shields” (τ_*), y está definido por:

$$\tau_* = \frac{\tau}{g d_n (\rho_n - \rho)} \quad (2.9)$$

Donde:

g es la gravedad, n representa la fracción característica de sedimento, d_n es el diámetro característico de sedimento, ρ_n es la densidad del sedimento y ρ es la densidad del fluido.

El esfuerzo cortante crítico de Shields (τ_{cr}) que se muestra en la ecuación 2.10, se usa para definir la tensión de esfuerzo crítico en el lecho τ_b , donde inicia el movimiento de partículas.

$$\tau_{Cr} = \frac{\tau_b}{g d_n (\rho_n - \rho)} \quad (2.10)$$

El valor base de τ_{Cr} , es para un lecho plano y horizontal de granos de tamaño idéntico. Puede ser especificado con el valor de 0.05, o determinado a partir de las ecuaciones de Shields-Rouse o bien por la ecuación de Soulsby-Whitehouse (1997), la cual posee un rango de aplicación más amplio y es descrita en la ecuación.

$$\tau_{Cr} = \frac{0.3}{1+1.2d_*} + 0.055(1 - e^{-0.02d_*}) \quad (2.11)$$

Donde:

d_* es el tamaño de grano adimensional dado por la ecuación (2.12)

$$d_* = d_n \left[\frac{g(S_n - 1)}{v^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.12)$$

Donde:

g es la gravedad, d_n es el diámetro característico de sedimento, ρ_n es la densidad del sedimento y ρ es la densidad del fluido, S_n es la densidad relativa de las partículas de sedimento y v es la viscosidad cinemática del fluido.

Para un lecho inclinado, la gravedad aplica una componente tangencial de fuerza dependiendo de la dirección del flujo. Esto es, la tensión del esfuerzo crítico aumenta si el flujo sube por la pendiente y disminuye si el flujo baja, este esfuerzo se determina empleando la ecuación (2.13)

$$\tau_{Cr} = \tau_{Cr,b} \frac{\cos\varphi' \sin\beta' + \sqrt{\cos^2\beta' \tan^2\phi_n - \sin^2\varphi' \tan^2\beta}}{\tan\phi_n} \quad (2.13)$$

Donde:

β' es el ángulo de pendiente del lecho, ϕ_n es el ángulo de reposo definido como el ángulo de la pendiente antes que los granos se deslicen por sí mismos, φ' es el ángulo entre la dirección de la pendiente ascendente y el flujo adyacente al lecho inclinado, oscila entre 0° y 180° , con 0° correspondiente al flujo ascendente y 180° al flujo descendente.

La erosión y la deposición son dos procesos opuestos que tienen lugar al mismo tiempo. Se combinan para determinar la tasa neta de intercambio entre sedimentos en reposo y suspendidos. Para la erosión, la velocidad a la que los granos se desprenden del lecho es la velocidad de elevación y se calcula con:

$$U_{E,n} = \mathbf{n}_b C_d d_{*,n}^{0.3} (\theta_n - \theta_{cr,n})^{1.5} \sqrt{g d_n (S_n - 1)} \quad (2.14)$$

Donde:

C_d es el coeficiente de arrastre de las partículas del lecho, y \mathbf{n}_b es el vector normal hacia el exterior de la superficie del lecho. En la deposición, se utiliza la velocidad de sedimentación de Soulsby (1997):

$$u_{s,n} = [(10.36^2 + 1.049 d_*^3)^{\frac{1}{2}} - 10.36] \frac{v}{d_n} \quad (2.15)$$

Donde:

$u_{s,n}$ es la velocidad de sedimentación, se asume en la misma dirección de la gravedad. Por otra parte, la forma adimensional de la tasa de transporte de fondo (g_{BT}) se define (2.16)

$$g_{BT} = \frac{q_b}{[g(s_n - 1)d_n^3]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.16)$$

Donde:

q_b es la tasa volumétrica de transporte de la carga de fondo por unidad de ancho. La tasa de transporte de la carga de fondo por unidad de ancho.

También la tasa de transporte de fondo se estima utilizando la ecuación de Meyer-Peter y Muller (1948).

$$g_{BT} = B_n (\tau_b - \tau_{Cr})^{1.5} C_b \quad (2.17)$$

Donde:

B_n es el coeficiente de carga de fondo, generalmente es de 5.0 a 5.7 para tasas de transporte bajos, alrededor de 8.0 para tasas de transporte intermedias y hasta 13.0 para tasas de transporte muy altas. 8.0 es el valor más utilizado en la literatura; c_b es la fracción de volumen asociada al diámetro característico de las partículas.

También, Van Rijn (1984), propone una relación para estimar el espesor de la capa de la carga de fondo h_n y la velocidad de carga $u_{b,n}$ se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$h_n = 0.3b_n d_*^{0.7} \left(\frac{\tau_b}{\tau_{Cr}} - 1 \right)^{0.5} \quad (2.18)$$

$$u_{b,n} = \frac{q_b}{\tau_{Cr}} \quad (2.19)$$

Algunos otros modelos matemáticos para estimar la tasa de transporte de fondo son los desarrollados por Bagnold (ecuación 2.20) y Shields (ecuación 2.21).

$$g_{BT} = \left(\frac{\tau_b - \tau_{Cr}}{\tau_b} \right) \frac{\tau_b V}{\left(1 - \frac{f}{f_s}\right) \tan(\alpha_*)} \left[1 - 5.75 \frac{u_*}{V} \log \left(\frac{0.37 y}{1.4 d_f \left(\frac{\tau_b}{\tau_{Cr}} \right)^{0.6}} \right) - \frac{w_s}{V} \right] \quad (2.20)$$

$$g_{BT} = \frac{10qS}{D_{50} S_n^2} (\tau_b - \tau_{Cr}) \quad (2.21)$$

Donde: τ_b es el esfuerzo cortante que el flujo ejerce sobre el fondo, τ_{Cr} es el esfuerzo cortante máximo que resiste una partícula del fondo, S_n densidad relativa de las partículas dentro del agua, τ_* es el parámetro adimensional de Shields y d_n diámetro característico de las partículas, V es la velocidad media del agua, $\frac{f}{f_s}$ es la tasa de trabajo sobre los granos, α_* ángulo de colisión entre los granos, y es el tirante y d_f distancia al fondo.

Mientras que, la concentración de sedimentos en suspensión se calcula resolviendo su propia ecuación de transporte para cada especie con la ecuación:

$$\frac{\partial C_{s,n}}{\partial t} + \nabla \cdot (C_{s,n} u_{s,n}) = \nabla \cdot \nabla (DC_{s,n}) \quad (2.22)$$

$C_{s,n}$ es la concentración de sedimento en suspensión, que se define como la mezcla fluido-sedimento; D es la difusividad; $u_{s,n}$ es la velocidad del sedimento de la especie n . Se observa que cada especie de sedimento en suspensión se mueve a su propia velocidad diferente de las del fluido y otras especies. Esto se debe a que los granos con diferente densidad de masa y tamaños tienen diferente inercia y reciben diferente fuerza de arrastre.

En consecuencia, la concentración de volumen de sedimento en suspensión $C_{s,n}$ se define como:

$$C_{s,n} = \frac{c_{s,n}}{\rho_n} \quad (2.23)$$

Para resolver la ecuación (2.23) se asume que los granos en suspensión no tienen fuertes interacciones entre sí. Además, la diferencia de velocidad entre los sedimentos suspendidos y la mezcla de sedimentos es principalmente, la velocidad de sedimentación de los granos, $u_{E,n}$, que se define en la ecuación (2.14). Por lo tanto, $u_{s,n}$ se evalúa utilizando la ecuación:

$$u_{s,n} = \bar{u} + u_{E,n}C_{s,n} \quad (2.24)$$

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo proporciona una exposición exhaustiva de los recursos tecnológicos y materiales que han sido fundamentales para el desarrollo de la investigación. Además, ofrece una detallada descripción de cada etapa que conforma el método implementado, diseñado para alcanzar cada uno de los objetivos establecidos. En esta sección, se lleva a cabo un análisis meticuloso de los materiales utilizados y se expone la metodología seguida durante la ejecución del estudio. La rigurosidad de esta sección garantiza una estructura precisa que no solo facilita la comprensión del proceso, también posibilita la replicación del estudio

3.1 Recursos disponibles

Los recursos fundamentales para llevar a cabo esta investigación se centran en el uso de herramientas computacionales. Se ha prestado especial atención a las características computacionales óptimas, esto debido a la importancia crucial que desempeñan en la satisfacción de las exigencias computacionales asociadas a los procesos de simulación, los cuales buscan obtener resultados coherentes con los objetivos planteados.

El software de simulación seleccionado fue FLOW 3D, elegido por su enfoque en aplicaciones que abarcan flujos en superficies libres y sistemas multifásicos. Este software ha demostrado su eficacia en diversas disciplinas, tales como el análisis de micro fluidos, dispositivos biomédicos, evaluación de obras hidráulicas, análisis de fenómenos hidráulicos, simulación de la socavación en cauces, entre otras áreas que involucran el análisis detallado de flujos de fluidos. En la Figura 3.1 se presentan ejemplos ilustrativos de estas aplicaciones, destacando la versatilidad y amplitud de utilización del software FLOW 3D.

En cuanto a las aplicaciones hidráulicas, FLOW 3D permite realizar simulaciones mediante fluidos internos y/o externos en 3 dimensiones, asimismo permite analizar fluidos no viscosos, viscosos, laminares y turbulentos en estado transitorio.

FLOW 3D posibilita la realización de análisis integrales de la interacción entre el fluido y las estructuras. Este software, por ejemplo, facilita la obtención de campos de velocidad y vorticidad alrededor de pilas de puentes, al mismo tiempo puede predecir el transporte de sedimentos y los procesos de erosión y sedimentación. En el contexto de este trabajo, se empleó FLOW 3D para llevar a cabo un análisis detallado de la hidrodinámica en un tramo de río afectado por problemas de erosión y socavación en las pilas del puente. Asimismo, se examinaron los efectos de agrupar pilares con distintas separaciones y acabados superficiales en la reducción de la profundidad de socavación local.

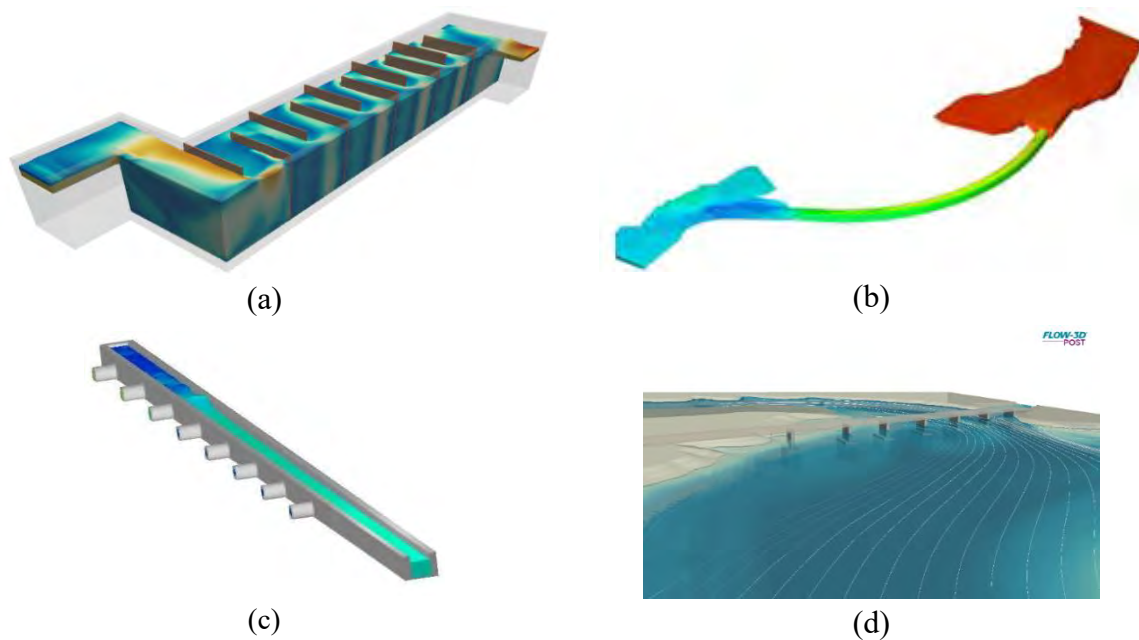


Figura 3.1. *Aplicaciones de FLOW 3D en diferentes casos de estudio; a) Modelo de un canal con secciones intermedias, b) Simulación hidráulica del túnel de desvío de presa, c) Simulación CFD de procesos químicos y d) Modelo de un puente vehicular sobre un río.*

3.2 Método

Para el desarrollo del proyecto y el logro de los objetivos planteados en la presente investigación se contemplaron 4 etapas. Etapa I. Recopilación de información: análisis y síntesis; Etapa II. Definición de variables, Etapa III. Simulación con FLOW 3D, donde se contemplan dos subetapas, III.1 Simulación hidrodinámica y III.2 Simulación de socavación y Etapa IV. Análisis de Resultados. En la figura 3.2 se observa la integración de la metodología propuesta en cada una de sus etapas, así como las metas planteadas en cada una.

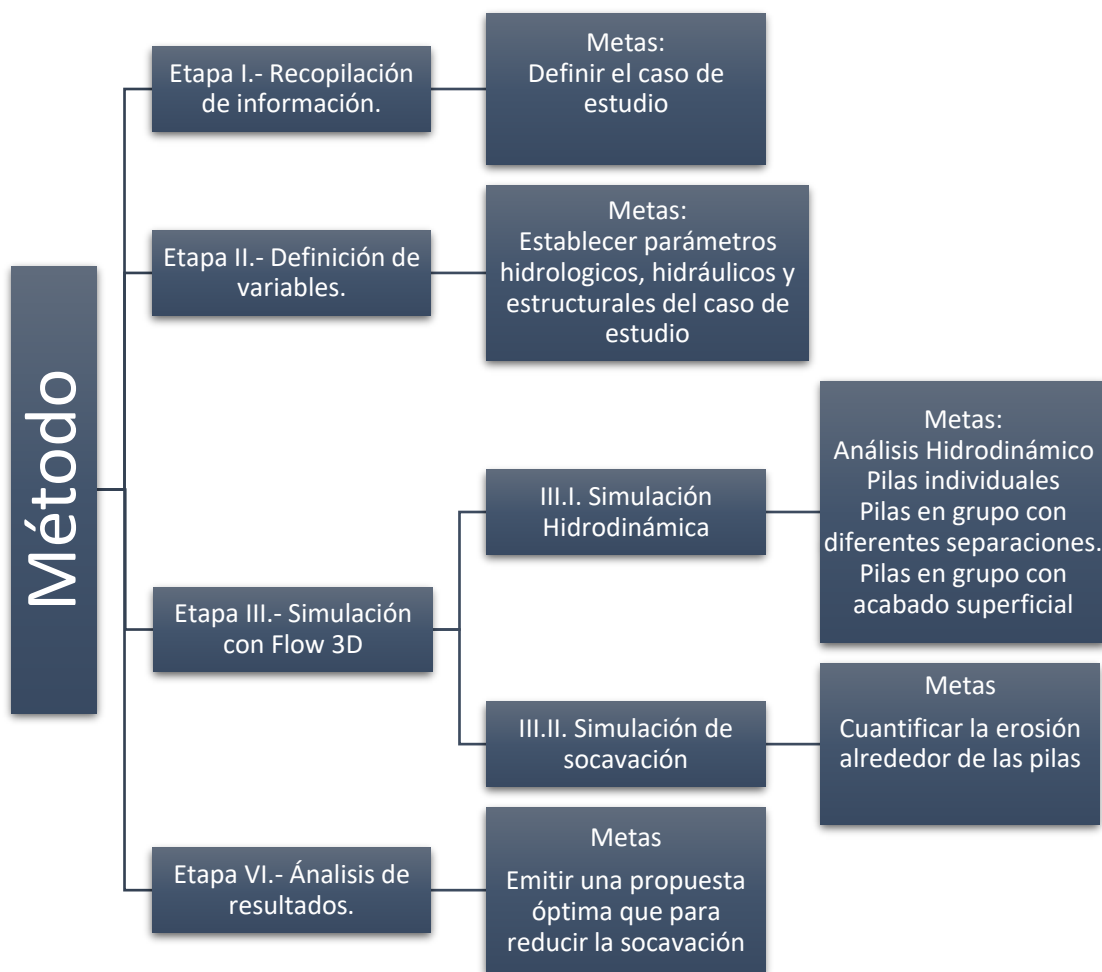


Figura 3.2. Metodología general de las actividades.

3.2.1 Etapa I: Recopilación de información: análisis y síntesis

En esta etapa se realizó una recopilación, síntesis y análisis de la información relacionada con el tema de estudio. Principalmente se analizaron distintos estudios sobre técnicas o métodos para reducir la socavación local en pilas, identificando las diferentes técnicas empleadas como reductores de la profundidad de socavación. También se identificaron las condiciones que producen la mayor profundidad de socavación y su influencia en el proceso.

Se revisaron diferentes modelos para determinar la profundidad de socavación de pilas con diferente sección transversal. Dentro de la revisión bibliográfica se analizaron los diferentes trabajos que presenten alternativas para reducir socavación enfocándose principalmente en el uso de rugosidad artificial en la superficie de las pilas. Se indagó en investigaciones relacionadas con la rugosidad artificial, analizando los acabados y características geométricas que la componen. Se realizó un análisis de las características gobernantes en el estudio de la socavación, detectando claramente que la rugosidad artificial como acabado superficial, disminuye considerablemente la profundidad de socavación en pilas.

Durante el análisis se realizó una comparación entre las diferentes alternativas propuestos por los autores de los diferentes acabados superficiales, identificando las ventajas, desventajas y las condiciones en las que se llevó a cabo su uso. Para la presente investigación se utilizó un acabado superficial mediante casquetes hexagonales el cual ha demostrado ser efectivo en la reducción de la socavación, identificando las variables hidráulicas dominantes que rigen el desempeño del fenómeno de socavación.

3.2.1.1 Caso de estudio

En la presente investigación se tomó como referencia la información del puente “Congreso – San Nicolás” actualmente en operación en el municipio de Teziutlán, Puebla cuyas coordenadas son 19°03'55.8" N, 98°00'22.6" W, su ubicación se muestra en la Figura 3.3. El análisis del proceso de socavación lo inicio Urrutia Piña (2010) quien además realizó el análisis y diseño estructural del puente el cual está apoyado sobre tres pilas cilíndricas de 1.20 m de diámetro.

En la tabla 3.1 y figura 3.4 se muestran las características del puente. Por otro lado, el río presenta el siguiente material de acuerdo con la geología superficial en el fondo: arenas, limos y boleos.

Se seleccionó este caso de estudio debido a que Díaz González (2016) evaluó de manera experimental, la socavación local en las pilas del puente mediante la elaboración de un modelo físico a escala reducida del puente. Además, se aplicaron técnicas ópticas para analizar la hidrodinámica del flujo y determinar la profundidad de socavación empleando diferentes acabados superficiales. Por lo que, esta información permitió validar el modelo en FLOW 3D. También demostró que la integración de distintos acabados superficiales permitió reducir la profundidad de socavación. En la tabla 3.2 se muestran las características hidráulicas correspondientes al caso de estudio.



Figura 3.3. Ubicación del puente del “Congreso-San Nicolás, Municipio de Teziutlán, Puebla.

Tabla 3.1. Datos generales del puente Congreso-San Nicolás (Urrutia Piña, 2010)

Parámetro	Unidad	Dimensión
Ancho total	m	10
Ancho de calzada	m	7.20
Longitud total	m	36
Claro 1	m	24
Claro 2	m	12

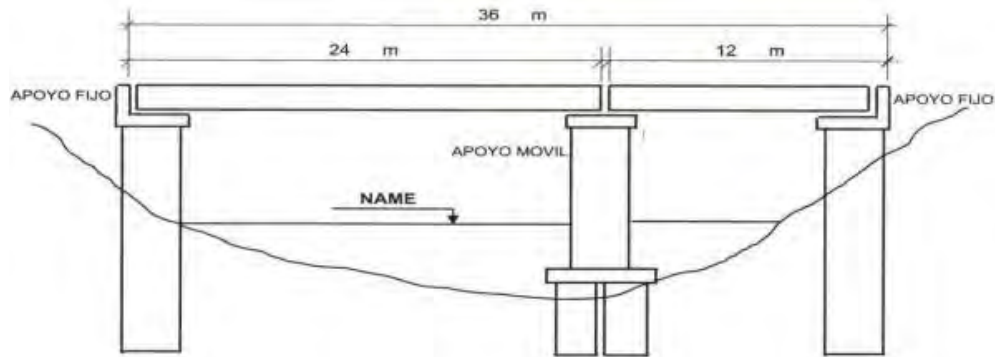


Figura 3.4 Datos generales del puente del “Congreso-San Nicolás, Municipio de Teziutlán, Puebla, México.

El cauce sobre el cual se encuentra la cimentación del puente es de carácter intermitente y nace aproximadamente a 20 km del posicionamiento de la estructura, desemboca a 50.00 km agua abajo del puente en el río Atoyac. El área de la cuenca drenada hasta el cruce es de 19.00 km² y pertenece a la región hidrológica No. 18 Balsas, según su clasificación de SARH (Díaz González, 2016). La información hidráulica relevante del cauce, se presentan en la tabla 3.2.

Por su parte, Álvarez Mejía (2022) amplió el estudio del modelo a escala de Díaz González (2016), utilizando técnicas CFD en 2D y 3D. Implementó modificaciones geométricas a los acabados superficiales (diámetro, separación y profundidad), analizó la hidrodinámica del flujo en 3D y demostró que la profundidad de socavación es menor al incluir un acabado superficial en las pilas mediante casquetes esféricos y hexagonales comparados con una pila lisa. También, con los resultados hidrodinámicos del flujo alrededor de las pilas con los diferentes acabados determinó coeficientes de rugosidad equivalente para ser utilizados en modelos de simulación en 2D. En este trabajo se implementó el acabado superficial en un modelo de simulación 3D como rugosidad equivalente, seleccionado aquel que presentó la menor profundidad de socavación. Con respecto al estudio hidrológico necesario para realizar las diferentes simulaciones, de los estudios mencionados se tomó la información hidrológica analizada para 3 periodos de retorno 10, 20 y 50 años. En la figura 3.5, se muestran los hidrogramas correspondientes, también, para llevar a cabo una representación adecuada del fenómeno se consideraron los datos hidráulicos, granulométricos y geométricos de los estudios previos los cuales son mostrados en la tabla 3.1 y 3.2.

Tabla 3.2. Características físicas e hidráulicas de la sección del puente (Díaz González, 2016).

Parámetro	Unidad	Dimensión
Área hidráulica (A_h)	m^2	19.23
Ancho del canal (B)	m	8.00
Longitud del canal (l)	m	20,000
Caudal de diseño, para $Tr=50$ años (Q)	m^3/s	47.68
Tirante (y)	m	2.60
Velocidad media (V)	m/s	2.66
Diámetro de la pila (d)	m	1.20
Tamaño de sedimento medio (d_n)	mm	10.00
Densidad del sedimento	kg/m^3	1800
Densidad relativa (S)	adim.	1.80
Aceleración de la gravedad	m/s^2	9.81

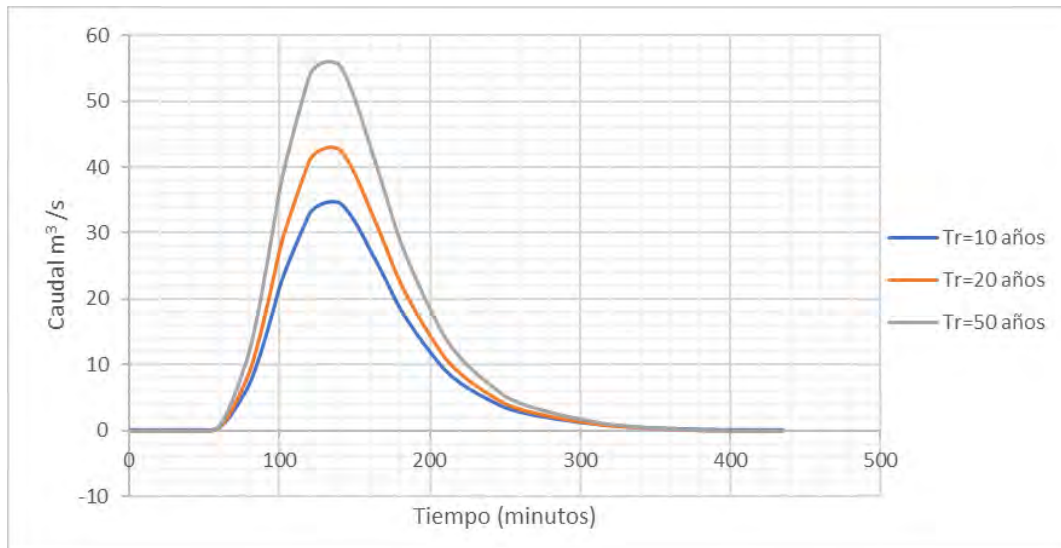


Figura 3.5. Hidrogramas de estudio con diferentes periodos de retorno (Álvarez Mejía, 2022).

Para la parte hidráulica, el tirante y la velocidad se consideraron valores promedio en el cauce para garantizar la representación de las condiciones hidráulicas, ya que son las condiciones que fueron tomadas de los estudios de referencia y por cual no pueden ser variadas. Los parámetros geotécnicos relevantes fueron el tamaño del sedimento ($d=10$ mm), la densidad del sedimento ($\rho_s=1800$ kg/m^3) y ángulo de fricción interna ($\phi=30^\circ$), parámetros importantes ya que representan las propiedades del lecho para estimar la erosión en el proceso de simulación de transporte de sedimentos.

Respecto al tipo de pilas, en este estudio se analizaron tres tipos de sección de pilas, **rectangular, circular e hidrodinámica**, las cuales se analizaron con acabado liso y acabado superficial. Se tomó como base el estudio realizado por Álvarez Mejía (2022) para el acabado superficial en pilas de sección circular donde utilizó el acabado con casquetes hexagonales, esto con la finalidad de analizar el efecto del acabado en los vórtices de herradura y estela, en la reducción de la profundidad de socavación.

También se analizó el efecto que presenta la separación de un grupo de pilas en los vórtices que generan la profundidad de socavación. Se propusieron tres separaciones correspondientes al diámetro de cada tipo de pila, también se planteó el análisis para un grupo de pilas, específicamente para tres pilas (Tabla 3.3). Las separaciones se establecieron tomando como referencia el lado largo de cada tipo de pila, y tomando como base una proporción entre los tres tipos de pila que pudieran tener la misma área.

Tabla 3.3. *Valores de la separación entre pilas.*

Tipo de sección de la pila	Separación entre pilas (m)		
	S1	S2	S3
	1 vez el diámetro	3 veces el diámetro	5 veces el diámetro
Circular	1.2	3.6	6.0
Rectangular	1.0	3.0	5.0
Hidrodinámica	1.8	5.4	9.0

3.2.2 Etapa II: Definición de Variables.

Una vez establecido el caso de estudio se definieron las diferentes variables que permitieron analizar su influencia en el proceso de socavación. Se consideraron los tres tipos de secciones de pilas: circular, rectangular e hidrodinámica. Para definir las dimensiones de la sección transversal se tomó como base la pila circular del caso de estudio y con base en el diámetro real se propusieron las diferentes dimensiones para los otros dos tipos, como se puede observar en la figura 3.6.

Otra variable por considerar es la separación entre pilas, que permite analizar el comportamiento e interacción del flujo en pilas en grupo de tal manera que, se establecieron tres tipos de separaciones (Figura 3.7). La primera separación corresponde a una vez el diámetro de la pila (S1), la segunda corresponde a tres veces el diámetro de la pila (S3) y finalmente la separación de cinco veces el diámetro (S5). Para las pilas rectangular e hidrodinámica se utilizó el mismo criterio y se puede observar las diferentes separaciones en la tabla 3.3.

Otra de las variables de relevancia es el acabado superficial en las pilas establecidas donde se tomó como referencia el estudio realizado por Álvarez Mejía (2022). Se seleccionó el acabado con casquetes hexagonales, tal como se muestra en la figura 3.8, con los parámetros geométricos de los casquetes hexagonales que se presentan en la tabla 3.4.

3.2.3 Etapa III: Simulación con FLOW 3D.

En esta etapa se realizó la simulación para los tres tipos de pilas incluyendo la sección circular del caso de estudio. Esta etapa se subdivide en dos subetapas: III.1 Simulación hidrodinámica para analizar el efecto hidrodinámico del flujo bajo las variables establecidas, con el fin de identificar las estructuras de vórtice, la zonas de concentración de energía cinética así mismo la velocidad del flujo y III.2 Simulación de socavación con el objetivo de analizar el efecto del acabado superficial y la separación entre pilas en la reducción de la socavación local tomando como base los escenarios de la subetapa III.1.

3.2.3.1 Proceso de Simulación con FLOW 3D.

Para la realización de la simulación con FLOW 3D, se establecieron una serie de pasos que a continuación se describen. En la figura 3.9 se muestra el proceso que se siguió para la realización de las simulaciones con el fin de determinar el comportamiento del flujo alrededor de la pila, los campos de velocidad, la vorticidad y la energía cinética, bajo diferentes condiciones de flujo.

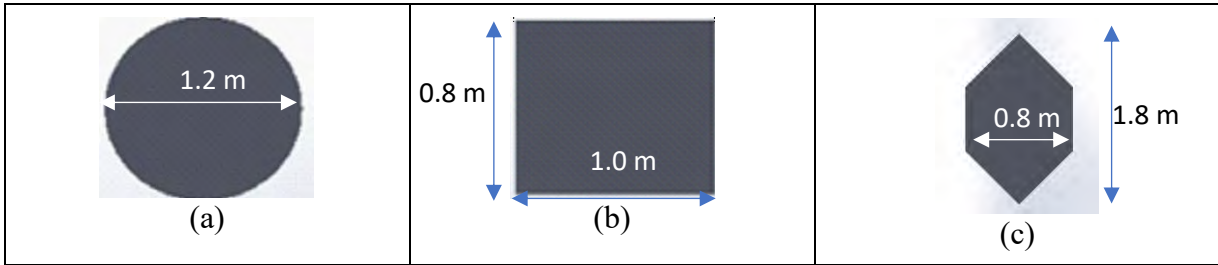


Figura 3.6. Geometría de las pilas. a) Pila Circular, diámetro 1.2 m; b) Pila Rectangular, Lado Largo=1.0 m, Lado corto= 0.8 y c) Pila Hidrodinámica eje largo 1.8 m, eje corto 0.8 m.

