

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE PANELES
SUMERGIDOS EN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
ALREDEDOR DE PILAS DE PUENTES CON ADV**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MENCIÓN HIDRÁULICA**

JOSELYN STEPHANYA BARROS MORENO

stephanya.barros@gmail.com

JHONNY MARCELO ECHEVERRÍA MEDINA

marcelo_echeverria_93@outlook.com

DIRECTOR: ING. Ph.D. KHALED MOHAMED AHMED HAMAD

Khaled.hamad@epn.edu.ec

Quito, junio 2020

DECLARACIÓN

Nosotros, Joselyn Barros y Marcelo Echeverría, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado todas las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa vigente.

JOSELYN STEPHANYA

BARROS MORENO

JHONNY MARCELO

ECHEVERRÍA MEDINA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Joselyn Stephanya Barros Moreno y Jhonny Marcelo Echeverría Medina, bajo mi supervisión

PhD. Ing. Khaled Hamad M.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por darme salud y fortaleza para seguir cada día con más fuerza que el anterior.

A mis padres, Jhon y Marushia, por su paciencia, apoyo, constancia, amor, por no haberme abandonado cuando creí que no podría seguir, por enseñarme a ser perseverante y no rendirme y a mis hermanos, Joyce, Richard y Joan porque a pesar de las riñas y discrepancias siempre estuvieron cuando los necesité e hicieron que mis momentos más amargos se conviertan en risas y diversión. A mis abuelos, tíos y primos que, a pesar de la distancia, siempre han estado para mí.

A mi pareja, Pedro, por demostrarme que con amor, esfuerzo, perseverancia y paciencia se pueden lograr grandes cosas y alcanzar todas las metas propuestas, por apoyarme y acompañarme en este camino; a mi hijo, Leonardo, por darme fuerza y ánimo para seguir todos los días. Te amo mi pequeño.

A la Escuela Politécnica Nacional y a todos los profesores que dentro o fuera de las aulas de clase me compartieron su conocimiento y experiencia convirtiéndose en la fuente de inspiración para este proyecto; a nuestro director, PhD. Khaled Hamad, por guiarnos, enseñarnos, aclarar todas nuestras dudas, por su esfuerzo y dedicación.

A mi compañero de tesis, Marcelo Echeverría, por su amistad, apoyo, ayuda, compromiso, preocupación y responsabilidad, estoy segura de que el futuro le depara grandes cosas; a mi mejor amigo, Juan Daniel, por estar siempre para mí, por prestarme tu hombro para llorar y tus manos para levantarme, por todo el ánimo que me has dado y las risas que hemos compartido y a su familia que hicieron de él la persona increíble que es.

A todos mis amigos y compañeros con los que compartí dentro y fuera del salón de clase momentos de felicidad, tristeza, preocupación y estrés, porque con ustedes todo fue más llevadero. Gracias infinitas a todos por permitir que esto fuera posible, las palabras no alcanzan para expresar lo importantes que han sido en este proceso.

JOSELYN STEPHANYA BARROS MORENO

AGRADECIMIENTO

Al terminar esta etapa de mi vida debo agradecer a todas las personas que han contribuido para que yo puedo titularme como Ingeniero Civil. Debo empezar por Dios que me dio la salud, a mi mamita Grace y mi hermano Alexander que a la largo de estos años ha sido un pilar de apoyo incondicional que con mucho amor y sacrificio me ha motivado constantemente a culminar mis estudios.

A mi amiga y compañera de tesis, Joselyn Barros, por la amistad, confianza y compromiso que me has demostrado y que ahora finalmente hemos terminado. A mi director de tesis, Ing. Khaled Hamad PhD. por extendernos la mano cuando lo necesitamos y despejar cualquier duda que tuviéramos.

A mis amigas María y Alexa que me han acompañado gran parte de mi vida universitaria y han sabido ayudarme cuando lo he necesitado. A mis amigos Diego Montalvo, Mario Guarderas, Karol Proaño, Darwin Salazar, Carlos Guamán, Karen Martínez, Cristian Lema, Pedro Almendáriz, Andrés Cusme, Walter Aldas, Diana Ramírez, Vanessa Almendáriz, Cristina Rivera, Alexis Zambrano, Mayra Zhunio, María Vizcaino, Daniel Centeno, Iván Males, Jorge Peñafiel, Henry Peñafiel, Carlos Rivera, Ana Catucuamba, Katy Rosero, Karola Sánchez, Jean Jiménez y Adriana Huertas con los que he compartido, alegrías, tristezas, desveladas, lágrimas y abrazos. Mi vida no sería lo mismo sin ustedes.

A la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional y a sus docentes por brindarme la oportunidad y los conocimientos necesarios para culminar mis estudios. A todos gracias de todo corazón por permitirme compartir el camino con ustedes.

JHONNY MARCELO ECHEVERRÍA MEDINA

DEDICATORIA

A mis padres, Jhon y Marushia, sin ustedes esto no sería posible, a Pedro y Leonardo, por su amor y a Delia, mi ángel, sé que desde el cielo me has cuidado todo este tiempo.

JOSELYN STEPHANYA BARROS MORENO

DEDICATORIA

A mi madre, Grace, sin su apoyo, amor y empeño esto no habría sido posible

JHONNY MARCELO ECHEVERRÍA MEDINA

INDICE

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
DEDICATORIA.....	VI
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE	2
1.4 JUSTIFICACIÓN	3
1.4.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	3
1.4.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	3
1.4.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	5
2.1 MARCO TEÓRICO	5
2.1.1 CONCEPTOS BÁSICOS.....	5
2.1.1.1 Fluido	5
2.1.1.2 Fluido Newtoniano	5
2.1.1.3 Número de Reynolds	5
2.1.1.4 Número de Froude	7
2.1.1.5 Capa límite	8
2.1.1.6 Flujo alrededor de un obstáculo	11
2.1.1.7 Vórtices de Von Kármán	12
2.1.2 FLUJO EN CANALES ABIERTOS	15
2.1.2.1 Descripción	15

2.1.2.2	Tipos de flujo.....	15
2.1.2.3	Regímenes de flujo	16
2.1.2.4	Distribución de velocidades.....	17
2.1.3	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	19
2.1.3.1	Principio de inicio del movimiento	20
2.1.3.2	Aguas claras y lecho móvil.....	24
2.1.4	TURBULENCIA	25
2.1.4.1	Métodos de cálculo	28
2.1.4.2	Modelo de turbulencia $k-\varepsilon$	29
2.1.4.3	Modelo de turbulencia $k-\omega$	30
2.1.4.4	Análisis de turbulencia	31
2.1.5	SOCAVACIÓN	41
2.1.5.1	Definición	42
2.1.5.4	Proceso de erosión en pilas de puentes	43
2.1.5.5	Factores determinantes de la socavación local.....	45
2.1.5.6	Equilibrio profundidad de la socavación local.....	46
2.1.5.7	Estimación de la máxima socavación local en pilas	48
2.1.6	PANELES SUMERGIDOS	64
2.1.6.1	Panel doble	66
2.2	ESTADO DEL ARTE.	68
2.2.1	ESTUDIOS SOBRE ANÁLISIS DE TURBULENCIA.	68
	Boussinesq (1877).....	68
	Reynolds (1883, 1895)	68
	Prandtl (1904, 1925).....	69
	Taylor (1923)	69
	Kolmogórov (1941)	70
	Rotta (1951).....	70
	Chiliquinga y Pinto (2019)	71
2.2.2	ESTUDIOS SOBRE PANELES SUMERGIDOS.....	72
	Odgaard (1983 - 1990)	72
	Ghorbani y Kells (2008).....	73
	Ouyang y Lai (2013)	73

Hamad (2015).....	74
Türkben (2018).....	74
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	75
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL CANAL	75
3.2 CONDICIONES DE CONTORNO	84
3.3 ENSAYO DE INICIO DEL MOVIMIENTO	86
3.4 PREPARACIÓN DE EXPERIMENTOS.....	88
3.4.1 SOCAVACIÓN EN PILA CUADRADA SIN PANELES	88
3.4.2 SOCAVACIÓN EN PILA CUADRADA CON PANELES	90
3.4.3 SOCAVACIÓN EN PILA CIRCULAR SIN PANELES	97
3.4.4 SOCAVACIÓN EN PILA CIRCULAR CON PANELES	98
3.5 MATERIALES E INSTRUMENTOS.....	99
3.5.1 PILAS DE HORMIGÓN	99
3.5.2 LIMNÍMETRO.....	100
3.5.3 SONDA ADV Y SOPORTE	101
3.5.4 SEDIMENTO	103
3.5.5 PALA Y FLEXÓMETRO	104
3.5.5 COMPUTADOR Y CÁMARA FOTOGRÁFICA	104
3.6 PLAN DE PRUEBAS.....	106
3.7 REGISTRO DE VELOCIDADES INSTANTÁNEAS	107
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES	109
5.1 TRATAMIENTO DE DATOS	109
4.1.1 PILA CUADRADA	109
4.1.1.1 Análisis de velocidades.....	109
4.1.1.2 Análisis de turbulencia	116
4.1.1.3 Análisis de erosión	161
4.1.2 PILA CIRCULAR	168
4.1.2.1 Análisis de velocidades.....	168
4.1.2.2 Análisis de turbulencia	174
4.1.2.3 Análisis de erosión	216
5.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS	223

4.2.1	PILA CUADRADA CON Y SIN PANELES SUMERGIDOS	223
4.2.1.1	Velocidades instantáneas	223
4.2.1.2	Tensiones de Reynolds.....	227
4.2.1.3	Intensidades turbulentas	231
4.2.1.4	Energía cinética y disipación turbulenta.....	235
4.2.1.5	Escalas de Kolmogórov	238
4.2.1.6	Socavación.....	242
4.2.2	PILA CIRCULAR CON Y SIN PANELES SUMERGIDOS	244
4.2.2.1	Velocidades instantáneas.....	244
4.2.2.2	Tensiones de Reynolds.....	249
4.2.2.3	Intensidad turbulenta.....	253
4.2.2.4	Energía cinética y disipación turbulenta.....	257
4.2.2.5	Escalas de Kolmogórov	260
4.2.2.6	Socavación.....	264
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		266
CAPÍTULO 6: REFERENCIAS		269

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Experimento de Reynolds	6
Figura 2-2 Regímenes de flujo	7
Figura 2-3 Interacción entre un cuerpo sumergido y las líneas de corriente a) caso ideal, b) caso real	9
Figura 2-4 Flujo alrededor de una placa a) Reynolds bajos, b) Reynolds altos.....	10
Figura 2-5 Patrón de flujo alrededor de una pila cilíndrica	11
Figura 2-6 Vórtices de Von Kármán	13
Figura 2-7 Flujo detrás de un cilindro	14
Figura 2-8 Flujo en canales abiertos	15
Figura 2-9 Tipos de flujo.....	16
Figura 2-10 Relación profundidad-velocidad para cuatro regímenes de flujo en canales abiertos.....	17
Figura 2-11 Distribución de velocidades en un canal rectangular	18
Figura 2-12 Efecto de la rugosidad en la curva de distribución de velocidades	18
Figura 2-13 Clasificación del transporte de sedimentos	19
Figura 2-14 Transporte de sedimento	20
Figura 2-15 Diagrama de Shields con el parámetro ASCE	23
Figura 2-16 Hidrodinámica y morfología de un foso de erosión local.....	24
Figura 2-17 Erosión local en pilas según la velocidad de la corriente	25
Figura 2-18 Causas de colapso de puentes en Colombia	41
Figura 2-19 Esquema de las zonas de erosión en una pila.....	44
Figura 2-20 Formas de fondo: (a) arrugas; (b) dunas; (c) anti dunas; (d) rápidos y pozos	46
Figura 2-21 Formas típicas de pilas	50
Figura 2-22 Valores K_1 . Método de Laursen y Toch.....	55
Figura 2-23 Valores K_2 . Método Laursen y Toch.....	55
Figura 2-24 Valores K_3 . Método de Larsen y Toch.....	56
Figura 2-25 Ábaco para pilas de sección rectangular. Método Maza-Sánchez.....	59
Figura 2-26 Ábaco para pilas de sección circular. Método Maza-Sánchez	60
Figura 2-27 Esquema de circulación inducida por un panel sumergido	65

Figura 2-28 Esquema de circulación inducida por tres paneles sumergidos.....	66
Figura 3-1 Canal hidrodinámico CIERHI-EPN.....	75
Figura 3-3-2 Instalaciones canal CIERHI-EPN a) aguas arriba, b) aguas abajo ...	76
Figura 3-3 Limnímetros encerados.....	78
Figura 3-4 Manómetro.....	78
Figura 3-5 Medición de Δh	79
Figura 3-6 Hoja de datos curva de descarga vertedero triangular.....	79
Figura 3-7 Vertedero triangular con contracciones.....	80
Figura 3-8 Coeficiente μ según la U. de Chile	81
Figura 3-9 Coeficiente k_v según la U. de Chile	81
Figura 3-10 Curva de descarga del vertedero triangular con contracciones	84
Figura 3-11 Ubicación de pilas y paneles en el canal	85
Figura 3-12 Socavación alrededor de la pila cuadrada sin paneles	89
Figura 3-13 Espaciamiento entre paneles.....	93
Figura 3-14 Paneles sumergidos.....	95
Figura 3-15 Remoción del sedimento para colocar los paneles	95
Figura 3-16 Ubicación de los paneles sumergidos.....	96
Figura 3-17 Socavación en pila cuadrada con paneles sumergidos	96
Figura 3-18 Socavación en pila circular sin paneles	97
Figura 3-19 Paneles colocados con pila circular	98
Figura 3-20 Geometría de pilas.....	100
Figura 3-21 Limnímetro	101
Figura 3-22 Componentes del velocímetro	102
Figura 3-23 Partes del soporte para ADV	103
Figura 3-24 Capa de sedimento en la sección de control	104
Figura 3-25 Interfaz software FlowTracker2.....	105
Figura 4-1 Velocidad instantánea (u_x) vs Posición (Y) Pila cuadrada.....	109
Figura 4-2 Velocidad instantánea (u_y) vs Posición (Y) Pila cuadrada.....	110
Figura 4-3 Velocidad instantánea (u_z) vs Posición (Y) Pila cuadrada.....	111
Figura 4-4 Velocidad instantánea (u_x) vs Posición (X) Pila cuadrada.....	113
Figura 4-5 Velocidad instantánea (u_y) vs Posición (X) Pila cuadrada.....	114
Figura 4-6 Velocidad instantánea (u_z) vs Posición (X) Pila cuadrada.....	115

Figura 4-7 Desviación estándar (σ_x) vs Posición (Y) Pila cuadrada	116
Figura 4-8 Desviación estándar (σ_y) vs Posición (Y) Pila cuadrada	117
Figura 4-9 Desviación estándar (σ_z) vs Posición (Y) Pila cuadrada	117
Figura 4-10 Desviación estándar (σ_x) vs Posición (X) Pila cuadrada	119
Figura 4-11 Desviación estándar (σ_y) vs Posición (X) Pila cuadrada	120
Figura 4-12 Desviación estándar (σ_z) vs Posición (X) Pila cuadrada	121
Figura 4-13 Tipos de distribución de probabilidad en función del Skewness factor	122
Figura 4-14 Skewness factor (S_x) vs Posición (Y) Pila cuadrada	123
Figura 4-15 Skewness factor (S_y) vs Posición (Y) Pila cuadrada	123
Figura 4-16 Skewness factor (S_z) vs Posición (Y) Pila cuadrada	124
Figura 4-17 Skewness factor (S_x) vs Posición (X) Pila cuadrada	125
Figura 4-18 Skewness factor (S_y) vs Posición (X) Pila cuadrada	126
Figura 4-19 Skewness factor (S_z) vs Posición (X) Pila cuadrada	127
Figura 4-20 Tipos de distribución de probabilidad en función del Kurtosis factor.	128
Figura 4-21 Kurtosis factor (d_x) vs Posición (Y) Pila cuadrada	129
Figura 4-22 Kurtosis factor (d_y) vs Posición (Y) Pila cuadrada	129
Figura 4-23 Kurtosis factor (d_z) vs Posición (Y) Pila cuadrada	130
Figura 4-24 Kurtosis factor (d_x) vs Posición (X) Pila cuadrada	131
Figura 4-25 Kurtosis factor (d_y) vs Posición (X) Pila cuadrada	132
Figura 4-26 Kurtosis factor (d_z) vs Posición (X) Pila cuadrada	133
Figura 4-27 Tensión de Reynolds (ζ_{xx}) vs Posición (Y) Pila cuadrada	134
Figura 4-28 Tensión de Reynolds (ζ_{yy}) vs Posición (Y) Pila cuadrada	135
Figura 4-29 Tensión de Reynolds (ζ_{zz}) vs Posición (Y) Pila cuadrada	135
Figura 4-30 Tensión de Reynolds (ζ_{xy}) vs Posición (Y) Pila cuadrada	136
Figura 4-31 Tensión de Reynolds (ζ_{yz}) vs Posición (Y) Pila cuadrada	137
Figura 4-32 Tensión de Reynolds (ζ_{xz}) vs Posición (Y) Pila cuadrada	137
Figura 4-33 Tensión de Reynolds (ζ_{xx}) vs Posición (X) Pila cuadrada	139
Figura 4-34 Tensión de Reynolds (ζ_{yy}) vs Posición (X) Pila cuadrada	140
Figura 4-35 Tensión de Reynolds (ζ_{zz}) vs Posición (X) Pila cuadrada	141
Figura 4-36 Tensión de Reynolds (ζ_{xy}) vs Posición (X) Pila cuadrada	142

Figura 4-37 Tensión de Reynolds (ζ_{yz}) vs Posición (X) Pila cuadrada	143
Figura 4-38 Tensión de Reynolds (ζ_{xz}) vs Posición (X) Pila cuadrada	144
Figura 4-39 Intensidad turbulenta (TI_x) vs Posición (Y) Pila cuadrada	145
Figura 4-40 Intensidad turbulenta (TI_y) vs Posición (Y) Pila cuadrada	146
Figura 4-41 Intensidad turbulenta (TI_z) vs Posición (Y) Pila cuadrada	146
Figura 4-42 Intensidad turbulenta (TI_x) vs Posición (X) Pila cuadrada	148
Figura 4-43 Intensidad turbulenta (TI_y) vs Posición (X) Pila cuadrada	149
Figura 4-44 Intensidad turbulenta (TI_z) vs Posición (X) Pila cuadrada	150
Figura 4-45 Energía cinética (k) vs Posición (Y) Pila cuadrada.....	151
Figura 4-46 Disipación turbulenta (ϵ) vs Posición (Y) Pila cuadrada	151
Figura 4-47 Energía cinética (k) vs Posición (X) Pila cuadrada.....	153
Figura 4-48 Disipación turbulenta (ϵ) vs Posición (X) Pila cuadrada.....	154
Figura 4-49 Escala de longitud (η_k) vs Posición (Y) Pila cuadrada.....	155
Figura 4-50 Escala de tiempo (t_η) vs Posición (Y) Pila cuadrada	156
Figura 4-51 Escala de velocidad (U_η) vs Posición (Y) Pila cuadrada	156
Figura 4-52 Escala de longitud (η_k) vs Posición (X) Pila cuadrada.....	158
Figura 4-53 Escala de tiempo (t_η) vs Posición (X) Pila cuadrada	159
Figura 4-54 Escala de velocidad (U_η) vs Posición (X) Pila cuadrada	160
Figura 4-55 Forma del lecho con paneles sumergidos. Pila cuadrada.....	167
Figura 4-56 Velocidad instantánea (u_x) vs Posición (Y) Pila circular	168
Figura 4-57 Velocidad instantánea (u_y) vs Posición (Y) Pila circular	169
Figura 4-58 Velocidad instantánea (U_z) vs Posición (Y) Pila circular	169
Figura 4-59 Velocidad instantánea (u_x) vs Posición (X) Pila circular	171
Figura 4-60 Velocidad instantánea (u_y) vs Posición (X) Pila circular	172
Figura 4-61 Velocidad instantánea (u_z) vs Posición (X) Pila circular	173
Figura 4-62 Desviación estándar (σ_x) vs Posición (Y) Pila circular.....	174
Figura 4-63 Desviación estándar (σ_y) vs Posición (Y) Pila circular.....	175
Figura 4-64 Desviación estándar (σ_z) vs Posición (Y) Pila circular.....	175
Figura 4-65 Desviación estándar (σ_x) vs Posición (X) Pila circular.....	177
Figura 4-66 Desviación estándar (σ_y) vs Posición (X) Pila circular.....	178
Figura 4-67 Desviación estándar (σ_z) vs Posición (X) Pila circular.....	179
Figura 4-68 Skewness factor (S_x) vs Posición (Y) Pila circular.....	180

Figura 4-69 Skewness factor (S_y) vs Posición (Y) Pila circular.....	180
Figura 4-70 Skewness factor (S_z) vs Posición (Y) Pila circular.....	181
Figura 4-71 Skewness factor (S_x) vs Posición (X) Pila circular.....	182
Figura 4-72 Skewness factor (S_y) vs Posición (X) Pila circular.....	183
Figura 4-73 Skewness factor (S_z) vs Posición (X) Pila circular.....	184
Figura 4-74 Kurtosis factor (d_x) vs Posición (Y) Pila circular	185
Figura 4-75 Kurtosis factor (d_y) vs Posición (Y) Pila circular	185
Figura 4-76 Kurtosis factor (d_z) vs Posición (Y) Pila circular	186
Figura 4-77 Kurtosis factor (d_x) vs Posición (X) Pila circular	187
Figura 4-78 Kurtosis factor (d_y) vs Posición (X) Pila circular	188
Figura 4-79 Kurtosis factor (d_z) vs Posición (X) Pila circular	189
Figura 4-80 Tensión de Reynolds (ζ_{xx}) vs Posición (Y) Pila circular	190
Figura 4-81 Tensión de Reynolds (ζ_{yy}) vs Posición (Y) Pila circular	191
Figura 4-82 Tensión de Reynolds (ζ_{zz}) vs Posición (Y) Pila circular	191
Figura 4-83 Tensión de Reynolds (ζ_{xy}) vs Posición (Y) Pila circular	192
Figura 4-84 Tensión de Reynolds (ζ_{yz}) vs Posición (Y) Pila circular	193
Figura 4-85 Tensión de Reynolds (ζ_{xz}) vs Posición (Y) Pila circular	193
Figura 4-86 Tensión de Reynolds (ζ_{xx}) vs Posición (X) Pila circular	195
Figura 4-87 Tensión de Reynolds (ζ_{yy}) vs Posición (X) Pila circular	196
Figura 4-88 Tensión de Reynolds (ζ_{zz}) vs Posición (X) Pila circular	197
Figura 4-89 Tensión de Reynolds (ζ_{xy}) vs Posición (X) Pila circular	198
Figura 4-90 Tensión de Reynolds (ζ_{yz}) vs Posición (X) Pila circular	199
Figura 4-91 Tensión de Reynolds (ζ_{xz}) vs Posición (X) Pila circular	200
Figura 4-92 Intensidad turbulenta (TI_x) vs Posición (Y) Pila circular.....	201
Figura 4-93 Intensidad turbulenta (TI_y) vs Posición (Y) Pila circular.....	202
Figura 4-94 Intensidad turbulenta (TI_z) vs Posición (Y) Pila circular.....	202
Figura 4-95 Intensidad turbulenta (TI_x) vs Posición (X) Pila circular.....	204
Figura 4-96 Intensidad turbulenta (TI_y) vs Posición (X) Pila circular.....	205
Figura 4-97 Intensidad turbulenta (TI_z) vs Posición (X) Pila circular.....	206
Figura 4-98 Energía cinética (k) vs Posición (Y) Pila circular	207
Figura 4-99 Disipación turbulenta (ϵ) vs Posición (Y) Pila circular	207
Figura 4-100 Energía cinética (k) vs Posición (X) Pila circular	209

Figura 4-101 Disipación turbulenta (ϵ) vs Posición (X) Pila circular	210
Figura 4-102 Escala de longitud (η_k) vs Posición (Y) Pila circular	211
Figura 4-103 Escala de tiempo (t_η) vs Posición (Y) Pila circular	212
Figura 4-104 Escala de velocidad (U_η) vs Posición (Y) Pila circular	212
Figura 4-105 Escala de longitud (η_k) vs Posición (X) Pila circular	213
Figura 4-106 Escala de tiempo (t_η) vs Posición (X) Pila circular.....	214
Figura 4-107 Escala de velocidad (U_η) vs Posición (X) Pila circular.....	215
Figura 4-108 Forma del lecho con paneles sumergidos, Pila circular	222
Figura 4-109 Comparación velocidad instantánea (u_x) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	224
Figura 4-110 Comparación velocidad instantánea (u_y) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	225
Figura 4-111 Comparación velocidad instantánea (u_z) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	226
Figura 4-112 Comparación Tensión de Reynolds (ζ_{xx}) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	228
Figura 4-113 Comparación Tensión de Reynolds (ζ_{xy}) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	229
Figura 4-114 Comparación Tensión de Reynolds (ζ_{xz}) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	230
Figura 4-115 Comparación intensidad turbulenta (T.I.x) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	232
Figura 4-116 Comparación intensidad turbulenta (T.I.y) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	233
Figura 4-117 Comparación intensidad turbulenta (T.I.z) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	234
Figura 4-118 Comparación energía cinética (k) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	236
Figura 4-119 Comparación disipación turbulenta (ϵ) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	237
Figura 4-120 Comparación escala de longitud (η_k) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	239

Figura 4-121 Comparación escala de tiempo (t_n) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	240
Figura 4-122 Comparación escala de velocidad (U_n) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada	241
Figura 4-123 Esquema niveles para análisis socavación	242
Figura 4-124 Comparación velocidad instantánea (u_x) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	246
Figura 4-125 Comparación velocidad instantánea (u_y) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	247
Figura 4-126 Comparación velocidad instantánea (u_z) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	248
Figura 4-127 Comparación Tensión de Reynolds (ζ_{xx}) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	250
Figura 4-128 Comparación Tensión de Reynolds (ζ_{xy}) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	251
Figura 4-129 Comparación Tensión de Reynolds (ζ_{xz}) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	252
Figura 4-130 Comparación intensidad turbulenta (T.I. _x) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	254
Figura 4-131 Comparación intensidad turbulenta (T.I. _y) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	255
Figura 4-132 Comparación intensidad turbulenta (T.I. _z) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	256
Figura 4-133 Comparación energía cinética (k) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	258
Figura 4-134 Comparación disipación turbulenta (ϵ) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	259
Figura 4-135 Comparación escala de longitud (n_k) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	261
Figura 4-136 Comparación escala de tiempo (t_n) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	262

Figura 4-137 Comparación escala de velocidad (U_n) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular	263
Figura 4-138 Esquema de niveles para comparar la socavación	264

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1	Número de Froude y Reynolds para cada régimen -----	16
Tabla 2-2	Condición de flujo -----	23
Tabla 2-3	Factor K_f . Método CSU-----	50
Tabla 2-4	Factor K_β . Método CSU-----	51
Tabla 2-5	Factor K_{cf} . Método CSU -----	51
Tabla 2-6	Valores f_c . Método Maza-Sánchez-----	57
Tabla 2-7	Coeficiente K_{hd} . Método Melville y Coleman -----	62
Tabla 2-8	Coeficiente K_1 . Método Melville y Coleman -----	62
Tabla 2-9	Coeficiente K_d . Método Melville y Coleman -----	62
Tabla 2-10	Coeficiente K_α . Método de Melville y Coleman -----	63
Tabla 2-11	Coeficiente K_{sh} . Método Melville y Coleman-----	63
Tabla 2-12	Coeficiente k_t . Método de Melville y Coleman-----	63
Tabla 3-1	Datos aforo volumétrico -----	82
Tabla 3-2	Resultados aforo volumétrico -----	83
Tabla 3-3	Condiciones de contorno para los ensayos -----	85
Tabla 3-4	Ensayo de inicio del movimiento -----	86
Tabla 3-5	Parámetros hidráulicos del inicio del movimiento-----	87
Tabla 3-6	Dimensionamiento de paneles sumergidos -----	94
Tabla 3-7	Resultado ensayo de resistencia del hormigón -----	99
Tabla 3-8	Dimensiones de las pilas -----	100
Tabla 3-9	Diámetros característicos de la muestra -----	104
Tabla 3-10	Plan de pruebas para el levantamiento del fondo-----	106
Tabla 3-11	Plan de pruebas para el registro de velocidades con el ADV-----	106
Tabla 4-1	Rango de variación de la desviación estándar eje y. Pila cuadrada--	118
Tabla 4-2	Rango de variación de la desviación estándar eje z. Pila cuadrada--	118
Tabla 4-3	Método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU). Pila cuadrada	161
Tabla 4-4	Método de Froehlich (1991). Pila cuadrada -----	162
Tabla 4-5	Método de Laursen y Toch (1956). Pila cuadrada-----	162
Tabla 4-6	Método de Maza-Sánchez (1968). Pila cuadrada -----	163
Tabla 4-7	Método de Melville y Coleman (2000). Pila cuadrada -----	164

Tabla 4-8 Leyenda del levantamiento de la forma del lecho con la pila cuadrada -----	166
Tabla 4-9 Elevaciones y depresiones ocurridas en el lecho con la pila cuadrada -----	166
Tabla 4-10 Rango de variación de la desviación estándar eje Z. Pila circular---	176
Tabla 4-11 Método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU). Pila circular	216
Tabla 4-12 Método de Froehlich (1991). Pila circular -----	217
Tabla 4-13 Método de Laursen y Toch (1956). Pila circular -----	217
Tabla 4-14 Método de Maza-Sánchez (1968). Pila circular-----	218
Tabla 4-15 Método de Melville y Coleman (2000). Pila circular -----	219
Tabla 4-16 Leyenda del levantamiento de la forma del lecho con la pila circular	221
Tabla 4-17 Elevaciones y depresiones ocurridas en el lecho con la pila circular -----	221
Tabla 4-18 Resumen de socavación teórica. Pila cuadrada-----	243
Tabla 4-19 Comparación entre socavaciones. Pila cuadrada-----	243
Tabla 4-20 Resumen de socavación teórica. Pila circular -----	265
Tabla 4-21 Comparación entre socavaciones. Pila circular-----	265

RESUMEN

Siendo la socavación una de las principales amenazas y causa de daños en los puentes, la búsqueda de elementos que reduzcan este efecto es de gran importancia para la ingeniería hidráulica permitiendo alargar la vida útil de estas estructuras. Dentro de este contexto, el uso de paneles sumergidos podría generar una importante disminución de la socavación local alrededor de las pilas de los puentes.

El presente trabajo es un análisis del fondo del lecho y medición experimental de la socavación localizada al pie de una pila de puente y los cambios que ocurren debido a la aplicación de paneles sumergidos aguas arriba de esta, así como también un análisis de los parámetros de la turbulencia generada aguas abajo de la pila. Para su desarrollo se utilizaron dos pilas de hormigón de sección cuadrada y circular sobre un lecho de arena colocado dentro del canal hidrodinámico ubicado en las instalaciones del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional.

Usando un registro de erosiones y forma del lecho antes y después de colocar los paneles se realiza una comparación a fin de cuantificar de forma porcentual la disminución del efecto. La medición de velocidades instantáneas aguas abajo de la pila usando un ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), posterior filtrado y análisis de turbulencia permite caracterizar al flujo y observar su evolución a lo largo de la sección de control.

Los resultados obtenidos se presentarán en forma de gráficos que serán comparados con los de Chilibringa y Pinto (2019) debido a que las condiciones del flujo son las mismas. Finalmente se determina en qué medida los paneles sumergidos reducen la socavación localizada al pie de las pilas.

Palabras clave: Socavación, paneles sumergidos, ADV, turbulencia.

ABSTRACT

As undercutting is one of the main threats and cause of damage to bridges, the search for elements that reduce this effect is of great importance for hydraulic engineering, allowing the useful life of these structures to be extended. Within this context, the use of submerged vanes could generate a significant decrease in local scour around bridge piers.

The present work is an analysis of the bed bottom and experimental measurement of the localized scour generated due to the application of submerged vanes upstream of the bridge pier, as well as an analysis of the parameters of the turbulence generated downstream of the pier. For its development, two concrete piers of square and circular section were used on a bed of sand placed inside the hydrodynamic channel located in the facilities of the Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI) at the Escuela Politécnica Nacional.

Using a record of erosion and bed shape before and after placing the vanes, a comparison is made in order to quantify the decrease in the effect in percentage terms. Measurement of instantaneous velocities downstream of the pier using an ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), subsequent filtering and turbulence analysis allows characterizing the flow and observing its evolution throughout the control section.

Results are presented as graphs that when compared with those of Chiliquinga and Pinto (2019) allow us to determine to what extent submerged panels reduce the undercut located at the foot of the piers.

Keywords: Undercut, submerged vanes, ADV, turbulence.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Los puentes a lo largo de la historia han servido para comunicar dos puntos geográficos separados por accidentes geográficos como ríos, acantilados, cañones, etc. Estas estructuras tienen una gran importancia social, económica y cultural puesto que puentes construidos hace más de 2000 años hoy en día se mantienen en pie y siguen generando aportes a las localidades en donde se encuentran. Por estas razones en su diseño se deben considerar todas las posibles amenazas a las que estará sujeta la estructura para maximizar la vida útil de la misma.

Una de las principales amenazas y causas de colapso en puentes es la socavación localizada alrededor de las pilas. Según un estudio publicado por la Pontificia Universidad Javeriana sobre las causas de colapsos de 63 puentes en Colombia desde el año 1986 hasta 2001 se observa que el 35% de las causas de colapso corresponden a fallas por socavación (Muñoz, 2003).

Para disminuir el efecto de socavación en pilas se propone utilizar paneles sumergidos que constituye una técnica simple y de bajo costo. Jacob Odgaard del Instituto de Investigación Hidráulica de Iowa (IIHR por sus siglas en inglés) ha estudiado estos paneles desde el año 1980 (Hamad, 2015). El principal objetivo de estos paneles es cambiar la dirección del flujo y su aplicación se puede ver en varios campos como son: protección de bancos, mejoramiento de bancos de arena y control de sedimentos en desviaciones y tomas de agua (Odgaard, 2009).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar los efectos que se producen en el transporte de sedimentos entre el uso y la ausencia de paneles sumergidos.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comprender el transporte de sedimentos, sus causas, propiedades y consecuencias.
- Comprender el fenómeno de turbulencia alrededor de pilas de puentes y sus propiedades.
- Registrar las velocidades instantáneas a lo largo de la sección de control para una pila de sección cuadrada y circular en el modelo físico usando la sonda ADV disponible en el CIERHI-EPN.
- Calcular las velocidades medias, distribución de probabilidades del campo de velocidad, tensiones de Reynolds, energía cinética turbulenta, disipación turbulenta, intensidades turbulentas y escalas de Kolmogórov para la pila cuadrada y circular en presencia de paneles sumergidos.
- Comparar los resultados de esta experimentación con “Análisis experimental en modelo físico de fenómenos de turbulencia causantes de erosión alrededor de pilas de puentes utilizando Acoustic Doppler Velocimeter ADV” (2019).

1.3 ALCANCE

Para la realización de esta tesis fueron utilizadas las instalaciones e instrumentos del Centro de Investigación y Estudios en Recursos Hídricos CIERHI de la Escuela Politécnica Nacional, las condiciones de contorno y el sedimento utilizado cumple con características similares al usado en “Análisis experimental en modelo físico de fenómenos de turbulencia causantes de erosión alrededor de pilas de puentes utilizando Acoustic Doppler Velocimeter ADV” con el fin de poder realizar una comparación entre ambos estudios y observar la eficiencia que tienen los paneles sumergidos para reducir la socavación localizada alrededor de pilas de puentes.

1.4 JUSTIFICACIÓN

1.4.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Los paneles sumergidos son pequeñas estructuras hidráulicas que modifican el curso del flujo en sus inmediaciones y redistribuyen el transporte de sedimentos (Huei-Tau & Jihn-Sung, 2013).

Las estructuras se instalan en un ángulo de ataque de 15-25 ° con el flujo, y su altura inicial es 0,2 a 0,4 veces la profundidad del agua local en la etapa de diseño.

Funcionan generando una circulación secundaria en el flujo (Odgaard & Wang, 1991). Esta circulación ocurre debido a una diferencia de presiones entre los extremos del panel generando un vórtice que se desplaza con el flujo produciendo un movimiento helicoidal asociado a cambios en la magnitud y la dirección de los esfuerzos tangenciales del lecho y en las distribuciones de velocidad, profundidad y transporte de sedimentos en el área afectada por las paletas (Odgaard & Spoljaric, 1986).

1.4.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

Debido a la falta de herramientas analíticas, el diseño de las estructuras de desvío a menudo debe basarse en estudios de modelos físicos (Odgaard & Spoljaric, 1986) donde es necesaria una caracterización del canal (ancho, pendiente, topografía del fondo, etc.), una descripción de los equipos y materiales a usarse en los experimentos al igual que sus restricciones.

Para la medición de las velocidades se usará un Acoustic Doppler Velocimeter (ADV por sus siglas en inglés) que es un dispositivo que permite realizar mediciones en cursos de agua de poca profundidad, consta de un transmisor que envía una serie de ondas sonoras a una determinada frecuencia y velocidad y tres receptores acústicos que reciben la señal luego de ser reflejada en un volumen de muestreo ubicado a 10 cm del transmisor (Palman et al., 2015).

El ADV ofrece una medición de flujo tridimensional basado en la información captada por los tres sensores (Voulgaris & Trowbridge, 1998) y utiliza la tecnología acústica Doppler para medir la velocidad. El efecto Doppler es el cambio de frecuencia aparente de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador (Rodríguez, 2015).

1.4.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

Una comparación entre el uso y la ausencia de los paneles sumergidos y su efecto en el transporte de sedimentos, el análisis de velocidades y de turbulencia alrededor de pilas de puente es de gran importancia debido a que son una solución simple y económica ante otras obras hidráulicas. Los resultados de este estudio experimental permitirán tener una visión más clara de lo que ocurre con la socavación alrededor de las pilas en presencia de los paneles sumergidos y contribuirán a optimizar el procedimiento de diseño de estas estructuras a fin de mejorar su capacidad de respuesta ante eventos extremos, con lo que se extenderá, además, su periodo de vida útil.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 CONCEPTOS BÁSICOS

2.1.1.1 Fluido

La materia se puede clasificar en tres estados: sólido, líquido y gaseoso, estos dos últimos conocidos como fluidos. Son sustancias que se deforman continuamente por acción de un esfuerzo cortante, el espacio y las fuerzas intermoleculares son mayores que en lo sólidos, no se comprimen con facilidad y presentan fuerzas tangenciales en su interior cuando están en movimiento (Sotelo, 1997).

2.1.1.2 Fluido Newtoniano

Un fluido newtoniano es un fluido cuya viscosidad permanece constante en el tiempo y que al aplicar una fuerza sobre el fluido su esfuerzo cortante es directamente proporcional a la rapidez de deformación. (White, 2003)

2.1.1.3 Número de Reynolds

La viscosidad hace que el flujo ocurra en dos regímenes muy diferentes; el del flujo laminar y el del flujo turbulento.

Osborne Reynolds realizó experimentos que permitieron demostrar las características de estos regímenes usando un sistema como el de la Figura 2-1. En esta figura se observa un tanque conectado a un tubo de vidrio con boca de campana a través del cual fluye agua, que se controla con la válvula A. Un tubo delgado, B, procedente del depósito de tinta, C, se coloca dentro de la entrada del tubo de vidrio.

Reynolds descubrió que cuando la velocidad dentro del tubo de vidrio es baja, un filamento delgado de tinte se mantiene formando una línea delgada paralela al eje del tubo; sin embargo, al abrirse más la válvula y aumentar la velocidad del flujo el filamento del tinte se ondula y se rompe difundiéndose en el agua (Street & Vennard, 1979).

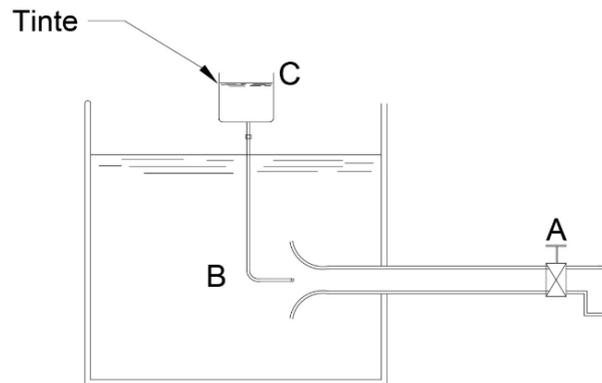


Figura 2-1 Experimento de Reynolds

Fuente: Street & Vennard (1979)

De este experimento se puede definir:

Flujo laminar es aquel en el que las fuerzas viscosas son muy fuertes en relación con las inerciales, se caracteriza porque el movimiento de las partículas se produce siguiendo trayectorias separadas perfectamente definidas (no necesariamente paralelas) sin existir mezcla o intercambio transversal (Sotelo, 1997).

Flujo turbulento es aquel en el que las fuerzas viscosas son débiles en relación con las inerciales, se caracteriza porque las partículas se mueven en trayectorias erráticas pero que en conjunto todavía representan el movimiento hacia adelante de la corriente entera (Chow, 1994).

En la Figura 2-2 se observan las trayectorias del flujo laminar (izquierda) y del flujo turbulento (derecha).

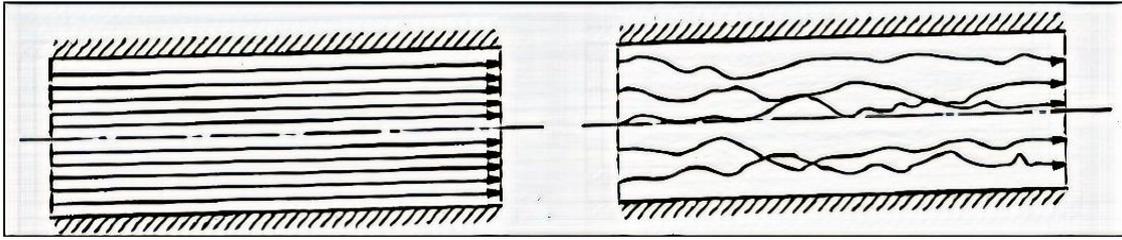


Figura 2-2 Regímenes de flujo

Fuente: Sotelo (1997)

Reynolds pudo generalizar sus conclusiones acerca de los experimentos realizados mediante la introducción de un término adimensional Re conocido como el número de Reynolds definido por:

$$Re = \frac{VR_h}{\nu} \quad (2.1)$$

Donde: V es la velocidad promedio del flujo (m/s)

R_h es el radio hidráulico (m). Definido como la relación entre el área hidráulica y el perímetro mojado de la sección.

ν es la viscosidad cinemática del agua (m²/s).

2.1.1.4 Número de Froude

La relación entre las fuerzas inerciales y la fuerza gravitacional que actúan sobre el flujo está dada por el número de Froude definido como:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (2.2)$$

Donde: g es la aceleración de la gravedad (m/s²)

y es el calado (m) para canales abiertos.

- Si $Fr = 1$ se dice que el estado del flujo es crítico.
- Si $Fr < 1$ el estado es subcrítico, esto quiere decir que las fuerzas gravitacionales son muy fuertes en relación a las fuerzas inerciales lo que implica velocidades bajas y a menudo las corrientes son lentas.
- Si $Fr > 1$ el estado es supercrítico, esto quiere decir que las fuerzas inerciales son las dominantes con velocidades altas y los flujos son rápidos, ultrarrápidos o torrenciales

2.1.1.5 Capa límite

Cuando el flujo se encuentra con un obstáculo, este ocasiona un cambio en la trayectoria que siguen las partículas que genera una película alrededor del cuerpo denominada capa límite (Street & Vennard, 1979).

En la Figura 2-3a se muestra un caso ideal donde la capa límite es delgada y aguas abajo del cuerpo se genera una estela viscosa muy delgada.

Aparentemente la teoría de la capa límite funcionaría perfectamente para este esquema; sin embargo, no corresponde a la realidad. En la Figura 2-3b se puede apreciar su forma real; es decir, la capa límite es delgada en la parte frontal del objeto donde la presión decrece a lo largo de la superficie (gradiente de presión favorable) mientras que en la parte posterior se generan presiones crecientes (gradiente de presión adverso) y se desprende formándose una estela amplia y pulsatoria que modifica las líneas de corriente adyacentes (White, 2003).

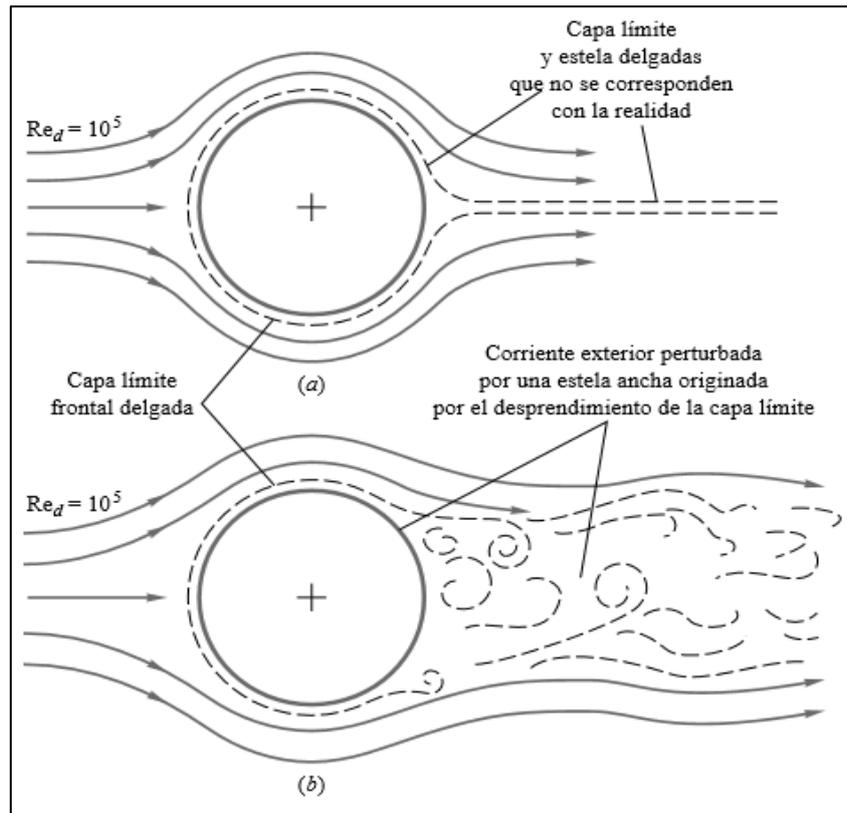


Figura 2-3 Interacción entre un cuerpo sumergido y las líneas de corriente a) caso ideal, b) caso real

Fuente: White (2003)

Cuanto mayor sea el número de Reynolds, más notoria es la capa límite como se observa en la Figura 2-4 que muestra una corriente uniforme con velocidad U que se mueve paralelamente a una placa plana delgada de longitud L .

Si el número de Reynolds es bajo (Figura 2-4a), la región viscosa es ancha y puede extenderse tanto como la longitud de la placa alrededor de la misma. La placa frena mucho la corriente incidente, y pequeños cambios en los parámetros del flujo originan grandes cambios en la distribución de presiones a lo largo de la placa. En general, estos flujos con capas viscosas gruesas se estudian experimentalmente o con modelos numéricos del campo fluido utilizando el ordenador (White, 2003).

Cuando el número de Reynolds es alto (Figura 2-4b) el acoplamiento de la capa límite es más fácil de tratar debido a que las capas viscosas, tanto laminares como turbulentas son muy delgadas. Se define, entonces, el espesor δ de la capa límite como el lugar geométrico de los puntos donde la velocidad u paralela a la placa alcanza el 99% de la velocidad exterior U . Para cuerpos esbeltos, como placas y perfiles paralelos a la corriente incidente, se puede suponer que la interacción entre la capa límite y la distribución de presiones de la corriente exterior es despreciable.

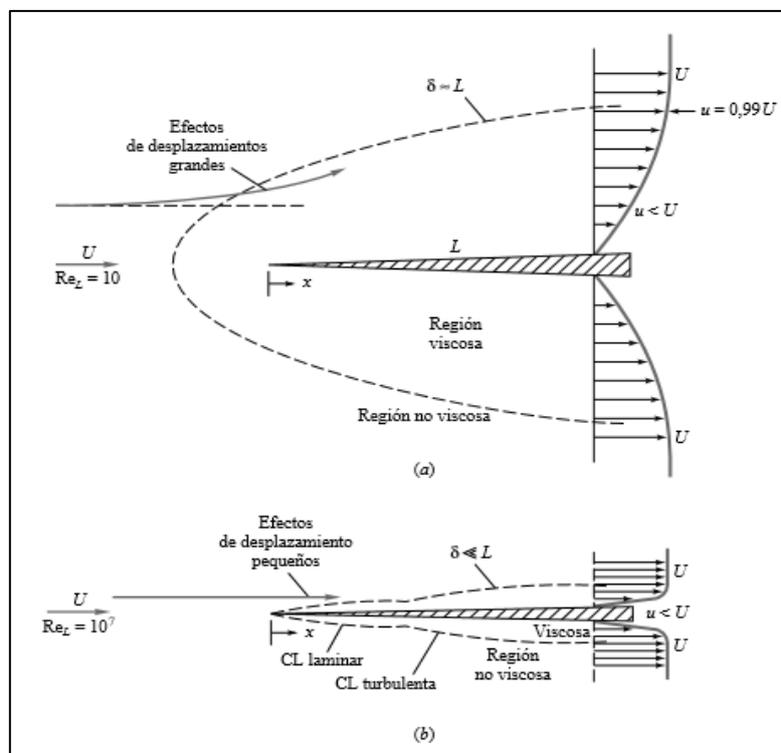


Figura 2-4 Flujo alrededor de una placa a) Reynolds bajos, b) Reynolds altos

Fuente: White (2003)

2.1.1.6 Flujo alrededor de un obstáculo

Autores como Hjorth (1975), Melville y Raudkivi (1977) y Ettema (1980) han reportado estudios de patrones de flujo alrededor de un cilindro, presentando algunos componentes como se muestran en la Figura 2-5. La velocidad del flujo es cercana a cero en la cara aguas arriba del cilindro y, como la velocidad disminuye con la profundidad hasta ser cero en el lecho, la presión de estancamiento también disminuye generando un gradiente de presión adverso y, consecuentemente un flujo descendente (*downflow*) que junto con la rotación descendente del flujo en la capa límite (*bow wave*) genera vórtices de herradura (*horseshoe vortex*) que se extienden hacia aguas abajo pasando por los lados de la pila antes de perder su identidad y convertirse en parte de los vórtices desechados también conocidos como vórtices de Von Kármán (*wake shed vortices*). Frecuentemente en la literatura se consideran a los vórtices de herradura como la causa de la socavación (*scour*) (Raudkivi, 1998).

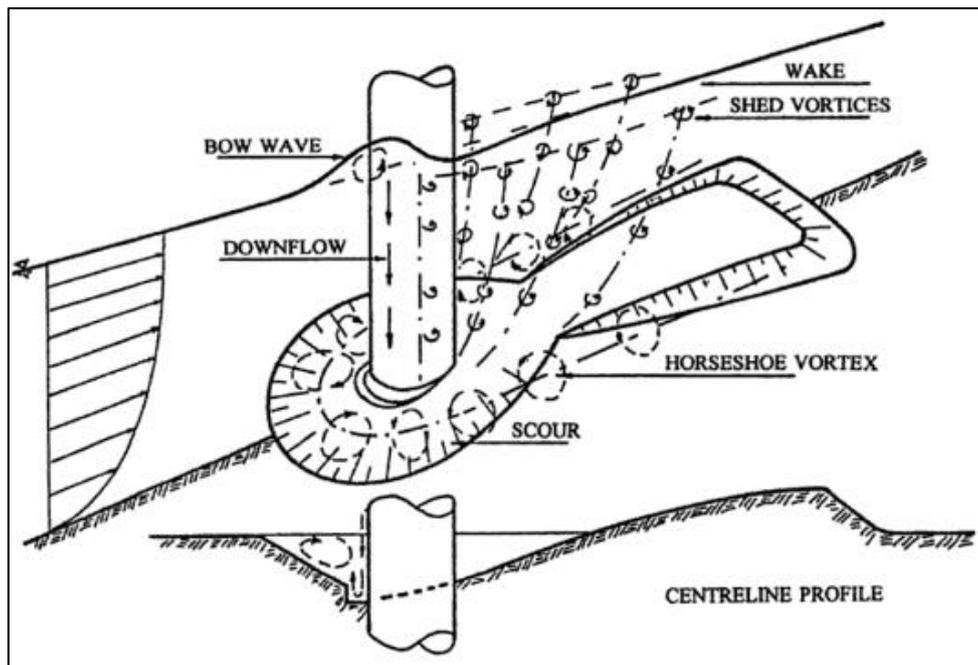


Figura 2-5 Patrón de flujo alrededor de una pila cilíndrica

Fuente: Raudkivi (1998)

2.1.1.7 Vórtices de Von Kármán

Una calle de vórtices de Von Kármán es un patrón de vórtices en remolino causados por la separación no estacionaria de la capa de fluido al pasar sobre cuerpos sumergidos. Debe su nombre al investigador húngaro Teodoro Von Kármán, planteó las bases del análisis de dicho fenómeno.

Básicamente la idea es que el fenómeno ocurre debido a la superposición de vórtices irrotacionales que se forman al paso de un fluido alrededor de un obstáculo; los cuales viajan aguas abajo con el fluido de forma ordenada y similar a las huellas dejadas al caminar por una calle.

La calle de vórtices de Von Kármán es uno de los patrones de vorticidad más estudiados y conocidos en el campo de la mecánica de los fluidos. Cuando el flujo pasa cerca de la sección más ancha del cilindro, las capas límites generadas comienzan a separarse de la superficie del cilindro, debido a que la parte de la capa límite en contacto con la superficie del cilindro se mueve más lentamente que la del flujo libre, la capa límite separada se enrolla, generando una serie de vórtices discretos y alternativos (Figura 2-6) que viaja aguas abajo junto con el fluido y que finalmente dan forma a la estela conocida como la calle de vórtices de von Kármán (López, 2002).

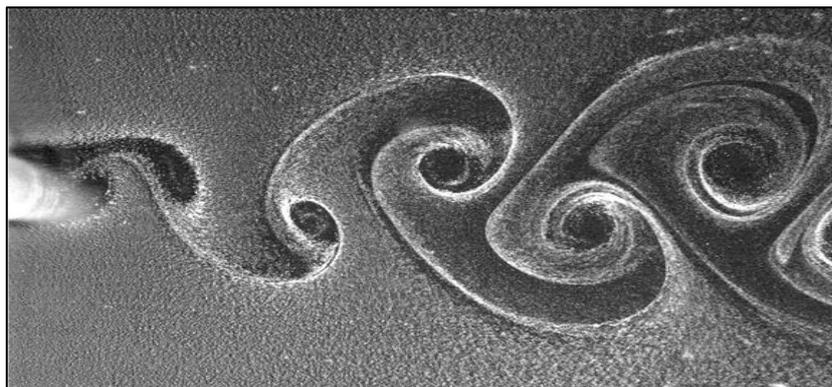


Figura 2-6 Vórtices de Von Kármán

Fuente: Kumar, Cantu & Gonzalez (2009)

Estos vórtices se generan para un rango de valores de Reynolds, es así que:

A altas velocidades del flujo ($Re < 1$) se puede tener un patrón de flujo simétrico y estacionario (Figura 2-7a); esta simetría se pierde cuando $5 < Re < 40$ y se generan vórtices constantes en la parte trasera del cilindro (Figura 2-7b); cuando Re se acerca a 40 se observa una inestabilidad en forma de estela oscilante, mientras que con $Re \approx 100$ los vórtices empiezan a despegarse de la parte trasera del cilindro de forma periódica y regular (Figura 2-7c), el flujo sigue siendo laminar pero se ha perdido la simetría de la superficie. Estas características, que representan la presencia de la calle de vórtices de Von Kármán, persisten hasta Re de aproximadamente 200. Donde se desarrollan inestabilidades tridimensionales, en $Re \approx 400$, empiezan a ocurrir niveles bajos de turbulencia dentro de los vórtices; sin embargo, su periodicidad es todavía robusta. Eventualmente, para valores de $Re \approx 10^5$ (Figura 2-7d y 2-7e), la turbulencia se extiende desde los vórtices y se obtiene una estela completamente turbulenta (Davidson, 2004).

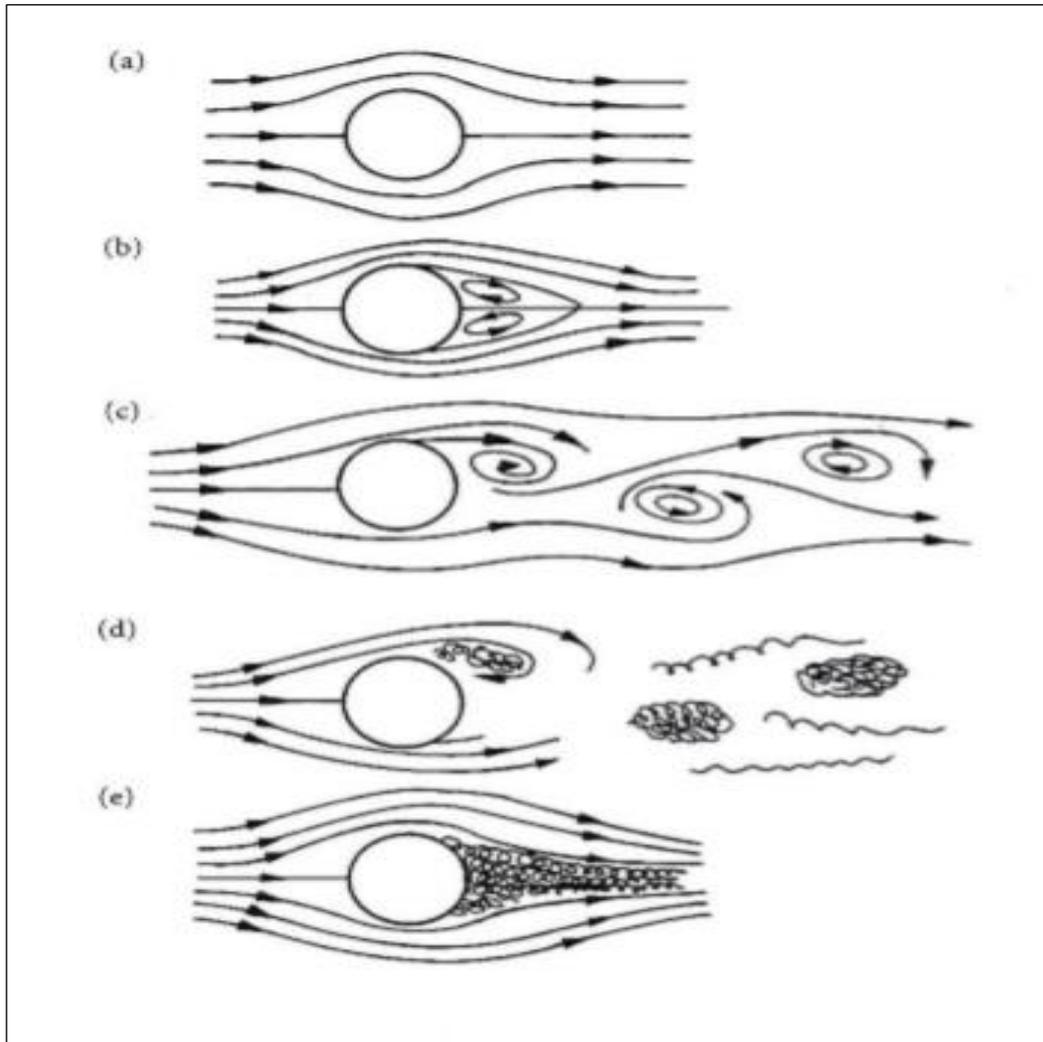


Figura 2-7 Flujo detrás de un cilindro

Fuente: Davidson (2004)

2.1.2 FLUJO EN CANALES ABIERTOS

2.1.2.1 Descripción

El agua puede fluir por un conducto abierto (canal) o cerrado (tubería). El flujo en canal abierto debe tener una superficie libre que está sometida a la presión atmosférica mientras que el flujo en tubería, al estar confinado posee una presión hidráulica (Chow, 1994). En la Figura 2-8 se muestra un esquema del flujo en canales abiertos donde se supone un flujo paralelo al fondo con una distribución de velocidades uniforme, la línea de gradiente hidráulico coincide con la superficie del líquido y la línea de energía hidráulica se encuentra a una carga de velocidad sobre la superficie, por último, la pérdida de carga se define como la caída de la línea de energía (Street & Vennard, 1979).

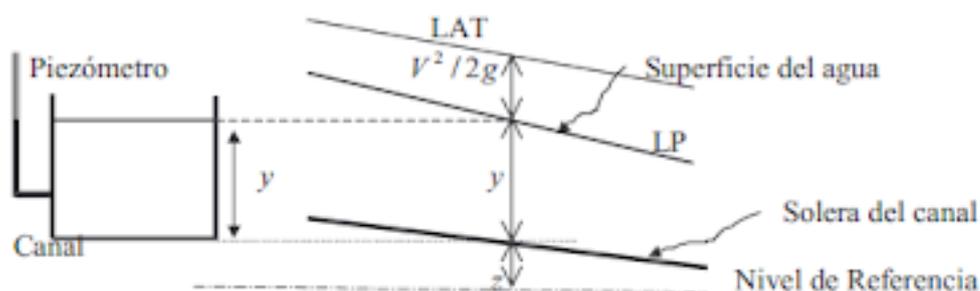


Figura 2-8 Flujo en canales abiertos

Fuente: <http://hidraulicaucentral.blogspot.com/2012/05/flujo-libre.html>

2.1.2.2 Tipos de flujo

En general, existen varios tipos y formas de describir la clasificación del flujo en canales abiertos. Es así que, basándose en criterios como el tiempo y el espacio, se tiene una clasificación que se resume en la Figura 2-9. En la naturaleza es posible encontrar flujos que cumplan con más de una característica, aunque el más raro es el flujo no permanente uniforme. El flujo en canales abiertos obedece a las relaciones que existen entre la viscosidad, la gravedad, y las fuerzas inerciales del mismo (Chow, 1994).

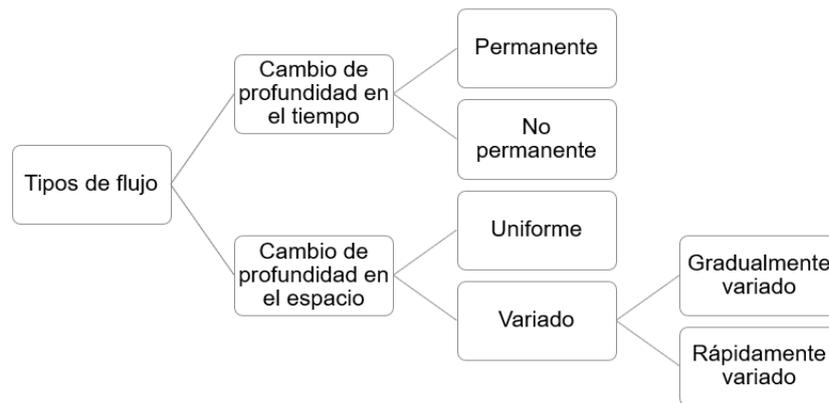


Figura 2-9 Tipos de flujo

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

2.1.2.3 Regímenes de flujo

La combinación de los efectos de gravedad y viscosidad generan uno de cuatro posibles regímenes de flujo como se indica en la Tabla 2-1. Cada régimen de flujo es el resultado de la intersección entre la línea gruesa de $Fr = 1$ y la zona sombreada del flujo transicional observados en la Figura 2-10 que relaciona la velocidad del flujo (en pies por segundo) con la profundidad (en pies) en un canal abierto mediante una gráfica logarítmica (Chow, 1994).

Tabla 2-1

Número de Froude y Reynolds para cada régimen

Número de Froude (Fr)	Número de Reynolds (Re)	Régimen
Menor a 1	Menor a 500	Subcrítico-laminar
Menor a 1	Mayor a 2000	Subcrítico-turbulento
Mayor a 1	Menor a 500	Supercrítico-laminar
Mayor a 1	Mayor a 2000	Supercrítico-turbulento

* Si Re está entre 500 y 2000 se dice que el flujo está en el rango de transición.

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

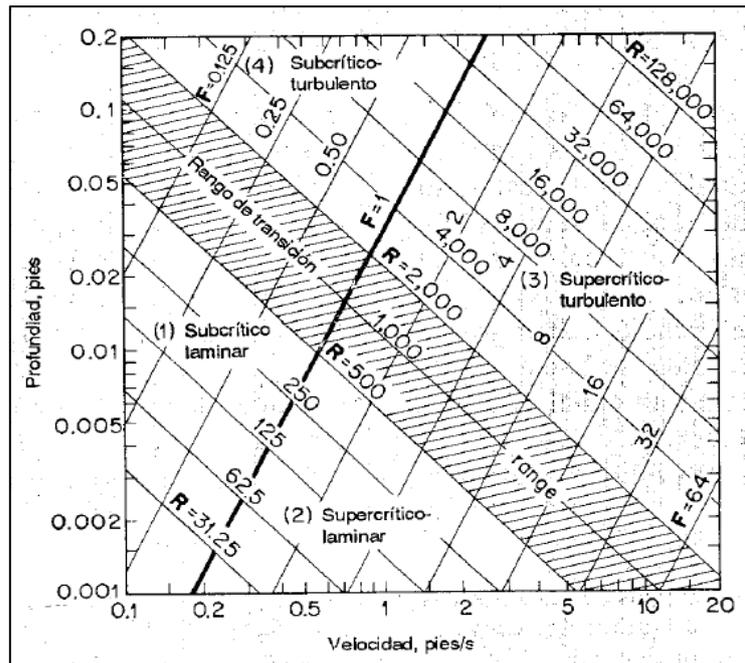


Figura 2-10 Relación profundidad-velocidad para cuatro regímenes de flujo en canales abiertos

Fuente: Chow (1994)

2.1.2.4 Distribución de velocidades

Las velocidades en un canal no se distribuyen de forma uniforme debido al efecto de la fricción en las paredes. En canales a menudo la máxima velocidad se encuentra de 0,05 a 0,25 veces la profundidad por debajo de la superficie libre; cuanto más cerca de las paredes más profundo se encuentra el máximo. La Figura 2-11 ilustra la distribución de velocidades para distintas secciones verticales y horizontales en un canal rectangular además de las curvas de igual velocidad (Chow, 1994).

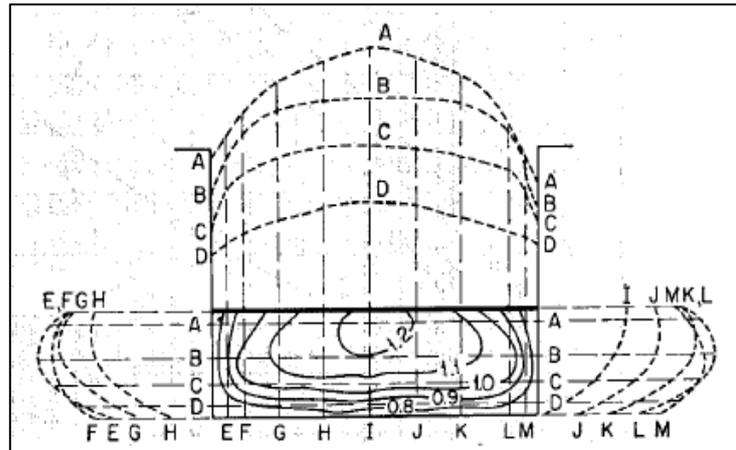


Figura 2-11 Distribución de velocidades en un canal rectangular

Fuente: Chow (1994)

Factores como la sección del canal, la existencia de curvas y su rugosidad afectan a la distribución de velocidades, este último genera una curva de distribución de velocidades más pronunciada (ver Figura 2-12) razón por la cual si el canal es muy liso la velocidad máxima se puede encontrar en la superficie (Chow, 1994).

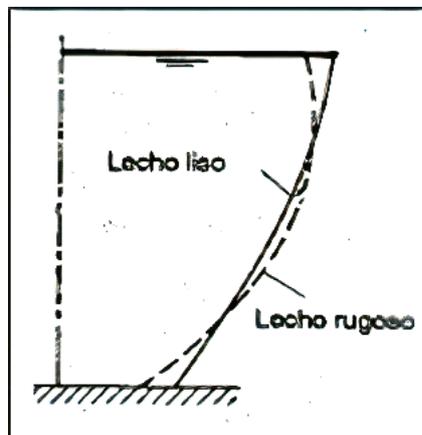


Figura 2-12 Efecto de la rugosidad en la curva de distribución de velocidades

Fuente: Chow (1994)

2.1.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Es difícil medir el transporte de sedimentos debido a que cualquier aparato que se coloque cerca del lecho perturba al flujo y altera la velocidad con que se desplazan los sólidos dentro del agua. Sin embargo, se sabe que el transporte de sedimentos en el lecho puede ocurrir de tres formas (ver Figura 2-13) (Galiano & Toapaxi, 2010):

Por el fondo, que constituye un 10% del transporte total, depende de las características hidráulicas como el caudal la pendiente o la granulometría.

En suspensión, que ocurre debido a que la acción de las componentes verticales de la turbulencia empuja y transportan en suspensión al sedimento con la corriente. Representa casi el 90% del transporte total.

Carga de lavado, que son todas las partículas suspendidas que, debido a sus características, principalmente el tamaño, no se sedimentan. Proceden en su mayoría del lavado de la cuenca.

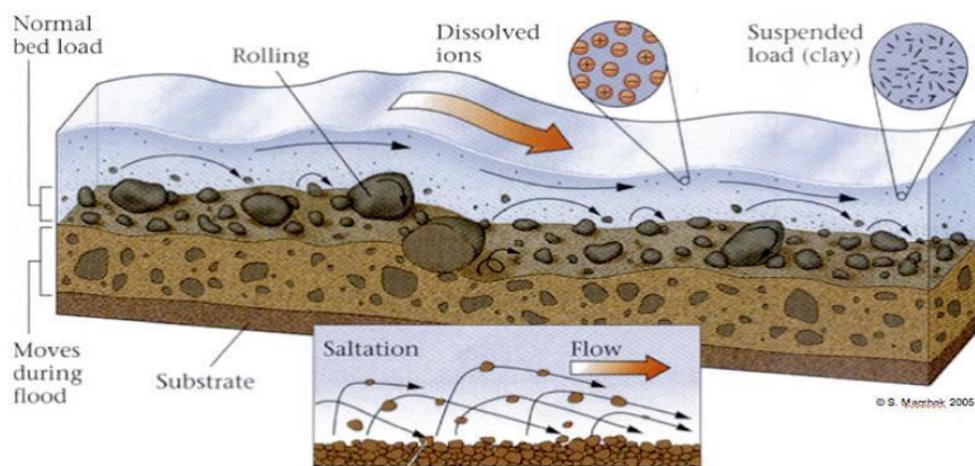


Figura 2-13 Clasificación del transporte de sedimentos

Fuente: Iglesias (2018)

2.1.3.1 Principio de inicio del movimiento

A lo largo del cauce de los ríos y canales sin revestimiento se produce erosión por el paso del agua debido a que los materiales de los que están formados no siempre son capaces de resistir las fuerzas de arrastre del flujo.

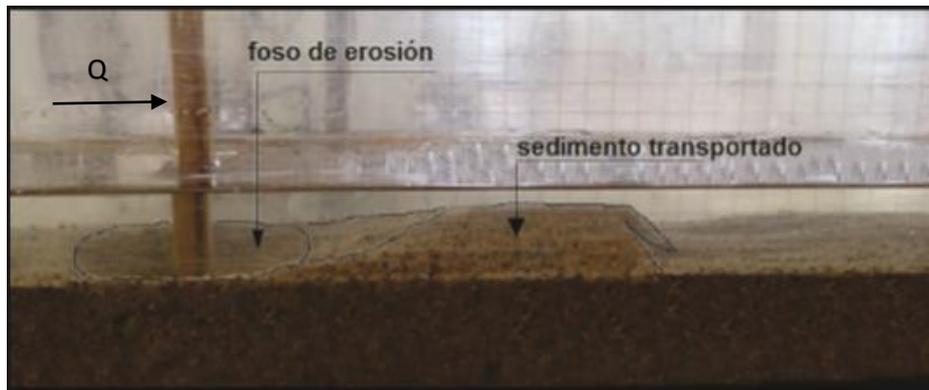


Figura 2-14 Transporte de sedimento

Fuente: Gallardo (2019)

Para detallar de mejor manera este fenómeno (Figura 2-14), imagine un canal rectangular cuyas paredes son de vidrio con una capa de material no cohesivo (arena) en el fondo de espesor constante con una pendiente determinada.

Al fluir el agua por encima de esta capa de sedimento las partículas experimentan una fuerza de arrastre, si la velocidad del agua es baja no existe movimiento de las partículas; pero al aumentar el caudal lo hará también la velocidad del flujo y por consiguiente la fuerza de arrastre hasta llegar a la situación crítica en que la fuerza de arrastre es lo suficientemente grande para iniciar el movimiento de las partículas menos estables. Al aumentar la velocidad será mayor el número de partículas que se separan de su lugar de origen (Basile, 2018).

Para determinar el inicio del movimiento se recurre al parámetro de Shields, a continuación, se detalla el procedimiento para determinarlo.

1º Calcular Re^*

$$Re^* = \frac{U^* D_{50}}{\nu} \quad (2.3)$$

Donde: Re^* es el número de Reynolds del sedimento

D_{50} es el diámetro mediano de las partículas (m)

ν es la viscosidad cinemática del agua (m^2/s)

U^* es la velocidad de corte que se obtiene usando la ecuación (m/s)

$$U^* = \sqrt{g * R_h * S} \quad (2.4)$$

Donde: g es la gravedad (m/s^2)

R_h es el radio hidráulico (m)

S es el valor mínimo entre la pendiente de la superficie de agua y la pendiente motriz (m/m)

2º Calcular la ecuación ASCE

$$\frac{D_{50}}{\nu} \sqrt{0,1 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g D_{50}} \quad (2.5)$$

Donde: γ_s es el peso específico del sedimento (T/m^3)

γ es el peso específico del agua (T/m^3)

3º En el diagrama de Shields (Figura 2-15), se busca el cruce entre Re^* y la ecuación ASCE para obtener τ^* y luego calcular τ_{cr} usando la ecuación:

$$\tau_{cr} = \tau^* (\gamma_s - \gamma) D_{50} \quad (2.6)$$

Donde: τ^* es el parámetro adimensional del diagrama de Shields

τ_{cr} es la tensión crítica en el fondo (N/m²)

4º Calcular τ_o

$$\tau_o = \gamma * R_h * S_f \quad (2.7)$$

Donde: τ_o es la tensión inicial del fondo (N/m²)

S_f es la pendiente motriz que se obtiene con la ecuación:

$$S_f = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R_h^{4/3}} \quad (2.8)$$

Donde: Q es en caudal que pasa por la sección (m³/s)

A es el área de la sección (m²)

n es el coeficiente de Manning

5º Comparar τ_o vs τ_{cr} usando la Tabla 2-2

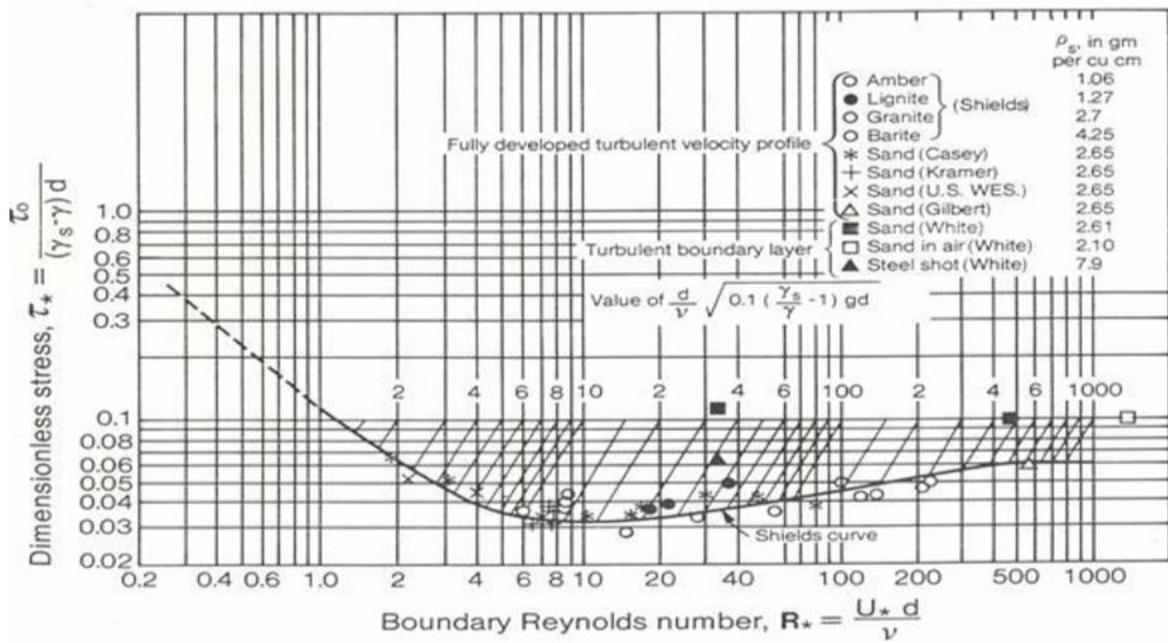


Figura 2-15 Diagrama de Shields con el parámetro ASCE

Fuente: Vanoni (1975)

Tabla 2-2

Condición de flujo

τ_0 / τ_{cr}	Condición de flujo
<1	Debajo de la línea de inicio de movimiento.
=1	En la línea de movimiento.
>1	Sobre la línea de movimiento.

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

2.1.3.2 Aguas claras y lecho móvil

La erosión que se produce alrededor de un obstáculo o pila se la denomina erosión local. Este fenómeno ocurre debido a que la velocidad local es mayor a la velocidad media de la corriente, y también por la presencia de vórtices que se forman delante y detrás de la pila. La erosión local empieza con una velocidad que es cercana a la capa límite ($v=0.5v_c$). Los vórtices son la principal causa de la socavación y el foso que forman alrededor de la pila tiene su mayor extensión y profundidad en la cara frontal de la pila (Figura 2-16). Existe una relación entre la velocidad del flujo y el foso de socavación de tal forma que si a lo largo del tiempo las condiciones hidráulicas son permanentes se llegará a un equilibrio en la forma y tamaño del foso.

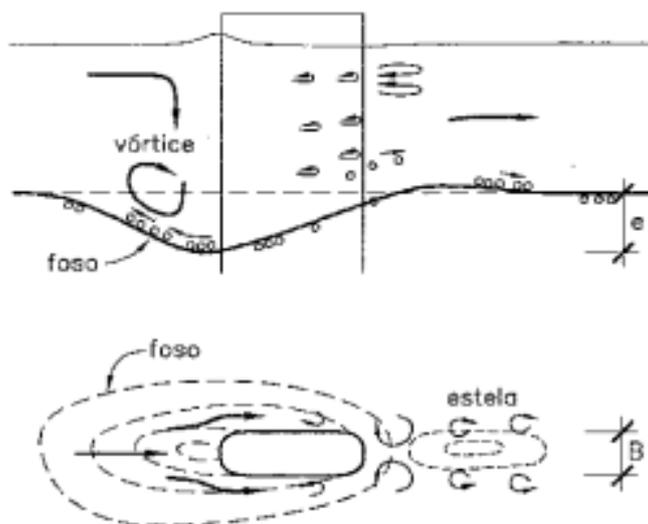


Figura 2-16 Hidrodinámica y morfología de un foso de erosión local

Fuente: Martín (2003)

Existen dos tipos de erosión al pie de las pilas: la primera ocurre cuando la corriente no puede mover las partículas del material del fondo, y solo los vórtices generan el movimiento de las partículas, a este tipo de erosión se la denomina erosión de aguas claras; la segunda forma de erosión es producida tanto por el flujo como por los vórtices alrededor de la pila en este caso se lo conoce como

erosión de lecho móvil, este modo de erosión se da con mucha frecuencia en avenidas. (Martín, 2003).

El equilibrio de los fosos de socavación es distinto para cada caso; en el primer caso no existe erosión de fondo una vez se haya alcanzado el equilibrio, en el segundo caso la cantidad de material que sale del foso es compensado por la cantidad de material que entra. El foso máximo tiende a formarse cuando las condiciones del fondo están en el límite entre el estado de aguas claras y el de lecho móvil ($v=v_c$) (Figura 2-17) (Martín, 2003).

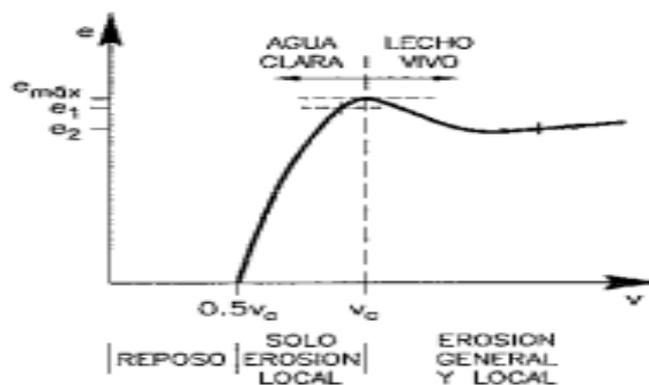


Figura 2-17 Erosión local en pilas según la velocidad de la corriente

Fuente: Martín (2003)

2.1.4 TURBULENCIA

No existe una definición clara del flujo turbulento, Von Kármán (1937) definió la turbulencia como un “movimiento irregular que aparece generalmente en fluidos, cuando fluyen por superficies solidas o incluso cuando las corrientes vecinas del mismo fluido fluyen una sobre la otra”, diferentes autores consideran que es impreciso usar el término “movimiento irregular” debido a que, según Wilcox (2010), existen flujos no turbulentos que pueden describirse como irregulares.

Hinze (2015) define el movimiento turbulento del fluido como “una condición irregular del flujo en el que las diferentes cantidades muestran una variación aleatoria con las coordenadas de tiempo y espacio, de modo que se pueden

discernir valores promedio estadísticamente distintos”. Según Carrillo (2014) estos flujos poseen las siguientes características:

- a) **Inestabilidad.** Matemáticamente hablando, las inestabilidades ocurren principalmente debido a la interacción entre los términos no lineales inerciales y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes.
- b) **No linealidad.** La no linealidad de las ecuaciones de Navier-Stokes conlleva a la interacción entre las fluctuaciones de diferentes direcciones y longitudes de onda. Donde la vorticidad es el principal proceso físico que propaga el movimiento en una amplia gama de longitudes de onda.
- c) **Aspectos estadísticos.** Sus fluctuaciones aleatorias características exigen el uso de métodos estadísticos para su análisis.
- d) **Fenómeno continuo.** La dependencia temporal, la continuidad tridimensional y las ecuaciones de Navier-Stokes contienen toda la física del flujo turbulento, esto se deduce del hecho de que la turbulencia es un fenómeno continuo.
- e) **Estructura de la vorticidad.** La vorticidad del flujo turbulento es tridimensional, las líneas de vórtice en el flujo no son paralelas, lo que implica que las aproximaciones bidimensionales no son del todo satisfactorias.
- f) **Escalas y cascada de turbulencia.** La turbulencia consiste en una sucesión de escalas que van de mayor a menor donde estas últimas alimentadas por la energía de las anteriores para luego disipar la energía en forma de calor mediante la acción de la viscosidad molecular.
- g) **Grandes remolinos y mezcla turbulenta.** El estado del flujo turbulento en una posición determinada depende de la situación aguas arriba y no puede ser únicamente especificado en términos del tensor tensión-deformación local como en el flujo laminar.
- h) **Mejora de la difusividad.** La difusión turbulenta mejora la transferencia de masa, cantidad de movimiento y energía, siendo mayor que en los flujos laminares.

Los primeros intentos para describir el movimiento de un fluido se remontan al siglo XVIII Cuando Leonhard Euler aplicó el principio de conservación de masa y la segunda ley de Newton a un fluido. Euler analizó un volumen diferencial en un periodo de tiempo conocido considerando que al inicio del movimiento este volumen ocupa un determinado espacio y luego de poco tiempo estará en otra posición dependiendo de cómo se esté moviendo el fluido. Existen dos tipos de fuerzas que actúan sobre el fluido en movimiento: las fuerzas que actúan por contacto como la presión y las que actúan a distancia como la gravedad, en el planteamiento, Euler consideró estas dos fuerzas, pero no las fuerzas internas del fluido (viscosidad). La viscosidad puede ser una fuerza de fricción interna y fue considerada por Claude-Louis Navier (matemático francés) en 1822 para desarrollar un modelo más exacto del movimiento de ciertos fluidos. Posteriormente Sir George Gabriel Stocks partiendo de un modelo diferente logró completar la descripción de las ecuaciones propuestas por Louis Navier, de esta forma las ecuaciones fueron bautizadas como “Ecuaciones de Navier-Stocks”.

Las ecuaciones de Navier-Stocks fueron desarrolladas a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. Estas ecuaciones describen el movimiento de un fluido Newtoniano partiendo del análisis de un volumen de fluido aplicando la segunda ley de Newton, la ley de Newton de la viscosidad y el principio de conservación de masa. Al unir todos estos principios sobre el volumen de control obtenemos una ecuación en derivadas parciales que gobierna el movimiento de la mayoría de los fluidos en las 3 dimensiones.

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \\ = \mu \left[\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ = \mu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.1.4.1 Métodos de cálculo

Para analizar y resolver problemas sobre la mecánica de fluidos se puede recurrir a la dinámica de fluidos computacional (CFD) que emplea métodos numéricos y algoritmos para realizar una gran cantidad de cálculos, necesarios para simular la interacción entre fluidos y superficies. Existen varios métodos de cálculo que pueden ser aplicados a la turbulencia de fluidos entre los que se encuentran:

Simulación numérica directa (DNS)

Este método permite resolver todas las escalas de la turbulencia dándole solución numérica a las ecuaciones de Navier-Stokes sin necesidad de un modelo de turbulencia (Carrillo, 2014). La necesidad de muchos recursos computacionales además del tiempo que tarda en realizar una simulación representa una gran desventaja al momento de usar este método.

Simulación de grandes vórtices (LES)

Este método es una aproximación que resuelve los movimientos fluctuantes a gran escala y utiliza modelos de turbulencia de tipo sub-celdas para el movimiento de pequeña escala. El modelo de Smagorinsky (1963) aplicado con diferentes formulaciones de la función de amortiguación de la pared es el más utilizado (Carrillo, 2014). Requiere menor costo computacional que el DNS.

Ecuaciones de Navier-Stokes promediado de Reynolds (RANS)

En general, los modelos de turbulencia buscan modificar las ecuaciones de Navier-Stokes no permanentes (transitorias) mediante la introducción de promediados y cantidades fluctuantes obteniendo las denominadas ecuaciones de Navier-Stokes promediado de Reynolds (RANS). Estas ecuaciones representan únicamente las cantidades de flujo medias, modelando los efectos de la turbulencia sin necesidad de resolver las fluctuaciones turbulentas. De este modo, cada componente Φ puede ser dividida en una componente media $\bar{\Phi}$ y una componente variable en el tiempo Φ' :

$$\Phi(\vec{x}, t) = \bar{\Phi}(\vec{x}, t) + \Phi'(\vec{x}, t) \quad (2.12)$$

Los modelos de turbulencia basados en las ecuaciones RANS son conocidos como modelos de turbulencia estadística, debido a que para obtener las ecuaciones es necesario realizar promedios estadísticos. La simulación de estas ecuaciones reduce considerablemente el costo computacional comparado con la DNS y es la que se usa generalmente. Sin embargo, este procedimiento introduce incógnitas adicionales como las tensiones turbulentas o de Reynolds que requieren ser modeladas mediante ecuaciones adicionales que permitan el cierre del sistema con un número suficiente de ecuaciones para todas las incógnitas. De esto se derivan diversos modelos de turbulencia entre los que figuran: Modelo de longitud de mezcla (Prandtl, 1925), modelo de una ecuación (Prandtl & Kolmogórov, 1990), modelo de tensión de Reynolds (Rotta, 1951) y los modelos de dos ecuaciones ($k - \varepsilon, k - \omega$).

2.1.4.2 Modelo de turbulencia $k-\varepsilon$

Hay dos formulaciones principales para este modelo siendo el de Launder y Sharma (1974) el que se conoce como “estándar” y uno de los más empleados en los modelos CFD ya que ha demostrado ser estable, numéricamente robusto y una buena capacidad de predicción. Sin embargo, posee sus limitaciones y no se recomienda para: flujos con separación de capa límite, flujos con cambios

repentinos en la velocidad media de deformación, flujos de fluidos en rotación y flujos sobre superficies curvas (Carrillo, 2014). El modelo asume que la viscosidad turbulenta (μ_t) está relacionada con la energía cinética turbulenta (k) y la disipación de energía cinética turbulenta (ε) mediante la expresión:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

Los valores de k y ε vienen de las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta y el radio de disipación turbulenta:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (2.14)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.15)$$

Los valores de las constantes $C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ se han determinado de forma experimental (Davidson, 2004) obteniendo: 0.09, 1.44, 1.92, 1.0, 1.3 respectivamente.

2.1.4.3 Modelo de turbulencia k- ω

- Es el modelo de dos ecuaciones más usado en el análisis de turbulencia
- Posee mayor precisión que el anterior
- Una de sus ventajas es el tratamiento de las paredes próximas para el cálculo con números de Reynolds bajos
- Este modelo no implica las complejas funciones no lineales de amortiguación requeridas en k- ε y es, sin embargo, más preciso y robusto (Carrillo, 2014).
- Asume que la viscosidad turbulenta (μ_t) está relacionada con la energía turbulenta (k) y la frecuencia turbulenta (ω) mediante la expresión:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (2.16)$$

La convergencia del modelo es similar a la del modelo k-ε. Los valores de k y ω se obtienen al usar:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega \quad (2.17)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 \quad (2.18)$$

Las constantes $\alpha, \beta, \beta^*, \sigma_k, \sigma_\omega$ se determinan de forma similar al modelo k-ε, obteniendo como resultado 5/9, 3/40, 9/100, 1/2, 1/2 (Davidson, 2004).

2.1.4.4 Análisis de turbulencia

En la bibliografía técnica se pueden encontrar varias formas de denotar las distintas velocidades usadas en los cálculos de flujos turbulentos. Es así que se ha seleccionado usar en adelante la siguiente notación:

u : velocidad instantánea (medidas tomadas con el ADV en un punto)

U : velocidad media (promedio de todas las velocidades instantáneas)

u' : Velocidad fluctuante; $u' = U - u$ y posee tres componentes:

$u'_x = u'$ es la fluctuación de velocidad en sentido de la corriente en dirección x.

$u'_y = v'$ es la fluctuación de velocidad en sentido de la corriente en dirección y.

$u'_z = w'$ es la fluctuación de velocidad en sentido de la corriente en dirección z.

Distribución de probabilidades del campo de velocidad

Uno de los puntos principales a enfatizar es que la distribución de probabilidad no es gaussiana. Esto es importante porque varios modelos de turbulencia suponen que algunos aspectos de la turbulencia son gaussianos. Las mediciones de la distribución de probabilidad de u pueden proporcionar pistas sobre la estructura espacial si la turbulencia evoluciona libremente (Davidson, 2004).

La distribución de probabilidad de alguna variable aleatoria (x) generalmente está representada por una función de distribución de probabilidad que se define de la siguiente manera: la probabilidad de que X se encuentre en el rango (a ; b) que se escribe como $P(a < x < b)$, está relacionada con la función de densidad de probabilidad (Hamad, 2015).

$$P(a < x < b) = \int_a^b f(x) dx \quad (2.19)$$

El término $f(x) dx$ representa la probabilidad relativa (a veces llamada frecuencia relativa) de que X se encuentra en el rango $x \rightarrow (x + dx)$. Evidentemente f tiene la propiedad:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (2.20)$$

Como la suma de las probabilidades relativas debe llegar a 1, la media (μ) de una distribución viene dada por:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = |x| \quad (2.21)$$

La varianza (σ^2) viene dada por:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx = |x^2| \quad (2.22)$$

Son de interés, principalmente las distribuciones con media cero en cuyo caso:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx = 0 \quad (2.23)$$

La desviación estándar de la distribución (σ) posee tres componentes:

Desviación estándar en dirección X:

$$\sigma_x = \frac{|u'_x|^2}{|u'_x|} \quad (2.24)$$

Desviación estándar en dirección Y:

$$\sigma_y = \frac{|u'_y|^2}{|u'_y|} \quad (2.25)$$

Desviación estándar en dirección Z:

$$\sigma_z = \frac{|u'_z|^2}{|u'_z|} \quad (2.26)$$

El factor de simetría (Skewness factor, S) representa la distribución de velocidades en términos del tercer momento dado por:

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^3 f(x)}{\sigma^3} dx = \frac{|x^3|}{|x^2|^{3/2}} \quad (2.27)$$

Este factor también posee tres componentes:

Skewness factor en dirección X:

$$S_x = \frac{|u'_x|^3}{|u'_x|^2}^{3/2} \quad (2.28)$$

Skewness factor en dirección Y:

$$S_y = \frac{|u'_y|^3}{|u'_y|^2}^{3/2} \quad (2.29)$$

Skewness factor en dirección Z:

$$S_z = \frac{|u'_z|^3}{|u'_z|^2}^{3/2} \quad (2.30)$$

Si S es igual a 0 representa una distribución totalmente simétrica, un valor positivo de S indica que los valores de U' tienden a ser frecuentemente positivos, mientras que un valor negativo representa lo contrario.

El factor de planitud (kurtosis factor, δ) mide la concentración de valores hacia el valor más frecuente, mientras más alto es δ los valores de U' se concentran más hacia el valor más frecuente y se obtiene usando:

$$\delta = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^4 f(x)}{\sigma^4} dx = \frac{|x^4|}{|x^2|^2} \quad (2.31)$$

Este factor también posee tres componentes:

Kurtosis factor en dirección X:

$$\delta_x = \frac{|u'_x|^4}{|u'_x|^2|^2} \quad (2.32)$$

Kurtosis factor en dirección Y:

$$\delta_y = \frac{|u'_y|^4}{|u'_y|^2|^2} \quad (2.33)$$

Kurtosis factor en dirección Z:

$$\delta_z = \frac{|u'_z|^4}{|u'_z|^2|^2} \quad (2.34)$$

Tensiones de Reynolds

Si se analizan los términos de la ecuación general de un fluido (ec 2.35) que transita a una velocidad media \bar{U} y por accionar de la tensión turbulenta $-\rho\langle u'_i u'_j \rangle$ y las tensiones de Reynolds, se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -\rho \delta_{ij} - \rho \langle u'_i u'_j \rangle + u \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (2.35)$$

Debido a la forma en que el término $-\frac{\partial}{\partial x_j} \langle u'_i u'_j \rangle$ aparece en la ecuación dinámica de Reynolds para la velocidad media, se puede decir que el tensor $-\rho \langle u'_i u'_j \rangle$ es un esfuerzo interno que actúa sobre el flujo turbulento. Desde el punto de vista del análisis tensorial, el término $-\rho \langle u'_i u'_j \rangle$ es un tensor simétrico de segundo orden:

$$\begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.35a)$$

Debido a que la ecuación de Navier Stokes solo es aplicable para flujos Newtonianos donde la viscosidad dinámica es constante en el tiempo, las tensiones tangenciales al flujo funcionan a manera de espejo con respecto a la diagonal principal. De esta manera se reducen a 3 las variables que se observan en la ecuación 2.35a.

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} ; \tau_{xz} = \tau_{zx} ; \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (2.36)$$

Las tensiones normales al flujo se obtienen usando:

$$\tau_{xx} = -\rho U'_x{}^2 \quad (2.37)$$

$$\tau_{yy} = -\rho U'_y{}^2 \quad (2.38)$$

$$\tau_{zz} = -\rho U'_z{}^2 \quad (2.39)$$

Las tensiones tangenciales al flujo se obtienen usando:

$$\tau_{xy} = -\rho U'_x U'_y \quad (2.40)$$

$$\tau_{xz} = -\rho U'_x U'_z \quad (2.41)$$

$$\tau_{yz} = -\rho U'_y U'_z \quad (2.42)$$

Intensidades turbulentas

La intensidad turbulenta se puede definir como u'/U Donde u' es la raíz cuadrática media o desviación estándar de las fluctuaciones de velocidad turbulenta en un determinado lugar en un periodo de tiempo y U es el promedio de la velocidad de flujo en el mismo lugar durante el mismo periodo de tiempo. La intensidad turbulenta se expresa en porcentaje y tiene tres componentes:

Intensidad turbulenta en dirección X:

$$TI_x = \frac{|u'_x|}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} * 100 \quad (2.43)$$

Intensidad turbulenta en dirección Y:

$$TI_y = \frac{|u'_y|}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} * 100 \quad (2.44)$$

Intensidad turbulenta en dirección Z:

$$TI_z = \frac{|u'_z|}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} * 100 \quad (2.45)$$

La intensidad turbulenta puede ser de tres tipos (Hamad, 2015):

- a) Alta turbulencia: Cuando TI se encuentra entre 5% y 20%.
- b) Media turbulencia: Cuando TI se encuentra entre 1% y 5%.

c) Baja turbulencia: Cuando TI es menor a 1%.

Energía cinética y disipación turbulenta

Si se aplica la ecuación 2.35 a un flujo de densidad constante, se obtiene una relación para la energía cinética turbulenta fluctuante promedio por unidad de masa (k):

$$k = \frac{1}{2}(\tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz}) \quad (2.46)$$

Medir la energía de disipación turbulenta (ε) no es simple debido a la cantidad limitada de datos que se pueden obtener en un modelo físico. Taylor (1935) investigó las simplificaciones que surgen en la ecuación de disipación asumiendo una turbulencia isotrópica:

$$\begin{aligned} & \overline{v \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)} \\ &= v \left[2 \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2} + 2 \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2} + 2 \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} \right. \\ & \quad \left. + \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2} \right] \end{aligned} \quad (2.47)$$

Que puede reducirse a:

$$\varepsilon = 6v \left[2 \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} + \overline{\frac{\partial v \partial u}{\partial x \partial y}} \right] \quad (2.48)$$

La expresión del álgebra de Taylor:

$$2 \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2} = \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} \quad (2.49)$$

Reemplazando 2.49 en 2.48 se obtiene la expresión para la turbulencia isotrópica:

$$\varepsilon = 15\nu \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2} = 15\nu u_x^2 \quad (2.50)$$

Escalas de Kolmogórov

Las micro escalas de Kolmogórov son las escalas en las que existe el movimiento turbulento más pequeño antes de que se disipen por los efectos viscosos. Al observar que estos movimientos a pequeña escala tienen escalas de tiempo muy pequeñas, se puede suponer que estos movimientos son estadísticamente independientes de la turbulencia a gran escala, que tiene un tiempo de rotación prolongado. Desde aquí, Kolmogórov declaró que las escalas pequeñas solo deberían depender de la energía suministrada por las escalas grandes y la viscosidad, pero la energía suministrada debe ser igual a la energía disipada y, por lo tanto, las escalas pequeñas son una función de disipación y viscosidad (Hamad, 2015). Utilizando este hecho junto con el análisis dimensional, estas expresiones se pueden inferir para:

Escala de longitud (η_k)

$$\eta_k = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} \quad (2.51)$$

Escala de tiempo (t_η)

$$t_\eta = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2} \quad (2.52)$$

Escala de velocidad (U_η)

$$U_\eta = (\nu\varepsilon)^{1/4} \quad (2.53)$$

2.1.5 SOCAVACIÓN

Fenómenos naturales como avenidas producto de fuertes precipitaciones o la intervención humana en un cauce generan retroceso en sus orillas o descenso en el fondo. Existen dos procesos complejos altamente ligados a estos cambios en el cauce que son: la turbulencia (sección 2.1.4) y el transporte de sedimentos (sección 2.1.3), cuando estos dos procesos ocurren también lo hace la socavación que puede afectar a las pilas de los puentes y a sus estribos provocando en muchos casos el colapso de estas estructuras.

De acuerdo a un estudio sobre causas del colapso de puentes en Colombia publicado en 2018 las fallas por socavación representan el 32% de las causas mientras que las crecientes y avalanchas son el 43% (que también pueden generar socavación) como se observa en la Figura 2-18 (Chamorro et al., 2018). Partiendo de estos datos es importante realizar estudios relacionados a la socavación de pilas en cauces, así como también formas de reducir este efecto.

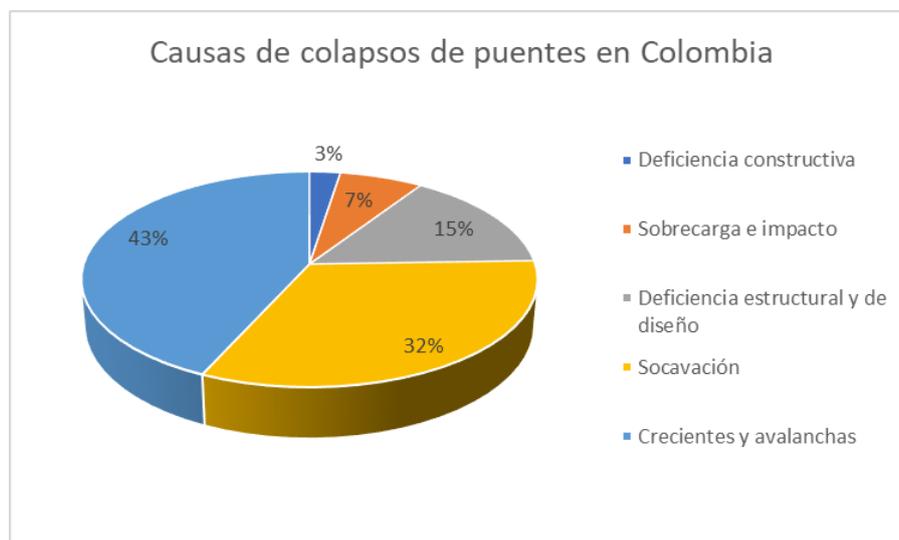


Figura 2-18 Causas de colapso de puentes en Colombia

Fuente: Chamorro et al. (2018)

2.1.5.1 Definición

Se denomina socavación a la excavación profunda causada por el agua, uno de los tipos de erosión hídrica. Puede deberse al embate de las olas contra un acantilado, a los remolinos del agua, especialmente allí donde encuentra algún obstáculo la corriente, y al roce con las márgenes de las corrientes que han sido desviadas por los lechos sinuosos (Martín, 2003).

La socavación provoca el retroceso de las cascadas y de los acantilados que, al ser privados de apoyo en su base, se van desplomando progresivamente. También representa un papel esencial en la formación y migración de los meandros. Existen dos tipos de socavación.

2.1.5.2 Socavación general

También conocida como socavación normal y se define como el descenso del fondo de un río durante una crecida debido al aumento de la capacidad de arrastre de la corriente al aumentar su velocidad; es consecuencia del régimen y en ocasiones se puede presentar alrededor de una estructura. Se puede generar durante un periodo de tiempo corto (una o varias crecidas) o largo (uno o varios años) (Galiano & Toapaxi, 2010).

2.1.5.3 Socavación local

Puede ocurrir en condiciones de agua clara, donde no existe transporte de sedimentos desde aguas arriba, hay reabastecimiento del hoyo socavado y la socavación alcanza el equilibrio cuando el esfuerzo cortante en el lecho es menor que el requerido para el inicio del movimiento de las partículas; o en condiciones de lecho móvil donde existe transporte de sedimentos desde aguas arriba quedando atrapado en el hoyo socavado, en este caso, el equilibrio se alcanza cuando el material transportado iguala la cantidad de material removido (Galiano & Toapaxi, 2010).

Este tipo de socavación afecta a una zona limitada, como pilas y estribos de puentes, se caracteriza por una fuerte turbulencia con remolinos y vórtices desarrollados por la obstrucción al paso del agua (sección 2.1.1).

2.1.5.4 Proceso de erosión en pilas de puentes

El foso de erosión creado por un vórtice (sección 2.1.1) ocurre de forma localizada cerca del fondo donde la velocidad es contraria al flujo principal provocando el levantamiento de las partículas. En la Figura 2-19 se observan las 4 zonas de interés cuando ocurre este proceso.

La zona A, es un hoyo pequeño junto a la pila que se observa con mayor claridad cuando la pila es cuadrada que cuando es circular. Es activo justo donde se concentra el vórtice que genera la socavación.

La zona B, es el hoyo en sí, debido a que es mucho más visible. Sin embargo, la diferencia es sustancial debido a que este ocurre debido al colapso intermitente del talud hacia el foso A.

La zona C, es la sedimentación que se produce aguas abajo, detrás de la pila.

Entre las zonas A y B, se puede apreciar una especie de terraza formada por los flujos normal y en retroceso por donde las partículas se desplazan alrededor de la pila abandonando el hoyo hacia aguas abajo.

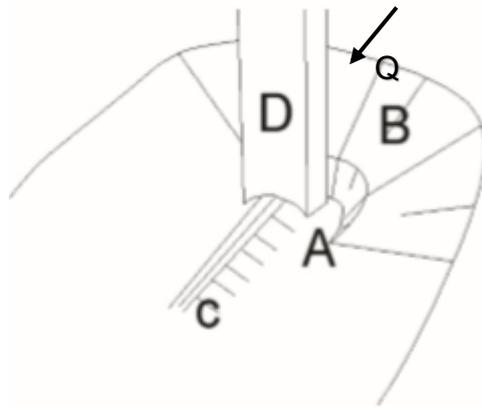


Figura 2-19 Esquema de las zonas de erosión en una pila

Fuente: Cardoso & Bettess (1999)

2.1.5.5 Factores determinantes de la socavación local

La profundidad del hoyo de socavación local bajo una pila se ve afectada por diversos factores (Richardson & Davis, 1995) como:

- a) **Velocidad del flujo de aproximación.** A mayor velocidad, más profundo será el hoyo. Existe una alta probabilidad de que la socavación se vea afectada por flujo subcríticos o supercríticos, aunque la mayoría de investigaciones realizadas previamente son para flujos subcríticos.
- b) **Profundidad de flujo.** Un aumento en la profundidad del flujo puede profundizar el hoyo de socavación al doble o más.
- c) **Ancho de la pila.** Este factor tiene una influencia directa con la profundidad del hoyo. Al aumentar el ancho también lo hace el hoyo, aunque pilas muy anchas (más de 10m) realmente no tienen hoyos de socavación como los obtenidos por las ecuaciones de la sección 2.1.5.7.
- d) **Sección de la pila.** Puede influir en más del 20% de la socavación, la racionalización de la parte frontal de un muelle reduce la fuerza del vórtice de herradura, lo que reduce la profundidad de socavación. La racionalización del extremo aguas abajo de los muelles reduce la fuerza de los vórtices de estela. Una pila de punta cuadrada tendrá profundidades máximas de socavación de aproximadamente un 20% más que una de punta afilada y un 10% más que una cilíndrica o de punta redonda.
- e) **Ángulo de incidencia.** Dependiendo del ángulo que forme el flujo con el obstáculo, la profundidad del hoyo de socavación varía.
- f) **Material del fondo.** Propiedades como el tamaño y cohesión del material del fondo del cauce afectan a la socavación local de diferentes formas. Por ejemplo, un sedimento con grano pequeño afecta menos que uno más grande porque este último puede ser movido por los vórtices generados en el flujo.

La cohesión es de gran influencia en el tiempo que toma alcanzar la socavación máxima, es así que si el fondo es de arena el tiempo se mide en horas y el resultado se puede ver después de un evento mientras que

cuando el material es cohesivo el tiempo aumenta y pueden ser necesarios más de un evento.

- g) **Configuración del lecho.** La configuración del lecho depende de la distribución del tamaño del material, las características hidráulicas y la viscosidad del fluido, puede cambiar la configuración de arrugas a dunas o anti dunas (Figura 2-20) durante un aumento en el flujo para un solo evento de inundación. Estos cambios también ocurren con una disminución del flujo o con un cambio en la temperatura del agua o la concentración de sedimentos y arcillas en suspensión alterando el hoyo de socavación.

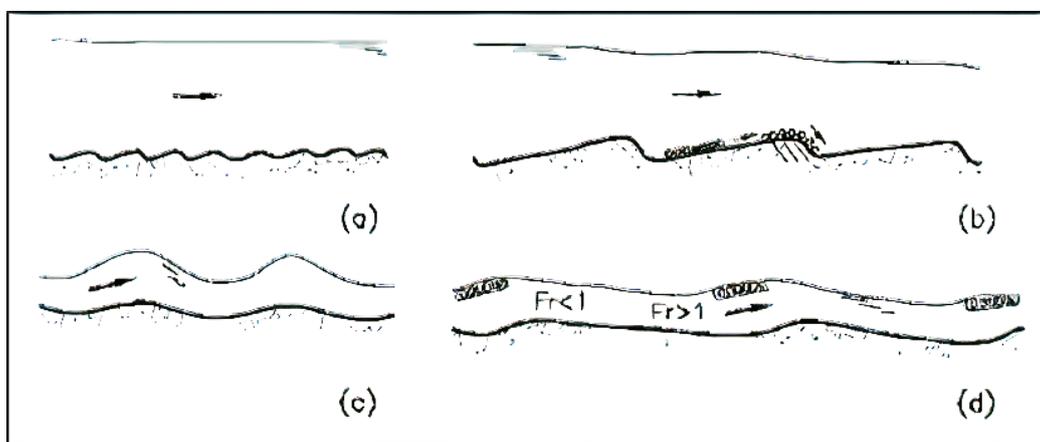


Figura 2-20 Formas de fondo: (a) arrugas; (b) dunas; (c) anti dunas; (d) rápidos y pozos

Fuente: Martín (2003)

2.1.5.6 Equilibrio profundidad de la socavación local

Se produce cuando la profundidad del hoyo de socavación no cambia con el tiempo, también se puede definir como un estado asintótico alcanzado cuando la tasa de limpieza disminuye alcanzando niveles casi insignificantes. El concepto es ampliamente descrito en la literatura. Franzetti et al. (1982) confirmó la existencia de una condición de equilibrio haciendo referencia al trabajo de Baker y Qadar (1980) definiéndolo como el estado de erosión de desarrollo donde no se producen cambios notorios en el tiempo.

Definir el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio es de gran importancia para relacionar los resultados y conclusiones obtenidos. Melville y Coleman (2000) señalan que los experimentos llevados en un periodo de tiempo corto, 10 a 12 horas, pueden dar lugar a una profundidad de la mitad del equilibrio. También observaron que, si no se tiene cuidado, el mismo experimento llevado a cabo en las mismas condiciones experimentales durante un periodo de tiempo distinto puede dar resultados diferentes. Varios investigadores (Heidapour et al., 2003; Zarrati et al., 2004; Mia y Nago, 2003; Sheppard et al., 2004) han propuesto definiciones diferentes para este parámetro, pero la formulación de Melville y Coleman (2000) es la más usada por la comunidad científica:

$$\text{Si } \frac{y}{b} > 6$$

$$T_e = 48,26 \left(\frac{b}{V} \right) \left(\frac{V}{V_c} - 0,4 \right) \quad (2.54)$$

$$\text{Si } \frac{y}{b} \leq 6$$

$$T_e = 30,98 \left(\frac{b}{V} \right) \left(\frac{V}{V_c} - 0,4 \right) \left(\frac{y}{b} \right)^{0,25} \quad (2.55)$$

Donde: V es la velocidad aguas arriba de la pila (m/s)

V_c es la velocidad crítica (m/s)

b es el ancho de la pila (m)

h es la profundidad del flujo (m)

Las ecuaciones 2.54 y 2.55 fueron desarrolladas experimentalmente, con sedimentos de tamaños entre 0,8 y 5,35 mm de diámetro medio, tamaño de pila entre 10 y 150 mm y con relaciones de V/V_c entre 0,5 y 1 (Bermúdez, 2011).

2.1.5.7 Estimación de la máxima socavación local en pilas

Debido a que los parámetros que afectan a la socavación son varios, existe una gran variedad de ecuaciones para determinarla en función de diferentes variables.

Autores como Blench (1965); Larras (1963); Neil (1967) desarrollaron ecuaciones considerando el caudal líquido por unidad de ancho, la diferencia entre niveles de energía hidráulica en el vertedero y la profundidad aguas debajo del hoyo y excluyen las propiedades del material del fondo.

Por otro lado, Ahmad (1962); Coleman (1974); Shen (1975); Jain (1981) desarrollaron ecuaciones considerando los mismos parámetros e incluyeron el tamaño característico del sedimento.

Autores como Chabert y Engeldinger (1952); Inglis y Lacey (1948); Knezevic (1958) consideran la granulometría, el diámetro del grano, la densidad y la cohesividad de las partículas.

Mientras que hay otros que consideran las variables de la pila en cuanto a su forma, tamaño, orientación y protección como Bonasoundas (1978, 1982); Grande (1974); Hancu (1971).

Sin embargo, la comunidad científica se inclina por los métodos que se describen a continuación.

Método de la Universidad estatal de colorado CSU

La erosión alrededor de pilas es función de las características del material de fondo, configuración del material, características de flujo, propiedades del flujo y la geometría del pilar y ubicación. Las características del material del lecho pueden ser granulares o no granulares, cohesivas o no cohesivas, roca erosionable o no erosionable. Las características de interés del flujo alrededor de pilas son la velocidad y calado aguas arriba de la pila, el ángulo del vector velocidad que se forma entre el eje del pilar y la velocidad (ángulo de ataque). Las características geométricas dependerán de las dimensiones y forma de la pila (Richardson & Davis, 2001).

Para determinar la socavación máxima en la pila se usará la siguiente ecuación:

$$D_s = 2 * y * K_f * K_\beta * K_{cf} * K_{mf} \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (2.56)$$

Donde: D_s es la profundidad de la erosión (cm)

y es la profundidad aguas arriba de la pila (m)

K_f es el factor de corrección de forma del pilar (Tabla 2-3)

K_β es el factor de corrección del ángulo de ataque del flujo (Tabla 2-4)

K_{cf} es el factor de corrección de condiciones de fondo (Tabla 2-5)

K_{mf} es el factor de corrección de protección del material de fondo (ecuación 2.57)

b es el ancho de la pila (m)

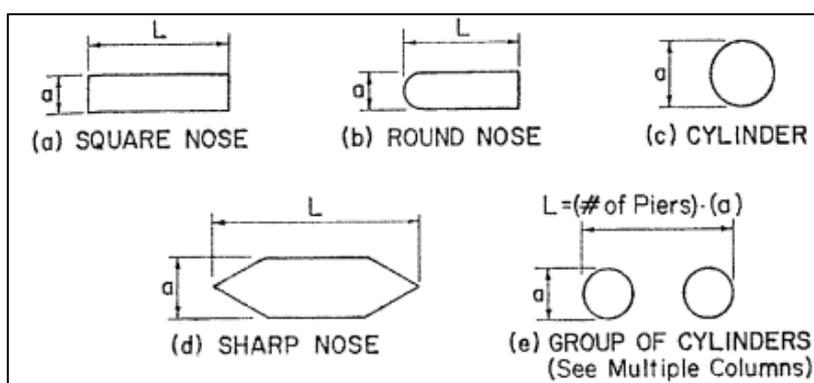
L es la longitud de la pila (m)

Fr es el número de Froude justo aguas arriba del pilar (ecuación 2.2)

Tabla 2-3*Factor K_f . Método CSU*

Forma de la arista	K_1
Cuadrada (a)	1,1
Redondeada (b)	1
Cilíndrica (c)	1
Punta (d)	0,9
Grupo de cilindros (e)	1

Fuente: Richardson & Davis (2001)

**Figura 2-21** Formas típicas de pilas

Fuente: Richardson & Davis (2001)

Tabla 2-4*Factor K_β . Método CSU*

Ángulo	L/a=4	L/a=8	L/a=12
0°	1	1	1
15°	1,5	2	2,5
30°	2	2,75	3,5
45°	2,3	3,3	4,3
90°	2,5	3,9	5

Fuente: Richardson & Davis (2001)

Tabla 2-5*Factor K_{cf} . Método CSU*

Condiciones de fondo	Altura de dunas (m)	K_3
Agua clara	N/A	1,1
Fondo plano	N/A	1,1
Pequeñas dunas	$3 > H > 0.6$	1,1
Dunas medianas	$9 > H > 3$	1,2 a 1,1
Dunas grandes	$H > 9$	1,3

Fuente: Richardson & Davis (2001)

Para determinar K_{mf} :Si $D_{50} < 2 \text{ mm}$ o $D_{95} < 20 \text{ mm}$; $K_{mf} = 1$

Si $D_{50} > 2 \text{ mm}$ y $D_{95} > 20 \text{ mm}$ entonces:

$$K_{mf} = 0.4 * (V_R)^{0.15} \quad (2.57)$$

$$V_R = \frac{V - V_{icD50}}{V_{cD50} - V_{icD95}} > 0 \quad (2.58)$$

$$V_{icDx} = 0.645 \left(\frac{D_x}{b} \right)^{0.053} V_{cDx} \quad (2.59)$$

$$V_{cDx} = K_u y_1^{1/6} D_x^{1/3} \quad (2.60)$$

Donde: y_1 es la profundidad aguas arriba de la pila (m)

V es la velocidad de aproximación del flujo aguas arriba de la pila (m/s)

D_x es el tamaño de grano para el cual el porcentaje del material del lecho es más fino (m)

K_u es igual a 6.19 (Para el sistema internacional de unidades)

Método de Froehlich (1991)

El Dr. David Froehlich desarrolló una ecuación utilizada por el programa HEC-RAS como alternativa al método de la Universidad Estatal de Colorado (Bermúdez, 2011).

$$D_s = 0.32K_f(b')^{0.62}y^{0.47}Fr^{0.22}D_{50}^{-0.99} + b \quad (2.61)$$

Donde: D_s es la profundidad de socavación local (cm)

K_f es el factor de corrección por la forma de la pila.

$K_f = 1,00$ para pilas circulares

= 0,75 para pilas de forma hidrodinámica

= 1,30 para pilas rectangulares

b' es el ancho proyectado de la pila con relación al ángulo de ataque del flujo (m)

b es el ancho de la pila, adicionado como un factor de seguridad (m)

y es la profundidad del flujo aguas arriba de la pila (m)

Fr es el número de Froude en la sección aguas arriba de la pila (ecuación 2.2)

D_{50} es el diámetro de la partícula de lecho en una mezcla cuyo 50% es menor (mm)

Método de Laursen y Toch (1956)

Este método fue desarrollado en el Instituto de Investigación Hidráulica de Iowa, a partir de mediciones confirmadas en el río Skunk. Donde se establecieron

dos casos generales en función del ángulo de incidencia del flujo al eje de la pila (Juárez & Rico, 1974).

Flujo alineado con la mayor dimensión transversal de la pila

$$D_s = K_f K_g a \quad (2.62)$$

Flujo con ángulo de incidencia Φ sobre el eje de la pila

$$D_s = K_g K_\Phi a \quad (2.63)$$

Donde: D_s es la profundidad del hoyo, medida desde el fondo natural del cauce (cm)

K_g es el coeficiente de relación H_s/a , se obtiene de la Figura 2-22.

K_f es el coeficiente de forma de la pila, se obtiene de la Figura 2-23.

K_Φ es el coeficiente que depende del ángulo de incidencia Φ , se obtiene de la Figura 2-24.

a es el ancho de la pila (cm)

H_s es la profundidad de agua aguas abajo (m)

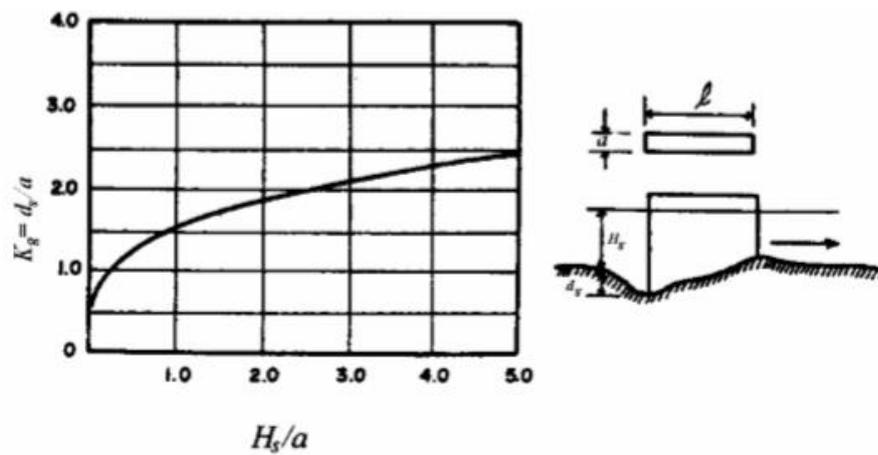


Figura 2-22 Valores K_1 . Método de Laursen y Toch

Fuente: Juárez y Rico (1992)

FORMA DE LA NARIZ		COEFICIENTE K_f DE SCHNEIBLE
RECTANGULAR $l/a = 4$		1.00
SEMICIRCULAR		0.90
ELIPTICA	$\frac{p}{r} = \frac{2}{1}$ 	0.81
	$\frac{p}{r} = \frac{3}{1}$ 	0.75
LENTICULAR	$\frac{p}{r} = \frac{2}{1}$ 	0.81
	$\frac{p}{r} = \frac{3}{1}$ 	0.69
FORMA DE LA NARIZ		SEGÚN TISON
BISELADA $l/a = 4$		0.78
PERFIL HIDRODINAMICO $l/a = 4$		0.75

Figura 2-23 Valores K_2 . Método Laursen y Toch

Fuente: Juárez y Rico (1992)

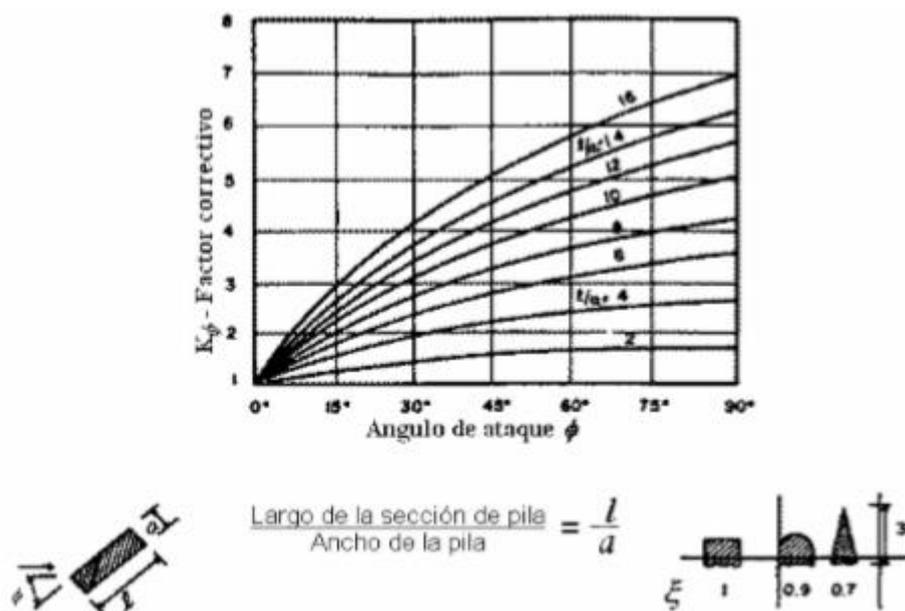


Figura 2-24 Valores K_3 . Método de Larsen y Toch

Fuente: Juárez y Rico (1992)

Método de Maza-Sánchez (1968)

Conocido también como “Método de la división de investigación de la Facultad de Ingeniería de la UNAM” se trata de estudios experimentales llevados a cabo en tres canales y en una instalación para estudios aerodinámicos. En el primer canal se estudió la forma en que inicia y prosigue la socavación, principalmente para comparar los métodos de Yaroslavtziev y Laursen-Toch. En el segundo canal se intentó verificar, para otras condiciones, las modificaciones propuestas para determinar la socavación obtenida en el primer modelo. En el tercer estudio se estudió someramente la socavación en gravas y protecciones formada con pedraplenes. En las instalaciones para estudios aerodinámicos se probaron distintos tipos de protección (Juárez & Rico, 1974).

Las observaciones realizadas respecto a las trayectorias de las partículas, forma de iniciarse el proceso erosivo y los avances sucesivos de la socavación se ven reflejadas en los ábacos de las Figuras 2-24, 2-25 y 2-26. Es importante aclarar que todos los valores de la socavación registrados corresponden a los máximos observados, los cuales no siempre se presentan en el mismo sitio de

la pila. En un principio todos los datos obtenidos de cada ensayo para la condición de máxima socavación fueron resumidos en tablas. Con ellos y por medio del análisis dimensional se obtuvieron varios parámetros adimensionales que revelaban al graficarlos alguna dependencia con la socavación. De entre ellos se obtuvo al final una gráfica para las pilas rectangulares, redondeadas y circulares que concordaba con la mayoría de los valores observados (Juárez & Rico, 1974).

El uso de estos ábacos consiste de tres pasos:

Obtener el número de Froude, que se ubica en el eje de las abscisas del ábaco usando la ecuación 2.2

En caso que la pila forme un ángulo de incidencia con el flujo se debe aplicar el factor de corrección f_c de la Tabla 2-6 a la ecuación 2.2.

Tabla 2-6

Valores f_c . Método Maza-Sánchez

Φ	0°	15°	30°	45°
f_c	1	1,25	1,4	1,45

Fuente: Juárez y Rico (1974)

Obtener el factor correspondiente a las curvas del lado derecho del eje de las ordenadas:

$$\frac{H_s}{a'} \quad (2.64)$$

Cruzar los valores obtenidos en los pasos anteriores y el valor observado en el lado izquierdo de las ordenadas será igual a:

$$f = \frac{H_s + D_s}{a'} \quad (2.65)$$

De donde se deberá despejar D_s que es el valor de la socavación.

$$D_s = f * a' - H_s$$

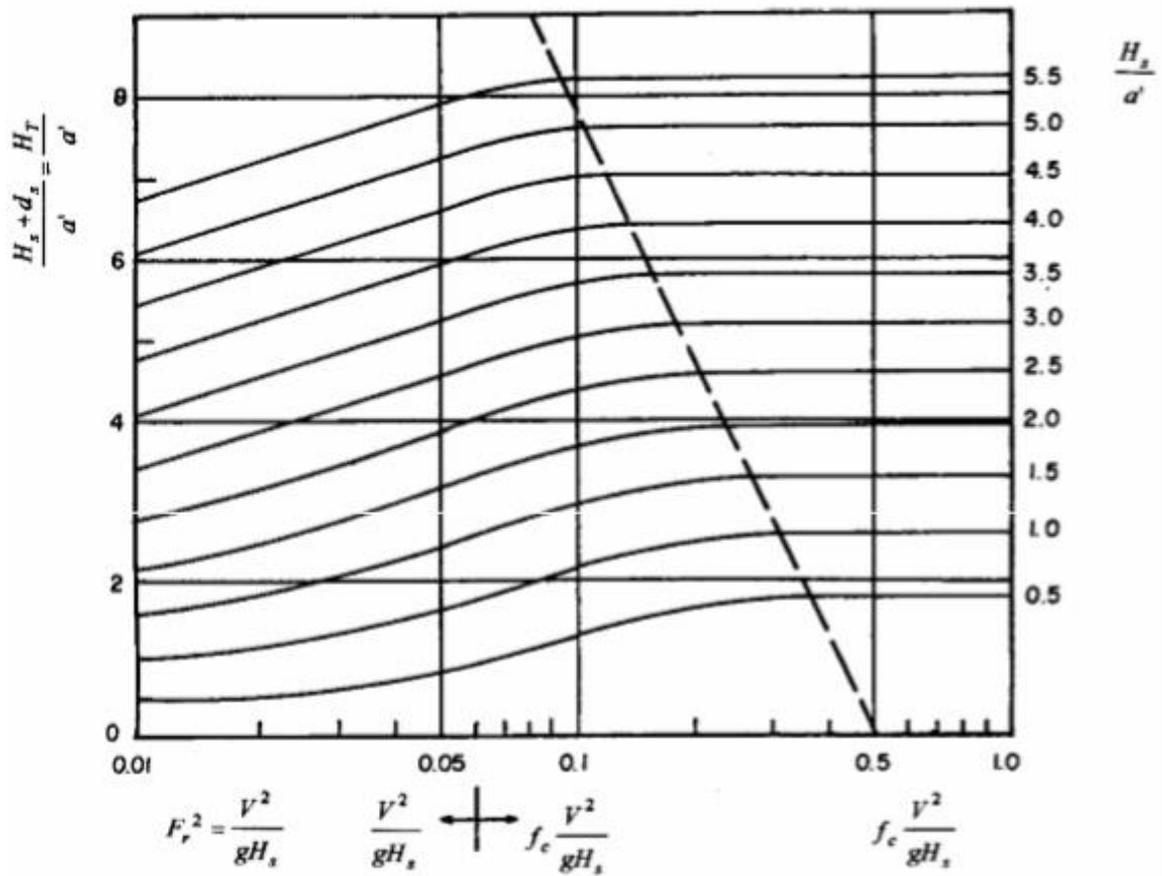
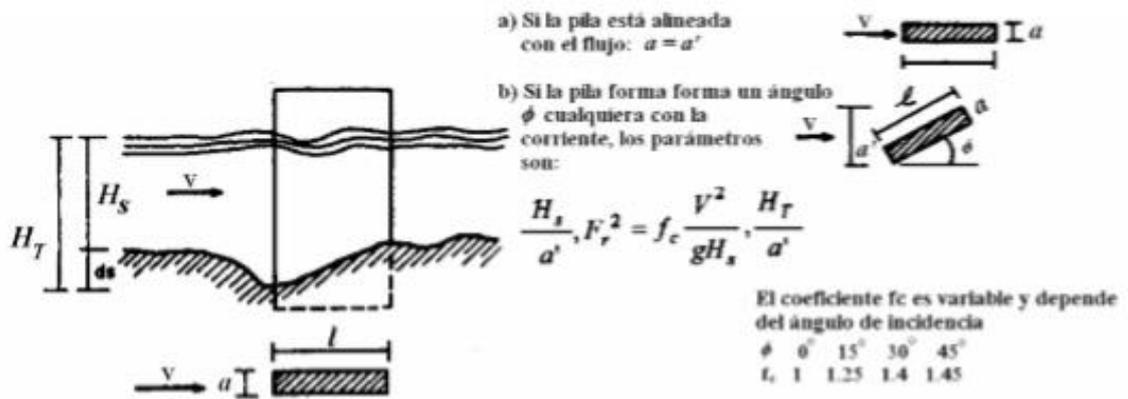


Figura 2-25 Ábaco para pilas de sección rectangular. Método Maza-Sánchez

Fuente: Juárez y Rico (1974)

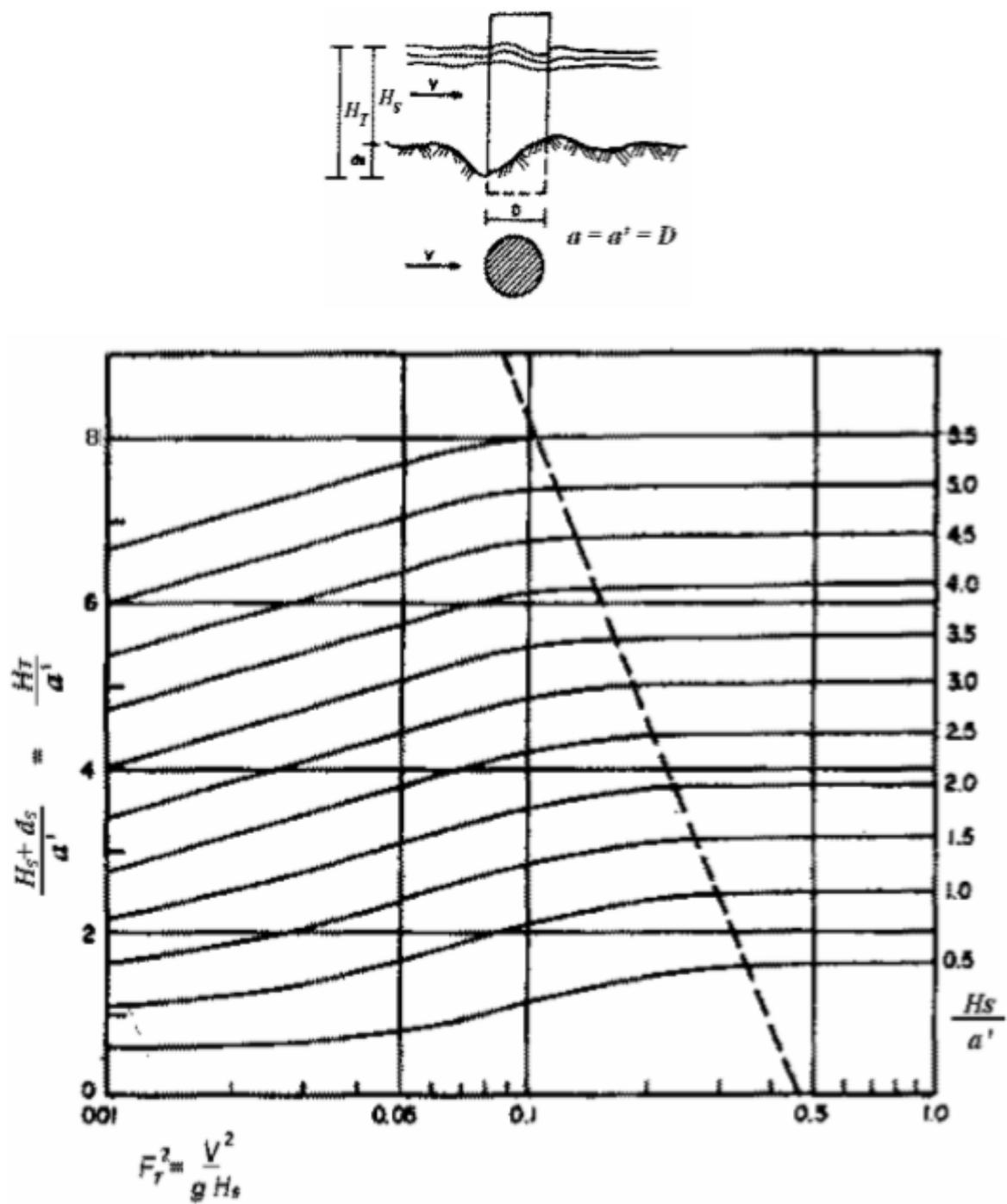


Figura 2-26 Ábaco para pilas de sección circular. Método Maza-Sánchez

Fuente: Juárez y Rico (1974)

Método de Melville y Coleman (2000)

Melville y Coleman (2000) presentaron una forma modificada de ecuación de predicción de profundidad de socavación, inicialmente propuesta por Melville (1997), insertando un factor de tiempo sugerido por Melville y Chiew (1999) (Coleman & Melville, 2001). La ecuación consta de varios factores multiplicadores para los efectos de los diversos parámetros que influyen en la determinación de la profundidad de socavación (Shrestha, 2015).

$$D_s = K_{hd}K_iK_dK_\alpha K_{sh}K_GK_t \quad (2.66)$$

Donde: K_{hd} es el coeficiente de relación ancho de la pila-profundidad de flujo (Tabla 2-7)

K_1 es el coeficiente de intensidad de flujo (Tabla 2-8)

K_d es el coeficiente del tamaño del sedimento (Tabla 2-9).

K_α es el coeficiente de alineación de la pila (Tabla 2-10).

K_{sh} es el coeficiente de forma de la pila (Tabla 2-11).

K_G es el coeficiente de la geometría del cauce, generalmente de valor 1.

K_t es el coeficiente de tiempo (Tabla 2-12)

Tabla 2-7*Coefficiente K_{hD} . Método Melville y Coleman*

Expresión	Condición
$k_{hD} = 2,4b$	$b/y < 0.7$
$k_{hD} = \sqrt{yb}$	$0.7 < b/y < 5$
$k_{hD} = 4,5y$	$b/y > 5$

Fuente: Melville y Coleman (2001)

Tabla 2-8*Coefficiente K_1 . Método Melville y Coleman*

Expresión	Condición
$K_1 = \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c}$	$\frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} < 1$
$K_1 = 1$	$\frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} > 1$

Fuente: Melville y Coleman (2001)

Tabla 2-9*Coefficiente K_d . Método Melville y Coleman*

Expresión	Condición
$K_d = 0,57 * \log$	$\frac{D}{d_{50}} < 25$
$K_d = 1$	$\frac{D}{d_{50}} > 25$

Fuente: Melville y Coleman (2001)

Tabla 2-10*Coeficiente K_α . Método de Melville y Coleman*

Expresión	Condición
$K_\alpha = 1$	Pila circular
$K_\alpha = \left(\frac{1}{b_e} \sin \theta + \cos \theta\right)^{0,65}$	Pila no circular

Fuente: Melville y Coleman (2001)

Tabla 2-11*Coeficiente K_{sh} . Método Melville y Coleman*

Expresión	Condición
$k_{sh} = 1$	Pila circular
$k_{sh} = 1$	Pila con bordes redondeados
$k_{sh} = 1,1$	Pila con bordes cuadrados
$k_{sh} = 0,9$	Pila triangular

Fuente: Melville y Coleman (2001)

Tabla 2-12*Coeficiente k_t . Método de Melville y Coleman*

Expresión	Condición
$k_t = 1$	$V_c/V > 1$
$k_t = \exp\left\{-0,03 \left[\frac{V_c}{V} \ln\left(\frac{t}{t_e}\right)\right]^{1,6}\right\}$	$V_c/V < 1$

Fuente: Melville y Coleman (2001)

2.1.6 PANELES SUMERGIDOS

Un panel sumergido con un ángulo de ataque con el flujo, α , induce una circulación horizontal en el flujo aguas abajo. La circulación surge porque los gradientes de presión vertical en las superficies del panel hacen que el agua fluya a lo largo del lado de alta presión (aguas arriba) adquiriendo una componente de velocidad hacia arriba, mientras que en el lado de baja presión (aguas abajo) hay una componente de velocidad hacia abajo los vórtices resultantes (lámina de vórtice) en el borde posterior del panel se enrollan desde un vórtice grande que surge de una posición cerca de la parte superior del panel (Figura 2-27). Este vórtice se transporta con el flujo aguas abajo, Donde da lugar a un movimiento secundario o helicoidal del flujo y a los cambios asociados en el esfuerzo cortante y la topografía del lecho (Odgaard & Wang, 1991).

El vórtice que induce el panel se describe como un vórtice de potencial constante con una fuerza que decae debido a la difusión viscosa a medida que el vórtice se transporta aguas abajo. La velocidad tangencial perpendicular al eje central de dicho vórtice se puede definir como:

$$v_{\theta} = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left[1 - \exp\left(-\frac{u}{4\varepsilon S} r^2\right) \right] \quad (2.67)$$

Donde: v_{θ} : es la velocidad tangencial al panel inducido por el vórtice (cm/s)

r es la distancia radial desde el eje del vórtice (cm)

u es la velocidad de aproximación al panel (cm/s)

Γ es la circulación horizontal inducida por el panel

La descripción anterior solo es válida si los vórtices están lejos de la capa límite.

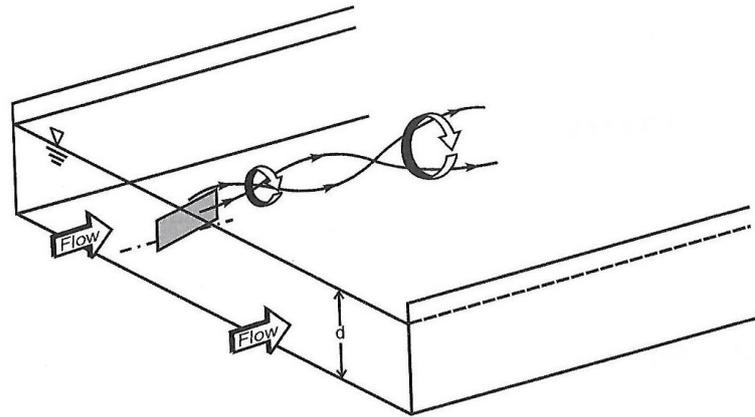


Figura 2-27 Esquema de circulación inducida por un panel sumergido

Fuente: Odgaard y Wang (1991)

El nivel original de la cama de sedimento en el río y el nivel de la superficie libre distorsionan al vórtice y esto produce que se genere una velocidad tangencial mayor cerca de los bordes que las que precedía la ecuación 2.67.

La circulación horizontal Γ se calcula relacionando la fuerza de elevación F_L , que el panel ejerce sobre el flujo. Esta fuerza de elevación tiene la misma magnitud que la fuerza que el flujo ejerce sobre el panel, y según el teorema de Kutta-Joukowski es proporcional a una circulación vertical alrededor del panel asociada con el cambio del estancamiento trasero al borde posterior de la pila. Esta circulación vertical se la calcula mediante la ecuación:

$$F_L = \rho \Gamma u H \quad (2.68)$$

Donde: ρ es la densidad del fluido (kg/cm^3)

H es la altura del panel (cm)

2.1.6.1 Panel doble

El área del fondo del lecho afectada por un panel es limitada. Para generar un vórtice con capacidad suficiente para afectar el patrón de la corriente sobre un área mayor en la sección transversal, se deben emplear múltiples paneles. La pregunta en este punto sería a qué distancia se deben colocar los paneles de forma que logren generar un vórtice coherente sin disminuir la eficiencia de cada panel individual (Figura 2-28)

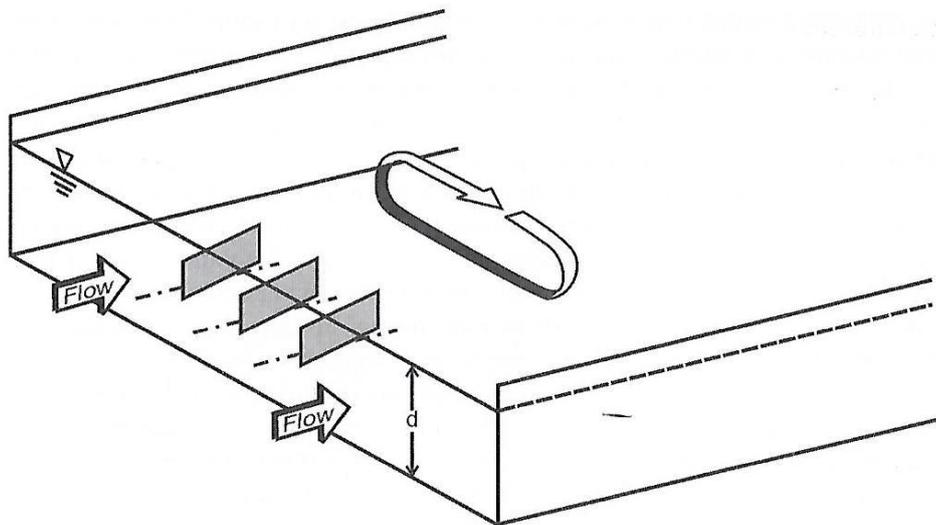


Figura 2-28 Esquema de circulación inducida por tres paneles sumergidos

Fuente: Odgaard y Wang (1991)

Para definir el problema, considere el flujo alrededor de un sistema de dos paneles (dos paneles colocados uno junto al otro con la misma orientación). Si la distancia entre ellos es muy grande, el efecto del primer panel en el flujo alrededor del otro es muy pequeño, cada panel genera su propio vórtice distinto, y la circulación asociada es aproximadamente similar al efecto de un solo panel, sin embargo, en este caso, los dos vórtices no se unen para formar un vórtice combinado, por lo que el objetivo no se cumple.

Si el espacio es pequeño, los paneles producen un vórtice combinado aguas abajo. En esta situación, la interacción entre los paneles se vuelve pronunciada y los vórtices generados por los paneles interactúan entre sí. Esta interferencia causa una reducción en la circulación total debido a la capa de corte en el área entre los vórtices; en consecuencia, la circulación total inducida por dos paneles estrechamente espaciadas es menos del doble que debido a un panel aislado (Odgaard & Wang, 1990).

2.2 ESTADO DEL ARTE.

2.2.1 ESTUDIOS SOBRE ANÁLISIS DE TURBULENCIA.

El origen del estudio sobre turbulencia tuvo lugar una vez que Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes publicaran un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido newtoniano llamadas ecuaciones de Navier-Stokes. Con el paso del tiempo varios autores se han dedicado a su resolución generando en el proceso modelos para caracterizar al flujo.

Boussinesq (1877)

Boussinesq realizó simultáneamente un promedio de las ecuaciones de Navier-Stokes y un cierre tensorial del tipo *eddy-viscosity*, usando una analogía con la teoría cinética y lo que él llamó “región relativamente limitada y casi siempre insignificante” es realmente el tensor que luego se llamará Tensor de Reynolds a pesar de que introdujo implícitamente un tensor de este tipo al considerar los componentes entre los ejes de las acciones ejercidas a través de los planos del elemento fluido con componente normales y tangenciales. Boussinesq comenta que la expresión promedio que obtiene todavía obedece a las ecuaciones de Navier-Stokes, Donde la viscosidad es reemplazada por un coeficiente mucho mayor, denotado ϵ (Schmitt, 2007). Boussinesq no usa el término “turbulencia” en sus publicaciones, usó: "movimientos tumultuosos", "agitaciones de remolinos", "teoría de movimientos", "teoría de remolinos líquidos".

Reynolds (1883, 1895)

El experimento que realizó Osborne Reynolds en 1883 permitió identificar los flujos posibles y caracterizarlos en función de un parámetro adimensional que lleva su nombre. Utilizó el mismo enfoque que Boussinesq, pero introdujo el tensor de tensiones de Reynolds usando el gradiente del campo de velocidad media conocidos como “promedios de Reynolds” (1895) para la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes. El resultado se usa hasta el día de hoy en la

resolución de los modelos de viscosidad turbulentos (Schmitt, 2007). Los términos usados por Reynolds en sus publicaciones eran: “camino sinuoso”, “movimiento sinuoso”, “remolinos irregulares, sinuosos o perturbación relativa”

Prandtl (1904, 1925)

Ludwig Prandtl realizó importantes trabajos pioneros en la aerodinámica, con ayuda de su canal de prueba de líquidos en 1904 formuló una teoría sobre la capa límite en la mecánica de fluidos que lo condujo a una comprensión de la fricción y de su reducción a través de la aerodinámica.

En el campo de la turbulencia notó que puede haber una analogía entre la ley de Newton de la viscosidad y las tensiones de Reynolds (1925) permitiéndole generar un equivalente macroscópico unidimensional del movimiento de las partículas dando lugar a su modelo de longitud de mezcla donde si se puede determinar correctamente la longitud de mezcla entonces, es posible encontrar la viscosidad. Este modelo trabaja de forma razonable en flujos simples y unidimensionales si se escoge una longitud adecuada (Davidson, 2004).

Taylor (1923)

Uno de los aportes realizados por Sir Geoffrey Ingram Taylor en la dinámica de fluidos tuvo lugar en 1923 cuando realizó una serie de experimentos bastante simples usando dos cilindros concéntricos con agua entre ellos, a medida que la velocidad de rotación del cilindro interior aumentaba los vórtices que aparecían (vórtices de Taylor) se volvían más caóticos. De aquí que la velocidad de rotación es necesaria para definir el parámetro adimensional conocido como “número de Taylor” (Koschmieder, 1993). Ese mismo año también dio una solución a un caso especial del flujo Beltrami para flujos planos inestables mediante los vórtices en descomposición de Taylor.

Kolmogórov (1941)

Andréi Kolmogórov realizó varias investigaciones significativas en el campo de la turbulencia incluyendo, entre otros, el modelo de “cascada de energía” en el que postula que la turbulencia está formada por remolinos de diferentes tamaños. Los remolinos más grandes, que tienen una longitud característica del orden del dominio fluido, se vuelven inestables y van transfiriendo energía a remolinos más pequeños que a su vez también la van transmitiendo a remolinos aún más pequeños generándose la llamada cascada de energía. En sus manos, la teoría de la turbulencia obtuvo una forma matemática precisa para la medida de espacios funcionales. En dos breves artículos en 1941, Kolmogórov postuló en forma matemática concisa ideas sobre la estructura de los componentes a pequeña escala del movimiento turbulento de fluidos y gases (Vitanyi, 2007), latentes en trabajos experimentales anteriores, particularmente por G.I. Taylor, conocidos como las escalas de tiempo, longitud y velocidad de Kolmogórov.

Rotta (1951)

Julius C. Rotta notó su afinidad con el campo de la turbulencia durante su estadía en Gotinga, al leer la publicación de Ludwig Prandtl acerca de los problemas asociados a la turbulencia y, en particular, su contribución a la turbulencia completamente desarrollada publicada en 1945. Al mismo tiempo, W. Heisenberg y C.F. Weizacker publicaron sus resultados en el espectro de energía de la turbulencia isotrópica a grandes números de onda. Desde ese momento, Rotta realizó su investigación en la turbulencia. En 1951 publicó una nueva teoría sobre turbulencia no homogénea en la revista de física, esto fue un paso muy importante para la construcción de un modelo de turbulencia en el que podría basarse un procedimiento de predicción completo, aunque para ese tiempo los procedimientos computacionales capaces de explotar estas ideas no existían y la comunidad no estaba a favor de sus ideas (Meier & Bradshaw, 2012). Tuvo que pasar más de una década para que sus ideas fueran comprobadas.

Chiliquinga y Pinto (2019)

Como parte de su tesis de ingeniería Chiliquinga y Pinto realizaron un análisis experimental de los fenómenos de turbulencia causantes de erosión alrededor de pilas de puente usando un velocímetro acústico Doppler (ADV) en el canal del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos de la Escuela Politécnica Nacional (CIERHI-EPN). Colocaron sedimento fino en el fondo de una sección de control del canal y ubicaron una pila circular, midieron la velocidad instantánea usando el ADV, filtraron y trataron los datos para obtener la distribución de probabilidades, las tensiones de Reynolds, la energía y disipación turbulenta, las intensidades turbulentas y las escalas de Kolmogórov; replicaron el experimento con una pila cuadrada con el fin de realizar una comparación. Como resultado se tienen graficas que permiten observar el flujo turbulento generado y la forma y dirección de los vórtices generados (Chiliquinga y Pinto, 2019).

2.2.2 ESTUDIOS SOBRE PANELES SUMERGIDOS

Una de las principales tareas de los ingenieros de ríos es ayudar a facilitar el uso óptimo de este recurso y al mismo tiempo proporcionar protección contra desastres. Las estrategias tradicionales incluyen la construcción de diques, presas de alas, presas, varios tipos de revestimientos y dragados que, desafortunadamente son caras y, a veces, incluso perjudican el medio ambiente. La técnica de panel sumergido ofrece una alternativa que protege el medio ambiente y facilita el desarrollo sostenible alrededor del río (Odgaard, 2009). Varios autores han trabajado en el dimensionamiento y aplicación de este elemento.

Odgaard (1983 - 1990)

Jacob Odgaard es uno de los pioneros en este campo, llegó a Estados Unidos en 1977 y ha realizado todas sus investigaciones desde entonces en la Universidad de Iowa. Junto a John Kennedy en 1983 realizó un experimento para validar la teoría planteada y la efectividad de las paletas de Iowa, como las denomina inicialmente, para producir distribuciones más uniformes de profundidad y velocidad en canales curvos de lecho erosionable mediante experimentos realizados en un canal de sedimento de recirculación curvo en el Instituto de Investigación Hidráulica de Iowa (IIHR) que es un modelo físico idealizado de una curva del río Sacramento, California (Odgaard & Kennedy, 1983). Los resultados obtenidos demostraron que las paletas de Iowa eran efectivas para anular las corrientes secundarias producidas en las curvas de los canales que, a menudo conducen a debilitar y acelerar la erosión de las orillas de los ríos. En 1985 junto a Carlos Mosconi deciden diseñar, instalar y evaluar un sistema de paletas de Iowa para la protección contra la erosión en una curva del este del río Nishnabotna, Iowa. Los datos fueron tomados durante la primavera de 1986 y como resultado se descubrió que el sistema reduce eficazmente la velocidad y recorre el banco sin cambiar la pendiente de energía del canal (Odgaard & Mosconi, 1987).

En 1990 junto con Yalin Wang y como parte de la tesis de doctorado de Wang definen los parámetros de diseño, espaciamientos necesarios en los arreglos de paletas y ángulos de ataque posibles para el control de sedimentos en las vías fluviales de los puentes generando gráficos de diseño usando dos ejemplos numéricos preparados con datos que son típicos de muchos ríos en Iowa y el medio oeste de Estados Unidos (Odgaard & Wang, 1990).

Ghorbani y Kells (2008)

Bahram Ghorbani y Jim Kells analizaron el efecto de los paneles sumergidos en pilas de sección circular, generaron un total de 36 experimentos con un solo panel de longitud igual al diámetro de la pila y a distancia 1.5 veces el diámetro variando la altura del panel, ángulo de inclinación y profundidad de flujo y 7 experimentos con 2 paneles con ángulo de ataque al flujo constante, altura del panel igual a 0 y distancia a la pila igual a 0 colocados a distintos ángulos con respecto del centro de la pila (Ghorbani & Kells, 2008).

Los resultados obtenidos demuestran que el uso de paneles dobles es más efectivo que el simple y que si se usa un solo panel es necesario adoptar una posición adecuada, además la mayor reducción conseguida en la socavación ocurrió cuando se usaron dos paneles con altura 0 a distancia 0 y a 30 grados con respecto al centro de la pila donde, además, el hoyo se observó en la esquina aguas arriba del panel.

Ouyang y Lai (2013)

Hasta ahora, las paletas han sido placas planas o láminas ligeramente curvadas con un giro en la cola, pero Huei-Tau Ouyang y Jih-Sung Lai decidieron modificarlas en un contorno trapezoidal con una sección transversal en forma de lámina. Utilizaron dos tipos de paletas: la NACA debido a que la forma adoptada pertenece a la familia de 4 dígitos de la superficie aerodinámica de NACA y la B-spline donde la sección se descompone de dos curvas de Bezier en el borde delantero y trasero de la paleta siguiendo un procedimiento basado

en un algoritmo genético (Huei-Tau & Jihn-Sung, 2013). El resultado de esta experimentación fue una optimización de estos perfiles disminuyendo los coeficientes de arrastre de ambas, además se encontró que la resistencia de la placa NACA es mayor que la B-spline a pesar de que esta última tiene un rendimiento general mayor que la otra con coeficientes de arrastre similares entre ambos tipos de paletas.

Hamad (2015)

La investigación realizada por Khaled M. A. Hamad Mohamed como parte de su tesis de doctorado consistía en medir las presiones verticales que actúan a ambos lados de una paleta sumergida para poder determinar experimentalmente las fuerzas, coeficientes de arrastre y elevación y estudiar la turbulencia generada en el fluido determinando parámetros como las tensiones de Reynolds, energía cinética turbulenta y tasa de disipación, intensidades de turbulencia, escalas de Kolmogórov, espectro de energía cinética, campos de velocidades turbulentas, velocidades fluctuantes y finalmente los histogramas de Reynolds. El resultado obtenido concuerda con lo expuesto por Odgaard (2009) en aspectos como el valor medio de circulación en la superficie total, la viscosidad turbulenta y la fuerza perpendicular que actúa en el panel (Hamad, 2015).

Türkben (2018)

El experimento que realizó Ash Bor Türkben para evaluar la eficiencia de un arreglo de tres paneles en condiciones de alimentación de sedimentos comparando la topografía del lecho antes y después de su instalación tuvo lugar en un canal de 1m de ancho con una derivación de 15 cm de ancho, se colocó el arreglo de paneles antes de la entrada a la derivación y las mediciones se realizaron mientras se alimentaba sedimento aguas arriba en el canal principal. Como resultado de la aplicación de los paneles la cantidad de sedimento que ingresaba a la desviación disminuyó en un 20% y la socavación máxima ocurrió en la esquina aguas debajo del inicio de la desviación (Türkben, 2018).

3. CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL CANAL

La experimentación realizada tuvo lugar en el canal hidrodinámico del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Sus características geométricas son: 25 m de longitud, 1 m de ancho, 0,8 m de profundidad y una pendiente variable, controlada por computador, de 0 a 4%. Las paredes del canal son de vidrio templado de espesor 10 mm adheridos a una estructura metálica y el fondo está conformado por placas de acero inoxidable de 6 mm de espesor adheridas con pernos de 1/8 de pulgada (Figura 3-1).



Figura 3-1 Canal hidrodinámico CIERHI-EPN

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Las instalaciones consisten de un tanque de carga por donde ingresa el agua impulsada por bombas pasando a través de un vertedero triangular con contracciones, una zona de disipación de energía y una pantalla de

uniformización que disminuye el efecto del giro de 90 grados que debe hacer el agua para ingresar al canal propiamente dicho (Figura 3-2a) además existen dos plataformas de acceso a un lado del canal para control y observación de los experimentos y al final un vertedero rectangular sin contracciones que permite regular la profundidad del flujo así como también una serie de tanques disipadores (Figura 3-2b) que devuelven el agua al canal de recirculación que se ubica alrededor de las instalaciones del CIERHI-EPN.



Figura 3-3-2 Instalaciones canal CIERHI-EPN a) aguas arriba, b) aguas abajo

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

3.1.1 CURVA DE DESCARGA DEL VERTEDERO

Para poder regular el caudal que pasa por el canal es necesario conocer la curva característica del vertedero ubicado a la salida del tanque de carga. Fue necesario realizar un aforo volumétrico para su determinación.

3.1.1.1 Materiales e instrumentos

- Probeta
- Cubeta de 4 litros
- Cubeta de 10 litros
- Lavacara
- Cronómetro
- Flexómetro
- 3 Limnímetros

3.1.1.2 Procedimiento

Antes de empezar es necesario saber la medida inicial h_0 de los tres limnímetros cuando el nivel de agua coincide con el vértice del vertedero (Figura 3-3).

Abrir la válvula y esperar hasta que el nivel del manómetro (Figura 3-4) se estabilice, con el cronómetro en cero colocar la lavacara al pie del vertedero procurando captar toda la lámina de agua, retirar la lavacara y detener el cronómetro de forma simultánea, es aconsejable que el tiempo sea corto en las primeras mediciones así el volumen captado es pequeño.

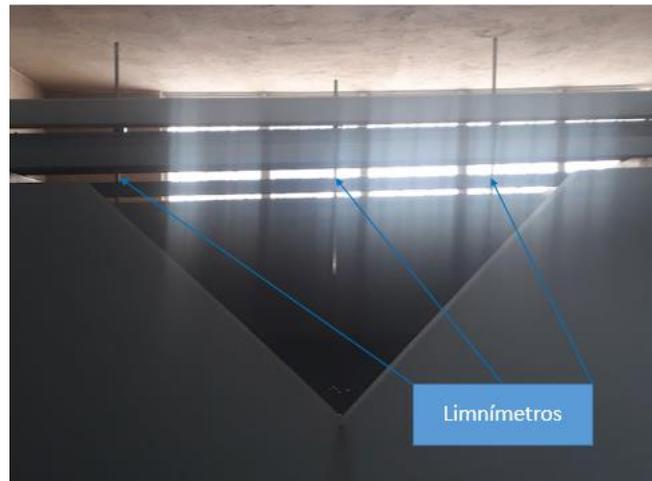


Figura 3-3 Límnímetros encerados

Fuente: Barros y Echeverría (2020)



Figura 3-4 Manómetro

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Medir, con ayuda del flexómetro la carga de agua en el manómetro (Δh) como se observa en la Figura 3-5, usando las cubetas y la probeta determinar el volumen de agua captado, hacer coincidir la punta de los limnímetros con la superficie de agua en el tanque. Registrar en la hoja de datos (Figura3-6) el tiempo, carga, medidas en los limnímetros y el volumen captado, repetir el proceso abriendo la válvula en 1/8 de vuelta mientras que el volumen captado sea manejable.



Figura 3-5 Medición de Δh

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Prueba	Δh (cm)	Limnómetro 1 (cm)	Limnómetro 2 (cm)	Limnómetro 3 (cm)	Volumen (L)	Tiempo (s)
1						
2						
3						
4						
5						

Figura 3-6 Hoja de datos curva de descarga vertedero triangular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

3.1.1.3 Curva de descarga del vertedero

Es necesario conocer la curva de descarga del vertedero aguas arriba del canal para poder determinar el caudal y la velocidad del flujo correctas para el experimento. Cuando el vertedero es de sección triangular (Figura 3-7), simétrico respecto a la vertical en el vértice y con un ángulo θ en el vértice, se tiene:

$$Q = C * \Delta h^{5/2} \quad (3.1)$$

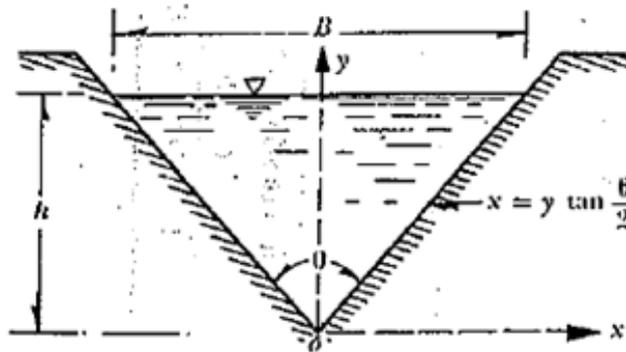


Figura 3-7 Vertedero triangular con contracciones

Fuente: Sotelo (1997)

Según la Universidad Católica de Chile el coeficiente C se determina usando la ecuación:

$$C = 2.362\mu k_v \quad (3.2)$$

Donde el coeficiente μ se obtiene de la Figura 3-8 en función de la carga Δh . Mientras que el coeficiente k se obtiene de la Figura 3-9.