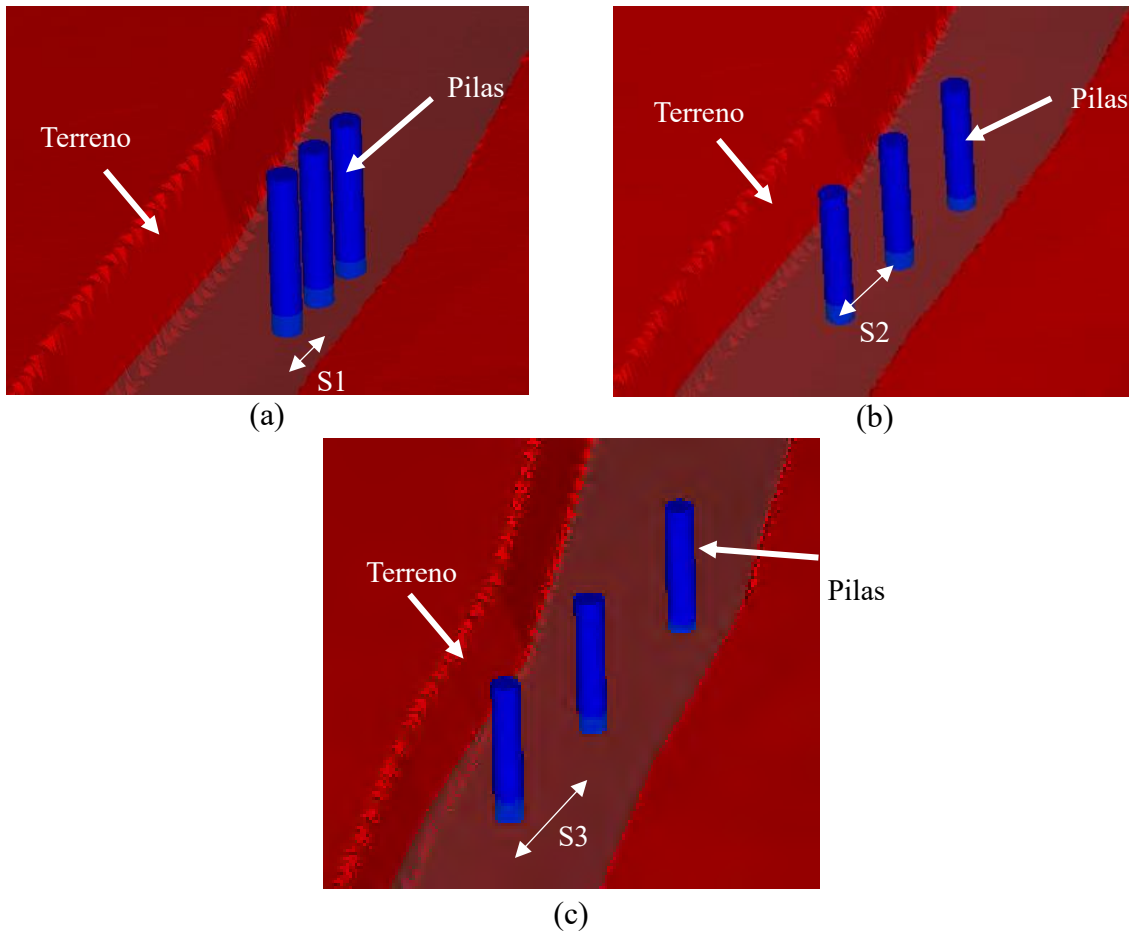
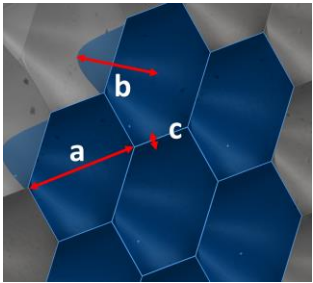


Figura 3.7. Separación entre pilas, a) separación $S_1=1.2$ m, b) separación $S_2=3.6$ m y c) separación $S_3=6.0$ m.

Para iniciar la simulación hidrodinámica, en primera instancia se habilitaron los modelos aplicables, donde se acotó el hidrograma para definir el tiempo de simulación con base en el tiempo máximo de cada hidrograma. También, se habilitaron los diferentes parámetros físicos del fluido. Por ejemplo, la aceleración de la gravedad asignando un valor de -9.81 m/s^2 en la dirección “Z”, temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y viscosidad constante. Se habilitó el módulo de “Aguas poco Profundas” modelo que describen el comportamiento de un fluido incompresible en superficie libre dentro de un dominio, también se habilitó el módulo “two equation $\kappa-\varepsilon$ ” para simular las características del flujo medio en condiciones de turbulencia.

Tabla 3.4. Factores geométricos de casquete hexagonal (Álvarez Mejía, 2022).

$a=$	0.06 m	
$b=$	0.04 m	
$c=$	0.0 m	

Donde “a” es el diámetro del casquete “b” es la profundidad de casquete y “c” es la separación entre casquetes.

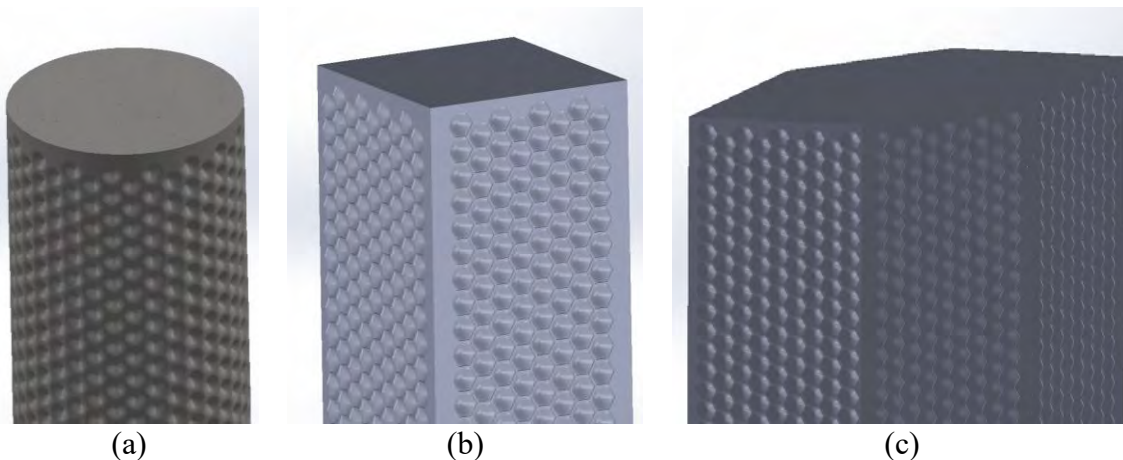


Figura 3.8. Ejemplo de acabado superficial a base de casquetes hexagonales para tres tipos de pilas; a) Pila de sección circular, b) Pila de sección rectangular y c) Pila de sección hidrodinámica.

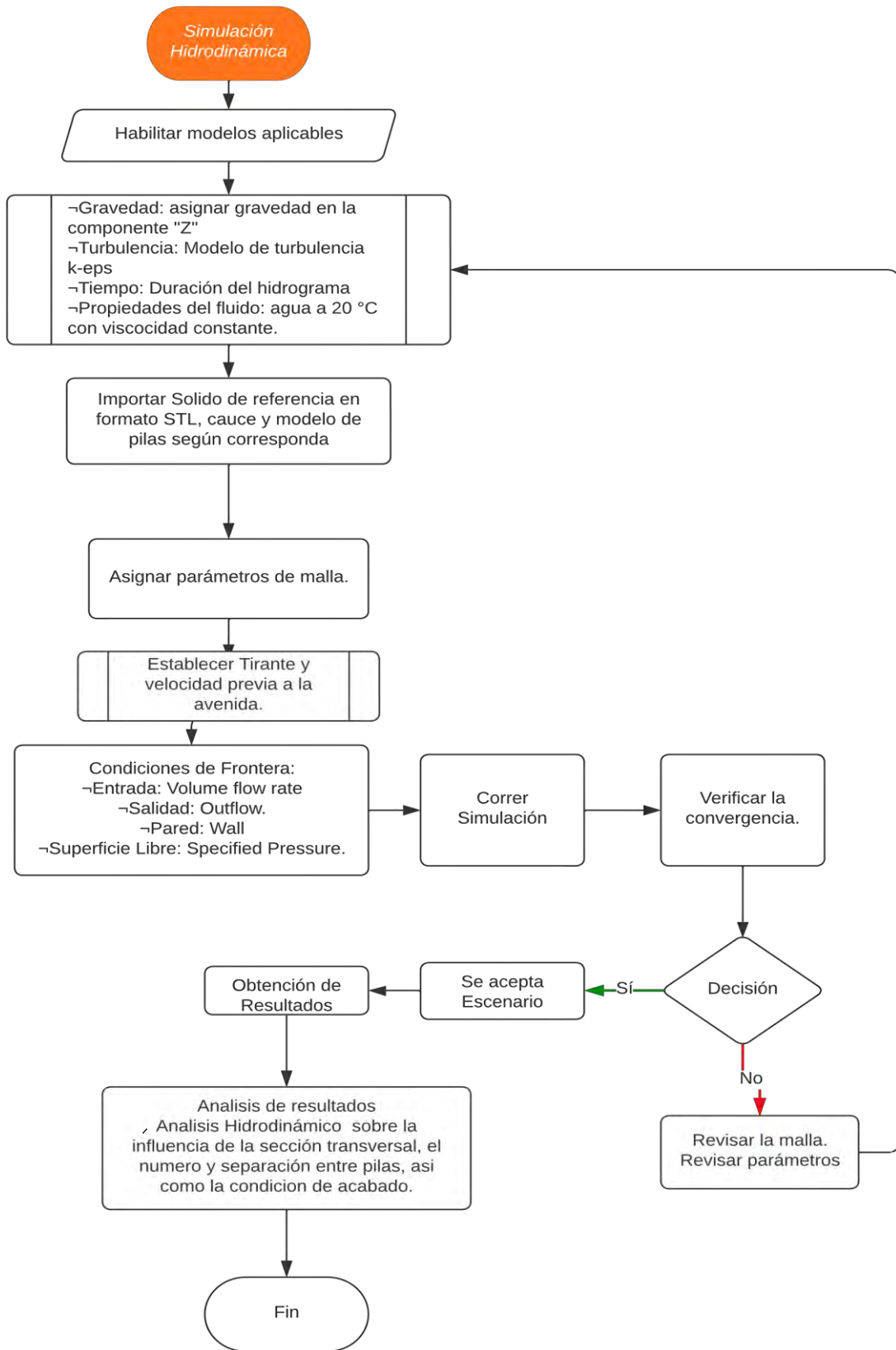


Figura 3.9. Diagrama de flujo del proceso de simulación hidrodinámica en FLOW 3D.

Respecto al tramo de río en estudio, este se importó como sólido, para ello se generó la topografía de cauce, realizando una réplica del modelo digital cuyas dimensiones corresponden al puente “Congreso-San Nicolas” en el municipio de Teziutlán en el estado de Puebla, México. Dicho modelo se realizó acoplando las herramientas ArcGIS y SolidWorks permitiendo tener una sección pertinente y adecuada del puente y del cauce. El modelo se realizó mediante la definición de secciones transversales, las cuales se incorporaron al modelo digital de terreno, se seleccionó un tramo de llegada de 700 m aguas arriba del puente y 500 m aguas abajo como se muestra en la figura 3.10.

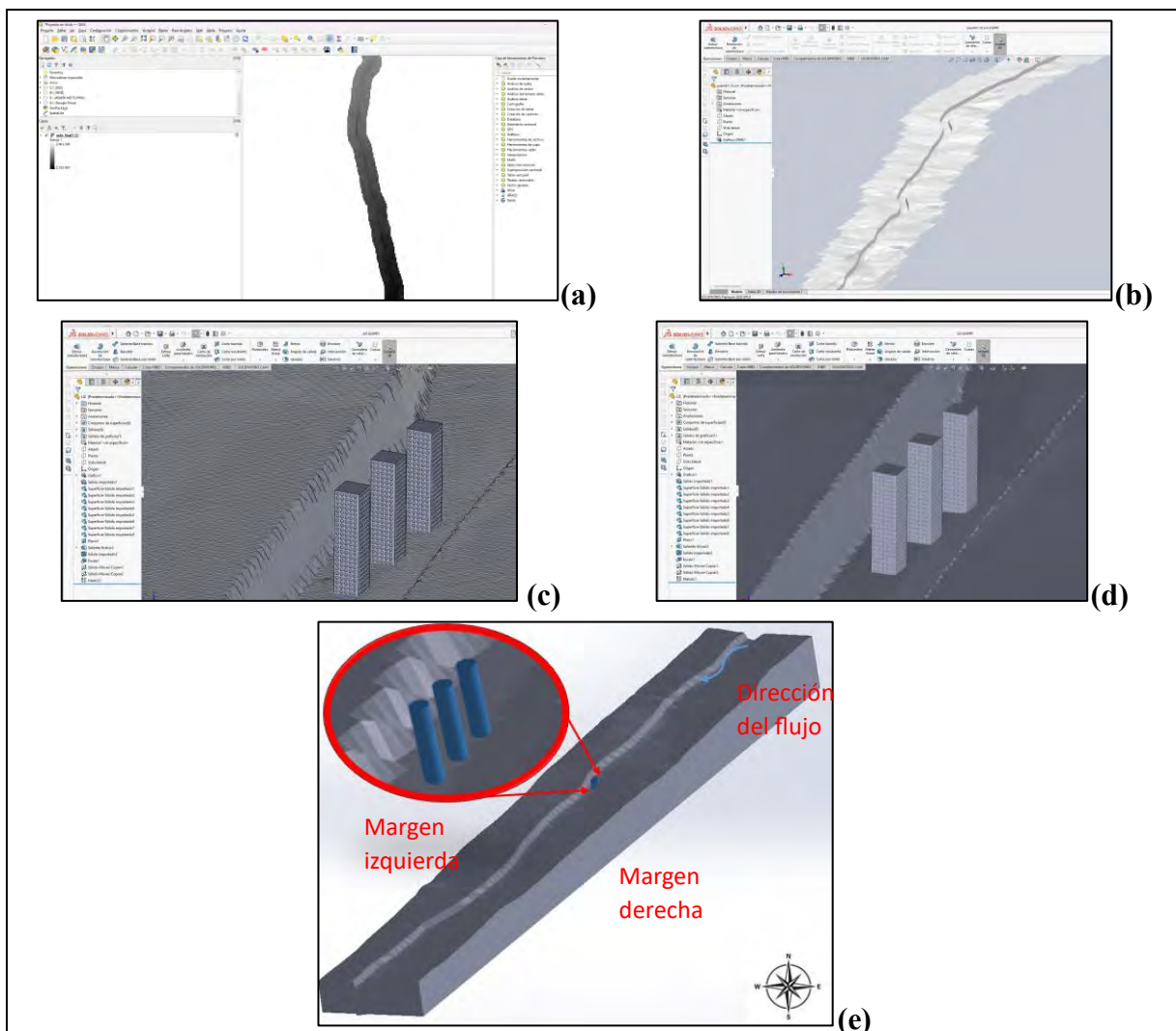


Figura 3.10. Construcción del modelo geométrico del tramo de río en QGIS y SolidWorks; a) Modelado y tratamiento de la superficie de elevaciones, b) Importación de la superficie a.wrl (Virtual Reality Modeling Language) del cauce, c) Conformación del sólido de malla, (d) Refinamiento del modelo y (e) Modelo STL final.

En FLOW 3D se importó el modelo de SolidWorks en formato SLT resolución 0.2x0.2 m para la fase de simulación hidrodinámica, adicionalmente se incorporaron los diferentes modelos de pila según su sección y separación. Al sólido se le asignó un bloque de malla que permitió establecer las condiciones de contorno establecidas en el programa, las cuales se enlistan en la tabla 3.5. Mientras que, en la figura 3.11 se observa las condiciones de frontera aplicadas al sólido, apreciando la sección del río y la integración de la pila unitaria, así como el mallado en bloque sobre el área de estudio.

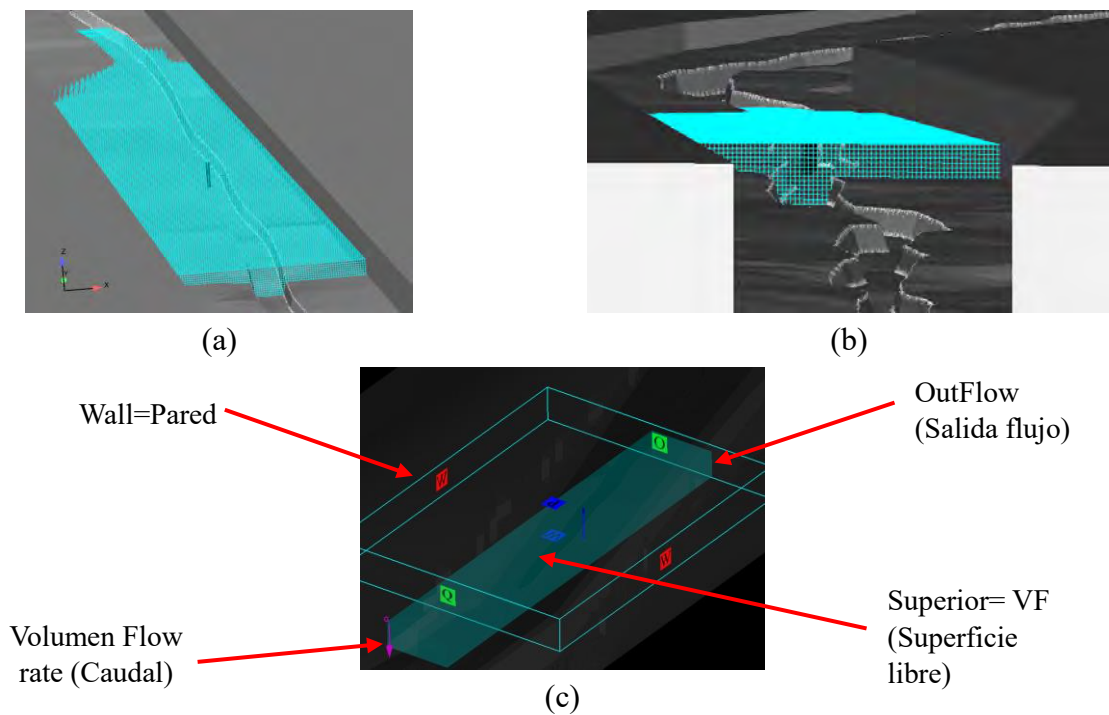


Figura 3.11. Modelo en FLOW 3D; a) Mallado en bloque, b) Vista frontal de la sección del cauce y c) Condiciones de Frontera.

Tabla 3.5. Condiciones de contorno del sólido, paredes del cauce.

Superior	VF=0 (superficie libre)
Inferior	Wall (pared)
Izquierdo	Wall (pared)
Derecho	Wall (pared)
Frontal	Volumen Flow rate (Caudal) Hidrogramas
Atrás	Salida de flujo (Outflow)

3.2.3.2 Simulación Hidrodinámica.

Antes de realizar la simulación hidrodinámica, se realizó un análisis de sensibilidad de malla para definir el tamaño y la resolución adecuada, con la finalidad de garantizar la independencia del tamaño de celda en los resultados. Partiendo del modelo geométrico en el cauce, se asignaron diferentes tamaños de malla los cuales observan en la figura 3.12. Se realizó el análisis con diferentes tamaños y para el caudal máximo asociado al periodo de retorno de 20 años, ($Q_{\text{máx}} = 43 \text{ m}^3/\text{s}$). El tamaño 1 representa un mallado de 5 millones de elementos, tamaño 2 corresponde a un mallado de 10 millones de elementos, y el tamaño 3 corresponde a un mallado de 15 millones de elementos además se analizó la convergencia en el tiempo para cada combinación.

Para realizar las simulaciones para cada tipo de pila se realizó la asignación de los diferentes límites de la malla como se muestra en la tabla 3.6. El planteamiento permitió analizar la discretización del dominio en cuadrículas rectangulares (mallado) con el objetivo de garantizar la estabilidad, consistencia y convergencia de la solución del flujo, así como garantizar los tiempos de simulación y la resolución de los resultados.

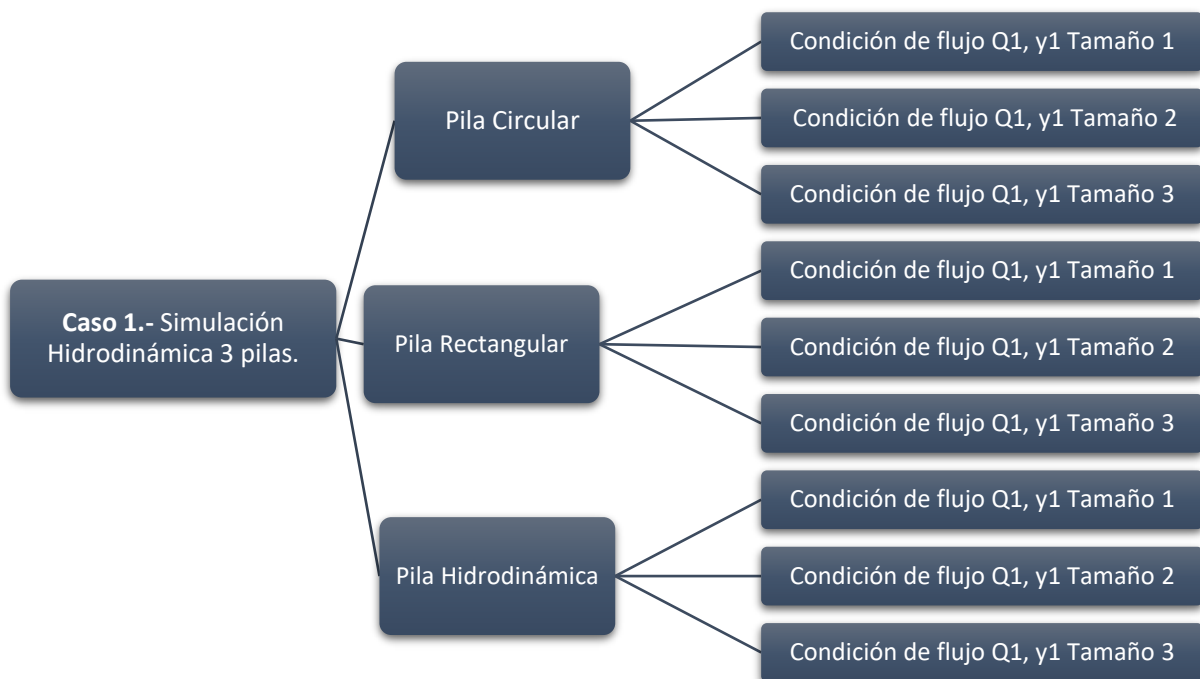


Figura 3.12. Esquema de Análisis de sensibilidad de malla.

Tabla 3.6. *Número de elementos de cada malla analizada.*

Tipo de Pila	Malla	Caudal
Circular	100,000	43 m ³ /s
	500,000	
Rectangular	1,000,000	
	5,000,000	
Hidrodinámica	10,000,000	
	15,000,000	

Definido el tamaño de malla, se planteó un grupo de combinaciones con la finalidad de analizar el comportamiento hidrodinámico alrededor de las pilas bajo la condición de caudal constante, verificando el comportamiento del flujo a lo largo del tiempo especialmente su comportamiento alrededor de la pila.

Para el análisis hidrodinámico del flujo alrededor de las diferentes pilas y condiciones de distancia se plantearon los diferentes escenarios mismos que se presentan en la figura 3.13 y 3.14. El número de escenarios se estableció con el fin de analizar el comportamiento hidrodinámico alrededor de las pilas para los distintos hidrogramas, analizando el comportamiento del flujo a lo largo del tiempo, especialmente el comportamiento alrededor de la pila, así como los comportamientos de las estelas de turbulencia.

Realizada la simulación hidrodinámica para una pila, se procedió a remplazar la presencia de la pila individual por un conjunto de 3 pilas con diferentes separaciones, manteniendo la forma geométrica para cada caso (circular, rectangular e hidrodinámica). Esta modificación permitió incorporar una fuente de variación para cumplir el objetivo central de la investigación sobre todo para analizar la interacción y el comportamiento del flujo ante la presencia del grupo de pilas, así mismo analizar el comportamiento de las estelas de vórtice y si estas aumentan o disminuyen bajo el efecto de la separación de pilas, y su influencia en la reducción de la profundidad de socavación.

Este enfoque de ajuste de la separación entre pilas influye directamente en el comportamiento de los vórtices de herradura y estelas. Dichas simulaciones se llevaron a cabo bajo la condición de flujo establecida por el hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de 20 años.

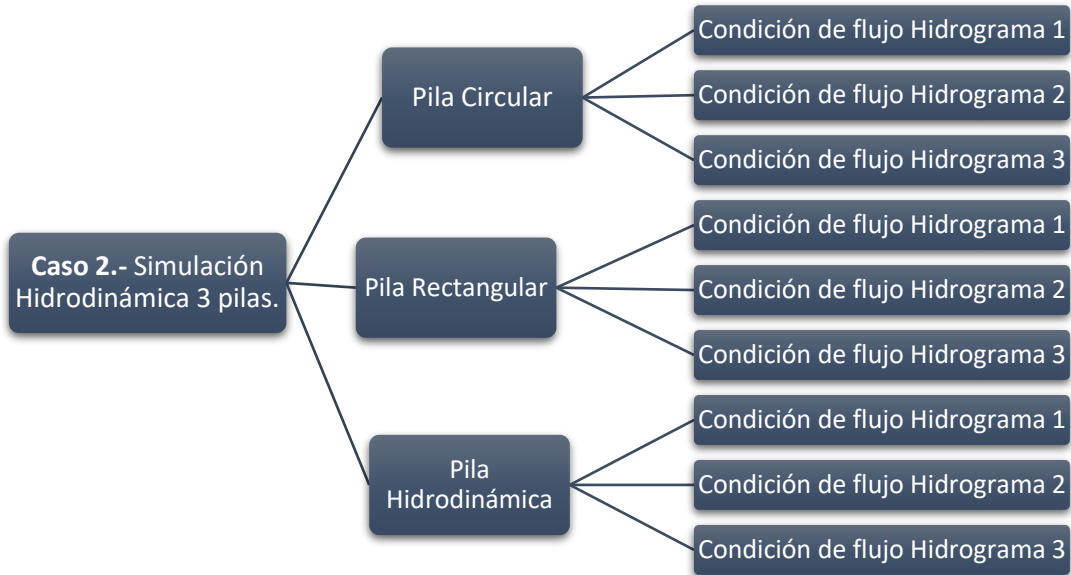


Figura 3.13. Esquema de análisis hidrodinámico para una sola pila.

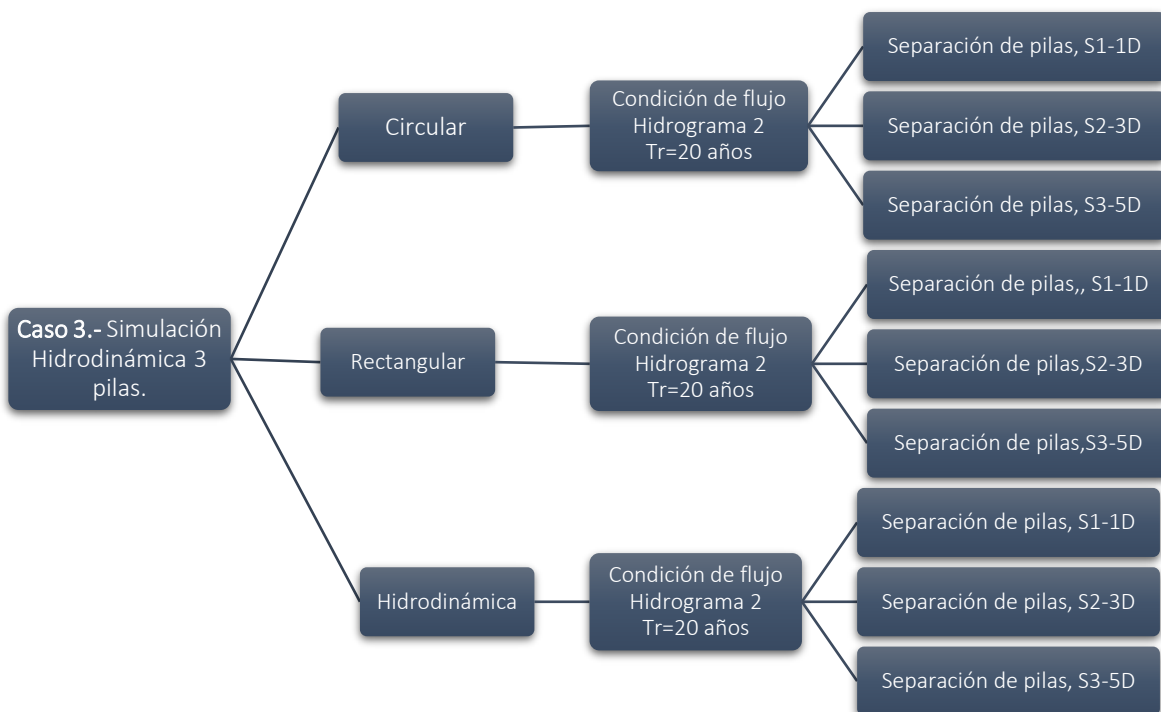


Figura 3.14. Análisis Hidrodinámico bajo la condición de variación de separación entre pilas.

3.2.3.3 Simulación de la socavación.

Con el fin de analizar el comportamiento de la profundidad de socavación local para un grupo de pilas con y sin acabado superficial y cumplir uno de los objetivos específicos de la investigación se realizó la simulación de erosión con la incorporación de sedimentos. Fue necesario importar un componente tipo bloque de sedimento compuesto por el terreno natural del cauce y un componente tipo sólido compuesto por el grupo de pilas en cuestión con una rugosidad de concreto con acabado simple. En la figura 3.15 se muestra el procedimiento de simulación. En esta etapa se desarrollaron las simulaciones de erosión para los grupos de pilas lisas donde se varia la separación entre ellas y se cambia la configuración geométrica como se puede observar en la figura 3.16 el número de escenarios analizados. Lo anterior con el fin de analizar el efecto de la separación de las pilas en el fenómeno de socavación. Obteniendo los campos de erosión y visualizando las direcciones de recirculación del flujo.

También, se analiza el comportamiento del arrastre de sedimentos alrededor del grupo de pilas con acabado superficial. En la figura 3.17 se muestra las diferentes combinaciones realizadas para analizar el efecto del acabado superficial en la profundidad de socavación para cada separación entre pilas. La condición del flujo fue la misma, basada en el hidrograma correspondiente para un periodo de retorno de 20 años. Del mismo modo se analizaron las tres separaciones establecidas entre pilas, la variable que experimentó variación fue el acabado superficial de las pilas.