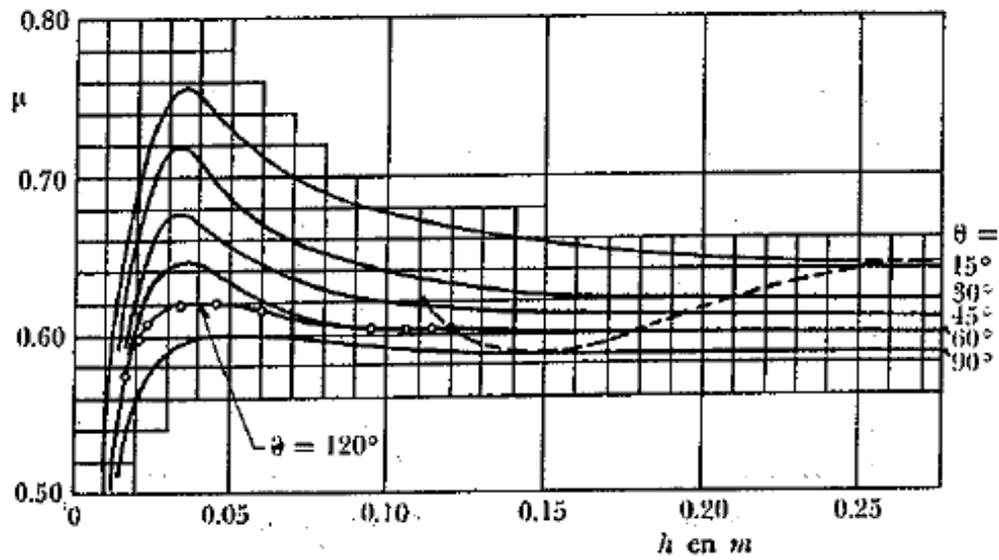


Figura 3-8 Coeficiente μ según la U. de Chile

Fuente: Domínguez (1999)

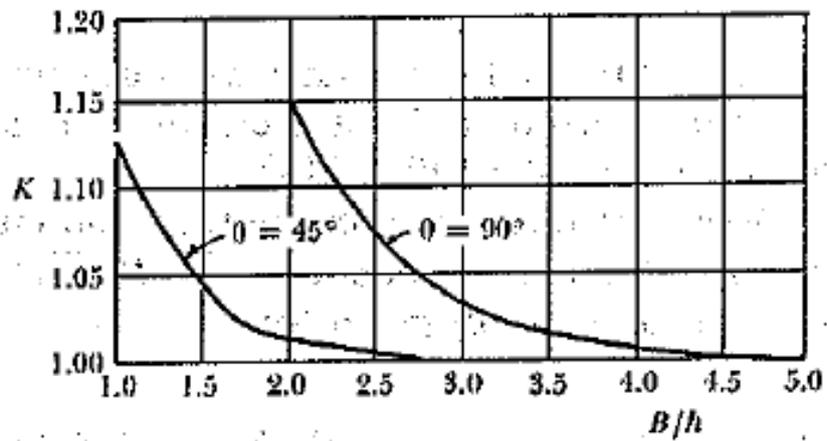


Figura 3-9 Coeficiente k_v según la U. de Chile

Fuente: Domínguez (1999)

Los datos obtenidos durante las mediciones realizadas se resumen en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1

Datos aforo volumétrico

DATOS						
Prueba	Deflexión del manómetro Δh (cm)	Limnómetro 1 (cm)	Limnómetro 2 (cm)	Limnómetro 3 (cm)	Volumen V (L)	Tiempo T (s)
1	4	30,02	14,73	30,02	4,45	4
2	5	30,38	14,8	30,02	4,5	4
3	6	31,46	16,02	31,34	7,3	4
4	8,7	34,13	18,79	33,94	9,77	4
5	9	34,17	18,7	33,93	19,445	4
6	9,6	35,4	19,93	35,46	19,65	3,83
7	10,8	36,62	21,13	36,32	29,4	4
8	12,6	37,7	22,23	37,45	38,48	4
9	13,5	39,23	23,8	38,91	41,91	4
10	14,5	39,35	24,4	39,74	54,89	4
11	16,1	41,21	25,66	39,58	58,3	4
12	17,1	42,33	26,87	42,1	85,32	4
13	18,1	43,43	27,78	43,1	94,37	4,67
14	18,9	44,54	29,33	44,65	81,67	3,63
15	19	44,32	28,85	44,09	80,4	3,24
16	20,1	45,32	29,87	45,11	88,82	3,8
17	20,9	46,15	30,25	46,08	75,28	2,87
18	21,85	47,31	31,89	47,05	78,75	2,7
19	22,9	48,47	33,53	48,11	60,68	1,82

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Una vez aplicadas las ecuaciones 3.1 y 3.2 al igual que las figuras 3-8 y 3-9 a los datos se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 3.2. Para determinar el caudal medido se utilizó la definición de caudal Donde $Q=V/T$.

Tabla 3-2*Resultados aforo volumétrico*

Prueba	Ecuación U. de Chile					Aforo volumétrico		
	Carga sobre el vertedero h (m)	μ	k	Coficiente de descarga C	Caudal teorico (l/s)	Volumen V (l)	Tiempo T (s)	Caudal medido (l/s)
1	0,043	0,600	1,150	1,630	0,633	4,45	4	1,113
2	0,049	0,600	1,150	1,630	0,863	4,5	4	1,125
3	0,060	0,600	1,150	1,630	1,435	7,3	4	1,825
4	0,087	0,590	1,150	1,603	3,565	9,77	4	2,443
5	0,088	0,590	1,150	1,603	3,710	19,445	4	4,861
6	0,098	0,585	1,150	1,589	4,768	19,65	3,83	5,131
7	0,109	0,583	1,150	1,584	6,267	29,4	4	7,350
8	0,124	0,582	1,150	1,581	8,544	38,48	4	9,620
9	0,136	0,582	1,150	1,581	10,785	41,91	4	10,478
10	0,144	0,582	1,150	1,581	12,352	54,89	4	13,723
11	0,157	0,582	1,150	1,581	15,324	58,3	4	14,575
12	0,170	0,582	1,150	1,581	18,730	85,32	4	21,330
13	0,180	0,582	1,150	1,581	21,619	94,37	4,67	20,208
14	0,191	0,582	1,150	1,581	25,088	81,67	3,63	22,499
15	0,189	0,582	1,150	1,581	24,565	80,4	3,24	24,815
16	0,200	0,582	1,150	1,581	28,143	88,82	3,8	23,374
17	0,207	0,582	1,150	1,581	30,911	75,28	2,87	26,230
18	0,218	0,582	1,150	1,581	35,191	78,75	2,7	29,167
19	0,225	0,582	1,150	1,581	38,159	60,68	1,82	33,341

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La curva resulta de graficar en el eje de las abscisas la carga sobre el vertedero (Δh) y en el eje de las ordenadas el caudal correspondiente como se observa en la Figura 3-10.

Como resultado, la ecuación que permitirá determinar el caudal que pasa por el vertedero hacia el canal es:

$$Q = 1525.2 * \Delta h^{2.48} \quad (3.3)$$

Con Δh en m y Q en l/s.

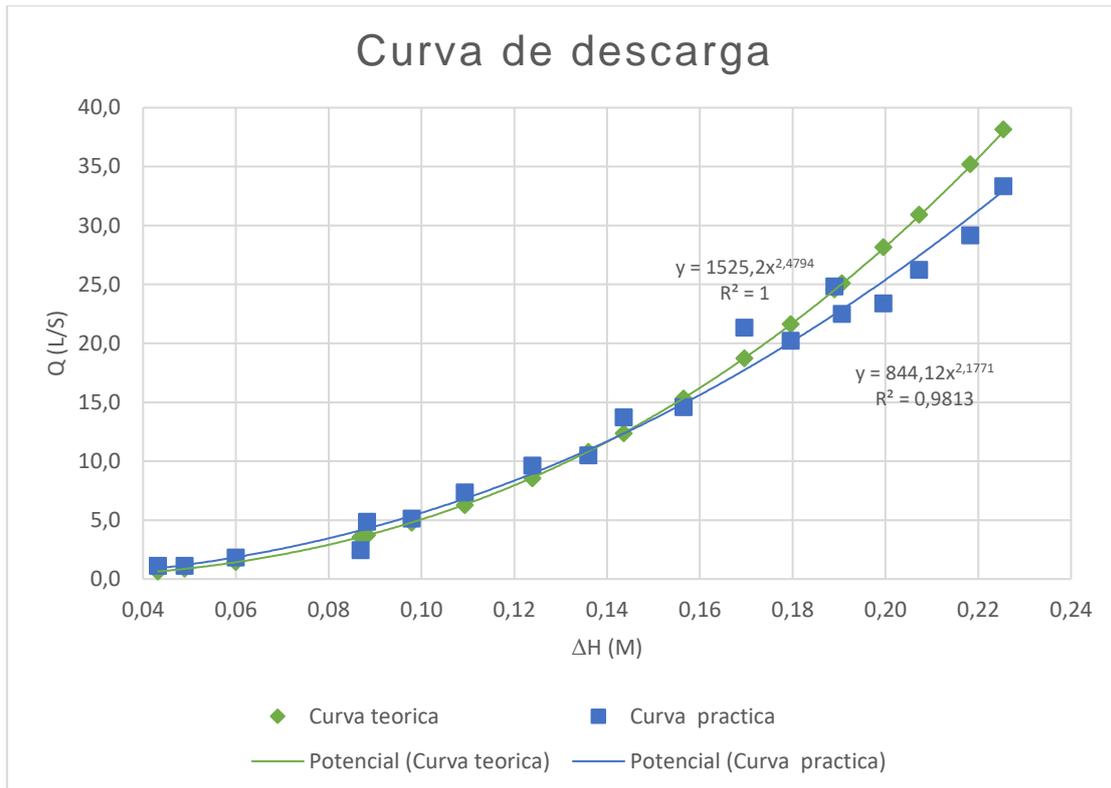


Figura 3-10 Curva de descarga del vertedero triangular con contracciones

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

3.2 CONDICIONES DE CONTORNO

La capa de sedimento colocada en el canal tiene un espesor de 10cm y una longitud de 3,12 m, la pila se ubica 1.5m hacia arriba del borde inferior de la capa de sedimento y en el centro del canal, los paneles están colocados a 72 cm del eje de la pila, espaciados 25 cm entre sí y hacia los bordes del canal y a 90 cm del borde aguas arriba de la capa de sedimento como se observa en la Figura 3-11. Los ensayos se realizaron para dos pilas de hormigón, una de sección cuadrada y otra circular que ocupan el 10% del ancho efectivo del canal. Algunas condiciones se mantienen constantes a lo largo de la experimentación, parámetros que se muestran resumidos en la Tabla 3-3.

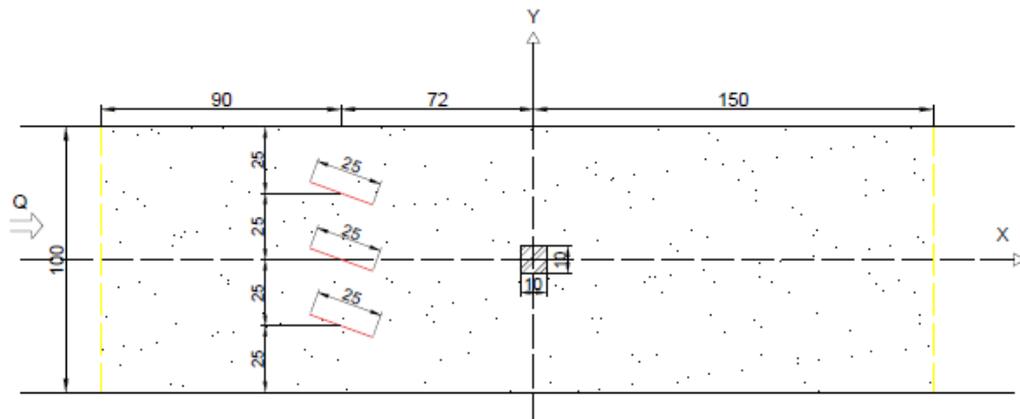


Figura 3-11 Ubicación de pilas y paneles en el canal

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 3-3

Condiciones de contorno para los ensayos

Condiciones de contorno		
Parámetro	Valor	Unidad
Pendiente del canal (S)	0,6	%
Ancho del canal (B)	1	m
Diámetro del sedimento (D_{50})	13	mm
Peso específico del agua (γ)	1	T/m ³
Peso específico del sedimento (γ_s)	2,65	T/m ³

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

3.3 ENSAYO DE INICIO DEL MOVIMIENTO

Las dos condiciones propuestas en la sección 2.1.3.2 pueden ocurrir durante los ensayos, pero, es necesario determinar cuándo se genera el inicio del movimiento para que se desarrolle únicamente la condición de aguas claras. Se deben seguir los pasos de la sección 2.1.3.1 para determinar bajo qué condiciones ocurre el movimiento de las partículas del sedimento. Los resultados se resumen en la Tabla 3-4 donde se observa que para un calado de 0,205 m la condición es de lecho móvil, razón por la cual se trabajara con el menor de los calados de la condición de aguas claras (0.25m).

Los parámetros hidráulicos del último ensayo de la Tabla 3-4 donde se observa el lecho móvil se obtuvieron usando las ecuaciones de la sección 2.1.3.1. En la Tabla 3-5 se observan todos los valores obtenidos. La relación final entre T_o y T_{cr} es casi 1 lo que implica que existe inicio del movimiento.

Tabla 3-4

Ensayo de inicio del movimiento

Ensayo de inicio del movimiento		
Caudal (l/s)	Calado (m)	Observación
52,47	0,44	Aguas claras
52,47	0,38	Aguas claras
52,47	0,365	Aguas claras
52,47	0,25	Aguas claras
52,47	0,205	Lecho móvil

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 3-5*Parámetros hidráulicos del inicio del movimiento*

Inicio de movimiento			
Paso	Parámetro hidráulico	Valor	Unidad
Datos	Pendiente (S)	0,6	m/m
	Calado (y)	0,205	m
	Caudal (Q)	52,47	l/s
	Velocidad (V)	0,256	m/s
	Ancho de canal (B)	1	m
	Viscosidad cinemática (ν)	1,14E-06	m ² /s
	Gravedad (g)	9,81	m/s ²
1	Área (A)	0,205	m ²
	Radio hidráulico (Rh)	0,145	m
	Velocidad de corte (U*)	0,016	m/s
	Coefficiente de Manning (n)	0,0143	
	Pendiente motriz (S _f)	0,000176	
	Número de Reynolds del sedimento (Re*)	10,261	
2	Parámetro ASCE	22,420	
3	Tensión adimensional de Shields (ζ^*)	0,0225	
	Tensión crítica (T _{cr})	0,027	N/m ²
4	Tensión de fondo (T _o)	0,026	N/m ²
5	Relación T _o /T _{cr}	0,931	

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

3.4 PREPARACIÓN DE EXPERIMENTOS

3.4.1 SOCAVACIÓN EN PILA CUADRADA SIN PANELES

El procedimiento realizado para ejecutar el experimento fue:

- Colocar arena en la sección de control, compactar y enrasar hasta conseguir un espesor uniforme de 10 cm. Evitar las arrugas y dunas a lo largo de la superficie.
- En la posición establecida colocar la pila de sección cuadrada haciendo un hueco en la capa de sedimento cuidando al máximo su inclinación y orientación.
- Nivelar nuevamente el sedimento y verificar su espesor, verificar que a los extremos la arena se distribuya adecuadamente para evitar que con el flujo de agua se levante.

. Para conseguir las condiciones de agua clara determinadas en la sección anterior se realizó el siguiente procedimiento:

- Encender una de las bombas del CIERHI-EPN.
- Abrir la válvula de regulación que permite el paso del agua al tanque de carga de tal forma que se llene de forma lenta y controlada.
- Una vez que el agua empieza a pasar por el vertedero es necesario observar que la capa de sedimento no sea arrastrada rápidamente por el flujo.
- Continuar abriendo la válvula de regulación poco a poco hasta llegar a la carga requerida en el manómetro ($\Delta h = 0,26$ m)
- Controlar, con ayuda del vertedero ubicado al final del canal el calado requerido (25 cm).
- Una vez que se han conseguido estas condiciones se debe dejar correr el agua por el canal al menos el tiempo de equilibrio que se obtiene con la ecuación 2.55.

$$\frac{y}{b} = \frac{0.25}{0.1} = 2.5$$

Si $y/b \leq 6$

$$T_e = 30,98 \left(\frac{0.1}{0.21} \right) \left(\frac{0.21}{0.25} - 0,4 \right) \left(\frac{0.25}{0.1} \right)^{0,25} \rightarrow T_e = 8.16 \text{ horas}$$

- Una vez transcurrido el tiempo del ensayo es necesario drenar la mayor cantidad posible de agua y se deben cerrar la válvula, bajar la compuerta y apagar la bomba de la misma forma en que se abrieron.
- El resultado obtenido se observa en la Figura 3-12.



Figura 3-12 Socavación alrededor de la pila cuadrada sin paneles

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

3.4.2 SOCAVACIÓN EN PILA CUADRADA CON PANELES

Una vez que la arena está seca se deben colocar los paneles con mucho cuidado de no afectar el hoyo que se generó al pie de la pila.

De acuerdo con Jacob Odgaard (2009) en su libro “River training and sediment management with submerged vanes” es recomendable seguir una serie de pasos para el correcto dimensionamiento de los paneles, esto es:

1. Determinar las condiciones del diseño que dependerán de la aplicación, cada una de estas requiere condiciones únicas.
2. Determinar las variables de diseño para la condición escogida en el paso 1.
 - A. Ancho promedio ($B = 1 \text{ m}$)
 - B. Profundidad promedio ($y = 0,25 \text{ m}$)
 - C. Velocidad promedio ($V = 0,21 \text{ m/s}$)
 - D. Pendiente longitudinal ($S = 0,0006 \text{ m/m}$)
 - E. Diámetro medio del grano ($D_{50} = 0,739 \text{ mm}$)
 - F. Profundidad máxima sin paneles ($d_m = 0,25 \text{ m}$)
 - G. Constante de von Kármán ($K = 0,41$)
 - H. Gravedad ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
3. En base a las variables del paso 2, calcular:
 - A. Parámetro de fricción (m)

$$m = \frac{KV}{\sqrt{gSy}} \quad (3.4)$$

$$m = \frac{0,41 * 0,21}{\sqrt{9,81 * 0,0006 * 0,25}} = 1,30$$

- B. Número de Froude del sedimento (F_D)

$$F_D = \frac{V}{\sqrt{gD_{50}}} \quad (3.5)$$

$$F_D = \frac{0,21}{\sqrt{9,81 * 0,739 * 1000}} = 0,002$$

C. Relación profundidad ancho (y/B)

$$\frac{y}{B} \quad (3.5)$$

$$\frac{y}{B} = \frac{0,25}{1} = 0,25$$

4. Selección de las dimensiones del panel

A. Altura del panel (H), debe cumplir:

$$0,12 < \frac{H}{y} < 0,48 \quad (3.6)$$

$$4H = 0,40 \therefore H = 10cm$$

B. Longitud del panel (L)

$$L=25 \text{ cm}$$

C. Angulo de ataque (α)

$$15^\circ < \alpha < 25^\circ \quad (3.7)$$

$$\alpha = 20^\circ$$

D. Sumergencia (T)

$$T = y - H \quad (3.8)$$

$$T = 0,25 - 0,11 = 0,14cm$$

5. Calcular:

A. Sumergencia relativa del panel (T/d_o)

$$\frac{T}{d_o} \quad (3.9)$$

$$\frac{T}{d_o} = \frac{0,14}{0,25} = 0,56$$

B. Relación largo-ancho (H/L)

$$\frac{H}{L} \quad (3.10)$$

$$\frac{H}{L} = \frac{0,11}{0,25} = 0,44$$

Debe cumplir $H \approx 0,33L$

6. Selección del número de paneles en función de los espaciamientos (Figura 3-13)

A. Escoger un valor para d_b , determinar d_b/y que debe cumplir:

$$\frac{d_b}{y} \leq 1,5 \quad (3.11)$$

$$d_b = 0,25m$$

B. Escoger un valor para d_n , determinar d_n/H que debe cumplir:

$$\frac{d_n}{H} \leq 3 \quad (3.12)$$

$$d_n = 0,25m$$

C. Escoger un valor para d_s , que debe cumplir:

$$d_s < 7H \quad (3.13)$$

$$d_s = 0,72m$$

D. En función de las dimensiones escogidas, y del ancho promedio se determina el número de paneles (N)

$$N=3$$

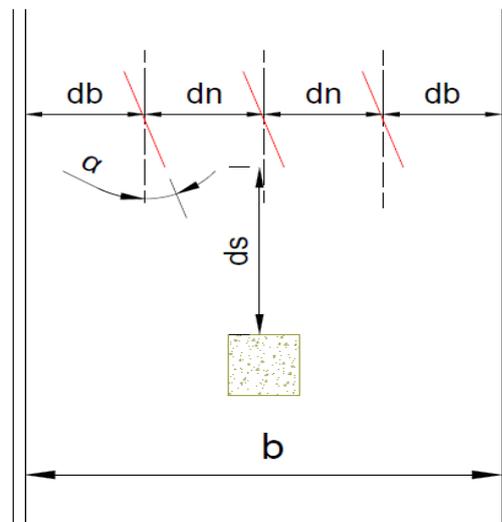


Figura 3-13 Espaciamiento entre paneles

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Tabla 3-6 muestra de forma resumida el procedimiento realizado para el dimensionamiento de los paneles.

Tabla 3-6*Dimensionamiento de paneles sumergidos*

Dimensionamiento grupo de paneles				
Paso	Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Paso 1	Control de sedimentos en la toma de agua o desviación			
Paso 2	Ancho promedio	b	1	m
	Profundidad promedio	d_o	0,25	m
	Velocidad promedio	u_o	0,2099	m/s
	Pendiente longitudinal	S	0,0006	m/m
	Diámetro medio del grano	D	0,739	mm
	Profundidad máxima sin paneles	d_m	0,25	m
	Constante de Von Kármán	k	0,41	
	Gravedad	g	9,81	m/s^2
Paso 3	Parámetro de fricción	m	1,30	
	Numero de Froude del sedimento	FD	0,002	
	Relación profundidad-ancho	d_o/b	0,25	
Paso 4	Altura del panel	H	0,11	m
		H/d_o	0,44	OK
	Longitud del panel	L	0,25	m
	Angulo de ataque	α	20	grados
	Sumergencia	T	0,14	m
Paso 5	Sumergencia relativa del panel	T/d_o	0,56	
	Relación largo-ancho	H/L	0,440	
Paso 6		d_b	0,25	m
		d_b/d_o	1	OK
		d_n	0,25	m
		d_n/H	2,27	OK
		d_s	0,72	m
	Número de paneles	N	3	Unidad

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Para colocar los paneles hechos con acrílico y pintados de color rojo para poder verlos mejor bajo el agua (Figura 3-14) se realizó un corte transversal en la sección y se removió la arena empujándola hacia aguas arriba (Figura 3-15). Se colocaron los paneles asegurándose de que el panel central se encuentre alineado con el eje geométrico de la pila, por último, se debe nivelar la arena evitando las arrugas y dunas en la superficie como se observa en la Figura 3-16.



Figura 3-14 Paneles sumergidos

Fuente: Barros y Echeverría (2020)



Figura 3-15 Remoción del sedimento para colocar los paneles

Fuente: Barros y Echeverría (2020)



Figura 3-16 Ubicación de los paneles sumergidos.

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Es necesario realizar el ensayo permitiendo el flujo de agua durante 16 horas, una vez pasado el tiempo y con ayuda del limnómetro se realizó un levantamiento de la forma del fondo (Figura 3-17) para la generación de un modelo digital con ayuda de la herramienta Autodesk Civil 3D. El resultado obtenido se verá en el capítulo 4.



Figura 3-17 Socavación en pila cuadrada con paneles sumergidos

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

3.4.3 SOCAVACIÓN EN PILA CIRCULAR SIN PANELES

Es necesario volver a nivelar la capa de sedimento en la misma sección utilizada en el apartado anterior. El procedimiento realizado y las condiciones fueron las mismas que se usaron con la pila de sección cuadrada, la socavación producida al pie de la pila sin presencia de los paneles se observa en la Figura 3-18.



Figura 3-18 Socavación en pila circular sin paneles

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

3.4.4 SOCAVACIÓN EN PILA CIRCULAR CON PANELES

Se colocaron los paneles siguiendo el mismo procedimiento de la sección 3.4.2, el resultado se muestra en la Figura 3-19.



Figura 3-19 Paneles colocados con pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Una vez que pasaron las 16 horas se volvió a realizar un levantamiento con ayuda del limnómetro para poder generar un modelo digital del fondo con ayuda del software Autodesk Civil 3D. Los resultados obtenidos se verán en el capítulo 4.

3.5 MATERIALES E INSTRUMENTOS

3.5.1 PILAS DE HORMIGÓN

Las pilas usadas son las que fabricaron Chiliquinga y Pinto para su experimentación, son de hormigón simple con resistencia 210 kg/cm^2 que se acerca bastante a la realidad de las pilas de puente. Los resultados de los ensayos de resistencia a tracción realizados en el LEMSUR-EPN a los cilindros se muestran en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7

Resultado ensayo de resistencia del hormigón

Tiempo (días)	$f'c$ (kg/cm ²)
7	143,5
14	192,85
28	232,51

Fuente: Chiliquinga y Pinto (2019)

Para los ensayos se requieren pilas de sección cuadrada y circular con dimensiones que deben estar dentro de un rango en función del ancho del canal (B), es así que la sección debe estar entre 10 % y 30% del ancho del canal mientras que la altura debe ser al menos el 90% de la altura del canal (Chiliquinga & Pinto, 2019). Un esquema de las dimensiones de las pilas que se usaron en los ensayos se muestra en la Figura 3-20 así como la Tabla 3-8 resume sus dimensiones.

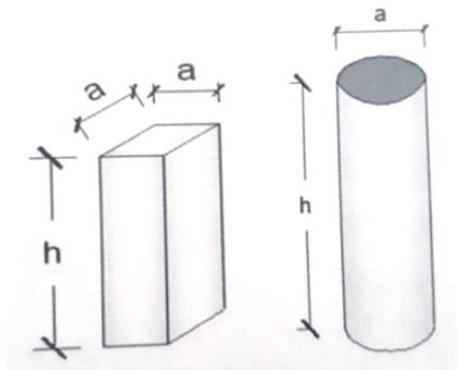


Figura 3-20 Geometría de pilas

Fuente: Chiliquinga y Pinto (2019)

Tabla 3-8

Dimensiones de las pilas

Descripción	a (m)	h (m)	a/B (%)
Cuadrada	0,1	0,9	10
Circular	0,1	0,9	10

Fuente: Chiliquinga y Pinto (2019)

3.5.2 LIMNÍMETRO

Es un instrumento que permite determinar el nivel de la superficie de agua, consta de una pequeña punta que debe tocar la superficie de agua y que se desplaza verticalmente (eje z) ajustando un tornillo permitiendo un ajuste fino. La medida se observa en el cuerpo del instrumento donde se tiene una escala primaria y una escala nonio para mayor precisión. Un bastidor de montaje se fija a una estructura apropiada de soporte que permite su desplazamiento en las otras 2 direcciones. En la Figura 3-21 se muestra el limnómetro utilizado durante los ensayos y mediciones realizadas.



Figura 3-21 Limnómetro

Fuente: Barros y Echeverria (2019)

3.5.3 SONDA ADV Y SOPORTE

El velocímetro acústico Doppler (ADV por sus siglas en inglés), modelo *FlowTracker2*, es un instrumento de medición de velocidad en flujos basado en el efecto Doppler. Se compone de dos partes (Figura 3-22): la sonda que contiene los elementos acústicos e incluye un transmisor que emite ondas de sonido a una velocidad y frecuencia conocida y 3 receptores acústicos a los que llega la señal luego de ser reflejada en un volumen de control de forma cilíndrica de 6mm de diámetro, 9 mm de altura y a una distancia nominal de 10cm del transmisor y el *handheld* que contiene el *software* de procesamiento, baterías, teclado y una pantalla LCD, este componente se usa con mayor frecuencia en el campo; en laboratorio puede ser reemplazado por un computador portátil con ayuda del programa proporcionado por el fabricante.

El instrumento permite medir velocidades entre 0,01 y 4 m/s; contiene sensores de presión y temperatura; se puede usar en arroyos naturales, vertederos, canales abiertos, riego y aguas pluviales.

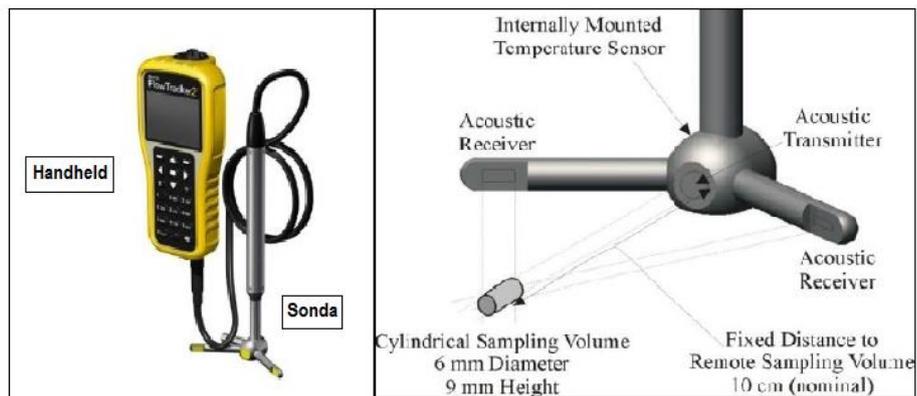


Figura 3-22 Componentes del velocímetro

Fuente: Sontek (2017)

El soporte permite el desplazamiento de la sonda ADV en las tres direcciones, consta de tres partes como se observa en la Figura 3-23.

- a) **Parante.** Es Donde se sujeta el ADV, posee un tornillo que permite su desplazamiento a lo largo del eje Z.
- b) **Base lateral.** Ubicadas a los extremos del soporte permiten que este se deslice sobre los rieles del canal a lo largo del eje X.
- c) **Rieles.** Unen las bases laterales y permiten el desplazamiento del parante a lo largo del eje Y.

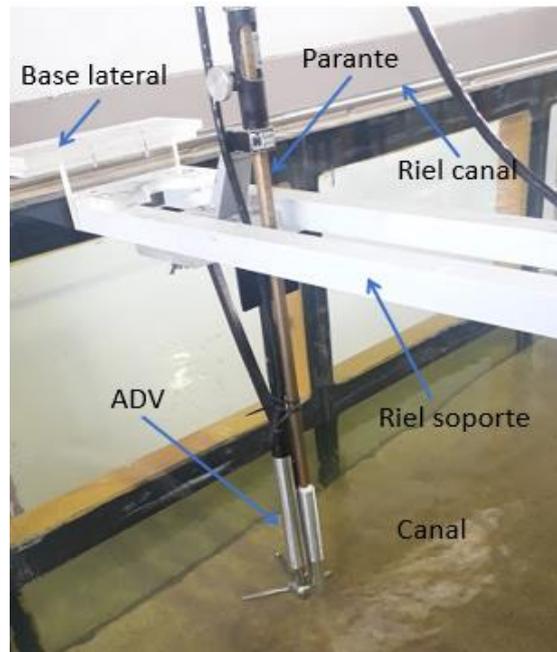


Figura 3-23 Partes del soporte para ADV

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

3.5.4 SEDIMENTO

Para los ensayos se utilizó arena cuyo análisis granulométrico se muestra en la Tabla 3-9, de donde es posible determinar si está bien o mal graduada estableciendo la desviación estándar (σ_g) usando:

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}}$$

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{17,10}{11,20}} = 1,52$$

En base a Martin (2003) un sedimento con un $\sigma_g < 3$ está mal graduado debido a que el tamaño de sus granos es casi uniforme. En este tipo de sedimentos no ocurre acorazamiento lo que facilita el movimiento de las partículas del fondo y la generación de la socavación buscada.

Tabla 3-9*Diámetros característicos de la muestra*

Diámetro, porcentaje que pasa (%)	Tamaño de la muestra (mm)
D16	0,403
D50	0,739
D84	1,072
D90	1,142

Fuente: Chiliquinga y Pinto (2019)

3.5.5 PALA Y FLEXÓMETRO

Estos elementos fueron necesarios para ubicar la arena de forma pareja a lo largo de la sección de control del canal con un espesor de 10 cm (Figura 3-24).

**Figura 3-24** Capa de sedimento en la sección de control

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

3.5.5 COMPUTADOR Y CÁMARA FOTOGRÁFICA

Para realizar las mediciones se utilizaron un computador portátil con el programa que controla el ADV proporcionado por el fabricante (FlowTracker2) y cables tanto de corriente como de datos. La interfaz del software incluye las

opciones de exportación de datos, configuración y utilidades tal como se muestra en la Figura 3-25. Para el correcto registro fotográfico de los experimentos se utilizó una cámara fotográfica Canon EOS 70D.

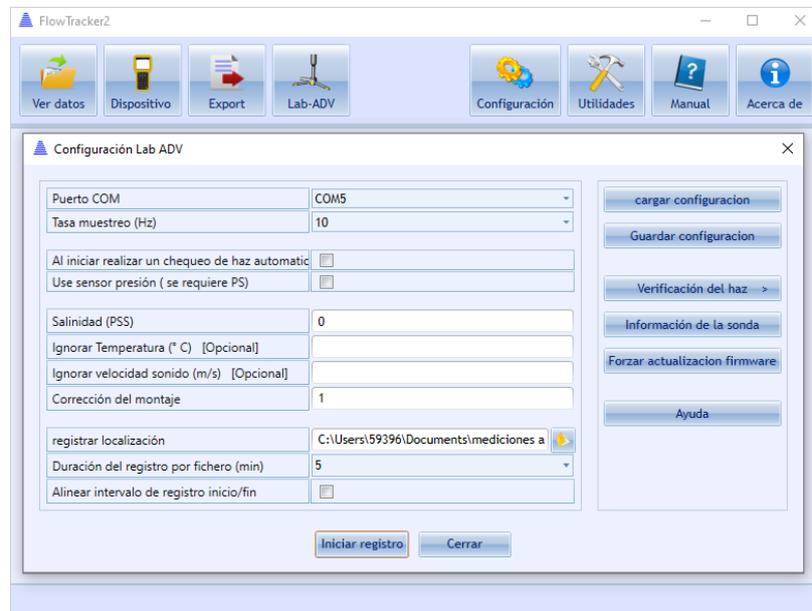


Figura 3-25 Interfaz software FlowTracker2

Fuente: Sontek (2017)

3.6 PLAN DE PRUEBAS

El levantamiento topográfico de la superficie del sedimento se realizó con el limnómetro. Las dimensiones que se observan en las dunas son variables, por lo que se presentan los valores promedio en la Tabla 3-10. La medición de la velocidad instantánea se recopilará formando una malla con el espaciamiento como se detalla en la Tabla 3-11 donde el eje de la pila representa el punto (Figura 3-26).

Tabla 3-10

Plan de pruebas para el levantamiento del fondo

Pila	Eje	Intervalo promedio (cm)	Puntos totales	Tiempo (días)
Cuadrada	X	4	1900	20
	Y	4		
Circular	X	4	1900	20
	Y	4		

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 3-11

Plan de pruebas para el registro de velocidades con el ADV

Pila	Eje	Inicio (cm)	Fin (cm)	Intervalo (cm)	Número de mediciones	Puntos totales	Tiempo (días)
Cuadrada	X	35	125	10	10	410	15
	Y	-30	30	5	13		
	Z	3	7	2	3		
Circular	X	35	125	10	10	410	15
	Y	-30	30	5	13		
	Z	3	7	2	3		

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

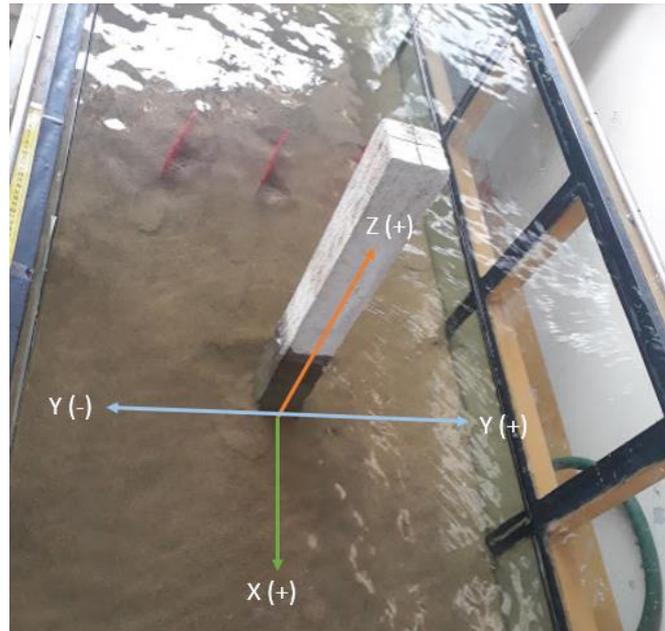


Figura 3-26 Esquema del sistema de coordenadas

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

3.7 REGISTRO DE VELOCIDADES INSTANTÁNEAS

Las mediciones en ambas pilas se realizaron de acuerdo al plan de pruebas, entre la información recopilada se encuentran la velocidad primaria, velocidad corregida (que puede ser ajustada ingresando un factor de corrección antes de iniciar la medición), la marca de correlación, la relación ruido-sonido, la temperatura, así como también la tasa de muestreo, el tiempo de inicio y la cantidad de muestras registradas (Figura 3-27)

Al finalizar la medición de cada punto se genera un archivo de valores separado por comas con aproximadamente 2900 muestras con información como la hora UTC, hora local, velocidades primarias, velocidades corregidas, marcas de correlación, SNR, amplitud computada y acelerómetro para cada uno de los ejes, así como también la temperatura, la velocidad del sonido y la tensión a la que funciona el ADV (Figura 3-28).

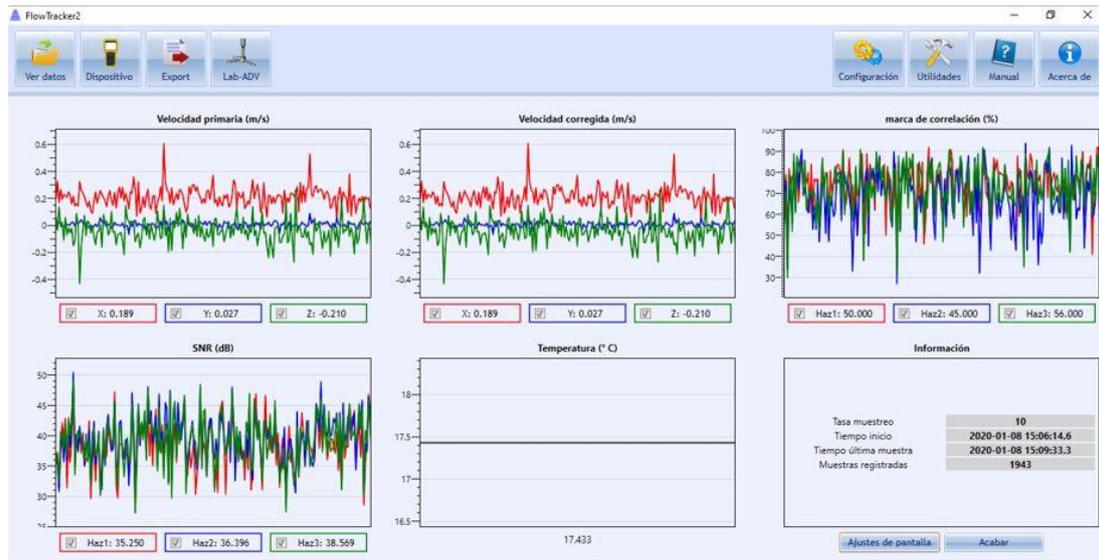


Figura 3-27 Registro de velocidades en software FlowTracker 2.

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled '20200108-100610 - Excel'. The data is organized in a table with the following columns:

Operación	Hora UTC	Hora local	Velocidad pr	Velocidad pr	Velocidad pr	Velocidad cc	Velocidad cc	Velocidad cc	marca de cor	marca de cor	marca de cor	SNR.Haz1 (di	SNR.Haz2 (di	SNR.Haz3 (di	Amplitud coi	Ampli
DataCollecti	06:10.1	06:10.1	0.17	0.031	-0.115	0.17	0.031	-0.115	63	78	89	30.754	36.192	40.858	699.521	6
DataCollecti	06:10.2	06:10.2	0.193	0.03	-0.143	0.193	0.03	-0.143	86	84	80	39.387	41.207	38.909	719.597	6
DataCollecti	06:10.3	06:10.3	0.198	0.033	-0.167	0.198	0.033	-0.167	63	62	44	25.134	20.513	22.729	686.451	6
DataCollecti	06:10.4	06:10.4	0.205	0.034	-0.164	0.205	0.034	-0.164	47	70	95	31.608	33.469	39.815	701.508	6
DataCollecti	06:10.5	06:10.5	0.185	0.035	-0.135	0.185	0.035	-0.135	63	75	78	25.021	32.085	46.16	686.189	6
DataCollecti	06:10.6	06:10.6	0.19	0.039	-0.089	0.19	0.039	-0.089	66	38	67	28.146	27.229	28.621	693.456	6
DataCollecti	06:10.7	06:10.7	0.209	0.01	-0.041	0.209	0.01	-0.041	84	72	67	35.947	38.28	25.131	711.598	6
DataCollecti	06:10.8	06:10.8	0.198	0.014	0.002	0.198	0.014	0.002	61	77	77	19.131	31.586	30.91	672.491	6
DataCollecti	06:10.9	06:10.9	0.207	0.004	0.001	0.207	0.004	0.001	54	58	51	21.582	18.47	21.233	678.19	6
DataCollecti	06:11.0	06:11.0	0.163	-0.001	0.046	0.163	-0.001	0.046	68	64	70	25.606	24.325	33.266	687.549	6
DataCollecti	06:11.1	06:11.1	0.161	-0.003	0.053	0.161	-0.003	0.053	59	73	71	30.956	34.037	35.419	699.991	6
DataCollecti	06:11.2	06:11.2	0.132	-0.011	0.103	0.132	-0.011	0.103	61	37	68	24.279	19.31	28.644	684.464	6
DataCollecti	06:11.3	06:11.3	0.165	-0.015	0.016	0.165	-0.015	0.016	52	53	56	25.089	24.869	27.012	686.346	6
DataCollecti	06:11.4	06:11.4	0.206	0.005	-0.057	0.206	0.005	-0.057	76	83	77	32.193	38.802	33.629	702.867	6
DataCollecti	06:11.5	06:11.5	0.199	0.025	-0.14	0.199	0.025	-0.14	78	84	84	36.622	38.892	37.073	713.166	6
DataCollecti	06:11.6	06:11.6	0.188	0.034	-0.096	0.188	0.034	-0.096	91	70	58	45.029	32.652	28.009	732.72	6
DataCollecti	06:11.7	06:11.7	0.2	0.015	-0.063	0.2	0.015	-0.063	85	65	73	43.928	45.654	42.988	730.158	7
DataCollecti	06:11.8	06:11.8	0.205	0.043	-0.192	0.205	0.043	-0.192	83	82	90	39.409	44.542	38.003	719.649	7
DataCollecti	06:11.9	06:11.9	0.211	0.046	-0.191	0.211	0.046	-0.191	55	88	84	31.541	40.231	36.484	701.351	7
DataCollecti	06:12.0	06:12.0	0.218	0.046	-0.2	0.218	0.046	-0.2	83	82	87	36.644	34.354	43.894	713.291	6
DataCollecti	06:12.1	06:12.1	0.229	0.06	-0.314	0.229	0.06	-0.314	74	83	71	35.385	44.089	43.486	710.291	7
DataCollecti	06:12.2	06:12.2	0.176	0.035	-0.096	0.176	0.035	-0.096	68	47	73	25.314	33.583	29.006	686.869	6

Figura 3-28 Archivo del registro de datos

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4. CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 TRATAMIENTO DE DATOS

Antes de realizar todos los cálculos pertinentes a la turbulencia fue necesario filtrar los datos medidos en todos los puntos dejando todos aquellos valores mayores o iguales a cero en la velocidad instantánea en dirección x (u_x).

4.1.1 PILA CUADRADA

4.1.1.1 Análisis de velocidades

La velocidad principal del flujo (u_x) posee una tendencia que se puede observar en la Figura 4-1 donde aumenta o disminuye con el flujo hacia los extremos del canal mientras que, en el centro, donde se encuentra la pila, la velocidad se mantiene cercana a un mismo valor tanto en el primer como el último plano Y medidos. Esto implica que el módulo del vector velocidad del flujo en dirección X se mantiene constante a lo largo de la sección de control (≈ 18 cm/s).

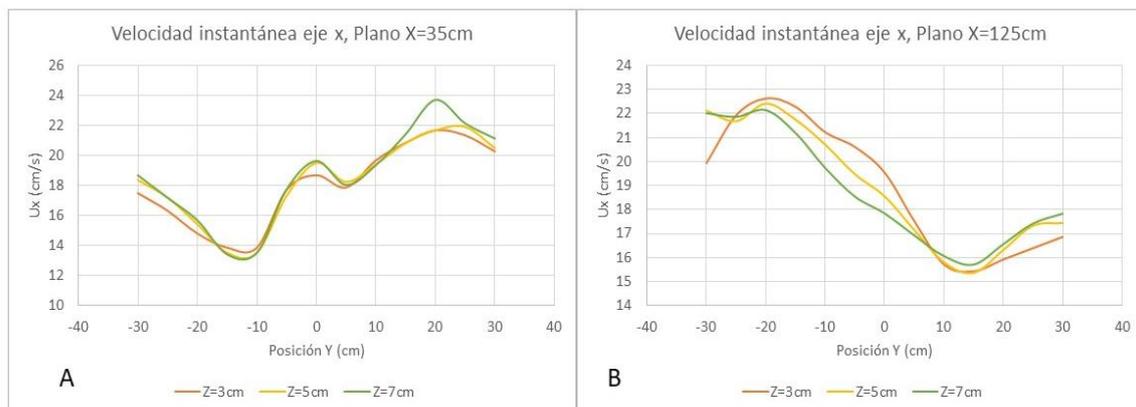


Figura 4-1 Velocidad instantánea (u_x) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La velocidad del flujo en dirección al eje Y (u_y) posee una tendencia que se puede observar en la Figura 4-2A. Donde las curvas de velocidad tienden a ser paralelas. En la figura 4-2B. se observa que las curvas dejan de ser paralelas

debido a la distancia recorrida y a la energía disipada en el trayecto; la curva correspondiente a $z=7$ es más plana debido a la poca injerencia que los paneles ejercen a esa altura, así mismo las velocidades en este plano son mayores al resto concordando con lo expuesto en la sección 2.1.2.4.

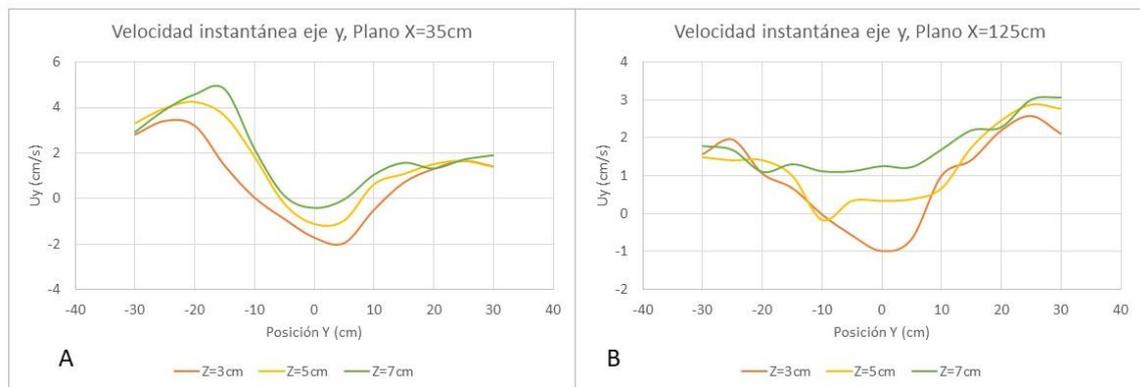


Figura 4-2 Velocidad instantánea (u_y) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La velocidad del flujo en dirección Z (u_z) posee una tendencia que se puede observar en la Figura 4-3A. Donde las curvas tienden a ser paralelas. En la figura 4-2B. se observa que las curvas se separan debido a la distancia recorrida a lo largo del canal, y a la energía disipada en el trayecto; la curva correspondiente a $z=3$ adquiere valores mayores al resto debido a la presencia de los paneles y la cercanía a los mismos.

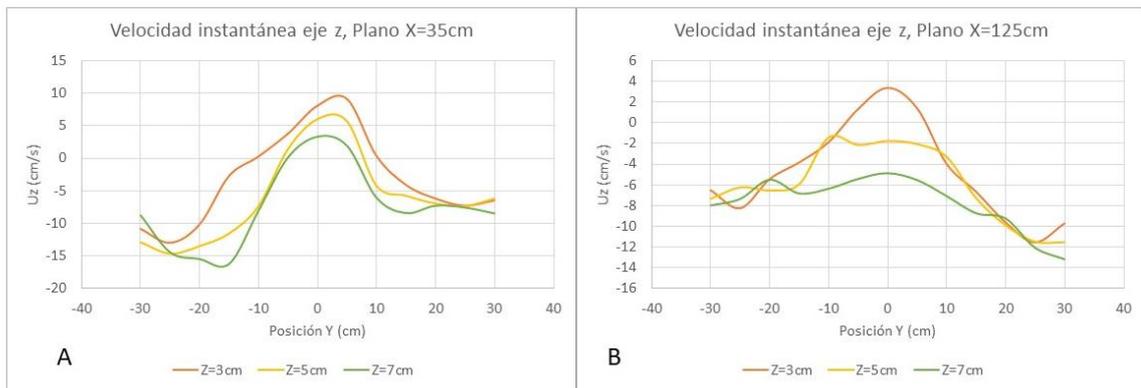


Figura 4-3 Velocidad instantánea (u_z) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-4 muestra la evolución de la velocidad en función de la posición x en cada uno de los planos z . Se puede observar que entre más superficial se encuentra el plano las curvas generadas tienden a reflejar la forma del vórtice que se genera debido a la presencia de los paneles sumergidos. Adicionalmente, observando el par de curvas con un mismo valor de “Y” y signos contrarios, a lo largo del eje “X”, los picos de una de las dos curvas coinciden con el valle de su opuesto y a medida que los ejes se acercan al centro del canal las curvas tienden a tomar los mismos valores describiendo la forma del vórtice generado. Para la curva $Y=0$ la velocidad es casi constante y no posee picos o valles. En contraparte, el plano más profundo ($Z=3\text{cm}$) presenta valores máximos y mínimos muy marcados debido a que está más cerca a los paneles y se observa mejor la naturaleza caótica de la turbulencia.

La Figura 4-5 muestra que, para la velocidad u_y , en el plano más profundo existen máximos y mínimos bien definidos, así como también una gran cantidad de valores negativos característicos del flujo turbulento mientras que en el plano más superficial la velocidad se vuelve positiva y, al igual que en u_x , las curvas de ejes “Y” opuestos se complementan entre sí describiendo la forma del vórtice generado.

La Figura 4-6 muestra que la velocidad u_z tiene una tendencia a uniformizarse hacia el final de la sección de control, cabe aclarar que los valores negativos indican la dirección del vórtice generado.

Las curvas de velocidad en las tres direcciones permiten determinar el módulo de la velocidad media del flujo en cada punto usando:

$$|\bar{u}| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \quad (4.1)$$

En todos los puntos se obtiene un valor aproximado de 20 cm/s que es menor a la velocidad del flujo a la salida de la pantalla de uniformización, esto debido al efecto que generan los paneles en la sección de control. Las forma y distribución de las curvas se deben al vórtice generado y al ajuste que debe tener cada una de las componentes de la velocidad para lograr un valor aproximado al de la velocidad media.

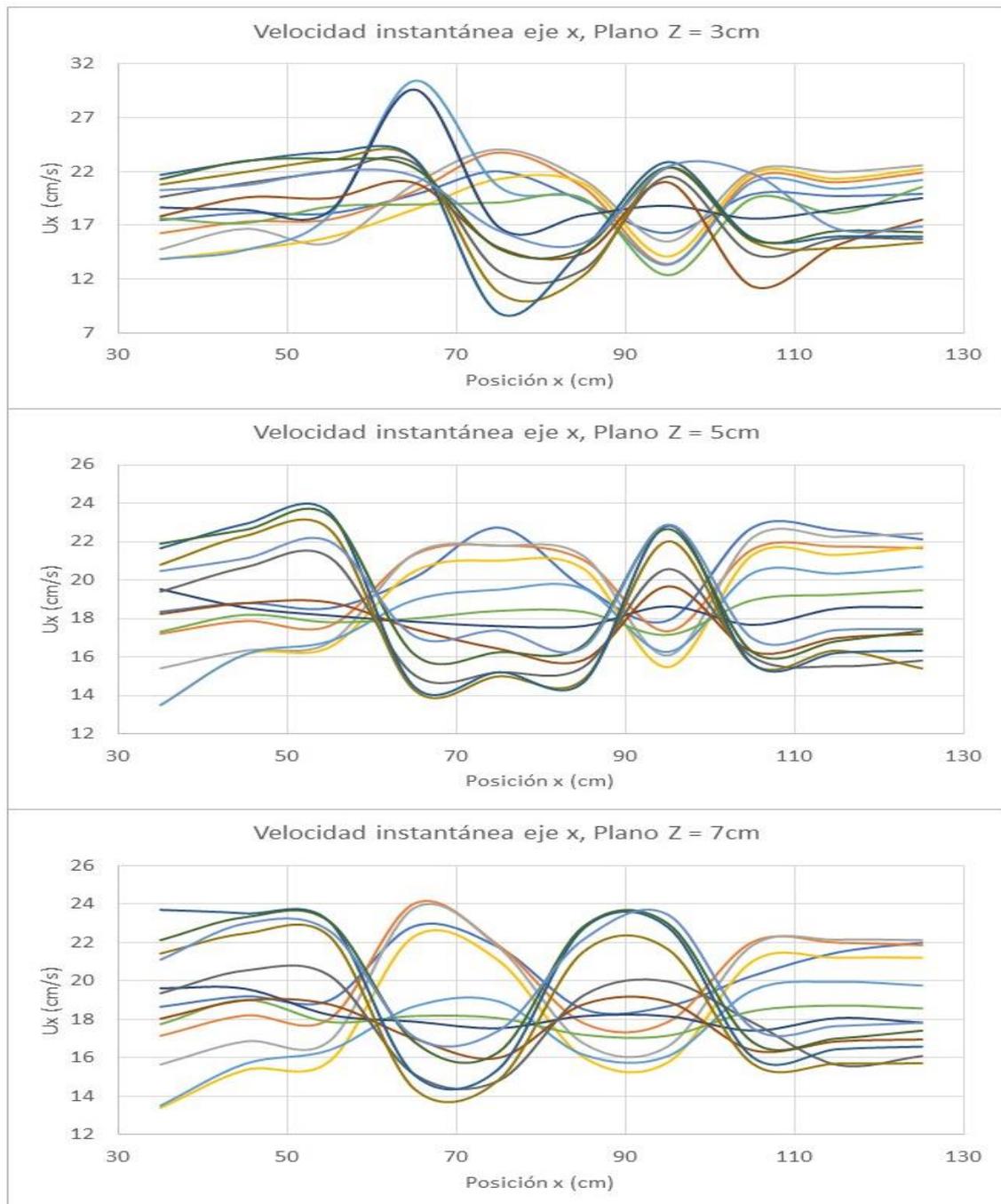


Figura 4-4 Velocidad instantánea (u_x) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

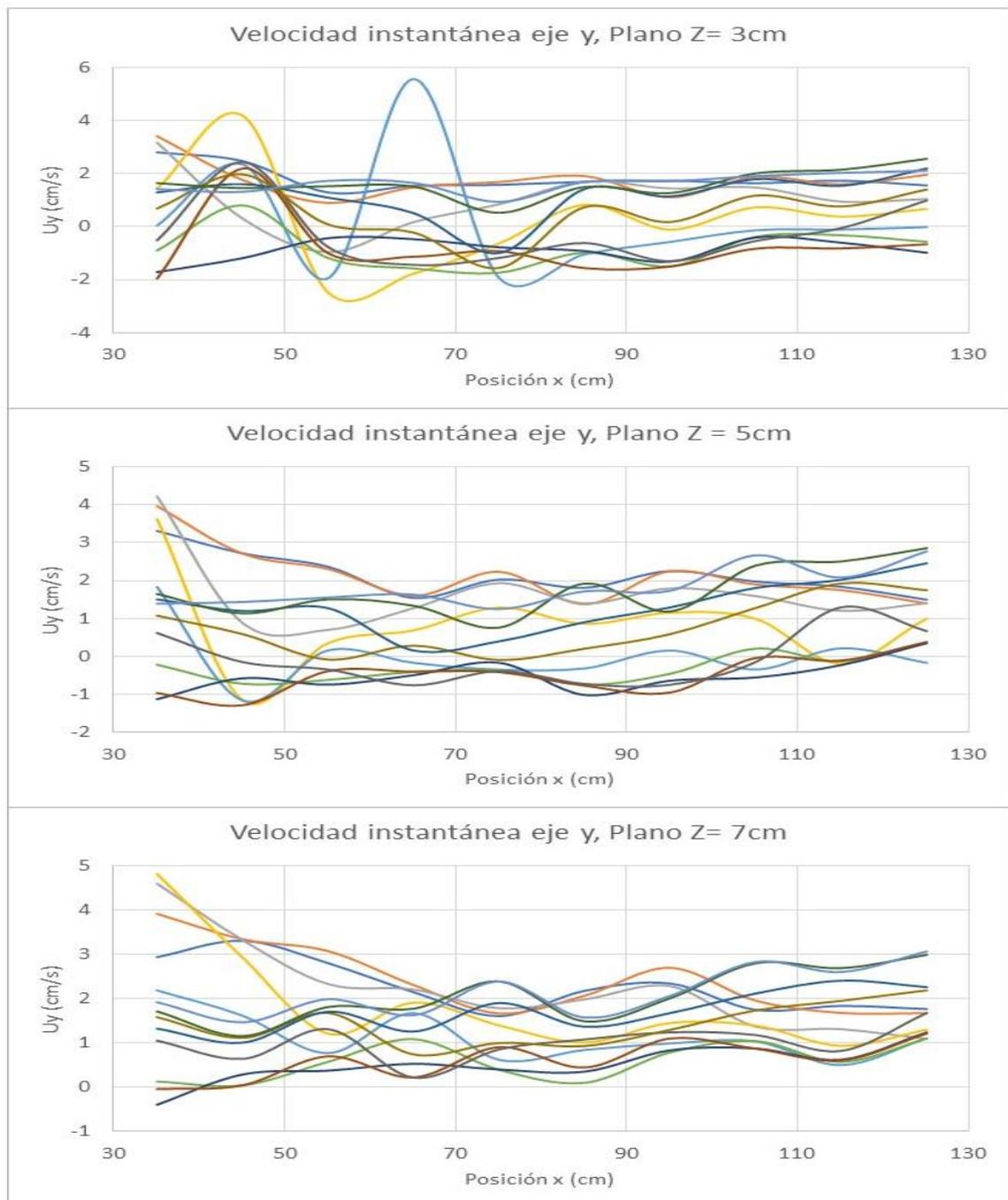


Figura 4-5 Velocidad instantánea (u_y) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

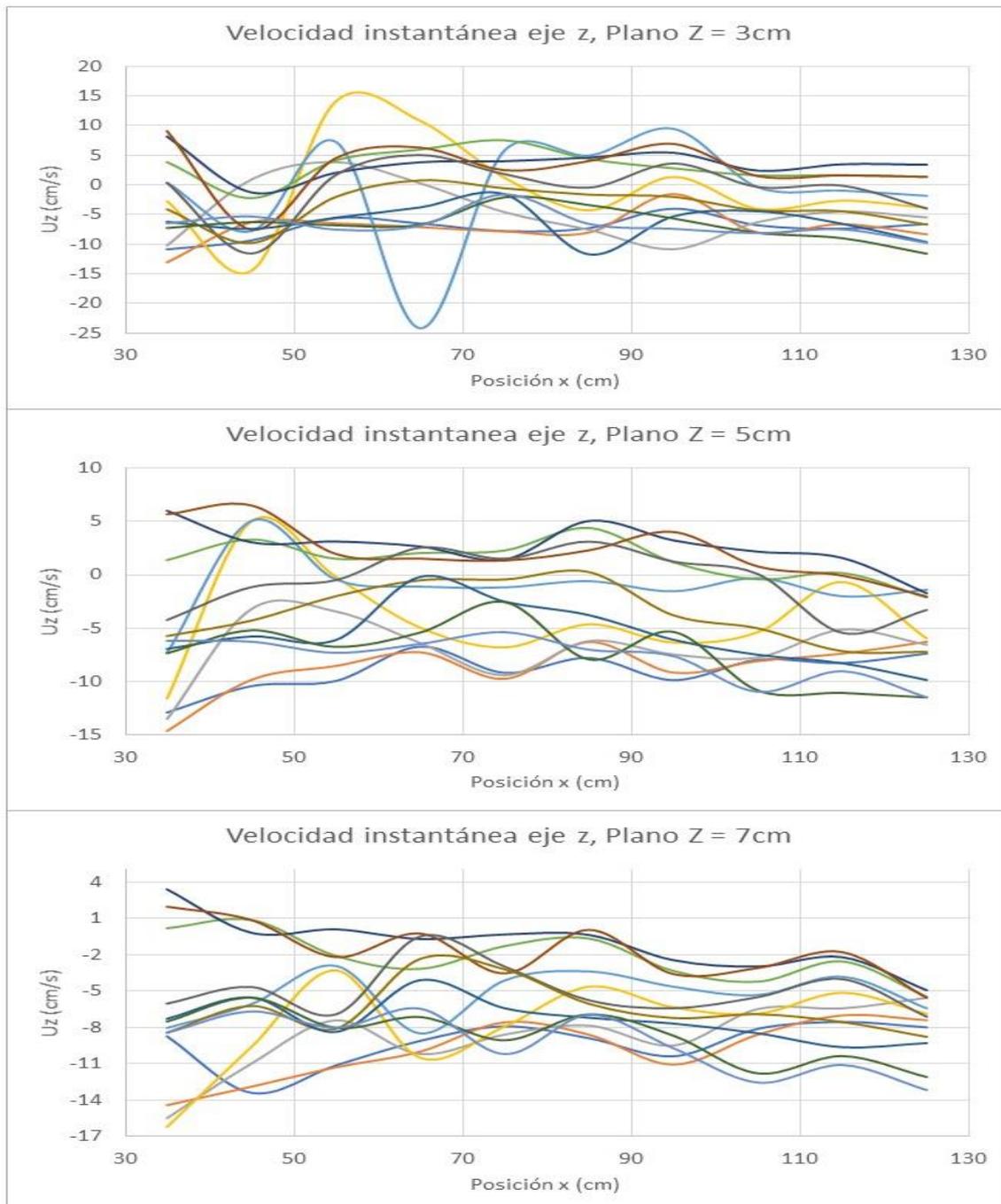


Figura 4-6 Velocidad instantánea (u_z) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.1.1.2 Análisis de turbulencia

En esta sección se realizará el análisis de turbulencia para la pila cuadrada siguiendo el orden descrito en el marco teórico. Cabe mencionar que la base de todos los cálculos realizados son las velocidades instantáneas obtenidas experimentalmente con el ADV.

Desviación estándar

En la Figura 4-7A. se observa que el máximo valor de la desviación estándar ocurre en el centro del canal y en el plano Z intermedio mientras que en la Figura 4-7B. los valores máximos se acumulan hacia el eje Y negativo debido al ángulo de ataque de los paneles.

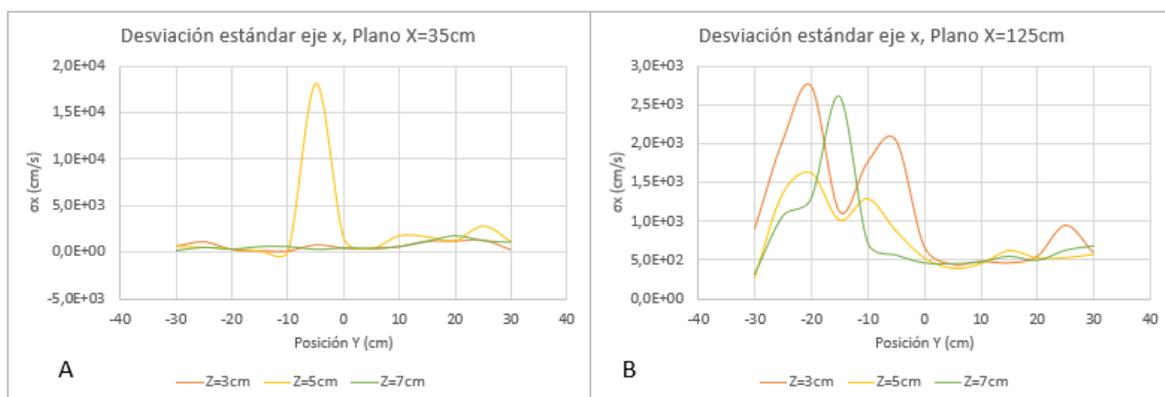


Figura 4-7 Desviación estándar (σ_x) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-8A. se observa que el máximo valor de la desviación estándar ocurre en los alrededores de la pila y en los planos inferior y superior mientras que en la Figura 4-8B. los valores máximos ocurren en el plano Z inferior y los mínimos en el superior.

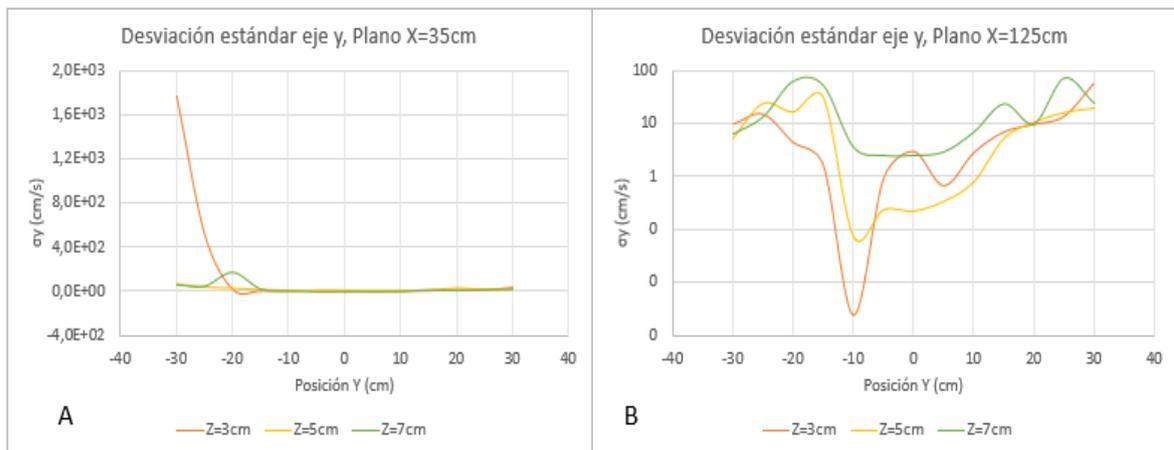


Figura 4-8 Desviación estándar (σ_y) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-9A. el rango de valores es bastante amplio y las tres curvas se mantienen similares mientras que en la Figura 4-9B. el rango es reducido y el plano superior adquiere valores mayores al resto.

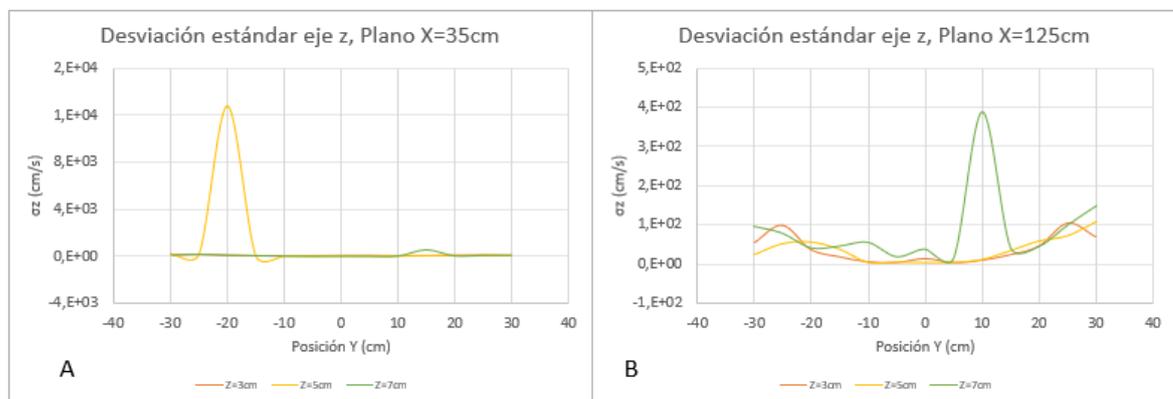


Figura 4-9 Desviación estándar (σ_z) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-10 indica la desviación estándar de la velocidad fluctuante en X, los rangos de desviación van desde 300 a 2000 cm/s en los tres ejes medidos,

Donde un rango bastante amplio debido a los números de Reynolds elevados propios del régimen turbulento que posee el flujo.

La Figura 4-11 indica la desviación estándar de la velocidad fluctuante en Y, los rangos de desviación se resumen en la Tabla 4-1 y varían dependiendo de la profundidad a diferencia de lo que se observa en la Figura 4.10.

Tabla 4-1

Rango de variación de la desviación estándar eje y. Pila cuadrada

Plano	Rango	Unidad
Z = 3	0,5 - 13	cm/s
Z = 5	0,05 - 27	cm/s
Z = 7	0,26 - 76	cm/s

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La figura 4-12 indica la desviación estándar de la velocidad fluctuante en Z, los rangos de desviación mostrados en la Tabla 4-2 varían dependiendo de la profundidad al igual que en la Figura 4-11.

Tabla 4-2

Rango de variación de la desviación estándar eje z. Pila cuadrada

Plano	Rango	Unidad
Z = 3	1,2 – 83,5	cm/s
Z = 5	2-61	cm/s
Z = 7	3,2 – 242,7	cm/s

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

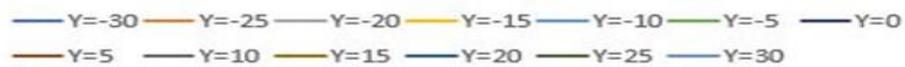
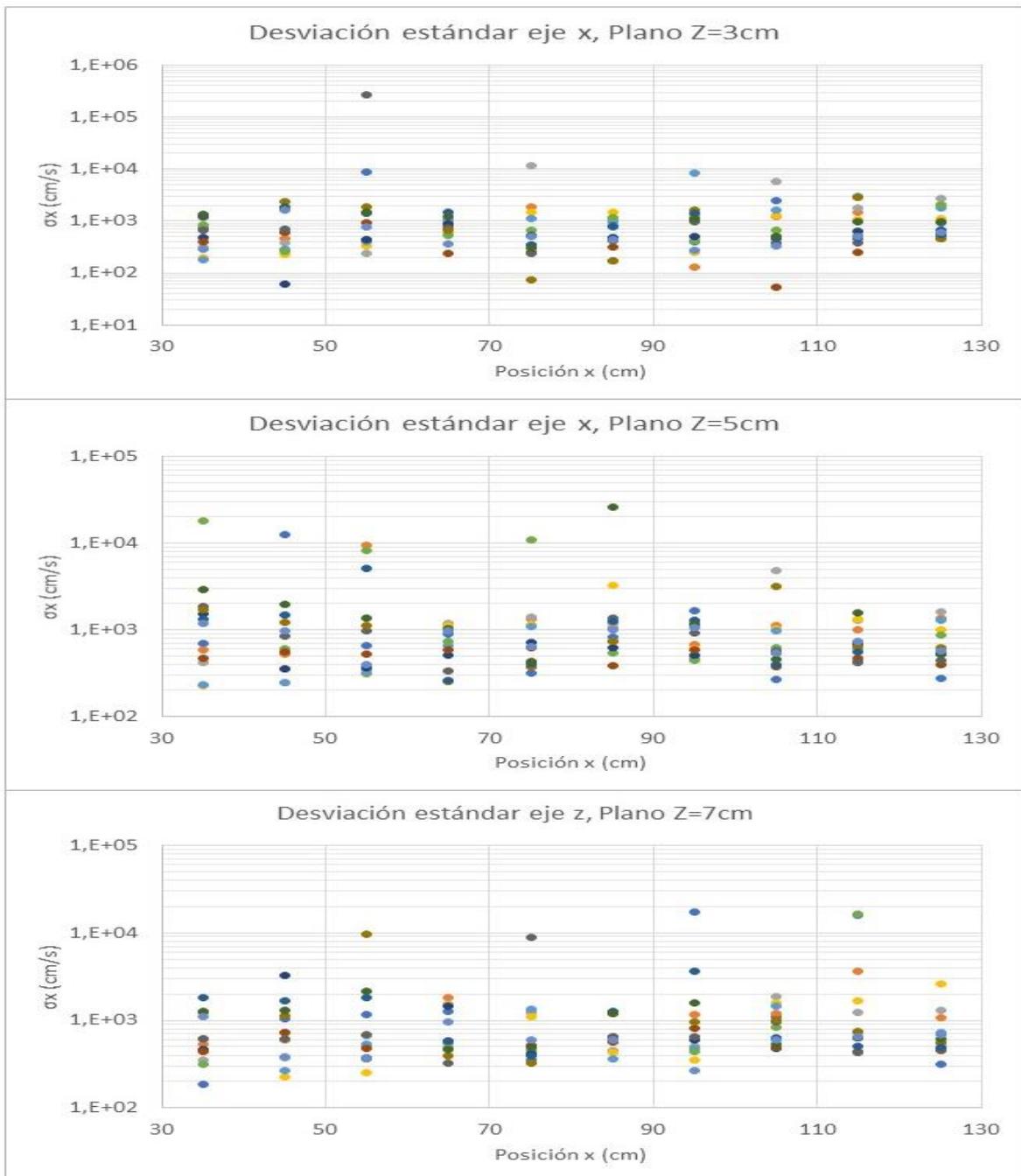


Figura 4-10 Desviación estándar (σ_x) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

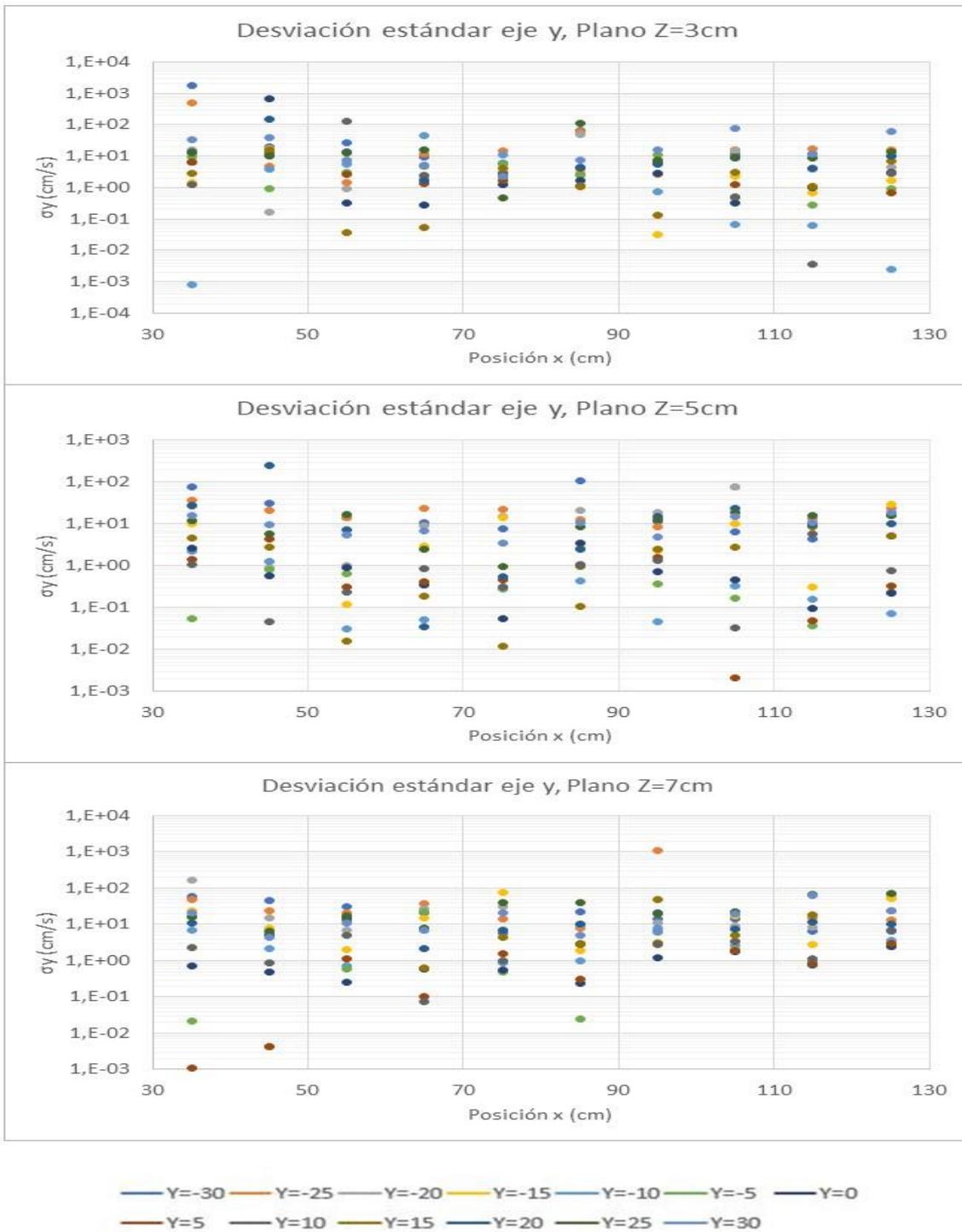


Figura 4-11 Desviación estándar (σ_y) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

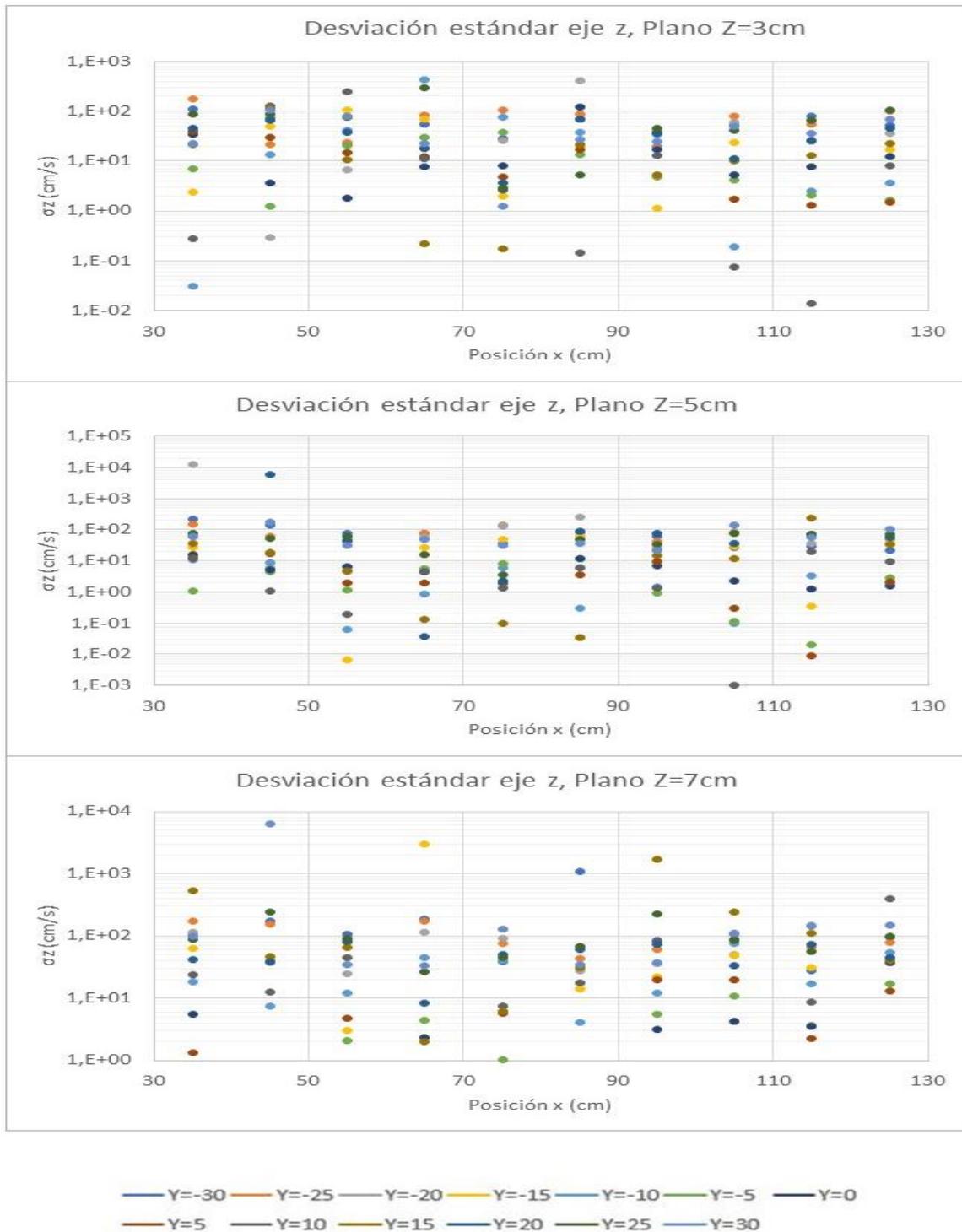


Figura 4-12 Desviación estándar (σ_z) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Skewness factor

El análisis de este factor se realiza en función de la posición en la que se ubica el pico de la curva con respecto de la posición, cuando el pico está hacia la derecha se dice que la distribución es negativamente sesgada, si el pico se encuentra en el centro la distribución no tiene sesgo, es decir, es normal y, por último, si el pico está hacia la izquierda la distribución es positivamente sesgada (Davidson, 2004) como se observa en la Figura 4-13. Este análisis permite conocer si los datos medidos se encuentran dentro de un mismo rango y distribuidos uniformemente.

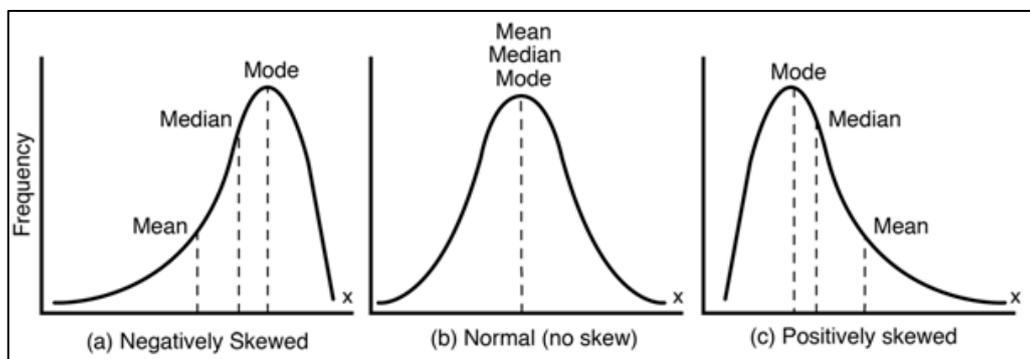


Figura 4-13 Tipos de distribución de probabilidad en función del Skewness factor

Fuente: Durkhure y Lodwal (2014)

En la Figura 4-14A. se observa que las curvas correspondientes a los planos Z intermedio y superficial son positivamente sesgadas. Por otro lado, en la Figura 4-14B. solo el plano inferior presenta un pico y es negativamente sesgada.

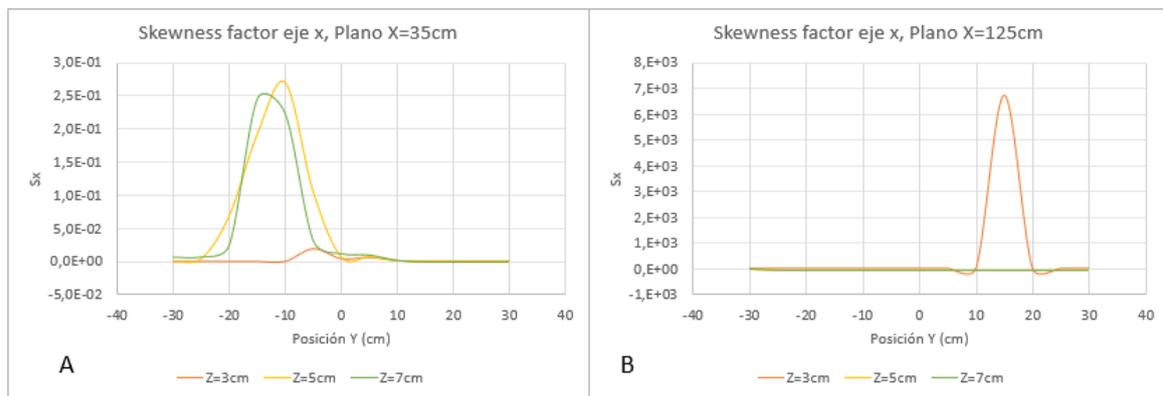


Figura 4-14 Skewness factor (S_x) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-15A. se observa que la curva correspondiente al plano Z superior es positivamente sesgada. Por otro lado, en la Figura 4-15B. solo el plano inferior presenta un pico y es positivamente sesgada.

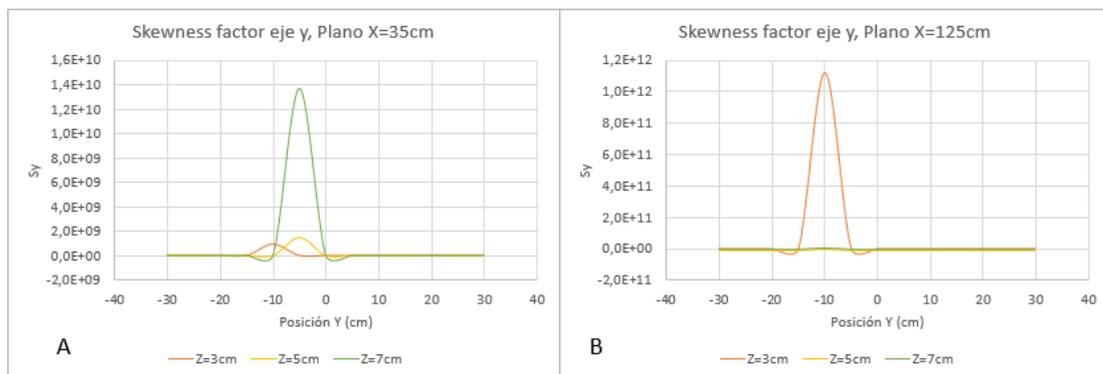


Figura 4-15 Skewness factor (S_y) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-16A. se observa que la curva correspondiente al plano Z superior es positivamente sesgada. Por otro lado, en la Figura 4-16B. solo el plano inferior presenta un pico y es negativamente sesgada.

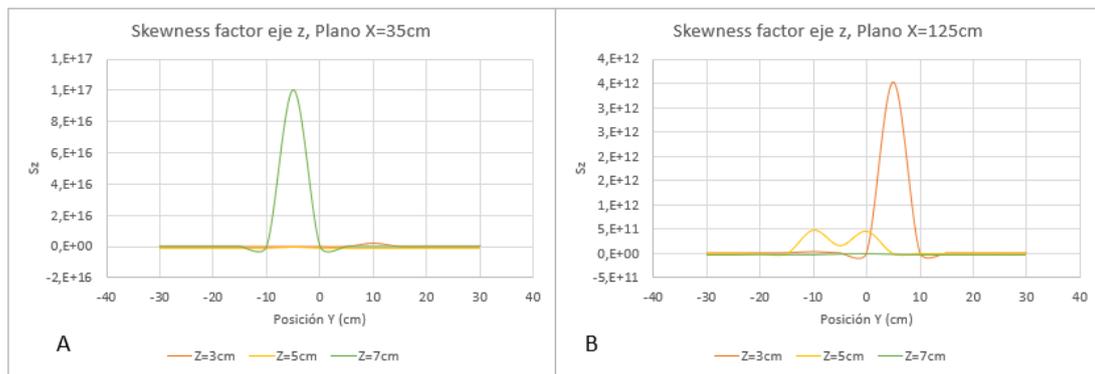


Figura 4-16 Skewness factor (S_z) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-17 muestra un pico en el plano $Z=3$ para $Y=20$ y es de distribución normal mientras que en el plano $Z=5$ además de repetirse la curva anterior se observa una pequeña elevación en $Y=5$ negativamente sesgada, por último, el plano $Z=7$ presenta una irregularidad en $Y=30$ y en $Y=-30$ puesto que presentan más de un pico, así como también la curva correspondiente a $Y=10$ resulta negativamente sesgada.

La Figura 4-18 muestra un pico en el plano $Z=3$ para $Y=15$ negativamente sesgada mientras que en el plano $Z=5$ se observa que la curva $Y=5$ es negativamente sesgada, por último, el plano $Z=7$ presenta una curva $Y=5$ que es positivamente sesgada.

La Figura 4-19 muestra un pico en el plano $Z=3$ para $Y=10$ Donde negativamente sesgada mientras que en el plano $Z=5$ se observa que las curvas $Y=5$ e $Y=10$ son negativamente sesgadas, así como la curva $Y=-15$ es positivamente sesgada, por último, el plano $Z=7$ presenta una curva $Y=5$ que posee una distribución normal.

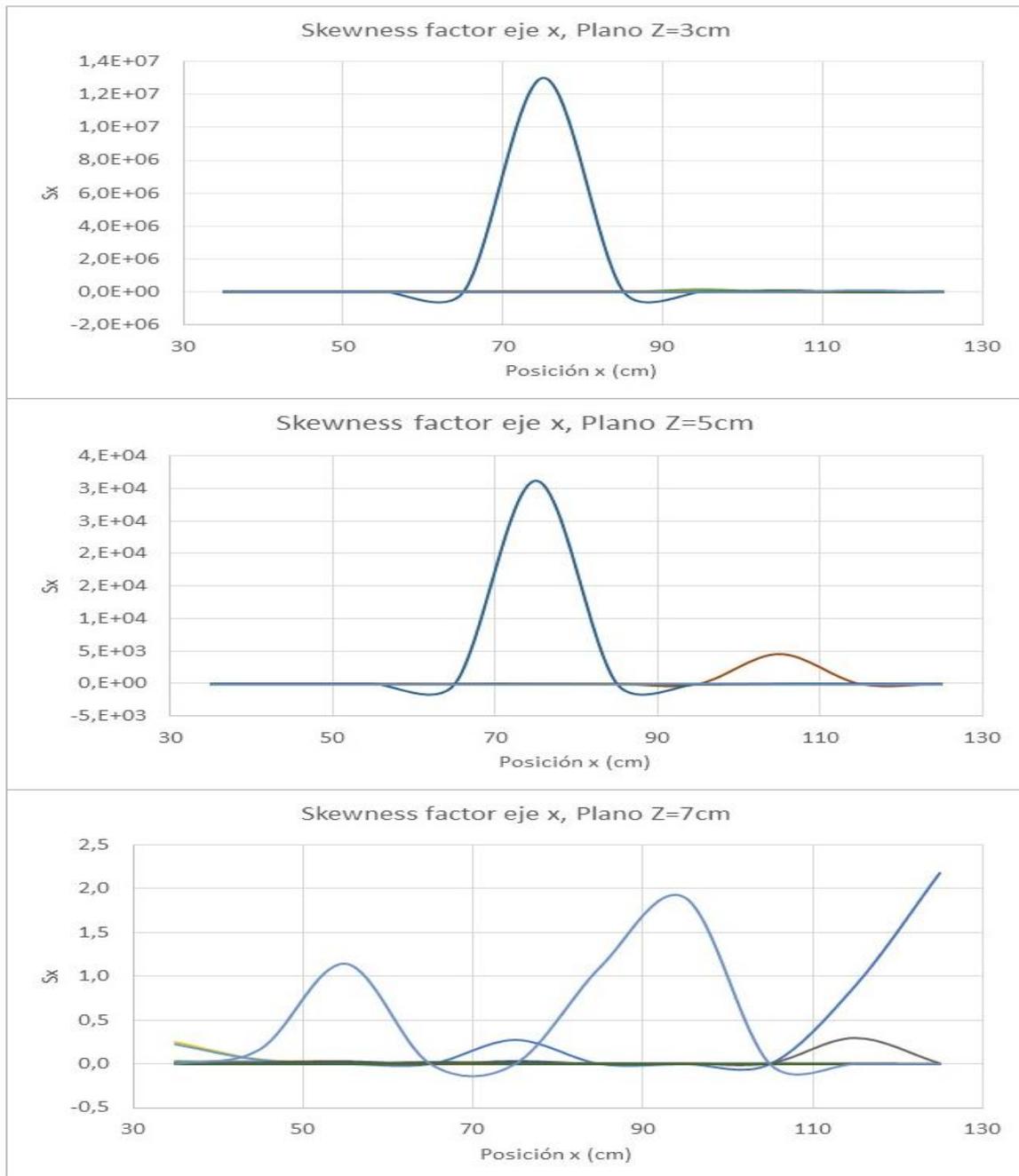


Figura 4-17 Skewness factor (S_x) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

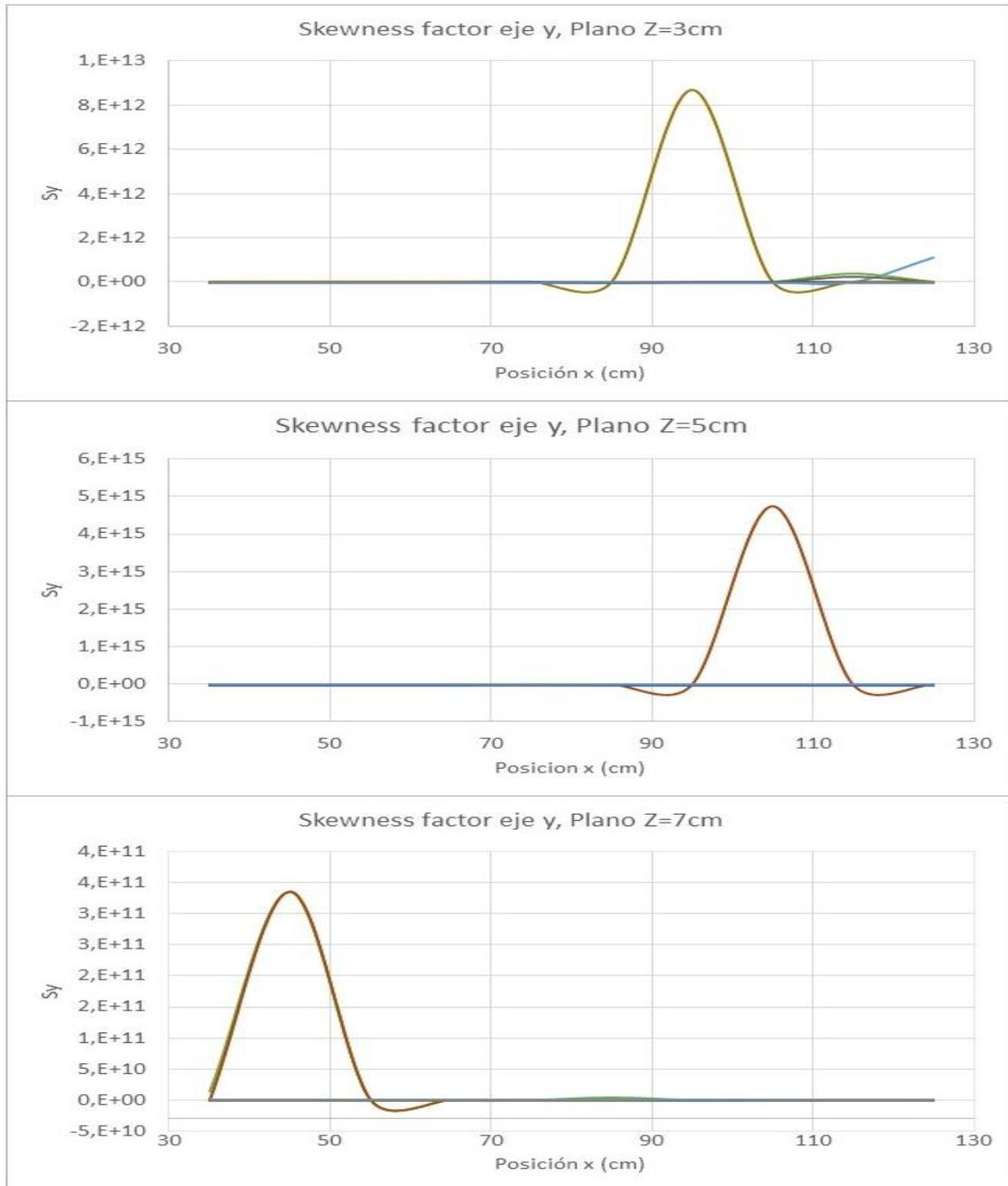


Figura 4-18 Skewness factor (S_y) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

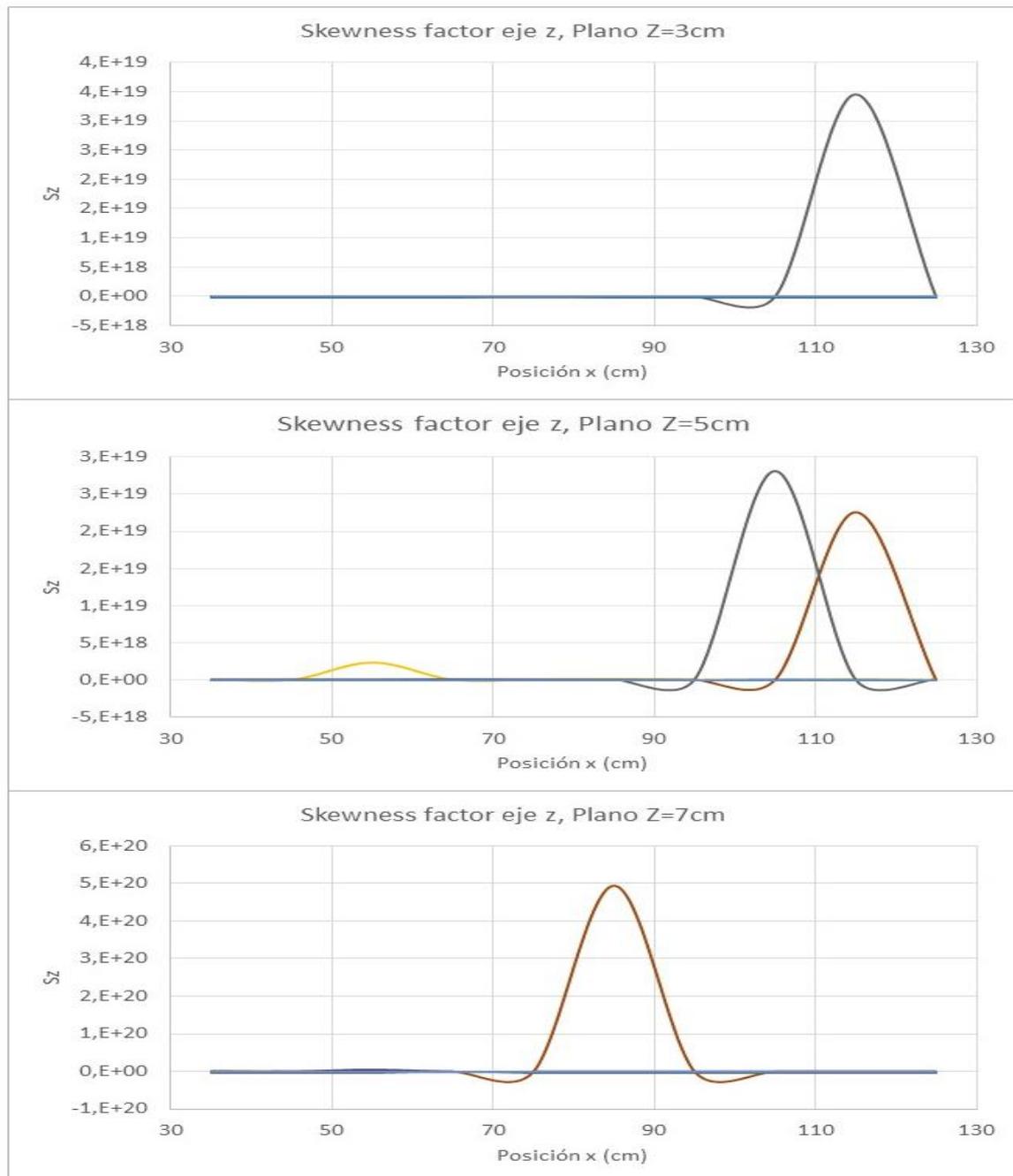


Figura 4-19 Skewness factor (S_z) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Kurtosis factor

El análisis de este factor se realiza en función de la forma que tenga la curva, es decir, si la curva es alargada hacia arriba se dice que el Kurtosis es positivo, por el contrario, si no posee un pico marcado y es más ancha se dice que el Kurtosis es negativo, mientras que, si posee una altura intermedia se habla de una distribución normal (Davidson, 2004) como se observa en la Figura 4-20. Con este análisis se puede saber si los datos medidos son cercanos a no al valor medio.

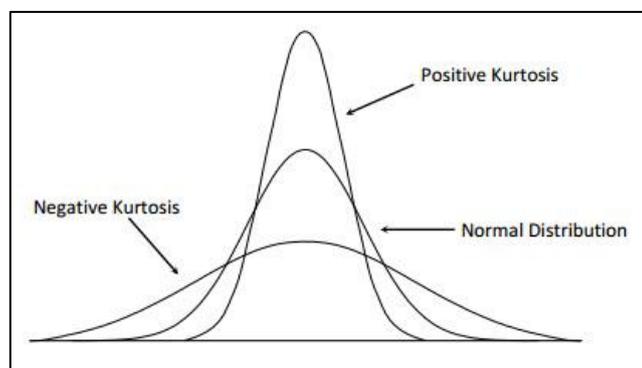


Figura 4-20 Tipos de distribución de probabilidad en función del Kurtosis factor.

Fuente: <https://deepai.org/machine-learning-glossary-and-terms/kurtosis>

En la Figura 4-21A. se observa que las curvas correspondientes a los planos Z intermedio y superficial son Kurtosis positivas. Por otro lado, en la Figura 4-21B. solo el plano inferior presenta un pico y también es Kurtosis positiva.

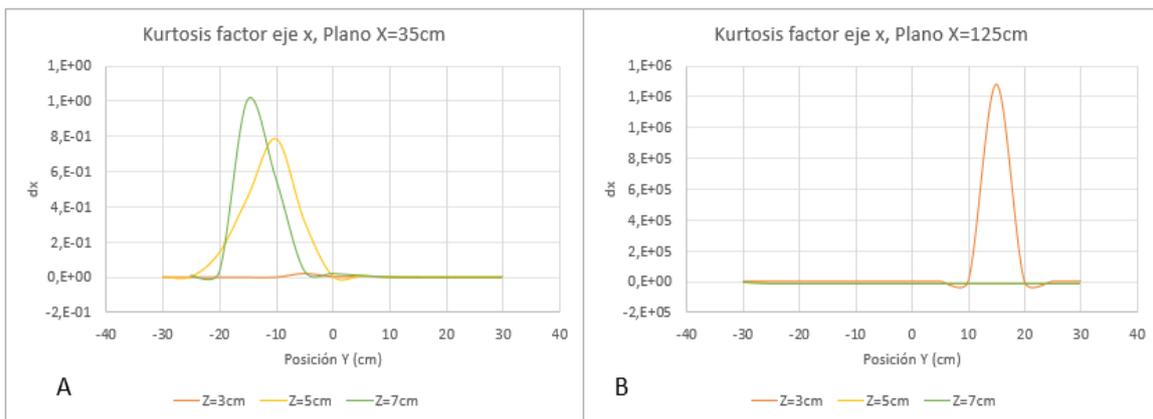


Figura 4-21 Kurtosis factor (d_x) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-22A. se observa que la curva correspondiente al plano Z superior es Kurtosis positiva. Por otro lado, en la Figura 4-22B. solo el plano inferior presenta un pico y también es Kurtosis positiva.

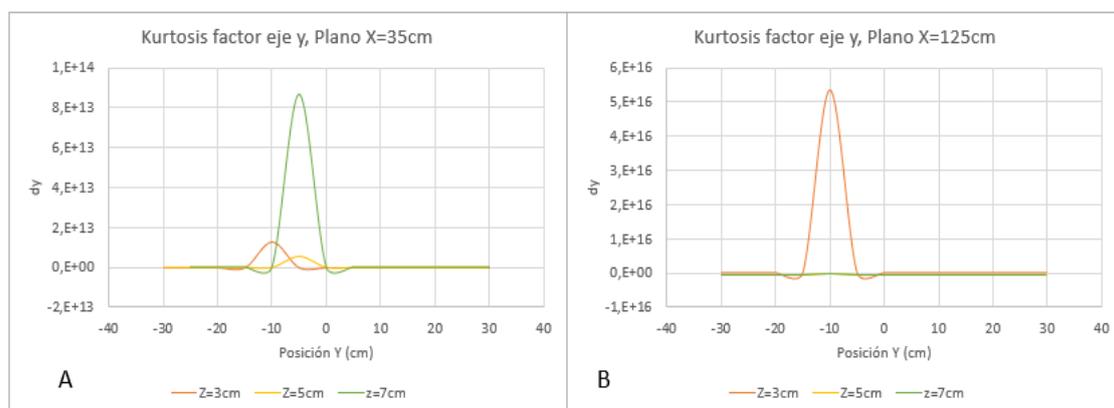


Figura 4-22 Kurtosis factor (d_y) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-23A. se observa que la curva correspondiente al plano Z superior es Kurtosis positiva. Por otro lado, en la Figura 4-23B. solo el plano inferior presenta un pico y es Kurtosis positiva.

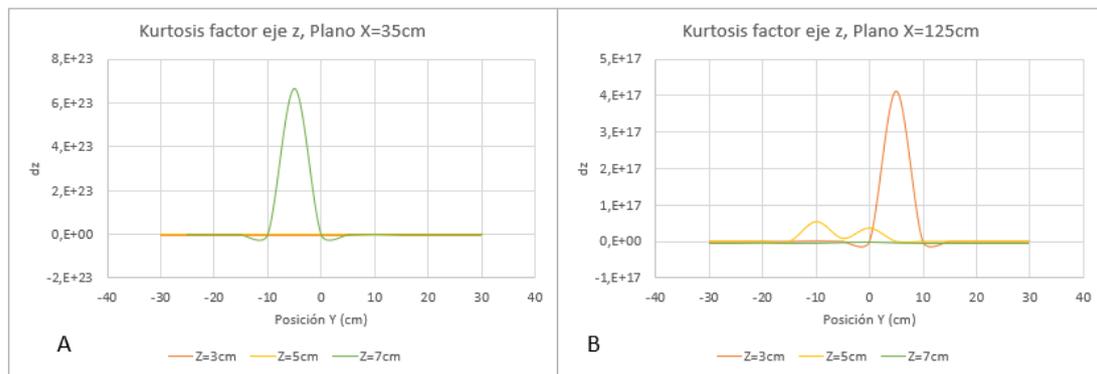


Figura 4-23 Kurtosis factor (d_z) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-24 muestra un pico en el plano $Z=3$ para $Y=20$ que es Kurtosis positiva mientras que en el plano $Z=5$ además de repetirse la curva anterior se observa que $Y=5$ es Kurtosis negativa, por último, el plano $Z=7$ presenta una irregularidad en $Y=30$ y en $Y=-30$ puesto que presentan más de un pico, así como también la curva correspondiente a $Y=10$ es Kurtosis negativa.

La Figura 4-25 muestra un pico en el plano $Z=3$ para $Y=15$ que es Kurtosis positiva mientras que en el plano $Z=5$ se observa que la curva $Y=5$ también es Kurtosis positiva, por último, el plano $Z=7$ presenta una curva $Y=5$ que es Kurtosis positiva.

La Figura 4-26 muestra un pico en el plano $Z=3$ para $Y=10$ es Kurtosis positiva mientras que en el plano $Z=5$ se observa que las curvas $Y=5$ e $Y=10$ son Kurtosis positivas, así como la curva $Y=-15$ es Kurtosis negativa, por último, el plano $Z=7$ presenta una curva $Y=5$ que es Kurtosis positiva.

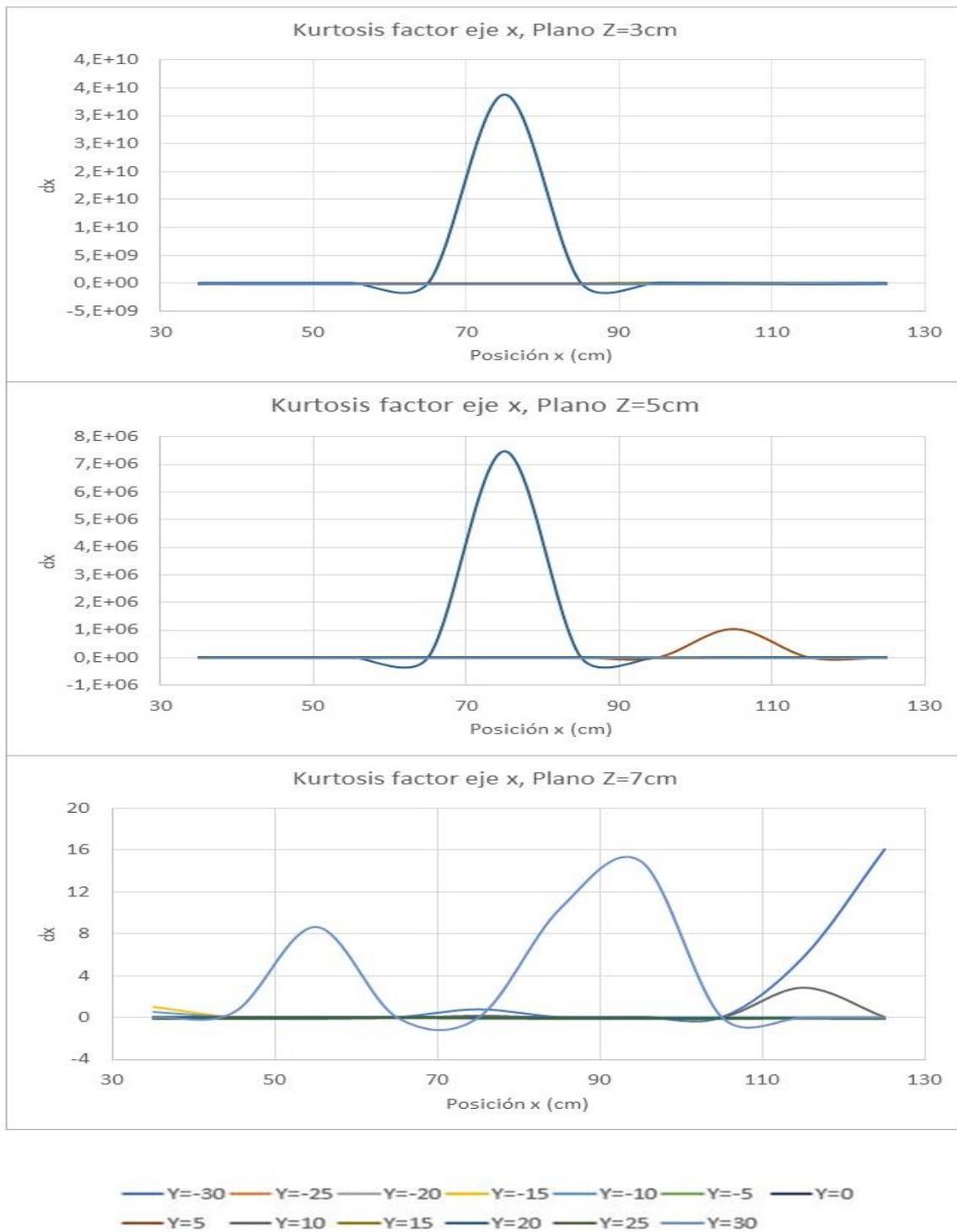


Figura 4-24 Kurtosis factor (d_x) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

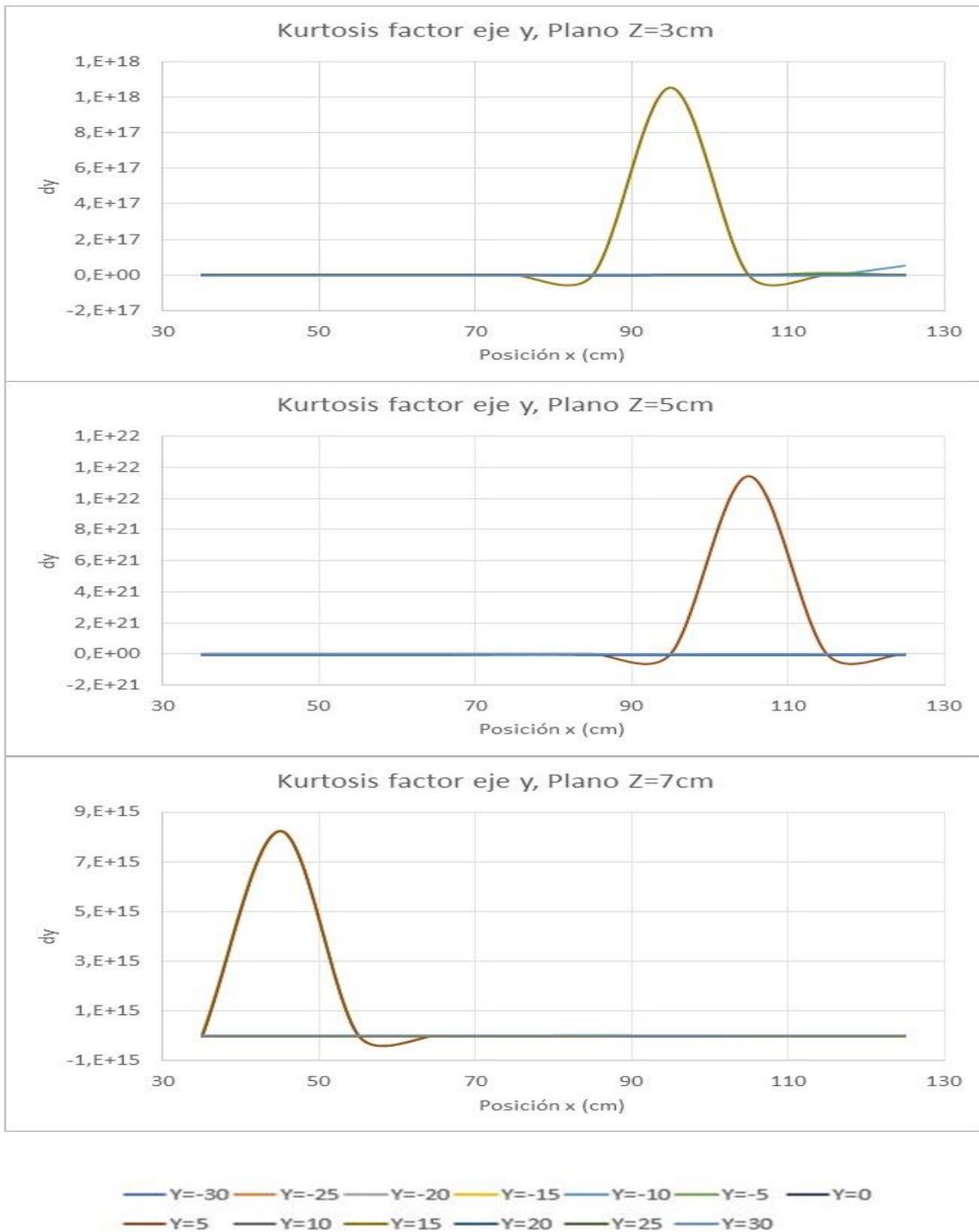
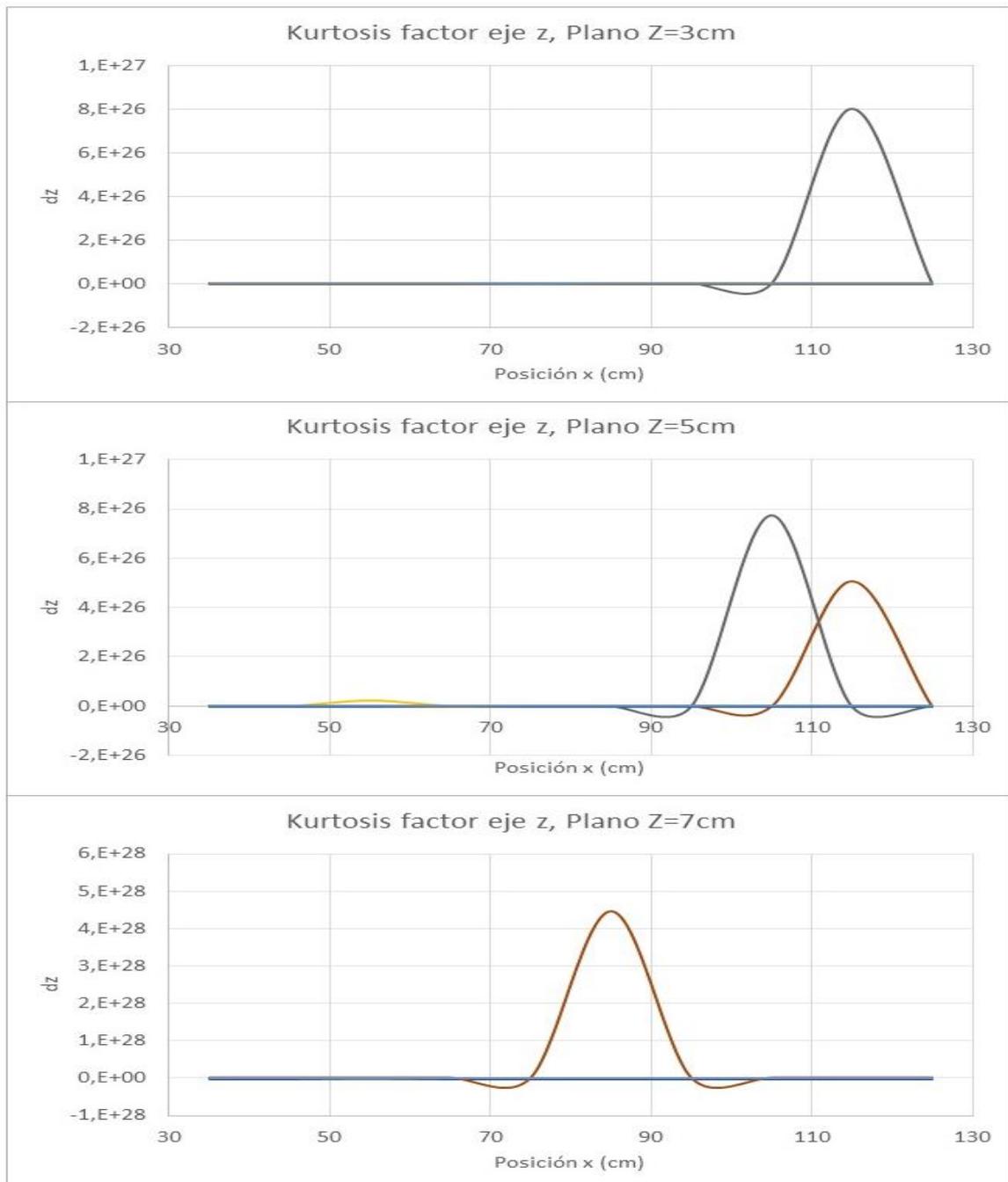


Figura 4-25 Kurtosis factor (d_y) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)



— Y=-30 — Y=-25 — Y=-20 — Y=-15 — Y=-10 — Y=-5 — Y=0
 — Y=5 — Y=10 — Y=15 — Y=20 — Y=25 — Y=30

Figura 4-26 Kurtosis factor (d_z) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tensiones de Reynolds

La Figura 4-27 muestra la Tensión de Reynolds normal (ζ_{xx}) donde la curva correspondiente al plano inferior posee cambios más notorios y un rango más amplio que las demás curvas, además todas las tensiones son positivas.

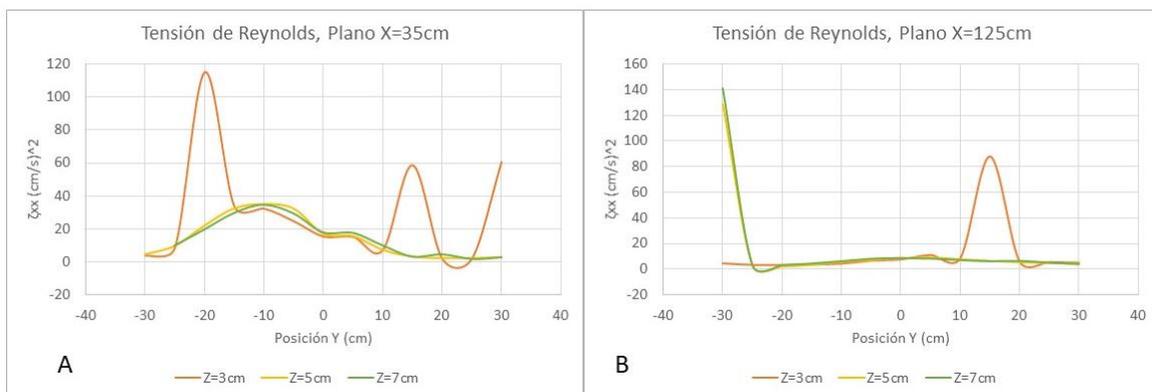


Figura 4-27 Tensión de Reynolds (ζ_{xx}) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-28A. muestra las curvas correspondientes a la Tensión de Reynolds normal (ζ_{yy}) en el primer plano X medido, las tres curvas tienen una misma forma con un mismo rango de valores mientras que la Figura-28B. demuestra un rango menor de valores acompañado de una mayor dispersión entre las curvas. Además, todas las tensiones son positivas.

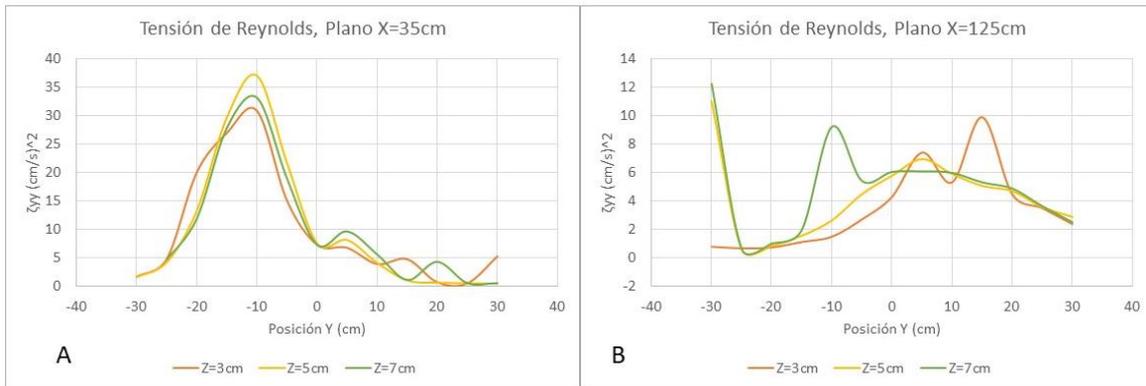


Figura 4-28 Tensión de Reynolds (ζ_{yy}) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-29A. muestra las curvas correspondientes a la Tensión de Reynolds normal (ζ_{zz}) Donde existe una acumulación de valores en el lado izquierdo del canal mientras que en la Figura 4-29B. la acumulación ocurre hacia el lado derecho de la sección del canal. Además, todas las tensiones son positivas.

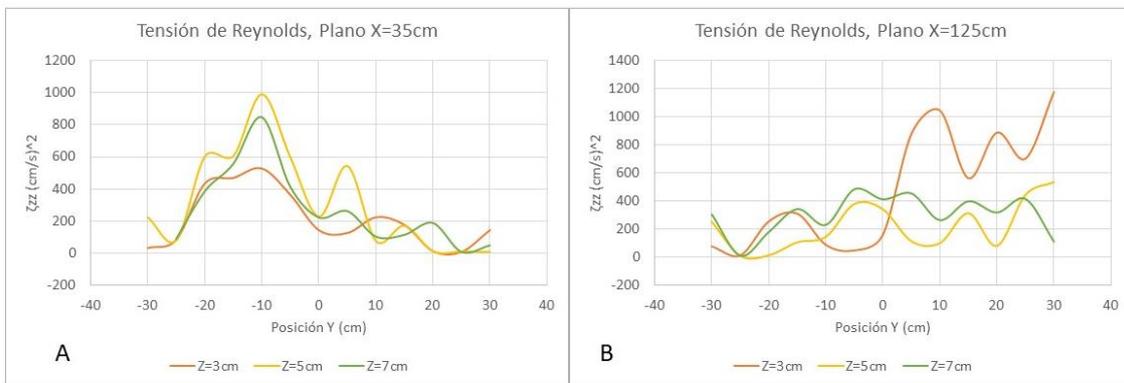


Figura 4-29 Tensión de Reynolds (ζ_{zz}) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-30A. muestra las curvas correspondientes a la Tensión de Reynolds tangencial (ζ_{xy}) muestra que los planos intermedio y superior mantienen rangos similares y el plano inferior tiene picos a los extremos de la sección, mientras que en la Figura 4-30B. las curvas tienen a ser más homogéneas entre sí. Además, existen tensiones tanto positivas como negativas.

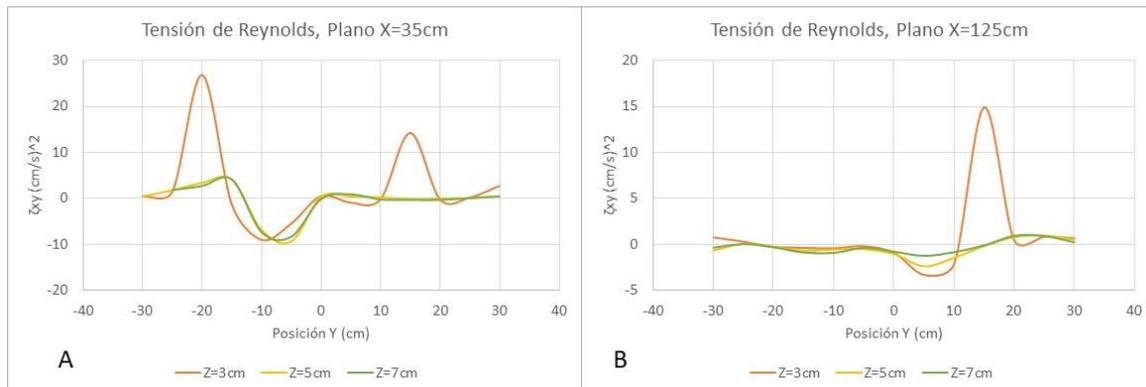


Figura 4-30 Tensión de Reynolds (ζ_{xy}) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-31 muestra las curvas correspondientes a la Tensión de Reynolds tangencial (ζ_{yz}) Donde todos los planos se mantienen en un mismo rango y son prácticamente paralelos entre sí, además, todas las tensiones resultan menores que cero. La Figura 4-31A. tiene un rango de valores mucho más amplio que la Figura 4-31B.

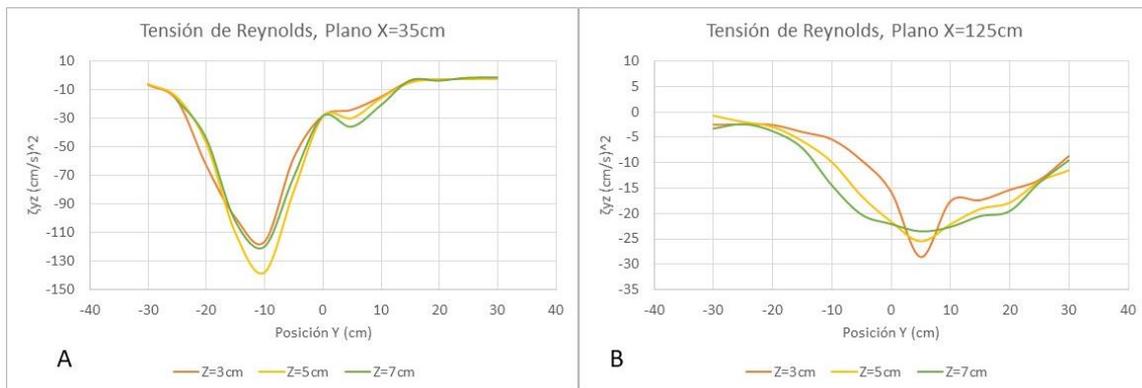


Figura 4-31 Tensión de Reynolds (ζ_{yz}) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-32A. muestra las curvas correspondientes a la Tensión de Reynolds tangencial (ζ_{xz}) Donde se observa una acumulación de valores del lado izquierdo del canal mientras en la Figura 4-32B. la acumulación ocurre hacia la derecha del canal y todos los planos tienen una distribución similar.

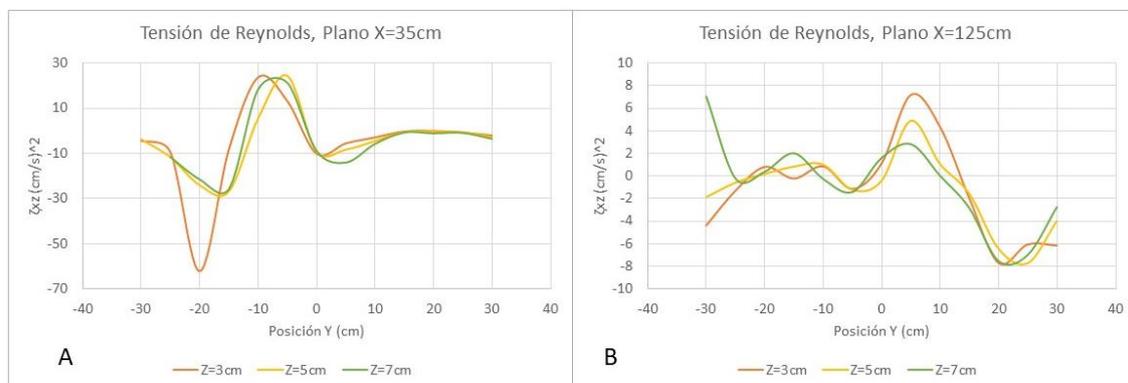


Figura 4-32 Tensión de Reynolds (ζ_{xz}) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Las Figuras 4-33, 4-34 y 4-35 indican la variación de los esfuerzos normales en dirección del eje X, Y, Z respectivamente y su desarrollo a lo largo de la sección de control, debido a que están en función del cuadrado de las

velocidades fluctuantes (u'_x , u'_y , u'_z) las curvas no solo son similares a las de la velocidad, sino que son siempre positivas.

Caso contrario, las Figuras 4-36, 4-37 y 4-38 indican la variación de los esfuerzos tangenciales y su desarrollo a lo largo de la sección de control que, al resultar de la combinación de las velocidades fluctuantes las curvas poseen coordenadas tanto positivas como negativas en el eje de las ordenadas.

Es importante también reconocer que todas las gráficas poseen una misma tendencia al acercarse al final de la sección de control, esto es, los valores se acercan a cero.

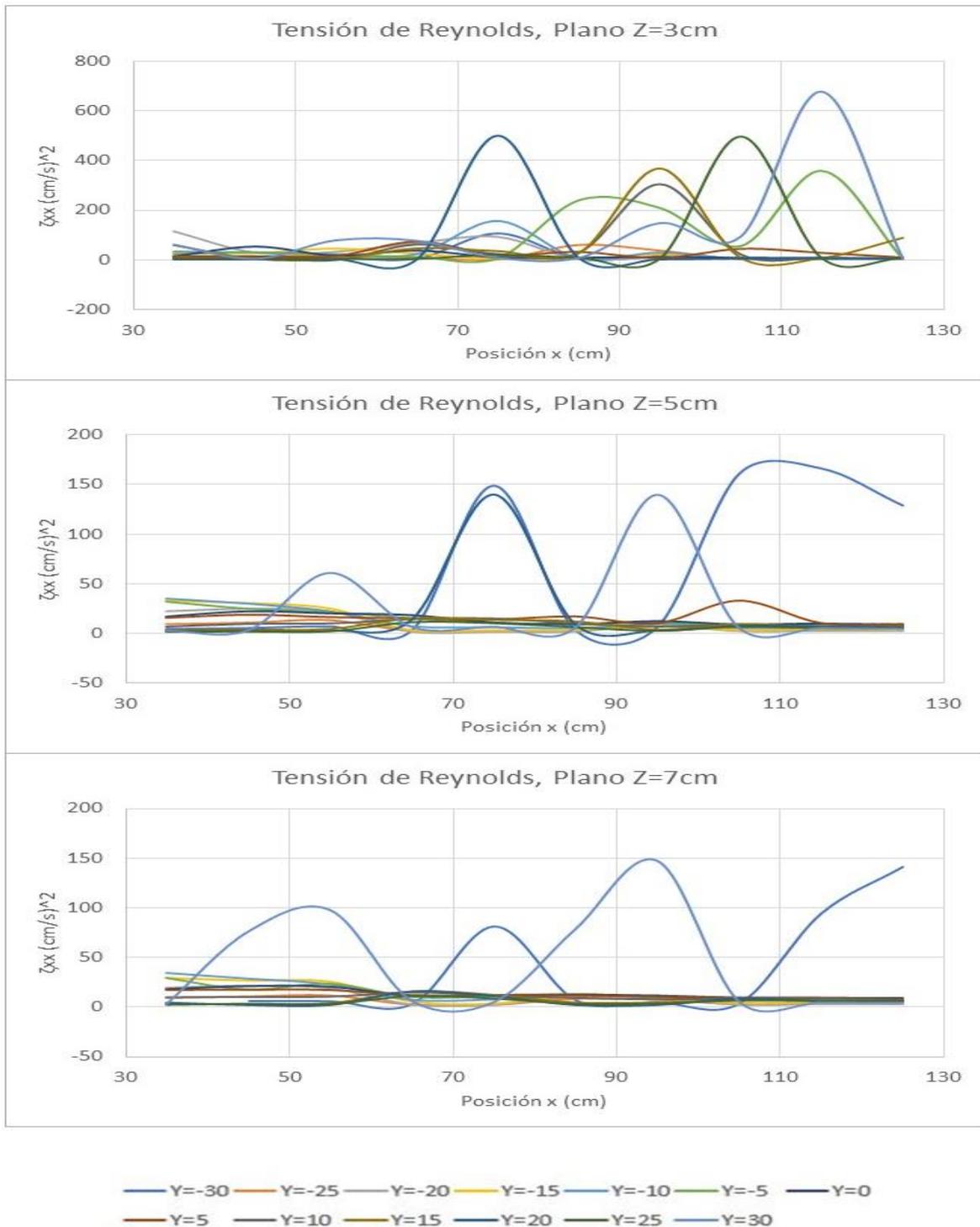


Figura 4-33 Tensión de Reynolds (ζ_{xx}) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

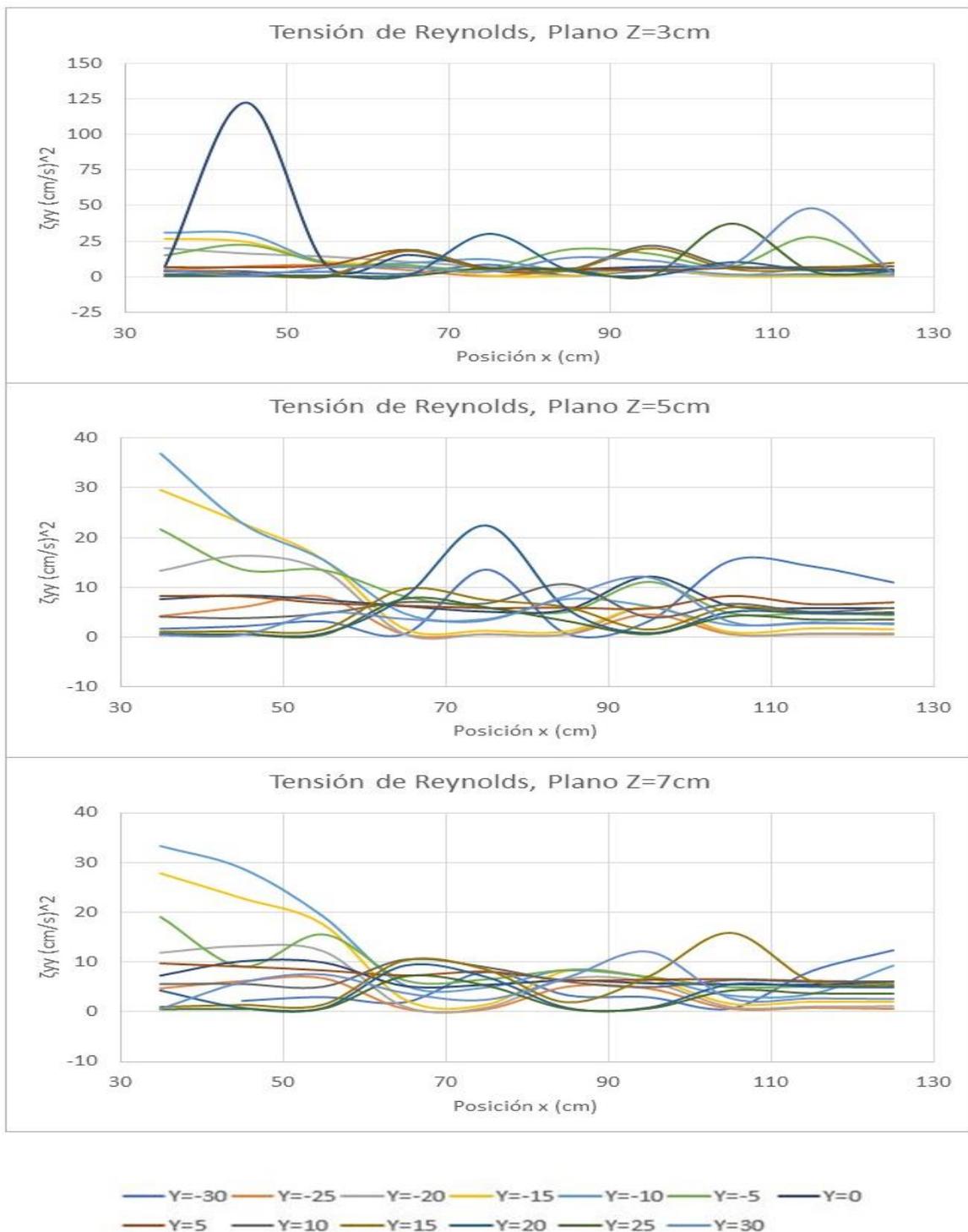


Figura 4-34 Tensión de Reynolds (ζ_{yy}) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

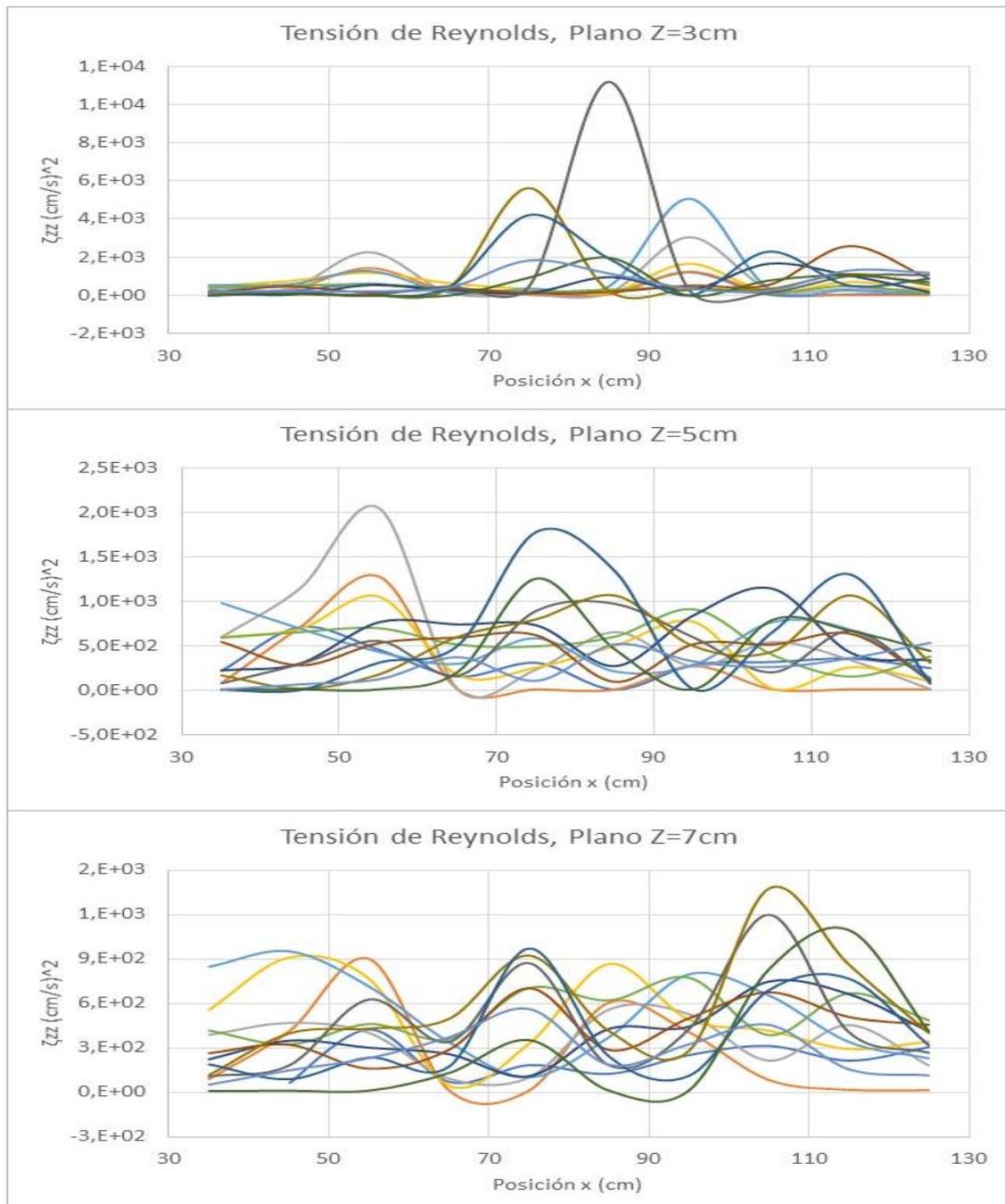


Figura 4-35 Tensión de Reynolds (ζ_{zz}) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

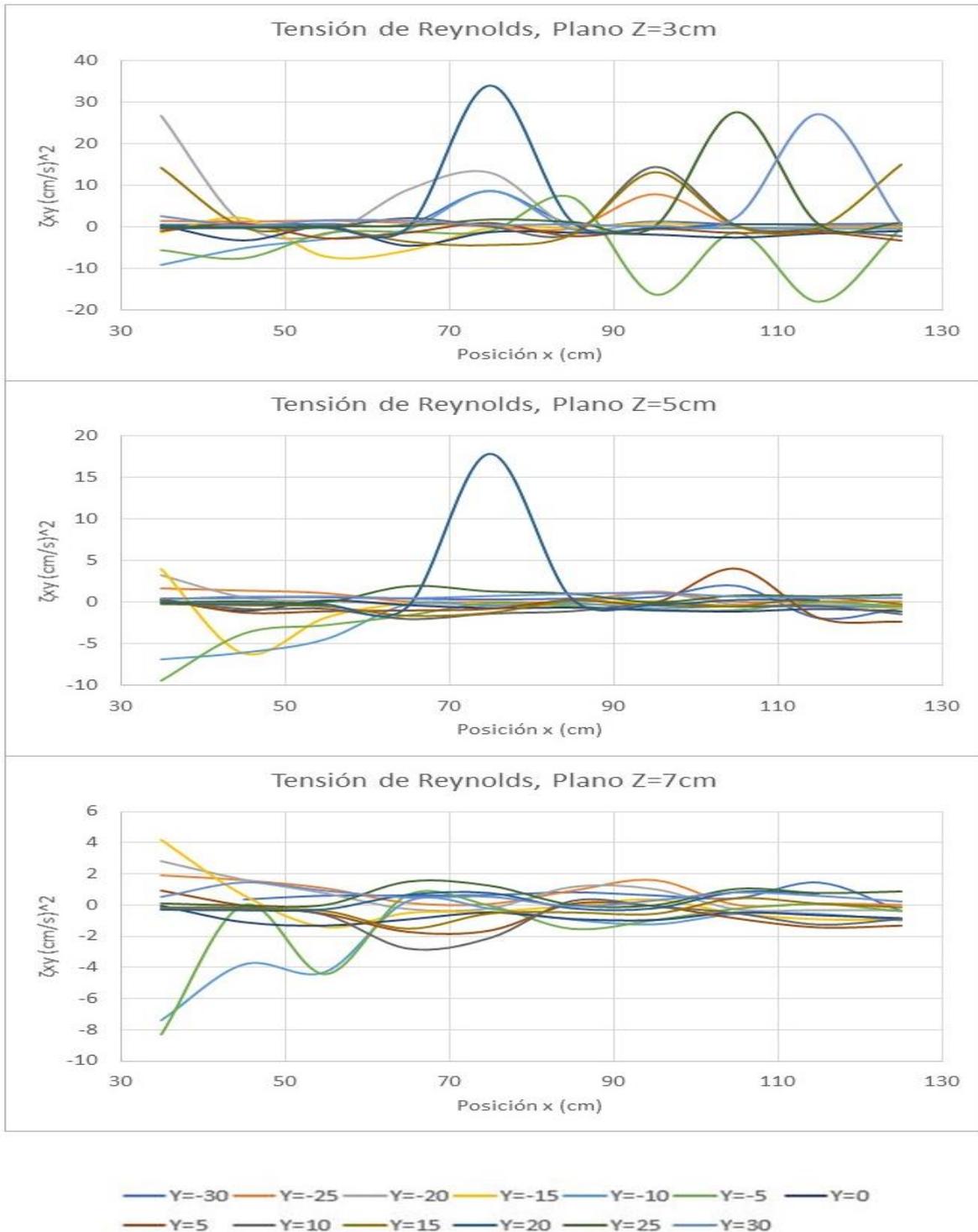


Figura 4-36 Tensión de Reynolds (ζ_{xy}) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

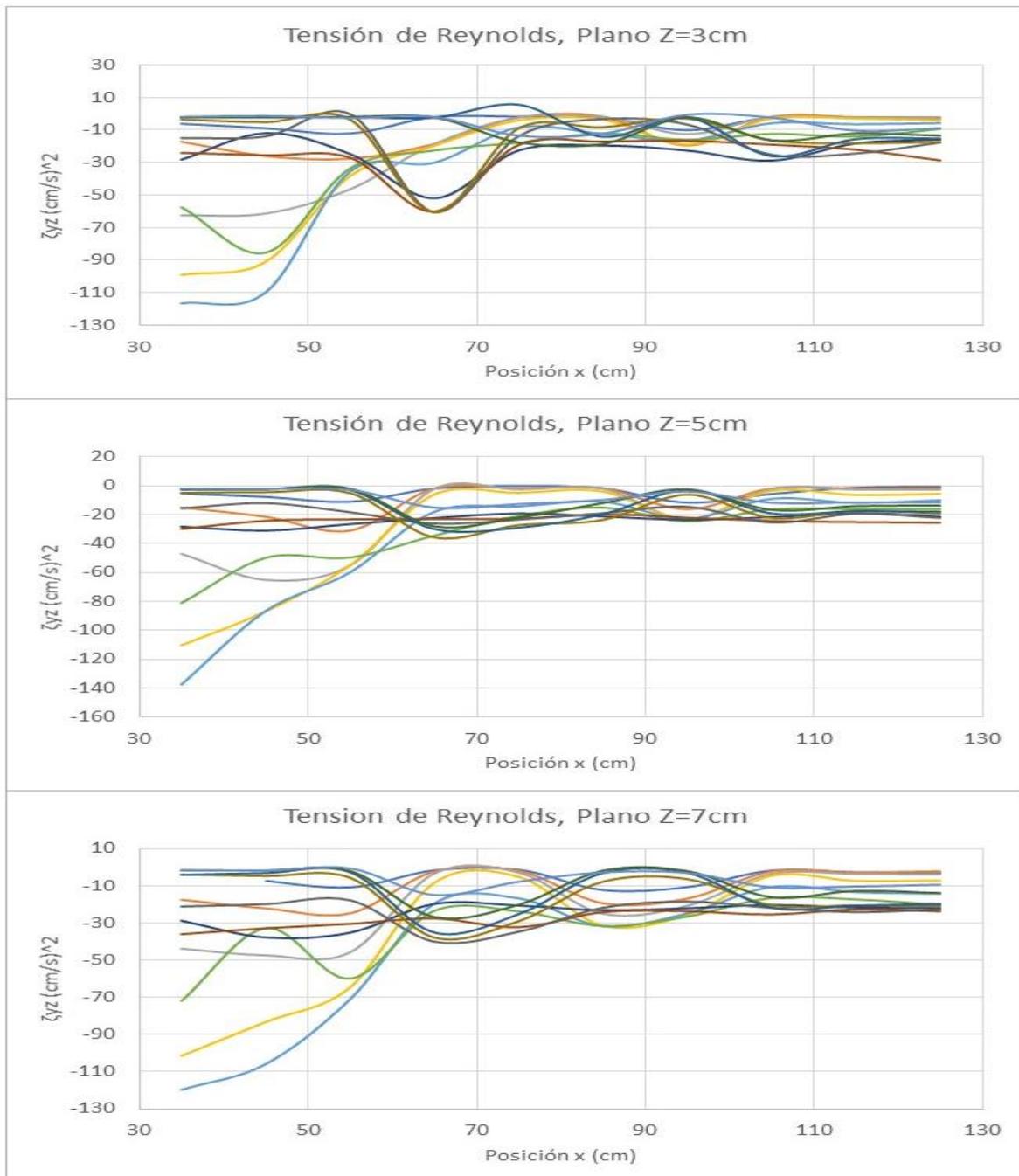


Figura 4-37 Tensión de Reynolds (ζ_{yz}) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

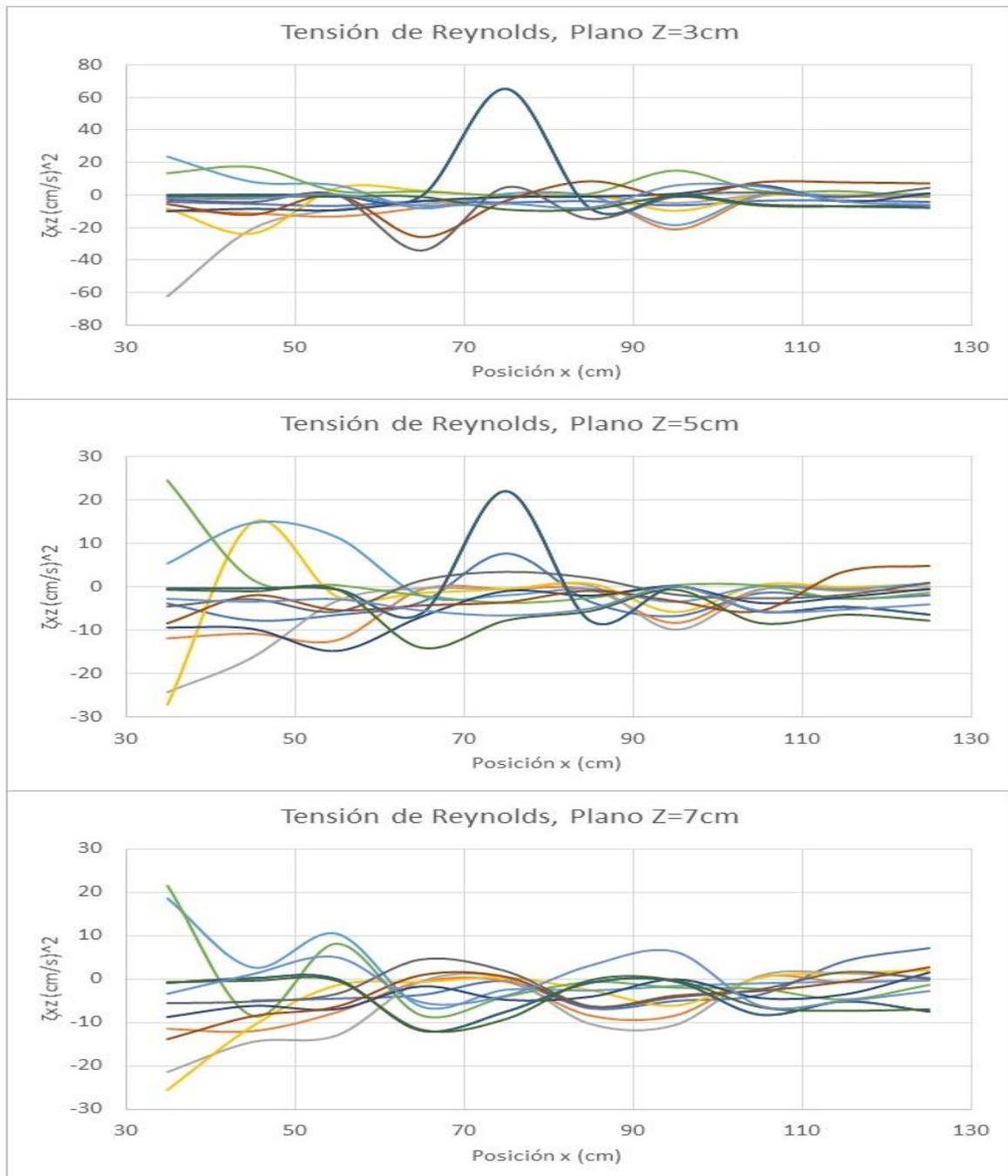


Figura 4-38 Tensión de Reynolds (ζ_{xz}) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Intensidad turbulenta

En la Figura-4-39A. se puede observar que la intensidad turbulenta (TI_x) del plano inferior es mayor que en los demás llegando a superar el 20% demostrando una alta turbulencia en los extremos del canal mientras que en la Figura 4-39B. las curvas se mantienen por debajo del 15% lo que demuestra que existe una disipación de energía a lo largo de la sección de control.

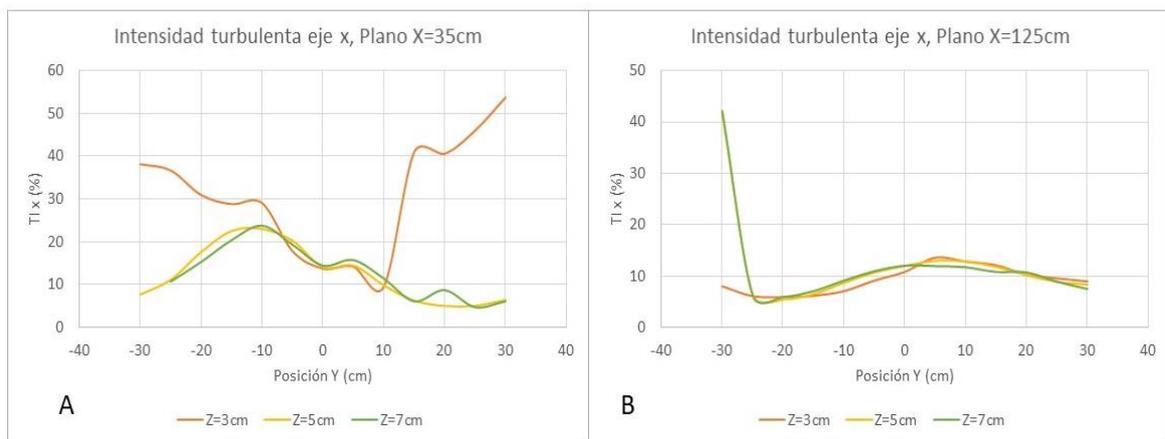


Figura 4-39 Intensidad turbulenta (TI_x) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-40A. la intensidad turbulenta (TI_y) supera el 20% en el plano inferior y a los extremos del canal mientras que la Figura 4-40B. muestra valores no mayores a 11% demostrando una disipación de energía en la sección de control.

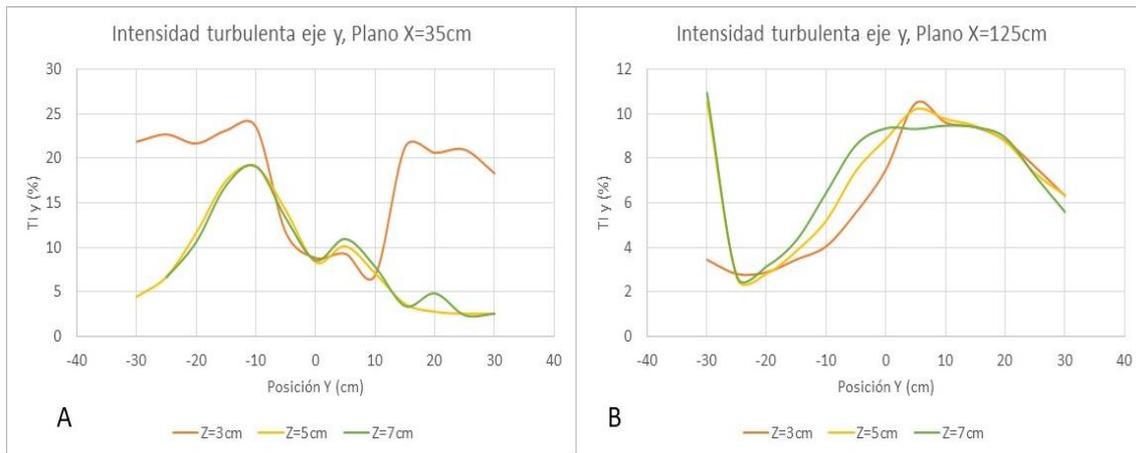


Figura 4-40 Intensidad turbulenta (TI_y) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-41A. la intensidad turbulenta (TI_z) presenta valores máximos en el plano inferior y a los extremos del canal superando el 70% mientras que en la Figura 4-41B. no superan el 50%. Estos porcentajes son muy elevados debido a que el flujo es turbulento.

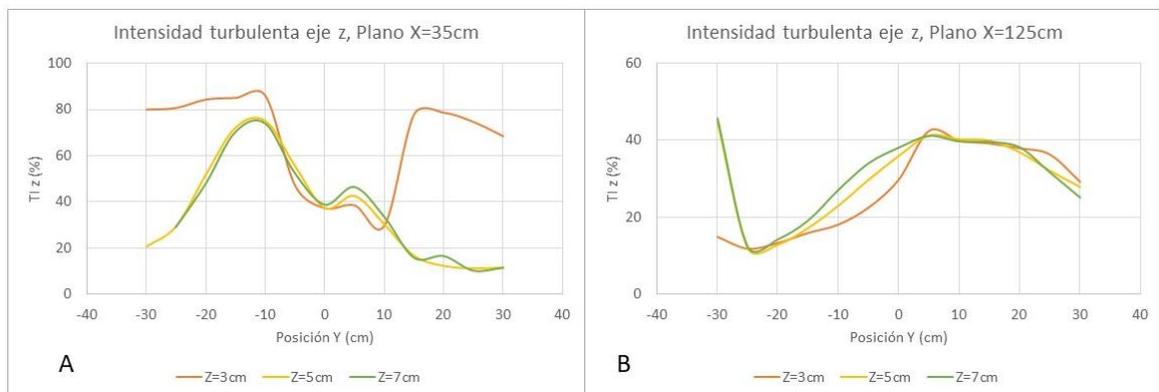


Figura 4-41 Intensidad turbulenta (TI_z) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-42 indica la relación entre la velocidad fluctuante (u') y la velocidad media (U) en dirección X, expresada en porcentaje. Esta relación al igual que las velocidades instantáneas tiende a ser periódica y a estar en pares de curva de

igual valor de eje Y, pero con signo contrario. Las curvas tienden a volverse paralelas y planas a medida que se alejan del origen. En el plano $Z=3$ el rango de intensidad fluctúa entre 5 y 96% mientras que en los planos $Z=5$ y $Z=7$ son similares con rangos de intensidad entre 5 y 40%.

La Figura 4-43 indica la relación entre la velocidad fluctuante (u') y la velocidad media (U) en dirección Y, expresado en porcentaje. Todos los planos son similares con rangos de intensidad no mayores a 23%.

La Figura 4-44 indica la relación entre la velocidad fluctuante (u') y la velocidad media (U) en dirección Z, expresado en porcentaje. Todos los planos son similares con intensidad no mayor a 86%.