Para las simulaciones planteadas en los casos 4 y 5, fue necesario importar un componente de tipo bloque de sedimento compuesto por el terreno natural del cauce y un componente tipo sólido compuesto por el grupo de pilas en cuestión con una rugosidad de concreto con acabado simple los cuales se pueden ver en la Figura 3.18. La interacción entre estos componentes se determina habilitando el modelo “Sediment scour”, para ello, se seleccionó el modelo de Meyer Peter Muller para estimar el transporte de fondo con tamaños de sedimento uniforme de 1 cm, densidad del sedimento $1,800 \text{ kg/m}^3$ y una densidad relativa 1.80, datos correspondientes a los proporcionados en estudios previos (Díaz Gonzales, 2016)

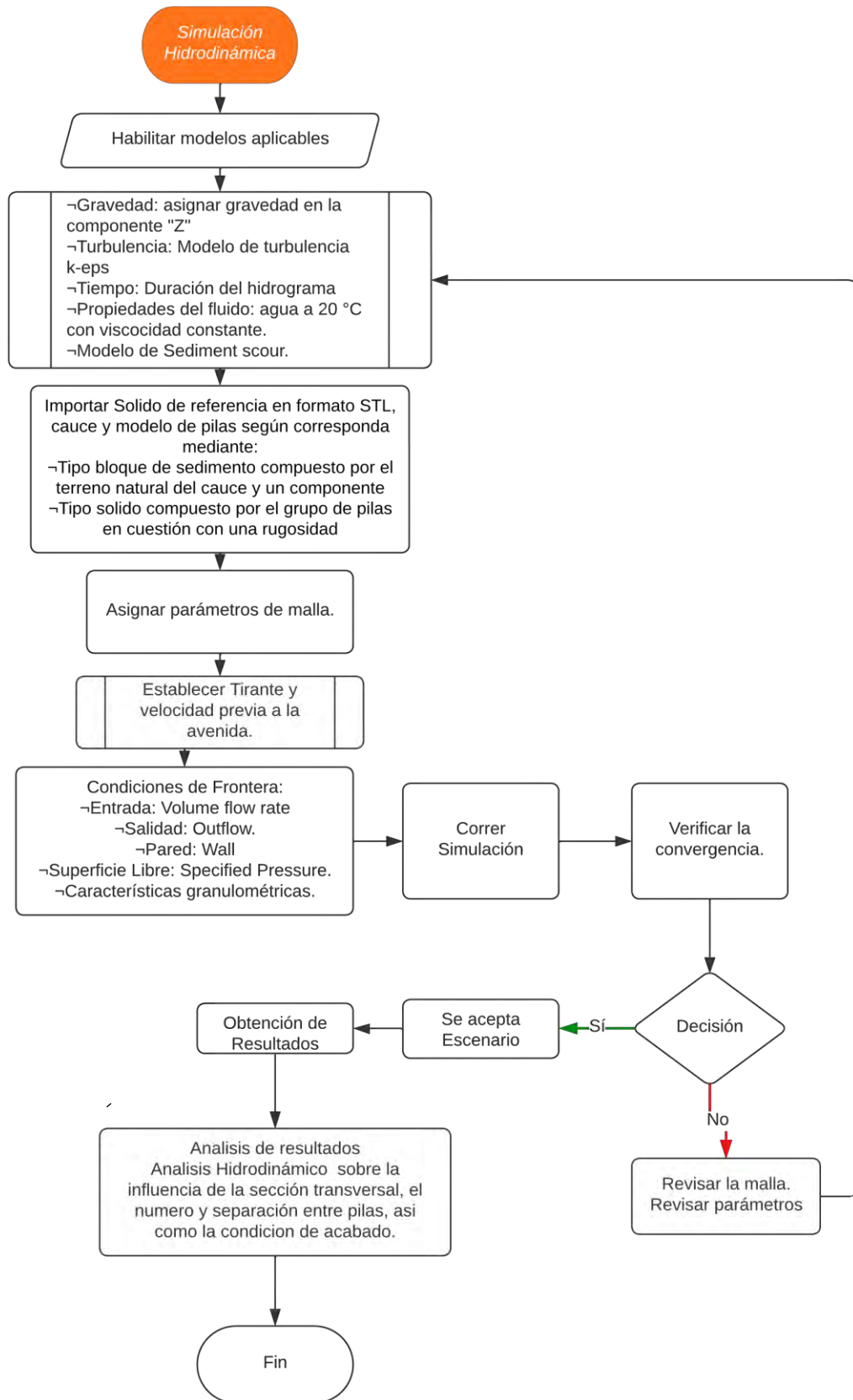


Figura 3.15. Diagrama de flujo del proceso de simulación de erosión.

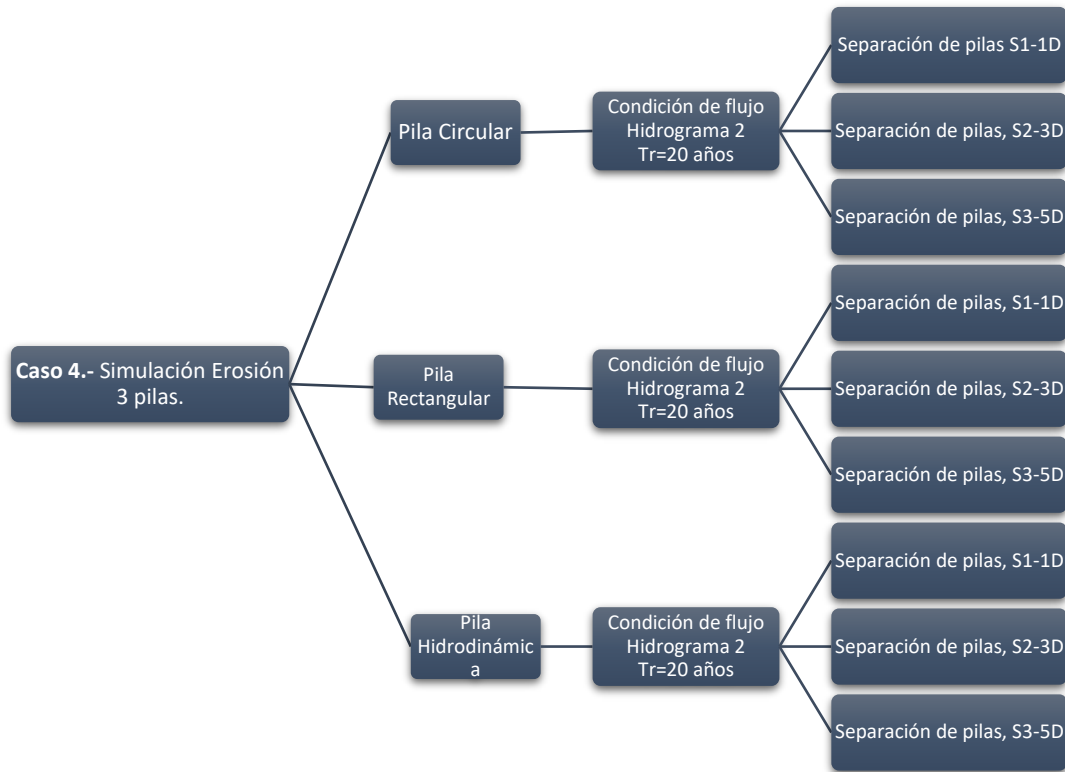


Figura 3.16. Diagrama de configuraciones para el análisis de la erosión.

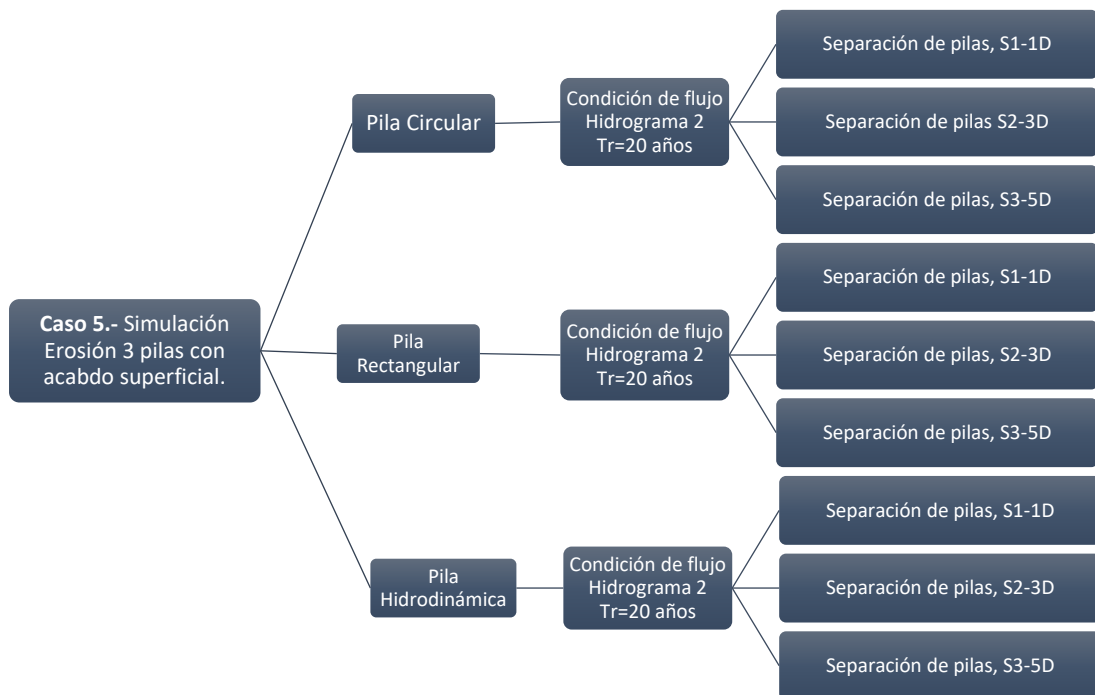


Figura 3.17. Configuración para el análisis de la erosión con acabado superficial en pilas.

Para evitar que se presentara una erosión fuerte al inicio de la simulación se estableció como condición inicial en el cauce un tirante igual a 2.6 m, velocidad de 2.66 m/s (figura 3.19), una constante de gravedad 9.81 m/s^2 , en la frontera superior se habilitó la condición de “shallow wáter mesh block”, la discretización del dominio alrededor de la pila fue a través de 2,500,000 elementos regulares, se redujo el tramo de llegada y salida conservando el tamaño de celda, reduciendo el número de elementos y se refinaron algunas zonas. Producto de las simulaciones hidrodinámicas, se identificó la longitud exacta que se necesita para uniformizar condiciones y se ajustó.

La duración de las simulaciones dependió directamente de la duración del hidrograma asociado a cada periodo de retorno, además para analizar el efecto de la turbulencia, se habilitó el modelo de turbulencia “two equation $\kappa-\varepsilon$ ”. El esquema empleado para la solución fue de tipo implícito GMRES (Generalized minimal residual method), con este método el sistema de ecuaciones se resuelve de manera simultánea en todo el dominio mediante una técnica iterativa, con un paso de tiempo adaptativo.

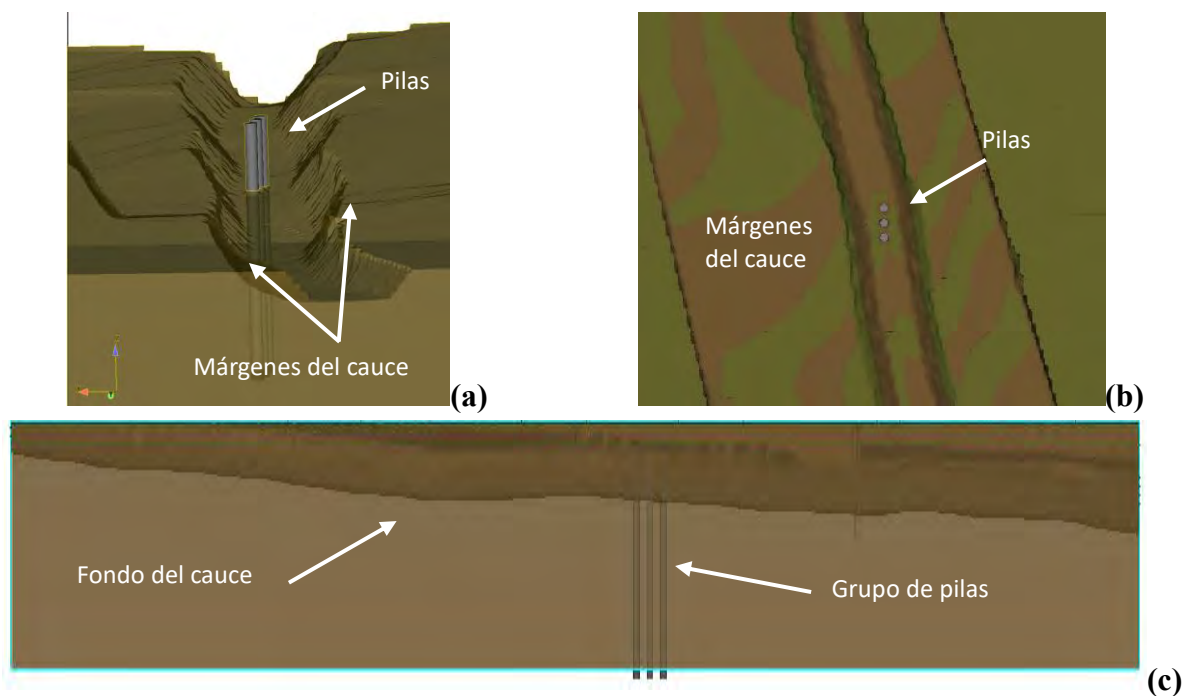


Figura 3.18. *Modelo del cauce con incorporación de sedimentos; a) Vista Frontal de pilas agrupadas, b) Vista en planta de la sección del cauce, terreno natural y c) Vista Lateral del terreno natural del cauce.*

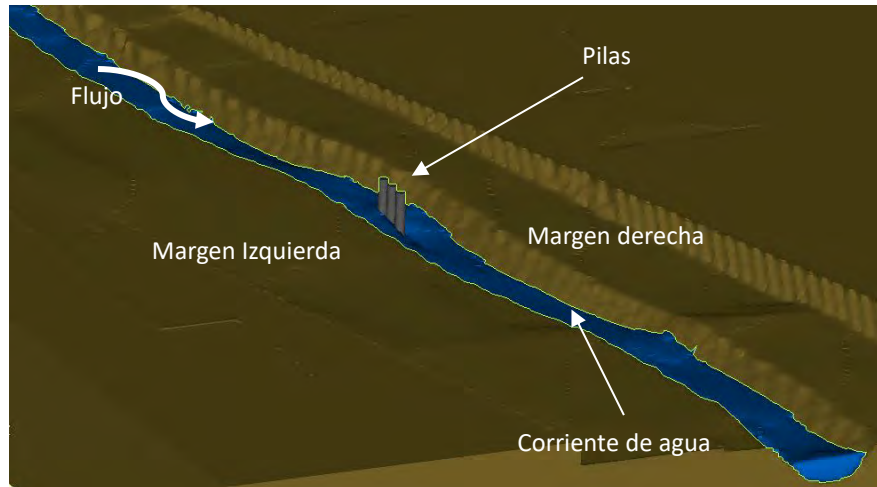


Figura 3.19. *Interacción entre flujo, sedimentos y pilas agrupadas.*

3.2.3.3 Análisis de resultados (Postproceso)

En esta fase, se llevó a cabo la extracción de información esencial para realizar un análisis detallado de campos de velocidad, la evaluación de la producción de vórtices de estela y vórtices de herradura mediante contornos y gráficos de evolución espacial, así como el examen del proceso de socavación. Este análisis se llevó a cabo con la herramienta complementaria FlowSight.

Las simulaciones realizadas en FLOW 3D fueron leídas en el programa FlowSight. Aquí, se ajustaron las condiciones del sólido mediante la creación de contornos, gráficas y transparencias, permitiendo así la observación detallada del comportamiento del flujo a lo largo del cauce. Este enfoque facilitó la discusión de las variables de interés. Los resultados se analizaron mediante la creación de diversas gráficas, extrayendo planos y superficies para evaluar campos como velocidad, vorticidad y distribución de energía cinética de turbulencia.

Este procedimiento se replicó para las diversas combinaciones descritas en los puntos 3.2.3.1 y 3.2.3.2, basándose en los resultados de las simulaciones. Se identificaron alternativas que permitieran reducir la profundidad de socavación en función de la geometría y distancia entre pilares. De este modo, se buscó definir la configuración que demostrara los mejores resultados en términos de disminución de la profundidad de socavación.

Asimismo, se realizó una cuidadosa revisión de los datos extraídos, asegurando la coherencia y validez de los resultados. La aplicación de criterios específicos permitió identificar patrones y tendencias significativas, respaldando así las conclusiones derivadas del análisis detallado de las distintas configuraciones evaluadas. Este proceso garantizó el alcance de las conclusiones obtenidas y la fiabilidad de las recomendaciones resultantes para mitigar el fenómeno de socavación local en el caso estudiado.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En este capítulo se exponen de manera sistemática y detallada los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología propuesta, ofreciendo una visión precisa de los descubrimientos alcanzados. Esta sección no solo valida la hipótesis planteada en el contexto del estudio, sino que, también sienta las bases para la interpretación y discusión de los resultados en el ámbito de la ingeniería civil.

La estructura de esta sección se divide en dos partes: la primera se centra en una caracterización hidrodinámica del fenómeno, mientras que la segunda se vincula con análisis cuantitativos el proceso de socavación, organizados por grupos de simulación.

4.1 Análisis hidrodinámico.

En esta sección se presenta un análisis hidrodinámico como herramienta esencial para comprender los mecanismos hidrodinámicos que producen la socavación local. Se proporciona una comprensión detallada de los efectos del flujo sobre las configuraciones de pilas planteadas. Este análisis no solo desvela los patrones de flujo que desencadenan la socavación, también posibilita la capacidad de prever y cuantificar los riesgos asociados. Al explorar la interacción entre el agua y la infraestructura, se presenta información valiosa para el diseño y la implementación de medidas preventivas empleando rugosidad artificial.

En esta sección, se abordan los principios hidrodinámicos que rigen el fenómeno, examinando variables fundamentales como la velocidad, vorticidad y la distribución de la energía cinética de la turbulencia.

4.1.1 Análisis hidrodinámico para pilas aisladas con acabado liso.

Esta sección corresponde a los escenarios donde se posiciona sola una pila con acabado liso sobre el lecho, cuya condición de entrada corresponde con un hidrograma asociado a un periodo de retorno (T_r) de 20 años con un valor en el caudal máximo ($Q_{\text{máx}}$) igual a 43.03 m³/s. Se exploran tres variantes de pilas con sección transversal circular, rectangular e hidrodinámica, respectivamente, para analizar sus respuestas frente a estas condiciones específicas.

En la figura 4.1 se presenta una comparativa de los campos de velocidad para cada tipo de pila. Es claramente observable que la posición de las pilas actúa como un obstáculo al flujo, generando una reducción en el área hidráulica que conlleva a fluctuaciones en la velocidad media en dos áreas específicas: frente a las pilas y a los costados, como resultado de la separación del flujo.

Estas áreas, de particular interés, emergen como los principales generadores de vórtices, donde la influencia de la sección de la pila cobra gran relevancia. La sección hidrodinámica se destaca por presentar una menor resistencia al flujo, con una zona de fluctuación de velocidad de menor impacto. En contraste, las pilas de sección rectangular y circular exhiben áreas de influencia de mayor intensidad, evidenciando así las diferencias significativas en el comportamiento hidrodinámico entre los distintos tipos de pilas.

Por otra parte, en la Figura 4.2 se ilustra la distribución de la energía cinética de turbulencia alrededor de las pilas. Al comparar con la figura 4.1 en situaciones de alta velocidad de flujo, se observa que la probabilidad de que el flujo se vuelva turbulento aumenta, lo que resulta en una energía cinética de la turbulencia más pronunciada, directamente proporcional a la velocidad del flujo. La concentración en la energía cinética está estrechamente vinculada a las trayectorias del flujo, condicionadas en gran medida por la forma de la sección transversal. En otras palabras, a medida que la velocidad aumenta, la energía cinética también lo hace. Con la intención de resaltar el efecto disipador de la geometría de la pila, se observa que los valores de energía cinética turbulenta tienden a elevarse aguas abajo de la pila.

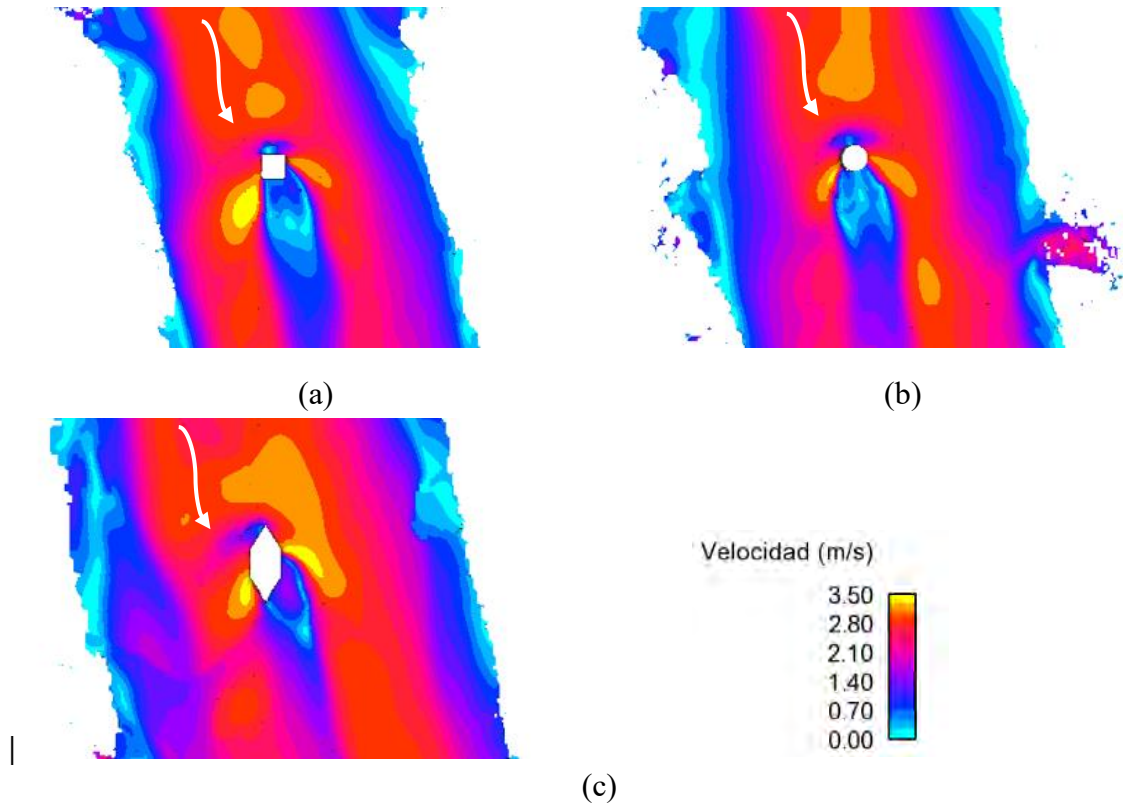


Figura 4.1. Campos de velocidad; a) pila de sección rectangular, b) pila de sección circular y c) pila de sección hidrodinámica.

En el caso de la pila de sección hidrodinámica (Figura 4.2a), se destaca por tener la mayor influencia alrededor de la pila, ya que aumenta la energía cinética. La distribución en esta sección dependerá del ángulo de ataque del flujo y de la relación entre las diagonales, lo cual se atribuye a la presencia de vórtices de baja intensidad. En cuanto a la pila de sección rectangular (Figura 4.2b), genera una amplia área de separación del flujo, aumentando la resistencia y, por ende, la energía cinética que disminuye aguas abajo de la pila. Finalmente, la pila de sección circular (Figura 4.2c) presenta una menor influencia en el aumento de la energía cinética de turbulencia en comparación con la sección rectangular, pero exhibe un mayor intercambio de energía entre los lados de la pila, acelerando la producción de vórtices aguas abajo.

Con el objetivo de caracterizar el desprendimiento del flujo que genera las estelas de turbulencia, se llevó a cabo una identificación detallada de las zonas de separación de flujo a los costados de las pilas y de la interacción entre estas áreas. En la Figura 4.3, se emplearon contornos de vorticidad para destacar la rotación del flujo en sentido positivo y negativo, proporcionando una herramienta efectiva para detectar y analizar estos fenómenos con precisión.

La pila de sección hidrodinámica, como se muestra en la Figura 4.3a, exhibe una separación del flujo antes de cruzar el eje central de la pila. En cambio, las pilas rectangular y circular (figuras 4.3b y 4.3c) presentan un punto de separación después del eje central de la pila, dando lugar a una estela de mayor dimensión debido al choque entre las capas de fluido que se desprenden de la pila con rotación contraria. Este detalle subraya la influencia crucial del punto de separación en la formación de la estela de turbulencia aguas abajo de la pila y, por ende, en la extensión del foso de socavación.

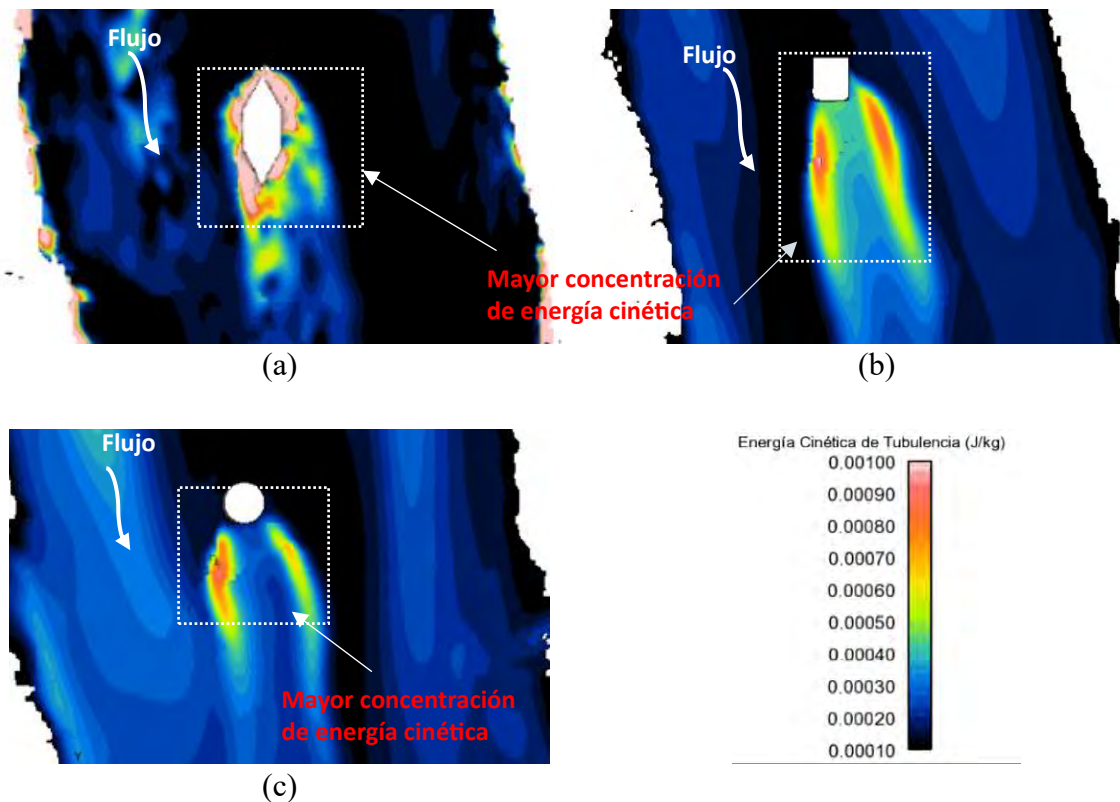


Figura 4.2. Campos de energía cinética de turbulencia alrededor de la pila; a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección rectangular y c) pila de sección circular

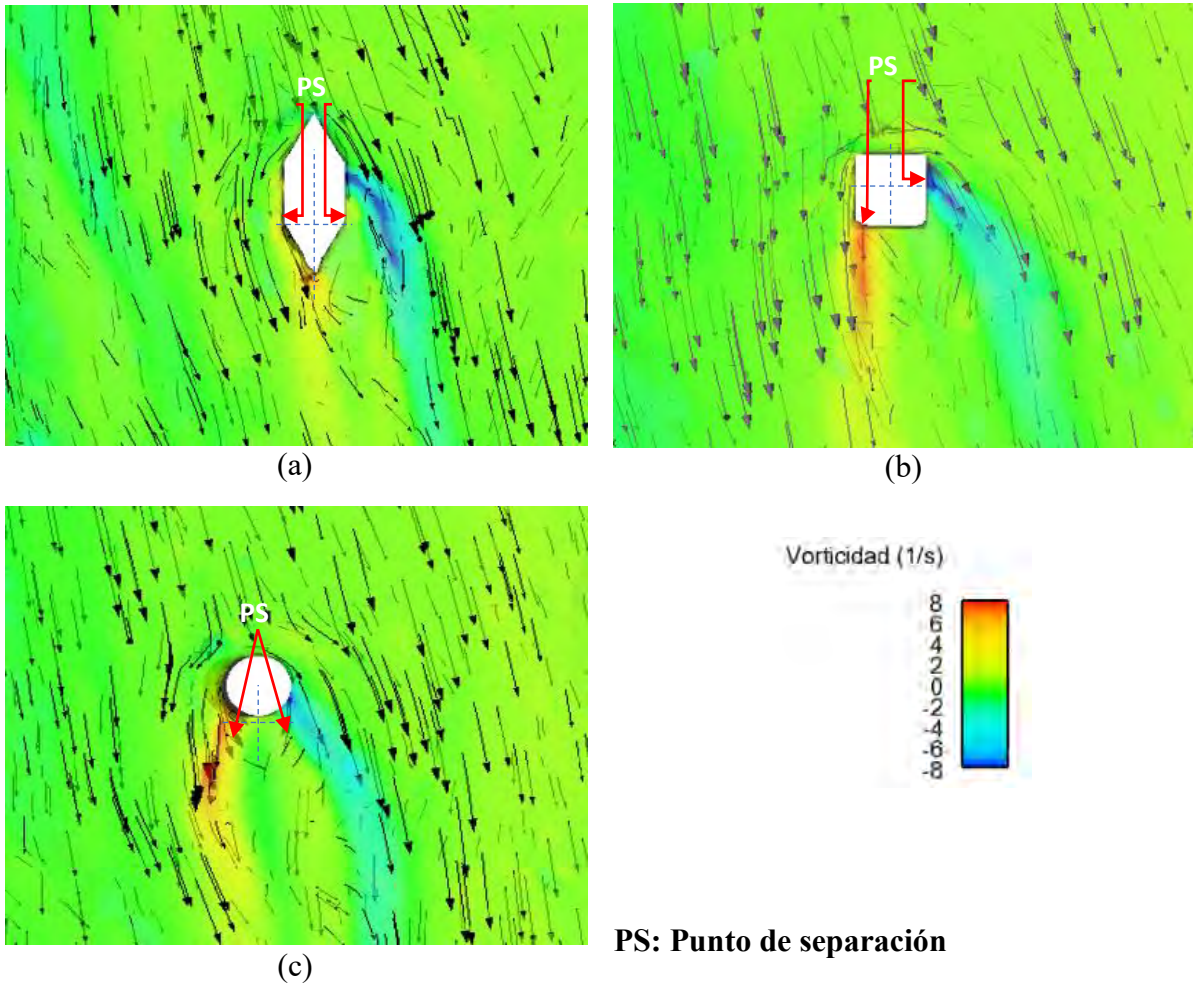


Figura 4.3. Campos de vorticidad en pilas lisas aisladas; a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección rectangular y c) pila de sección circular.

Las Figuras 4.4 y 4.5, generadas en un plano intermedio y cercano al lecho respectivamente, exhiben las trayectorias de recirculación en la estela de turbulencia, proporcionando una descripción detallada de la extensión de la región de flujo inverso o recirculante alrededor de las pilas. La pila de sección hidrodinámica al presentar un punto de separación del flujo cercano al centro de la pila origina una trayectoria de recirculación más limitada. En contraste, la pila de sección rectangular muestra una trayectoria de recirculación más amplia dado que, el punto de separación del flujo se sitúa más lejos del eje central de la pila.

Es crucial señalar que, entre ambos planos de análisis a medida que el flujo se acerca al lecho, el radio de giro disminuye. Además, cuando el flujo está más próximo a la superficie libre, la trayectoria se amplía formando remolinos o vórtices en la estela, estructuras de flujo caracterizadas por la rotación localizada del fluido alrededor de un eje, fenómeno intrínseco al proceso de socavación.