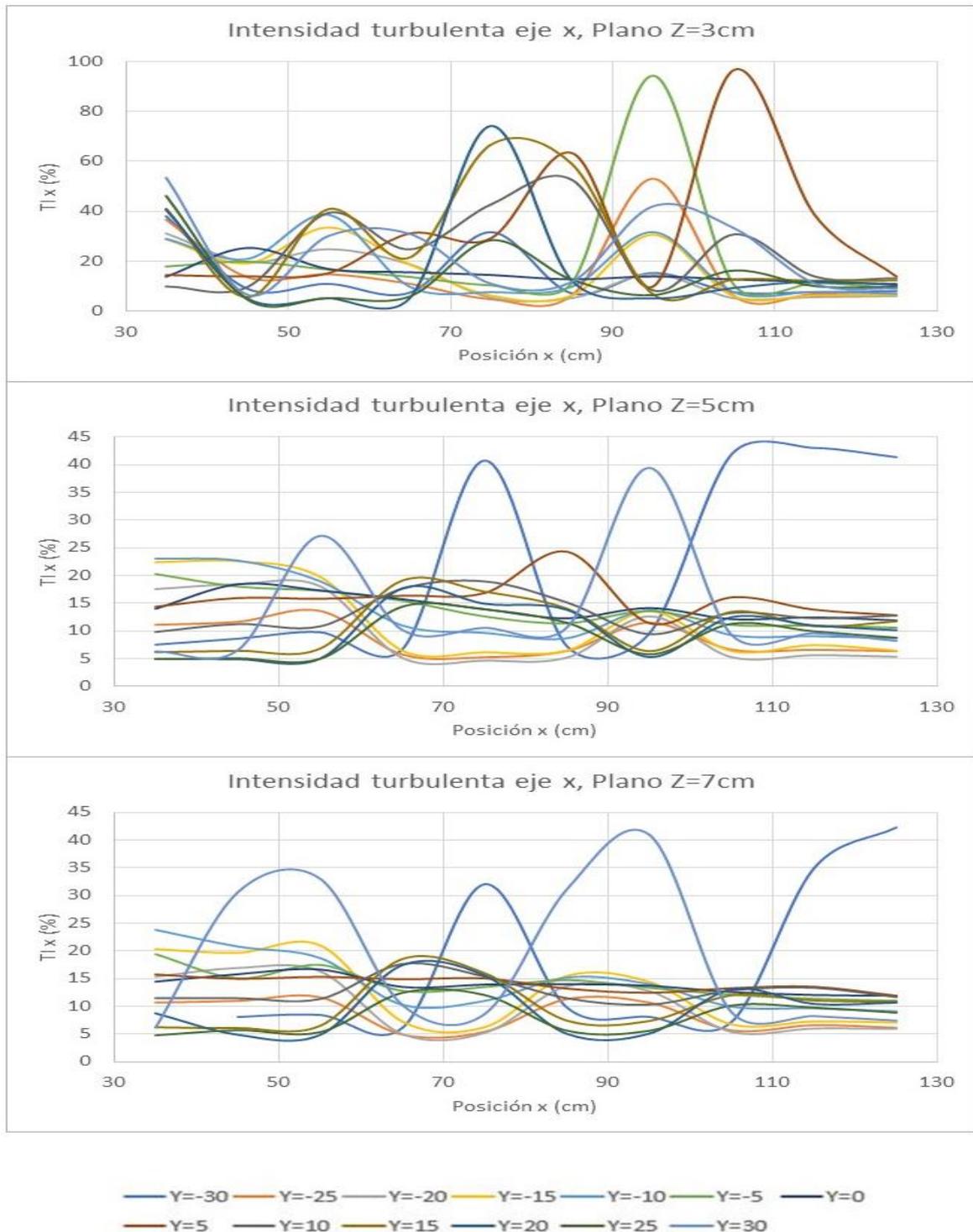


Figura 4-42 Intensidad turbulenta (TI_x) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

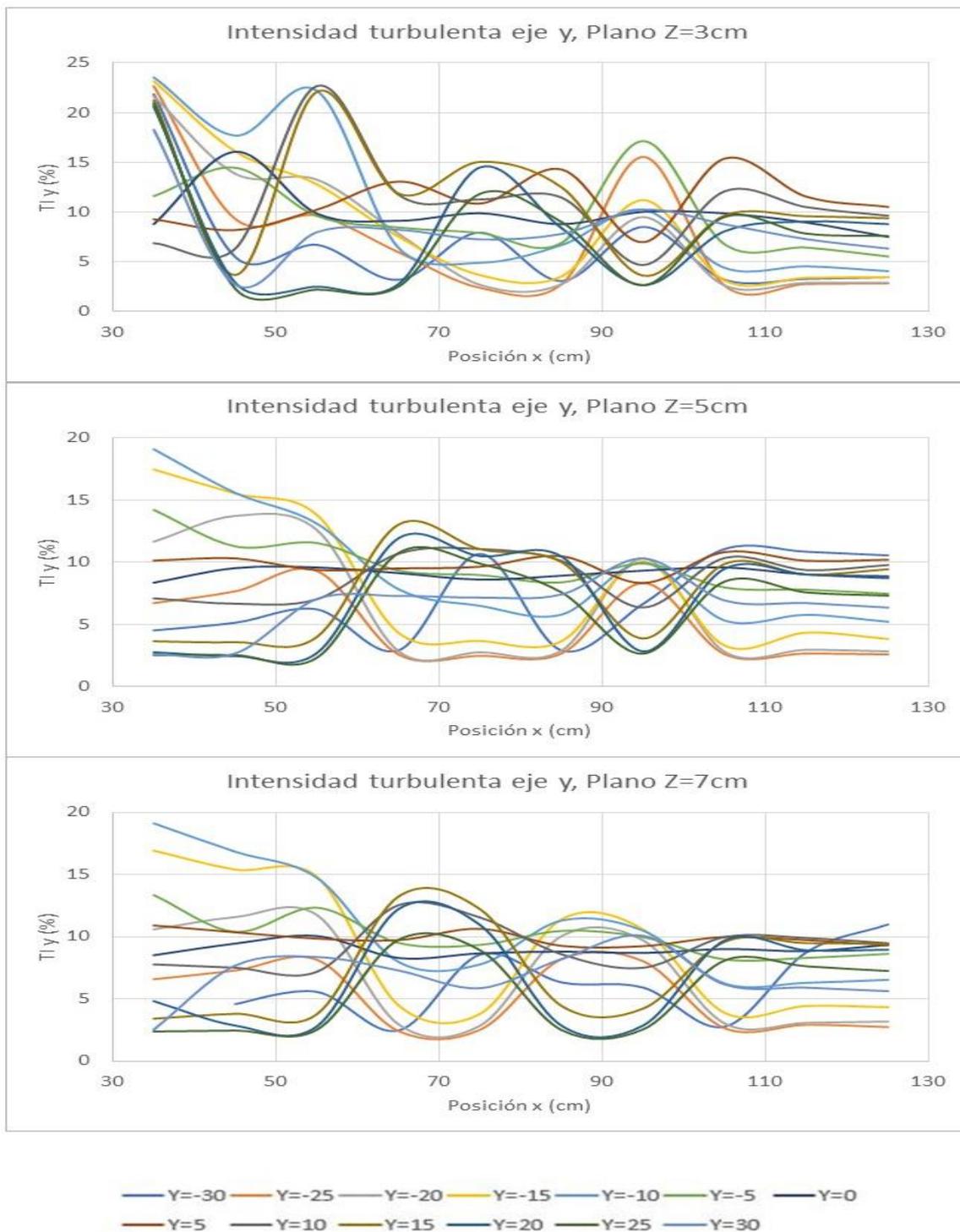


Figura 4-43 Intensidad turbulenta (TI_y) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

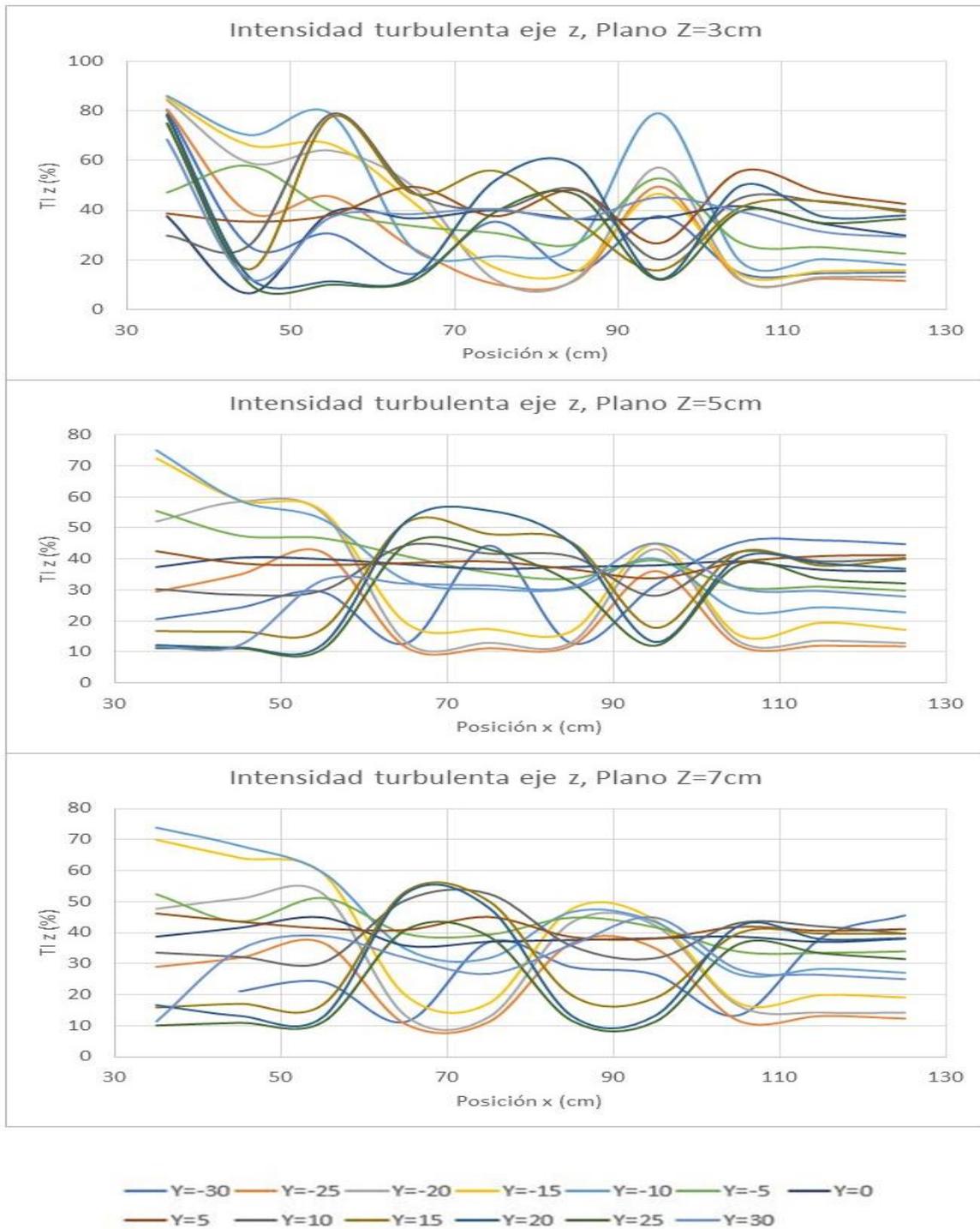


Figura 4-44 Intensidad turbulenta (TI_z) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Energía cinética y disipación turbulenta

En la Figura 4-45A. se observa que los picos en la energía cinética ocurren en los planos intermedio y superior mientras que en la Figura 4-45B. los picos corresponden al plano inferior.

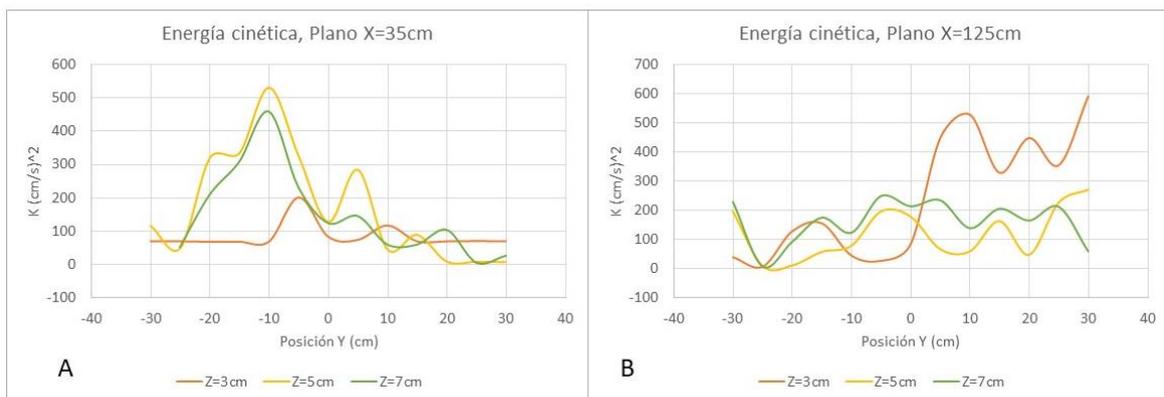


Figura 4-45 Energía cinética (k) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-46A. la disipación turbulenta toma sus mínimos valores en el eje inferior mientras que en la Figura 4-46B. las curvas de los tres planos son similares.

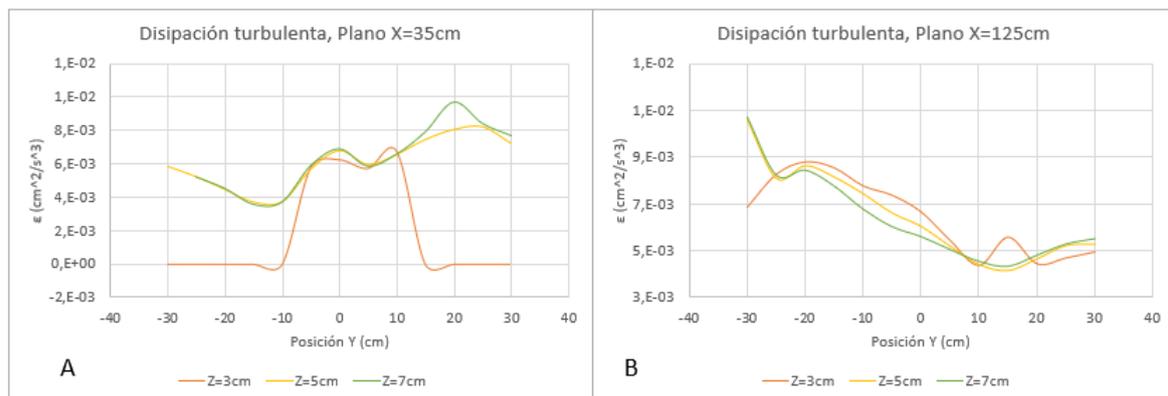


Figura 4-46 Disipación turbulenta (ϵ) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-47 muestra que los rangos de energía disminuyen entre los tres planos medidos, además, todos demuestran valores bajos de energía en los últimos puntos ubicados al final de la sección de control.

La Figura 4-48 indica la disipación turbulenta que es una función de la velocidad instantánea x (U_x), razón por la cual las curvas tienen la misma tendencia que la observada en esta velocidad.

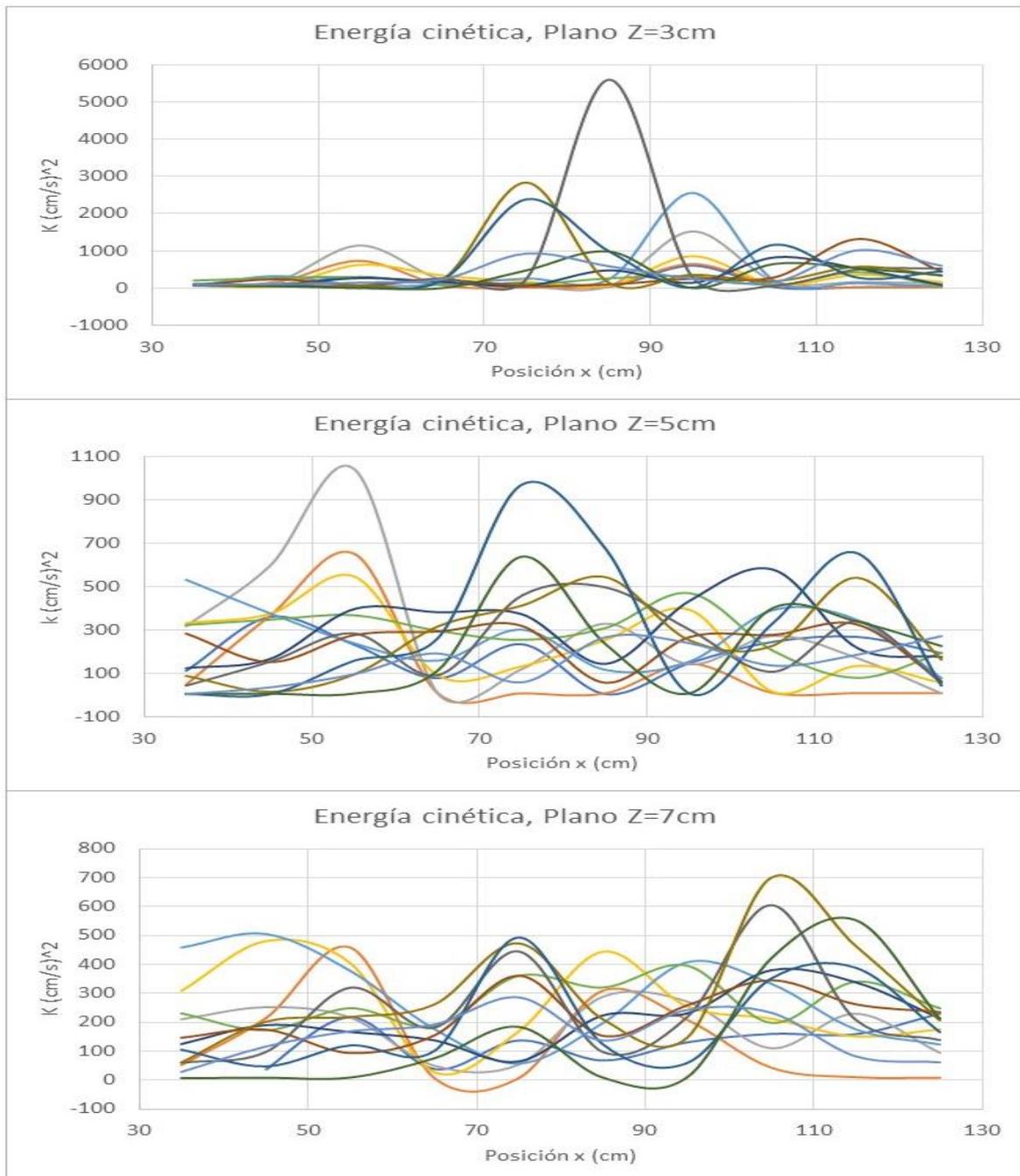


Figura 4-47 Energía cinética (k) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

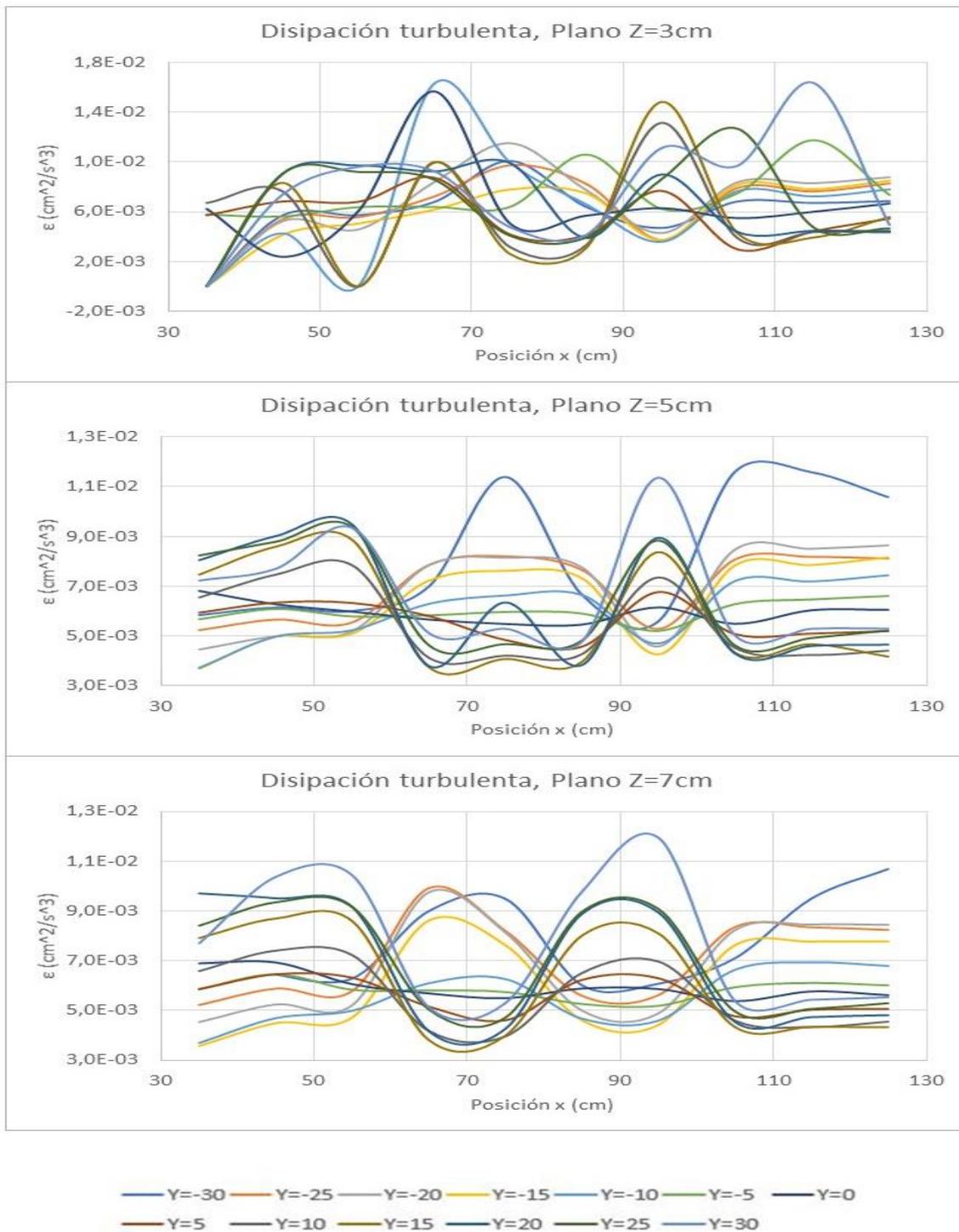


Figura 4-48 Disipación turbulenta (ϵ) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Escalas de Kolmogórov

En la Figura 4-49A se observa la microescala de longitud invariable para los planos intermedio y superior mientras que tantos picos como máximos se encuentran en el plano inferior mientras que en la Figura 4-49B. las curvas de los tres planos adoptan una misma tendencia a lo ancho del canal. En la Figura 4-50 se observa la microescala de tiempo, su tendencia es la misma que en la Figura 4-49.

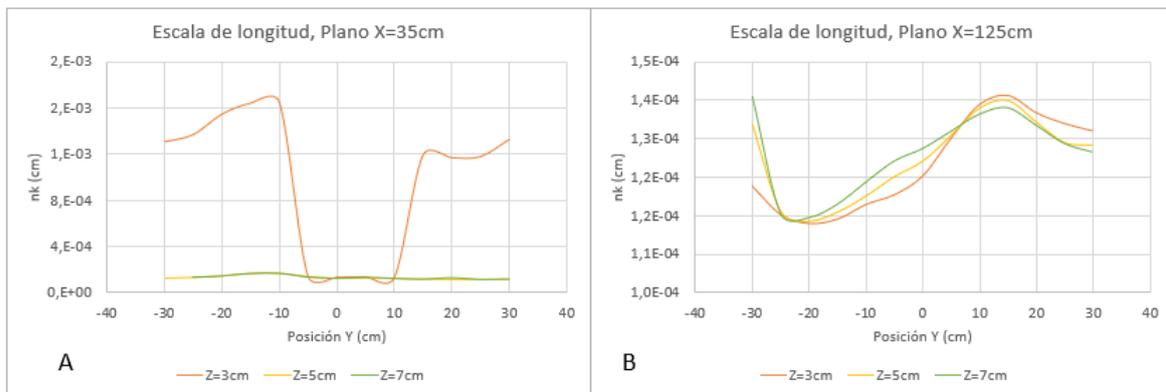


Figura 4-49 Escala de longitud (n_k) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

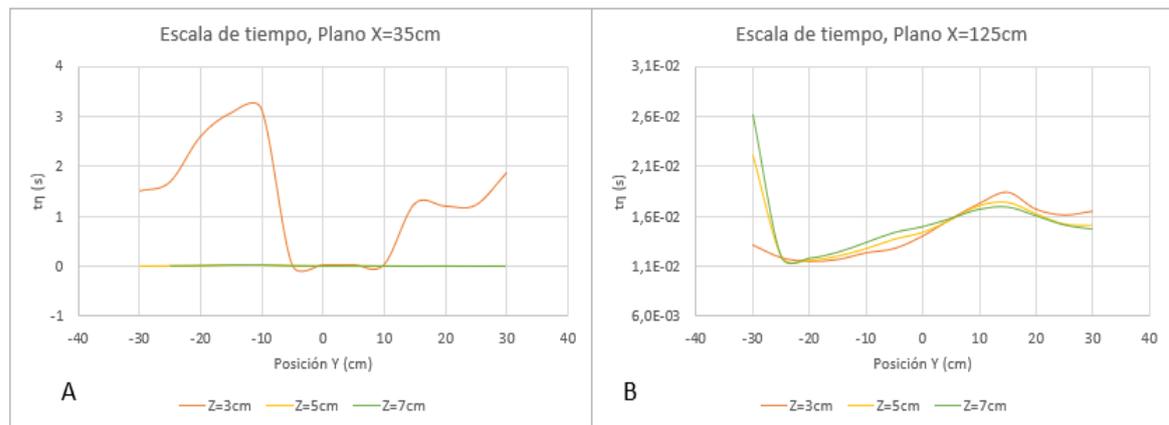


Figura 4-50 Escala de tiempo (t_n) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-51A. se observa la microescala de velocidad con variaciones mínimas en los planos intermedio y superficial mientras que los mínimos están bien definidos en la curva del plano inferior y a los extremos del canal mientras que en la Figura 4-51B. las curvas nuevamente tienden a juntarse y tener una misma forma.

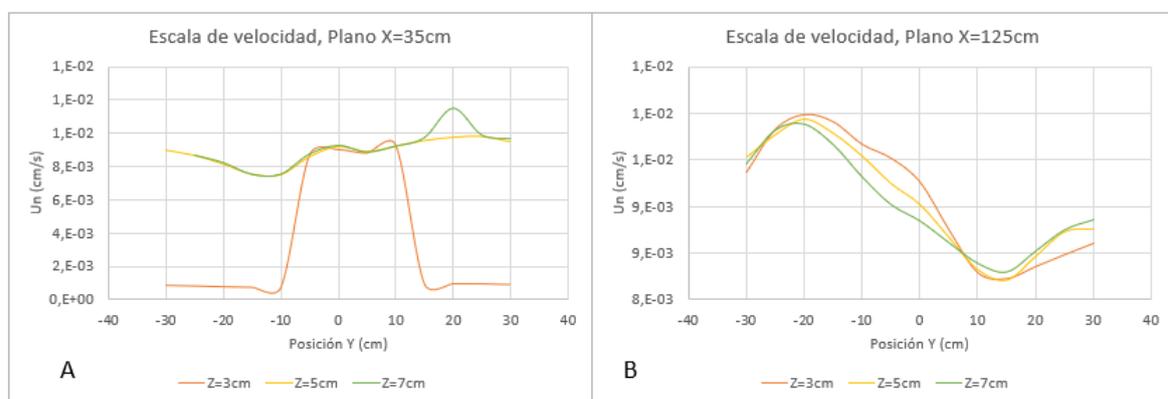


Figura 4-51 Escala de velocidad (U_n) vs Posición (Y) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Estas escalas son las características del movimiento turbulento más pequeño donde predominan las fuerzas viscosas y la energía cinética se disipa mediante

calor, estadísticamente son independientes de la turbulencia a gran escala razón por la cual están en función de la disipación de energía cinética turbulenta que a su vez es función de u_x como se puede observar en la ecuación 2.50, razón por la cual todas las curvas resultantes mostradas en las Figuras 4-52, 4-53 y 4-54 tienen la misma forma que esta velocidad.

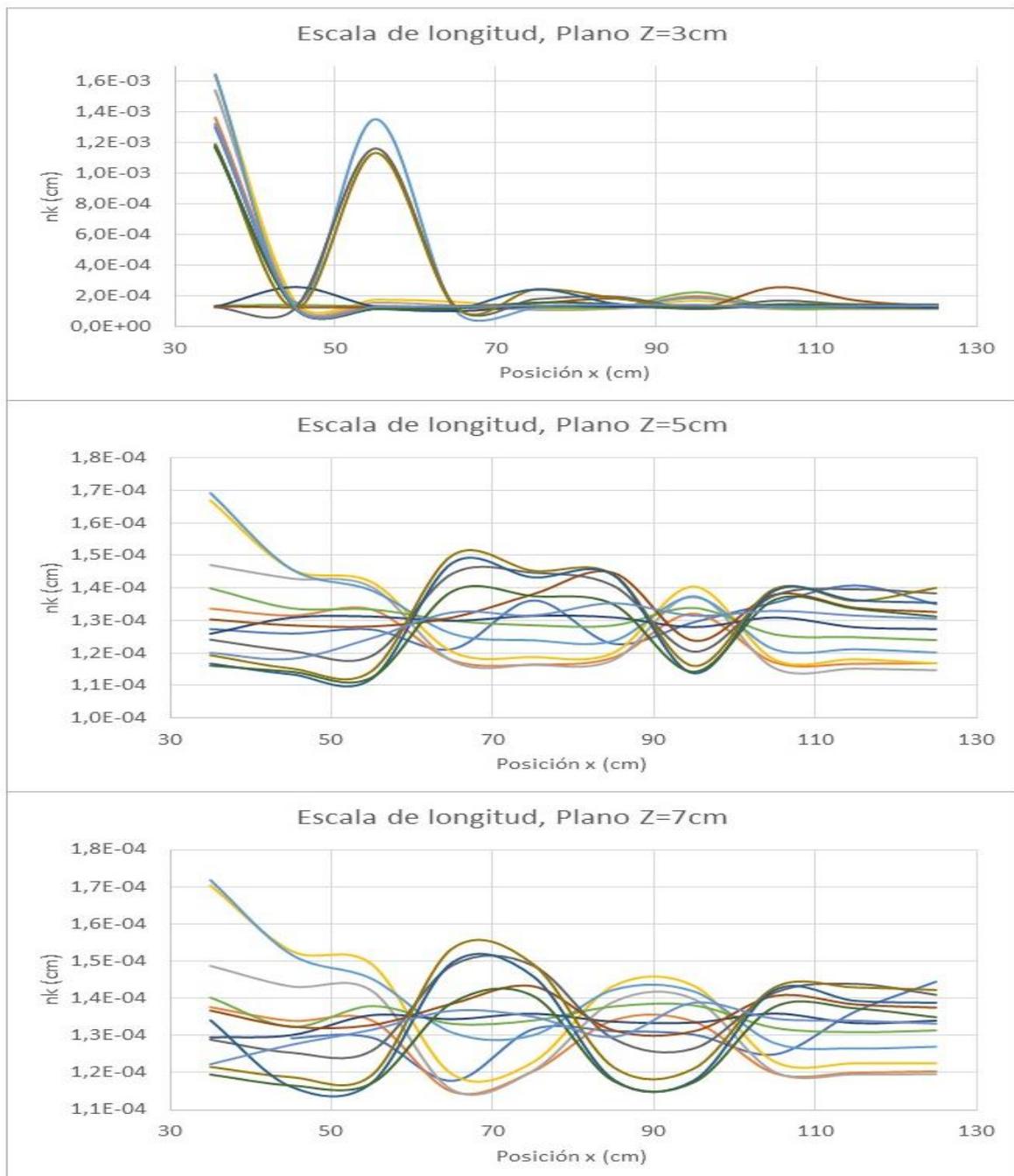


Figura 4-52 Escala de longitud (η_k) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

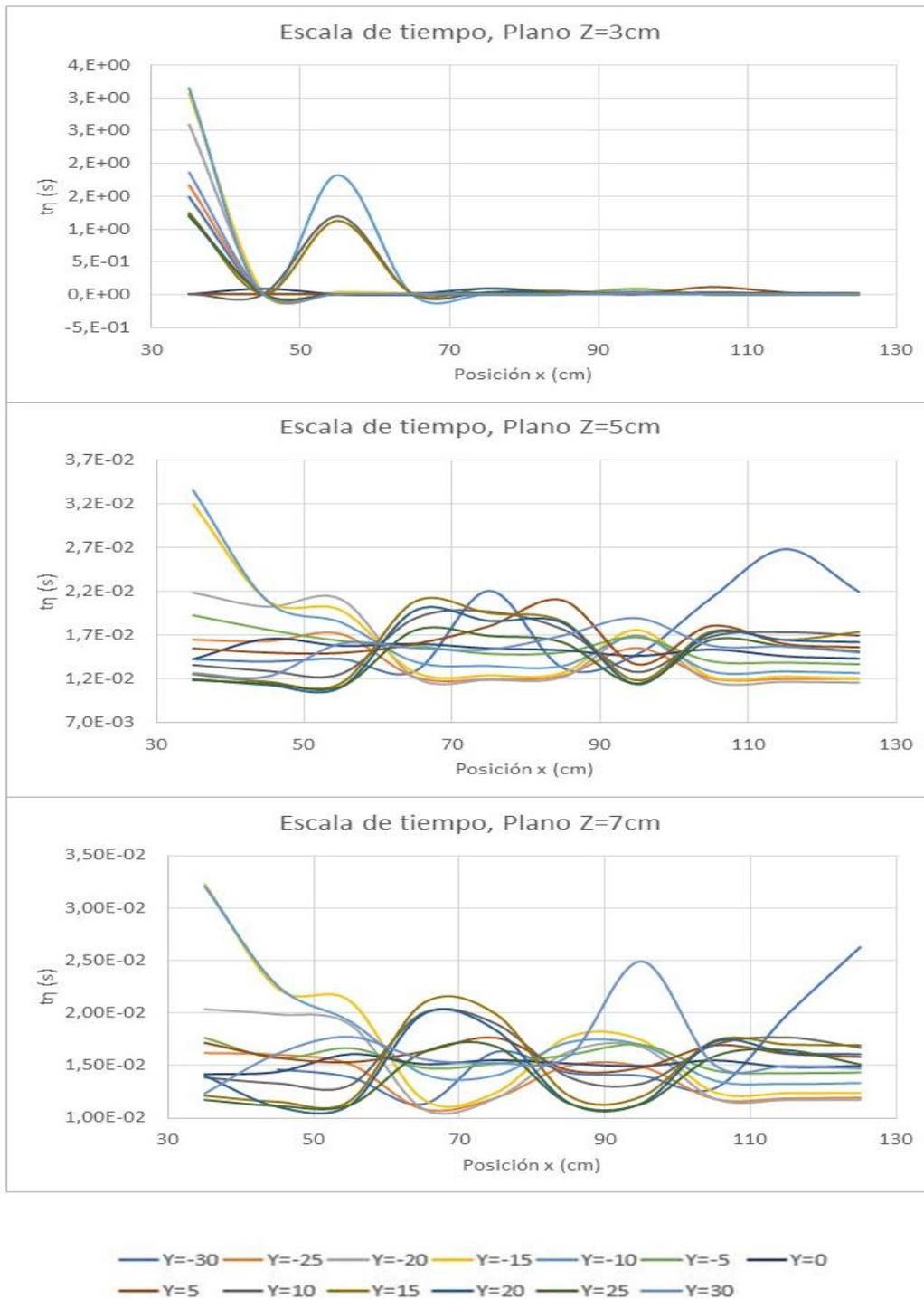


Figura 4-53 Escala de tiempo (t_{η}) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

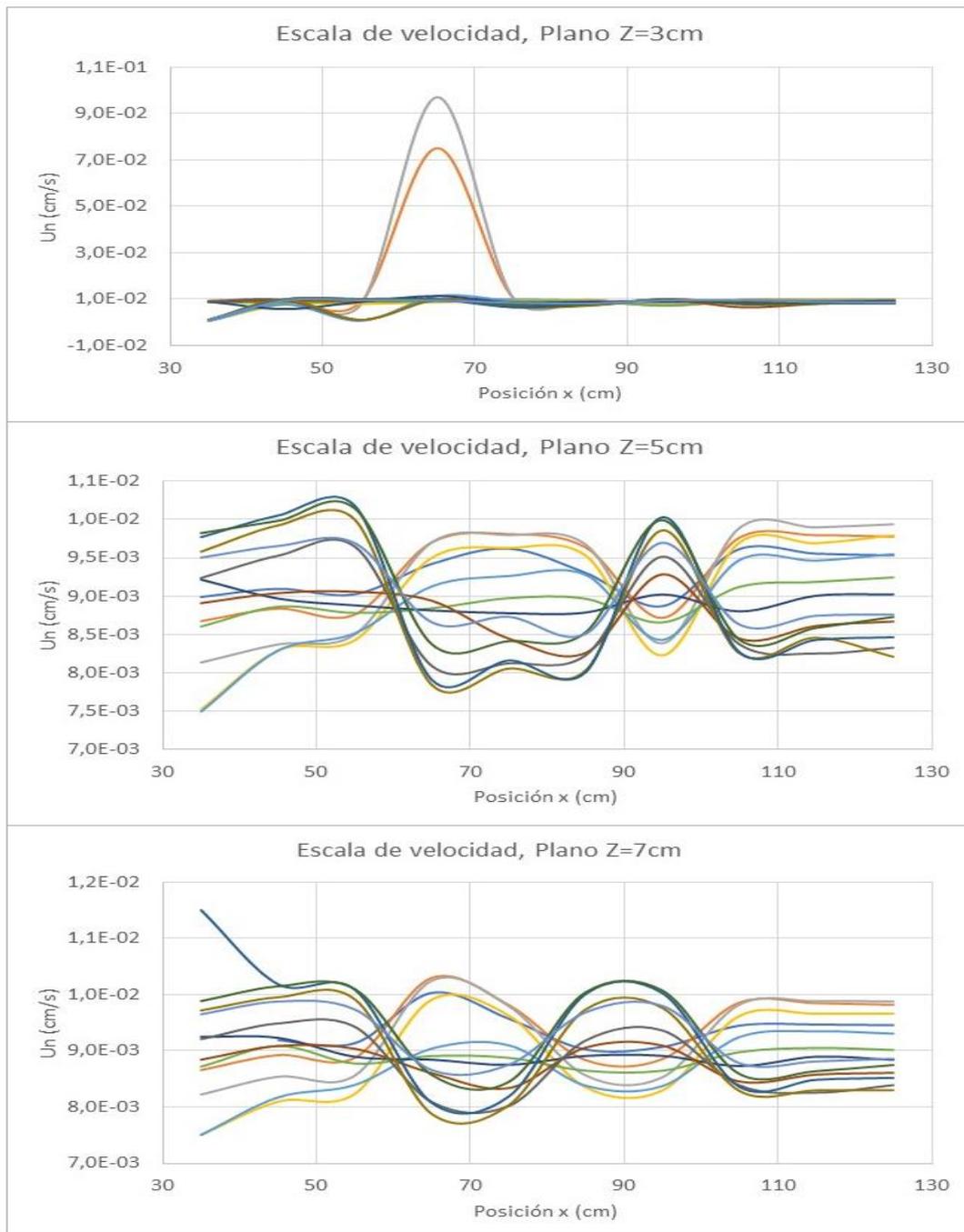


Figura 4-54 Escala de velocidad (U_n) vs Posición (X) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.1.1.3 Análisis de erosión

Socavación teórica

Para determinar la profundidad del hoyo de socavación generado al pie de la pila se utilizaron todos los métodos descritos en la sección 2.1.5, los resultados obtenidos se resumen en las Tablas 4-3 a 4-7. El resultado varía entre 14 y 20 cm lo que resulta mayor que el espesor de la capa de sedimento colocada en el canal, esto se debe a que el cálculo de la socavación depende de la profundidad del flujo y del ancho de la pila debido a que en la realidad los cauces tienen espesores mucho más grandes de sedimento en el fondo.

Tabla 4-3

Método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU). Pila cuadrada

Método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU)				
$D_s = 2 * y * K_f * K_\beta * K_{cf} * K_{mf} \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43}$				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Calado aguas arriba de la pila	y	0,25	m	
Factor de corrección de forma	k _f	1,1		Tabla 2-3
Longitud de la pila	L	0,9	m	
Ancho de la pila	A	0,1	m	
Relación largo/ancho	L/a	9		
Factor de corrección de ángulo de ataque	k _β	1		Tabla 2-4
Factor de corrección de condiciones de fondo	k _{cf}	1,1		Tabla 2-5
Factor de corrección de protección del material de fondo	k _{mf}	1		
	b/y	0,4		
Número de Froude aguas arriba de la pila	Fr	0,13		
Profundidad del hoyo	D _s	14,06	cm	Ecuación 2.56

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-4
Método de Froehlich (1991). Pila cuadrada

Método de Froehlich (1991)				
$D_s = 0.32K_{f*}(b')^{0.62}y^{0.47}Fr^{0.22}D_{50}^{-0.99} + b$				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Factor de corrección por la forma de la pila	K_{f*}	1,3		
Ancho proyectado de la pila	b'	0,1	m	
Calado aguas arriba de la pila	y	0,25	m	
Número de Froude aguas arriba de la pila	Fr	0,13		
Diámetro 50	D_{50}	7,39E-01	mm	
Ancho de la pila	b	0,1	m	
Profundidad del hoyo	D_s	14,48	cm	Ecuación 2.61

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-5
Método de Laursen y Toch (1956). Pila cuadrada

Método de Laursen y Toch (1956)				
$D_s = K_f K_g a$				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Relación calado/ancho	H_s/b	2,5		
Coefficiente de relación H_s/b	K_g	2		Figura 2-22
Coefficiente de forma de la pila	K_f	1		Figura 2-23
Ancho de la pila	a	10	cm	
Profundidad del hoyo	D_s	20	cm	Ecuación 2.62

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-6
Método de Maza-Sánchez (1968). Pila cuadrada

Método de Maza-Sánchez (1968)				
$D_s = f * a' - H_s$				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Velocidad media del flujo	V_o	0,21	m/s	
Calado aguas arriba de la pila	H_s	0,25	m	
Gravedad	g	9,81	m/s ²	
Número de Froude	Fr	0,13		Ecuación 2.2
Ancho de la pila	a'	0,1	m	
Relación calado/ancho	H_s/a'	2,5		Ecuación 2.64
Factor	f	4,3		Figura 2-25
Profundidad del hoyo	ds	18	cm	Ecuación 2.65

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-7
Método de Melville y Coleman (2000). Pila cuadrada

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Calado	Y	0,25	m	
Ancho de la pila	b	0,1	m	
Relación ancho/calado	b/y	0,4		
Coefficiente de relación ancho/calado	K_{hd}	0,24	m	Tabla 2-8
	d_{50a}	0,60	mm	
Diámetro 50	d_{50}	0,74	mm	
Tensión adimensional de Shields	T^*	0,023		
	V_{ca}	0,435	m/s	
	V_a	0,348	m/s	
	V_c	0,423	m/s	
Velocidad media del flujo	V	0,210	m/s	
Coefficiente de intensidad de flujo	K_i	0,67		
	D/d_{50a}	167,91		
Coefficiente del tamaño del sedimento	K_d	1		Tabla 2-9
Coefficiente de alineación de la pila	K_α	1		Tabla 2-10
Coefficiente de forma de la pila	K_{sh}	1		Tabla 2-11
Coefficiente de la geometría del cauce	K_g	1		
	V/V_c	0,50		
Coefficiente de tiempo	K_t	1		Tabla 2-12
Profundidad del hoyo	D_s	16,16	cm	Ecuación 2.66

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Socavación medida sin paneles

La socavación generada una vez transcurrido al menos el tiempo de equilibrio (8,16 horas) dejó ver el fondo metálico del canal hidrodinámico alcanzando una socavación de 12cm.

Socavación medida con paneles

Para poder determinar hasta donde se generó la socavación al pie de la pila cuadrada con los paneles sumergidos colocados aguas arriba de ésta se realizó el procedimiento detallado al final de la sección 3.4.2. El resultado obtenido se muestra en la Figura 4-55 donde las tres líneas negras del lado izquierdo son los paneles, la pila está en el punto (0,50) y el rango del levantamiento va en dirección del eje X desde -100 hasta 210 que es el máximo punto hasta donde se desplazó el sedimento al final del experimento; en el gráfico se distinguen 8 intervalos diferentes detallados en la Tabla 4-8, las curvas de nivel mayores se encuentran cada 3,5cm y las menores cada 0,7cm. Es importante aclarar que la elevación mínima, es decir, el fondo del canal se encuentra en 15,7 cm que es la medida obtenida con el limnómetro en el levantamiento realizado.

Alrededor de los paneles, en el extremo Donde chocan con el flujo de agua se generan depresiones que tienen su punto mínimo en la arista del panel y en el costado derecho de cada panel se genera una elevación producto del movimiento del sedimento bajo la arista del mismo. En la pila los sedimentos toman la forma de la Figura 2.19, la Tabla 4-9 resume tanto las depresiones como elevaciones resultantes considerando que la superficie inicial del sedimento es el punto 0 en el eje Z.

Tabla 4-8*Leyenda del levantamiento de la forma del lecho con la pila cuadrada*

Tabla de elevaciones, Pila cuadrada				
Intervalo	Elevación mínima (cm)	Elevación máxima (cm)	Área (cm ²)	Color
1	15.70	21.94	7641.99	
2	21.94	22.87	2671.77	
3	22.87	23.24	2793.23	
4	23.24	23.55	2561.44	
5	23.55	23.84	2833.02	
6	23.84	24.14	2370.04	
7	24.14	25.05	3479.95	
8	25.05	27.70	3768.56	

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-9*Elevaciones y depresiones ocurridas en el lecho con la pila cuadrada*

Elemento	Depresión (cm)	Elevación (cm)
Panel 1 (y=25)	4,5	1,1
Panel 2 (y=50)	4,5	1,8
Panel 3 (y=75)	5,2	1,8
Pila cuadrada	8,7	2,5

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

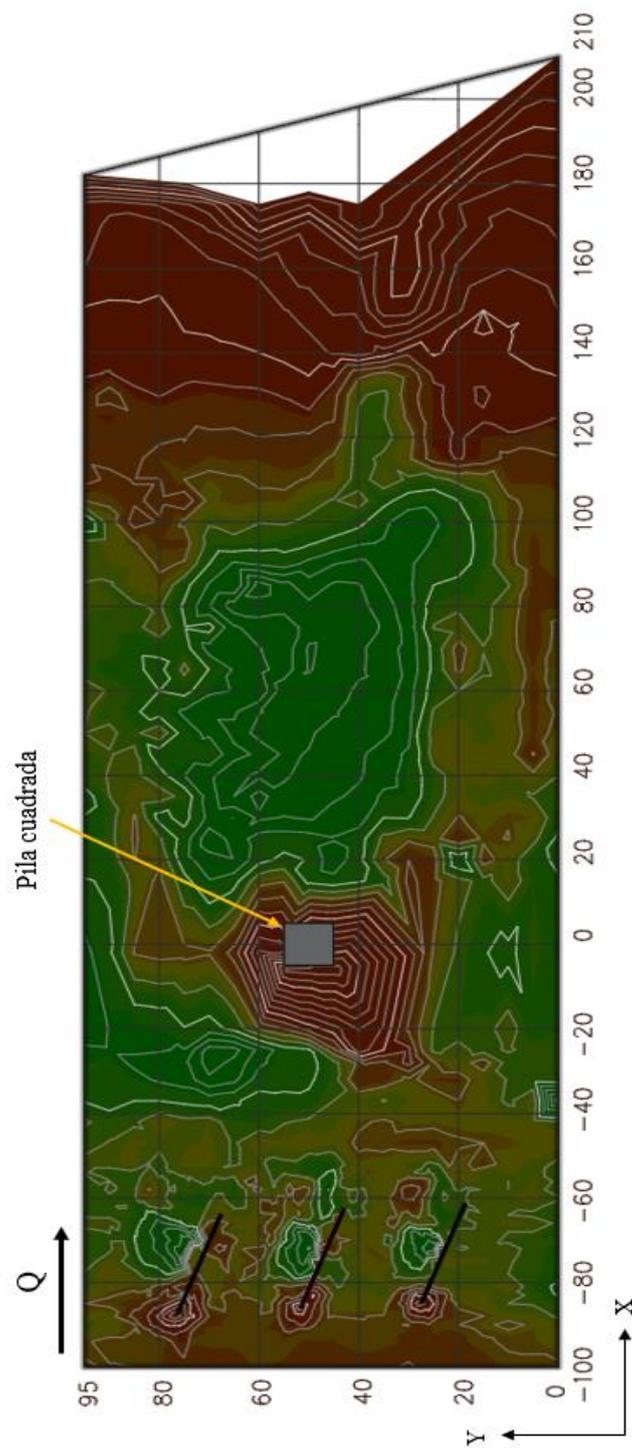


Figura 4-55 Forma del lecho con paneles sumergidos. Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.1.2 PILA CIRCULAR

4.1.2.1 Análisis de velocidades

La velocidad principal del flujo (u_x) de la Figura 4-56A. las curvas tienen formas y tendencias distintas mientras que en la Figura 4-56B. todas siguen una misma forma. Adicionalmente, en ambos casos los rangos son bastante similares lo que implica que la velocidad principal se mantiene en la sección de control.

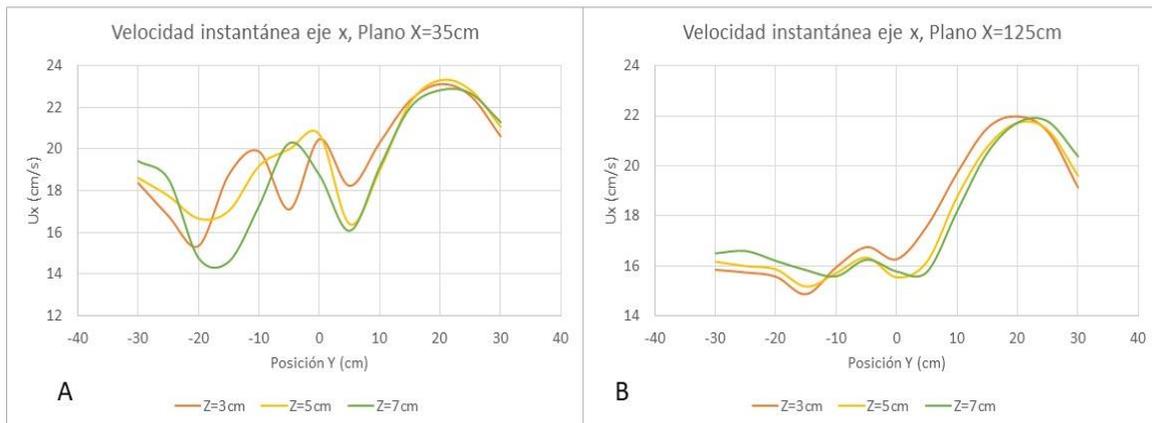


Figura 4-56 Velocidad instantánea (u_x) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La velocidad del flujo en dirección al eje Y (u_y) de la Figura 4-57A en los extremos del canal tienden a ser paralelas, pero a medida que se acercan al centro del canal se dispersan teniendo que los valores máximos se encuentran en el plano más superficial. Para la figura 4-57B sucede lo mismo.

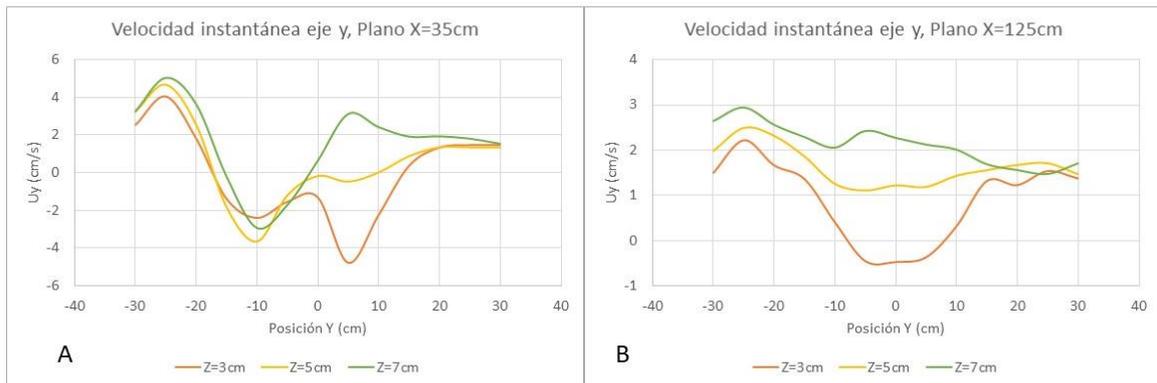


Figura 4-57 Velocidad instantánea (u_y) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La velocidad instantánea del flujo en dirección al eje Z (u_z) muestra una tendencia inversa a la de u_y , además, en la Figura 4-58A. las curvas se encuentran tanto en el rango positivo como negativo mostrando un amplio rango de variación de este parámetro mientras que la Figura 4-58B. demuestra que el plano Z inferior adquiere mayores velocidades y el Z superior adquiere las menores velocidades Donde todas menores que cero.

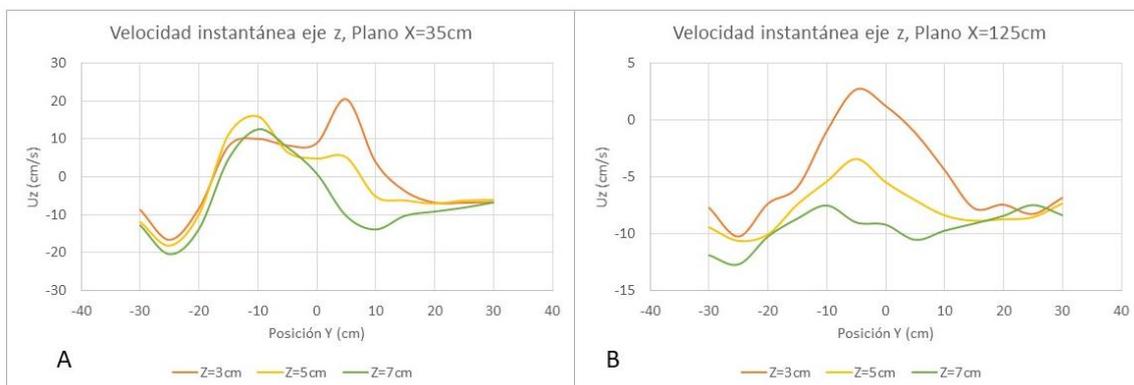


Figura 4-58 Velocidad instantánea (U_z) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-59 muestra la evolución de la velocidad (u_x) en función de la posición (x) en todos los planos Z, Donde las curvas adquieren una forma

determinada en el plano $Z=7$ asemejándose a lo expuesto en la Figura 2-7. A diferencia de la pila cuadrada, todas las curvas siguen una misma tendencia, con picos y valles no tan pronunciados, pero aún se complementan entre sí aquellas que tienen signos opuestos.

La Figura 4-60 muestra la evolución de la velocidad (u_y) en función de la posición (x) Donde los picos más notorios se encuentran en las mismas coordenadas que las velocidades u_x . A lo largo de la sección de control las curvas tienden a volverse planas y paralelas acercándose a un valor constante, con picos y valles muy pequeños pero que igualmente cumplen con la característica de que los ejes opuestos se complementan entre sí.

La Figura 4-61 muestra la evolución de la velocidad (u_z) en función de la posición (x) que tiene una tendencia, al igual que u_y , a uniformizarse hacia el final de la sección de control en todos los planos, cabe aclarar que los valores negativos indican la dirección del vórtice generado. Los picos y valles son más notorios en esa componente de la velocidad.

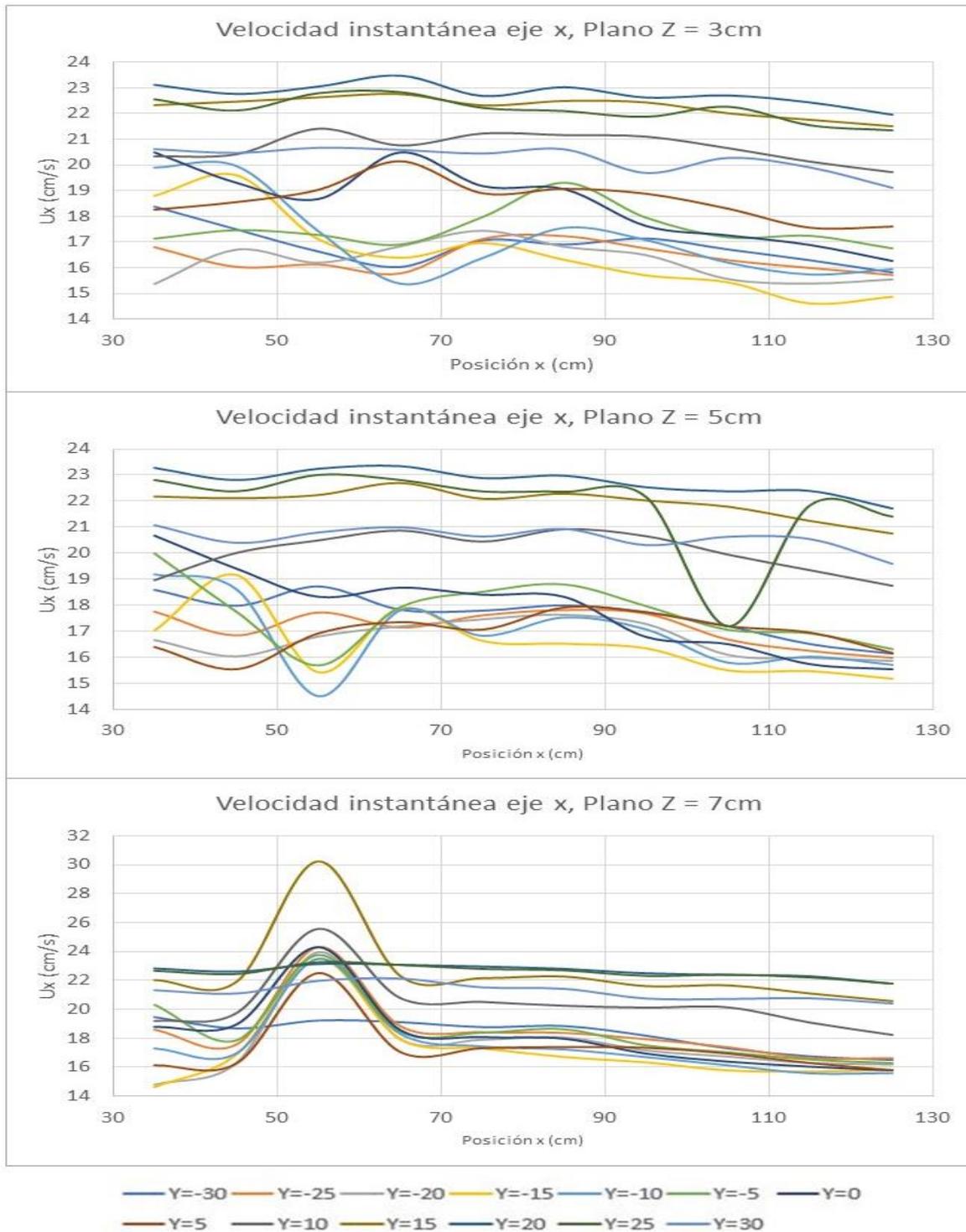


Figura 4-59 Velocidad instantánea (u_x) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

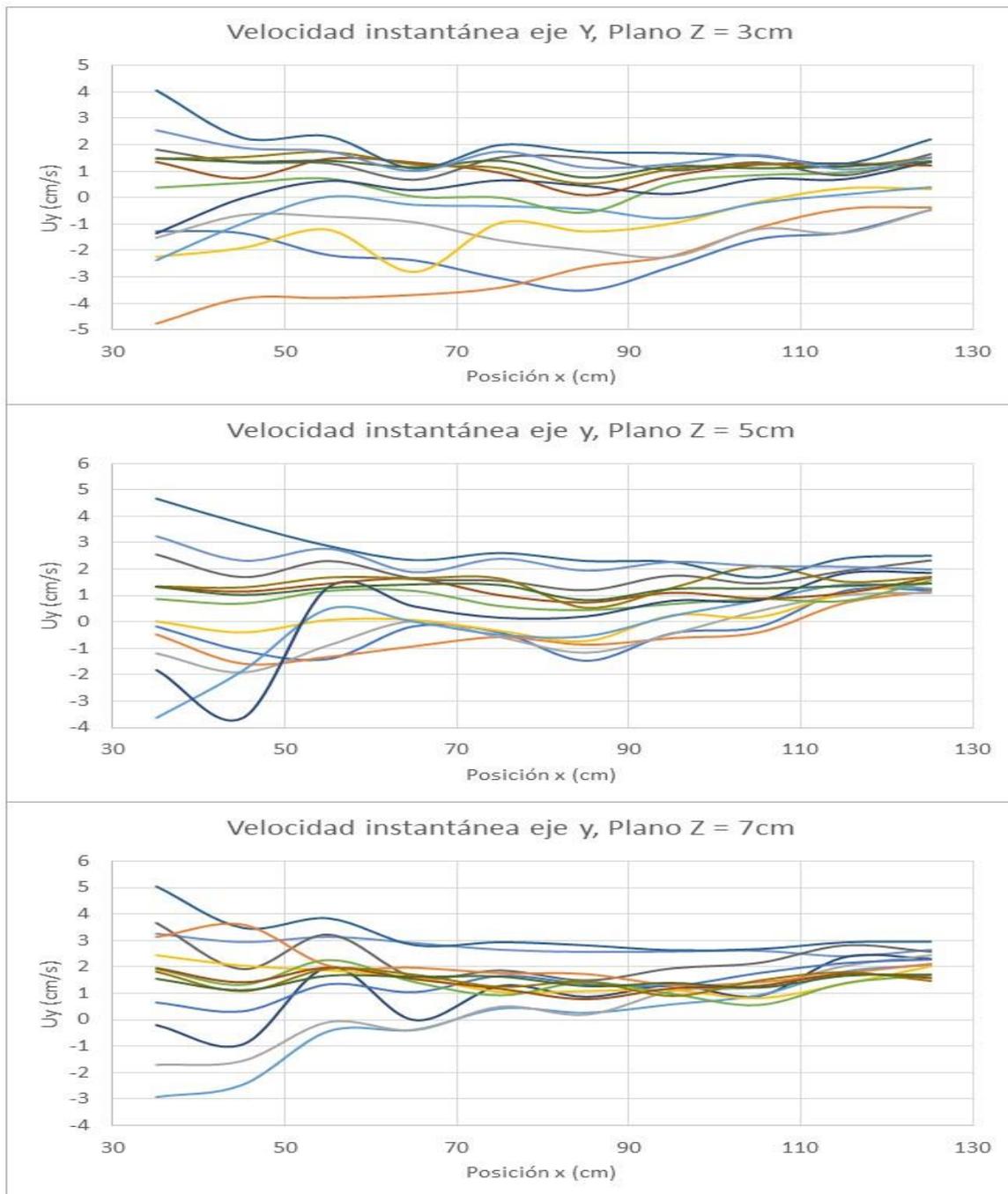


Figura 4-60 Velocidad instantánea (u_y) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

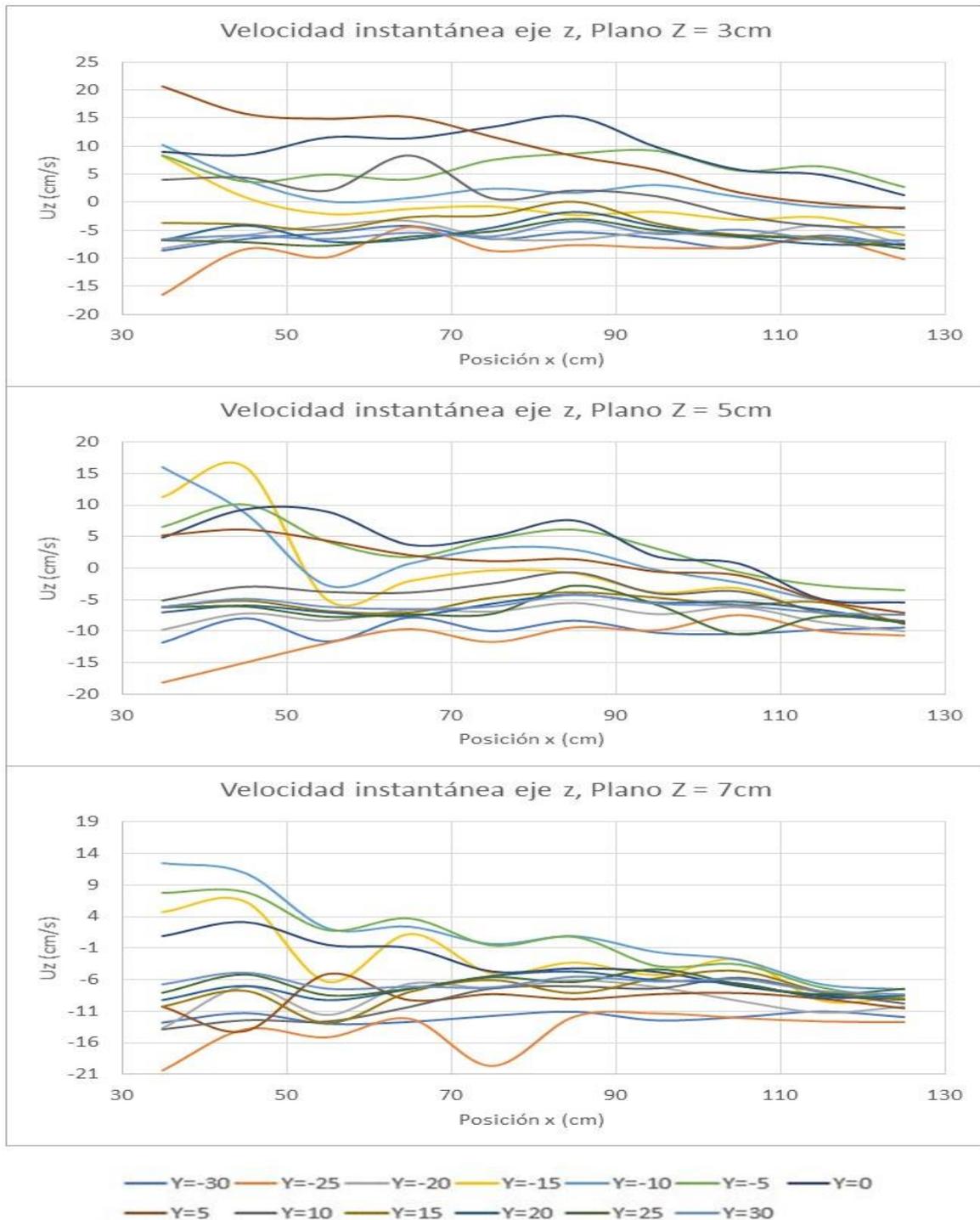


Figura 4-61 Velocidad instantánea (u_z) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.1.2.2 Análisis de turbulencia

En esta sección se realizará el análisis de turbulencia para la pila circular siguiendo el orden descrito en el marco teórico. Cabe mencionar que la base de todos los cálculos realizados son las velocidades instantáneas obtenidas experimentalmente con el ADV.

Desviación estándar

En la Figura 4-62A. el máximo valor ocurre en el plano Z superficial y cerca del centro del canal mientras que en la Figura 4-62B. el máximo se ubica en el plano Z intermedio y hacia el margen derecho del canal.

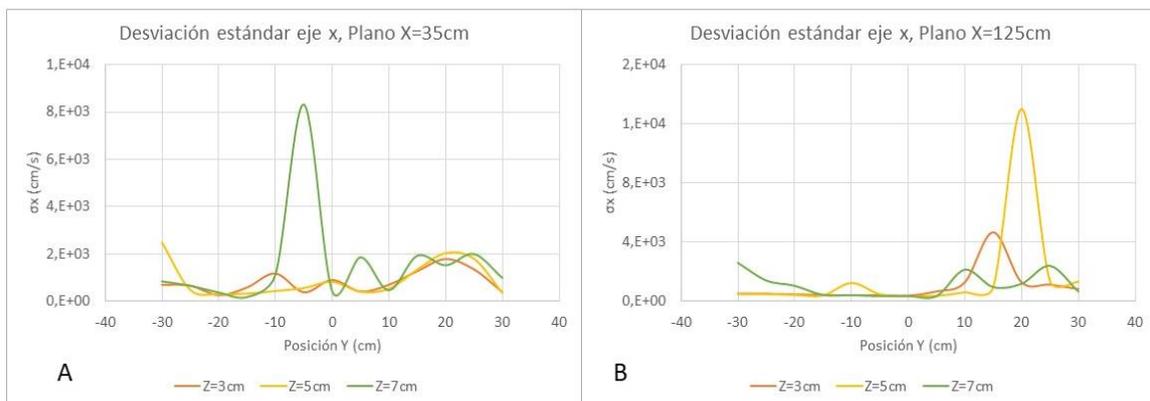


Figura 4-62 Desviación estándar (σ_x) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-63A. existe una acumulación de valores sobre el margen izquierdo del canal debido al ángulo de ataque de los paneles mientras que en la Figura 4-63B. el máximo se ubica en el plano Z intermedio y hacia el margen izquierdo del canal.

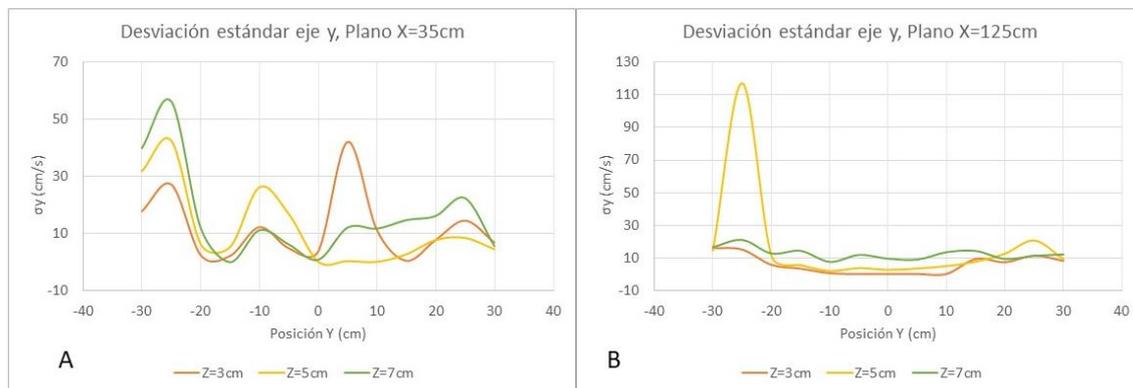


Figura 4-63 Desviación estándar (σ_y) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-64A. existe una acumulación de valores sobre el margen izquierdo del canal debido al ángulo de ataque de los paneles mientras que en la Figura 4-64B. las curvas tienden a dispersarse entre sí donde el plano Z superior el que contiene los máximos valores.

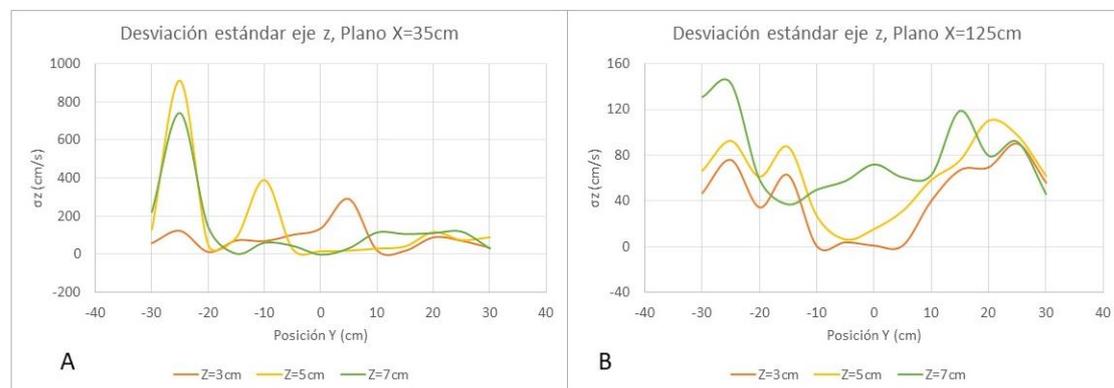


Figura 4-64 Desviación estándar (σ_z) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-65 indica la desviación estándar de la velocidad fluctuante en X, los rangos de desviación van de 2500 a 14000 cm/s en los tres ejes medidos, donde un rango bastante amplio debido a los números de Reynolds elevados propios del régimen turbulento que posee el flujo.

La Figura 4-66 indica la desviación estándar de la velocidad fluctuante en Y, los rangos de desviación, a diferencia de la pila cuadrada, tienen rangos similares de desviación sin que la profundidad influya mucho en este que va de 1 a 170 cm/s.

La figura 4-67 indica la desviación estándar de la velocidad fluctuante en Z, los rangos de desviación se indican en la Tabla 4-10 y varían dependiendo de la profundidad.

Tabla 4-10

Rango de variación de la desviación estándar eje Z. Pila circular

Plano	Rango	Unidad
Z = 3	1,1 – 3100	cm/s
Z = 5	1,1 - 1994	cm/s
Z = 7	2,9 – 1492	cm/s

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

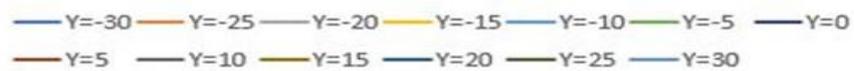
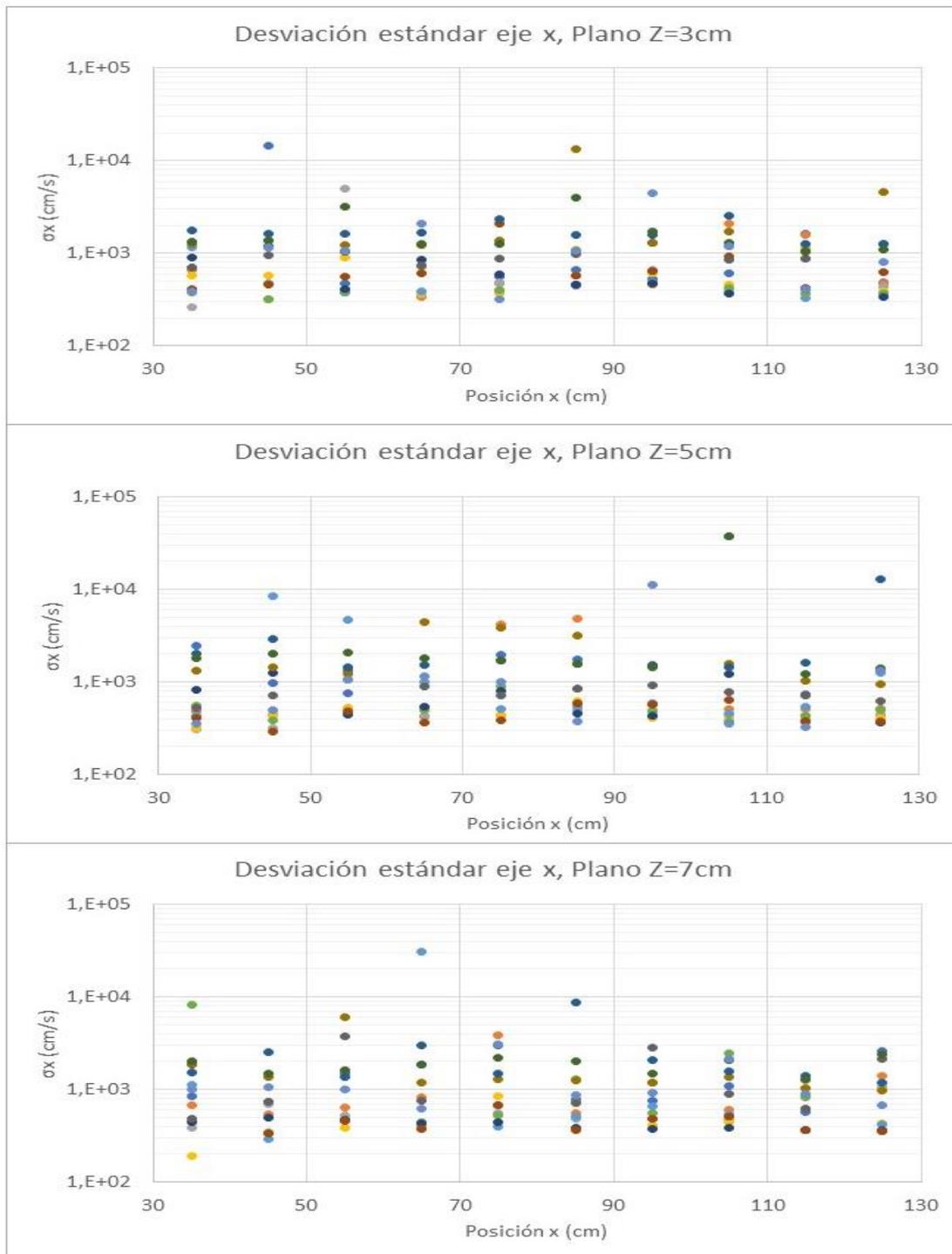


Figura 4-65 Desviación estándar (σ_x) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

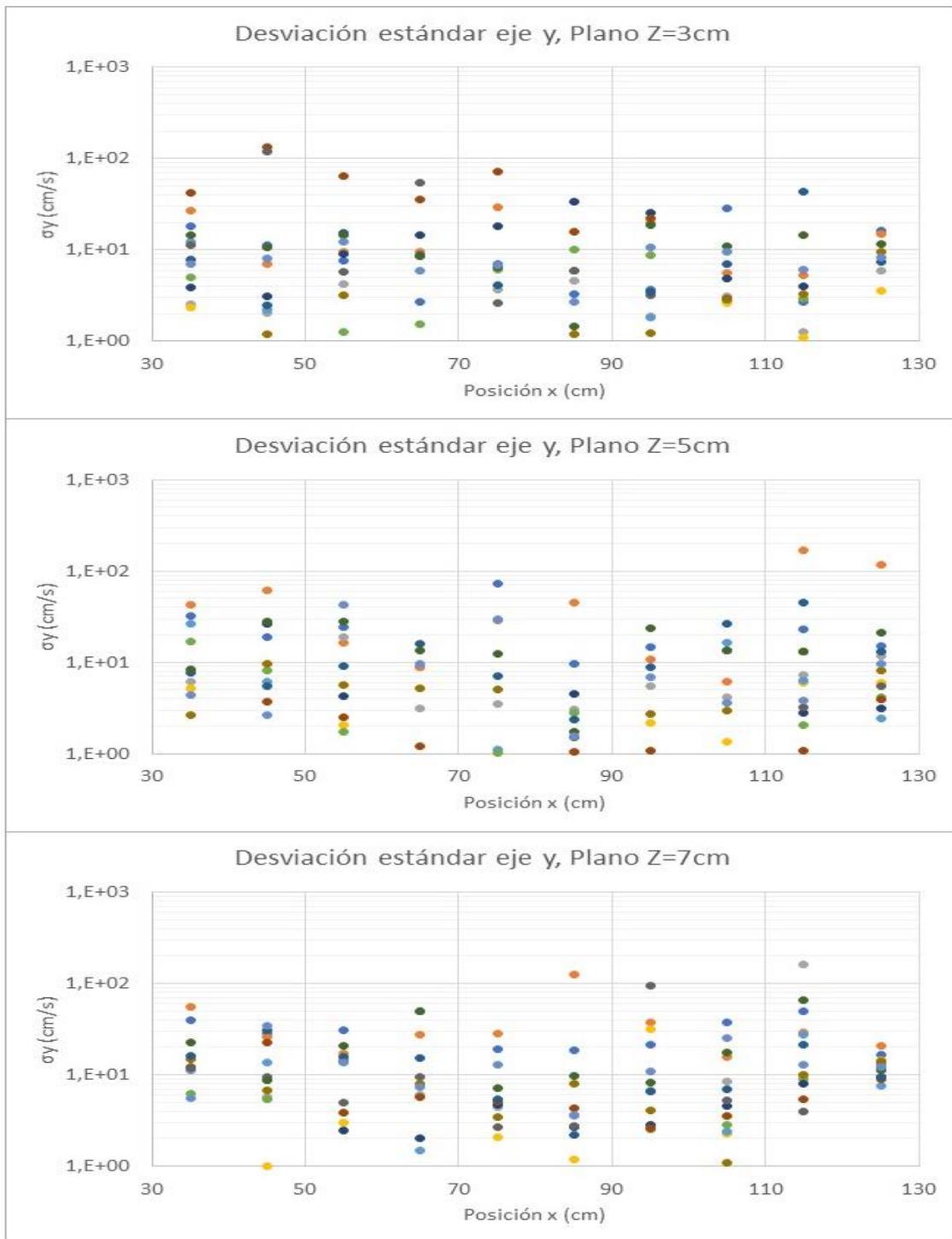


Figura 4-66 Desviación estándar (σ_y) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

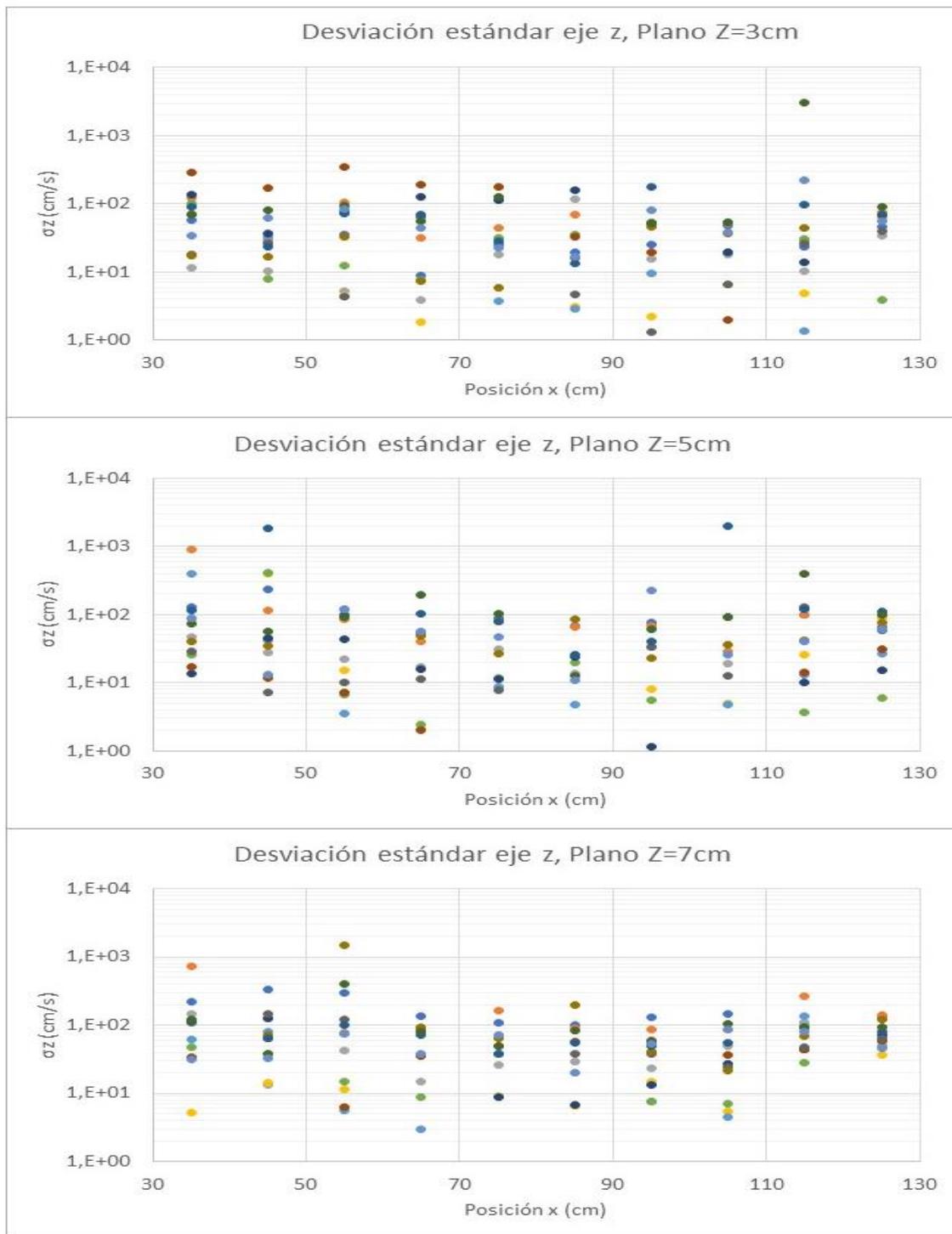


Figura 4-67 Desviación estándar (σ_z) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Skewness factor

En la Figura 4-68A. se observa que la curva correspondiente al plano Z superficial es positivamente sesgada mientras que en la Figura 4-68B. existe una anomalía debido a que no es posible observar todo el desarrollo del pico del plano Z superficial. En la Figura 4-69A. se observa que la curva correspondiente al plano Z intermedio es negativamente sesgada al que igual que la curva del plano Z inferior de la Figura 4-69B.

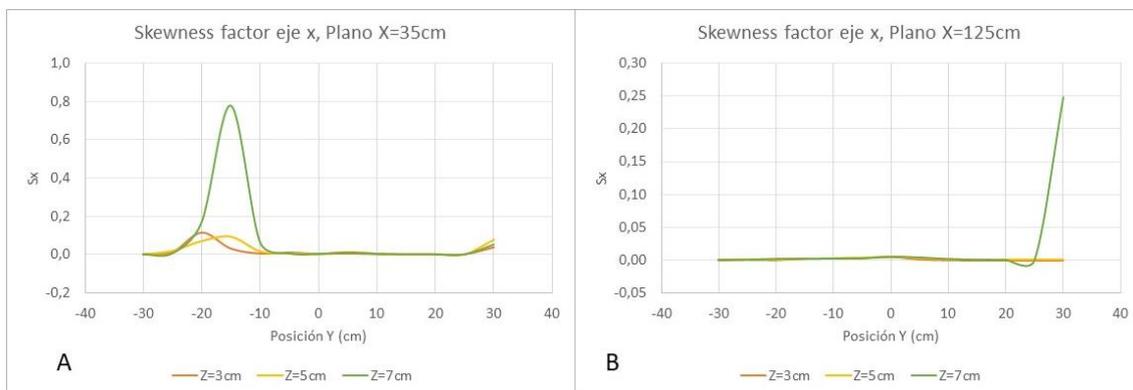


Figura 4-68 Skewness factor (S_x) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

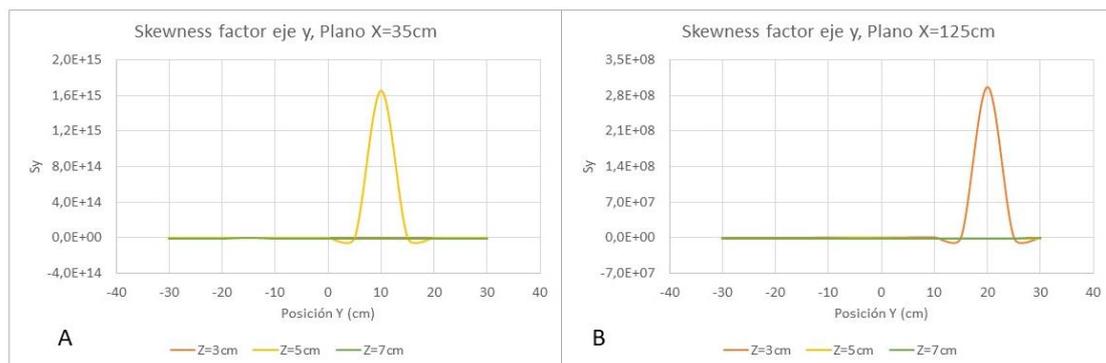


Figura 4-69 Skewness factor (S_y) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-70A. se observa que la curva correspondiente al plano Z superficial es normal mientras que en la Figura 4-70B. existe una anomalía

debido a que existen dos picos a cada lado del centro de la sección en el plano Z inferior.

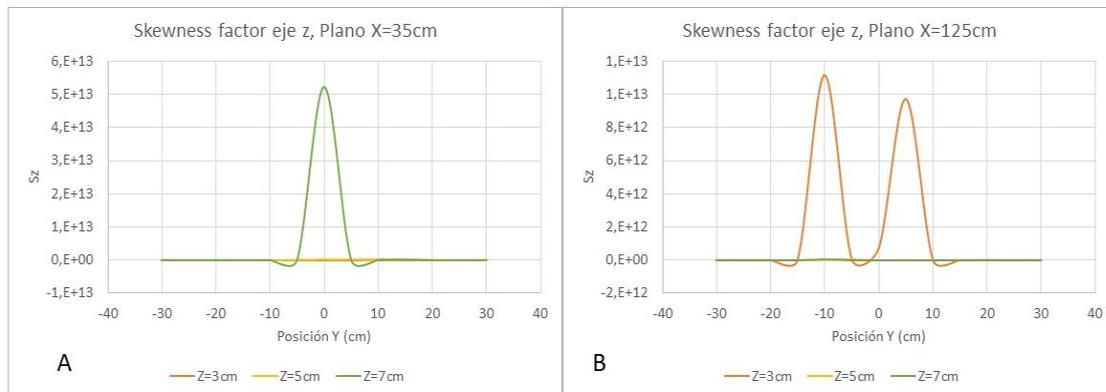


Figura 4-70 Skewness factor (S_z) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-71 muestra 3 picos en el plano $Z=3$; en $Y=30$ hay dos picos, uno con distribución positivamente sesgada (casi normal) y el otro pico ubicado a la derecha del centro haciéndolo negativamente sesgado además en $Y=-25$ hay un pico que indica que la curva es positivamente sesgada. Para el plano $Z=5$ hay dos picos correspondientes a $Y=30$ ambos negativamente sesgados. Finalmente, para el plano $Z=7$ en $Y=30$ hay dos picos casi del mismo tamaño, el primer pico negativamente sesgado y el segundo con distribución normal.

La Figura 4-72 muestra un pico en el plano $Z=3$ para $Y=15$ positivamente sesgada. En el plano $Z=5$ se observa que la curva $Y=-10$ es positivamente sesgada, por último, el plano $Z=7$ presenta una curva $Y=-15$ positivamente sesgada.

La Figura 4-73 muestra un pico en el plano $Z=3$ para $Y=-10$ Donde negativamente sesgada mientras que en el plano $Z=5$ se observa que la curva $Y=-15$ es positivamente sesgada y las curvas $Y=5$ y $Y=-5$ son negativamente sesgadas. Por último, el plano $Z=7$ presenta una curva $Y=-5$ que posee una distribución normal.

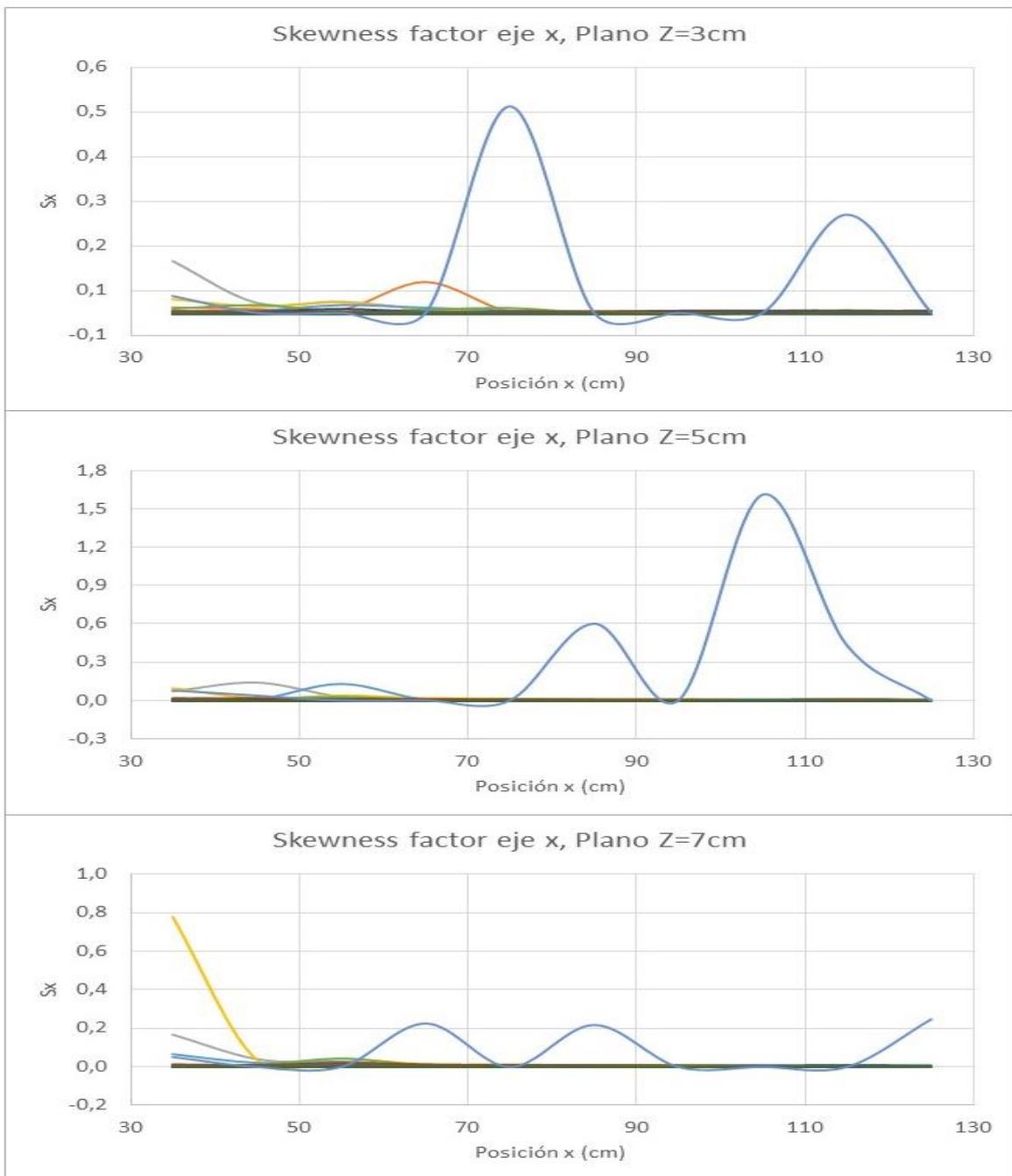


Figura 4-71 Skewness factor (S_x) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

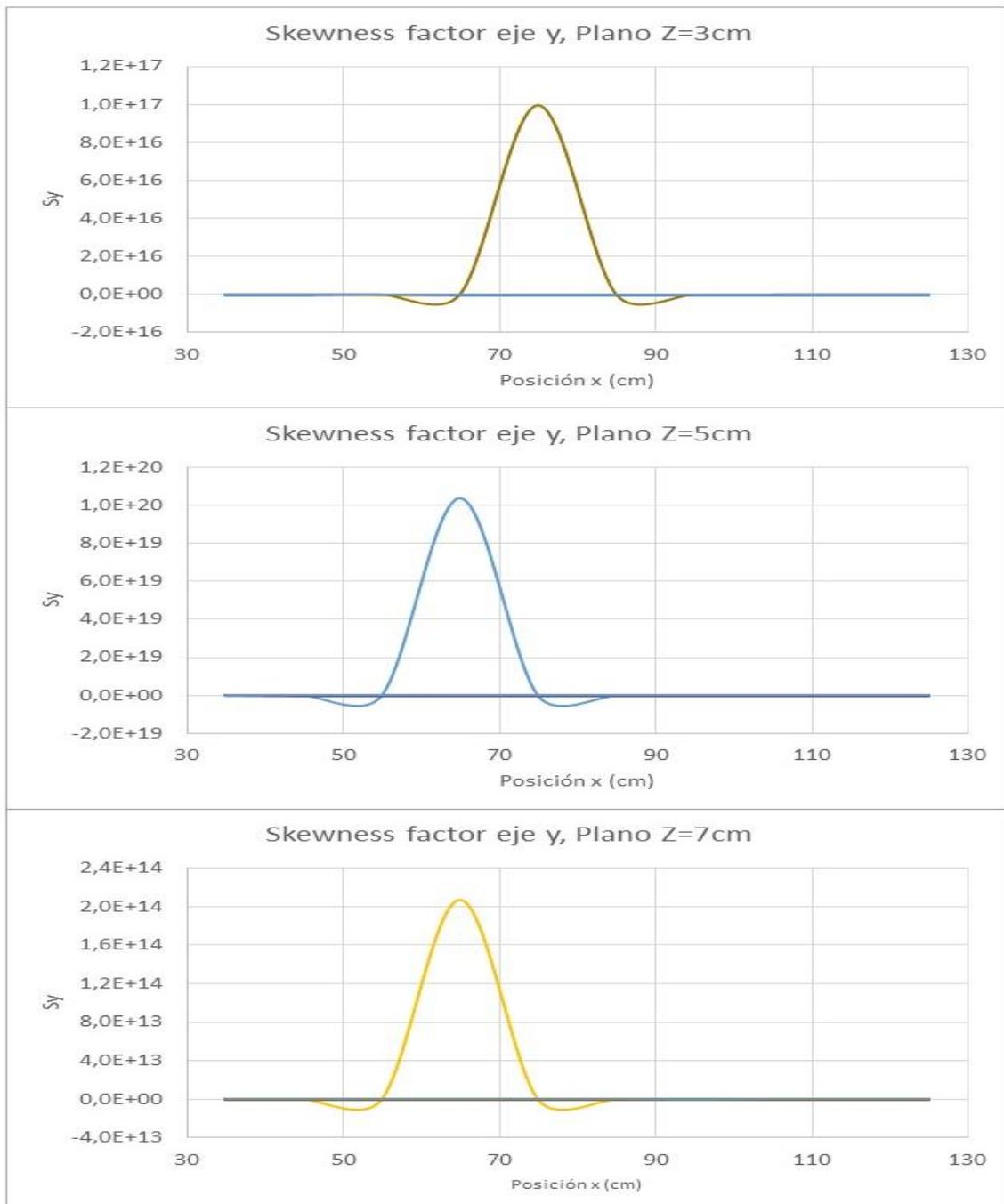


Figura 4-72 Skewness factor (S_y) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

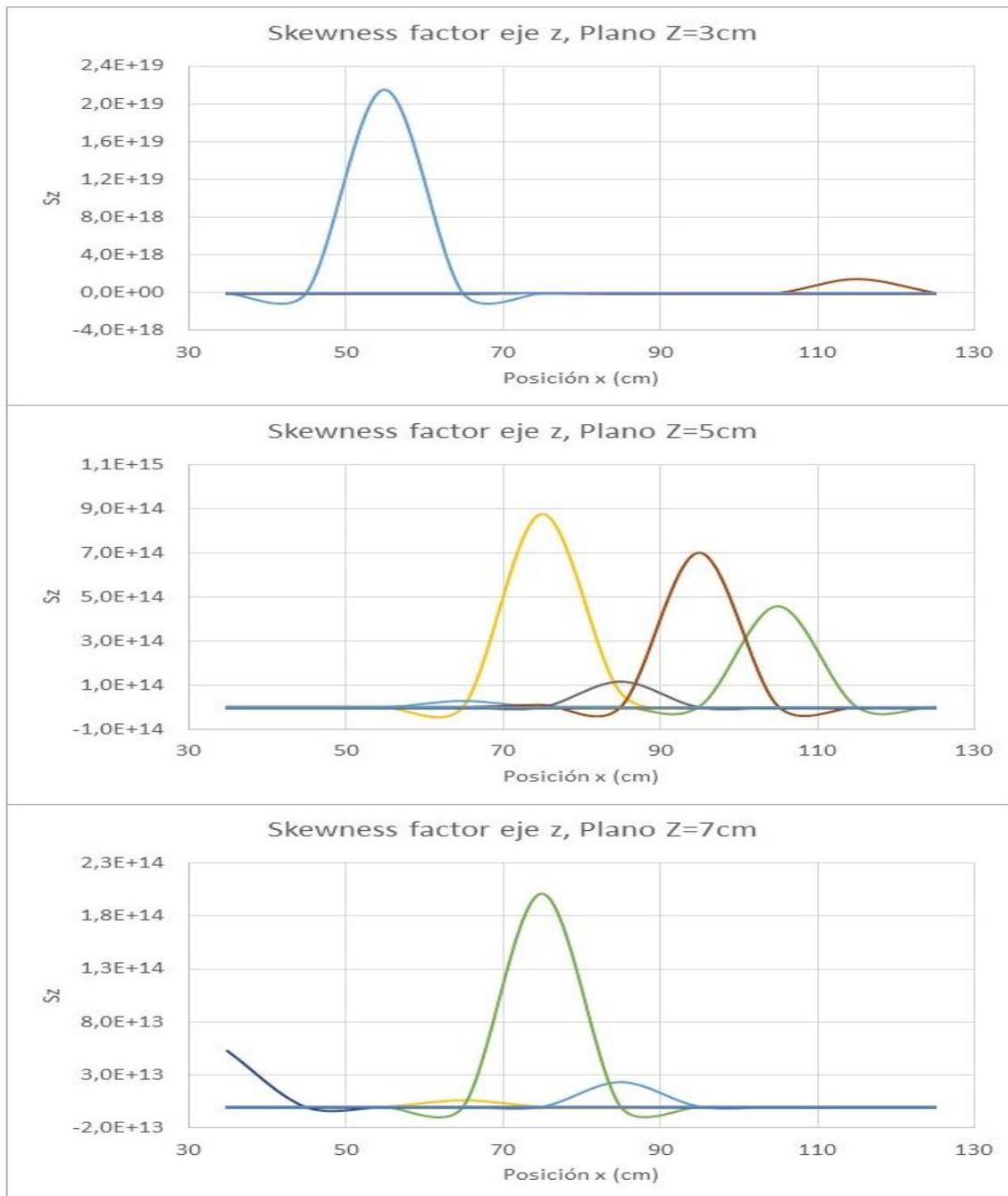


Figura 4-73 Skewness factor (S_z) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Kurtosis factor

En la Figura 4-74A. se observa que la curva correspondiente al plano Z superficial es Kurtosis positiva mientras que en la Figura 4-74B. ocurre lo mismo pero la curva no se desarrolla por completo.

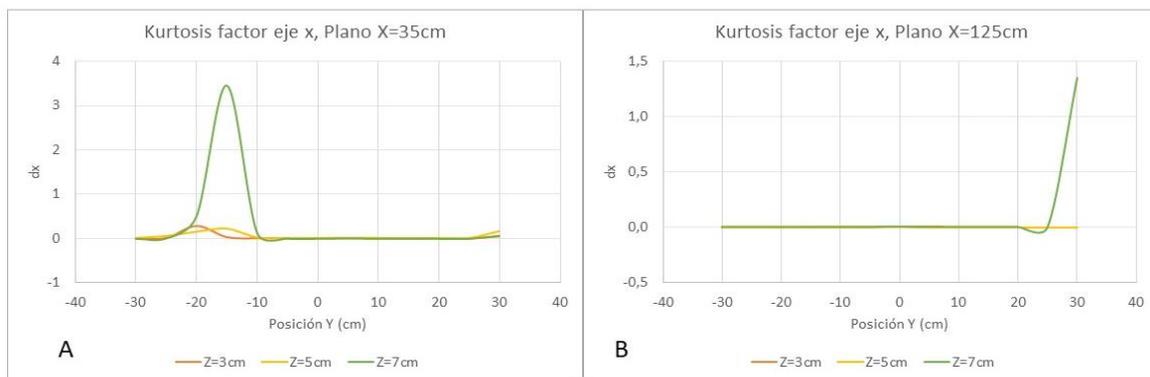


Figura 4-74 Kurtosis factor (d_x) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-75A. se observa que la curva correspondiente al plano Z intermedio es Kurtosis positiva al que igual que la curva del plano Z inferior de la Figura 4-75B.

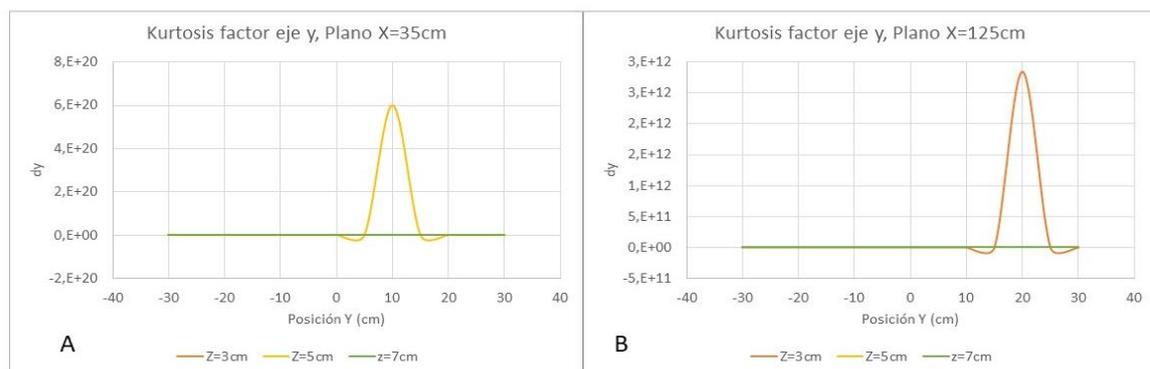


Figura 4-75 Kurtosis factor (d_y) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-76A. se observa que la curva correspondiente al plano Z superficial es Kurtosis positiva mientras que en la Figura 4-76B. la curva del plano Z inferior posee una anomalía al tener dos picos.

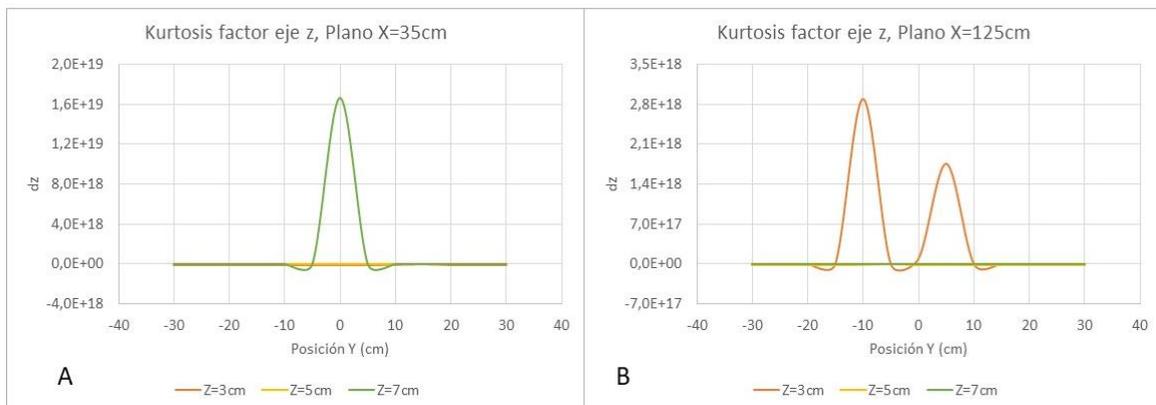


Figura 4-76 Kurtosis factor (d_z) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-77 muestra en los tres planos una incongruencia en la curva Y=30 que presenta dos picos en todos los casos.

La Figura 4-78 muestra un pico en el plano Z=3 en Y=15 Donde Kurtosis positiva. Para el plano Z=5 se observa que la curva Y=-10 también es Kurtosis positiva, por último, el plano Z=7 presenta una curva Y=-15 que es Kurtosis positiva.

La Figura 4-79 muestra un pico en el plano Z=3 para Y=-10 es Kurtosis positiva mientras que en el plano Z=5 se observa que la curva Y=-15 es Kurtosis positiva y para las curvas Y=5 y Y=-5 son Kurtosis negativas. Finalmente, en Z=7 la curva Y=-5 es Kurtosis positiva.

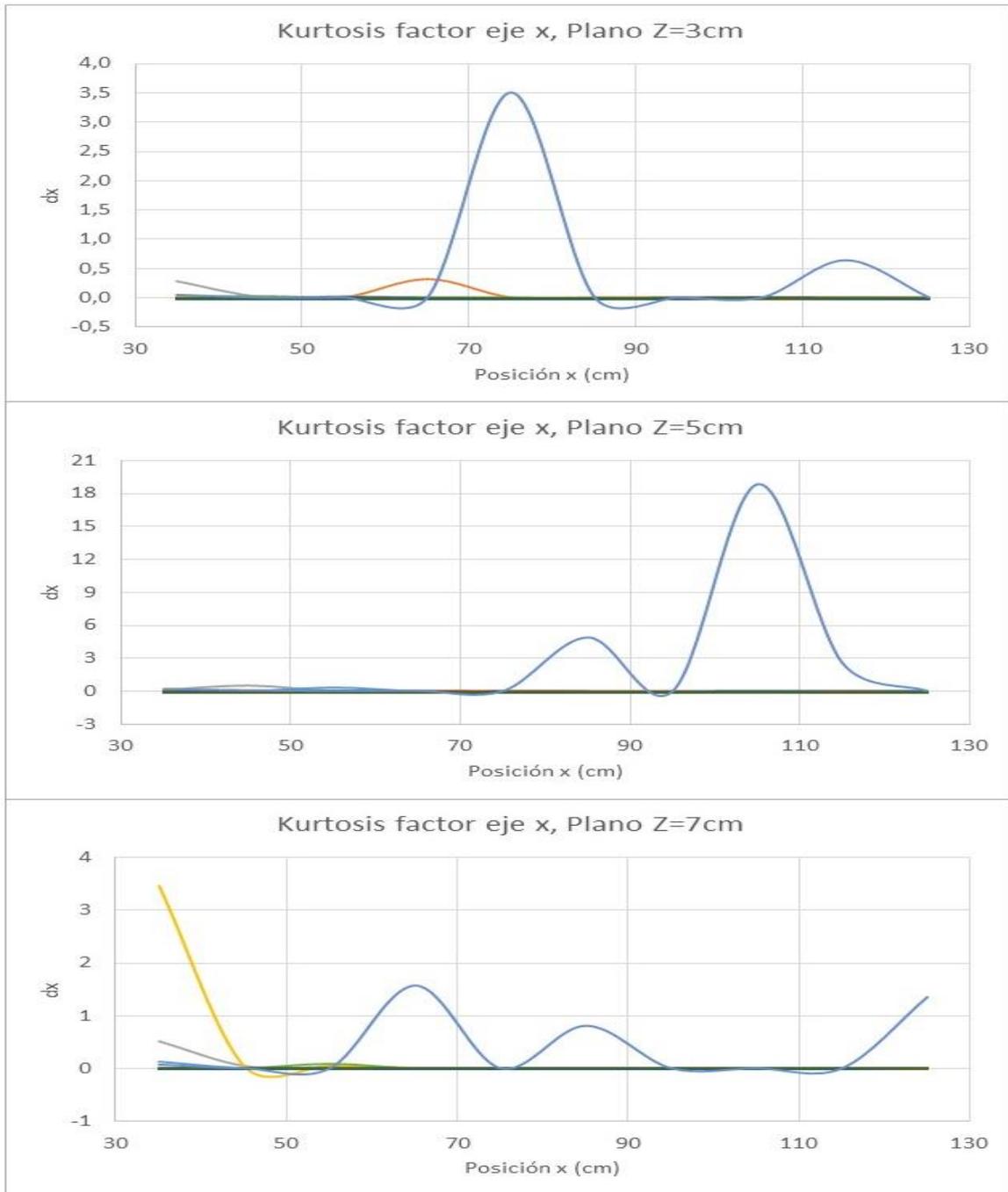


Figura 4-77 Kurtosis factor (d_x) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

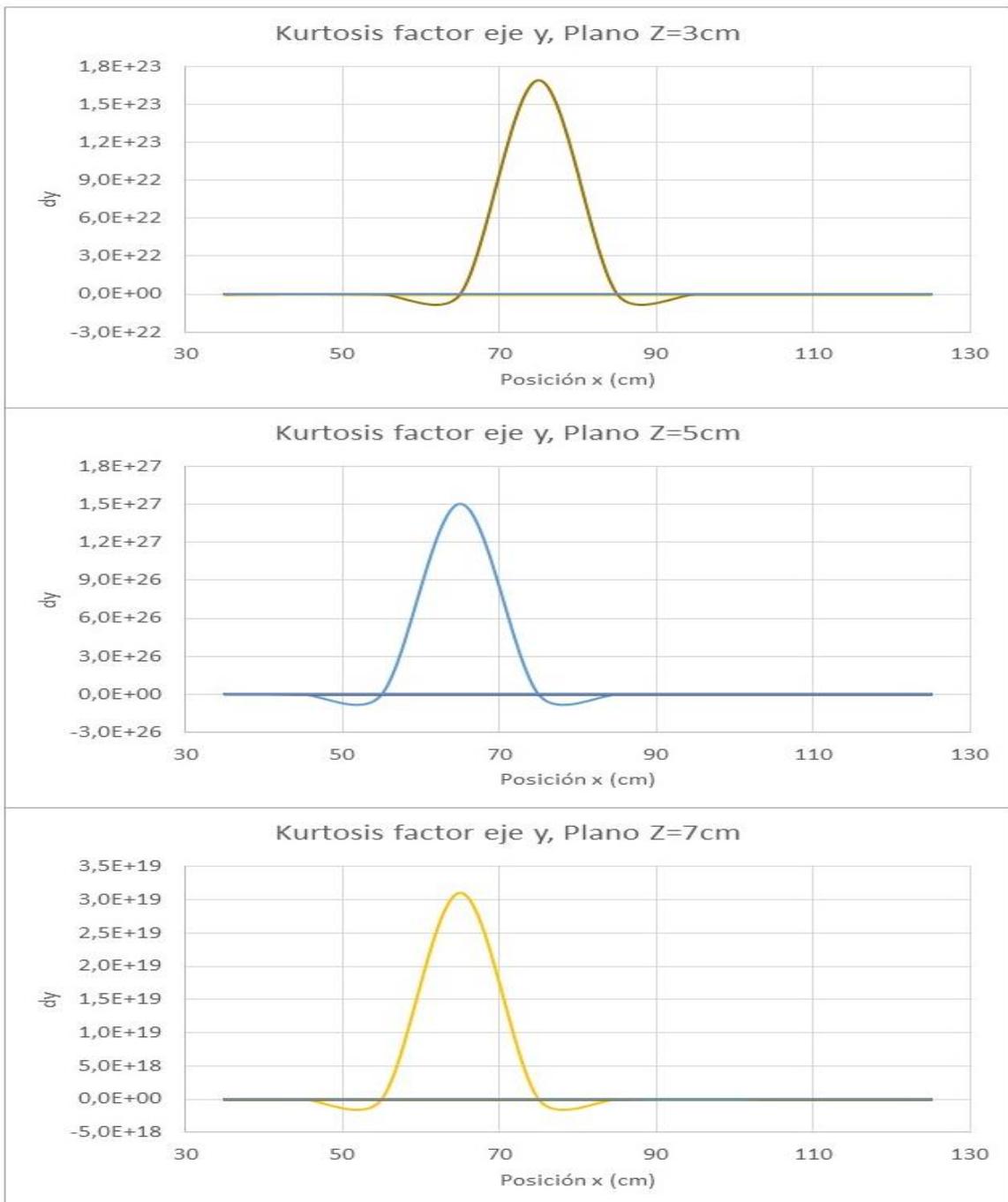


Figura 4-78 Kurtosis factor (d_y) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

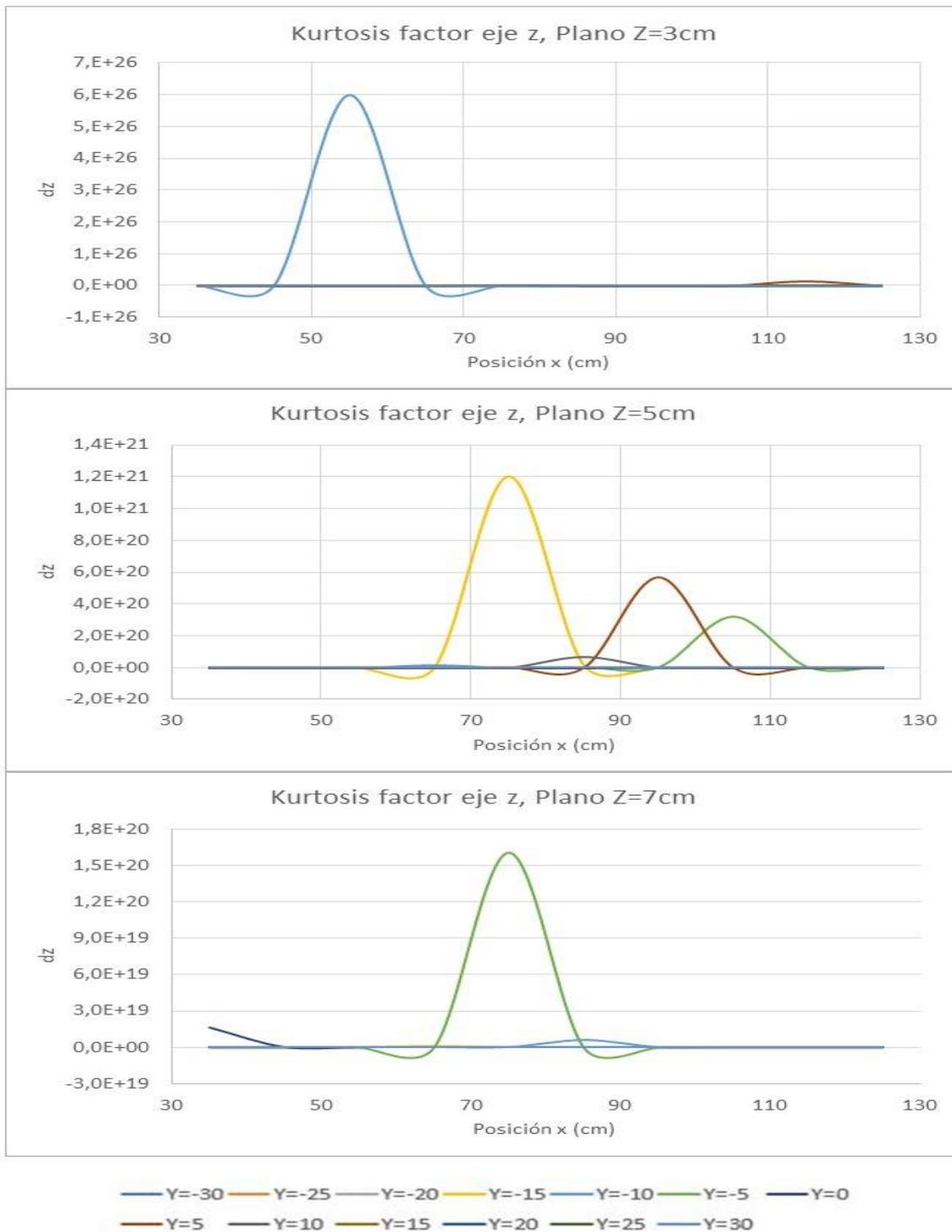


Figura 4-79 Kurtosis factor (dz) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tensiones de Reynolds

En la Figura 4-80A. se observa que la variación de la Tensión de Reynolds normal (ζ_{xx}) en los planos Z medidos que ocurre en un rango bastante amplio, además las curvas se observan distanciadas entre sí en el margen izquierdo y juntas en el margen derecho mientras en la Figura 4-80B. existe un valor extraordinario en el eje Z superficial y todas las curvas están juntas siguiendo una misma tendencia, además todas las tensiones son positivas.

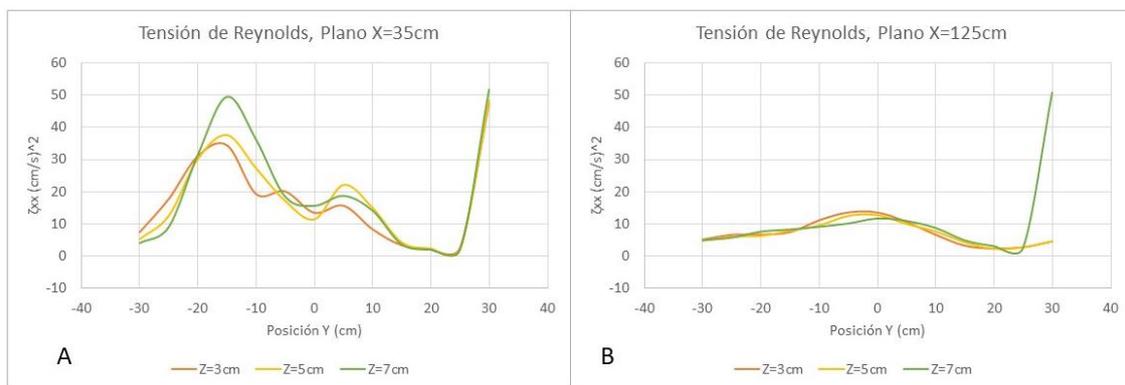


Figura 4-80 Tensión de Reynolds (ζ_{xx}) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-81A. se observa que la variación de la Tensión de Reynolds normal (ζ_{yy}) en los planos Z medidos que ocurre en un rango bastante amplio, además las tres curvas tienen una misma forma con cierta distancia entre sí mientras que en la Figura 4-81B. el rango es menor y se muestran las tres curvas más cercanas entre sí y con una misma tendencia, además todas las tensiones son positivas.

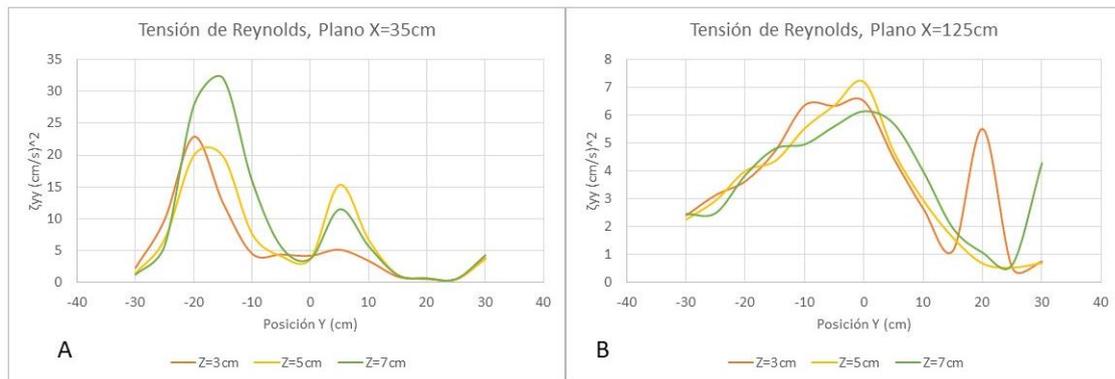


Figura 4-81 Tensión de Reynolds (ζ_{yy}) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-82A. se observa que la variación de la Tensión de Reynolds normal (ζ_{zz}) en los planos Z medidos, a diferencia de los casos anteriores existe un mayor rango de valores en la Figura 4-82B. En cuanto a la tendencia, ambas figuras carecen de constancia y todas las curvas resultan de cierto modo “caóticas”, además todas las tensiones son positivas.

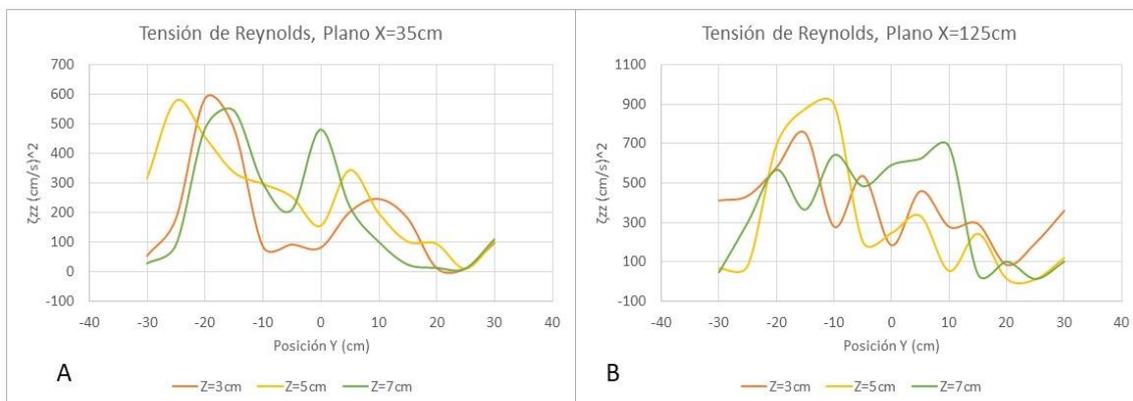


Figura 4-82 Tensión de Reynolds (ζ_{zz}) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-83A. se observa que la variación de la Tensión de Reynolds tangencial (ζ_{xy}) en los planos Z medidos adquiere tanto un máximo como un mínimo en el plano Z superficial mientras que en la Figura 4-83B las tres curvas

tienen una misma forma y tendencia a excepción del valor extraordinario del plano Z superficial en la margen derecha, además las tensiones son tanto positivas como negativas.

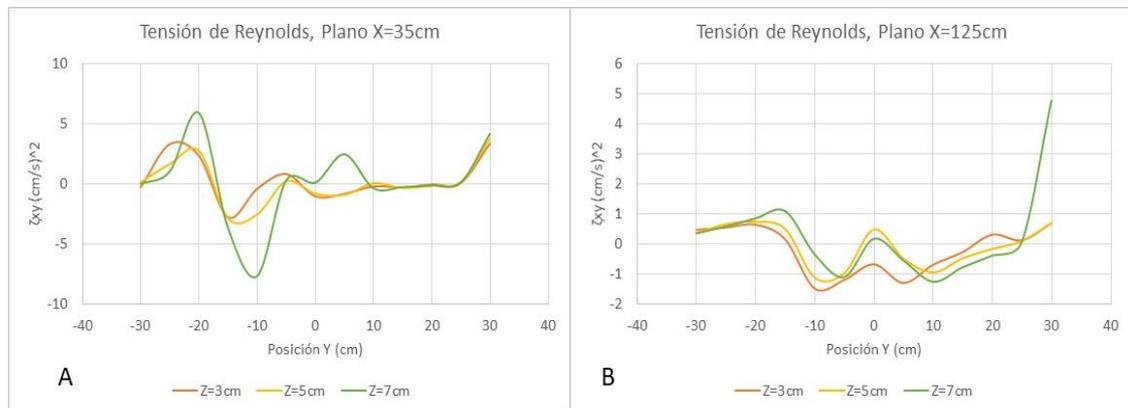


Figura 4-83 Tensión de Reynolds (ζ_{xy}) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-84A. se observa que la variación de la Tensión de Reynolds tangencial (ζ_{yz}) en los planos Z medidos adquiere un valor mínimo notable en el plano Z superficial mientras que en la Figura 4-84B. las tres curvas tienen una misma forma y tendencia, además todas las tensiones son negativas.

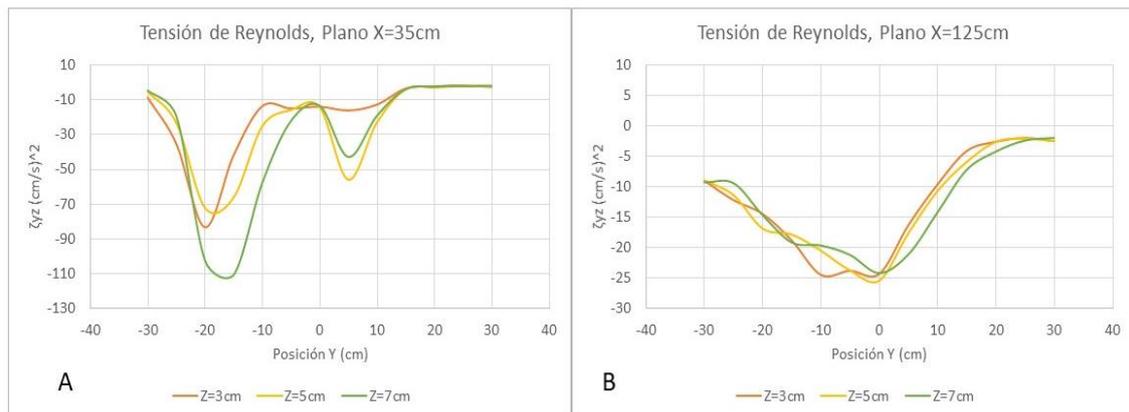


Figura 4-84 Tensión de Reynolds (ζ_{yz}) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura 4-85 se observa que la variación de la Tensión de Reynolds tangencial (ζ_{yz}) en los planos Z medidos sigue una tendencia similar en cuanto a la cantidad de picos y valles con cierto desfase entre sí y tienden a acercarse en el margen derecho, además las tensiones son tanto positivas como negativas.

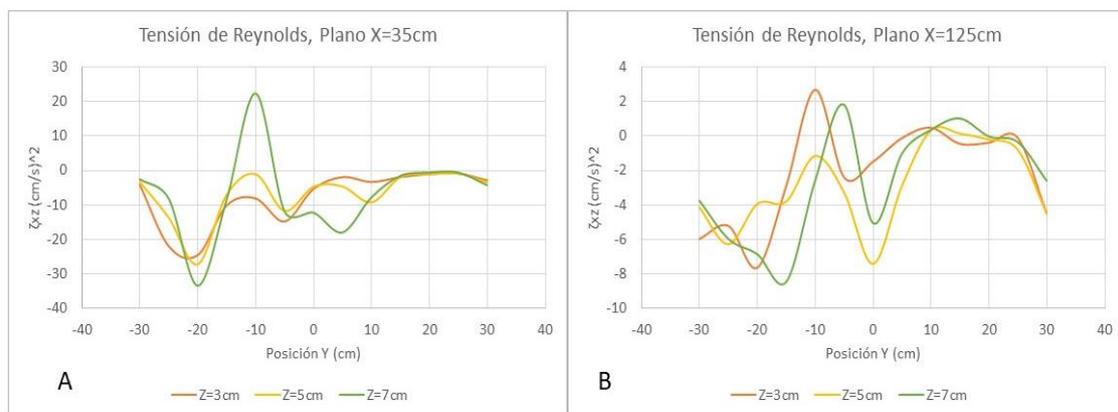


Figura 4-85 Tensión de Reynolds (ζ_{xz}) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Las Figuras 4-86, 4-87 y 4-88 indican la variación de los esfuerzos normales en dirección del eje X, Y, Z respectivamente y su desarrollo a lo largo de la sección de control, Donde los valores más altos los que se encuentran en la

cercanía de la pila, desde $X= 35$ hasta $X= 55$. Debido a que están en función del cuadrado de las velocidades fluctuantes (u'_x , u'_y , u'_z) las curvas no solo son similares a las de la velocidad, sino que son siempre positivas.

Caso contrario, las Figuras 4-89, 4-90 y 4-91 indican la variación de los esfuerzos tangenciales y su desarrollo a lo largo de la sección de control que, al resultar de la combinación de las velocidades fluctuantes las curvas poseen coordenadas tanto positivas como negativas en el eje de las ordenadas.

Es importante también reconocer que todas las gráficas poseen una misma tendencia al acercarse al final de la sección de control, esto es, los valores se acercan a cero.

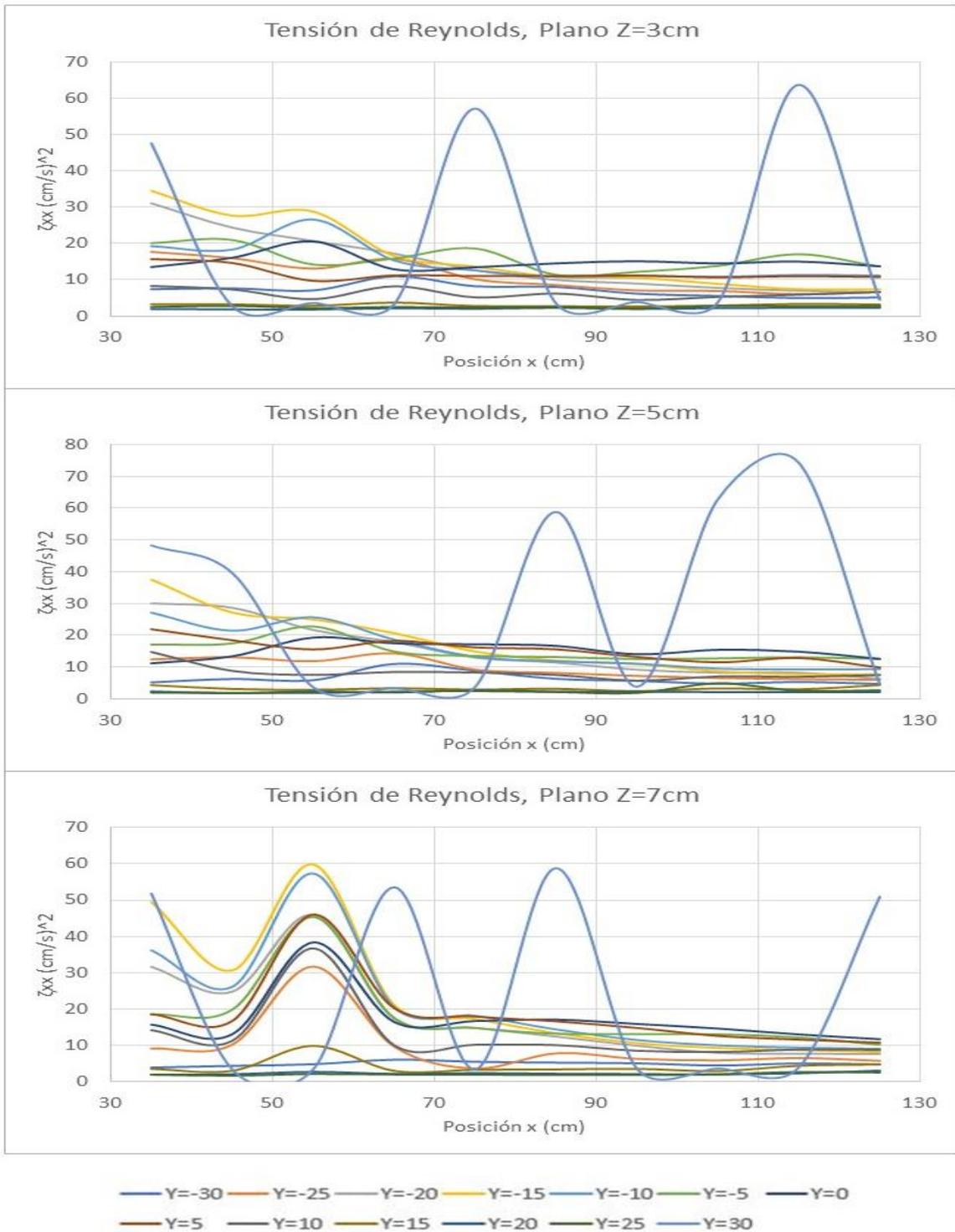


Figura 4-86 Tensión de Reynolds (ζ_{xx}) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

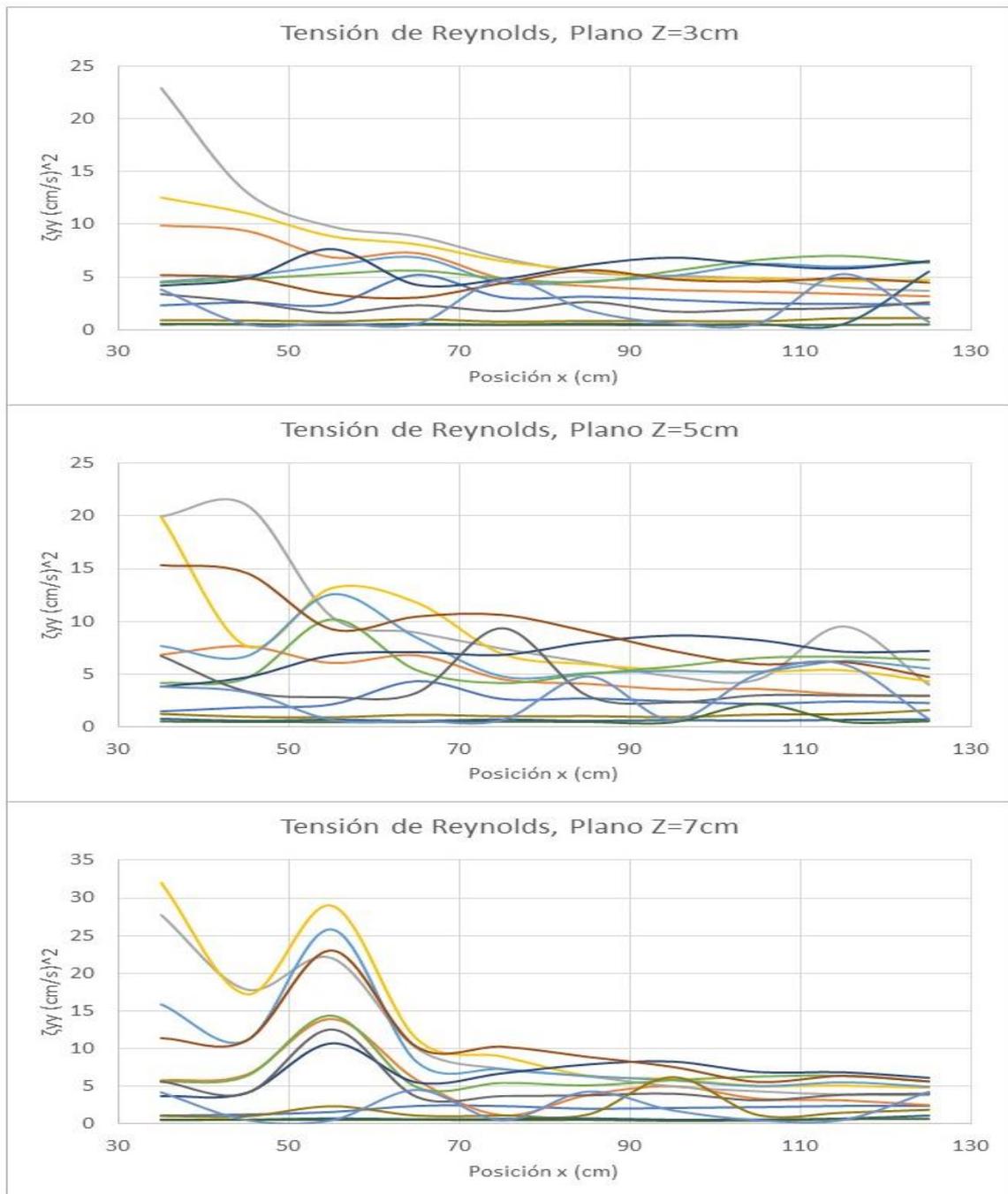


Figura 4-87 Tensión de Reynolds (ζ_{yy}) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

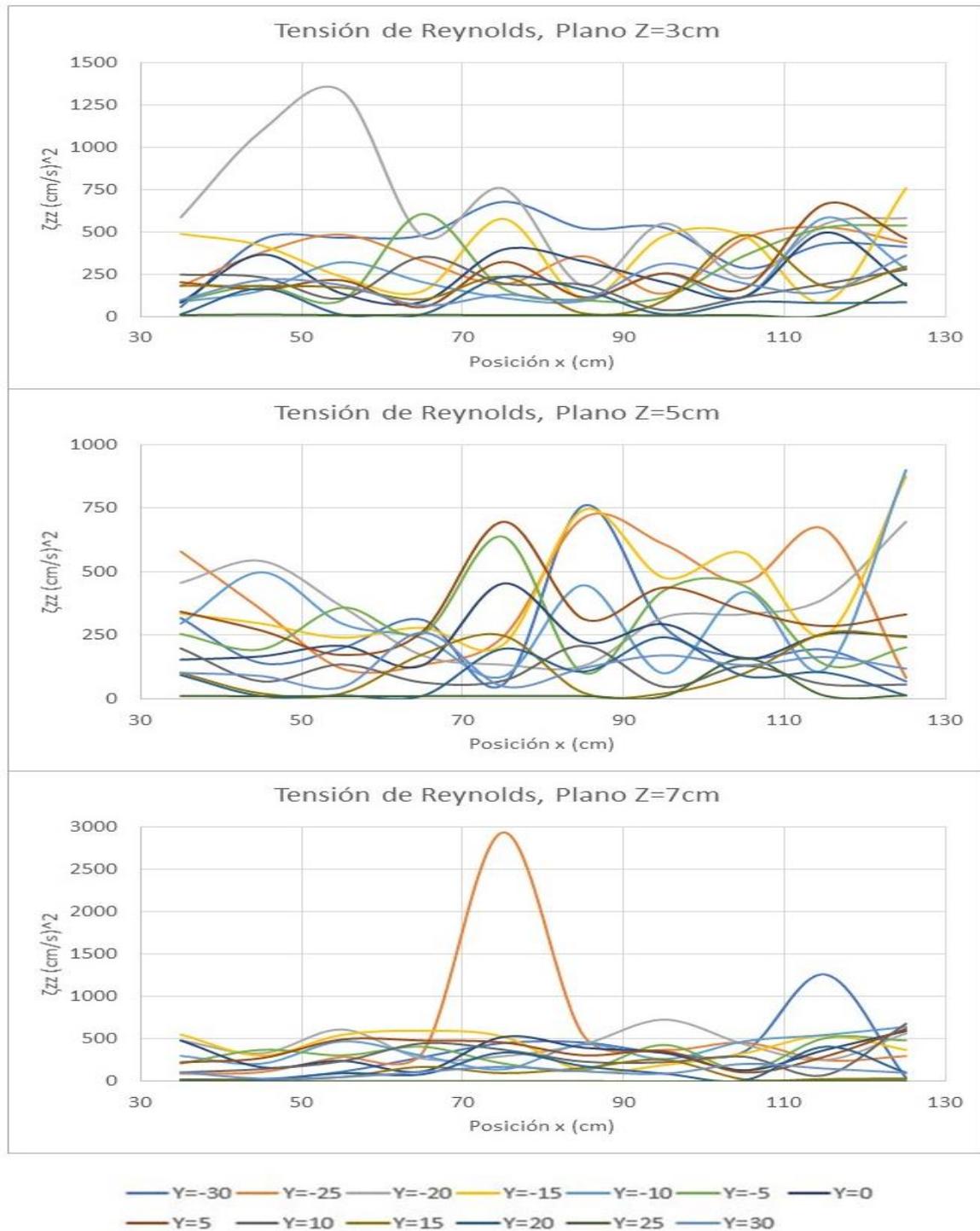


Figura 4-88 Tensión de Reynolds (ζ_{zz}) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

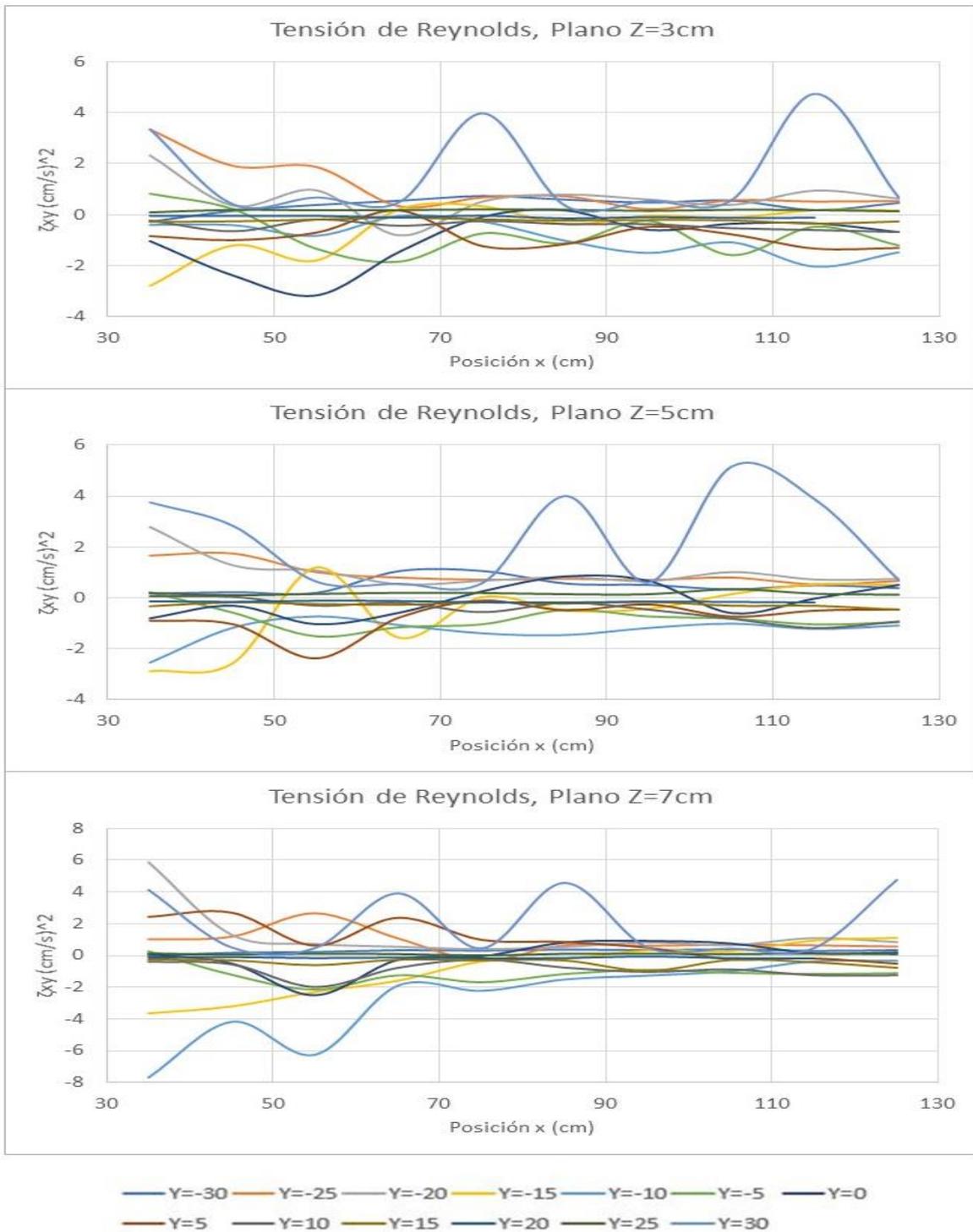


Figura 4-89 Tensión de Reynolds (ζ_{xy}) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

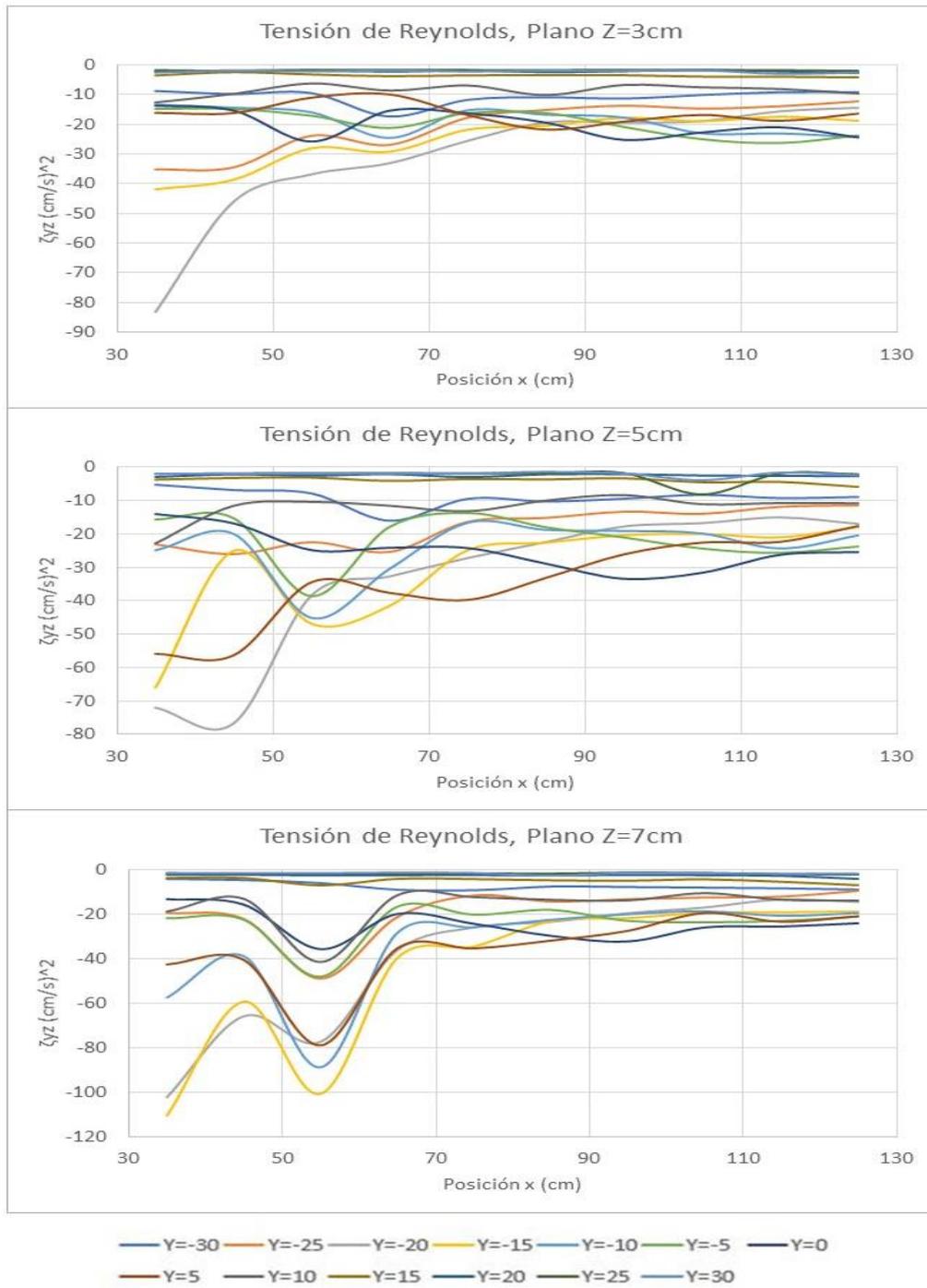


Figura 4-90 Tensión de Reynolds (ζ_{yz}) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

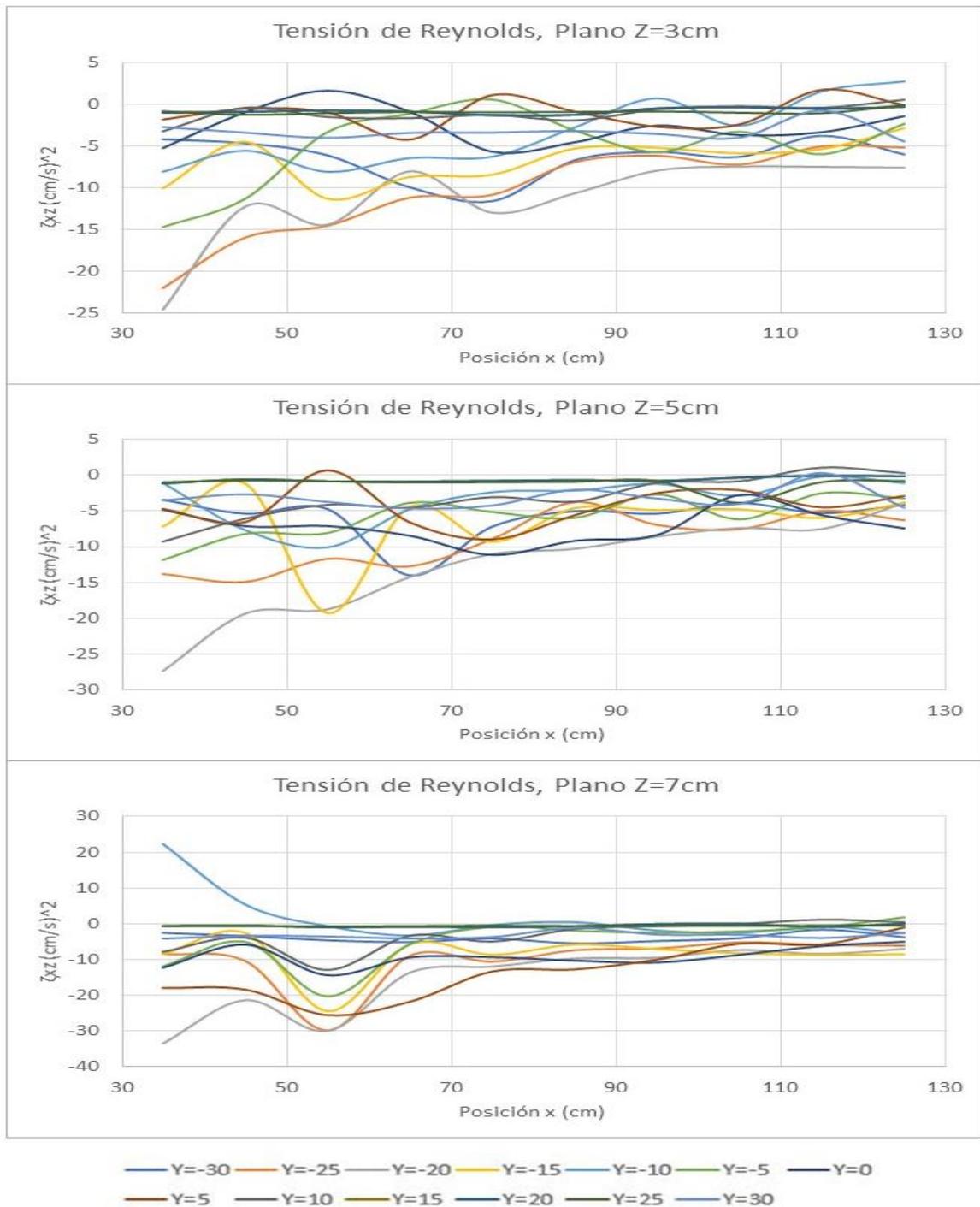


Figura 4-91 Tensión de Reynolds (ζ_{xz}) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Intensidad turbulenta

En la Figura-4-92A. se puede observar que la intensidad turbulenta (TI_x) supera el 20% demostrando una alta turbulencia en los extremos del canal mientras que en la Figura 4-92B. las curvas se mantienen por debajo del 15% lo que demuestra que existe una disipación de energía a lo largo de la sección de control.

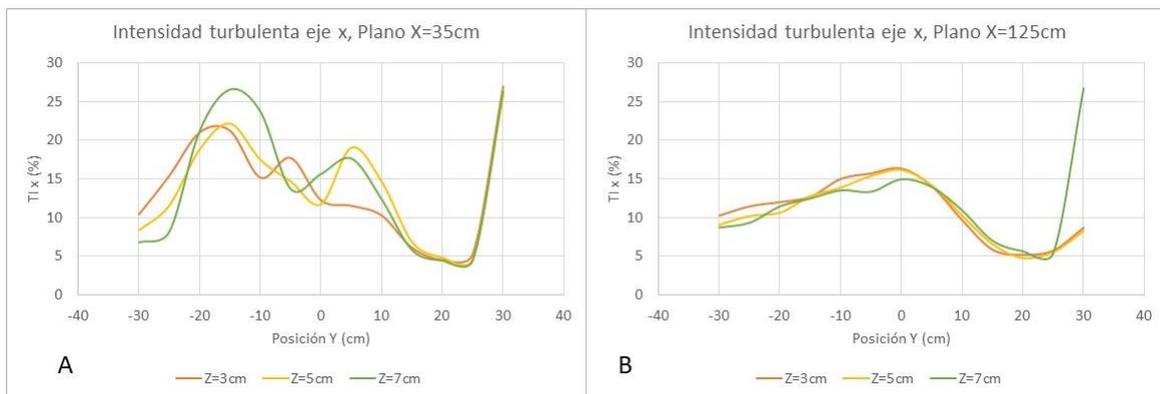


Figura 4-92 Intensidad turbulenta (TI_x) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura-4-93A. se puede observar que la intensidad turbulenta (TI_y) no supera el 20%, aun así, posee alta turbulencia en la margen izquierda del canal mientras que en la Figura 4-93B. las curvas se mantienen por debajo del 10% lo que demuestra que existe una disipación de energía a lo largo de la sección de control.

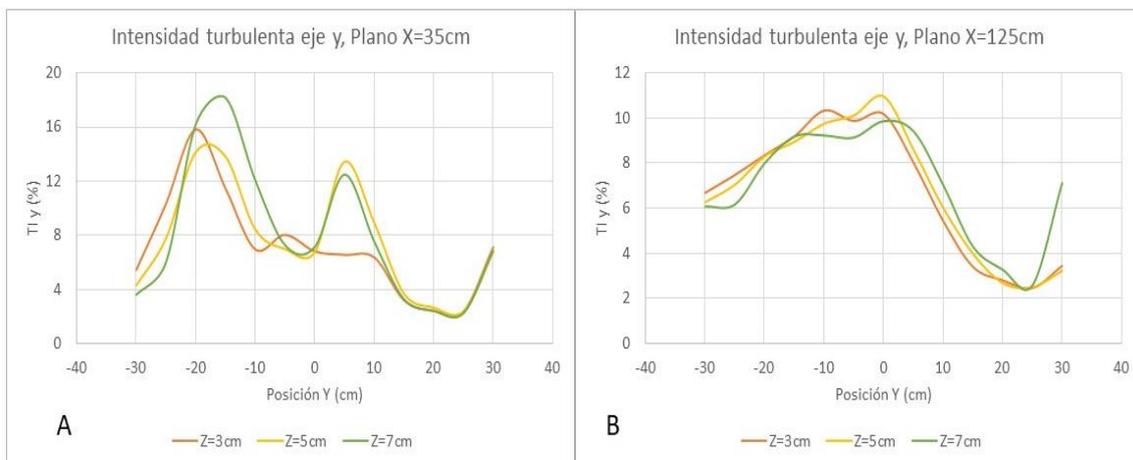


Figura 4-93 Intensidad turbulenta (TI_y) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

En la Figura-4-94 se puede observar que la intensidad turbulenta (TI_z) tiene una distribución muy parecida a TI_y pero en un rango mucho más grande llegando incluso a superar el 50%.

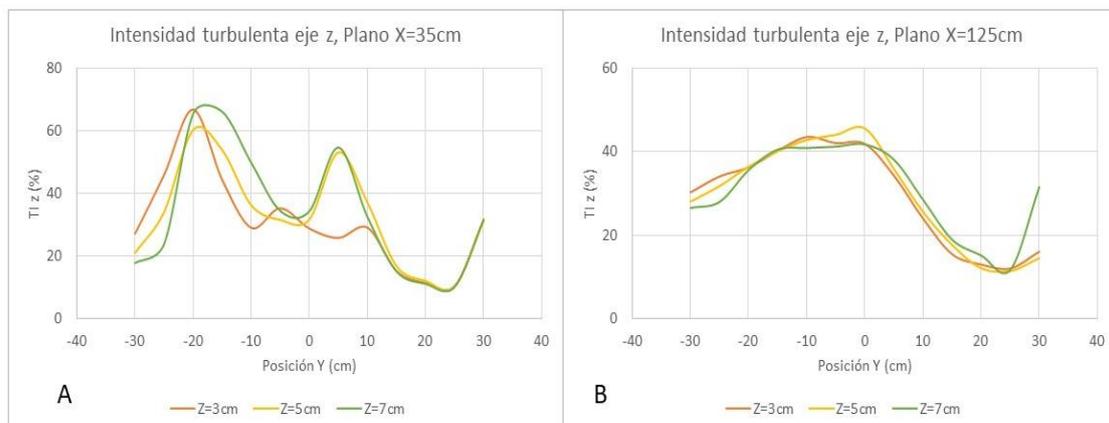


Figura 4-94 Intensidad turbulenta (TI_z) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-95 indica la relación entre la velocidad fluctuante (u') y la velocidad media (U) en dirección X, expresada en porcentaje. Esta relación, al igual que las velocidades instantáneas tiende a ser periódica y a estar en pares de curva

de igual Y , pero con signo contrario. Las curvas tienden a volverse paralelas y planas a medida que se alejan del origen. Para los tres planos Z el rango de intensidad fluctúa entre 5 y 25%, Donde la curva $Y=30$ la única curva que varía entre 5 y 30% en los tres planos.

La Figura 4-96 indica la relación entre la velocidad fluctuante (u') y la velocidad media (U) en dirección Y , expresado en porcentaje. Todos los planos son similares con rangos de intensidad no mayores a 17%.

La Figura 4-97 indica la relación entre la velocidad fluctuante (u') y la velocidad media (U) en dirección Z , expresado en porcentaje. Todos los planos son similares con intensidad no mayor a 70%.