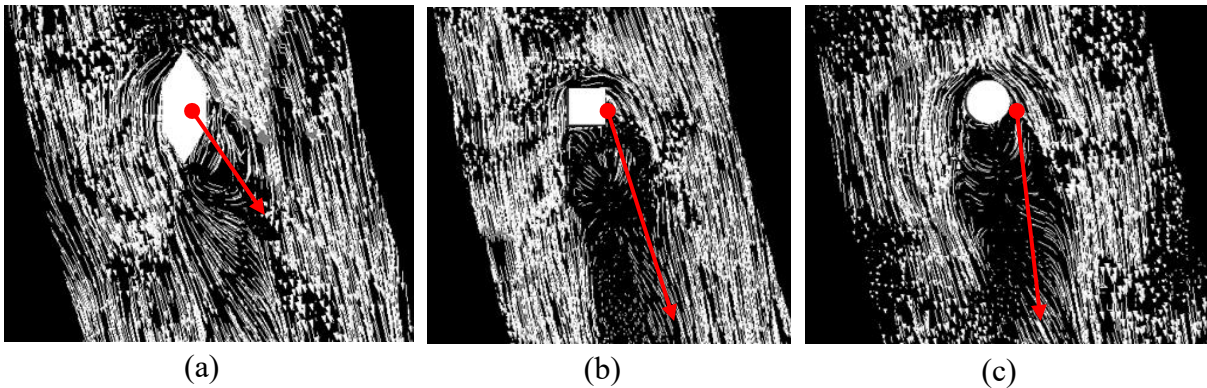


Figura 4.4. Zonas recirculación del flujo en un plano intermedio a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección rectangular y c) pila de sección circular.

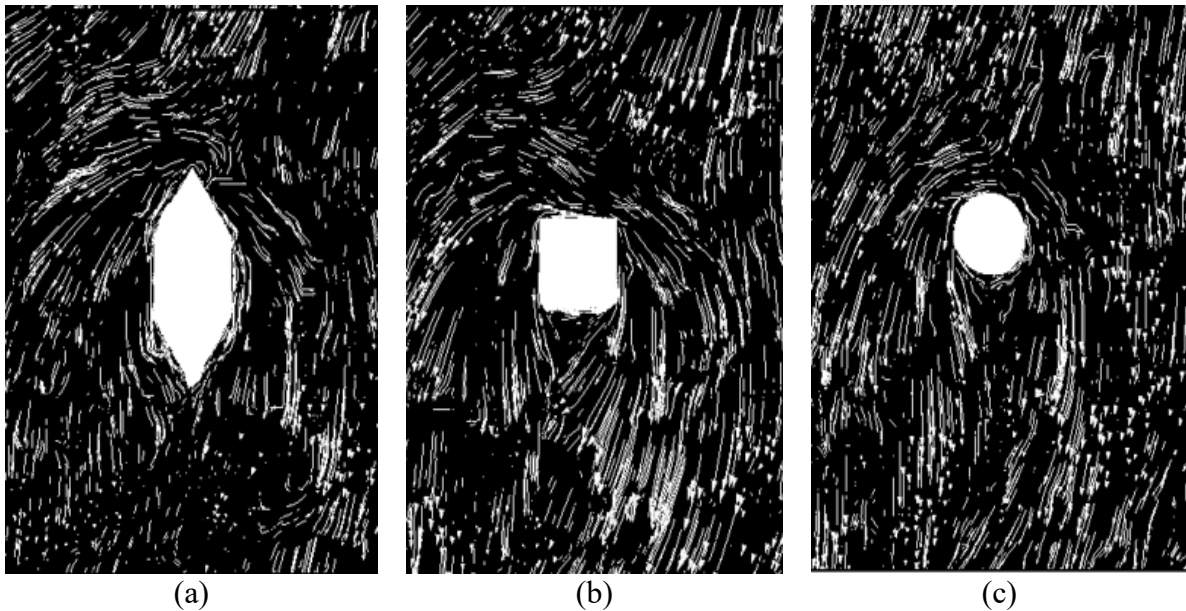


Figura 4.5. Zonas recirculación del flujo en un plano cercano al lecho a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección rectangular y c) pila de sección circular

La figura 4.6 ilustra de manera detallada el proceso de formación y ruptura de los vórtices de herradura y estela alrededor de las pilas. Además, posibilita la comparación entre los tres tipos de sección de pila, permitiendo la identificación de patrones específicos para cada uno. Esta comparación proporciona información valiosa sobre la interacción fluido-estructura.

La distribución a través del Q-criterio, que combina la magnitud de la vorticidad y la magnitud de la velocidad de deformación, se reveló como una herramienta útil para discernir la complejidad de los vórtices tridimensionales generados. Este enfoque facilita la comprensión de los intrincados mecanismos que subyacen a la socavación, ofreciendo una perspectiva más clara de los fenómenos observados.

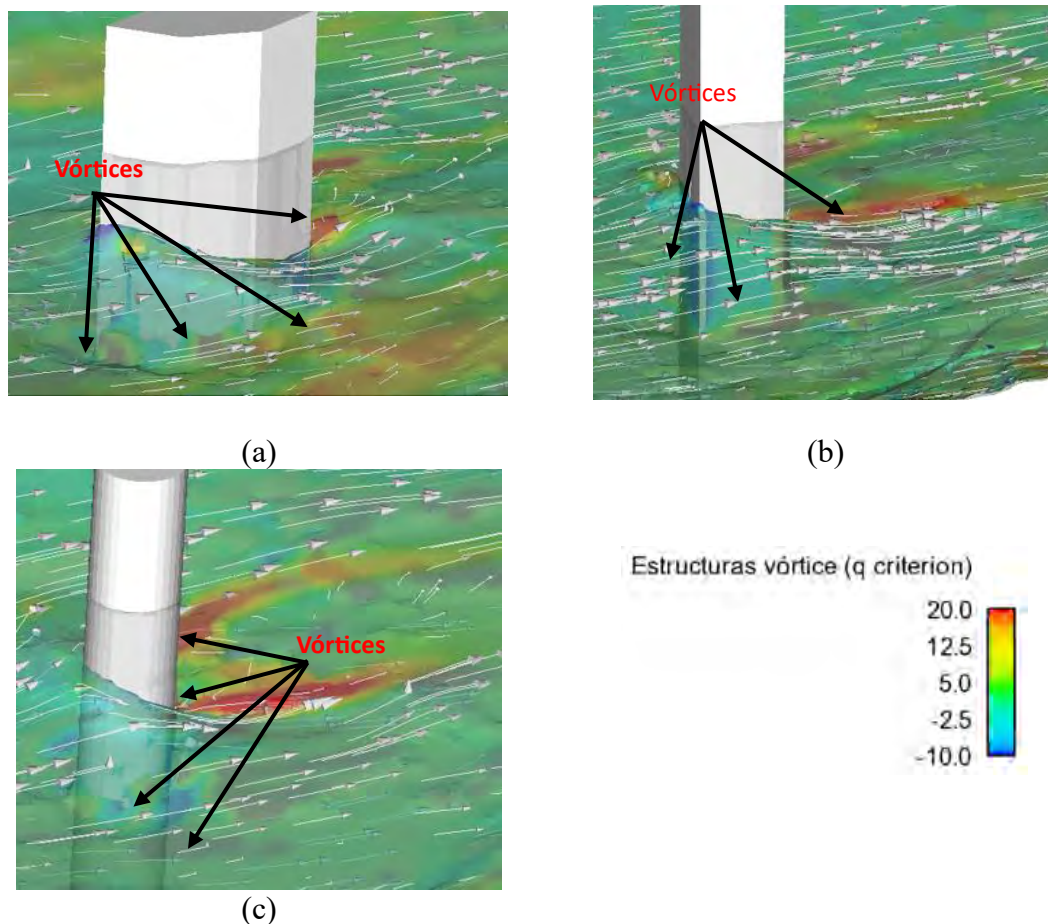


Figura 4.6. Estructuras vórtice en pilas lisas aisladas a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección rectangular y c) pila de sección circular.

Adicionalmente, la Figura 4.7 exhibe la distribución de la energía cinética de turbulencia en las diversas secciones de la pila, siendo esta energía un factor determinante en la formación de los vórtices de herradura alrededor de las pilas. Se aprecia que la pila de sección hidrodinámica presenta la menor energía cinética de turbulencia, lo que indica una mayor capacidad de disipación en comparación con las otras configuraciones de pilas.

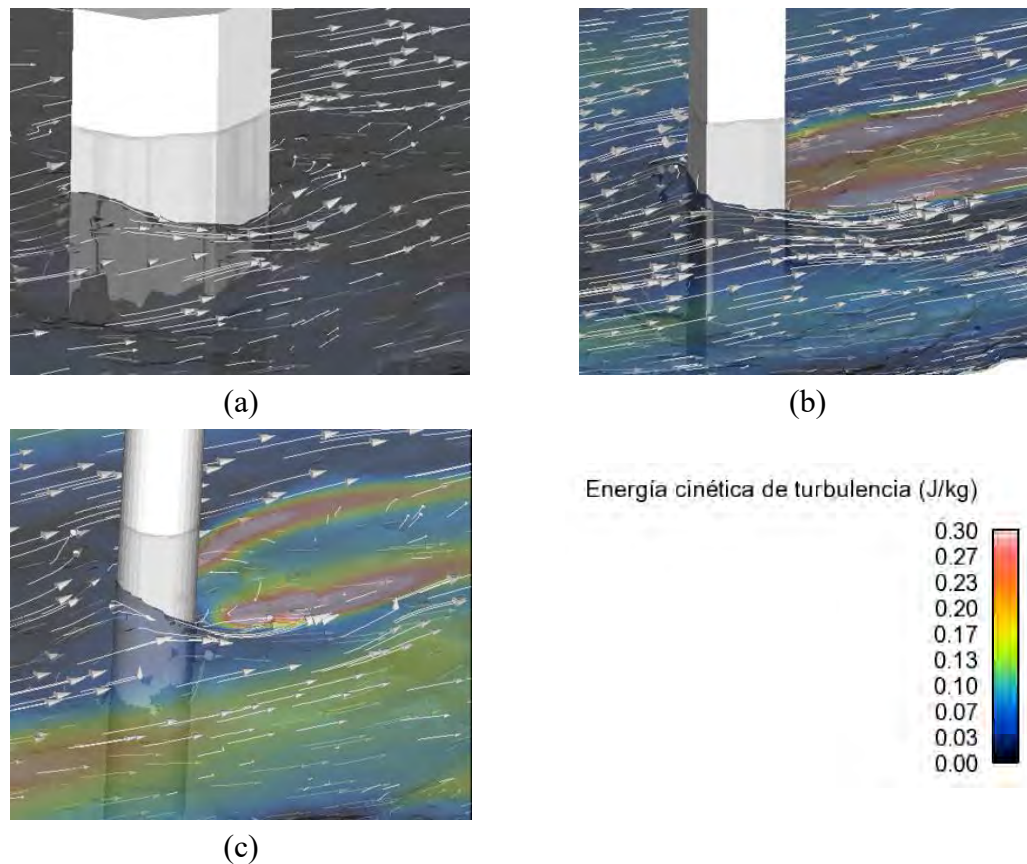


Figura 4.7. *Energía Cinética de turbulencia alrededor de la pila; a) sección hidrodinámica, b) sección rectangular y c) sección circular.*

4.1.2 Análisis hidrodinámico de pilas lisas en grupo.

En esta sección, se presenta el análisis del comportamiento de los campos de flujo en escenarios que involucran pilas dispuestas en grupo con diversas configuraciones. La disposición de estas pilas tiene un impacto significativo en la distribución de la velocidad del flujo. Por ende, se exponen los resultados de la exploración de estas interacciones, con un enfoque particular en comprender la influencia colectiva de pilas con acabado liso. Este análisis se estructura por sección transversal, dividiéndose en tres apartados que se presentan a continuación.

a) Grupo de pilas con sección circular

Se lleva a cabo una comparación detallada de las características del flujo, poniendo énfasis en dos variables fundamentales: velocidad y vorticidad en un conjunto de tres pilas de sección circular con distintas separaciones. La Figura 4.8 presenta un análisis comparativo de la velocidad del flujo alrededor de este grupo de pilas de sección circular, considerando diferentes separaciones: $S1=1.2$ m, $S2=3.6$ m y $S3=6.0$ m.

En la Figura 4.8a, se destaca que la proximidad entre las pilas genera una obstrucción significativa del flujo, resultando en una región de alta fluctuación en la velocidad entre ellas. Este escenario contrasta con las configuraciones de separación más amplia, como se observa en las figuras 4.8b y 4.8c. En la Figura 4.8b, la separación intermedia reduce la interferencia en el flujo, permitiendo una circulación más fluida entre las pilas, aunque persiste cierta influencia de las pilas anteriores en el desarrollo de las estelas. Finalmente, en la Figura 4.8c, correspondiente a la separación máxima entre pilas, se aprecia una notable reducción en la interferencia y perturbación de la velocidad entre las pilas en comparación con las configuraciones anteriores.

En resumen, a medida que se incrementa la separación entre pilas, la velocidad del flujo experimenta menos perturbaciones, aproximándose al comportamiento observado en un escenario con una pila aislada. Este fenómeno resulta en que la primera pila tenga la mayor zona de recirculación, mientras que en las pilas subsecuentes la extensión de estas zonas disminuye, con una formación de vórtices reducida, según se indica por las trayectorias del flujo. En este contexto, se sugiere que la disposición de una pila de sacrificio ideal correspondería a la configuración representada por S3.

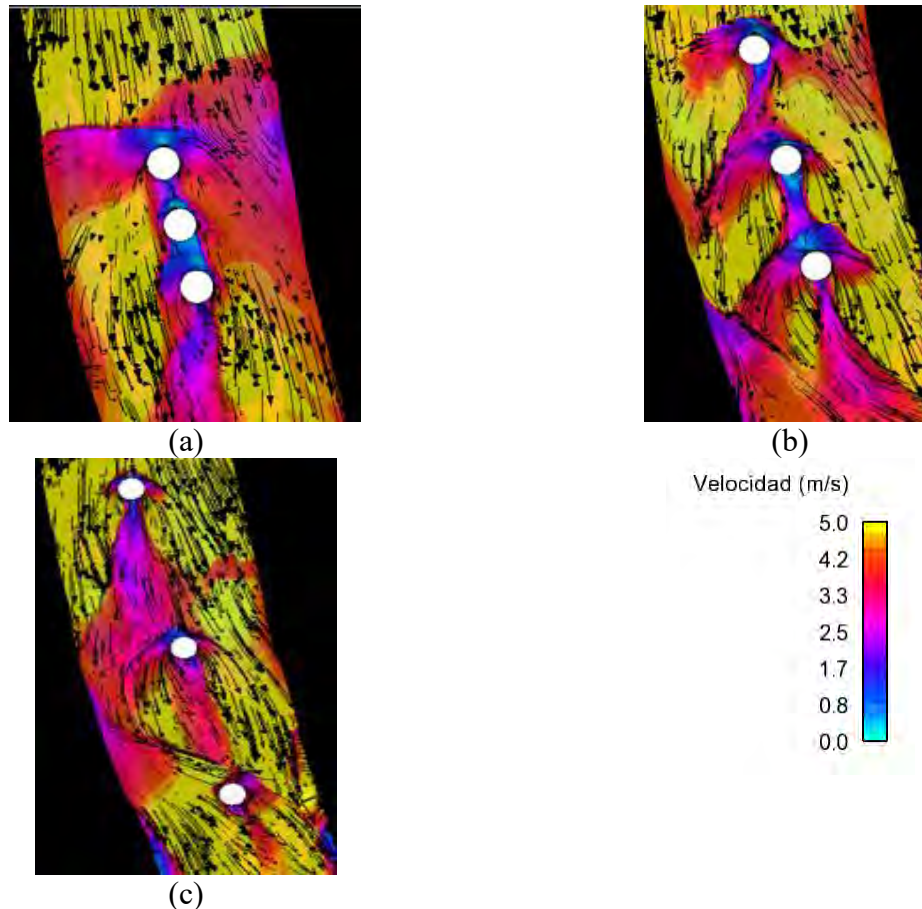


Figura 4.8. *Velocidad para grupo de pilas de sección circular lisa con diferente separación; a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.2$ m, c) Separación $S3=6.0$ m.*

La Figura 4.9 muestra una comparativa de la distribución de la energía cinética de turbulencia en un conjunto de pilas de sección circular lisas con diferentes separaciones: $S1$, $S2$ y $S3$. En la Figura 4.9a, se destaca que la energía cinética se concentra alcanzando valores más altos en la proximidad entre las pilas, con un promedio de 0.0030 J/kg. La cercanía entre las pilas impide la disipación de esta variable, concentrando la energía en la zona donde se encuentran las tres pilas. En contraste, en las separaciones $S2$ y $S3$ (Figuras 4.9b y 4.9c), se favorece la disipación de la energía a medida que se desarrollan las estelas de turbulencia, mostrando una distribución similar en ambas configuraciones.

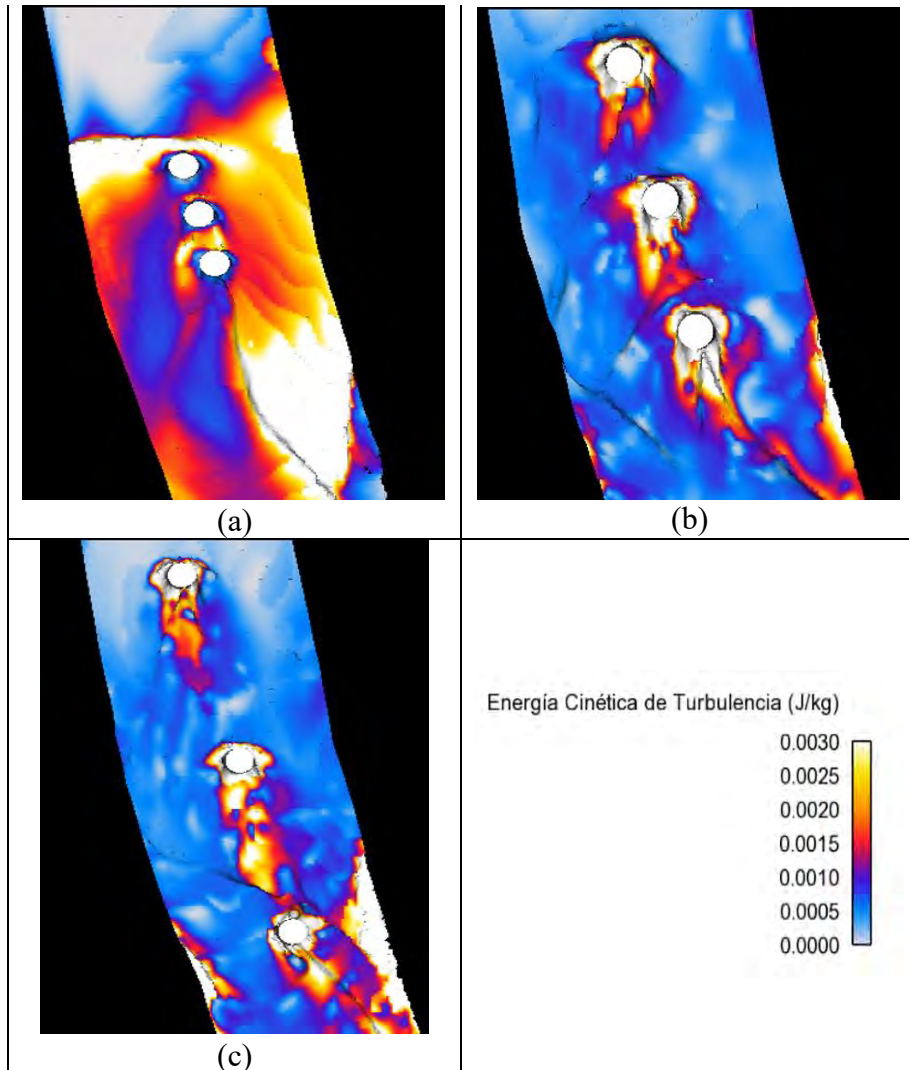


Figura 4.9. *Energía cinética de turbulencia en grupo de pila de sección circular; a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m, c) Separación $S3=6.0$ m.*

Por otro lado, la Figura 4.10 presenta un comparativo de la distribución de vorticidad provocada por el grupo de pilas de sección circular con diferentes separaciones: $S1$, $S2$ y $S3$. En esta representación, el color rojo indica rotación en sentido positivo, mientras que el azul rotación en sentido negativo. La Figura 4.10a, asociada a la más estrecha separación entre pilas provoca una significativa interferencia, generando una mayor cantidad de vórtices alrededor de las pilas y por ende, una mayor vorticidad en la zona.

En contraste, la Figura 4.10b muestra vórtices con menor intensidad y amplitud. Por último, la Figura 4.10c con una amplia separación que minimiza la interacción longitudinal del flujo entre las pilas. Ambas figuras revelan la influencia crítica de la separación entre pilas en la distribución de energía cinética y vorticidad, aspectos fundamentales para comprender la complejidad de la interacción fluido-estructura en el entorno de pilas de sección circular. La proximidad entre pilas intensifica los fenómenos turbulentos, aumentando la concentración de energía y la vorticidad. En contraste, mayores separaciones permiten una disipación más efectiva de la energía, resultando en vórtices de menor intensidad y una dinámica de flujo más estable. Estos hallazgos ofrecen indicios valiosos para el diseño y la gestión de infraestructuras, destacando la importancia de considerar esta influencia hidrodinámica en la configuración de pilas de puentes.

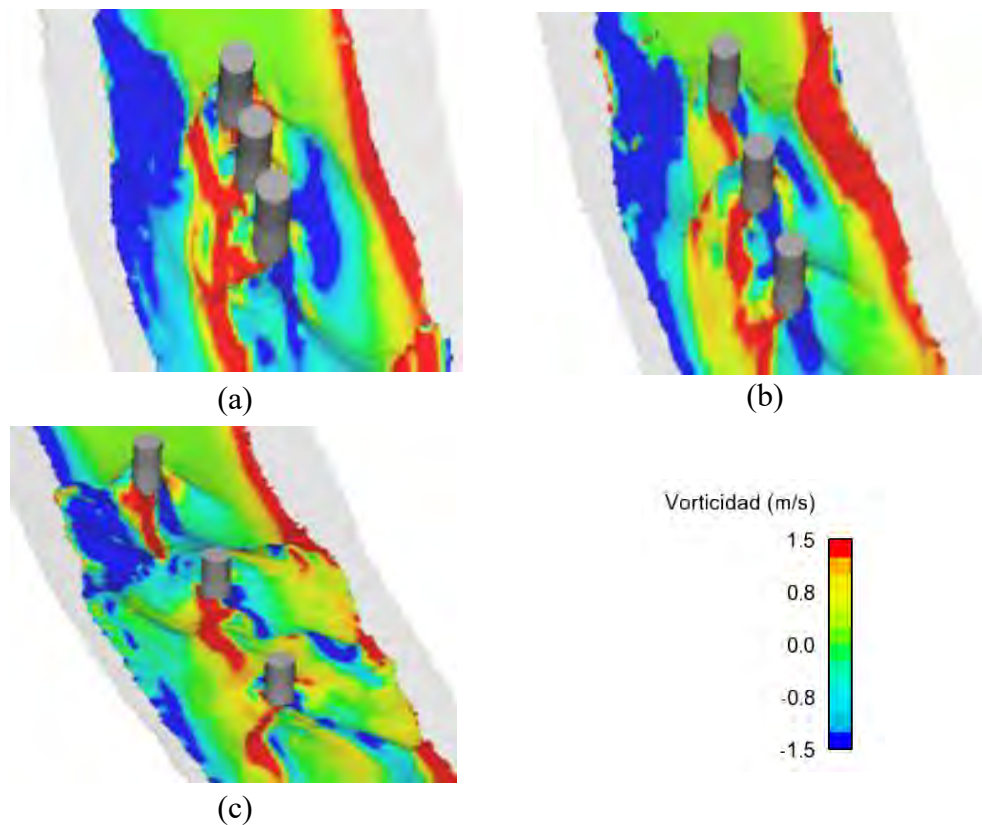


Figura 4.10. Vorticidad para grupo de pilas de sección circular con diferente separación; a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m, c) Separación $S3=6.0$ m.

La figura 4.11 muestra una visualización detallada de las trayectorias del flujo alrededor de las pilas, destacando especialmente la recirculación del flujo para cada separación (S1, S2 y S3). Esta representación refleja de manera gráfica la influencia directa de la separación entre pilas, la cual está estrechamente vinculada con la distribución en la velocidad y la energía cinética de turbulencia, como se observa en las Figuras 4.9 y 4.10.

En concordancia con los hallazgos anteriores, se evidencia que la proximidad entre pilas, representada en la configuración S1, genera una recirculación más pronunciada del flujo, concordando con la mayor concentración de energía cinética y vorticidad observada en la Figura 4.9a y 4.10a.

Por otro lado, en la configuración S3, con una separación más amplia, se visualiza una recirculación menos intensa, alineándose con la menor concentración de energía y vorticidad, como se muestra en la Figura 4.9c y 4.10c. Estos resultados reafirman la importancia crítica de la separación entre pilas en la configuración de los patrones de flujo y la dinámica de turbulencia, proporcionando una visión integral de la interacción fluido-estructura en entornos de grupos de pilas de sección circular.

En la Figura 4.12 se observa el movimiento del flujo alrededor de las pilas de sección circular, se aprecia que el choque de flujo entre pilas manifiesta un movimiento caótico del flujo, lo que se traduce en la formación de vórtices. Estos hallazgos subrayan la significativa influencia de la separación entre pilas en la dinámica del flujo, afectando la formación de vórtices y la estabilidad del entorno alrededor de las pilas de sección circular con diferente separación.

b) Grupo de pilas de sección rectangular

En esta sección, se presentan los resultados correspondientes a los escenarios de un grupo de tres pilas de sección rectangular con diferentes separaciones (S1=1.0 m, S2=3.0 m, S3=5.0 m).

La Figura 4.13 ofrece una comparación detallada de la velocidad del flujo alrededor de dicho grupo, evidenciando una marcada obstrucción en el flujo debido a la estrecha separación entre las pilas. Este fenómeno genera fluctuaciones significativas en la velocidad, afectando las pilas subsiguientes y propagando la estela del flujo hacia ellas, lo que incide en el desarrollo del campo de flujo.

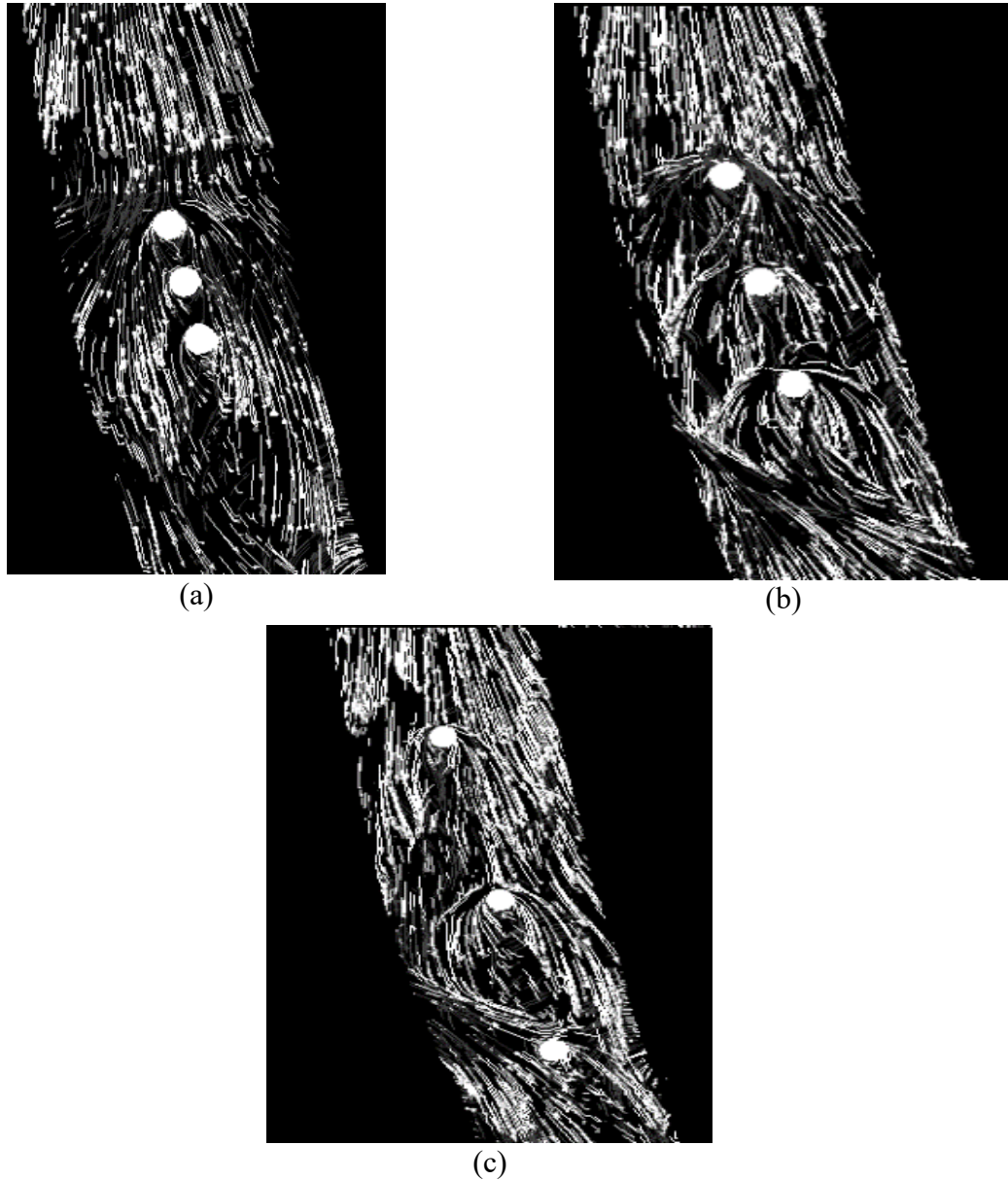


Figura 4.11. Zonas de recirculación de flujo en pilas agrupadas de sección circular lisa; a) Separación $S_1=1.2$ m, b) Separación $S_2=3.6$ m, c) Separación $S_3=6.0$ m.