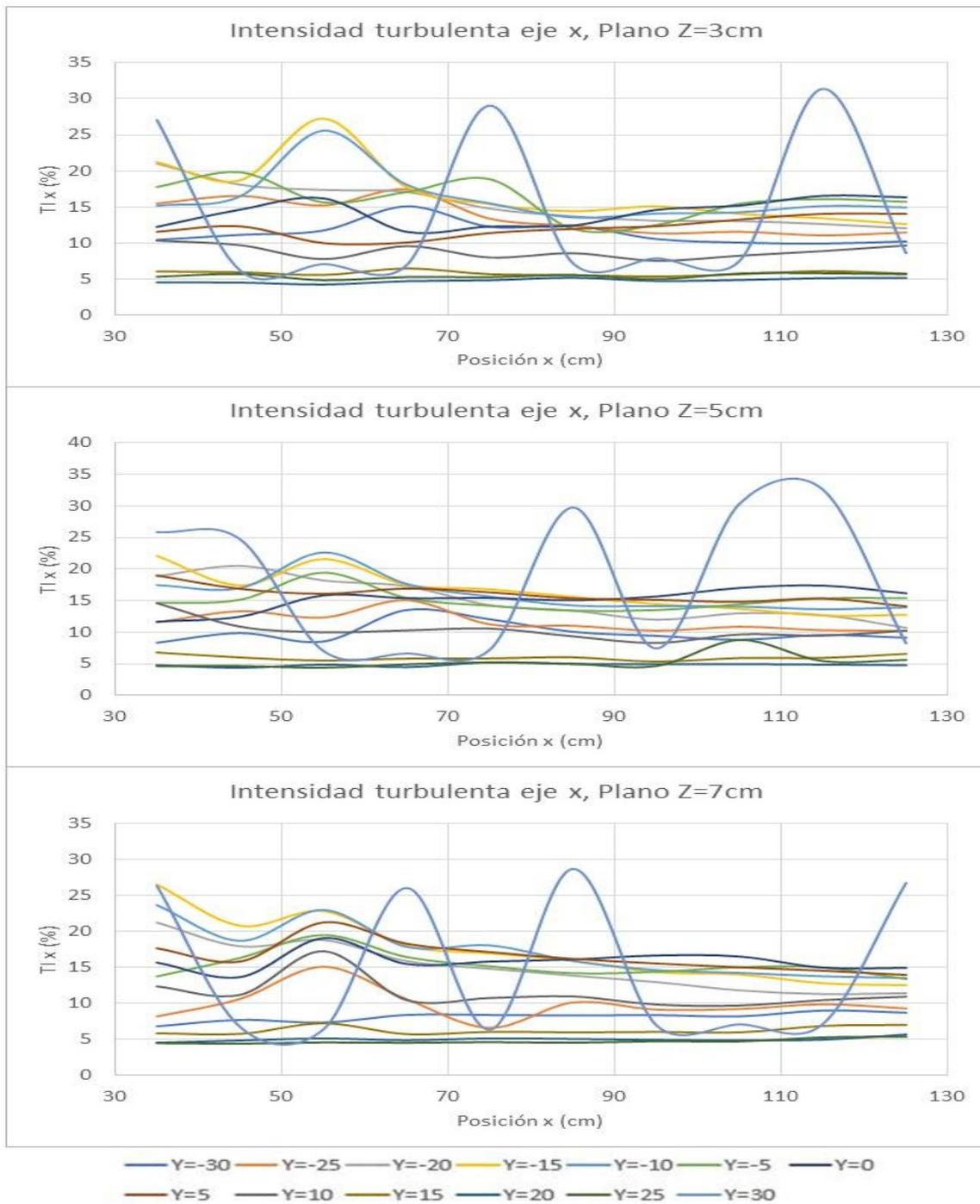


Figura 4-95 Intensidad turbulenta (TI_x) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

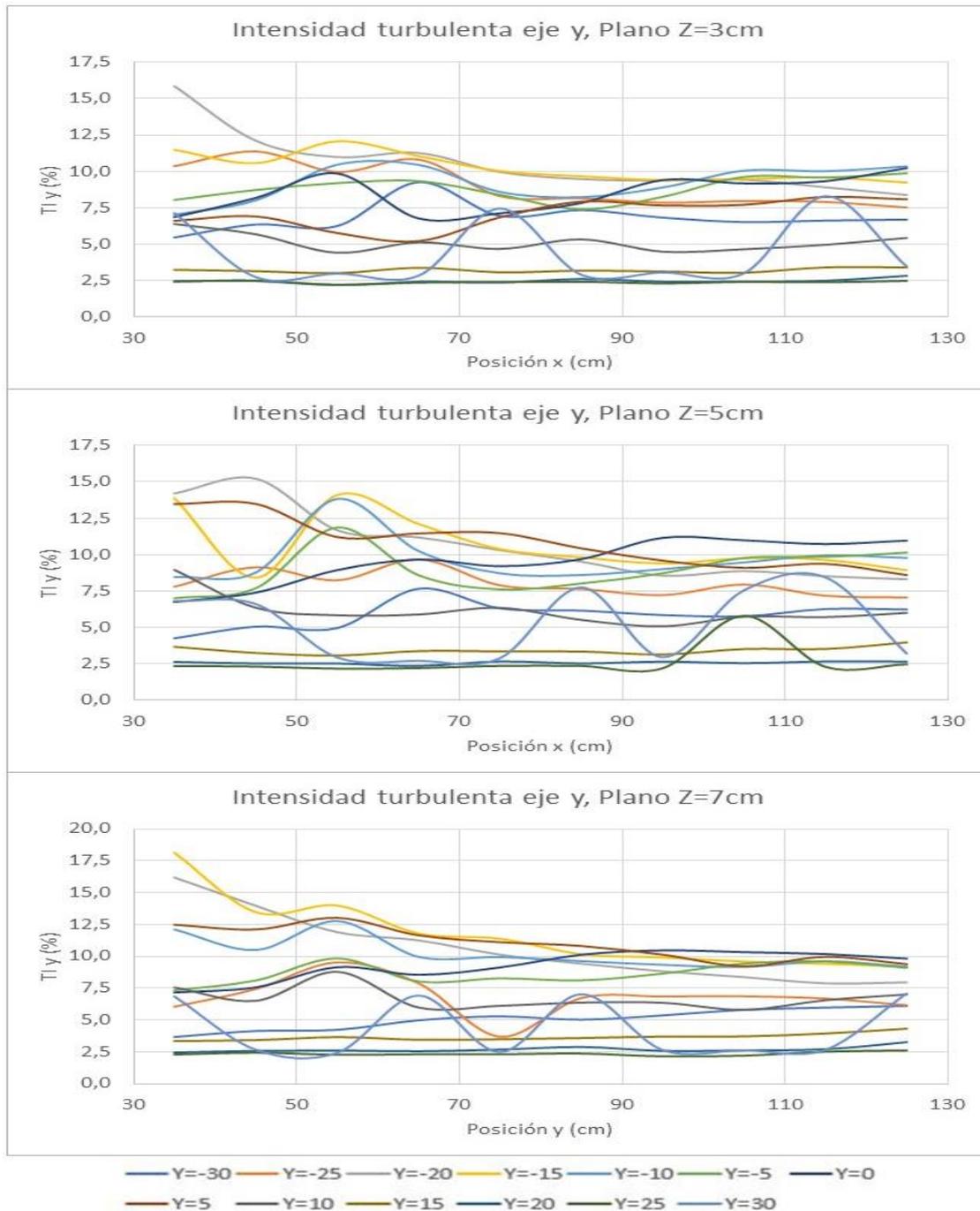


Figura 4-96 Intensidad turbulenta (TI_y) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

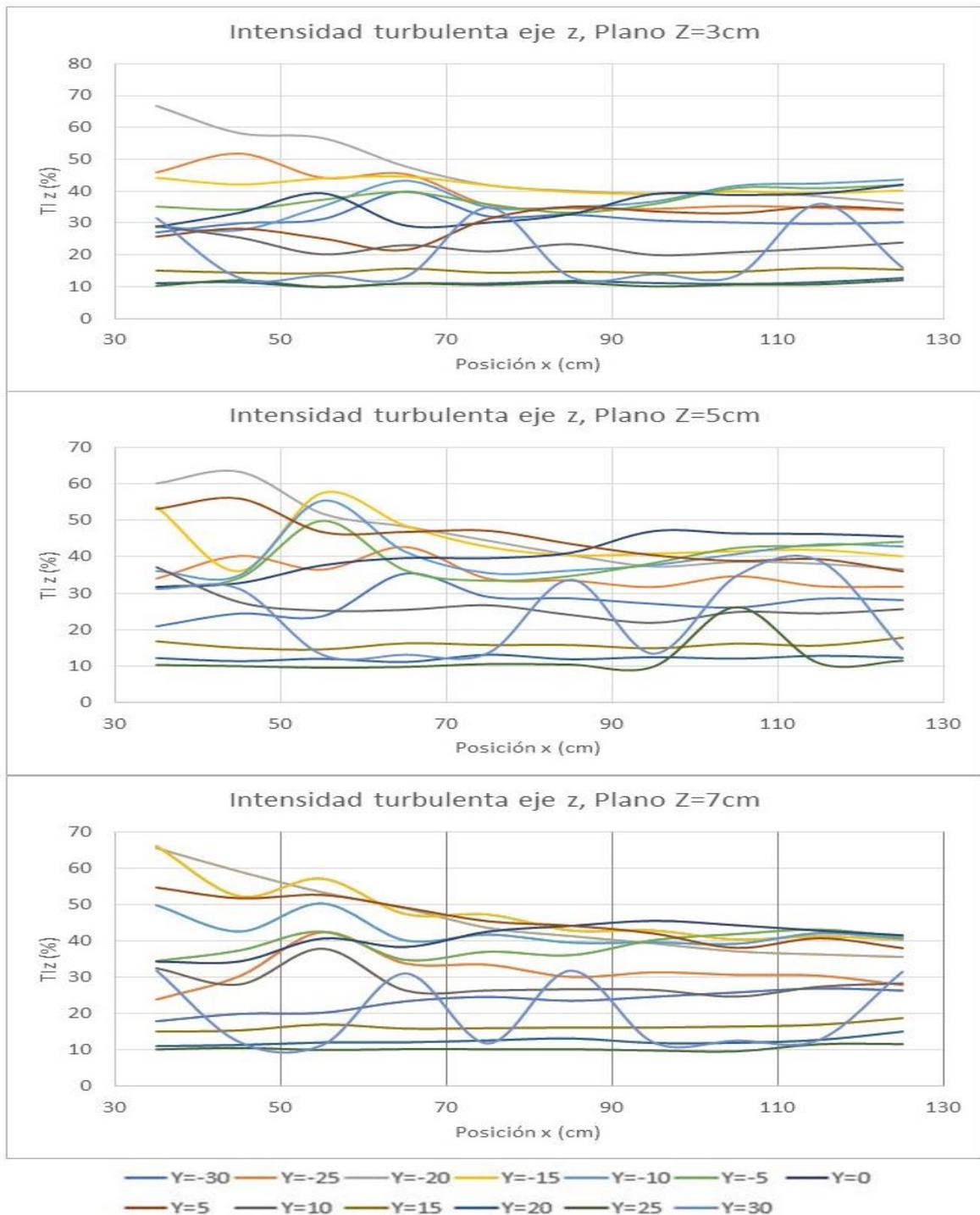


Figura 4-97 Intensidad turbulenta (TI_z) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Energía cinética y disipación turbulenta

En la Figura 4-98A. se observa que los picos en la energía cinética ocurren en todos los planos en el lado negativo del eje Y mientras que en la Figura 4-98B. el pico máximo ocurre en el plano intermedio. En la Figura 4-99A. la disipación turbulenta toma sus máximos valores del lado positivo del eje Y en la misma posición para los tres planos al igual que en la Figura 4-99B.

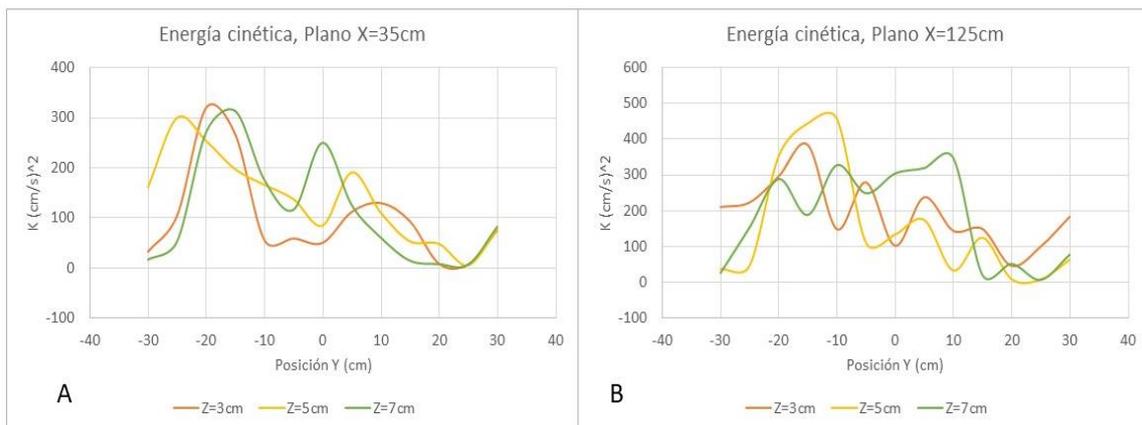


Figura 4-98 Energía cinética (k) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

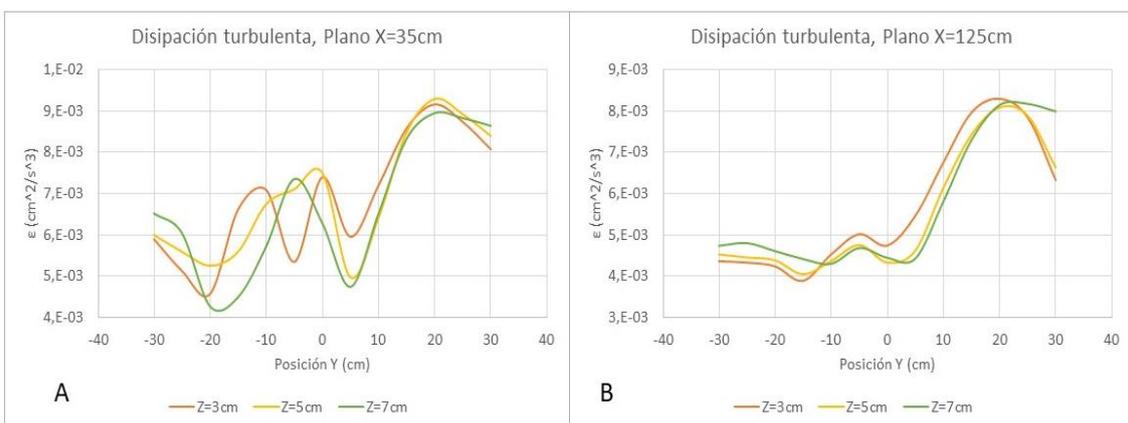
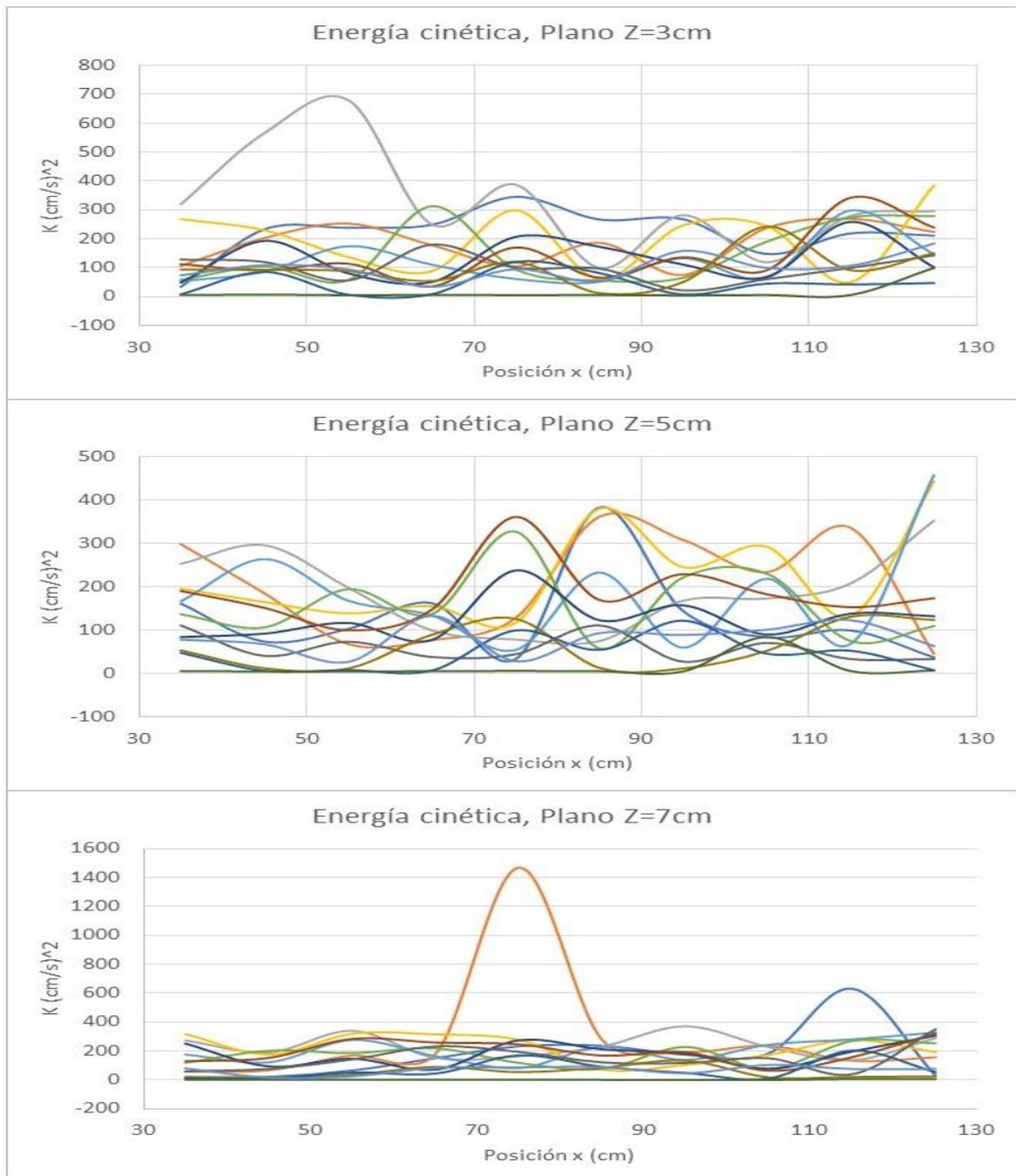


Figura 4-99 Disipación turbulenta (ϵ) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

La Figura 4-100 muestra que los rangos de energía que tiene el flujo en los tres planos medidos se mantienen constante en los puntos ubicados al final de la sección de control.

La Figura 4-101 indica la disipación turbulenta que es una función de la velocidad instantánea u_x , razón por la cual las curvas tienen la misma tendencia que la observada en esta velocidad.



— Y=-30 — Y=-25 — Y=-20 — Y=-15 — Y=-10 — Y=-5 — Y=0
 — Y=5 — Y=10 — Y=15 — Y=20 — Y=25 — Y=30

Figura 4-100 Energía cinética (k) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

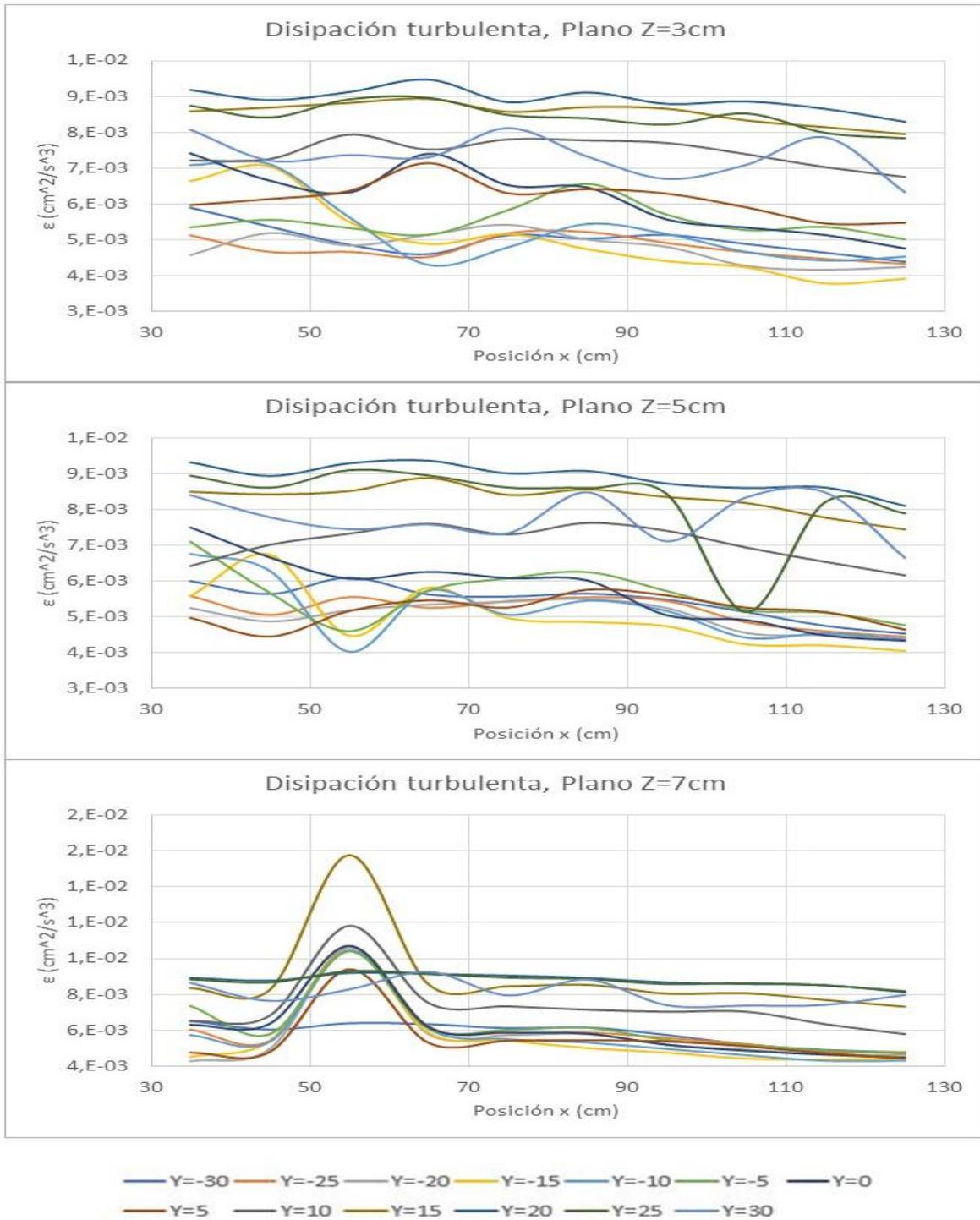


Figura 4-101 Disipación turbulenta (ϵ) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Escalas de Kolmogórov

En la Figura 4-102A se observa que la microescala de longitud (η_k) en los tres planos medidos tiene varios picos y valles en distintas ubicaciones mientras que en la Figura 4-102B las curvas se acoplan a una misma forma y tendencia. Lo mismo ocurre con las Figuras 4-103 y 4-104 de las microescalas de tiempo (t_η) y velocidad (U_η) respectivamente.

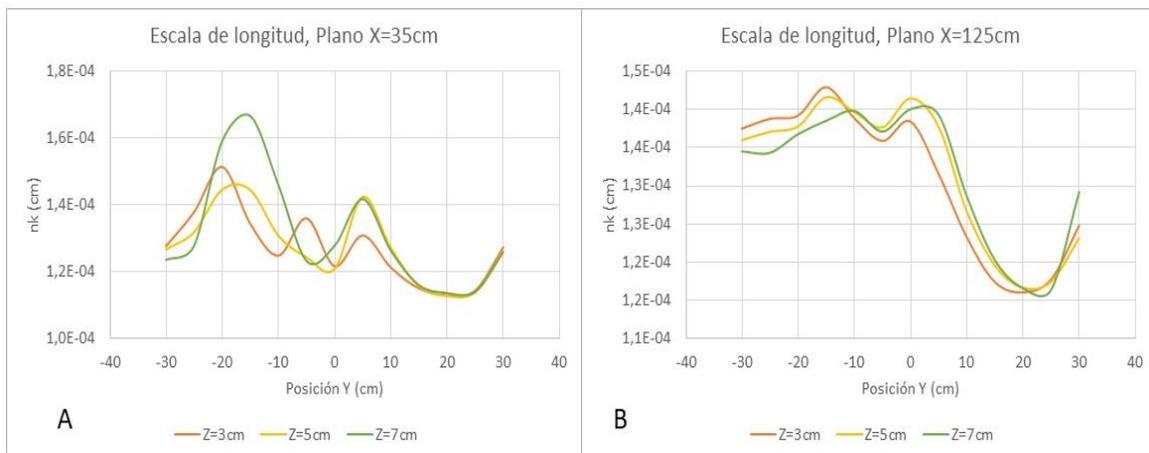


Figura 4-102 Escala de longitud (η_k) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

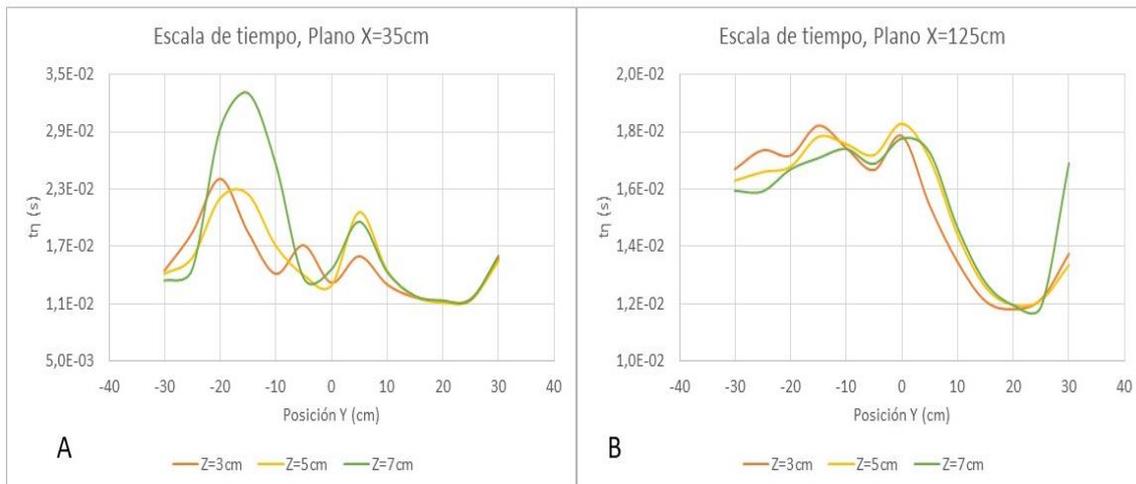


Figura 4-103 Escala de tiempo (t_η) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

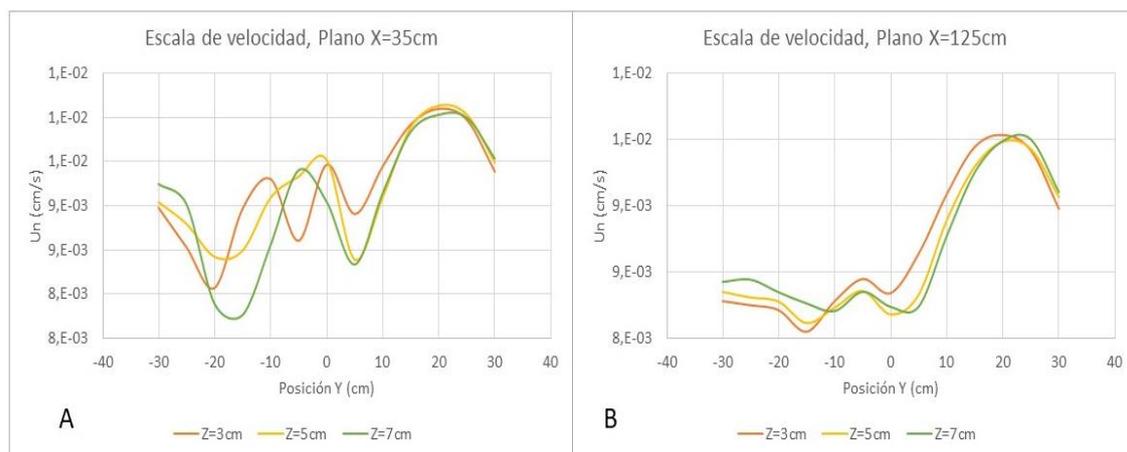


Figura 4-104 Escala de velocidad (U_η) vs Posición (Y) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Debido a que las microescalas de Kolmogórov están en función de la disipación de energía cinética turbulenta, que a su vez solo depende de la velocidad instantánea (u_x), todas las curvas resultantes tienen la misma forma que la de esta velocidad como se puede observar en las Figuras 4-105, 4-106 y 4-107.

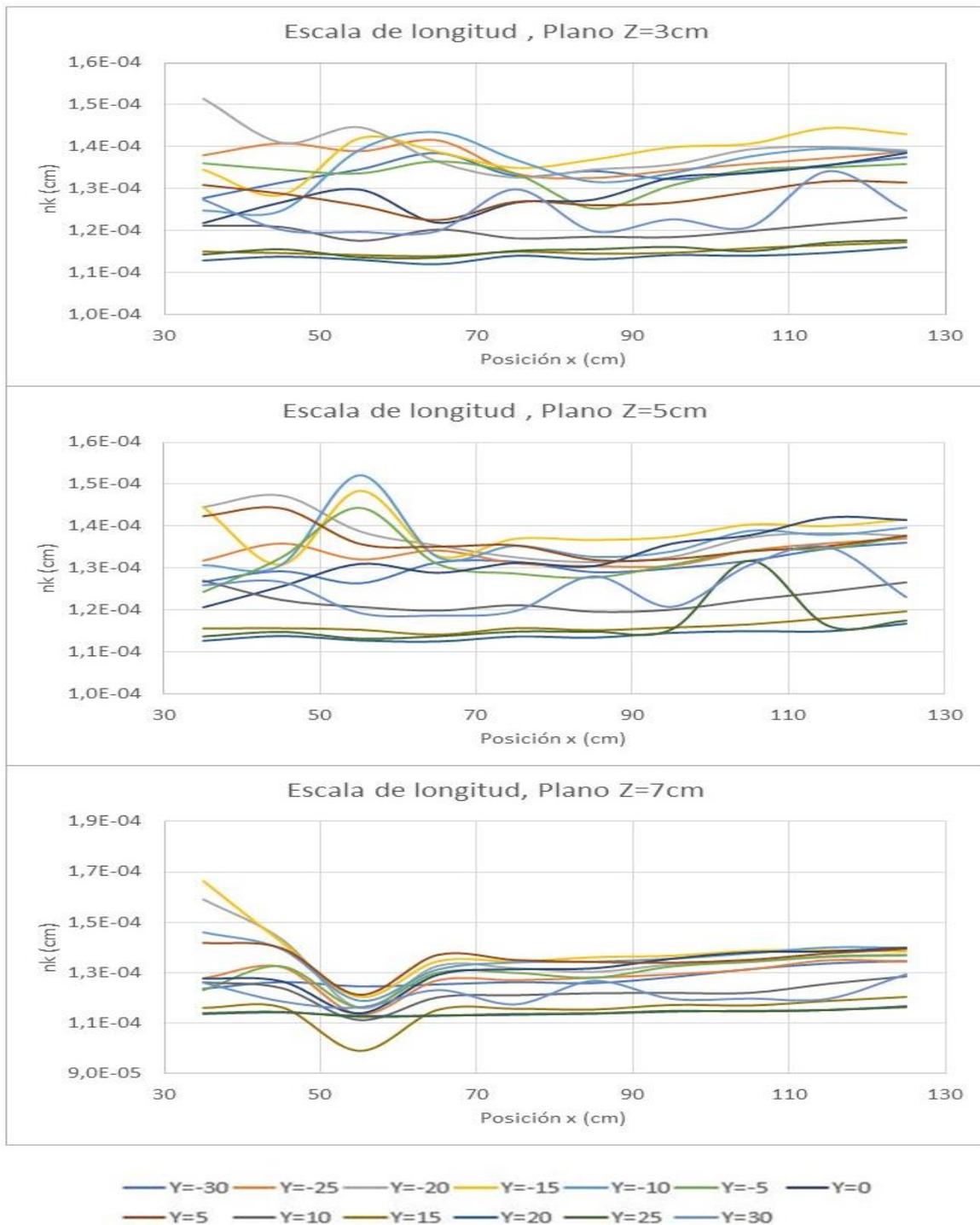
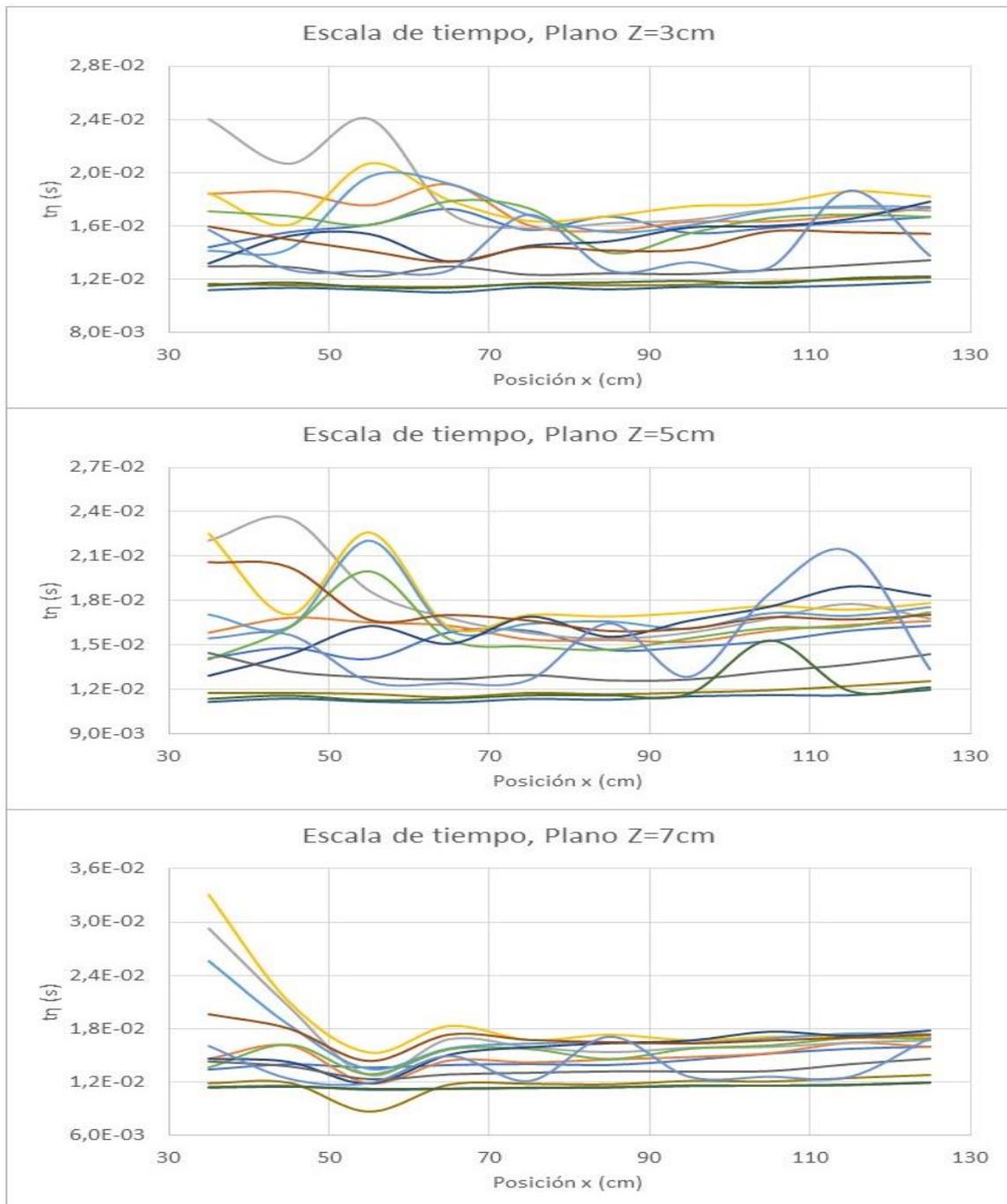


Figura 4-105 Escala de longitud (η_k) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)



— Y=-30 — Y=-25 — Y=-20 — Y=-15 — Y=-10 — Y=-5 — Y=0
 — Y=5 — Y=10 — Y=15 — Y=20 — Y=25 — Y=30

Figura 4-106 Escala de tiempo (t_n) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

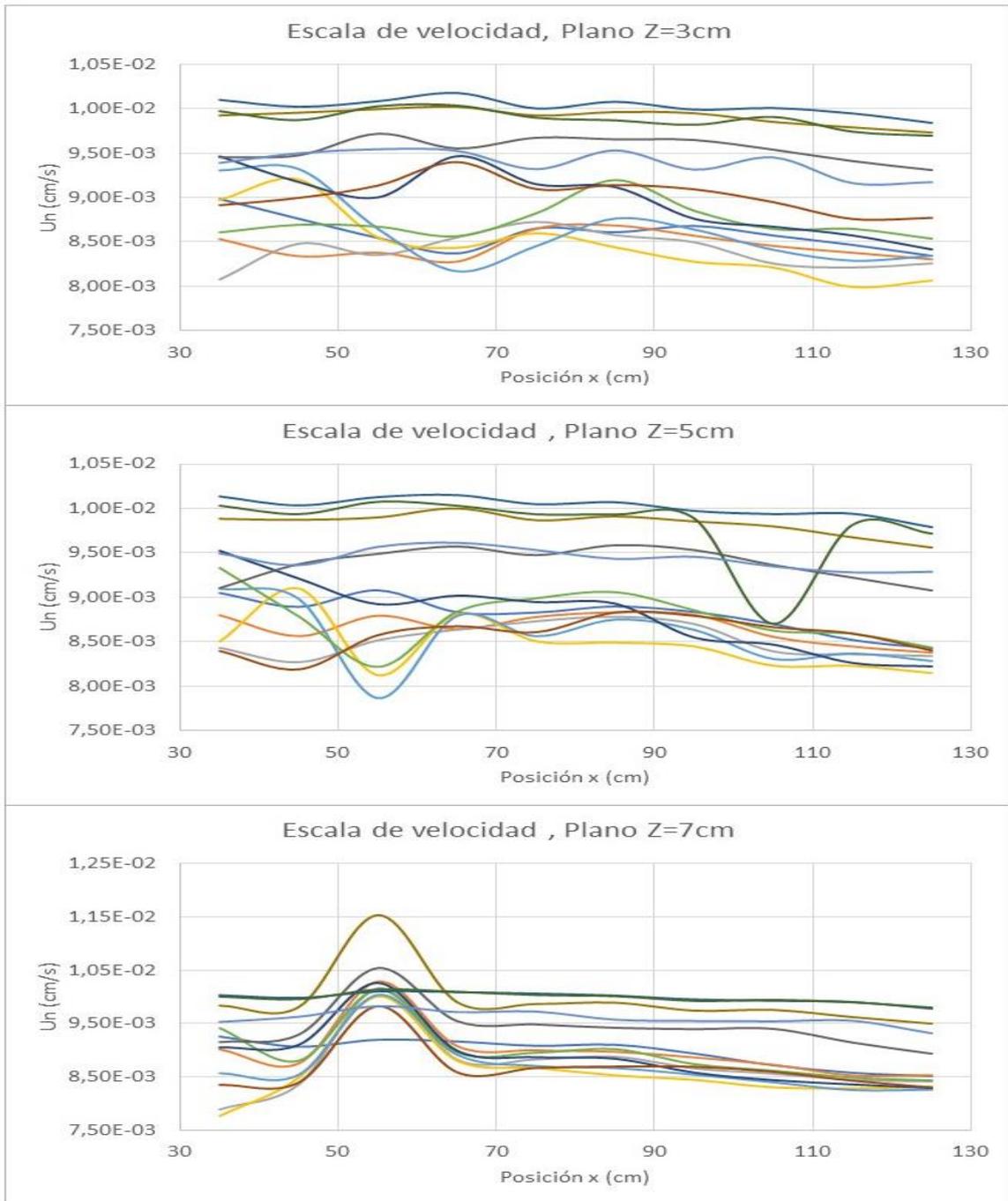


Figura 4-107 Escala de velocidad (U_n) vs Posición (X) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.1.2.3 Análisis de erosión

Socavación teórica

Para determinar la profundidad del hoyo de socavación generado al pie de la pila se utilizaron todos los métodos descritos en la sección 2.1.5, los resultados obtenidos se resumen en las Tablas 4-11 a 4-15. El resultado varía entre 12.8 y 18 cm lo que resulta mayor que el espesor de la capa de sedimento colocada en el canal, esto se debe a que el cálculo de la socavación depende de la profundidad del flujo y del ancho de la pila debido a que en la realidad los cauces tienen espesores mucho más grandes de sedimento en el fondo.

Tabla 4-11

Método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU). Pila circular

Método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU)				
$D_s = 2 * y * K_f * K_\beta * K_{cf} * K_{mf} \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43}$				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Calado aguas arriba de la pila	y	0,25	m	
Factor de corrección de forma	k _f	1		Tabla 2-3
Longitud de la pila	L	0,9	m	
Ancho de la pila	a	0,1	m	
Relación largo/ancho	L/a	9		
Factor de corrección de ángulo de ataque	k _β	1		Tabla 2-4
Factor de corrección de condiciones de fondo	k _{cf}	1,1		Tabla 2-5
Factor de corrección de protección del material de fondo	k _{mf}	1		
	b/y	0,4		
Número de Froude aguas arriba de la pila	Fr	0,13		
Profundidad del hoyo	D _s	12,78	cm	Ecuación 2.56

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-12
Método de Froehlich (1991). Pila circular

Método de Froehlich (1991)				
$D_s = 0.32K_{f*}(b')^{0.62}y^{0.47}Fr^{0.22}D_{50}^{-0.99} + b$				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Factor de corrección por la forma de la pila	k_{f*}	1		
Ancho proyectado de la pila	b'	0,1	m	
Calado aguas arriba de la pila	y	0,25	m	
Número de Froude aguas arriba de la pila	Fr	0,13		
Diámetro 50	D_{50}	7,39E-01	mm	
Ancho de la pila	b	0,1	m	
Profundidad del hoyo	D_s	13,45	cm	Ecuación 2.61

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-13
Método de Laursen y Toch (1956). Pila circular

Método de Laursen y Toch (1956)				
$D_s = K_f K_g a$				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Relación calado/ancho	H_s/b	2,5		
Coefficiente de relación H_s/b	K_g	2		Figura 2-22
Coefficiente de forma de la pila	k_f	0,9		Figura 2-23
Ancho de la pila	a	10	cm	
Profundidad del hoyo	D_s	18	cm	Ecuación 2.62

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-14
Método de Maza-Sánchez (1968). Pila circular

Método de Maza-Sánchez (1968)				
$D_s = f * a' - H_s$				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Velocidad media del flujo	V_o	0,21	m/s	
Calado aguas arriba de la pila	H_s	0,25	m	
Gravedad	g	9,81	m/s ²	
Número de Froude	Fr	0,13		Ecuación 2.2
Ancho de la pila	a'	0,1	m	
Relación calado/ancho	H_s/a'	2,5		Ecuación 2.64
Factor	f	4,2		Figura 2-26
Profundidad del hoyo	D_s	17	cm	Ecuación 2.65

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-15
Método de Melville y Coleman (2000). Pila circular

Método de Melville y Coleman (2000)				
$D_s = K_{hd} K_i K_d K_\alpha K_{sh} K_G K_t$				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Calado	y	0,25	m	
Ancho de la pila	b	0,1	m	
Relación ancho/calado	b/y	0,4		
Coeficiente de relación ancho/calado	K_{hd}	0,24	m	Tabla 2-8
	d_{50a}	0,60	mm	
Diámetro 50	d_{50}	0,74	mm	
Tensión adimensional de Shields	T^*	0,023		
	V_{ca}	0,435	m/s	
	V_a	0,348	m/s	
	V_c	0,423	m/s	
Velocidad media del flujo	V	0,210	m/s	
Coeficiente de intensidad de flujo	K_i	0,67		
	D/d_{50a}	167,91		
Coeficiente del tamaño del sedimento	K_d	1		Tabla 2-9
Coeficiente de alineación de la pila	K_α	1		Tabla 2-10
Coeficiente de forma de la pila	K_{sh}	1		Tabla 2-11
Coeficiente de la geometría del cauce	K_g	1		
	V/V_c	0,50		
Coeficiente de tiempo	K_t	0,88		Tabla 2-12
Profundidad del hoyo	D_s	14,17	cm	Ecuación 2.66

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Socavación medida sin paneles

La socavación generada una vez transcurrido al menos el tiempo de equilibrio (8.16 horas) dejó ver el fondo metálico del canal hidrodinámico alcanzando una socavación de 10cm.

Socavación medida con paneles

Para poder determinar hasta Donde se generó la socavación al pie de la pila circular con los paneles sumergidos colocados aguas arriba de esta se realizó el procedimiento detallado al final de la sección 3.4.2. El resultado obtenido se muestra en la Figura 4-108 Donde las tres líneas rojas son los paneles, la pila está en el punto (0,50) y el rango del levantamiento va en dirección del eje X desde -100 hasta 145cm que es el máximo punto hasta Donde se desplazó el sedimento al final del experimento; en el gráfico se distinguen 8 intervalos diferentes detallados en la Tabla 4-10, las curvas de nivel mayores se encuentran cada 3,5cm y las menores cada 0,7cm. Es importante aclarar que la elevación mínima, es decir, el fondo del canal se encuentra en 15,7 cm que es la medida obtenida con el limnómetro en el levantamiento realizado.

Alrededor de los paneles, en el extremo Donde chocan con el flujo de agua se generan depresiones que tienen su punto mínimo en la arista del panel y en el costado derecho de cada panel se genera una elevación producto del movimiento del sedimento bajo la arista del mismo. En la pila los sedimentos toman la forma de la Figura 2.19, la Tabla 4-11 resume tanto las depresiones como elevaciones resultantes considerando que la superficie inicial del sedimento es el punto 0 en el eje Z.

Tabla 4-16*Leyenda del levantamiento de la forma del lecho con la pila circular*

Tabla de elevaciones, Pila circular				
Intervalo	Elevación mínima (cm)	Elevación máxima (cm)	Área	Color
1	17.24	22.07	2540.35	
2	22.07	23.04	3309.07	
3	23.04	23.60	2270.27	
4	23.60	23.97	3257.69	
5	23.97	24.35	2882.78	
6	24.35	24.91	2887.67	
7	24.91	25.68	3214.03	
8	25.68	27.41	2548.15	

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-17*Elevaciones y depresiones ocurridas en el lecho con la pila circular*

Elemento	Depresión (cm)	Elevación (cm)
Panel 1 (y=25)	5,9	1,8
Panel 2 (y=50)	5,2	1,8
Panel 3 (y=75)	6,6	1,8
Pila circular	6,6	1,8

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

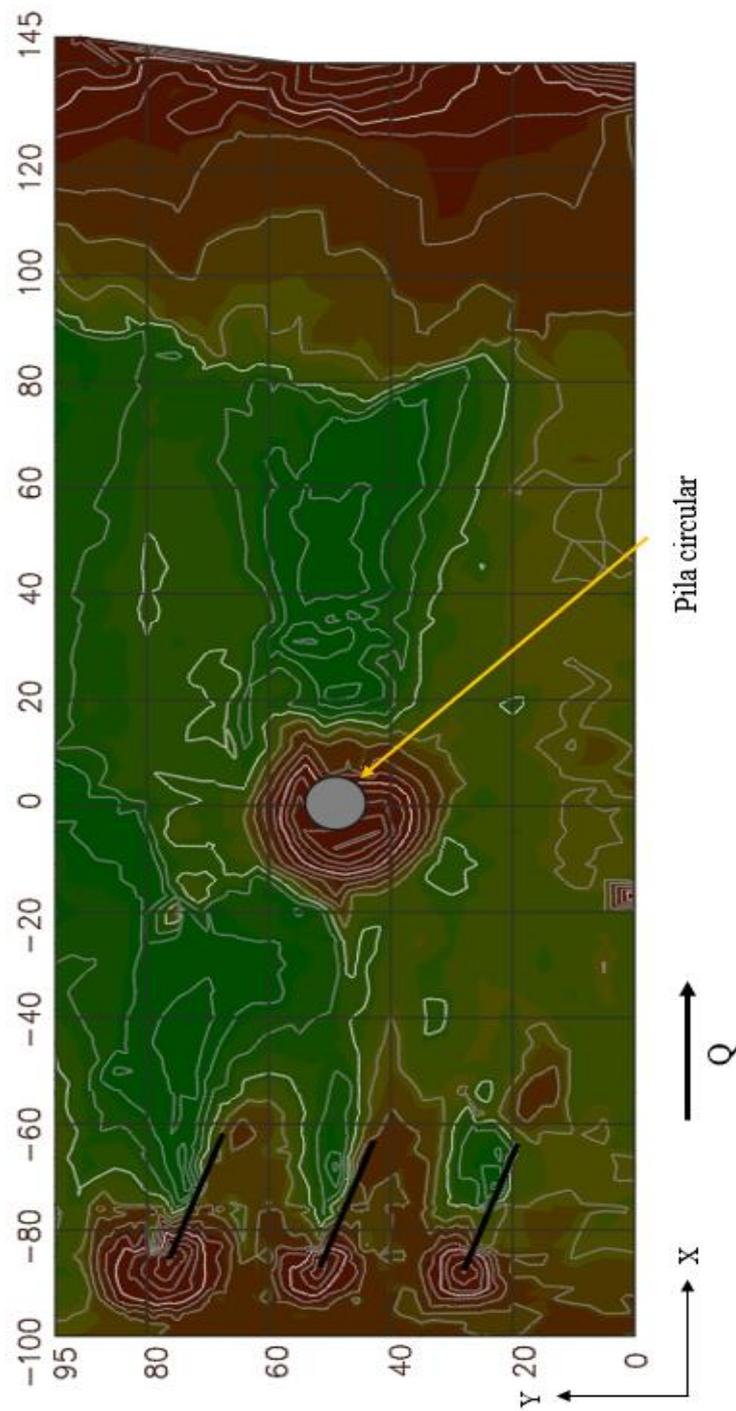


Figura 4-108 Forma del lecho con paneles sumergidos, Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

5.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de tener una mejor apreciación durante la comparación, en esta sección las figuras muestran los gráficos de ambos trabajos: del lado izquierdo están las curvas obtenidas por Barros y Echeverría (2020) (con paneles sumergidos) y en el lado derecho las curvas obtenidas por Chiliquinga y Pinto (2019) (sin paneles sumergidos). Es importante aclarar que no serán comparadas todos los parámetros vistos en la sección anterior si no únicamente aquellos que poseen mayor relevancia.

4.2.1 PILA CUADRADA CON Y SIN PANELES SUMERGIDOS

4.2.1.1 Velocidades instantáneas

En la Figura 4-109 se compara la velocidad instantánea en dirección al eje X, se puede observar que el uso de los paneles sumergidos genera cambios notorios en la dirección de la velocidad que describen la trayectoria del vórtice de forma complementaria entre las curvas de signo opuesto reflejado en las gráficas además de una disminución en la velocidad media de aproximadamente 5 cm/s.

En la Figura 4-110 se compara la velocidad instantánea en dirección al eje Y, se puede observar que los rangos de variación son similares pero el uso de paneles sumergidos genera en el plano inferior $Z=3$ una mayor fluctuación debido a la proximidad que tienen, adicionalmente se observa una tendencia a uniformizarse y volverse valores constantes positivos hacia el final de la sección de control.

En la Figura 4-111 se compara la velocidad instantánea en dirección al eje Z, se puede observar que sigue la misma tendencia que el caso anterior, pero se uniformiza en dirección a valores constantes negativos hacia el final de la sección de control.

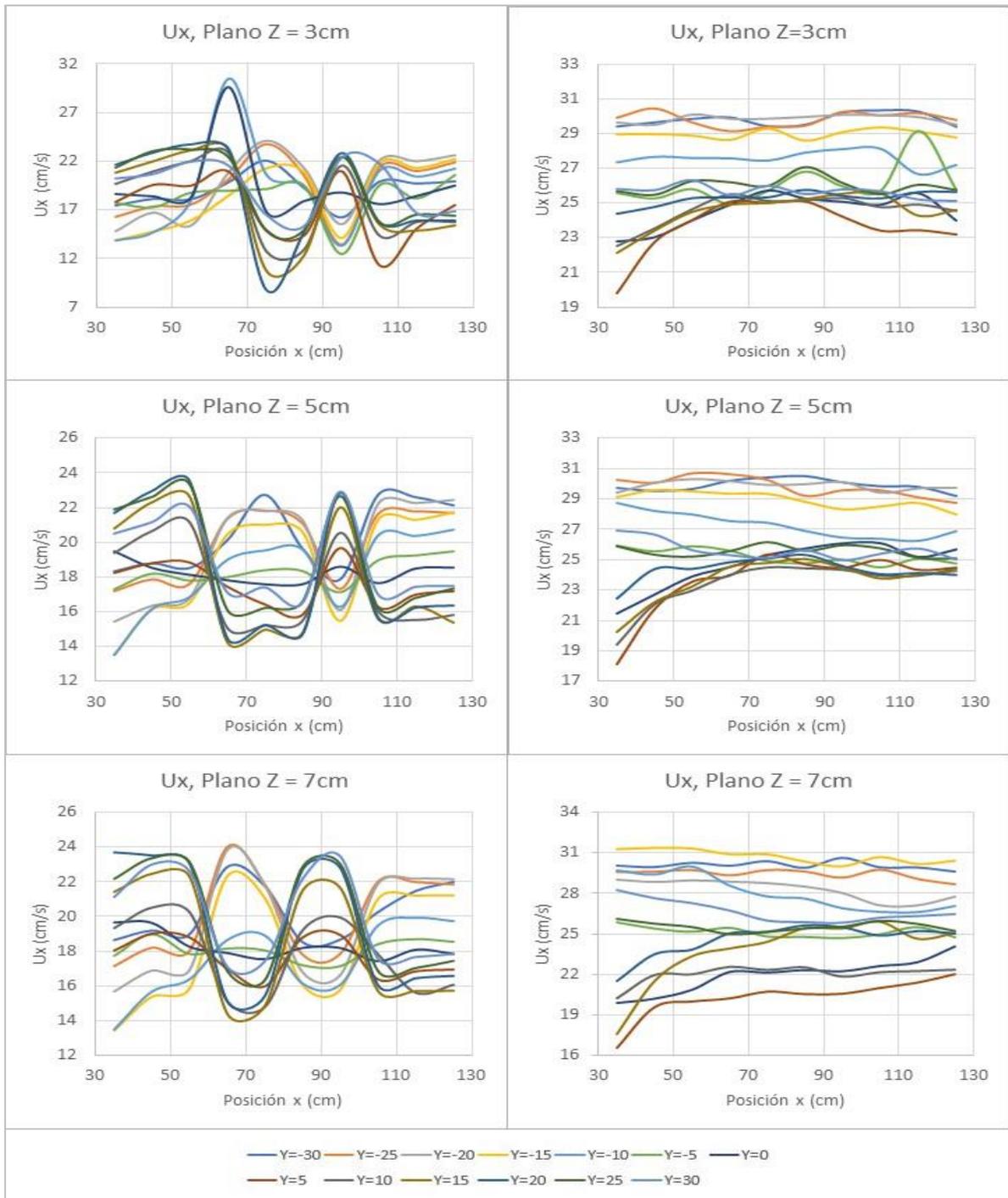


Figura 4-109 Comparación velocidad instantánea (u_x) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

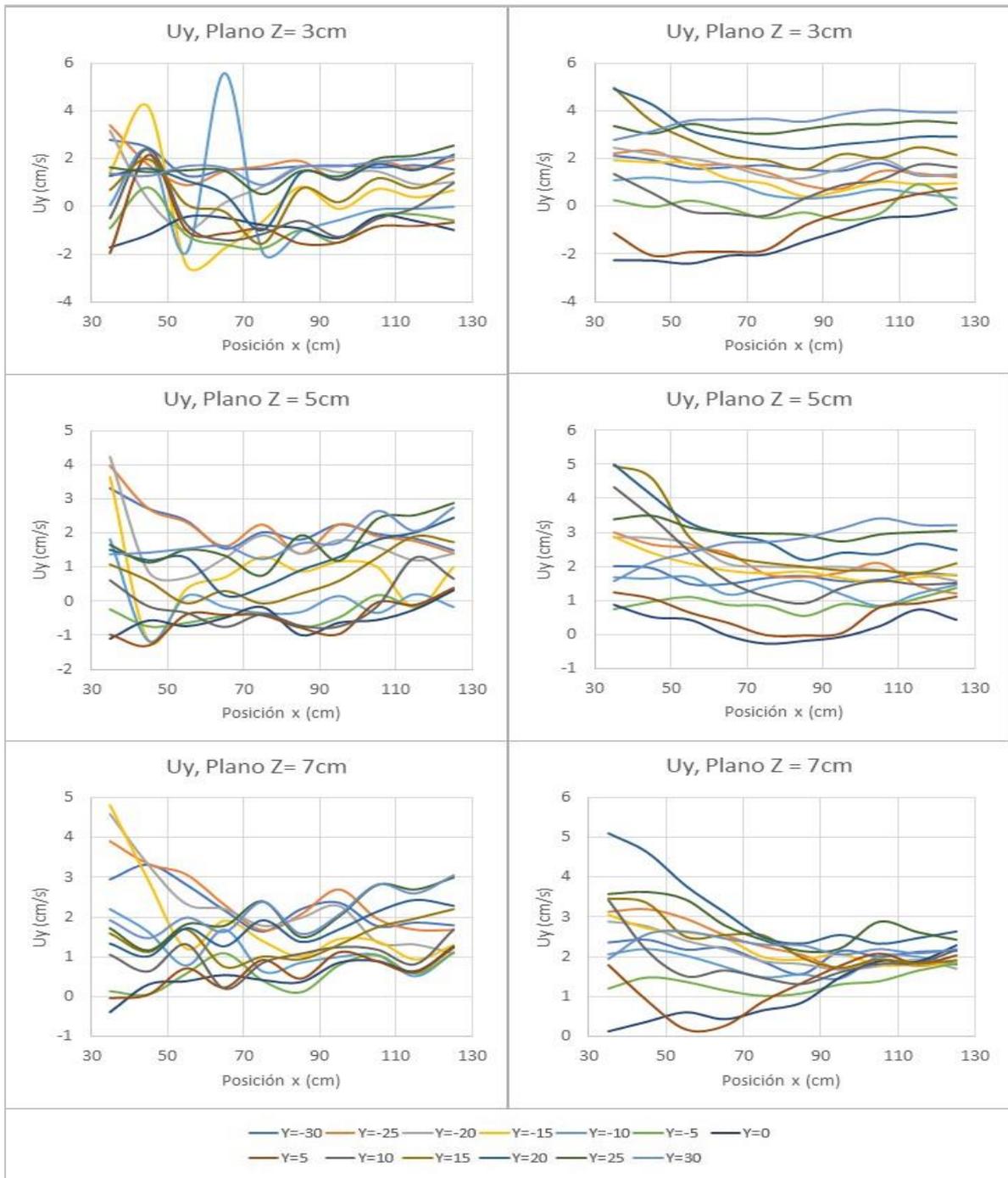


Figura 4-110 Comparación velocidad instantánea (u_y) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

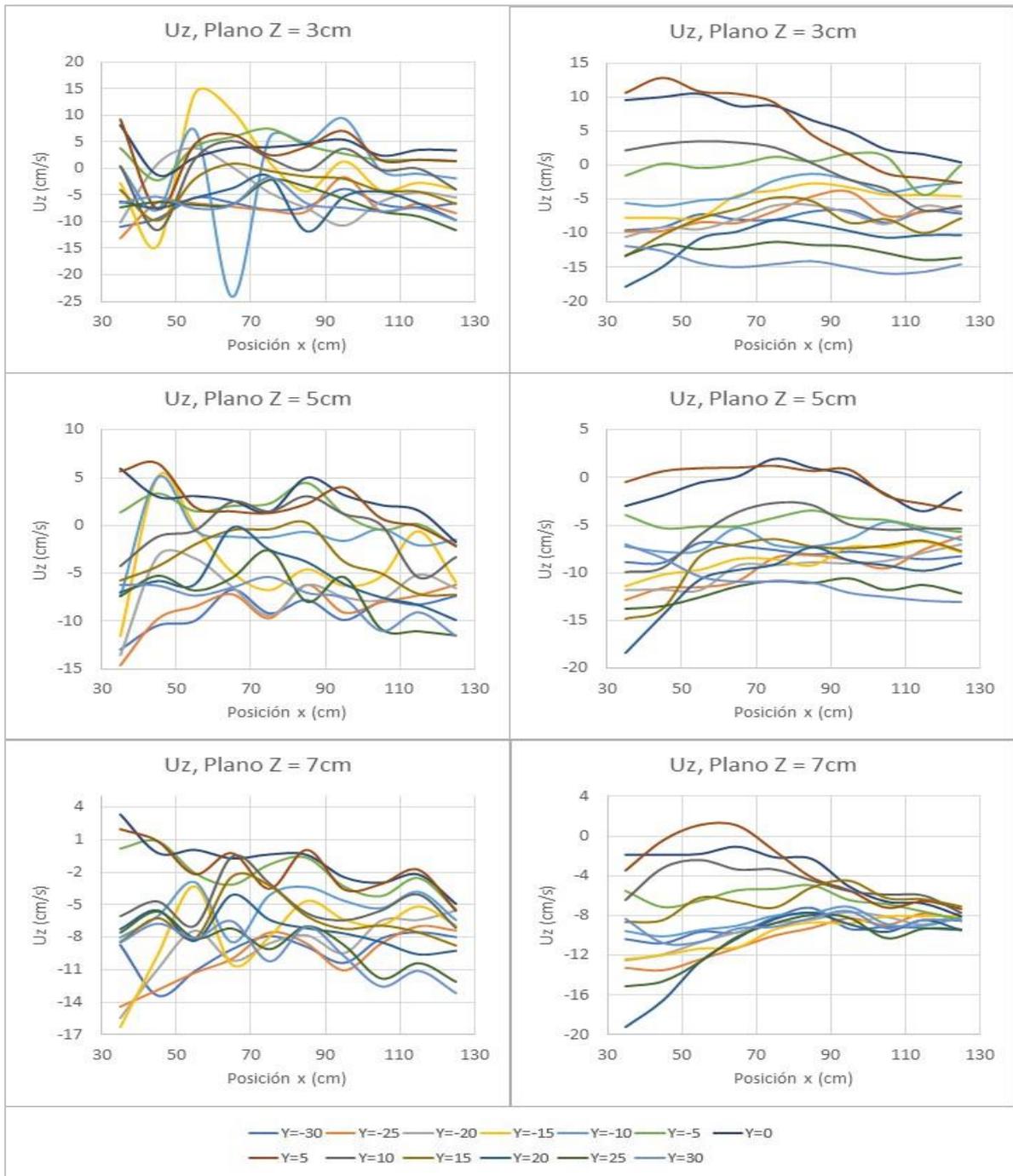


Figura 4-111 Comparación velocidad instantánea (u_z) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.2.1.2 Tensiones de Reynolds

En la Figura 4-112 se compara la tensión normal de Reynolds (ζ_{xx}), se puede observar que el uso de paneles sumergidos genera una uniformización en los valores de las curvas haciendo que se agrupen alrededor del 0 excepto en los extremos que se mantienen variables con valores mayores a 70 (cm/s)^2 .

En la Figura 4-113 se compara la tensión de Reynolds tangencial (ζ_{xy}), se puede observar que el uso de paneles sumergidos reduce considerablemente el rango de valores que, en ausencia de paneles supera fácilmente los 35 (cm/s)^2 y, al igual que en la tensión normal hay una uniformización hacia el 0 en todas las curvas hacia aguas abajo.

En la Figura 4-114 se compara la tensión de Reynolds tangencial (ζ_{xz}), al igual que en el caso anterior hay una reducción considerable en el rango de valores y una uniformización de las curvas hacia el 0. Es notorio, además el comportamiento por pares de curvas con signo opuesto en el plano más superficial.

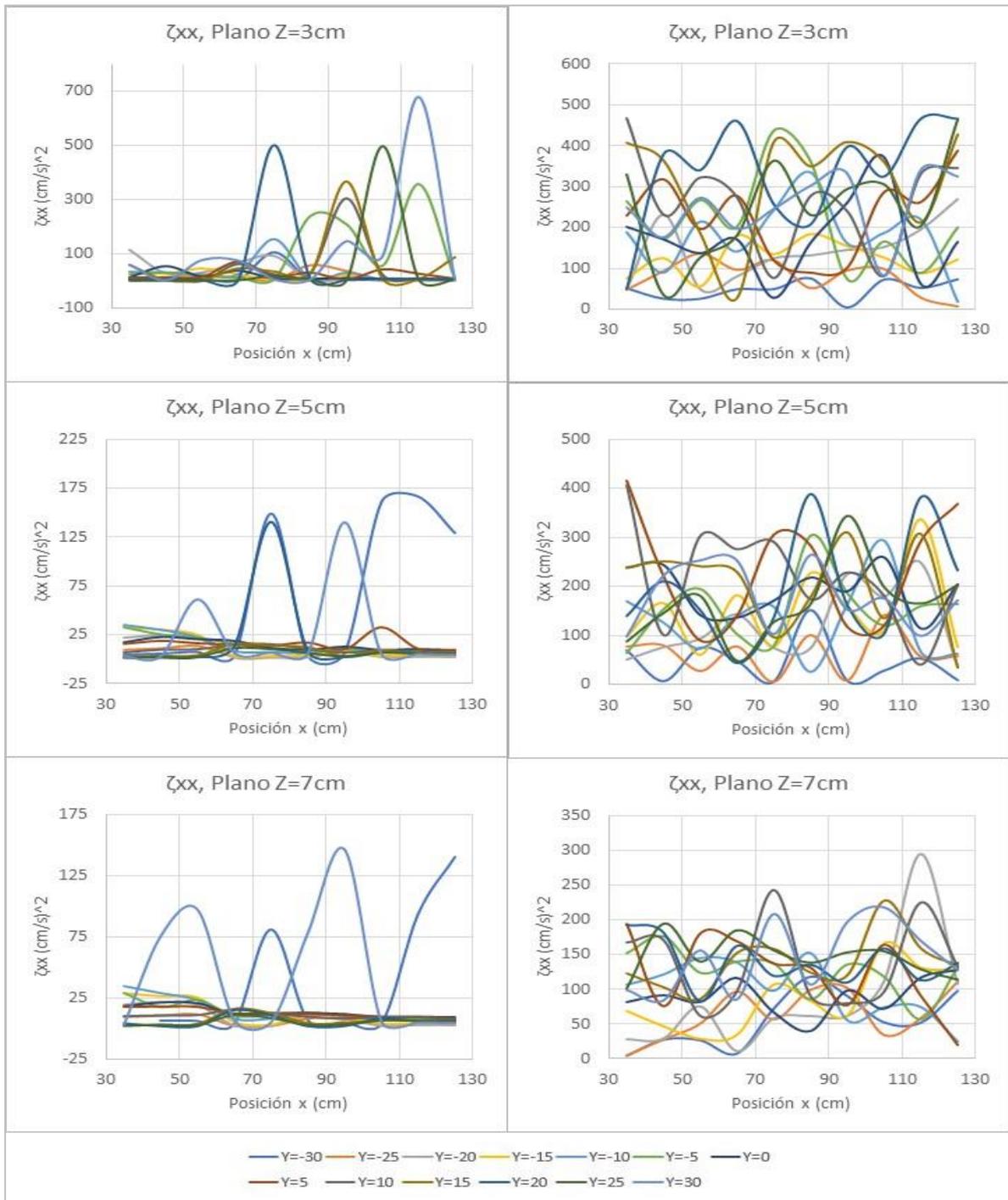


Figura 4-112 Comparación Tensión de Reynolds (ζ_{xx}) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

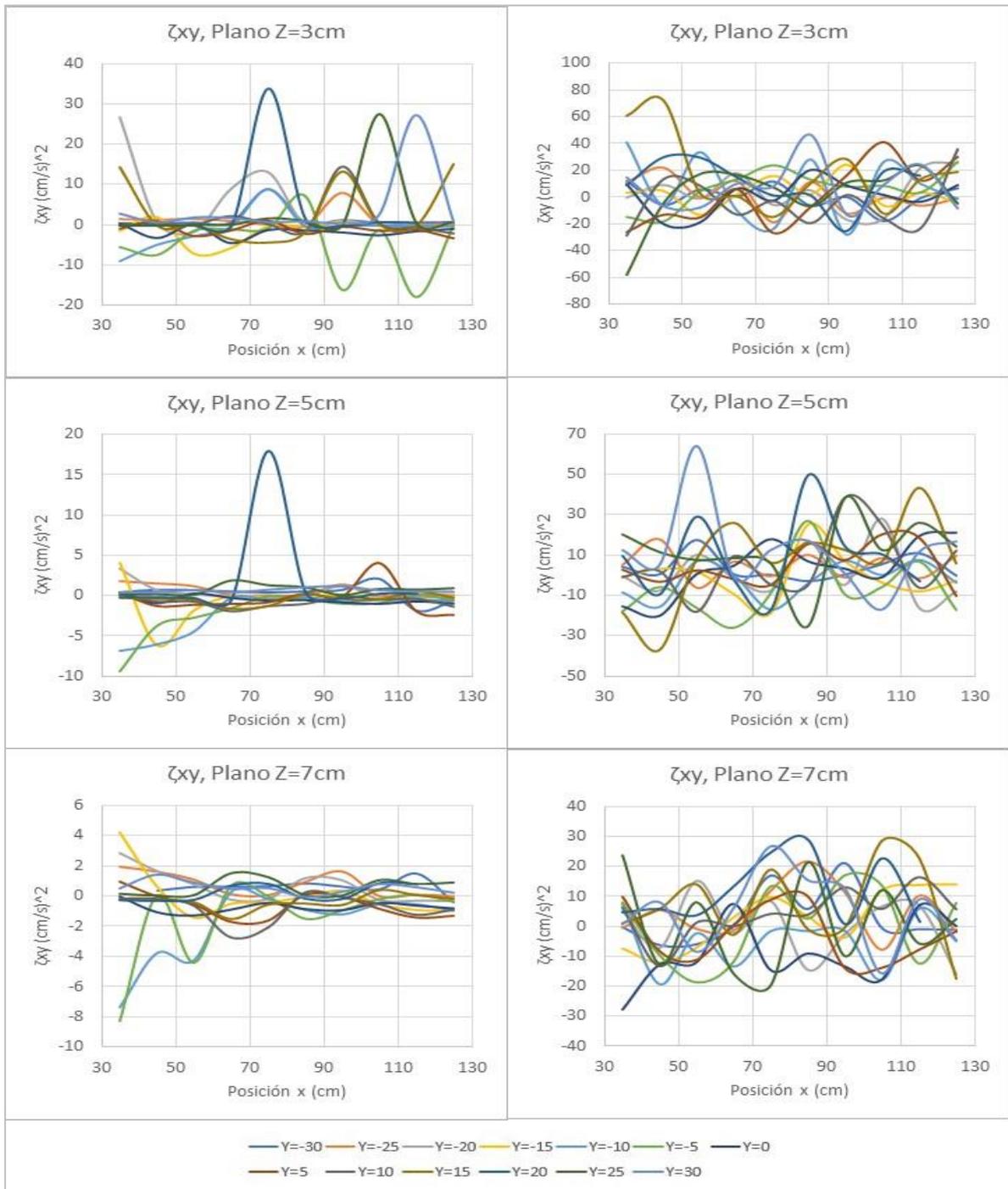


Figura 4-113 Comparación Tensión de Reynolds (ζ_{xy}) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

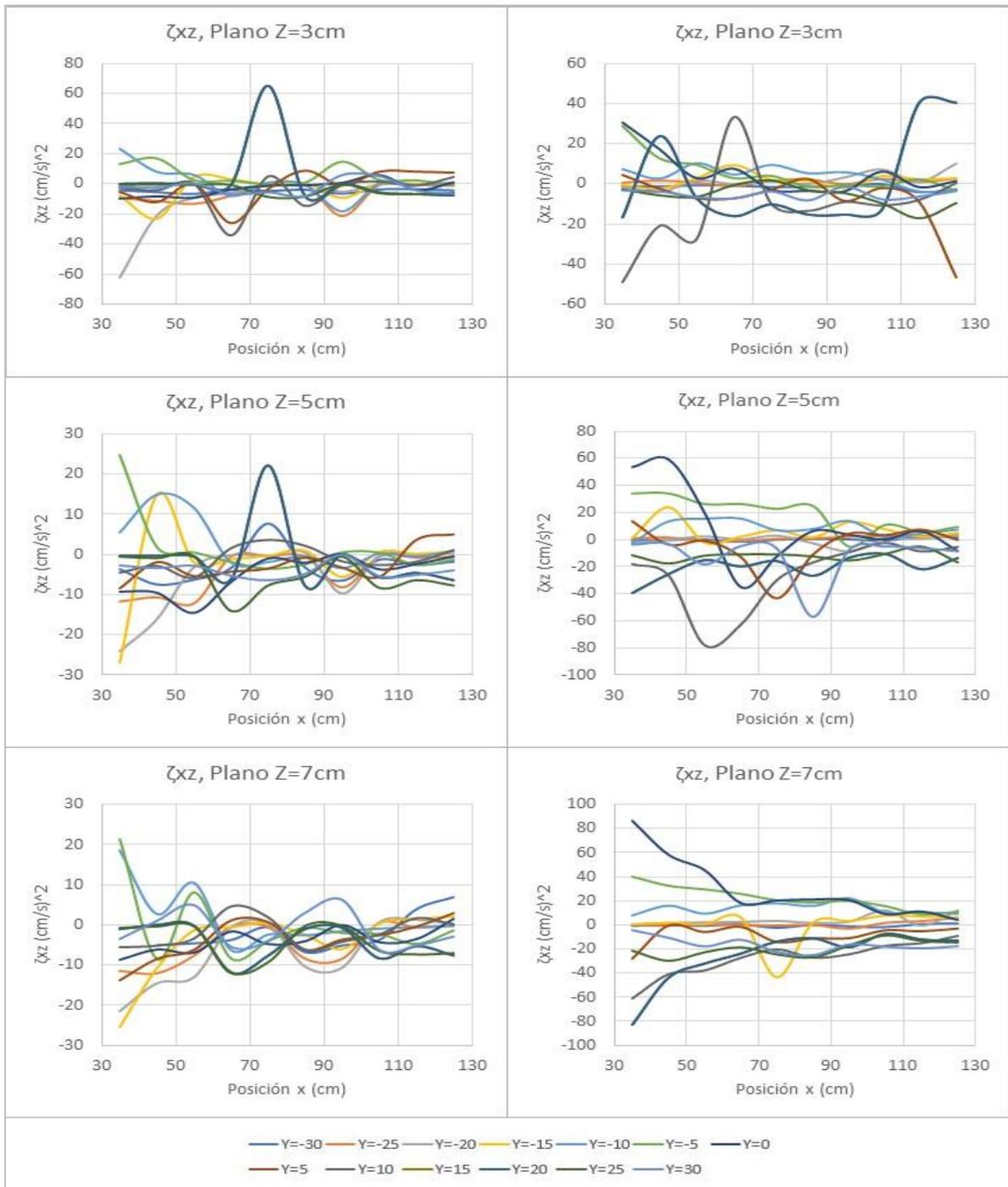


Figura 4-114 Comparación Tensión de Reynolds (ζ_{xz}) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.2.1.3 Intensidades turbulentas

En la Figura 4-115 se compara la intensidad turbulenta ($T.I._x$), se puede observar que el uso de paneles sumergidos genera un aumento en el rango de valores en el plano inferior en un 70%, esto debido a la cercanía que existe entre este plano y los paneles así como una disminución en el rango de valores de los planos restantes de aproximadamente el 5% en casi todas las curvas Y a excepción de las correspondientes a los extremos, esto debido a que el efecto de los paneles es mínimo en esta sección del canal. Es notoria además la existencia de una disipación de energía hacia el final de la sección de control.

En la Figura 4-116 se compara la intensidad turbulenta ($T.I._y$), se puede observar que el uso de paneles sumergidos genera un aumento en el rango de valores del plano inferior en 5% mientras que los planos restantes se mantienen en el mismo intervalo que en ausencia de paneles. Se observa también la misma distribución por pares de curvas de signo opuesto como en u_x . Es notoria además la existencia de una disipación de energía hacia el final de la sección de control.

En la Figura 4-117 se compara la intensidad turbulenta ($T.I._z$), se puede observar que el uso de paneles sumergidos no genera cambios en los rangos de valores. Se observa también la misma distribución por pares de curvas de signo opuesto como en u_x . Es notoria además la existencia de una disipación de energía hacia el final de la sección de control.

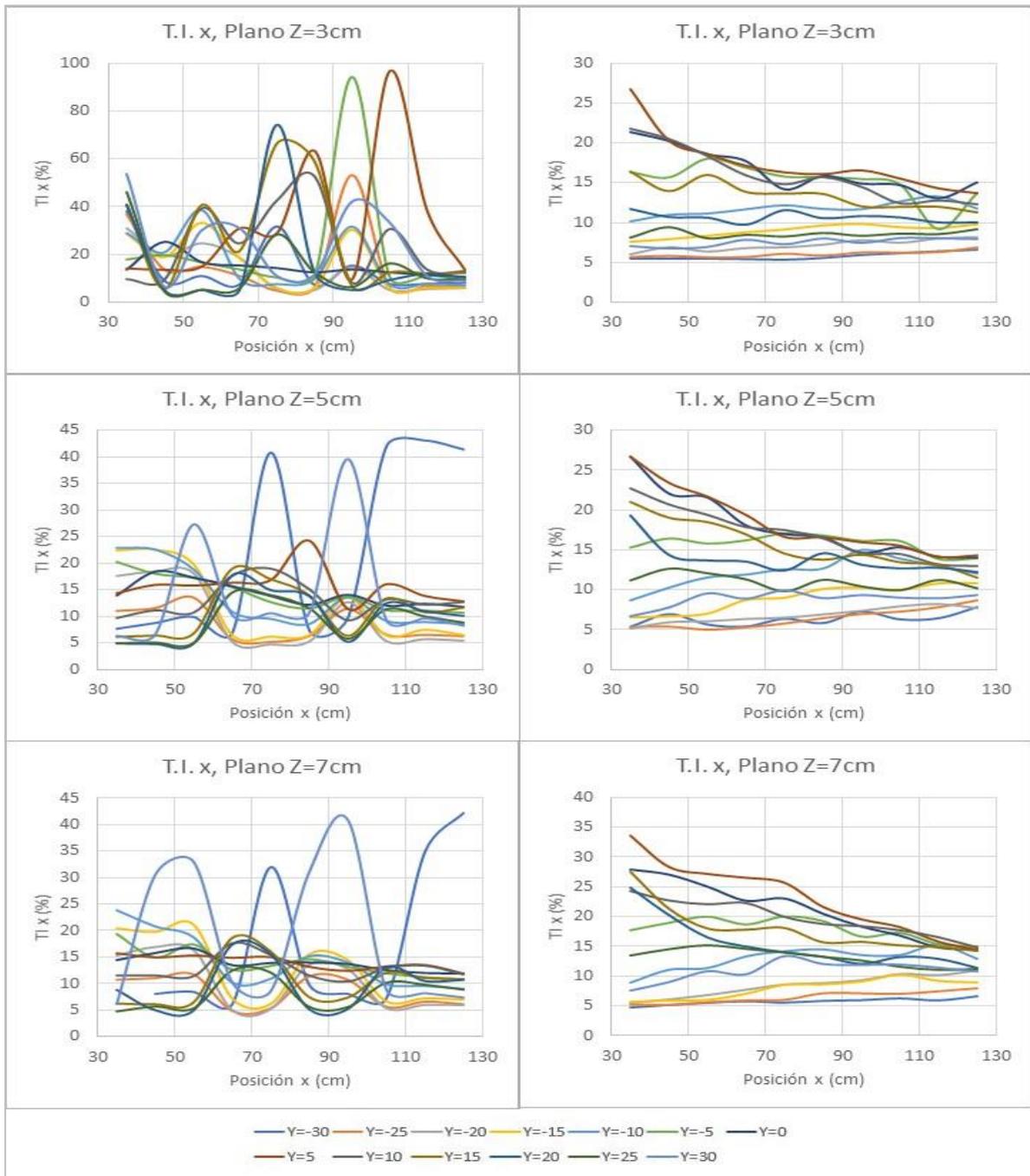


Figura 4-115 Comparación intensidad turbulenta (T.I.x) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

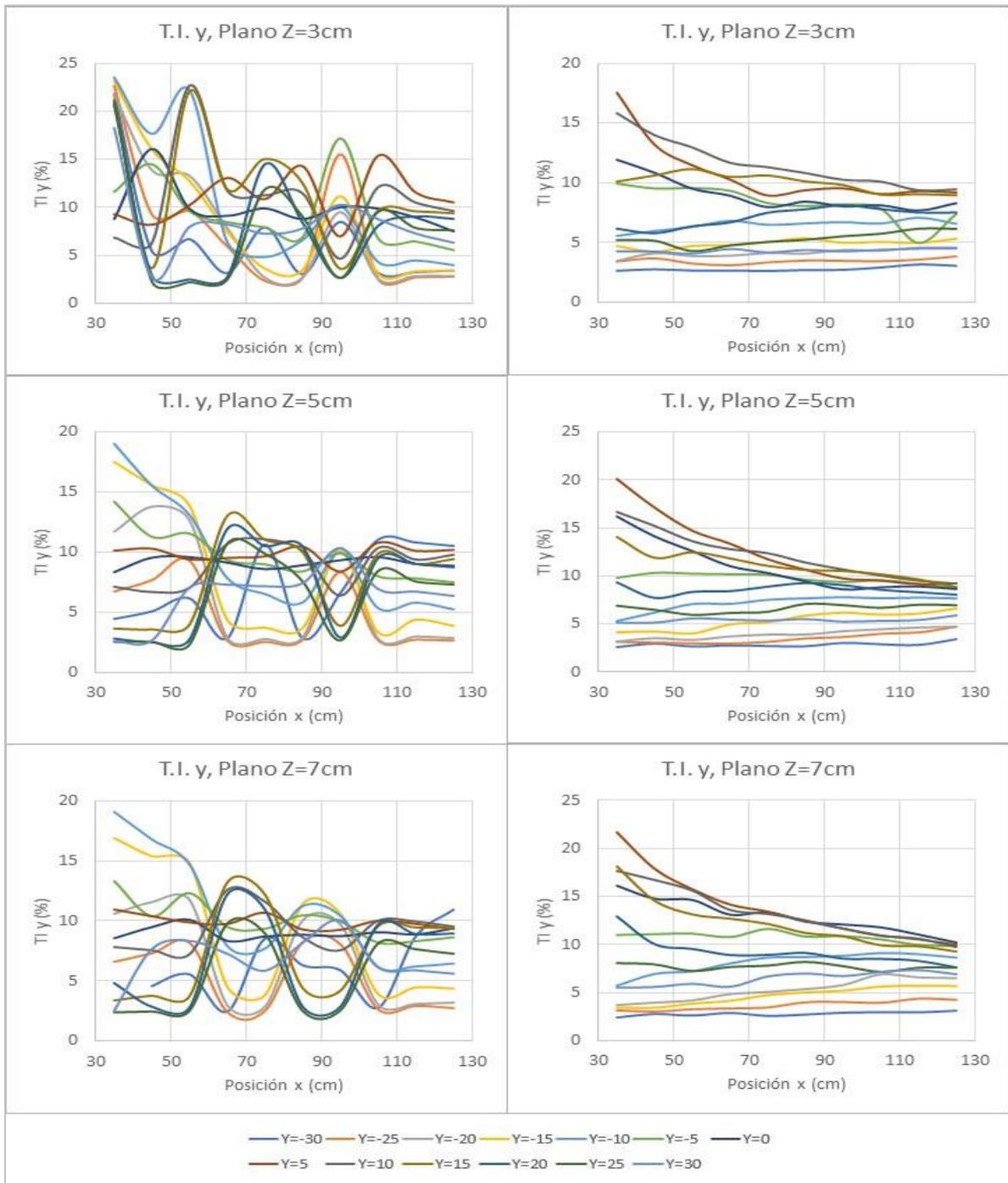


Figura 4-116 Comparación intensidad turbulenta (T.I.) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

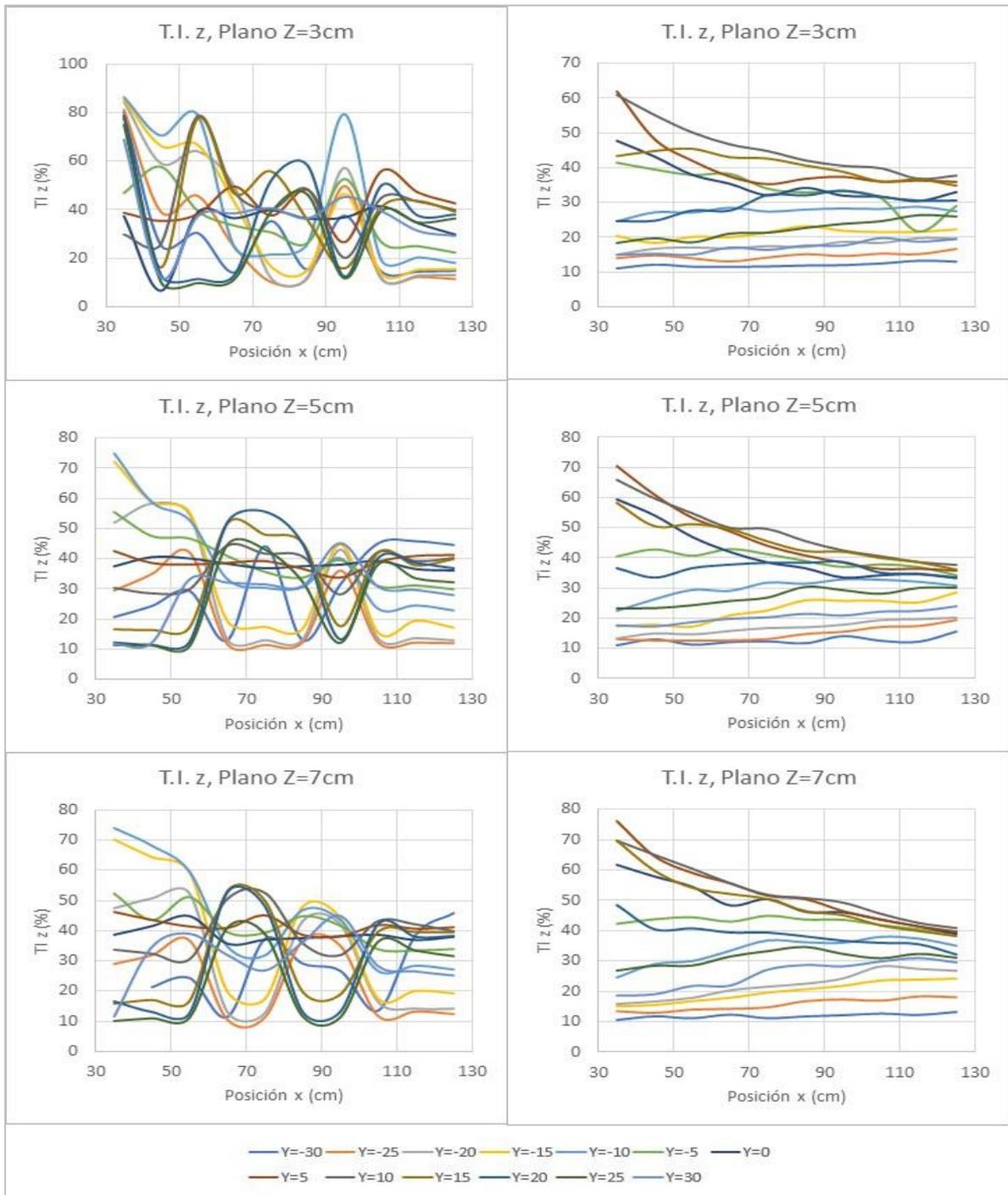


Figura 4-117 Comparación intensidad turbulenta (T.I.z) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.2.1.4 Energía cinética y disipación turbulenta

En la Figura 4-118 se compara la energía cinética (k), se puede observar que el uso de paneles sumergidos genera un aumento de energía en el plano inferior mientras que en los otros planos los rangos son similares a los obtenidos en ausencia de paneles. No se observa una tendencia marcada como en ausencia de paneles en ninguno de los planos.