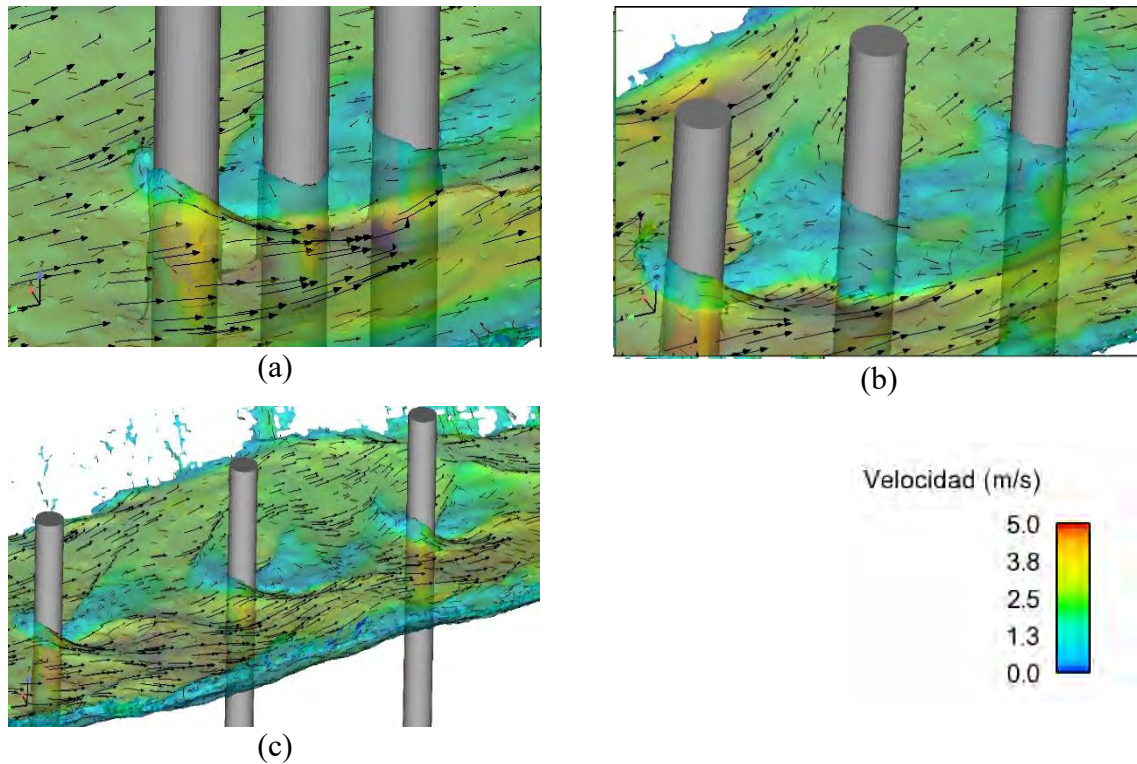


Figura 4.12. Trayectorias de flujo en pilas de sección circular lisa; a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m, c) Separación $S3=6.0$ m.

La sección transversal de este conjunto de pilas ocasiona estelas de turbulencia de mayor dimensión, lo que implica que, incluso con el aumento de la distancia entre pilas hasta $S3$, persiste una interferencia que obstaculiza el completo desarrollo de la estela. Además, se observa un impacto notable en las tres pilas, donde la primera experimenta una fuerte zona de fluctuación que se atenúa en las pilas siguientes. Este análisis proporciona una comprensión detallada de cómo la separación entre pilas influye en la interacción del flujo y la generación de estelas de turbulencia en este contexto específico.

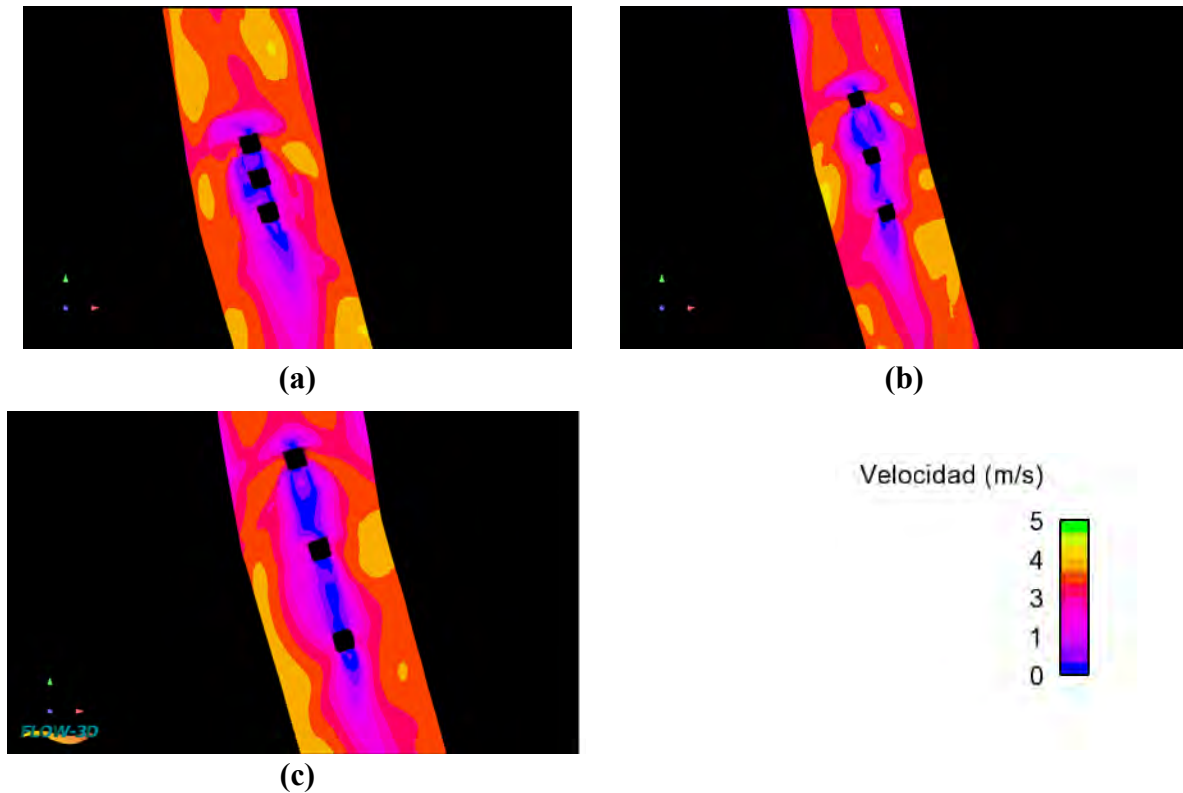


Figura 4.13. *Velocidad para grupo de pilas de sección rectangular lisa con diferente separación; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m, c) Separación $S3=5.0$ m.*

La Figura 4.14 presenta la distribución de la vorticidad generada por el grupo de pilas de sección rectangular con diferentes separaciones. Se observa que el punto de separación permanece constante en la parte posterior al eje de las pilas en las tres configuraciones, y en cada separación se genera una secuencia de vórtices estela cuya estructura se refleja en las trayectorias del flujo. Además, se identifican áreas de alta recirculación del flujo, tanto en sentido positivo como negativo, a los costados de las pilas, favoreciendo el desarrollo de vórtices en el conjunto del campo de flujo.

Por otro lado, en la Figura 4.15 se destaca que la rotación del flujo también ocurre en la parte frontal de las pilas, en una dirección descendente (vórtice herradura), y se desarrolla cerca del lecho como resultado del choque entre las pilas.

Este comportamiento es consistente en las tres separaciones analizadas, lo que sugiere que la configuración de las pilas de sección rectangular influye en la formación y extensión de vórtices, tanto alrededor de las pilas como en las zonas adyacentes al lecho. Estos hallazgos proporcionan una comprensión más completa de los efectos hidrodinámicos en el entorno de las pilas de sección rectangular y su interacción con el flujo circundante. En la misma línea, la figura 4.16 proporciona un análisis detallado de la distribución en la energía cinética de turbulencia en grupos de pilas de sección rectangular con diferentes separaciones: S1, S2 y S3. En la configuración S1 (Figura 4.16a), la energía cinética experimenta un aumento a valores medios (0.2-0.25 J/Kg) a un costado del grupo de pilas a partir de la primera pila y aguas abajo de la tercera pila. Entre las pilas, se registran valores bajos de energía cinética (0.075 J/Kg).

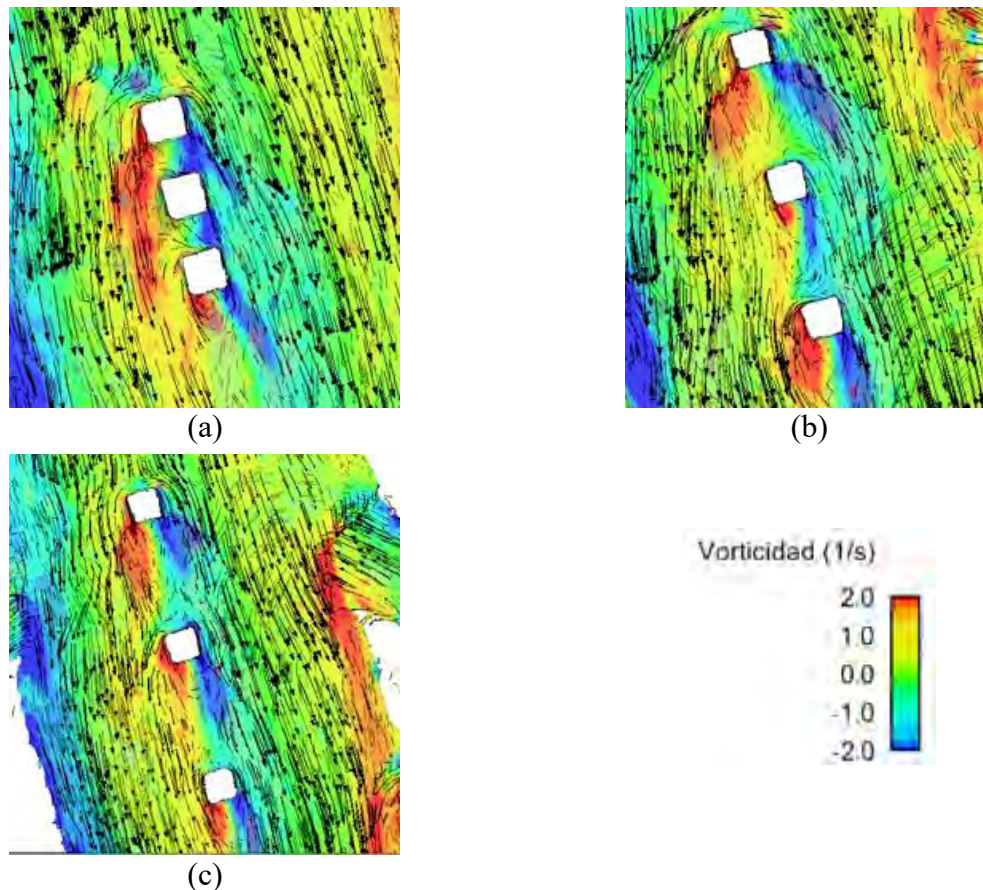


Figura 4.14. Vorticidad y separación del flujo en un grupo de pilas de sección rectangular con diferente separación; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m, c) Separación $S3=5.0$ m.

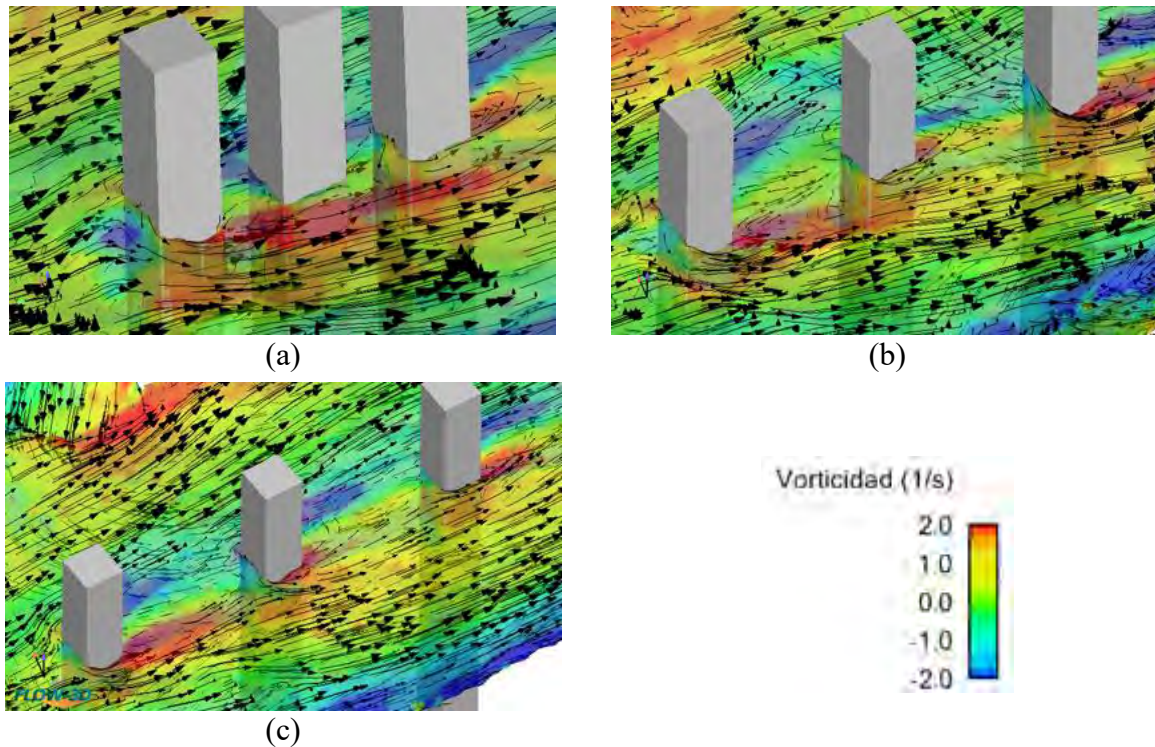


Figura 4.15. *Vorticidad y descensos de flujo en un grupo de pilas de sección rectangular con diferente separación; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m, c) Separación $S3=5.0$ m.*

En la disposición S2 (Figura 4.16b), aguas abajo de la primera pila, se observan valores altos de energía (0.25-0.3 J/Kg) que disminuyen a valores medios (0.2-0.25 J/Kg) al entrar en la influencia de la pila central. Aguas arriba y abajo de la tercera pila, nuevamente se registran valores altos de energía. En cuanto a la configuración S3 (Figura 4.16c), entre las separaciones de las pilas, se manifiestan valores medios de energía (0.20-0.25 J/Kg), y se observan valores altos (0.25-0.3 J/Kg) cuando el flujo impacta en la tercera pila y aguas abajo de esta.

Por otro lado, la Figura 4.17 presenta las zonas de recirculación del flujo generadas por el grupo de pilas de sección rectangular con diferentes separaciones. Estas áreas de recirculación se manifiestan aguas debajo de cada pila, contribuyendo así a la comprensión de la dinámica del flujo y su interacción con la configuración específica de las pilas de sección rectangular.

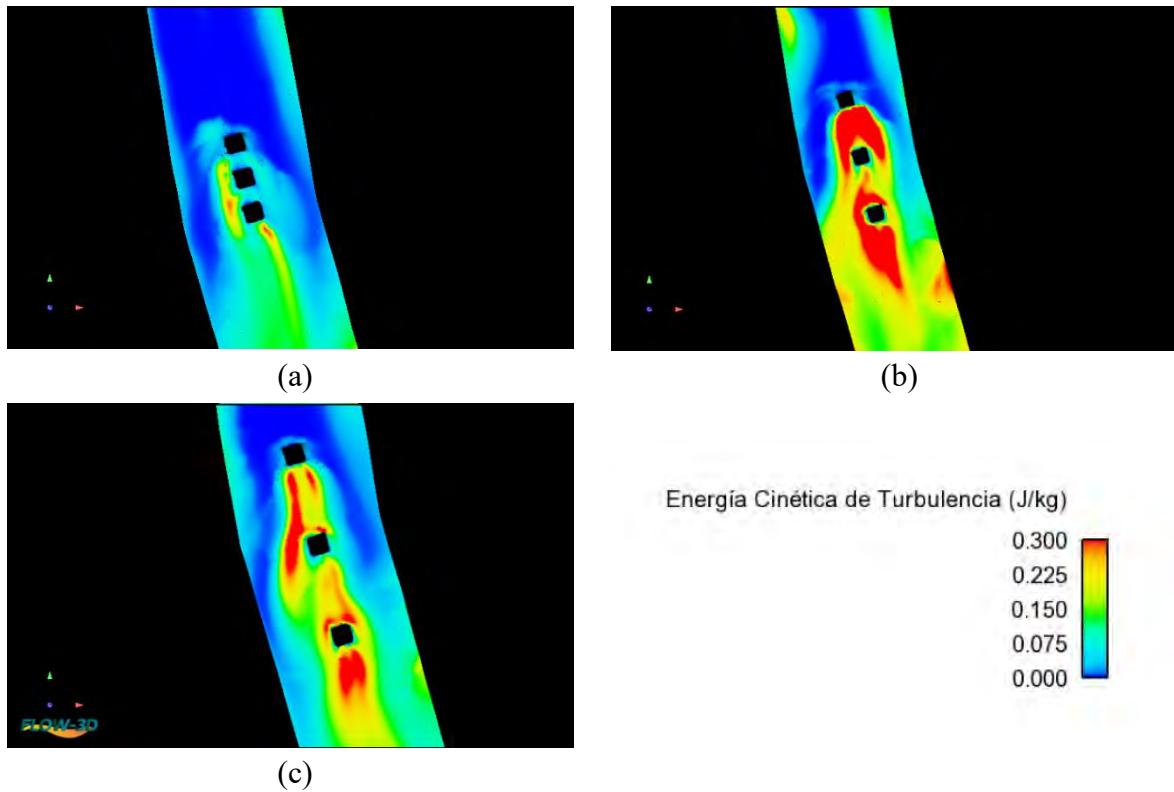


Figura 4.16. Energía Cinética de turbulencia en un grupo de pilas de sección rectangular lisa con diferente separación; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m, c) Separación $S3=5.0$ m.

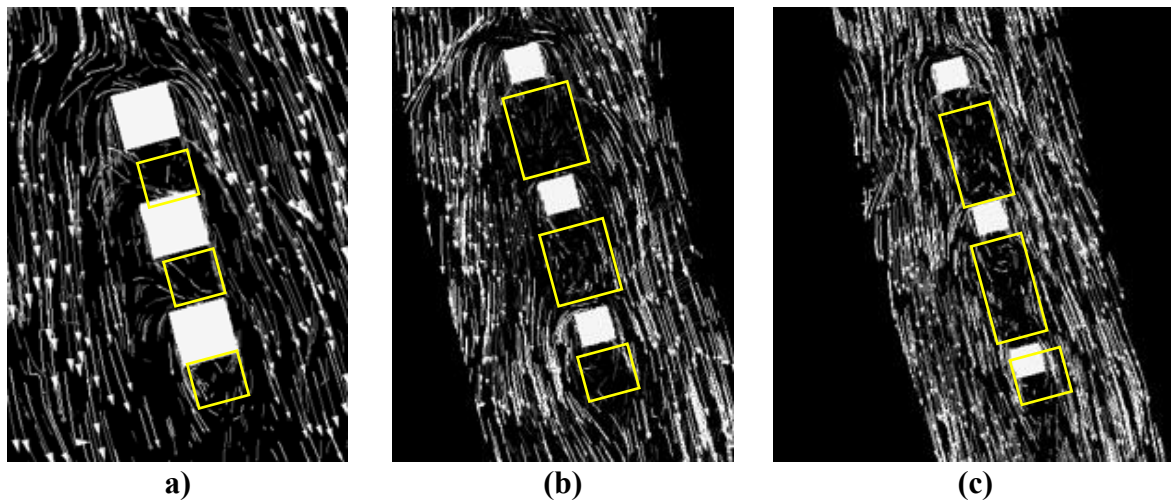


Figura 4.17. Recirculación del flujo en un grupo de pilas de sección rectangular con diferente separación; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m, c) Separación $S3=5.0$ m.

c) Grupo de pilas con sección hidrodinámica.

En concordancia con los grupos de pilas previos, se analiza el comportamiento de la velocidad del flujo para la pila con sección hidrodinámica en diferentes separaciones ($S1=1.8$ m, $S2=5.4$ m, $S3=9.0$ m). La Figura 4.18 ilustra los campos de velocidad alrededor de las pilas, evidenciando que la mayor velocidad se registra a los costados de la primera pila en las tres separaciones.

En el caso de la separación $S1$ (Figura 4.18a), se observan zonas de baja velocidad entre las pilas. Para la configuración de separación $S2$ (Figura 4.18b), una mayor distancia entre pilas reduce la interferencia en la velocidad del flujo y fomenta una mayor circulación entre ellas, en comparación con la separación $S1$ (Figura 4.18a).

En cuanto a la separación $S3$ (Figura 4.18c), la amplia distancia entre pilas provoca una mayor circulación del flujo, destacando el impacto significativo de las separaciones en la modificación del campo de flujo alrededor de los pilares. A medida que se incrementa la separación entre pilas, la velocidad del flujo tiende a sufrir menos fluctuación por la presencia de las pilas, aproximándose al comportamiento de una pila aislada.

La Figura 4.19 revela el desprendimiento y la formación de estructuras vórtice al producirse el choque con las pilas, dando lugar a una recirculación del flujo. El color azul indica una rotación del flujo en sentido negativo. Se observa una mayor recirculación en sentido positivo en las pilas con separación $S1$, lo que conlleva a una recirculación más intensa en sentido negativo, impactando directamente en la generación y eventual aceleración de vórtices.

En contraste, cuando la separación entre pilas aumenta, como se evidencia en la Figura 4.19 con respecto a las separaciones $S2$ y $S3$, se observa una disminución tanto en las recirculaciones positivas como negativas. Sin embargo, es importante destacar que, a medida que la separación entre pilas disminuye, las zonas de recirculación del flujo tienden a aumentar. Esto se debe al incremento de la velocidad en las áreas cercanas a las pilas, resultado de la reducción del área hidráulica disponible.

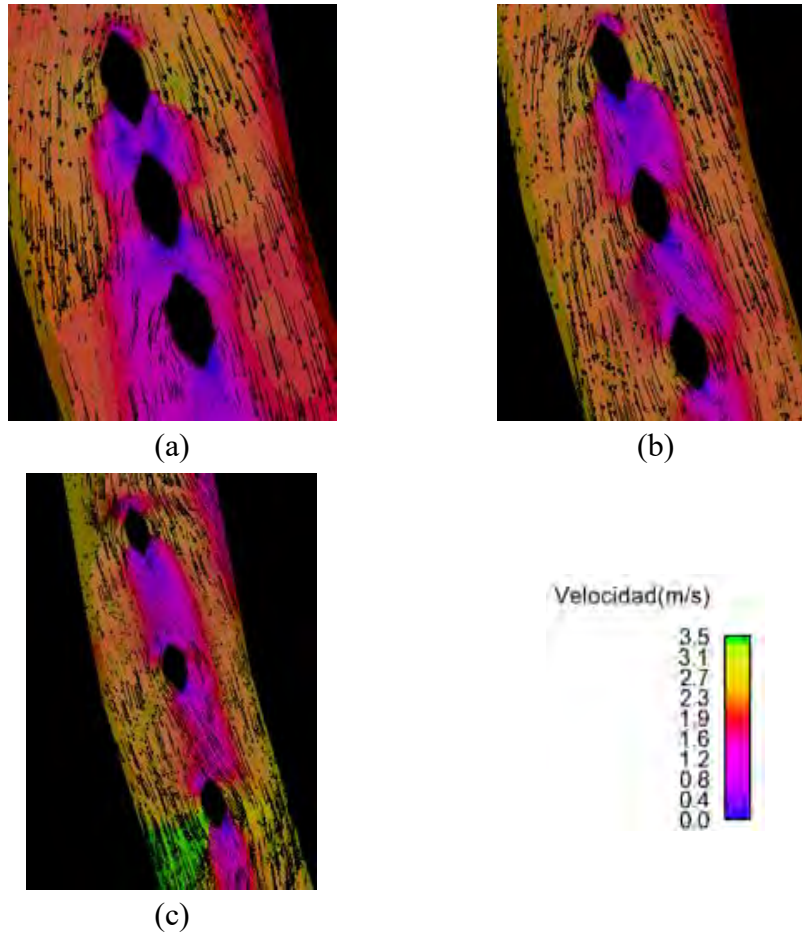


Figura 4.18. Velocidad del flujo en grupo de pilas de sección hidrodinámica lisa con diferente separación; a) Separación $S1=1.8m$, b) Separación $S2=5.4 m$, c) Separación $S3=9.0 m$.

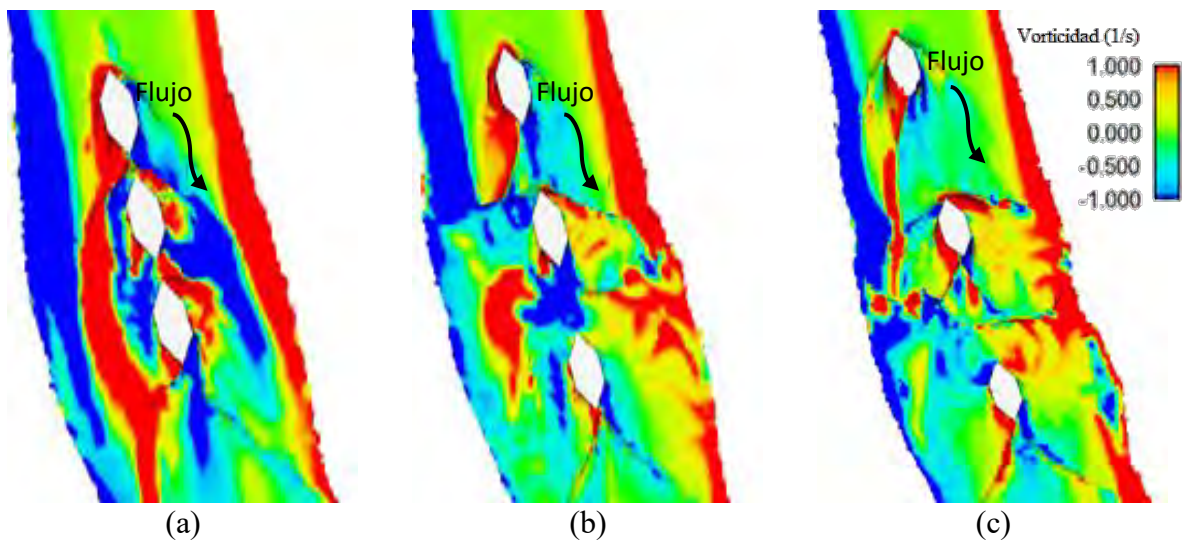


Figura 4.19. Vorticidad en grupo de pilas de sección hidrodinámica con diferente separación; a) Separación $S1=1.8 m$, b) Separación $S2=5.4 m$ y c) Separación $S3=9.0 m$.

En la Figura 4.20 se observa la distribución de la energía cinética de turbulencia en el grupo de pilas de sección hidrodinámica con distintas separaciones, resaltando las áreas de mayor y menor energía cinética a través de la escala de colores. En el caso de la separación S1 (Figura 4.20a), se observan regiones de alta energía cinética en los laterales entre las pilas. En la S2 (Figura 4.20b), se destaca un área de mayor energía cinética en la parte inferior derecha de la primera pila, que impacta en la segunda pila; aunque esta zona de alta energía cinética es menor en la segunda pila y no llega a afectar a la tercera pila.

En cuanto a la separación S3, se aprecia una extensa área de alta energía cinética detrás de la última pila, siendo la tercera pila de la S3 la que exhibe la mayor concentración de energía cinética y, por ende, se ve más afectada. Esta concentración de energía influye en la generación de vórtices aguas debajo de la última pila, presentando un valor de energía cinética de 0.10 J/kg.

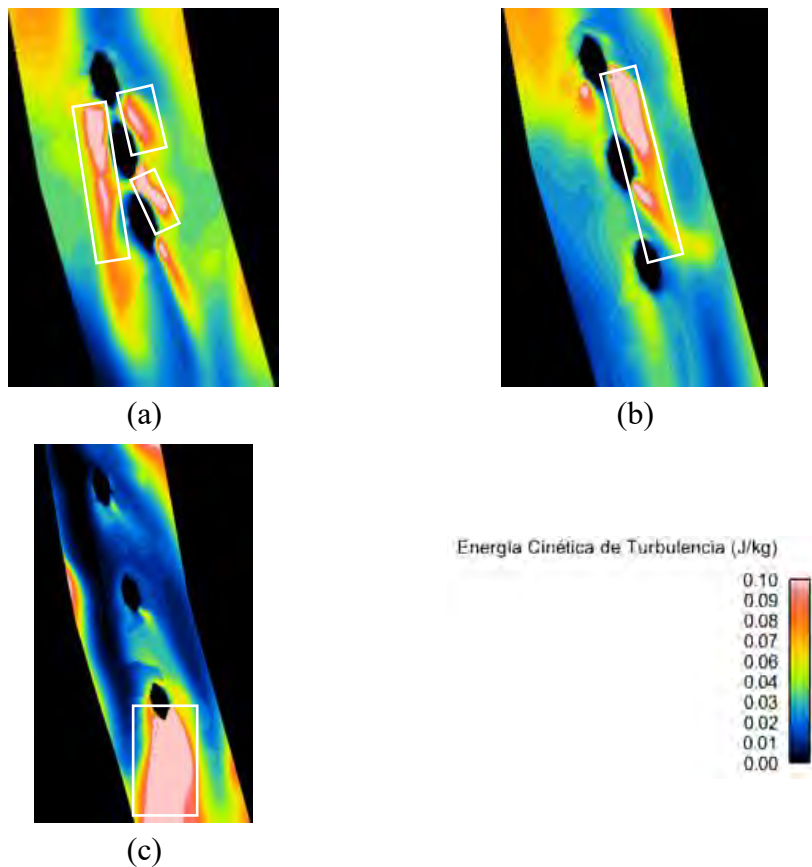


Figura 4.20. *Energía Cinética de turbulencia de un grupo de pilas de sección hidrodinámica con diferente separación; a) Separación S1=1.8 m, b) Separación S2=5.4 m y c) Separación S3=9.0 m.*

En la Figura 4.21 se observa el comportamiento del flujo alrededor de las pilas, destacando la recirculación del flujo para cada separación y demostrando la influencia de la distancia entre pilas. En el caso de la S1 (Figura 4.21a), se generan zonas de recirculación entre las pilas. Para la S2 (Figura 4.21b), solo se observa una zona de circulación aguas abajo de la primera pila. En cuanto a la S3 (Figura 4.21c), con una separación de 9 metros entre pilas, se genera una extensa área de recirculación entre la Pila 1 y la Pila 2, y también aguas abajo de la última pila, siendo la S3 la que proporciona áreas de recirculación del flujo más extensas

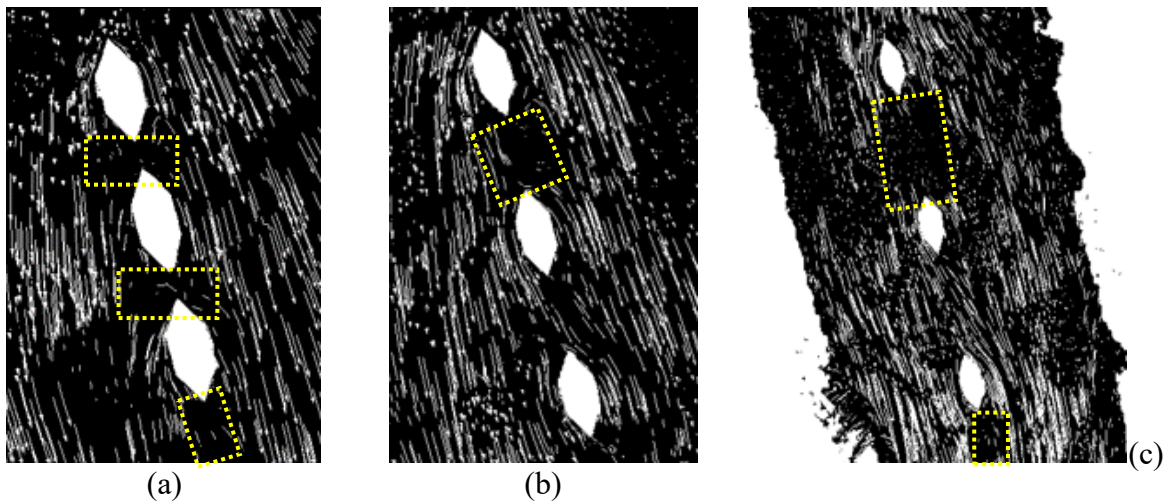


Figura 4.21. Zonas de recirculación del flujo en un grupo de pilas de sección hidrodinámica con diferente separación; a) Separación $S1=1.8$ m, b) Separación $S2=5.4$ m y c) Separación $S3=9.0$ m.

4.1.3 Análisis hidrodinámico de pilas aisladas con acabado hexagonal.

En la Figura 4.22 se presenta una comparación detallada de la distribución de velocidad en varias secciones de la pila. Es evidente que, aguas abajo de las pilas, las velocidades disminuyen significativamente debido al efecto del acabado superficial en las pilas, que actúa como un disipador de la energía del flujo.

Este fenómeno influye directamente en la recirculación del flujo, como se visualiza en la Figura 4.23. Al examinar esta figura, se destaca que al frente de la pila no se observa recirculación del flujo.

La representación cromática muestra en rojo la recirculación en sentido positivo y en azul la recirculación en sentido negativo. Estos resultados indican que los casquetes desempeñan un papel crucial al mitigar los efectos del flujo en la recirculación, afectando así la formación de vórtices.

En la figura 4.24, se visualiza la distribución de la vorticidad en la parte trasera de la pila, destacando una significativa recirculación del flujo. Este fenómeno evidencia el desprendimiento de vórtices en los laterales de las pilas, manifestando la rotación del flujo en sentido positivo (rojo) y negativo (azul). Es notable la mayor intensidad y longitud de la recirculación en sentido negativo, sugiriendo una mayor complejidad en la dinámica del flujo en esa dirección.

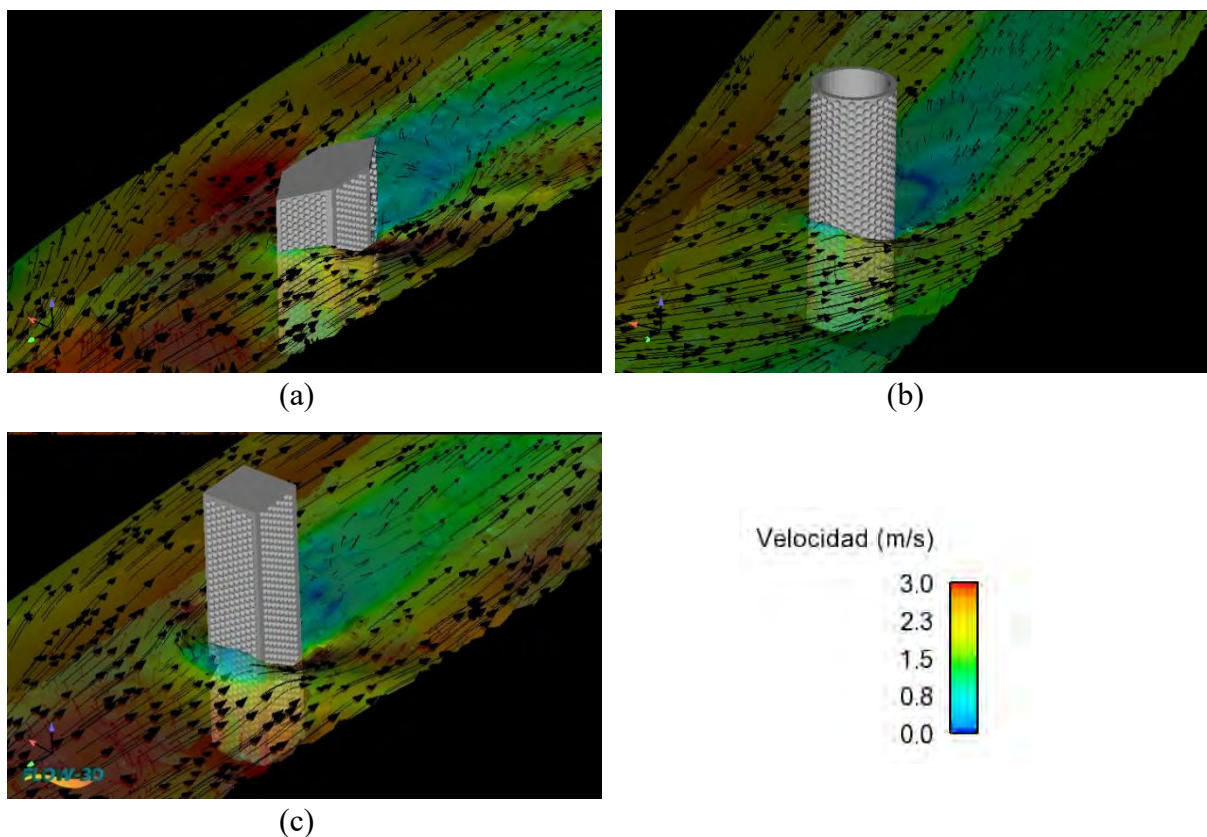


Figura 4.22. Comportamiento de la velocidad; a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección circular y c) pila de sección rectangular.

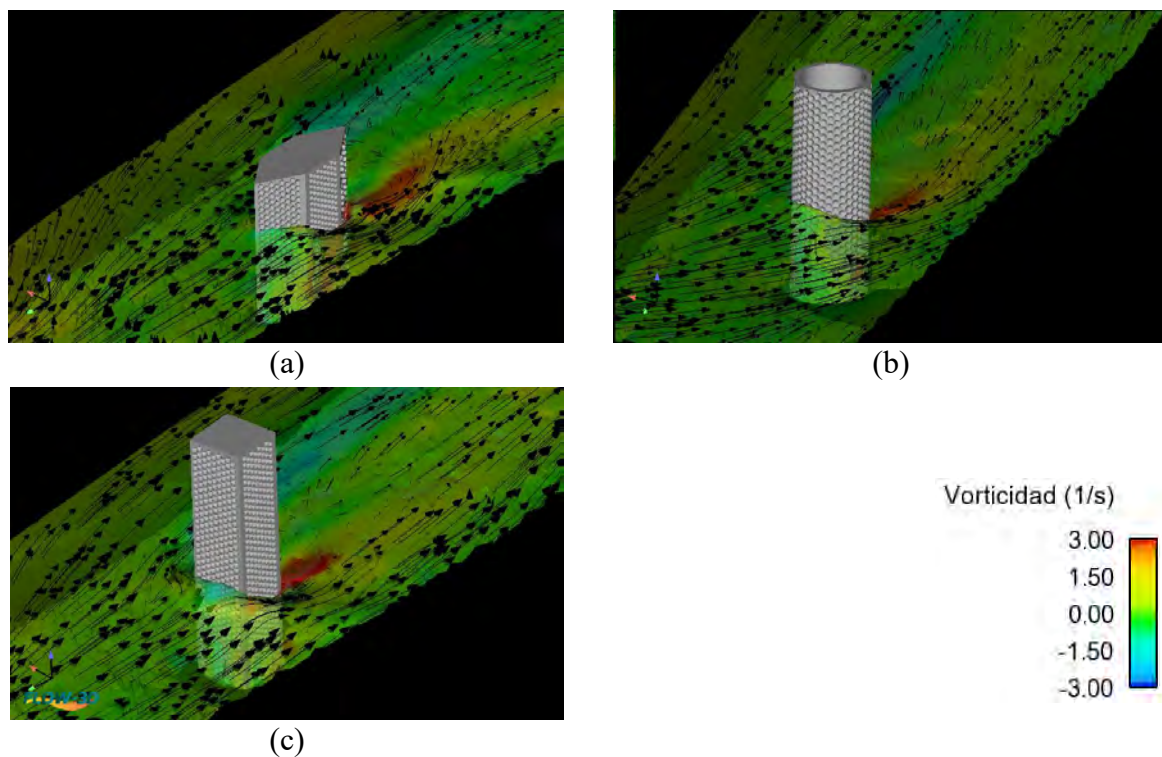


Figura 4.23. Vorticidad en pilas con acabado (parte frontal); a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección circular y c) pila de sección rectangular.

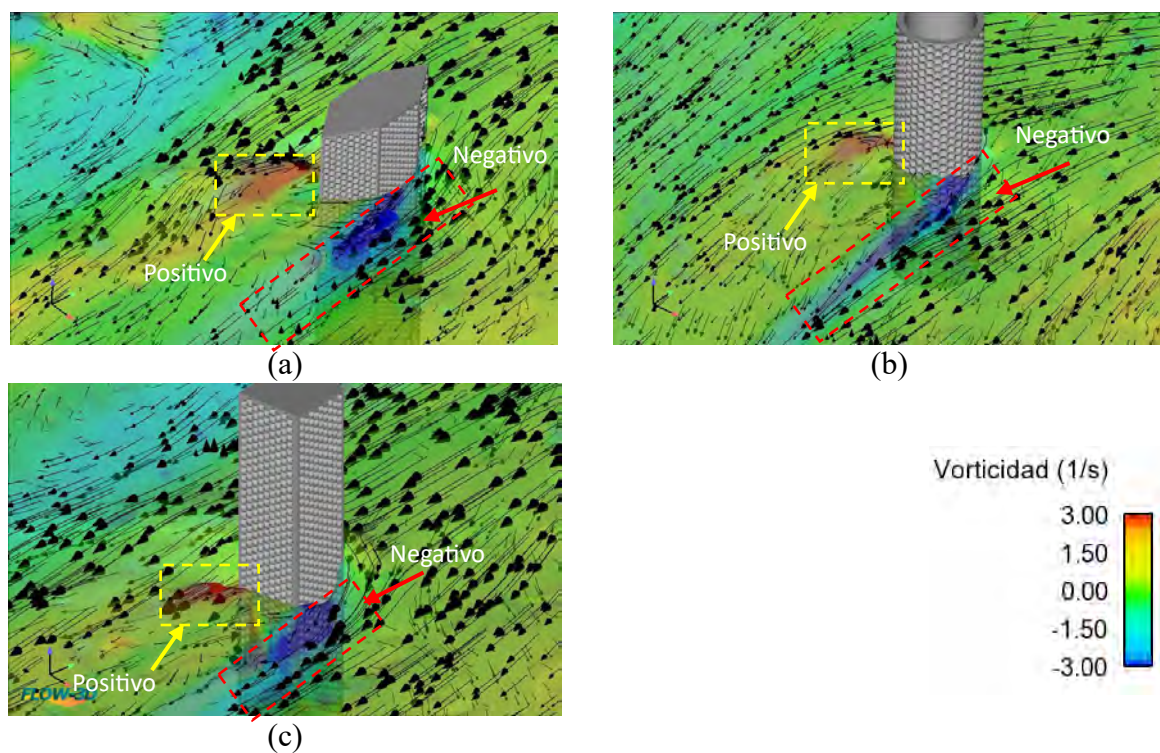


Figura 4.24. Vorticidad en pilas con acabado hexagonal (parte posterior); a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección circular y c) pila de sección rectangular.

4.1.4 Análisis hidrodinámico de pilas en grupo con acabado hexagonal.

En esta sección de resultados, se presentan los hallazgos del análisis hidrodinámico de pilas en grupo con acabado hexagonal que revelan patrones interesantes en la interacción del flujo. Donde la disposición hexagonal juega un papel crucial en la mitigación de la resistencia al flujo e impacta en las áreas de recirculación, destacando la eficacia de este diseño para reducir la formación de vórtices y minimizar la interferencia entre las pilas.

Además, la energía cinética de turbulencia presenta variaciones significativas, ofreciendo percepciones clave sobre la eficiencia hidráulica de las pilas hexagonales en comparación con el acabado liso convencional. Estos resultados proporcionan una base sólida para la comprensión de la dinámica del flujo en grupos de pilas con acabado hexagonal para su presentación se integran 3 apartados que corresponden a las diferentes secciones transversales.

a) Grupo de pilas con sección circular

La figura 4.25 detalla el comportamiento de la vorticidad en un grupo de pilas con sección circular y acabado hexagonal, proporcionando una visión esclarecedora sobre la interacción del flujo y el lecho del cauce. En la configuración con una separación S1 (figura 4.25a), se destaca una vorticidad significativa, con valores cercanos a 2 (1/s) en el costado de la primera pila, impactando en la pila subsiguiente. Sin embargo, esta vorticidad decrece al llegar a la última pila, indicando una disminución de su influencia. En el escenario con separación S2 (figura 4.25b), las estelas de turbulencia muestran una notable reducción en comparación con S1. Por último, en la configuración con separación S3 (figura 4.25c), se evidencia que estela de turbulencia decrece aún más que en el caso de S2.

Estos resultados apuntan a una conclusión fundamental: la separación entre pilas, combinada con el acabado superficial, desempeña un papel crucial en la formación de vórtices. Se observa que distancias más cortas entre pilas generan una mayor vorticidad, subrayando la importancia de considerar estos factores en el diseño de estructuras hidráulicas para optimizar la eficiencia y minimizar perturbaciones en el flujo.

Por otro lado, la figura 4.26 ofrece una visión reveladora de la concentración de energía cinética de turbulencia en el entorno de grupos de pilas con sección circular. En este análisis, los tonos cercanos al rojo indican áreas de alta concentración de energía cinética, revelando zonas propicias para la formación de vórtices debido a la influencia de un flujo caótico en esa región específica. Al observar las tres separaciones analizadas, se destaca que la pila frontal exhibe una concentración de energía cinética de turbulencia que oscila entre 0 y 0.13 (J/kg). Este fenómeno sugiere una correlación directa entre la intensidad de la energía cinética y la formación de vórtices, destacando la importancia de comprender estos patrones para optimizar el diseño y rendimiento de los acabados como mecanismos de protección.

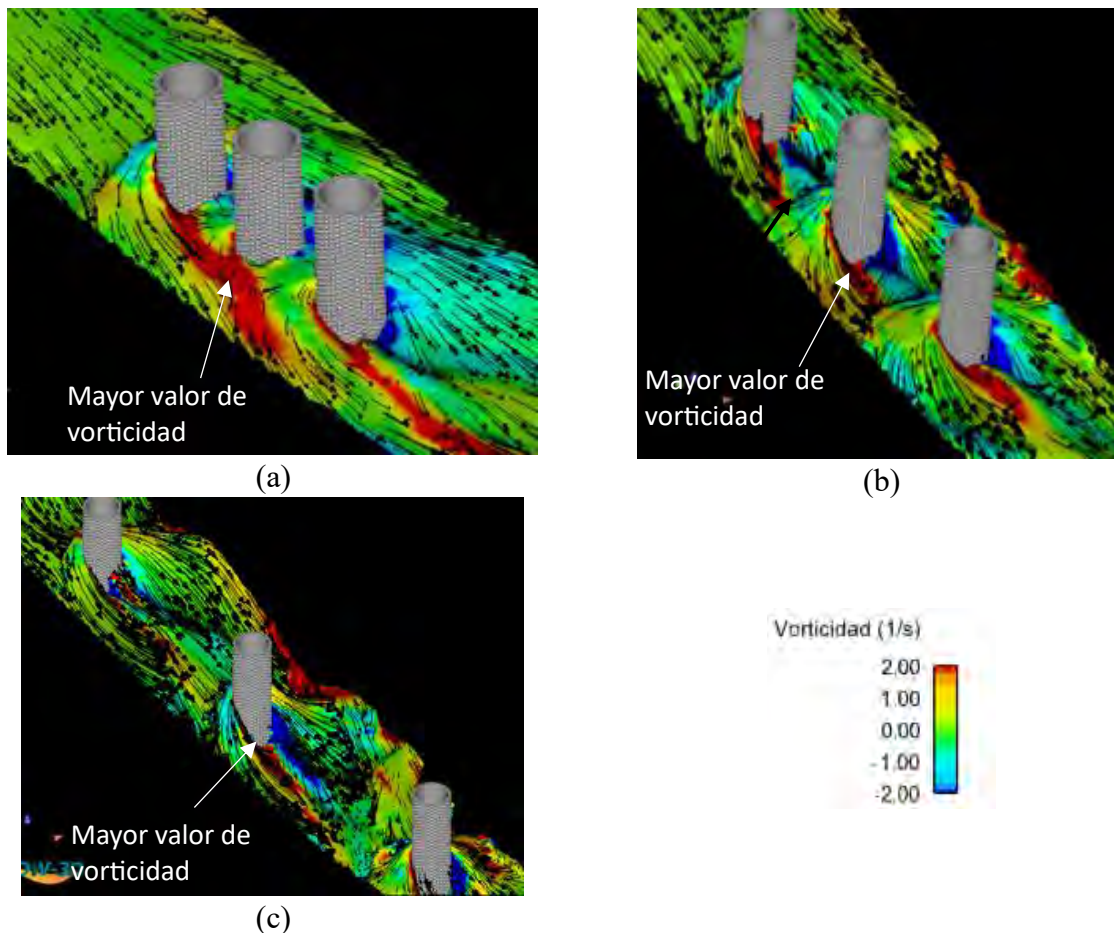


Figura 4.25. Vorticidad en grupo de pilas de sección circular con acabado hidrodinámico a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m, c) Separación $S3=6.0$ m.

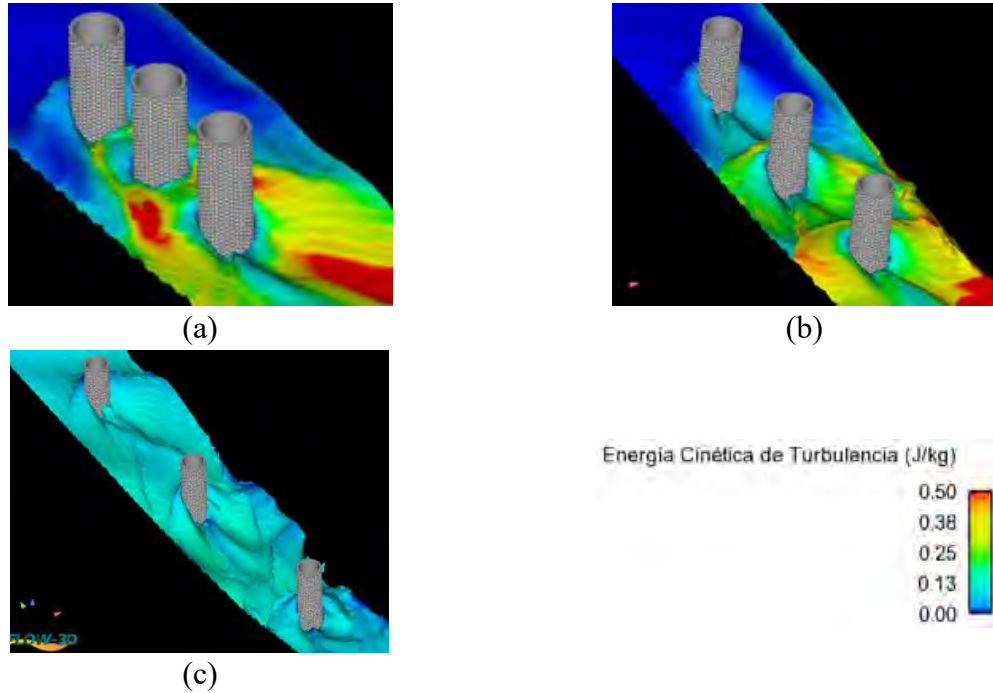


Figura 4.26. *Energía cinética de turbulencia en grupo de pilas de sección circular con acabado hidrodinámico a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m, c) Separación $S3=6.0$ m.*

b) Grupo de pilas con sección rectangular

La figura 4.27 presenta un análisis exhaustivo de la vorticidad en un conjunto de pilas con sección rectangular con acabado. Este examen revela la compleja interacción entre el flujo del agua y las pilas sólidas en el lecho del cauce, ofreciendo una visión profunda de la hidrodinámica.

En todas las configuraciones de pilas, se observa una vorticidad caracterizada por la ausencia de valores positivos significativos, indicando una limitada recirculación intensa. No obstante, surge un hallazgo notable: la presencia de valores negativos en tonalidades azules, cercanos a -2.5 (1/s), señalando una recirculación del flujo en sentido negativo. Este fenómeno subraya la influencia crítica de las características geométricas y superficiales de las pilas de sección rectangular en la dinámica del flujo, ofreciendo perspectivas esenciales para comprender y regular el comportamiento hidrodinámico en entornos fluviales.

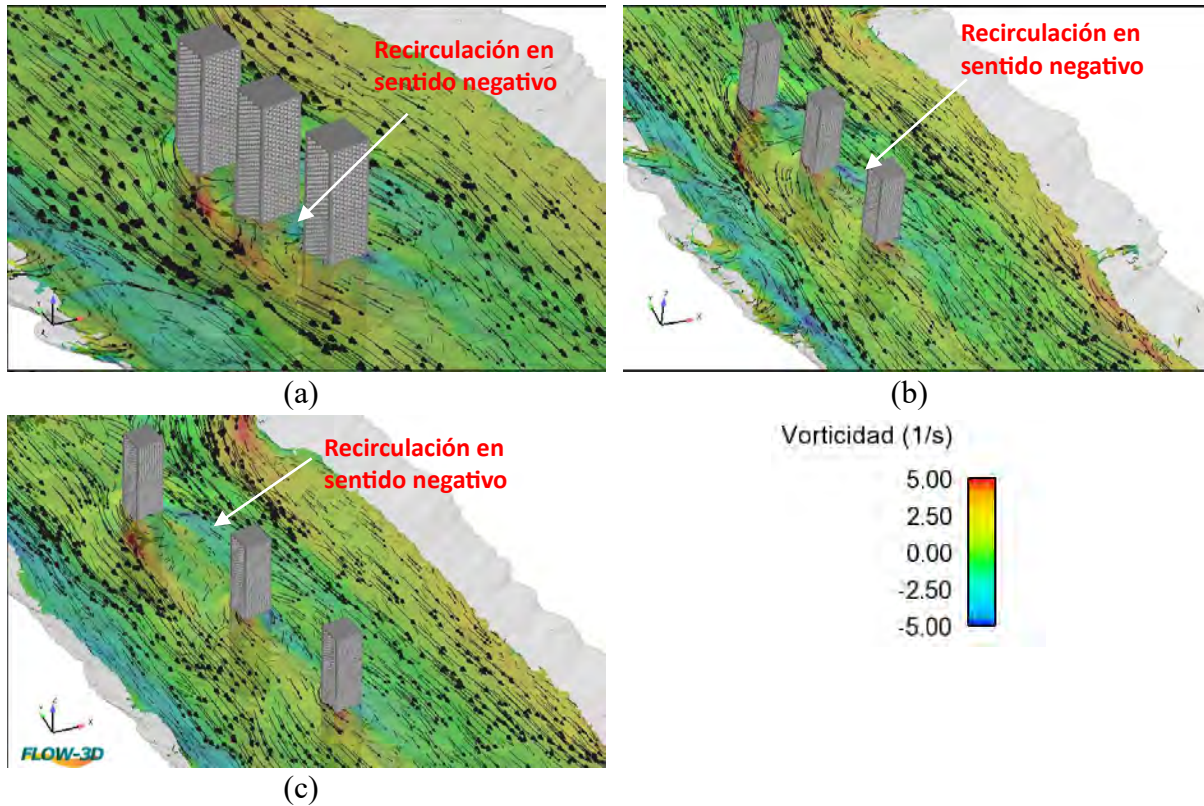


Figura 4.27. Vorticidad en pilas de sección rectangular; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m y c) Separación $S3=5.0$ m.

La figura 4.28 proporciona una evaluación detallada de la concentración de energía cinética de turbulencia en un grupo de pilas con separación variable. Este análisis es crucial para comprender la generación y desarrollo de vórtices en el entorno fluvial.

En la Figura 4.28a, con una separación $S1$ entre las pilas, se observa una concentración de energía cinética de 0.2 (J/kg) en las zonas intermedias. Este bajo nivel de concentración se atribuye a la influencia directa entre pilas adyacentes, lo que limita la acumulación de energía. En la Figura 4.28b, una separación $S2$ induce un aumento significativo en la energía cinética en las zonas intermedias. Este incremento favorece la recirculación del flujo entre las pilas, resultando en la formación notoria de vórtices.

Finalmente, en la Figura 4.28c, donde las pilas están más separadas, se observa un aumento sustancial en la energía cinética en la zona intermedia entre la primera y segunda pila, seguido

de una disminución para la tercera pila. Este patrón sugiere una relación directa entre la separación entre pilas y la distribución de la energía cinética, destacando la importancia de este factor en la dinámica del flujo.

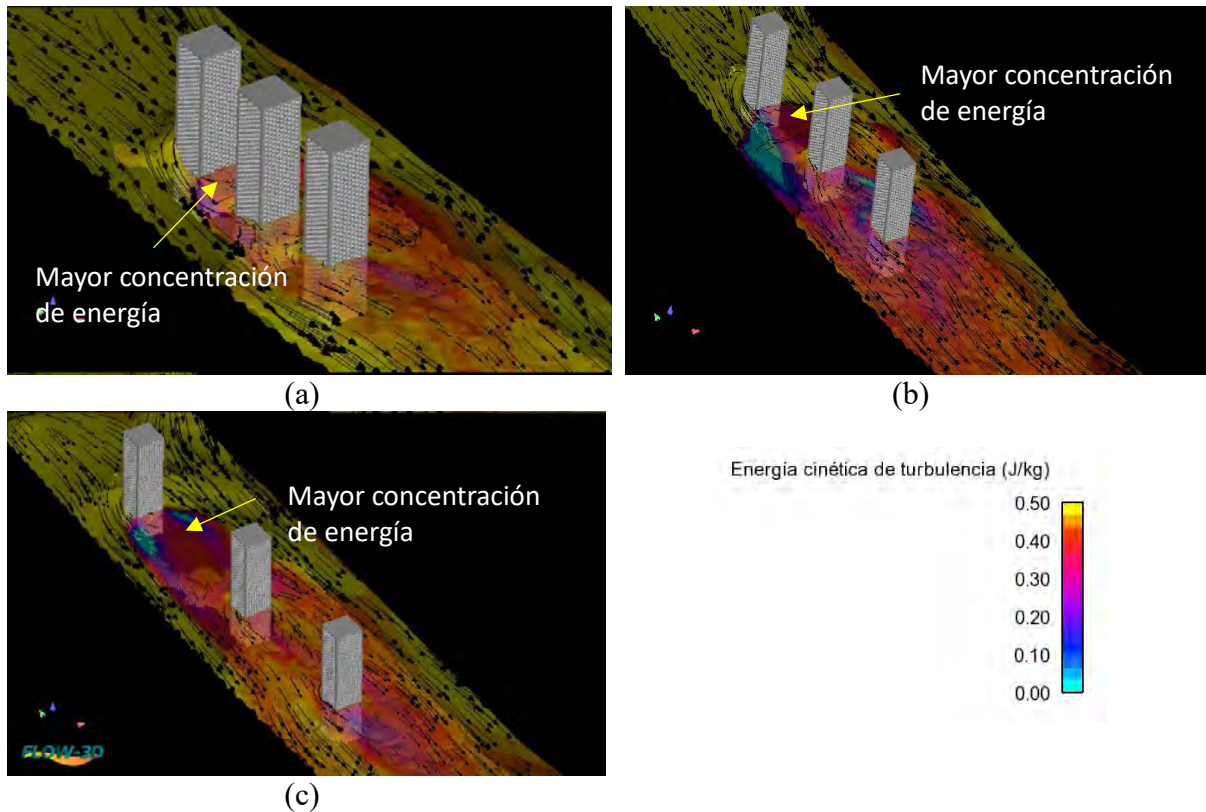


Figura 4.28. *Energía cinética de turbulencia en pilas de sección rectangular; a) Separación $S1=1.0\text{ m}$, b) Separación $S2=3.0\text{ m}$ y c) Separación $S3=5.0\text{ m}$*

c) Grupo de pilas con sección hidrodinámica

La figura 4.29 ofrece una visión detallada de la vorticidad generada en pilas con sección hidrodinámica, considerando diversas configuraciones de separación ($S1$, $S2$ y $S3$) además de acabado superficial. Este análisis destaca las características específicas de la recirculación del flujo en torno a las pilas y su influencia en las configuraciones hidrodinámicas.

En las tres configuraciones, la vorticidad al frente de las pilas es cercana a 0 ($1/s$), indicando una relativa ausencia de recirculación en esta región. No obstante, en los costados de las pilas aguas abajo, así como en los costados, se observa un aumento significativo con un valor promedio de 2 ($1/s$).

Las Figuras 4.29a y 4.29b revelan una recirculación del flujo que afecta las pilas subsiguientes, evidenciando la influencia de la separación entre pilas en la generación de vorticidad y su propagación aguas abajo. En contraste, la Figura 4.29c exhibe una configuración donde las estelas de turbulencia generadas no impactan en las pilas siguientes. Este comportamiento se atribuye a la mayor separación existente, permitiendo que las pilas se comporten de manera más independiente, similar a pilas unitarias.

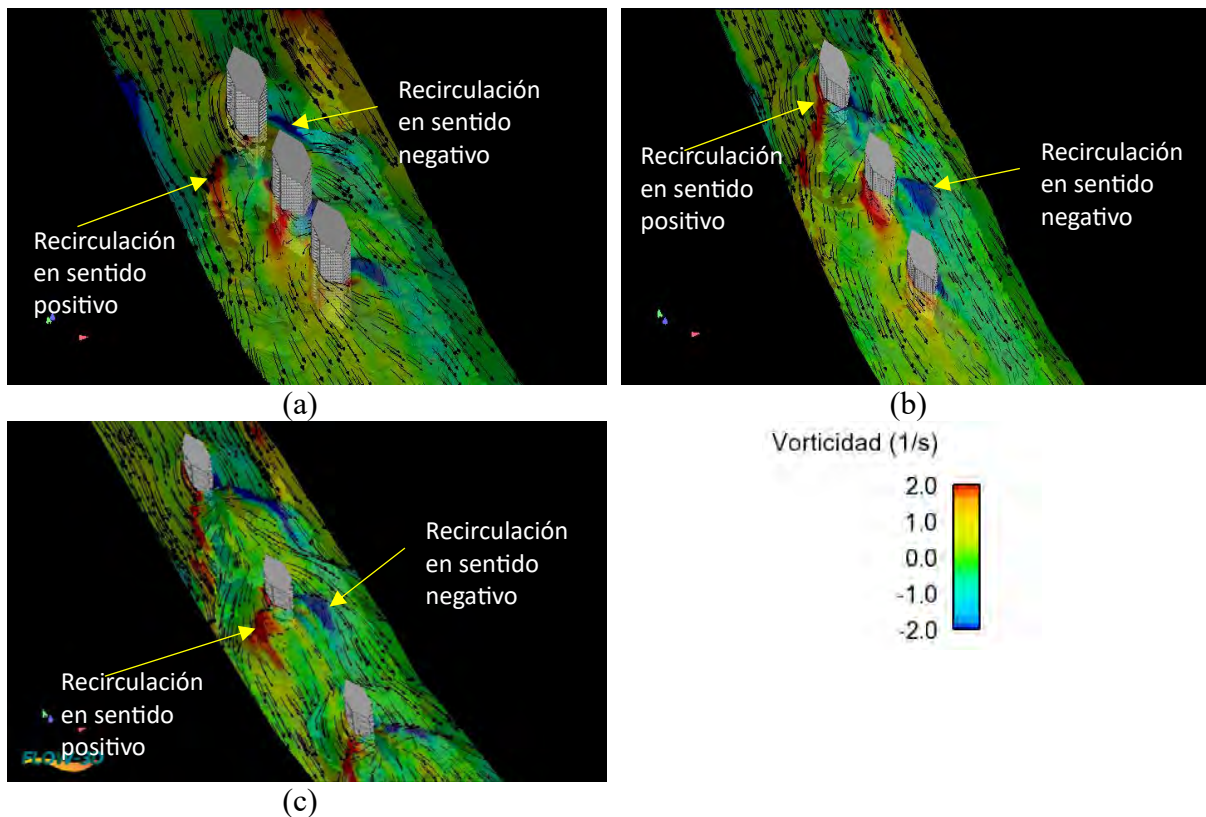


Figura 4.29. Vorticidad en grupo de pilas de sección hidrodinámica con diferentes separaciones; a) Separación $S1=1.8$ m, b) Separación $S2=5.4$ m y c) Separación $S3=9.0$ m.

Este análisis subraya la importancia de la separación entre pilas en la configuración hidrodinámica y en la formación de vórtices. La observación detallada de la vorticidad proporciona perspectivas valiosas sobre la compleja interacción del flujo y la influencia de las condiciones geométricas en el comportamiento de grupos de pilas. El análisis exhaustivo de pilas con acabados superficiales en diversas secciones ha proporcionado información valiosa

sobre su comportamiento hidrodinámico. En general, la presencia de acabados superficiales influye en la generación de vorticidad y recirculación del flujo alrededor de las pilas, siendo la separación entre ellas un factor crucial. Estos resultados respaldan la idea de que las condiciones superficiales y geométricas de las pilas desempeñan un papel clave en la hidrodinámica, sin embargo, a continuación, se presentan las implicaciones de estos análisis hidrodinámicos en la estimación del fenómeno de socavación.

4.2. Análisis del proceso de socavación.

La siguiente sección presenta los resultados del grupo de escenarios enfocados en la estimación de los niveles de erosión que producen la socavación, utilizando un hidrograma asociado con un periodo de retorno (T_r) de 20 años. Dichas simulaciones abarcaron pilas con diversos acabados bajo condiciones de lecho móvil. Se llevaron a cabo análisis específicos para tres tipos de pilas: circular, rectangular e hidrodinámica. Además, se consideraron tanto la condición de pila aislada como la de pilas agrupadas para ofrecer una visión integral del impacto de los efectos hidrodinámicos en diferentes configuraciones discutidos en la sección anterior.

4.2.1 Análisis de la socavación en pilas unitarias con acabado liso.

La Figura 4.30 ilustra el descenso del fondo del lecho en las diversas secciones contiguas a las pilas. Se destaca que las áreas de mayor concentración de energía cinética de turbulencia, como se reveló en el análisis hidrodinámico asociado a la generación de vórtices, coinciden con las zonas de máxima profundidad de socavación. Es posible observar que, para la pila de sección hidrodinámica (Figura 4.30a), la máxima profundidad de socavación se localiza a los costados de la pila, con un valor promedio de 1.54 metros.

En cuanto a la pila de sección circular (Figura 4.30b), la máxima profundidad de socavación se sitúa en la parte derecha de la pila, alcanzando una profundidad de 1.8 metros. Por otro lado, en la pila de sección rectangular (Figura 4.30c), la mayor profundidad de socavación se encuentra en la parte frontal de la pila, registrando una profundidad de socavación de 1.8 metros.

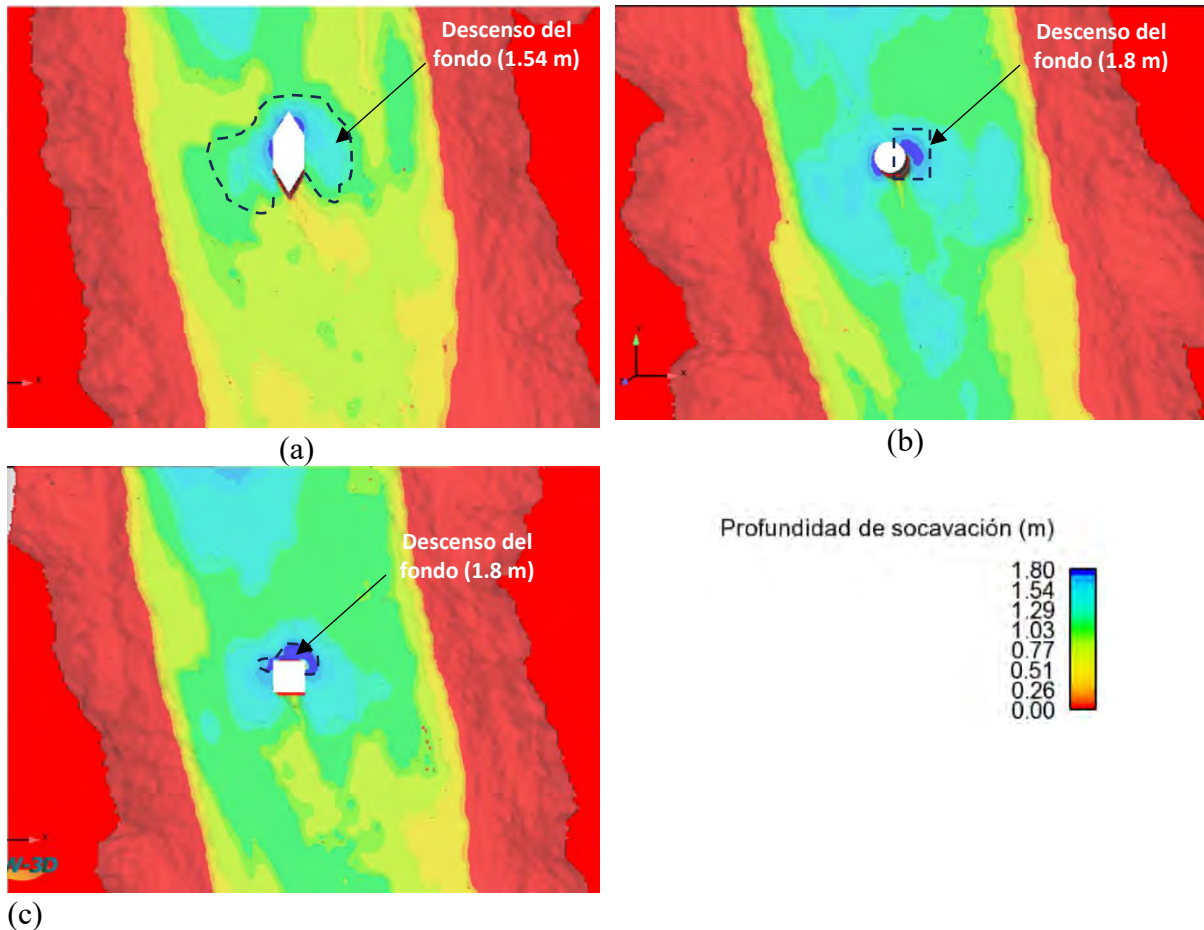


Figura 4.30. Profundidad de socavación en pilas unitarias con acabado liso; a) pila de sección hidrodinámica, b) pila de sección circular y c) pila de sección rectangular.

4.2.2 Análisis de socavación en pilas lisas agrupadas

En esta sección, se exponen los resultados derivados de las simulaciones específicas orientadas al análisis de la socavación (erosión) en pilas agrupadas, bajo la influencia de diferentes distancias de separación en pilas con acabado liso. Las simulaciones se llevaron a cabo considerando un hidrograma con un período de retorno de 20 años. Se abordaron tres categorías de pilas: circular, rectangular e hidrodinámica.

a) Grupo de pilas de sección circular lisa

En la figura 4.31, se analiza la evolución de la profundidad de socavación en diversas configuraciones de separación entre pilas de sección circular. En el caso de una separación $S1=1.2$ m (figura 4.31a), se destaca que la mayor profundidad de socavación se registra en la

primera pila, actuando como un dissipador de energía y disminuyendo la socavación en las pilas subsiguientes. Para una separación $S2=3.6$ m (figura 4.31b), se evidencia una profundidad de socavación máxima en las tres pilas, situada principalmente en la parte frontal. En la configuración con separación $S3=6.0$ m, la profundidad máxima se presenta en las dos primeras pilas, mientras que en la última pila se reduce la socavación en un promedio del 14%.

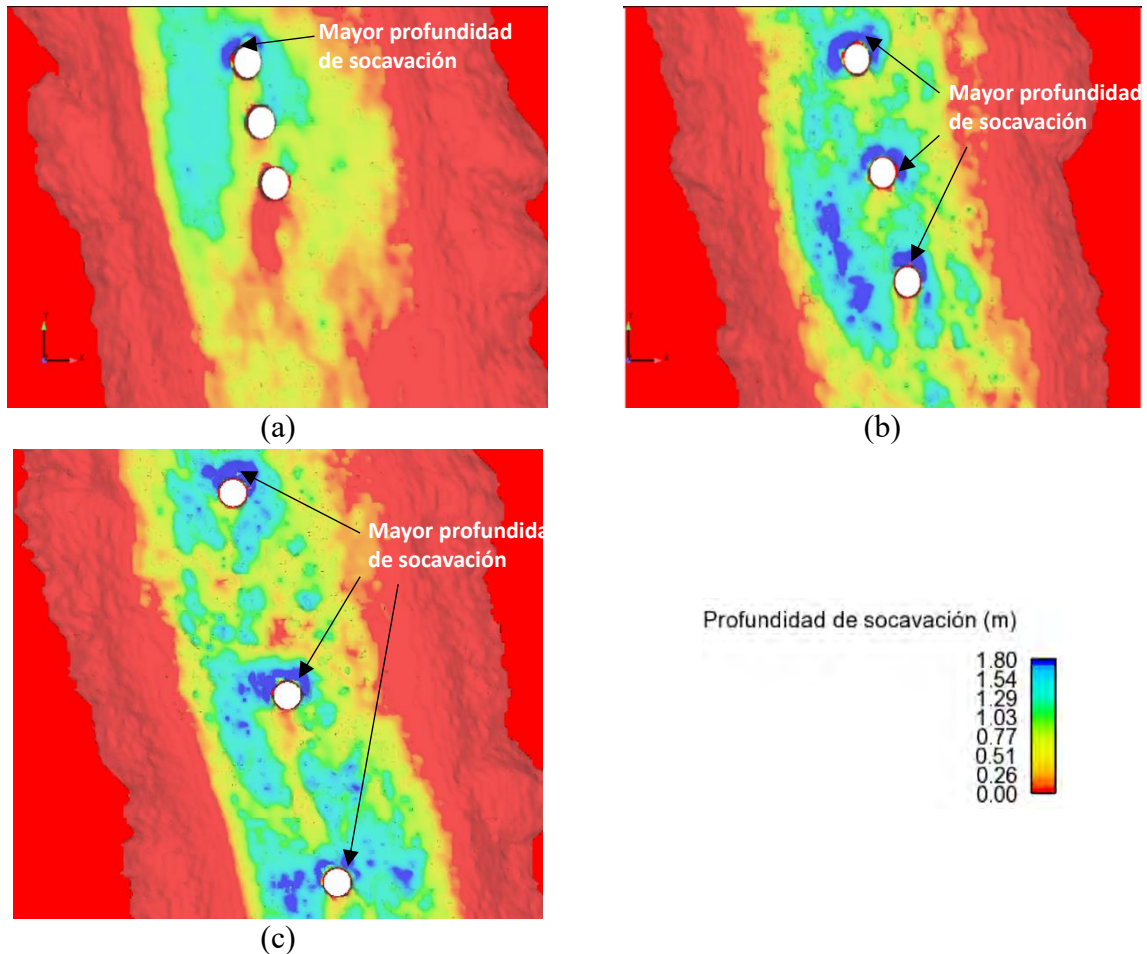


Figura 4.31. Profundidad de socavación en grupo de pilas de sección circular con acabado liso; a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m y c) Separación $S3=6.0$ m.

b) Grupo de pilas de sección rectangular lisa.

En la figura 4.32, se examina la evolución de la profundidad de socavación en distintas configuraciones de separación entre pilas de sección rectangular. En el caso de una separación $S1=1.0$ m (figura 4.32a), destaca la mayor profundidad de socavación en la primera pila,

actuando como disipador de energía y reduciendo la socavación en las pilas subsiguientes. La profundidad de socavación aguas abajo alcanza los 1.54 m, representando una disminución del 14%. Para una separación $S_2=3.0$ m (figura 4.32b), se observa una profundidad de socavación máxima al frente de las pilas, con un valor promedio de 1.54 m.

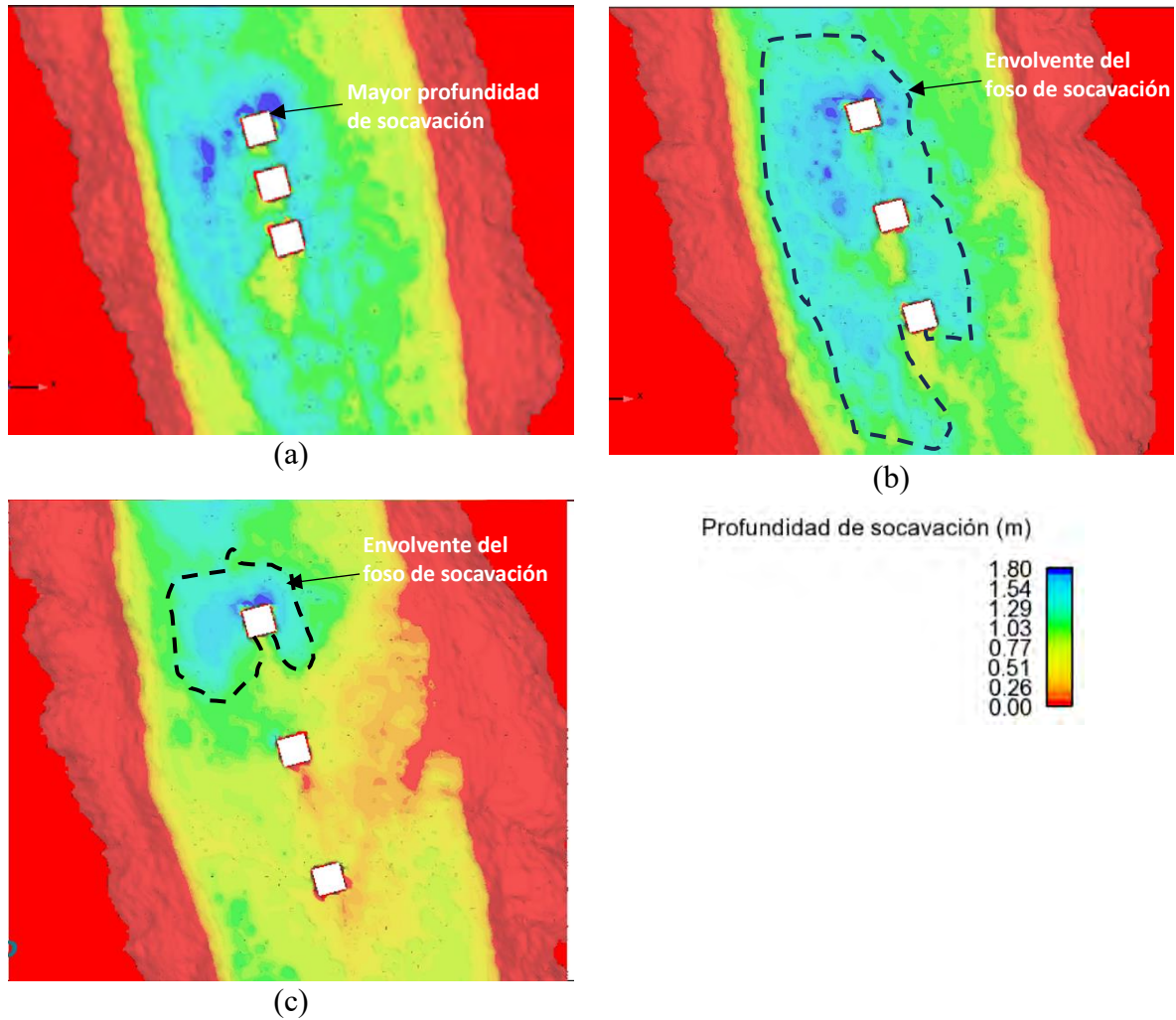


Figura 4.32. Profundidad de socavación para grupo de pilas de sección rectangular; a) Separación $S_1=1.0$ m, b) Separación $S_2=3.0$ m y c) Separación $S_3=5.0$ m.

En la configuración con separación $S_3=5.0$ m, se registra una profundidad máxima frente a la primera pila, con un promedio de 1.8 m en la zona cercana y una envolvente de 1.29 m aguas abajo. Para las pilas restantes, la profundidad de socavación disminuye significativamente, alcanzando valores promedio de 0.26-0.51 m, representando una reducción del 60%.

c) Grupo de pilas de sección hidrodinámica lisa

En la figura 4.33 se examina el comportamiento de la profundidad de socavación en diversas combinaciones de separación entre pilas de sección hidrodinámica. Para una separación $S1=1.8$ m (figura 4.33a), destaca la mayor profundidad de socavación en la primera pila, con una envolvente del foso de socavación de aproximadamente 1.29 m de profundidad.

En el caso de una separación $S2=5.4$ m (figura 4.33b), se observa una profundidad de socavación máxima a los costados de la primera pila, mientras que las pilas subsiguientes muestran una disminución en la profundidad de socavación. En la configuración con separación $S3=9.0$ m, se registra una profundidad máxima frente a la primera pila de 1.8 m, y en las dos pilas siguientes, la profundidad de socavación experimenta una reducción.

4.2.3 Análisis de la socavación en pilas unitarias con acabado superficial.

La figura 4.34a proporciona una comparación en el descenso del fondo móvil alrededor de una pila con sección rectangular, mientras que la figura 4.34b presenta la misma situación para una pila con sección circular. Además, la figura 4.34c muestra la distribución correspondiente a una pila con sección hidrodinámica. En estos casos, es evidente cómo, frente a cada pila, la profundidad de socavación promedio es de 1.50 m, pero disminuye aguas abajo, indicando el proceso de deposición de material influenciado por el campo de flujo alrededor de las pilas.

4.2.4 Análisis de la socavación en pilas agrupadas con acabado superficial.

En esta sección, se presentan los resultados derivados del análisis de la socavación (erosión) en pilas agrupadas con acabado superficial bajo diversas condiciones hidrodinámicas.

Se llevaron a cabo simulaciones para evaluar los niveles de erosión en un escenario representativo de un hidrograma con un período de retorno de 20 años. El estudio se centró en tres tipos de de sección de pilas: circular, rectangular e hidrodinámica.

a) Grupo de pilas de sección circular con acabado superficial.

En la figura 4.35, se detalla la profundidad de socavación en pilas de sección circular agrupadas con diferentes separaciones (S1, S2 y S3), considerando la implementación de acabado superficial. Para la separación S1 (figura 4.35a), se evidencia una disminución en la profundidad de socavación en la pila frontal en comparación con las pilas sin acabado superficial, manteniéndose alrededor de 1.50 m en las tres pilas. De manera similar, en la separación S2 (figura 4.35b), se observa un comportamiento análogo.

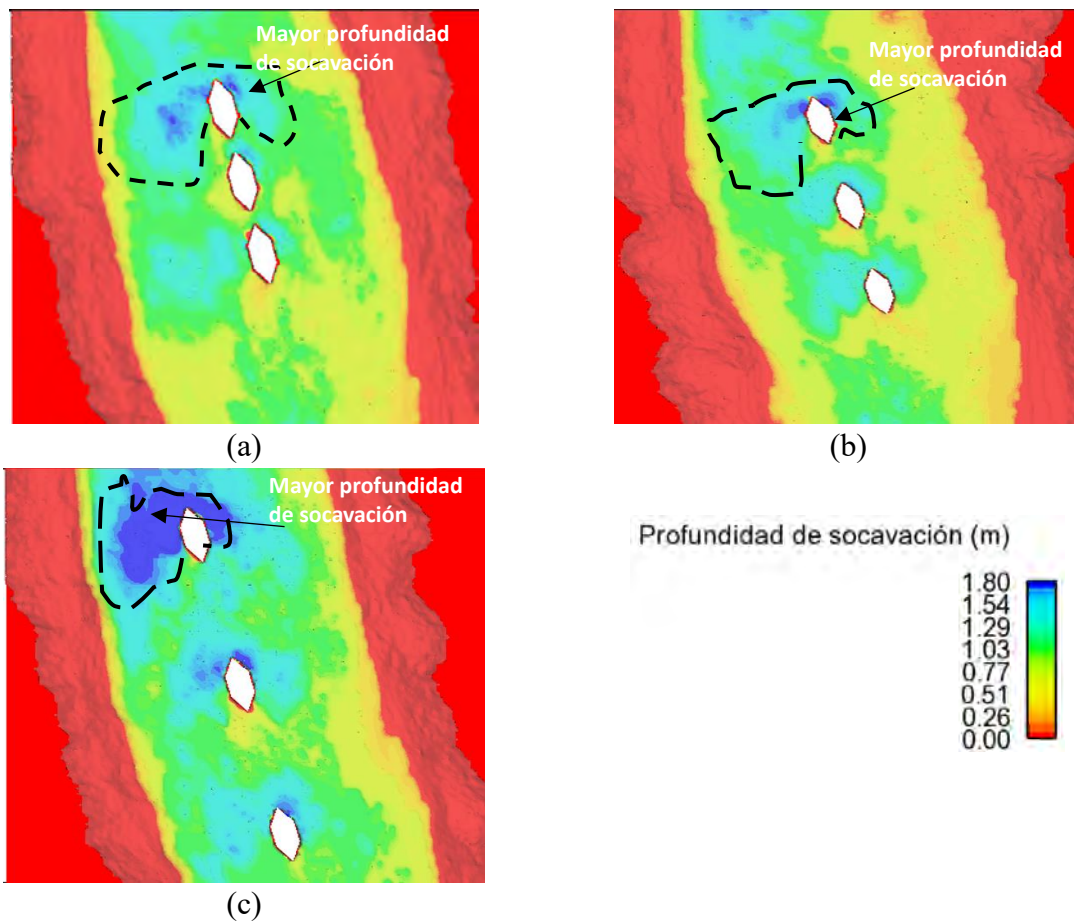


Figura 4.33. Profundidad de socavación para grupo de pilas de sección hidrodinámica; a) Separación S1=1.8 m, b) Separación S2=5.4 m y c) Separación S3=9.0 m.

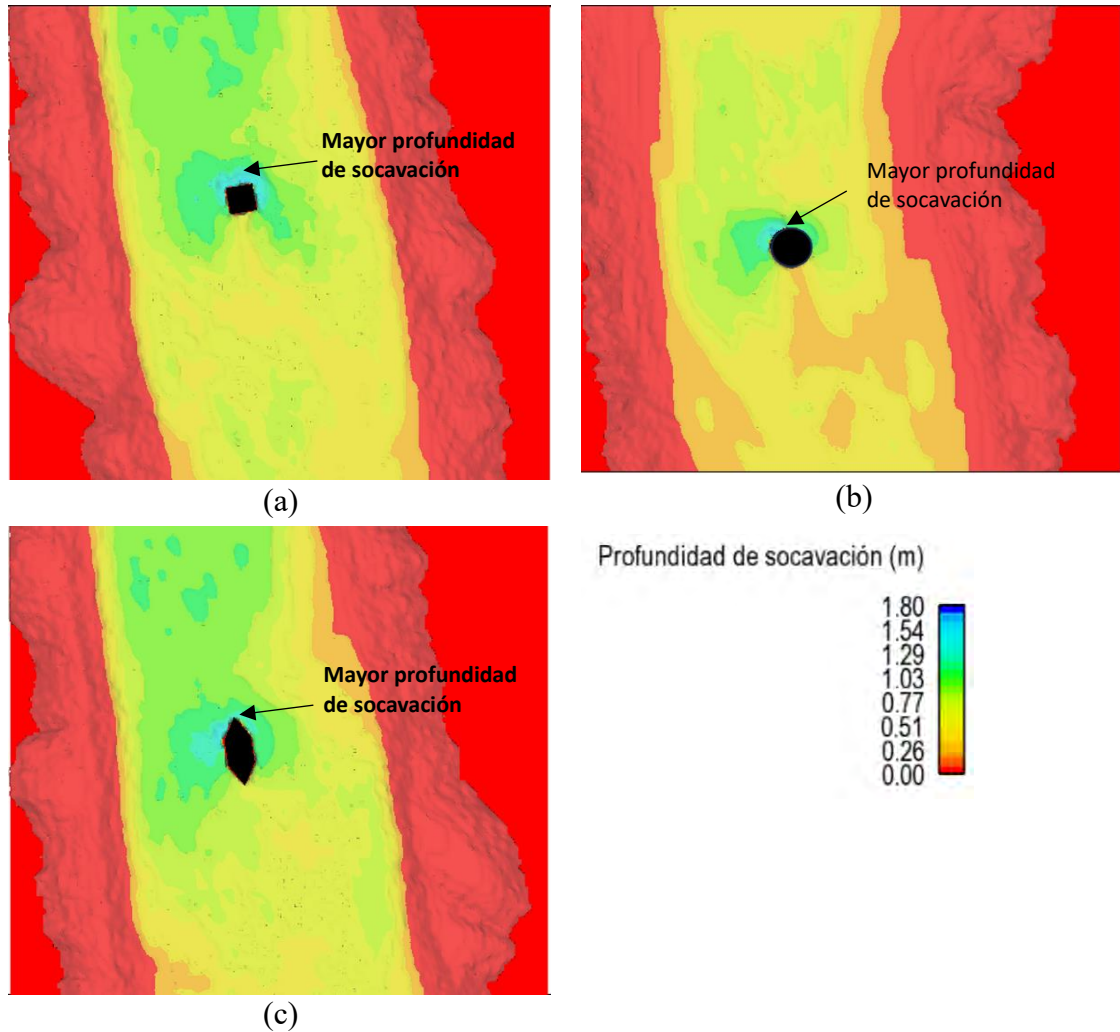


Figura 4.34. Profundidad de socavación en pilas unitarias con acabado superficial; a) Sección rectangular, b) Sección circular y c) Sección hidrodinámica.

En el caso de la separación S3 (figura 4.35c), se destaca que la profundidad de socavación en la pila frontal es de 0.51 m, pero se incrementa en un 50% aguas abajo, alcanzando aproximadamente 1.50 m de profundidad de socavación.

b) Grupo de pilas de sección rectangular con acabado superficial.

En la figura 4.36 se presenta la profundidad de socavación alrededor de las pilas de sección rectangular con diferentes separaciones (S1, S2 y S3) y con la aplicación del acabado superficial.

Se observa que para la separación S1 (figura 4.36a), la profundidad de socavación se concentra en la primera pila mostrando un descenso del fondo en 1.50 m, mientras que en las pilas subsecuentes la profundidad disminuye lo que indica una deposición de sedimentos. En la separación S2 (Figura 4.36b), se aprecia que la primera pila en el costado derecho presenta un descenso del fondo alrededor de 1.50 m, mientras que la pila intermedia presenta valores medios entre 0.7-1.05 m, mientras que la última pila presenta una envolvente del foso de socavación. Finalmente, en la separación S3 (figura 4.36c), la profundidad de socavación presenta un comportamiento similar.

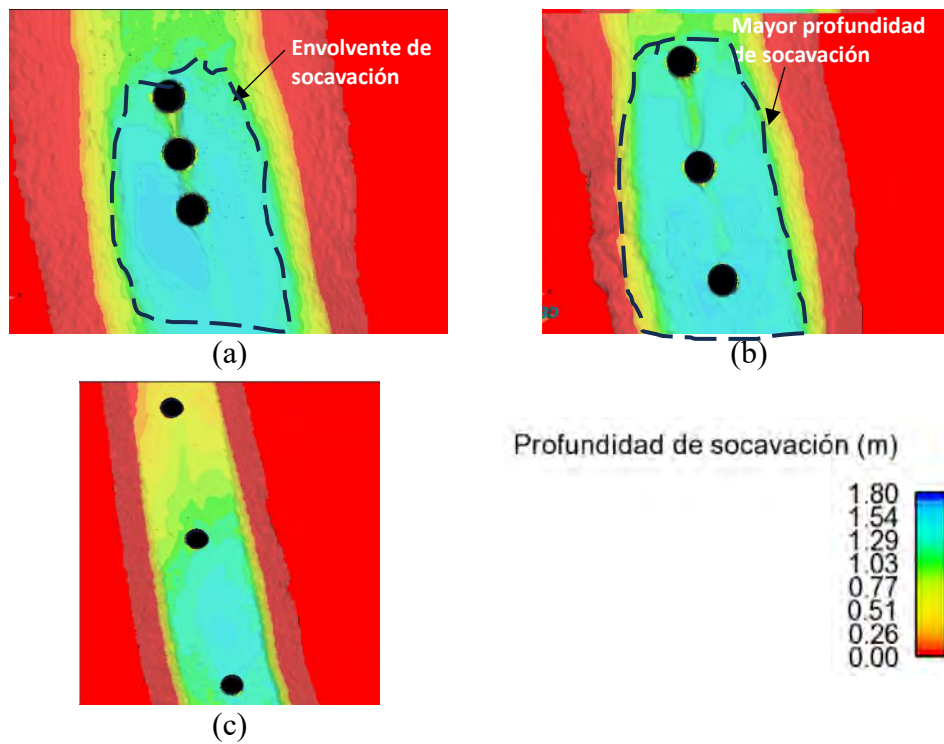


Figura 4.35. Profundidad de socavación para grupo de pilas de sección circular con acabado superficial; a) Separación $S1=1.2$ m, b) Separación $S2=3.6$ m y c) Separación $S3= 6.0$ m

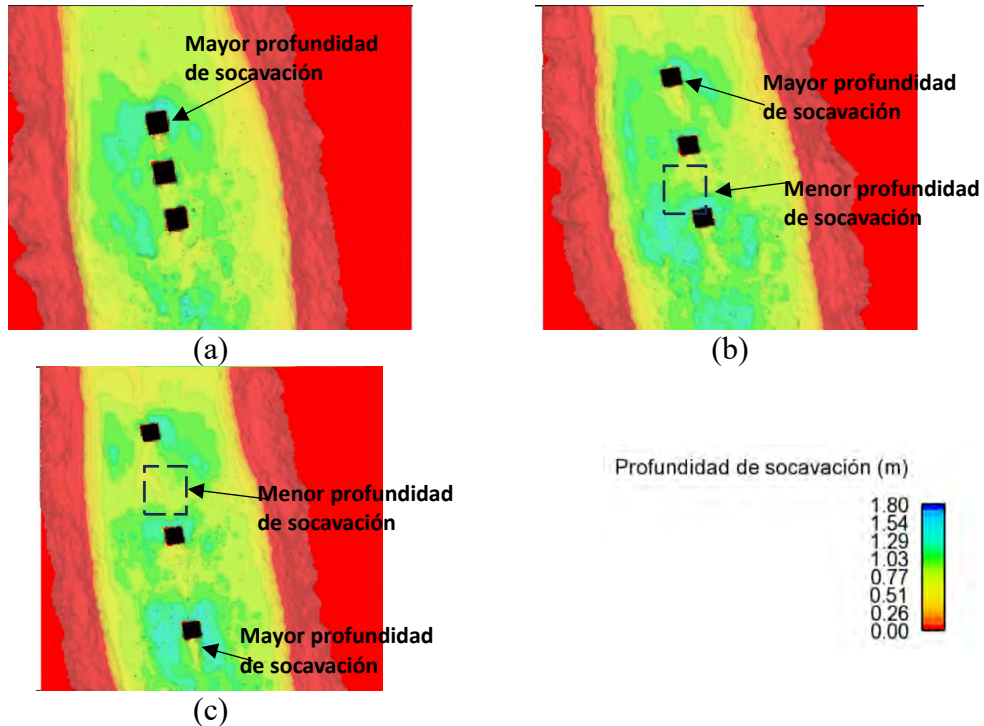


Figura 4.36. Profundidad de socavación para grupo de pilas de sección rectangular con acabado superficial; a) Separación $S1=1.0$ m, b) Separación $S2=3.0$ m y c) Separación $S3= 5.0$ m

c) Grupo de pilas de sección hidrodinámica con acabado superficial.

En la figura 4.37, se muestra el comportamiento de la profundidad de socavación de pilas de sección hidrodinámica con diferentes separaciones ($S1$, $S2$ y $S3$) y la incorporación del acabado superficial. En la separación $S1$ (figura 4.37a), se observa un descenso del lecho con un valor promedio de 1.50 m para las tres pilas. Para la separación $S2$ (figura 4.37b), se tiene un comportamiento similar. En la separación $S3$ (figura 4.37c), de igual forma se tiene un comportamiento similar, con longitudes de socavación más extendidas, sugiriendo que la profundidad de socavación en las tres configuraciones tiene un comportamiento similar alrededor de las pilas con acabado superficial.

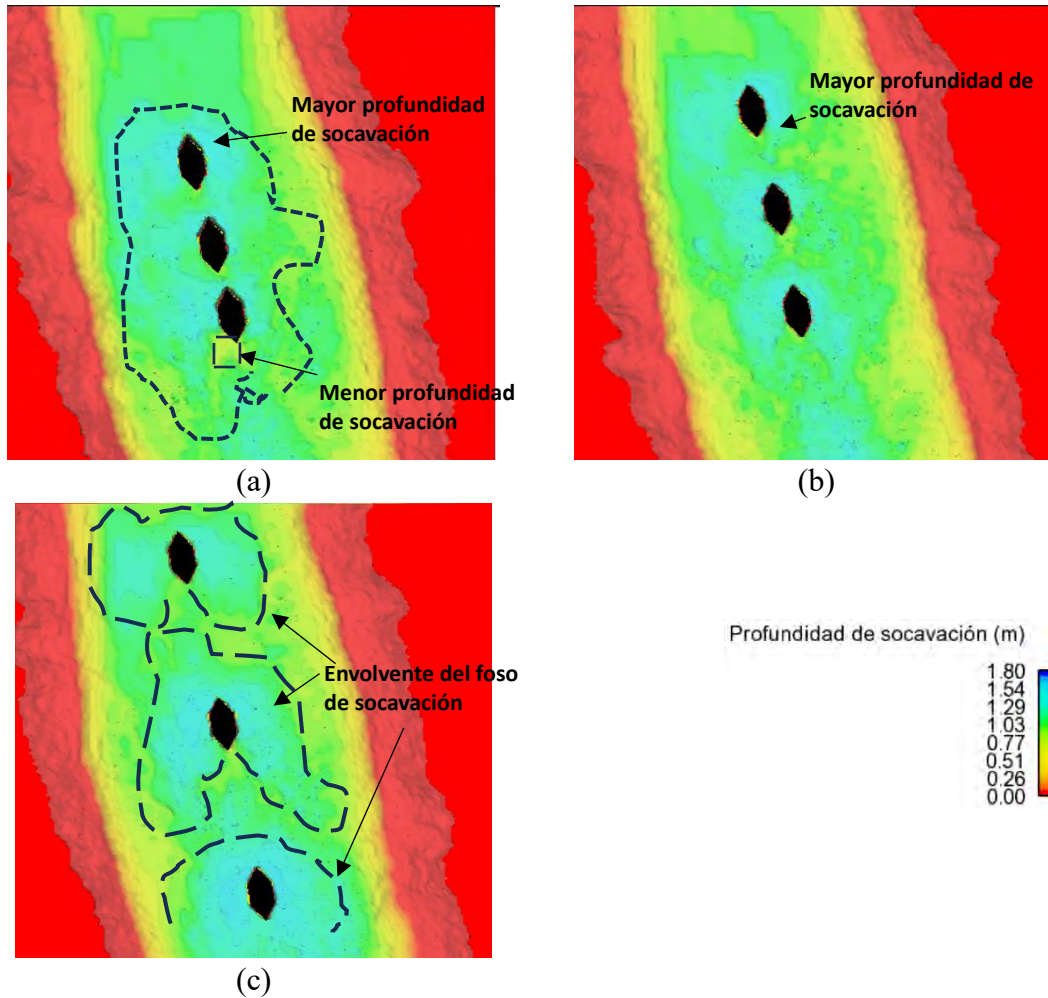


Figura 4.37. Profundidad de socavación para grupo de pilas de sección hidrodinámica con acabado superficial; a) Separación $S1=1.8\text{ m}$, b) Separación $S2=5.4\text{ m}$ y c) Separación $S3=9.0\text{ m}$

4.2.5 Análisis en la profundidad de socavación

Como resultado del presente estudio, la profundidad de socavación en pilas con acabado liso en el lecho del río ha presentado altas profundidades de socavación en la parte frontal, siendo una consecuencia del equilibrio dinámico presente en el campo hidrodinámico del fenómeno. Esto lleva a que el material del lecho se desprende de manera continua. Las profundidades máximas de socavación alcanzadas en pilas individuales con diferentes secciones se resumen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 *Profundidad máxima de socavación en pilas lisas aisladas*

Sección transversal	Profundidad máxima de socavación (m)
Circular	1.76
Rectangular	1.93
Hidrodinámica	1.58

El aumento en el número de pilas en el lecho, junto con la modificación de la separación entre ellas, independientemente de la sección transversal, generó cambios significativos en los patrones de socavación y deposición. La presencia de una pila aguas arriba resulta en una disminución de la velocidad de aproximación efectiva para las pilas subsecuentes aguas abajo. Esta reducción mitiga el efecto del vórtice herradura, lo que conduce a una menor profundidad de socavación aguas abajo, mientras que el material extraído de la pila aguas arriba se deposita en el lecho, frente a la pila aguas abajo.

Posteriormente, el flujo se desvía alrededor de la pila aguas abajo, reduciendo así la fuerza y, consecuentemente, el daño causado por el vórtice de herradura. Se puede inferir que la colocación de más de una pila disminuye considerablemente el descenso del lecho en la parte trasera del foso de socavación aguas arriba. No obstante, a medida que aumenta la separación entre las pilas, el efecto de amortiguamiento se reduce y eventualmente desaparece, alcanzando el nivel máximo del lecho que se presenta en los escenarios con una sola pila. A medida que la separación de pilas aumenta, el déficit de velocidad tras la pila aguas arriba desaparece, y los efectos de protección no son perceptibles. Estos resultados se resumen en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 *Profundidad máxima de socavación en grupos de pilas con acabado liso*

Sección transversal	S1	S2	S3
Circular	1.63	1.74	1.86
Rectangular	1.56	1.69	1.95
hidrodinámica	1.43	1.47	1.52

Las máximas profundidades de socavación se registran en la pila frontal (Pila 1) debido a la interacción directa con el flujo. En la sección circular, la profundidad de socavación en las pilas subsiguientes alcanza el 87%, mientras que en la sección rectangular es del 80%, y en la sección hidrodinámica, llega al 96% de la profundidad máxima. A medida que la profundidad de socavación se desarrolla en la pila trasera, la máxima separación aumenta. En configuraciones con mayores separaciones, las pilas actúan de forma independiente, manteniendo profundidades de socavación equivalentes a las de una sola pila, sin afectar el nivel medio del lecho entre ellas.

Las profundidades más significativas en la pila trasera resultan de la combinación de los vórtices desprendidos por la pila frontal y la compresión de los vórtices de herradura entre pilas adyacentes. La introducción de un acabado superficial en las pilas muestra un efecto generalizado de reducción, como se resume en las tablas 4.3 y 4.4, que presentan las profundidades máximas de socavación alcanzadas.

Tabla 4.3 *Profundidad máxima de socavación en pilas aisladas con acabado hexagonal*

Sección transversal	Profundidad máxima de socavación (m)
Circular	1.37
Rectangular	1.44
Hidrodinámica	1.21

Tabla 4.4 *Profundidad máxima de socavación en pilas agrupadas con acabado hexagonal*

Sección transversal	S1	S2	S3
Circular	1.40	1.44	1.62
Rectangular	1.48	1.57	1.77
Hidrodinámica	1.24	1.29	1.37

Los resultados finales se muestran en la tabla 4.5, en general, el acabado hexagonal tiende a tener una reducción porcentual más significativa en comparación con el acabado liso en todos los escenarios. Entre las pilas circulares aisladas, las hexagonales muestran una reducción del 28%, mientras que, en pilas rectangulares aisladas y pilas hidrodinámicas aisladas, la reducción es del 34% y 31%, respectivamente.

En los grupos de pilas con secciones circulares, rectangulares e hidrodinámicas, las variaciones en la reducción porcentual son: en el grupo de pilas con sección circular, la S1 tiene una reducción del 16%, la S2 del 21%, y la S3 del 15%. En resumen, el acabado hexagonal es una medida eficiente en la reducción porcentual de la profundidad máxima de socavación alcanzada en los escenarios evaluados.

Tabla 4.5 *Comparativo en profundidad máxima de socavación entre escenarios*

Escenario	Profundidad de socavación (m)		Porcentaje de reducción (%)
	Acabado liso	Acabado hexagonal	
Pila de sección circular aislada	1.76	1.37	28%
Pila de sección rectangular aislada	1.93	1.44	34%
Pila de sección hidrodinámica aislada	1.58	1.21	31%
Grupo de pilas con sección circular (S1)	1.63	1.4	16%
Grupo de pilas con sección circular (S2)	1.74	1.44	21%
Grupo de pilas con sección circular (S3)	1.86	1.62	15%
Grupo de pilas con sección rectangular (S1)	1.56	1.48	5%
Grupo de pilas con sección rectangular (S2)	1.96	1.57	25%
Grupo de pilas con sección rectangular (S3)	1.95	1.77	10%
Grupo de pilas con sección hidrodinámica (S1)	1.43	1.24	15%
Grupo de pilas con sección hidrodinámica (S2)	1.47	1.29	14%
Grupo de pilas con sección hidrodinámica (S3)	1.52	1.37	11%

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos y la metodología previamente delineada, en este apartado se presentan las conclusiones que detallan los descubrimientos derivados del proyecto de investigación. Además, se incluyen recomendaciones para futuras investigaciones que abarquen el tema desarrollado, proporcionando así una guía valiosa para la expansión y profundización de conocimientos en esta área específica. Este análisis crítico no solo resume los logros alcanzados, sino que también sugiere vías potenciales para la mejora continua del entendimiento del fenómeno de socavación local en pilas con acabado liso y acabado superficial tanto aisladas como en grupo.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que permitieron cumplir los objetivos de la presente investigación se enlistan continuación:

- ✓ El análisis de la influencia de vórtices alrededor de estructuras como pilas de puentes en el transporte de sedimentos es esencial, pues estos vórtices generados por la energía cinética de turbulencia crean zonas de alta concentración de energía cinética, resultando en una mayor profundidad de socavación. Esta relación directa entre la presencia de vórtices y el transporte de sedimentos resalta la importancia de comprender la dinámica de estos fenómenos en el entorno específico de las pilas.

- ✓ El papel crucial del punto de separación del flujo en la formación de la estela de turbulencia aguas abajo de las pilas añade otra capa de complejidad. La proximidad de este punto al eje central de las pilas modula el desprendimiento de vórtices, lo que impacta directamente en la extensión del foso de socavación. Este vínculo entre el punto de separación y el eje central se convierte en un factor determinante que influye significativamente en la dinámica de la turbulencia y, por ende, en la socavación resultante.

Así mismo, la vorticidad se posiciona como un factor esencial que incide de manera directa en el proceso de socavación alrededor de las pilas. La comprensión profunda de la vorticidad y la hidrodinámica es imperativa para el diseño efectivo de estructuras resistentes a la socavación y para la formulación de estrategias preventivas. El control de la vorticidad se convierte en una herramienta clave en la planificación de estructuras hidráulicas capaces de resistir los efectos adversos de la socavación.

- ✓ En esta investigación queda demostrado que la implementación de rugosidad superficial en las pilas a través, de casquetes hexagonales, emerge como una estrategia alternativa en la reducción de la profundidad de socavación para cualquier tipo de sección transversal de la pila.
- ✓ La introducción de casquetes hexagonales como rugosidad superficial en las pilas de puente, altera el campo hidrodinámico de flujo, reduciendo los vórtices de herradura y de estela contribuyendo así en la reducción de la profundidad de socavación. Este resultado destaca la viabilidad de la manipulación de la rugosidad como una medida práctica y prometedora para mitigar los impactos de la socavación en las estructuras, presentando una perspectiva innovadora en el ámbito de la ingeniería hidráulica.

- ✓ La eficacia del acabado superficial tipo casquete hexagonal en la reducción porcentual de la profundidad máxima de socavación se ha confirmado a través de diversas evaluaciones en escenarios entre pilas de sección circular. Para pilas unitarias, se observa una reducción del 28%, mientras que, para pilas en grupo, la mayor reducción se registra con una separación S2, alcanzando un 21%. En el caso de la sección rectangular, la reducción para pilas unitarias es del 34%, y para pilas en grupo, la mayor disminución se presenta también con una separación S2, llegando al 25%.

- ✓ Al considerar la sección hidrodinámica, se evidencia una reducción del 31% para pilas unitarias, y la mayor disminución entre pilas en grupo se produce con una separación S1, alcanzando el 15%. Estos resultados muestran reducciones significativas, respaldando la idoneidad de la estrategia de casquetes hexagonales para contrarrestar los efectos adversos de la socavación. Este hallazgo refuerza la pertinencia y aplicabilidad práctica de la implementación de casquetes hexagonales en el diseño de estructuras hidráulicas resilientes.

- ✓ El uso de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en este estudio reviste una importancia crucial. Pues no solo proporciona una comprensión profunda del comportamiento tridimensional altamente turbulento del flujo, sino que, también resulta ser una herramienta precisa y detallada para la modelación de variables clave, como la velocidad, vorticidad, energía cinética de la turbulencia y profundidad de socavación.

- ✓ La capacidad de la CFD para simular de manera eficiente y representar visualmente fenómenos hidráulicos complejos en 3D, ha permitido identificar de manera precisa las zonas más propensas a la socavación en pilas con acabado superficial, así como evaluar el comportamiento de la separación de pilas en la reducción de la profundidad de socavación.

- ✓ La configuración de la sección transversal y la geometría de las pilas ejercen una influencia directa sobre la distribución de las fuerzas hidrodinámicas, y en conjunto con el acabado superficial, contribuyen a mitigar los efectos de la erosión local alrededor de las pilas.
- ✓ La óptima separación entre pilas desempeña un papel fundamental en reducir la profundidad de socavación al reducir las interferencias entre las corrientes de flujo circundantes principalmente en los vórtices herradura y de estela, causantes principales de la socavación local.
- ✓ Al minimizar la formación de zonas turbulentas, se reduce de manera significativa la probabilidad de socavación. Por lo que, mantener una distancia adecuada entre las pilas promueve un flujo más suave y organizado, mejorando la eficiencia del sistema y disminuyendo los riesgos asociados con la socavación.

RECOMENDACIONES

Si bien en esta investigación se han encontrado hallazgos importantes en la implementación de acabados superficiales en las pilas de puente con diferente sección geometría y distintas separaciones entre pilas, también hace falta mayor investigación por lo que, del análisis de los resultados resaltan las siguientes recomendaciones.

- ✓ ***Análisis de separaciones intermedias:*** Se aboga por la implementación de separaciones intermedias en el estudio hidrodinámico. Este enfoque posibilitará la evaluación de mayores distancias entre las pilas de puentes, permitiendo la identificación precisa del radio de influencia para mitigar los efectos de la estela de turbulencia. Se podría plantear un análisis de optimalidad con el objetivo de establecer criterios de diseño, contemplando la eventual adopción estratégica de pilas falsas aguas arriba del cauce como medida de intervención.

- ✓ ***Exploración de rugosidades mixtas.*** Se propone explorar la implementación de rugosidades mixtas mediante la variación de acabados en áreas específicas de las pilas. Esta estrategia, fundamentada en la optimización de la interacción fluido-estructura, persigue ofrecer soluciones viables para la atenuación de la profundidad de socavación.

- ✓ ***Visita In Situ y validación de resultados.*** Para fortalecer la robustez del estudio, se insta a realizar una visita in situ con el propósito de obtener datos en tiempo real y enriquecer la información mediante mediciones directas. Este enfoque no solo posibilitará mejorar la calibración y validación de los resultados numéricos principalmente para secciones de pila rectangular e hidrodinámica, sino que, también respaldará la legitimidad de los hallazgos mediante la validación experimental con un modelo físico de escenarios preseleccionados.

- ✓ ***Validación en campo.*** Se recomienda la ejecución de pruebas piloto o estudios en campo para validar la eficacia de las medidas de mitigación propuestas. La información adquirida durante estas pruebas posibilitará ajustes en tiempo real, garantizando así la adaptabilidad de las estrategias a condiciones específicas y optimizando la eficacia de las intervenciones propuestas. Esta fase de validación en campo consolida la aplicabilidad pragmática de las soluciones propuestas y su desempeño en condiciones del mundo real.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akib, S., Jahangirzadeh, A., & Basser, H. (2014). Local scour around complex pier groups and combined piles at semi-integral bridge. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(2). <https://doi.org/10.2478/johh-2014-0015>
- Abdelhaleem, F. S. F. (2019). Roughened bridge piers as a scour countermeasure under clear water conditions. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 25(1), 94–103. <https://doi.org/10.1080/09715010.2017.1420498>
- Alasta, M. S., Ali Ali, A. S., Ebrahimi, S., Masood Ashiq, M., Sami Dheyab, A., AlMasri, A., Alqatanani, A., & Khorram, M. (2022). Modeling of Local Scour Depth Around Bridge Pier Using FLOW 3D. *COMPUTATIONAL RESEARCH PROGRESS IN APPLIED SCIENCE & ENGINEERING*, 8(2). <https://doi.org/10.52547/crpase.8.2.2781>
- Álvarez-Mejía, A. L. (2022). “Análisis del acabado superficial en pilas de puentes y su efecto en la profundidad de socavación, aplicando CFD”. [Tesis de maestría] Universidad Autónoma del Estado de México.<http://ri.uaemex.mx/>
- Amini, A., Melville, B. W., Ali, T. M., & Ghazali, A. H. (2012). Clear-Water Local Scour around Pile Groups in Shallow-Water Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000488](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000488)
- Ataie-Ashtiani, B., & Aslani-Kordkandi, A. (2013). Flow field around single and tandem piers. *Flow, Turbulence and Combustion*, 90(3). <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9427-7>
- Ataie-Ashtiani, B., & Beheshti, A. A. (2006). Experimental Investigation of Clear-Water Local Scour at Pile Groups. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(10), 1100–1104. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:10\(1100\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:10(1100))
- Bao, T., & Liu, Z. (2017). Vibration-based bridge scour detection: A review. In *Structural Control and Health Monitoring* (Vol. 24, Issue 7). <https://doi.org/10.1002/stc.1937>
- Batani, S. M., Vosoughifar, H. R., Truce, B., & Jeng, D. S. (2019). Estimation of Clear-Water Local Scour at Pile Groups Using Genetic Expression Programming and Multivariate Adaptive Regression Splines. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 145(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000488](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000488)
- Benjamín, G., Morales, P., Jesús, D. R., Rodríguez, A., Juan, C. M. I., Aguilar, P. M., & Molina Aguilar, P. (2018). *Ingeniería de ríos Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Licenciatura de Ingeniería.*

<http://hidraulica.umich.mx/bperez/APUNTES%20INGENIER%3%8DA%20DE%20R%3%8DOS-AGO-2018%20V-3.pdf>

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber -River modelling simulation tool. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 30(1). <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Brethour J., 2003, Modeling Sediment Scour, Technical note FSI-03-TN-62, Flow Science.
- Breusers, H. N. C., G. Nicollet and H.W. Shen. (1977). Local Scour around Cylindrical Piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15(3). 211-252
- Butt, U., Egbers, C. Flow structure due to hexagonal cavities and bumps on a plate surface. *Thermophys. Aeromech.* **23**, 839–847 (2016). <https://doi.org/10.1134/S0869864316060068>
- Campa Rodriguez, A., & Bustillos Astorga, R. F. (2015). Ingeniería y Tecnología Artículo arbitrado Resumen Methods for quantification of local scour at bridge piers. In *Núm. 1 • Enero-Abril: Vol. IX*.
- Coles, D. (1956). The law of the wake in the turbulent boundary layer, *Journay Fluid Mech.* 1, 191–226. doi: 10.1017/S0022112056000135.
- Díaz-González, E. V. (2016). “Análisis experimental de la socavación local de pilas de puente, con acabado hidrodinámico”. [Tesis de maestría] Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/>
- Dierich, F., & Nikrityuk, P. A. (2013). A numerical study of the impact of surface roughness on heat and fluid flow past a cylindrical particle. *International Journal of Thermal Sciences*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.08.009>
- Duque Escobar, G., & Escobar Potes, C. E. (2016). *GEOMECÁNICA*.
- Drikakis D 2003 Advances in turbulent flow computations using high-resolution methods *Progress in Aerospace Sciences*, 39(6–7), pp. 405–424. doi: 10.1016/S03760421(03)00075-7
- Farooq, R., & Ghumman, A. R. (2019). Impact assessment of pier shape and modifications on scouring around bridge pier. *Water (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/w11091761>
- Fernández Tena, A., & Casan Clarà, P. (2015). Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional a la neumología. *Archivos de Bronconeumología*, 51(6), 293–298. <https://doi.org/10.1016/J.ARBRES.2014.09.005>

FLOW-3D Sedimentation & Scour Model, Technical note FSI-09-TN-85, Flow Science

Fouli, H., & Elsebaie, I. H. (2016). Reducing local scour at bridge piers using an upstream subsidiary triangular pillar. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(12). <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2615-3>

García Guillen, Geovani Samuel. (2019). “*Socavación en Presas y Puente*”. Universidad Nacional Autónoma de México.

Gautam, P., Eldho, T. I., Mazumder, B. S., y Behera, M. R. (2019). Experimental study of flow and turbulence characteristics around simple and complex piers using PIV. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 100(201), 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.09.010>

Heredia Ligorria, A. I. (2017). *caracterización del transporte de sedimentos en un tramo del río tercero (Ctalamochita) utilizando tecnología acústica doppler*. [Tesis de Maestría]Universidad nacional de Córdoba. <http://hdl.handle.net/11086/6475>

Islam, M. R., & Mohany, A. (2020). On the three-dimensional flow development around circular finned cylinders. *Physics of Fluids*, 32(11). <https://doi.org/10.1063/5.0026603>

Jalal, H. K., & Hassan, W. H. (2020). Three-dimensional numerical simulation of local scour around circular bridge pier using Flow-3D software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 745(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012150>

Jaramillo-Mejía, P., & Reyes-Salazar, J. (2019). Evaluation of effect of inclined face bridge pier on the local scour. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(5). <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-04>

Jiménez Pérez, F., Roldán Herrera María Dolores, & Uribe Chávez, Daisy Yessica. (2006). *Reducción de la socavación local en pilas circulares mediante el uso de rugosidades artificiales*. [Tesis de Licenciatura]Instituto Politécnico Nacional. <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/251>

Kumar, V., Raju, K. G. R., & Vittal, N. (1999). Reduction of Local Scour around Bridge Piers Using Slots and Collars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1999\)125:12\(1302\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1999)125:12(1302))

Larras, J. (1963). Profondeurs maximales d'erosion des fonds mobiles autour des piles en riviere, *Ann. Ponts et Chaussees*, 133(4), pp.411-424.

Laursen, E.M. y Toch, A. (1956). Scour around bridge piers and abutments, Bulletin No.4, Iowa Highways Research Board, Ames, Iowa, U.S.A.

- Ma, L., Ashworth, P. J., Best, J. L., Elliott, L., Ingham, D. B., & Whitcombe, L. J. (2002). Computational fluid dynamics and the physical modelling of an upland urban river. *Geomorphology*, 44(3–4). [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00184-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00184-2)
- Maza, A.J.A. y B.J.L. Sánchez. 1968. Contribución al estudio desocavación local en pilas de puentes. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- MELVILLE, B.W. and CHIEW, Y.M. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 125, No. 1, 1999, pp. 59-65.
- Melville, B.W. y A. J. Sutherland. (1988). Design Method for Local Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 114(10). 1210-1226.
- Mendoza Lopez, F.A.(2014) "Modelación del transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente, aplicación al ríos de las cruces, Calimaya Estado de Mexico". [Tesis de Licenciatura] Universidad Autónoma del Estado de México. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/58240>
- Meyer-Peter, E. and Müller, R., 1948, Formulas for bed-load transport. *Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*. pp. 39–64.
- Meyer-Peter, E. y Müller, R. (1948). Formulas for Bed-Load transport. *Hydraulic Engineering Reports*, <http://resolver.tudelft.nl/uuid:4fda9b61-be28-4703-ab06-43cdc2a21bd7>
- Miau, J. J., Tsai, J. H., Hsu, X. Y., Tsai, Z. X., Lai, Y. H., Ciou, Y. S., Shen, P. T., Chuang, P. C., Lebiga, V., Isaev, S., Mironov, D., Pak, A., & Zinovyev, V. (2018). On critical transition of flow over a circular cylinder roughened by textile materials. *AIP Conference Proceedings*, 2027. <https://doi.org/10.1063/1.5065082>
- Modenesi, K., Furlan, L. T., Tomaz, E., Guirardello, R., & Núñez, J. R. (2004). A CFD model for pollutant dispersion in rivers. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 21(4). <https://doi.org/10.1590/S0104-66322004000400005>
- Moncada, A., Aguirre, J., Bolívar, J., & Flores, E. (2007). Efecto de un aro sobre la socavación en pilas circulares. *Ciencia e Ingeniería*, 28(3).
- Muñoz Lozano, I. (2018). *Estudio de la erosión local en pilas de puentes. Aplicación al puente de la N-II Río Tordera*. (Trabajo Fin de Master inédito) Universidad de Sevilla. <https://hdl.handle.net/11441/84194>
- Nieves Rinaudi María (2016). Formulación de un modelo de comportamiento de pilas fundadas con pilotes sometidas a erosión para la inspección y mantenimiento de puentes. <http://hdl.handle.net/11086/4804>

- Okhravi, S., Gohari, S., Alemi, M., & Maia, R. (2023). Numerical modeling of local scour of non-uniform graded sediment for two arrangements of pile groups. *International Journal of Sediment Research*, 38(4). <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2023.04.002>
- Reyes-Ramírez, C. A., & Reyes-Ramírez, J. C. (2020). *Determinación de la socavación para las pilas del puente localizado en el municipio de Riosucio Caldas*. [Trabajo de Grado] Universidad Católica de Colombia. <https://hdl.handle.net/10983/24573>
- Richardson, E.V. & Davis, S.R. (2001). Evaluating Scour at Bridges, Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18), Rep. No. FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington DC, US
- Rocha, A. (2013). *Introducción a la Hidráulica de las Obras Viales Arturo Rocha Felices. Instituto de La Construcción y Gerencia, Tercera Ed*(Fondo Editorial ICG).
- Rodríguez Pérez, R. D. J., & Yataco Manrique, G. Z. (2021). *Comparación de los modelos numéricos 1D y 2D en el análisis de socavación total en el puente Huallaga*. [Tesis de Grado]Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. <http://hdl.handle.net/10757/654632>
- Salgado Maldonado, G., Millán Barrera, C., Gómez Martínez, J., & Castañeda Hernández, C. (2017). *Desarrollo de tecnología para el diseño contra socavación en pilas y estribos de puente mediante rugosidad artificial y diseño hidrodinámico*.
- Salim, M. and Jones, J.S.: Scour around exposed pile foundations, North American Water and Environment Congress, A.S.C.E., Anaheim, U.S.A., June, 1996.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2019). Manual de proyecto geométrico de carreteras. Tercera edición. <https://comunicaciones.edomex.gob.mx/sites/comunicaciones.edomex.gob.mx/files/files/SCT%20-%20Manual%20Proyecto%20Geometrico%20Carreteras%202018.pdf>
- Shahsavari, H., Heidarpour, M., y Mohammadalizadeh, M. (2017). Simultaneous effect of collar and roughness on reducing and controlling the local scour around bridge abutment. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65(2), 491–499. <https://doi.org/10.11118/actaun201765020491>
- Sheppard, D.M. and Glasser, T.: Sediment scour at piers with complex geometries, Proc., 2nd Int. Conf. on Scour and Erosion, World Scientific, Singapore, 2004
- Solares, D.:c. 1989. La socavación en puentes y obras menores, Reunión conjunta sobre socavación en puentes y obras menores de la AHM, AMIVITAC y SMMS. México.
- Soulsby R L and Whitehouse R J S W 1997 Threshold of sediment motion in Coastal Environments Proc. Combined Australian Coastal Engineering and Port Conference, EA, pp. 149-154.

- Toapaxi, J., Galiano, L., Castro, M., Hidalgo, X., & Valencia, N. (2015). Analisis de la Socavacion en Cauces Naturales. *Revista Politecnica*, 35(3).
- Torres Suarez, L. H. (2019). *Análisis experimental de la socavación local en pilas de sección circular en puentes. Modelo en laboratorio*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1019>
- Van Rijn, L. C., 1984, Sediment Transport, Part I: Bed load transport, *Journal of Hydraulic Engineering* 110(10), pp 1431-1456.
- Vásquez, J. A. (2003). Modelación Numérica en Hidráulica. *ResearchGate*, 1(1).
- Vasquez, J., & Walsh, B. (2009). CFD simulation of local scour in complex piers under tidal flow. *Proceedings of the Thirty-Third IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*, 604.
- Urrutia, A.(2010) Análisis y diseño del puente Congreso-San Nicolas del Estado de Puebla,Pue. Memoria para obtener el título de Ingeniero Civil en la Universidad Veracruzana.
- Van Rijn, L. C., 1984, Sediment Transport, Part I: Bed load transport, *Journal of Hydraulic Engineering* 110(10), pp 1431-1456.
- Vijayasree, B. A., Eldho, T. I., Mazumder, B. S., & Ahmad, N. (2019). Influence of bridge pier shape on flow field and scour geometry. *International Journal of River Basin Management*, 17(1). <https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1394315>
- Vite Moreno, J. (2019). *Diseño óptimo de cimentaciones de puentes ante problemas de socavación*. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3520264>
- Voskoboinick, A., Voskoboinick, V., Turick, V., Voskoboinyk, O., Cherny, D., & Tereshchenko, L. (2021). Interaction of Group of Bridge Piers on Scour. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1247 AISC. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_1
- Wei, G., Brethour, J.M., Grüenzner M., and Burnham, J., 2014, The Sediment Scour Model in FLOW-3D, Technical Note FSI-14-TN-99, Flow Science, Inc.
- William, V., Salinas Vázquez, M., & Rodríguez. (2018). *Dinámica de fluidos computacional para el análisis de sistemas de interés práctico que incluye el movimiento de fluidos*. Gaceta Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Zarrati, A. R., Gholami, H., & Mashahir, M. B. (2004). Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 42(1). <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9641188>

Zhang, C., Wu, C., & Wang, P. (2020). Seismic Fragility Analysis of Bridge Group Pile Foundations considering Fluid-Pile-Soil Interaction. *Shock and Vibration*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8838813>