En la Figura 4-119 se compara la disipación turbulenta (ϵ), se puede observar que el uso de paneles sumergidos genera una disminución en el rango de valores en 8×10^{-3} . La tendencia en las de curvas con signos opuestos se observa cada vez más definida hacia el plano superior.

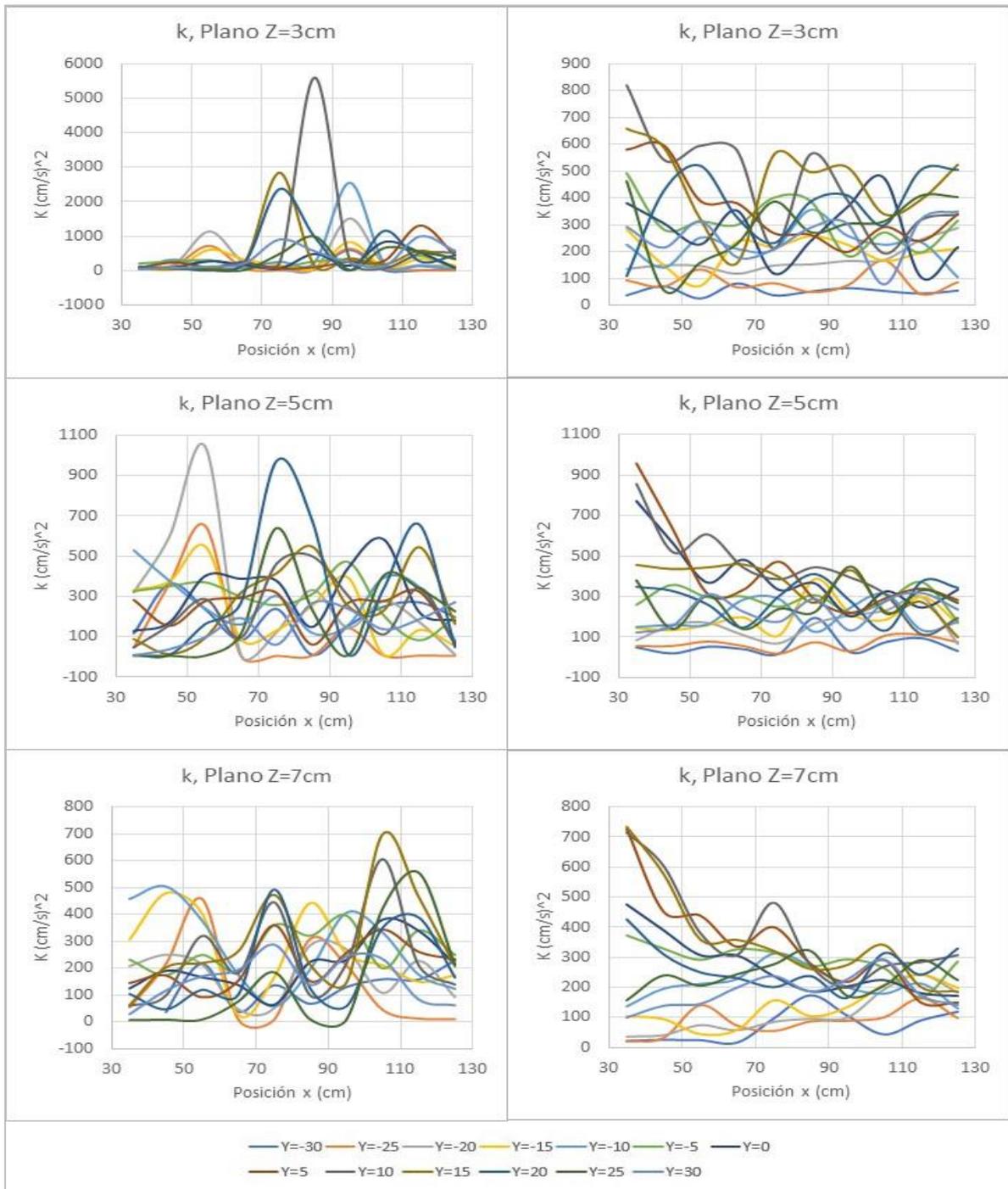


Figura 4-118 Comparación energía cinética (k) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

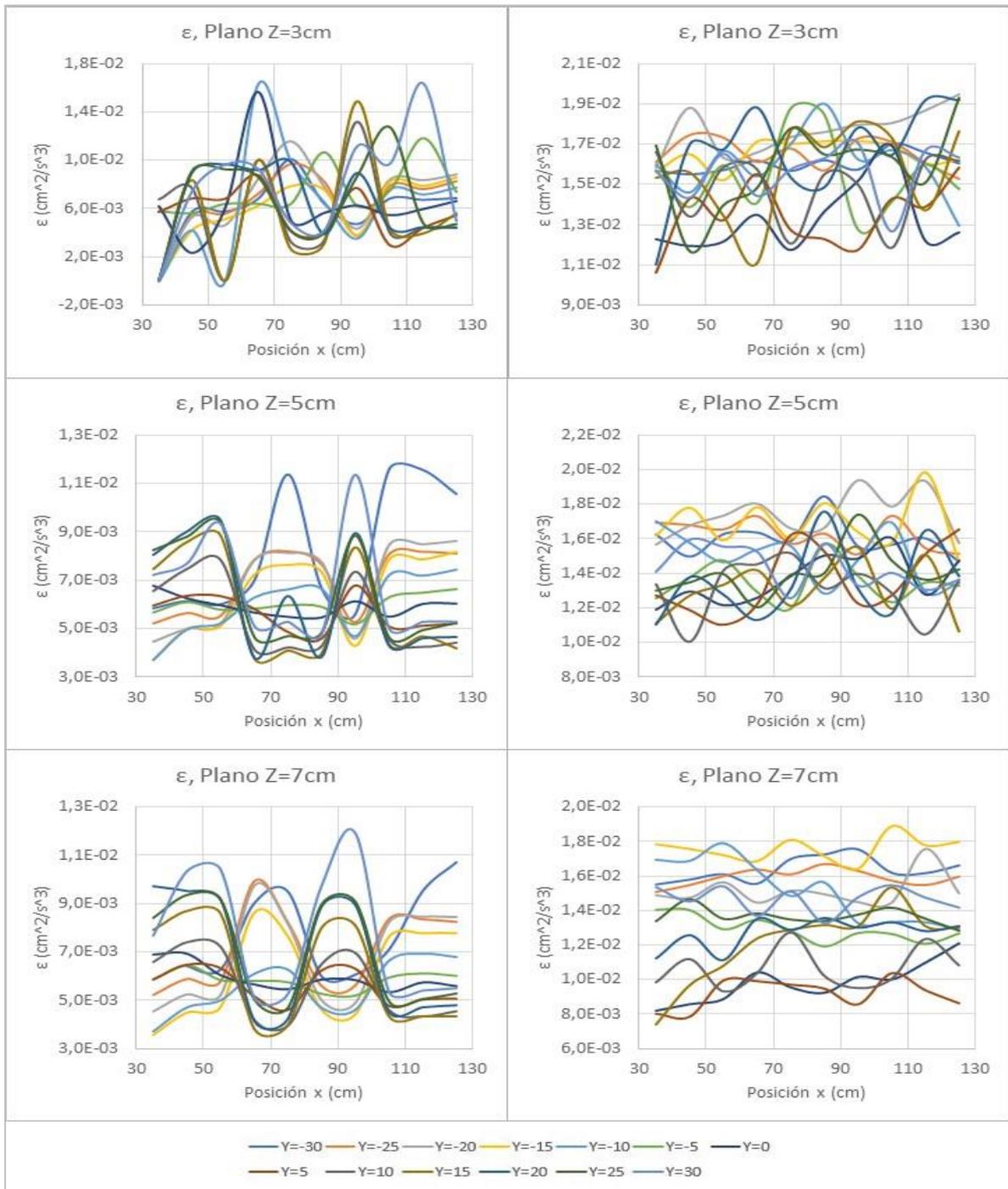


Figura 4-119 Comparación disipación turbulenta (ϵ) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.2.1.5 Escalas de Kolmogórov

En las Figura 4-120 se compara la microescala de longitud (η_k), se puede observar que el uso de paneles sumergidos genera una disminución en el rango de valores en el plano inferior de aproximadamente $1,4 \times 10^{-3}$ cm mientras que los demás planos se mantienen constantes. Se observa claramente la tendencia de las curvas con signos opuestos típica de U_x , esto debido a que depende de esta velocidad.

En la Figura 4-121 se compara la microescala de tiempo (t_η), se puede observar que el uso de paneles sumergidos genera un aumento en el rango de valores tanto en el plano inferior como el superior de 3,16 y $2,5 \times 10^{-2}$ s respectivamente mientras que el plano intermedio se mantiene en el mismo rango que en ausencia de paneles. Es notoria la misma tendencia que en U_x debido a que depende de este parámetro.

En la Figura 4-122 se compara la microescala de velocidad (U_η), se puede observar que el uso de paneles sumergidos genera un aumento en el rango de valores en $8,8 \times 10^{-2}$ en el plano inferior y 2×10^{-3} cm/s en el plano intermedio y superior. Es notoria la misma tendencia que en U_x debido a que depende de este parámetro.

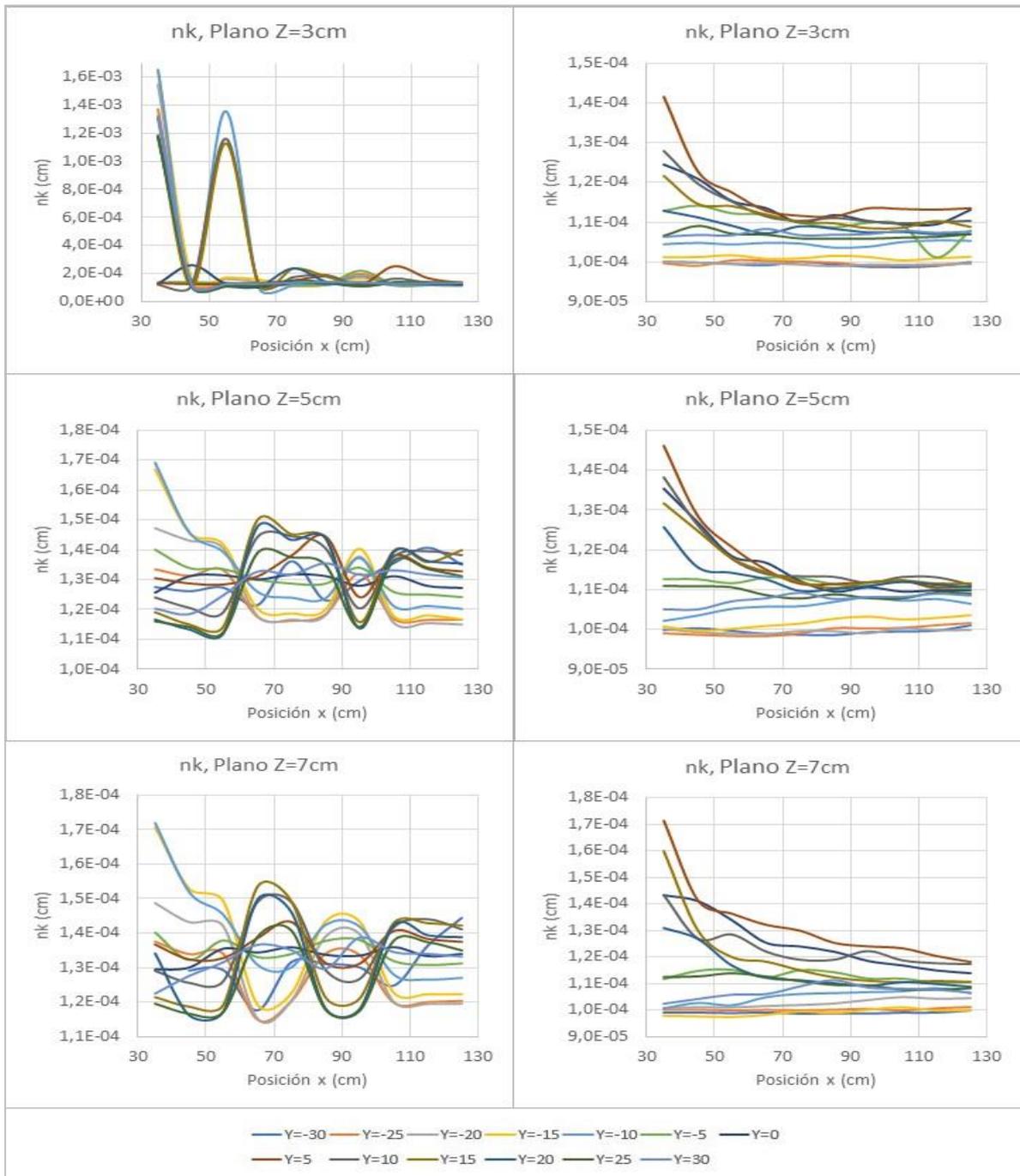


Figura 4-120 Comparación escala de longitud (n_k) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

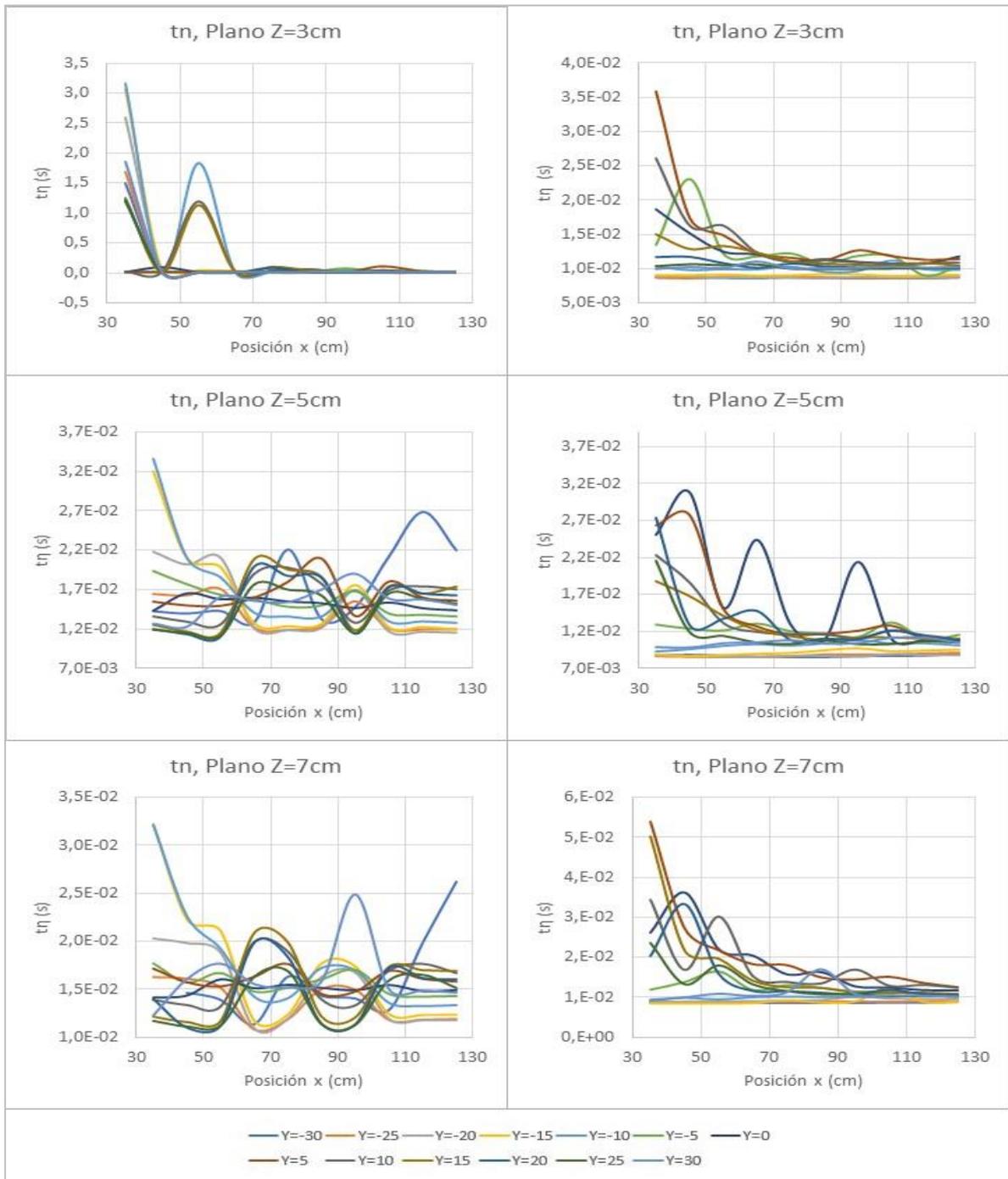


Figura 4-121 Comparación escala de tiempo (t_n) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

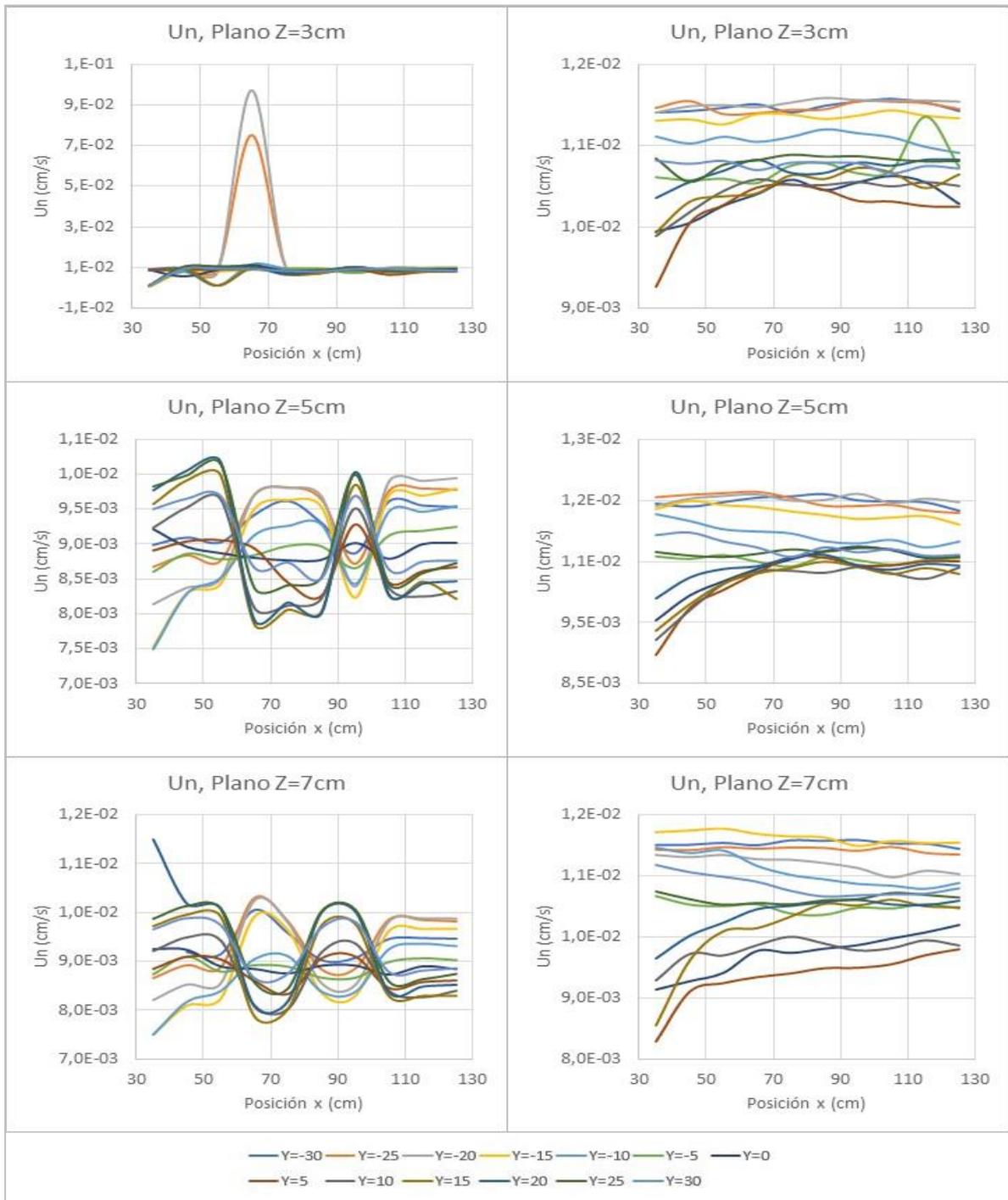


Figura 4-122 Comparación escala de velocidad (U_n) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila cuadrada

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.2.1.6 Socavación

Para este análisis se tomará como nivel 0 el valor que marco el limnómetro antes de que se deje pasar el agua sobre la arena (22 cm) esto por facilidad de cálculo ya que las ecuaciones para calcular la socavación teórica miden este parámetro desde el nivel del lecho antes del proceso de erosión. El experimento sin paneles sumergidos arrojó un valor máximo de socavación de 10 cm correspondiente al fondo del canal, esto es una limitante debido a que no se conoce el valor máximo real de socavación del experimento. La Tabla 4-18 indican todos los valores teóricos máximos de socavación para la pila cuadrada, se asumirá el valor de 16.6 cm correspondiente al promedio entre los diferentes métodos como el máximo real. De la figura 4-55 podemos obtener el valor de socavación máximo real con paneles sumergidos que es de 6.1 cm. con esos datos se puede estimar que el uso de paneles redujo hasta en un 63% la socavación local (Tabla 4-19).

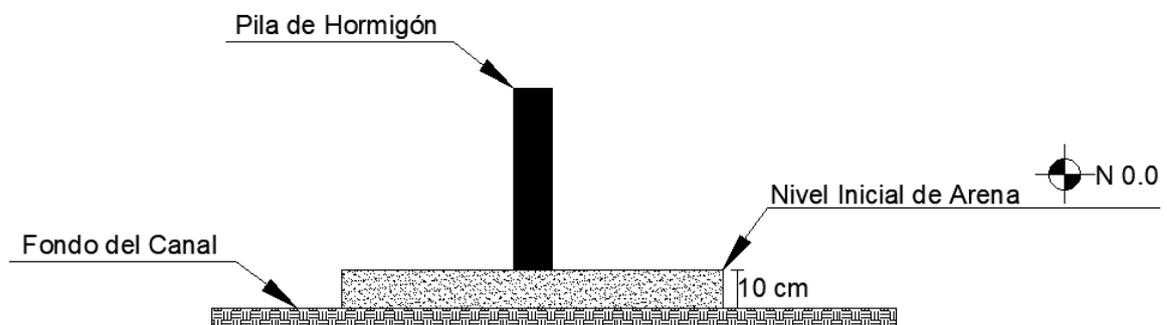


Figura 4-123 Esquema niveles para análisis socavación

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-18*Resumen de socavación teórica. Pila cuadrada*

Método	Ds	Unidad
Universidad Estatal de Colorado	14,06	cm
Froehlich	14,48	cm
Lausen y Toch	20	cm
Maza-Sánchez	18	cm
Melville y Coleman	16,16	cm
Promedio	16,54	cm

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-19*Comparación entre socavaciones. Pila cuadrada*

Socavación sin paneles	10	cm
Socavación con paneles	6,1	cm
Reducción	39	%

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.2.2 PILA CIRCULAR CON Y SIN PANELES SUMERGIDOS

4.2.2.1 Velocidades instantáneas

Debido a la sección geométrica de la pila las curvas con paneles sumergidos tienden a ser más planas a comparación de la pila cuadrada, sin embargo, aún se puede evidenciar la presencia de picos y valles en los 3 ejes. La Figura 4-124 compara la velocidad en dirección del eje X, podemos observar que los valores son más altos en las gráficas sin paneles sumergidos, alrededor de 5 cm/s más altas, y para este mismo caso en los 3 planos las curvas son similares con tendencia a volverse constantes pasando la posición $x=70$ cm. En el caso con paneles sumergidos en los tres planos hay diferencias donde el plano medio e inferiores curvas similares a las vistas en la pila cuadrada que describen el cambio de velocidad en el vórtice. Para el plano superior existe una concentración de picos en $x=55$ para luego aplanarse cabe mencionar que el plano superior es el único plano en el que las curvas en su mayoría son paralelas desde el inicio de la sección de control.

En la Figura 4-125 se compara la velocidad instantánea en dirección Y, en ambos casos formas de las curvas son similares con la característica que en el inicio de la sección de control el rango de variación es mayor que al final, cabe mencionar que los rangos de variación al inicio de la sección son más amplios en presencia de los paneles, pero al final los rangos de variación son similares para los dos casos. De igual forma que en la velocidad en dirección X hay una concentración de picos, aunque menos pronunciados, en el plano superior de esta investigación en $x=55$.

En la Figura 4-126 se compara la velocidad instantánea en dirección Z, la velocidad Z es similar a la velocidad en Y, de igual manera se observa que el rango de variación de la velocidad al inicio de la sección de control es mucho mayor para el caso con paneles sumergidos y al final de la sección de control el rango es menor. En este caso el rango de variación al final de la sección de control no es el mismo para los dos casos existiendo desfases de ± 2 cm/s aproximadamente en el mismo plano. para el plano más superficial esta vez no hay una concentración de $X=55$ y se observa más bien que hay una concentración de valles no muy acentuados.

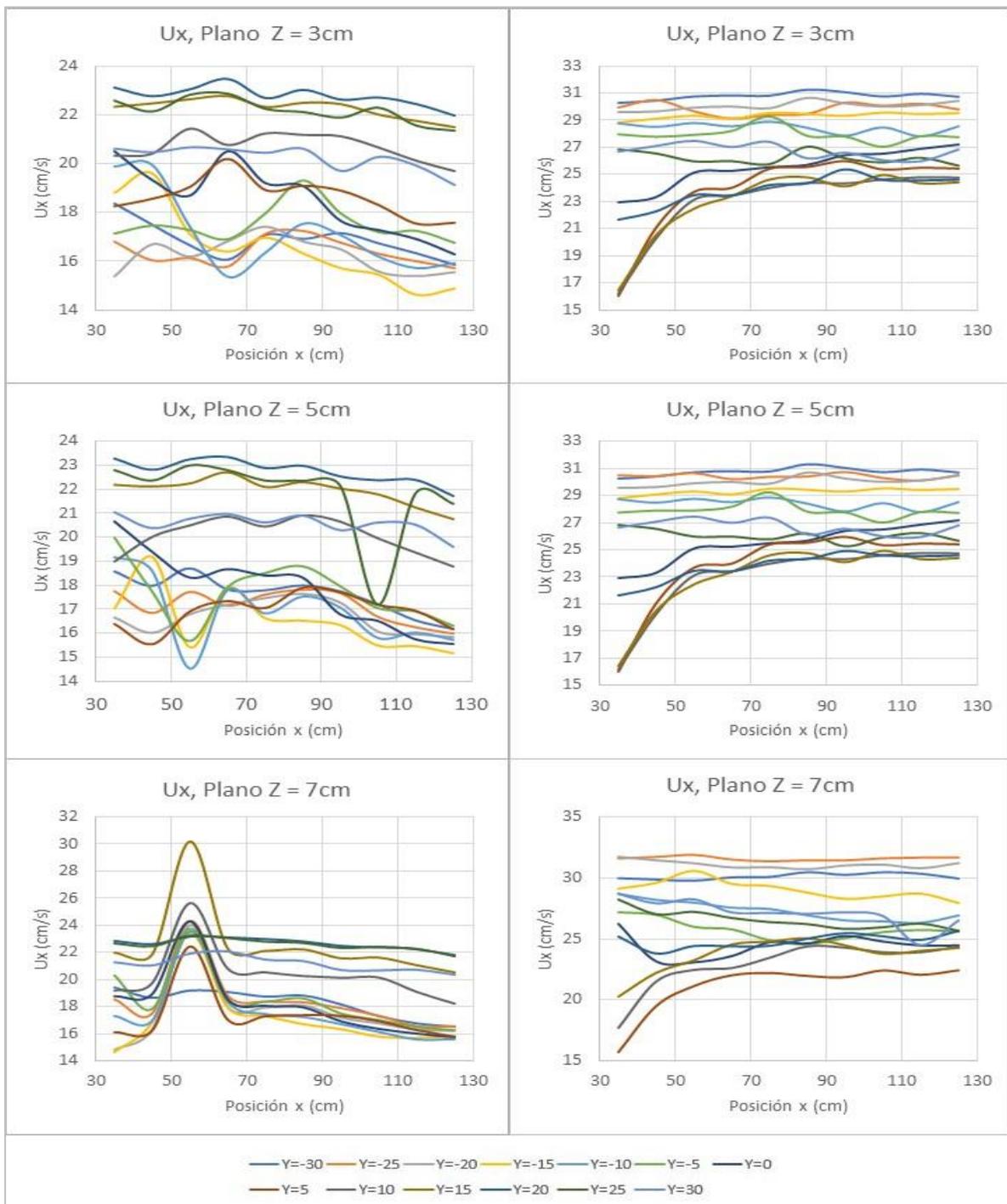


Figura 4-124 Comparación velocidad instantánea (u_x) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

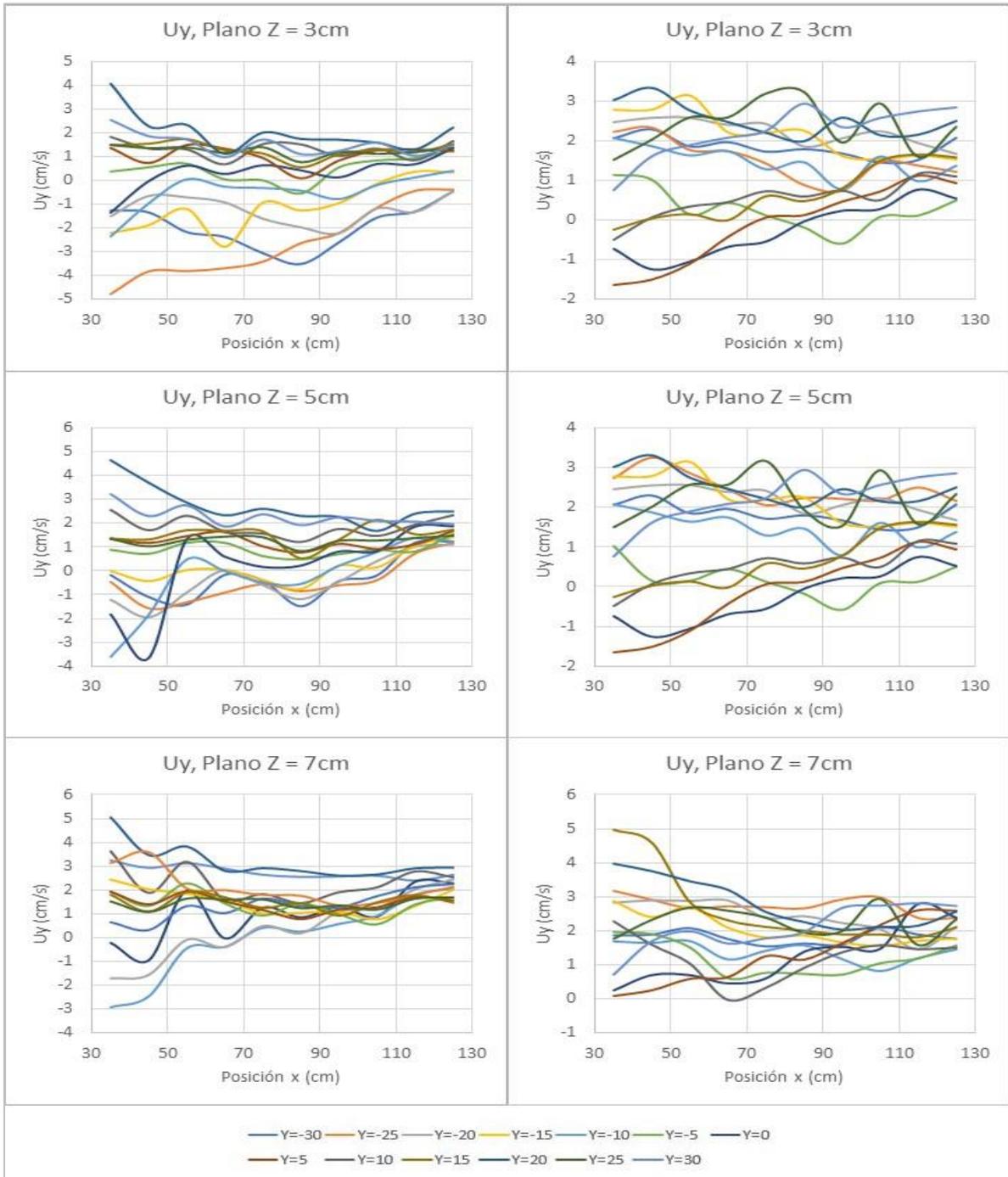


Figura 4-125 Comparación velocidad instantánea (u_y) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

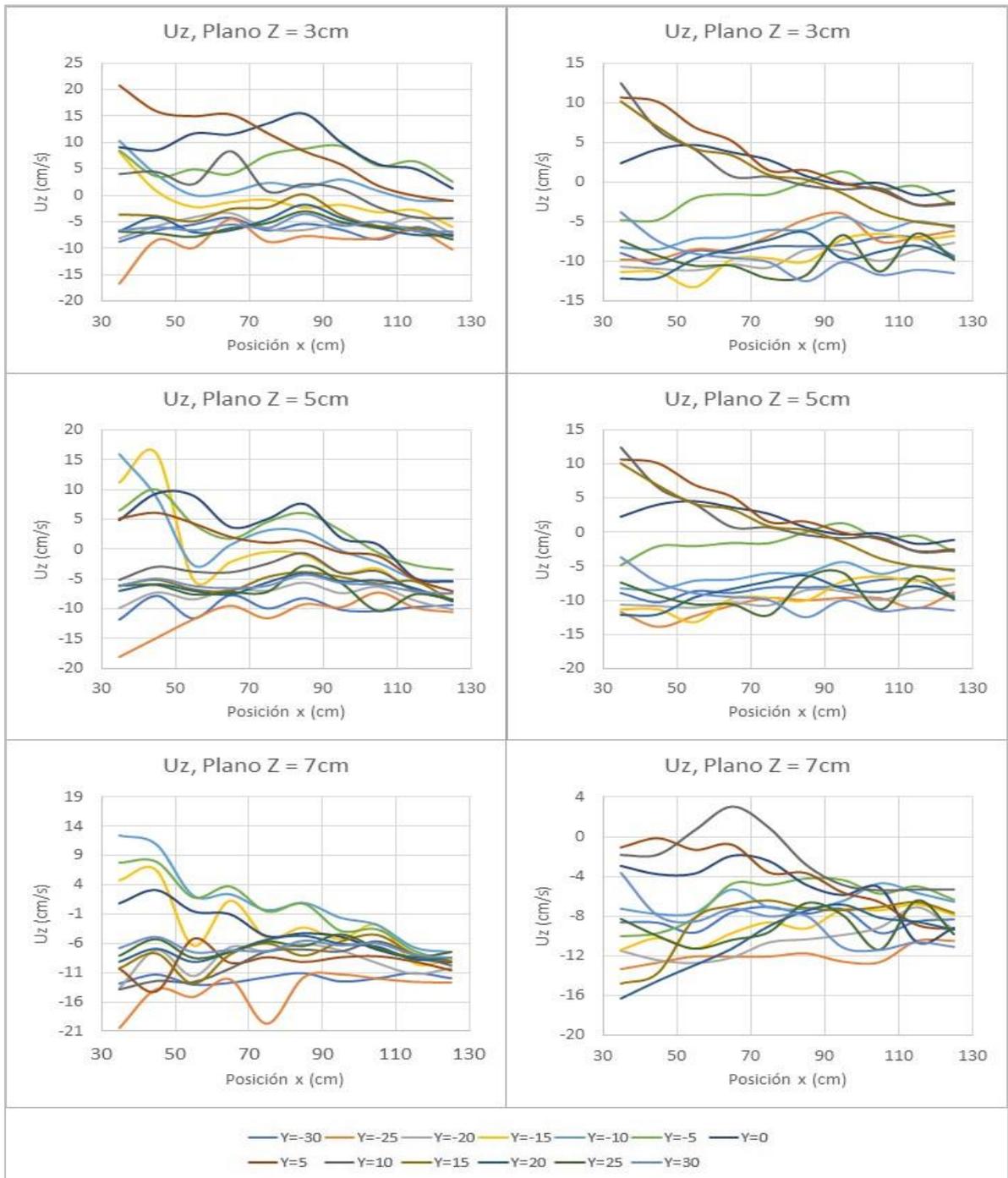


Figura 4-126 Comparación velocidad instantánea (u_z) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.2.2.2 Tensiones de Reynolds

En la Figura 4-127 se compara la tensión normal de Reynolds (ζ_{xx}), se puede observar que el uso de paneles sumergidos genera una uniformización de valores de las curvas haciendo que estas sean casi lineales y paralelas y que al final de la sección tengan valores entre 2.5 y 14 (cm/s)². Adicionalmente para el último plano en las gráficas con paneles sumergidos se observa una concentración de picos en $x=55$ al igual que en las velocidades instantáneas, más allá de ese rasgo las curvas tienden a aplanarse y a estar paralelas desde el inicio de la sección con rango de variación de valores más elevados 2 y 50 (cm/s)².

En la Figura 4-128 se compara la tensión tangencial de Reynolds (ζ_{xy}), se puede observar que el uso de paneles sumergidos reduce considerablemente el rango de valores que, en ausencia de paneles supera fácilmente los 25 (cm/s)², al final de la sección de control hay una uniformización hacia el 0 en todas las curvas.

En la Figura 4-129 se compara la tensión de Reynolds tangencial (ζ_{xz}), al igual que en el caso anterior hay una reducción considerable en el rango de valores por el uso de paneles sumergidos y una uniformización de las curvas hacia el 0, cabe mencionar que con paneles sumergidos la mayoría de curvas tienen valores negativos y al igual que ocurría con la velocidad en dirección Z hay una concentración de valles en $x=55$.

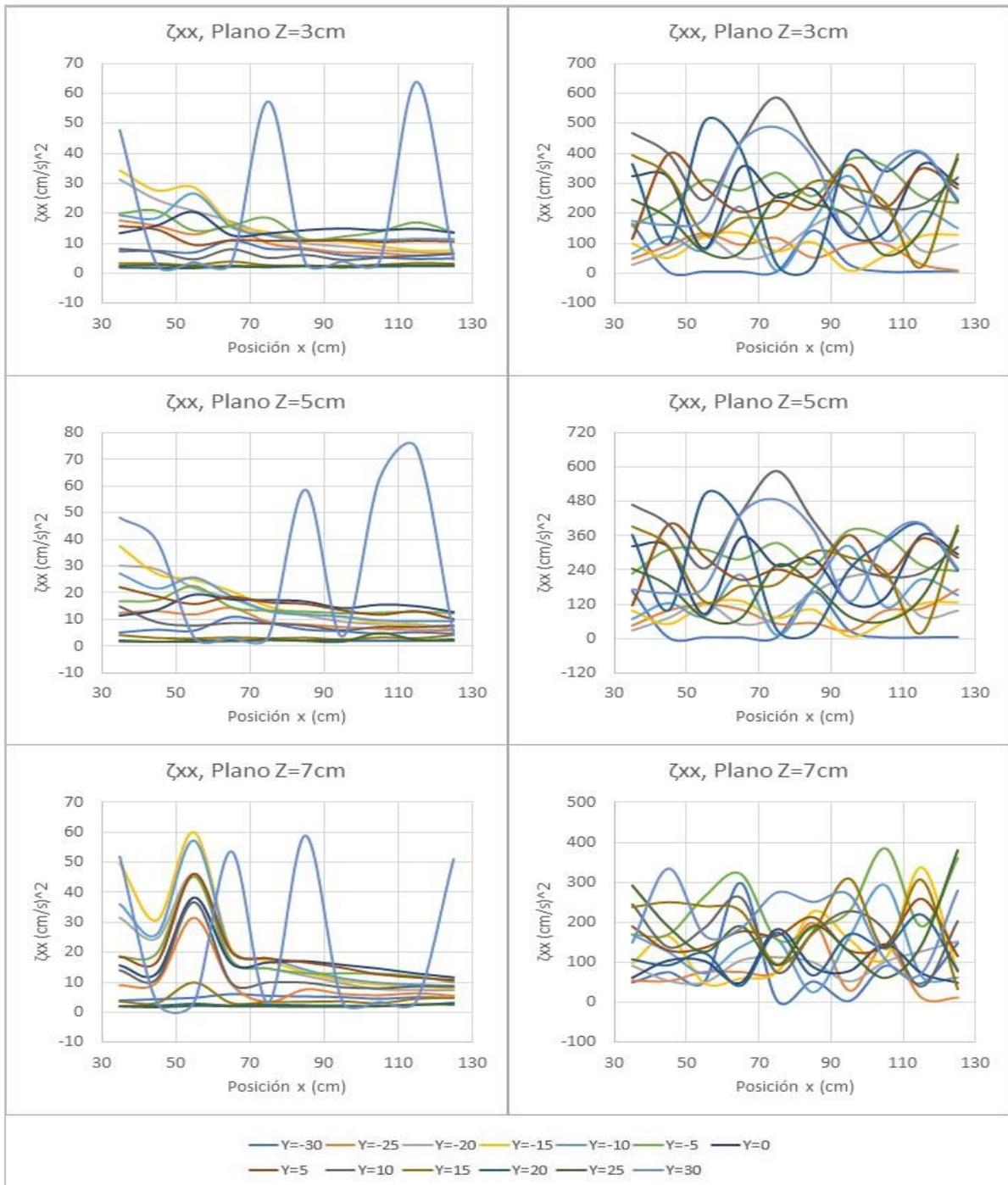


Figura 4-127 Comparación Tensión de Reynolds (ζ_{xx}) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

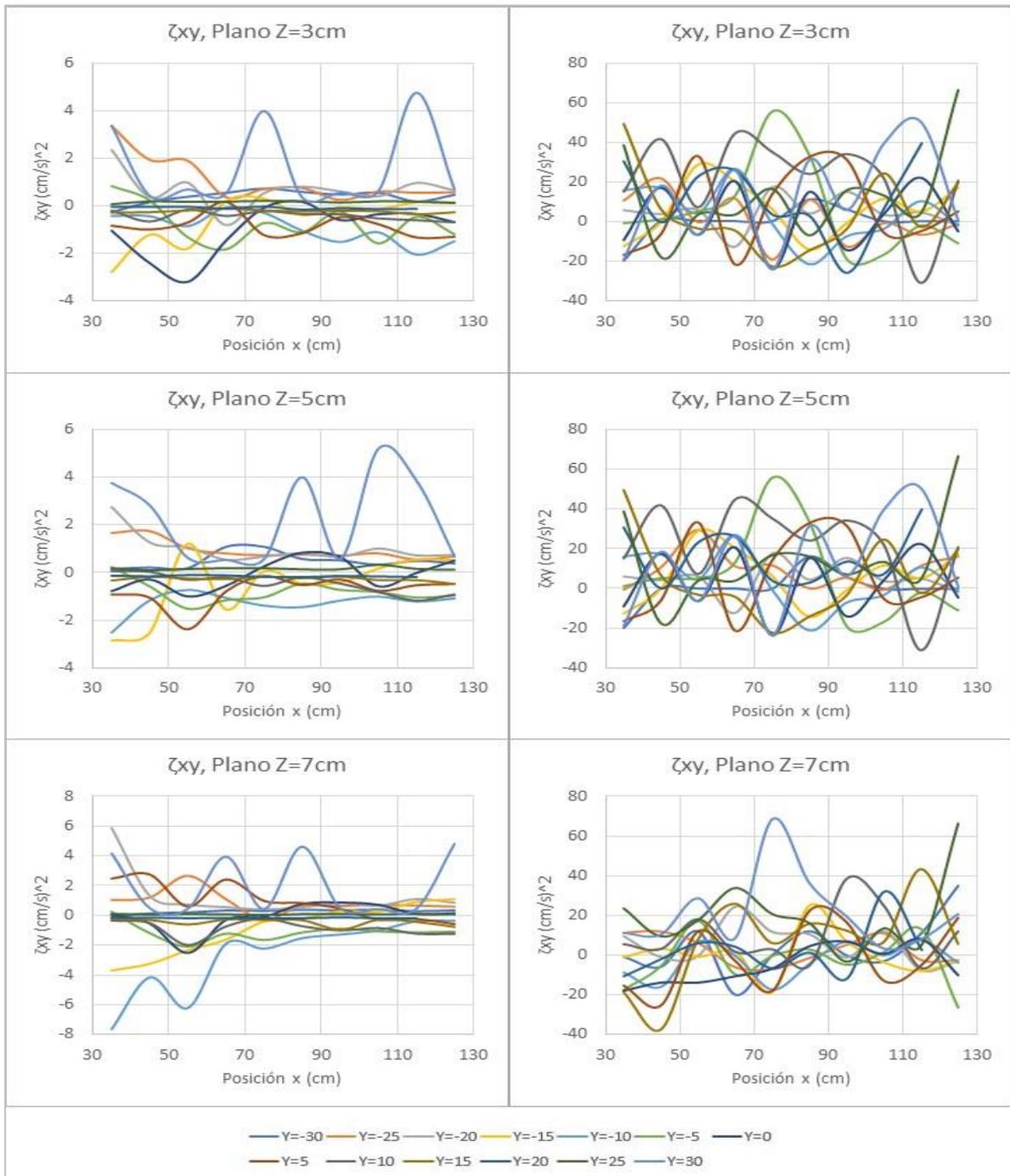


Figura 4-128 Comparación Tensión de Reynolds (ζ_{xy}) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

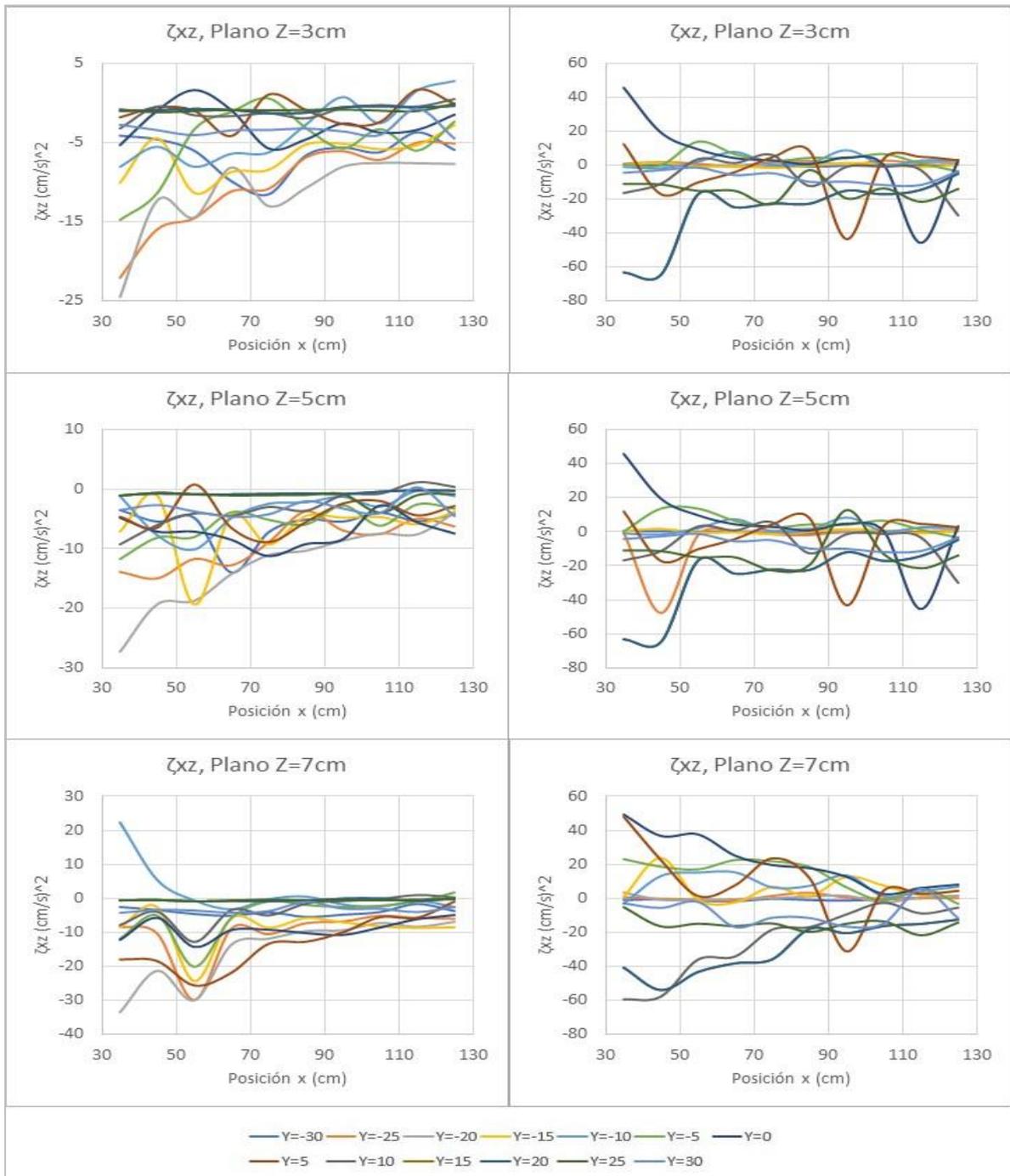


Figura 4-129 Comparación Tensión de Reynolds (ζ_{xz}) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.2.2.3 Intensidad turbulenta

En la Figura 4-130 se compara la intensidad turbulenta ($T.I.x$), se puede observar que el uso de paneles sumergidos genera una disminución en el rango de valores de aproximadamente el 10% en casi todas las curvas Y a excepción de la correspondiente a $Y=30$, esto debido a que el efecto de los paneles es mínimo en esta sección del canal. En los tres planos se tiene una alta intensidad turbulenta tanto al inicio como al final de la sección, es notoria, además la existencia de una disipación de energía hacia el final de la sección de control.

En la Figura 4-131 se compara la intensidad turbulenta ($T.I.y$) se puede observar que el uso de paneles sumergidos genera una disminución en el rango de valores de aproximadamente el 5% en todas las curvas Y . Las gráficas muestran que la intensidad puede ir de media a alta dependiendo de la curva que se analice. Donde las curvas $Y=15$, $Y=20$ y $Y=25$ las curvas que permanentemente están por debajo del 5% de intensidad. Es notoria además la existencia de una disipación de energía hacia el final de la sección de control.

En la Figura 4-132 se compara la intensidad turbulenta ($T.I.z$) se puede observar que el uso de paneles sumergidos no genera una disminución tan notoria en el rango de valores teniendo ambos casos porcentajes de intensidad similares tanto al inicio como al final de la sección de control. Al igual que en los casos anteriores es notoria la existencia de una disipación de energía hacia el final de la sección de control, pero cuyos valores máximos son de al menos el doble que los valores máximos en $T.I.x$ y $T.I.z$.

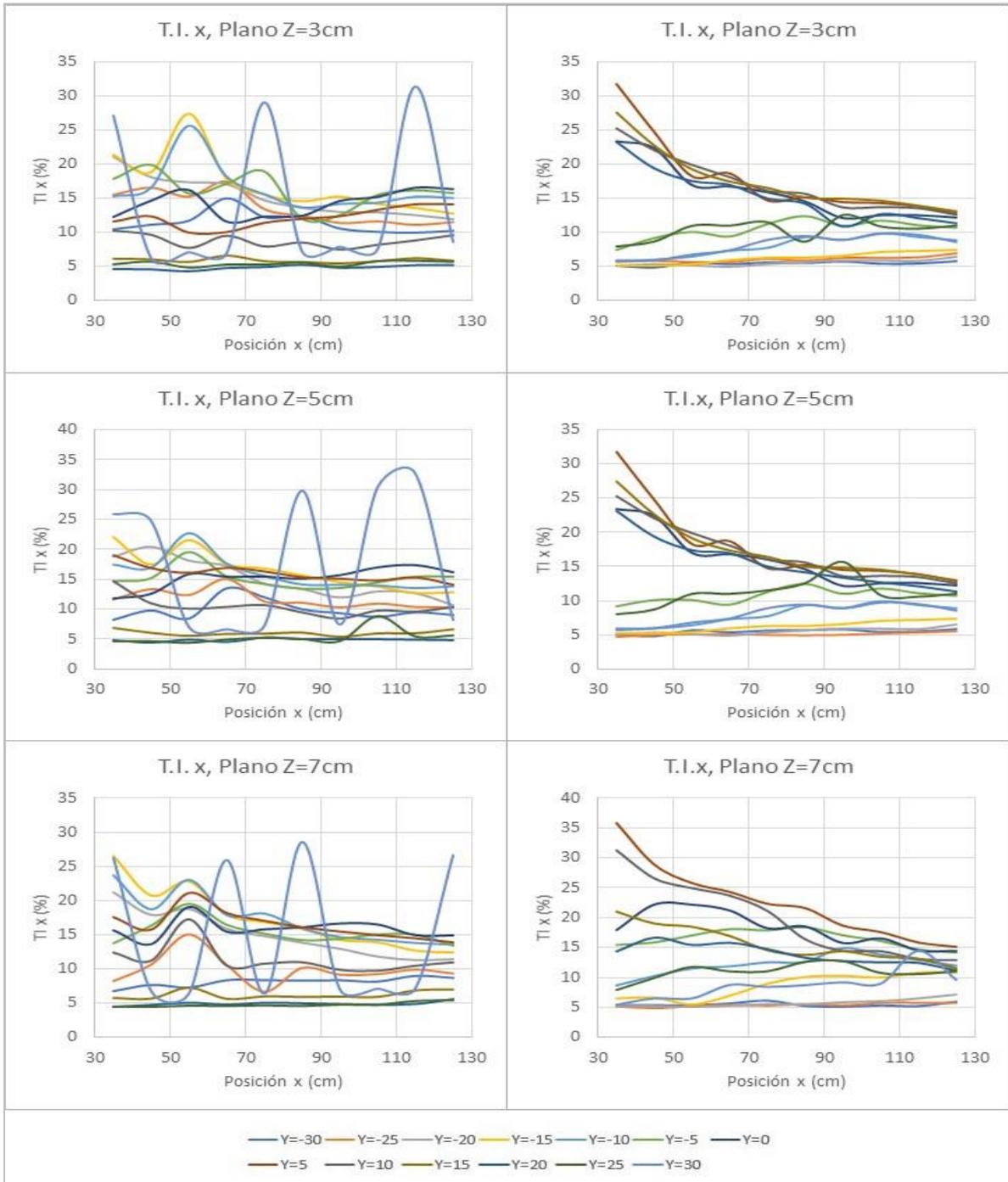


Figura 4-130 Comparación intensidad turbulenta (T.I.x) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

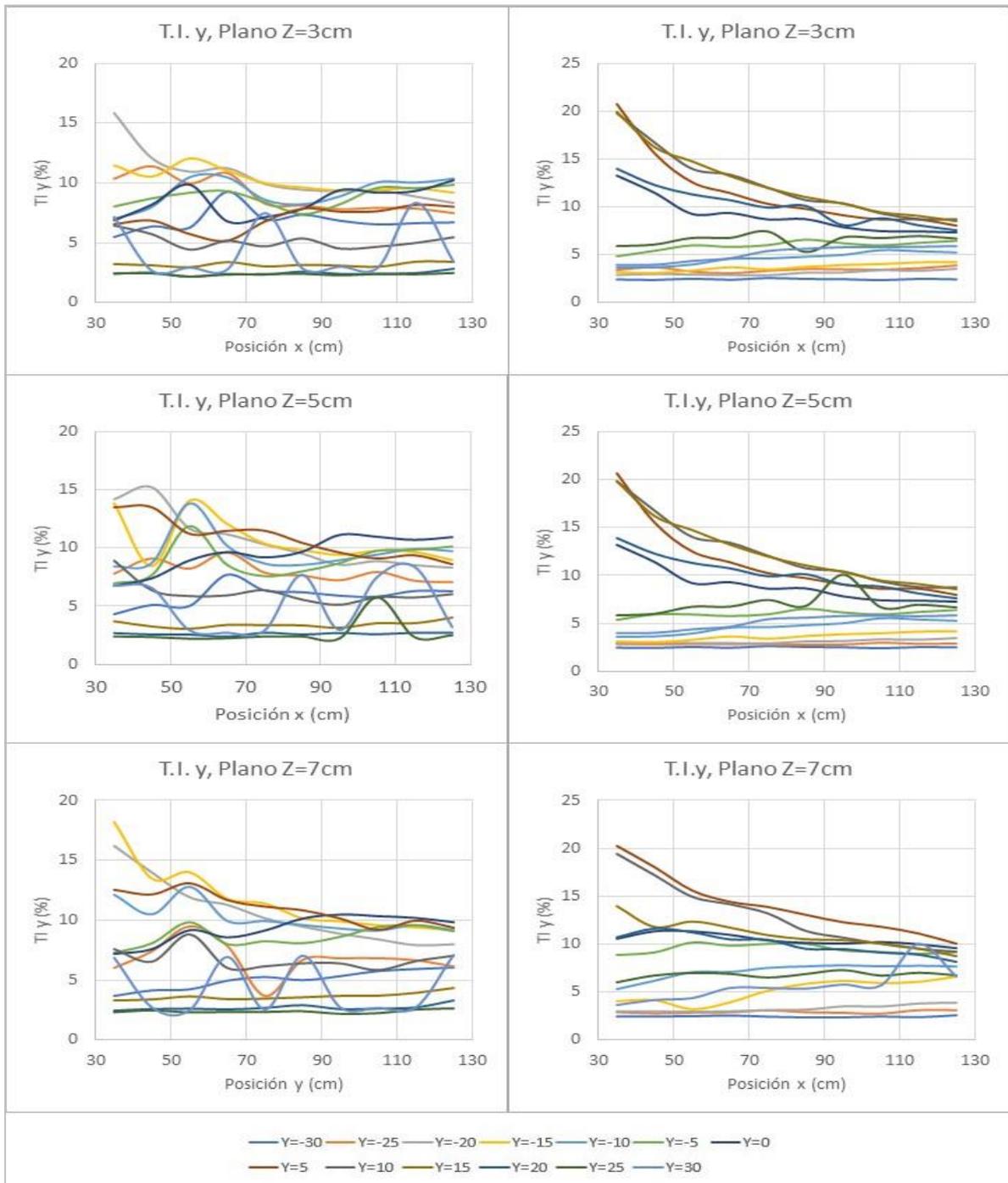


Figura 4-131 Comparación intensidad turbulenta (T.I.y) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

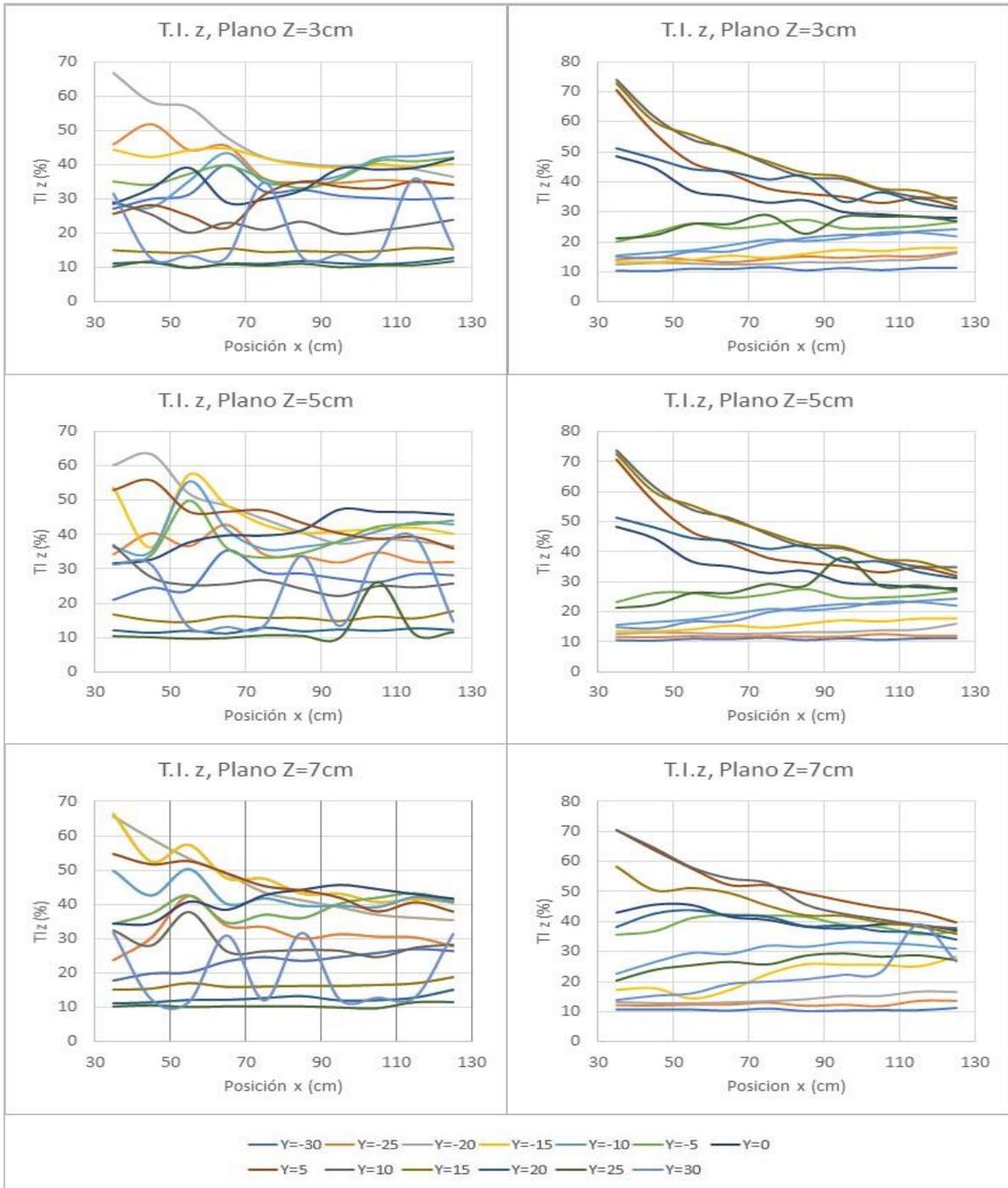


Figura 4-132 Comparación intensidad turbulenta ($T.I.z$) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.2.2.4 Energía cinética y disipación turbulenta

En la Figura 4-133 se compara la energía cinética (k), se puede observar que el uso de paneles sumergidos genera una disminución de energía en los 3 planos, donde los rangos de variación constantes lo largo de la sección de control manteniéndose entre 10 a 300 $(\text{cm/s})^2$ aproximadamente teniendo un pico máximo de 680 $(\text{cm/s})^2$ en $z=3$, algunos valores máximos cercanos a 380 $(\text{cm/s})^2$ en $z=5$ y un valor máximo 1470 $(\text{cm/s})^2$. Para los planos $z=5$ y $z=7$ los picos máximos ocurren aproximadamente en la mitad de la sección de control entre $x=75$ a $x=85$. Para el caso sin paneles hay una diferencia de rangos al inicio y al final de la sección donde de 30 a 900 $(\text{cm/s})^2$ al inicio y de 15 a 500 al final de la sección. En los dos casos no se observa una tendencia marcada.

En la Figura 4-134 se compara la disipación turbulenta (ϵ), el experimento con paneles refleja que el orden de magnitud es de 10^{-3} con pocas excepciones en el plano $z=7$ que el orden de magnitud puede subir hasta 10^{-2} . Para el caso sin paneles sumergidos el rango está en el orden de 10^{-2} , es decir, hay menor disipación de energía en presencia de paneles. En ambos casos en los planos $z=3$ y $z=5$ las curvas son similares y para el caso particular del plano $z=7$ con paneles sumergidos hay una concentración de picos en $x=55$.

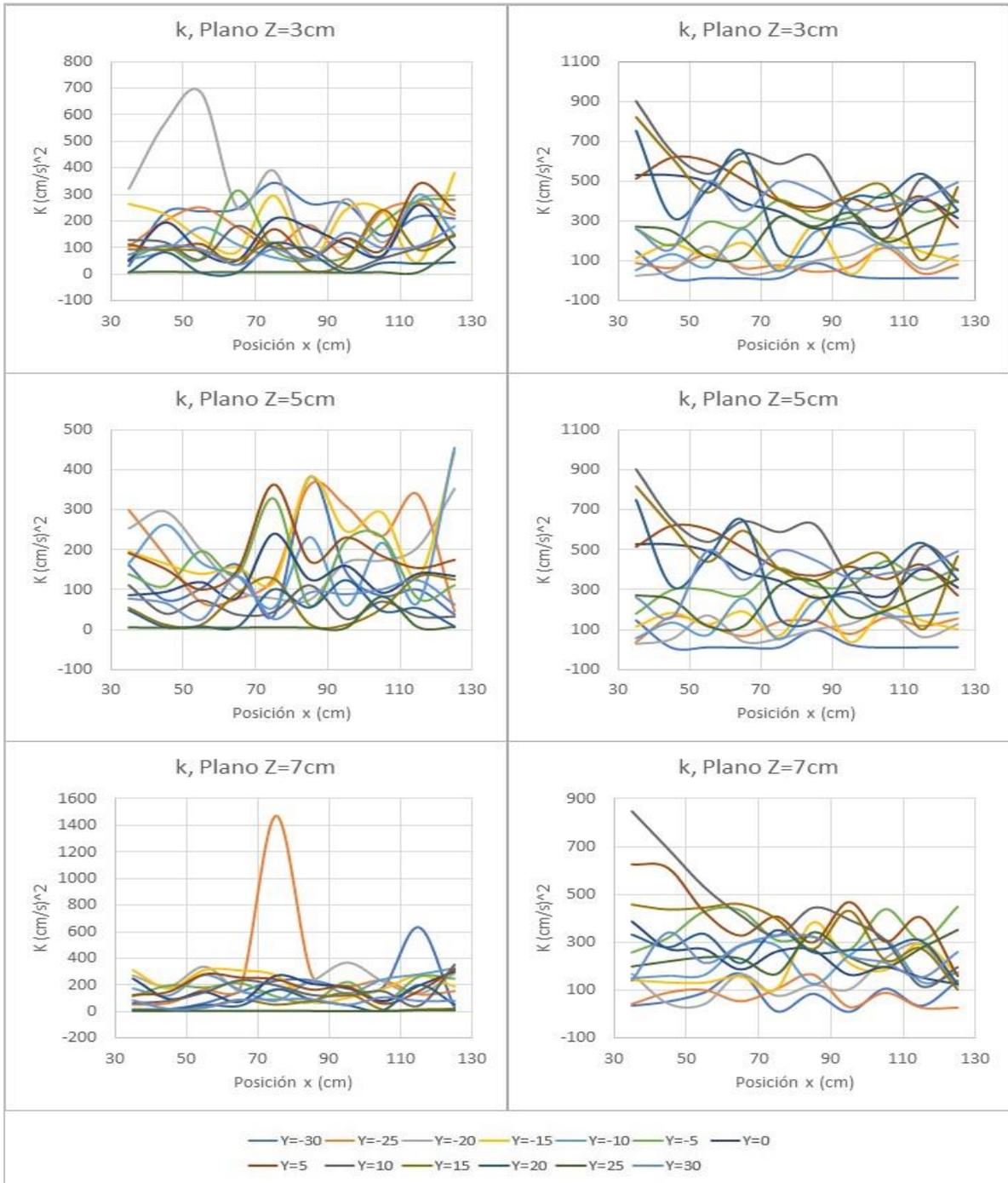


Figura 4-133 Comparación energía cinética (k) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

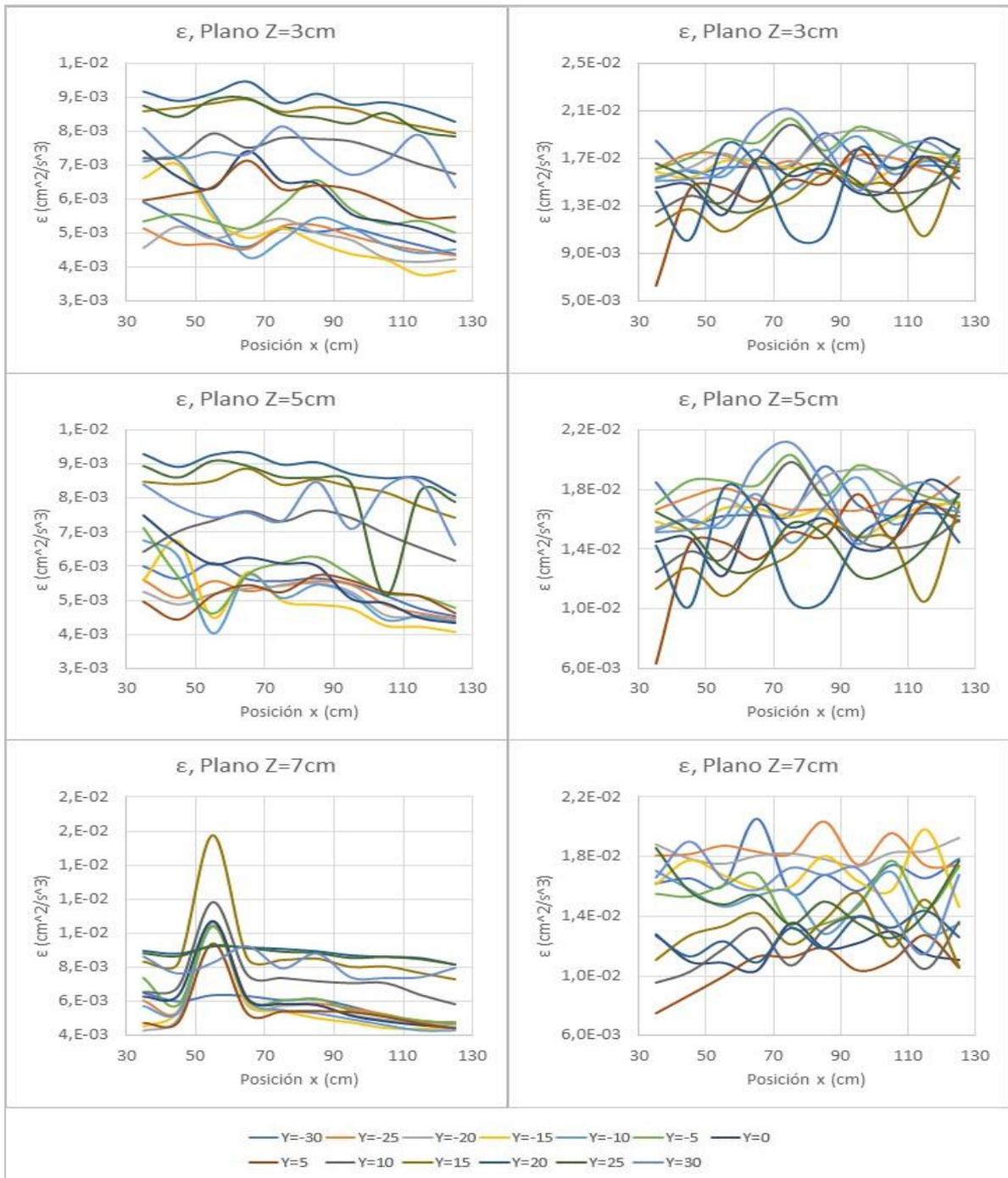


Figura 4-134 Comparación disipación turbulenta (ϵ) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.2.2.5 Escalas de Kolmogórov

En las Figura 4-135 se compara la microescala de longitud (η_k), hay una diferencia notoria en la forma que tienen las curvas en ambos casos debido a que este parámetro depende de u_x las formas de las curvas son similares a las vistas en u_x . En ambos casos el orden de magnitud es de 10^{-4} donde el caso sin paneles sumergidos Donde los valores son ligeramente más bajos estando por debajo de $1,1 \times 10^{-4}$. El plano más superficial para el caso con paneles sumergidos concentra un cúmulo de valles en $x=55$, pasando ese punto se linealizan y permanecen casi constantes y paralelas, existiendo una única curva que está por debajo de $1,1 \times 10^{-4}$; cabe mencionar que para el caso con paneles sumergidos el rango de variación permanece casi constante a lo largo de la sección mientras que para el caso sin paneles sumergidos el rango de variación es más amplio al principio de la sección de control.

En la Figura 4-136 se compara la microescala de tiempo (t_η), la forma de las curvas es similar al de la escala de longitud, igualmente este parámetro depende de u_x , los valores para el caso sin paneles sumergidos son hasta 4×10^{-2} s más altos que para el caso con paneles sumergidos (representa un aumento de un 250%). Los paneles sumergidos provocan que el rango de variación de este parámetro se mantenga constante a lo largo de la sección de control

En la Figura 4-136 se compara la microescala de velocidad (U_η), los rangos de variación son similares en los dos casos entre 8.5×10^{-3} y 1.2×10^{-2} . El plano $z=7$ del caso con paneles presente la acumulación de picos típica de este plano en $x=55$. Al igual que en las escalas anteriores, ambos casos siguen las curvas de tendencia propias de su respectivo caso de estudio.

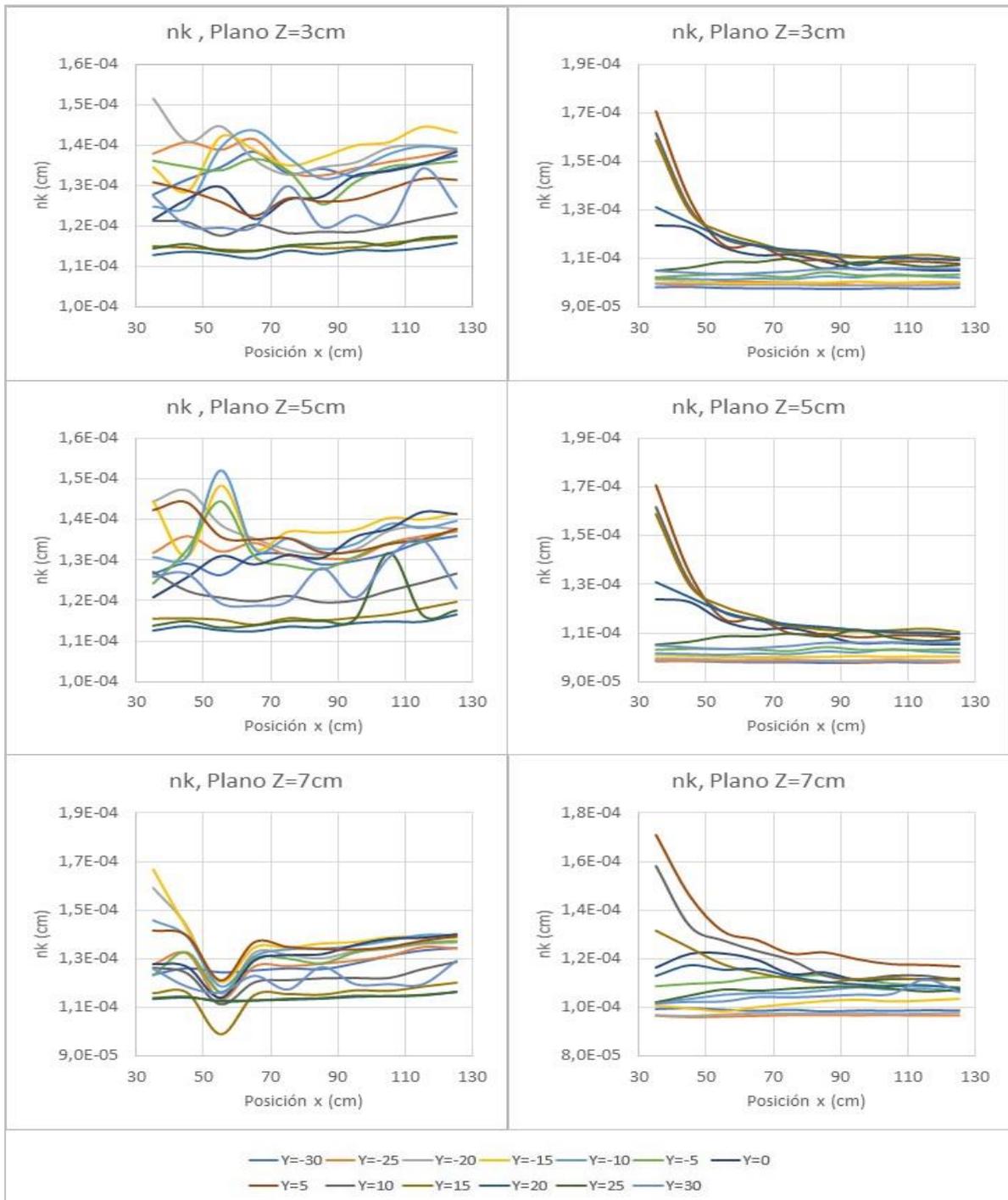


Figura 4-135 Comparación escala de longitud (n_k) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

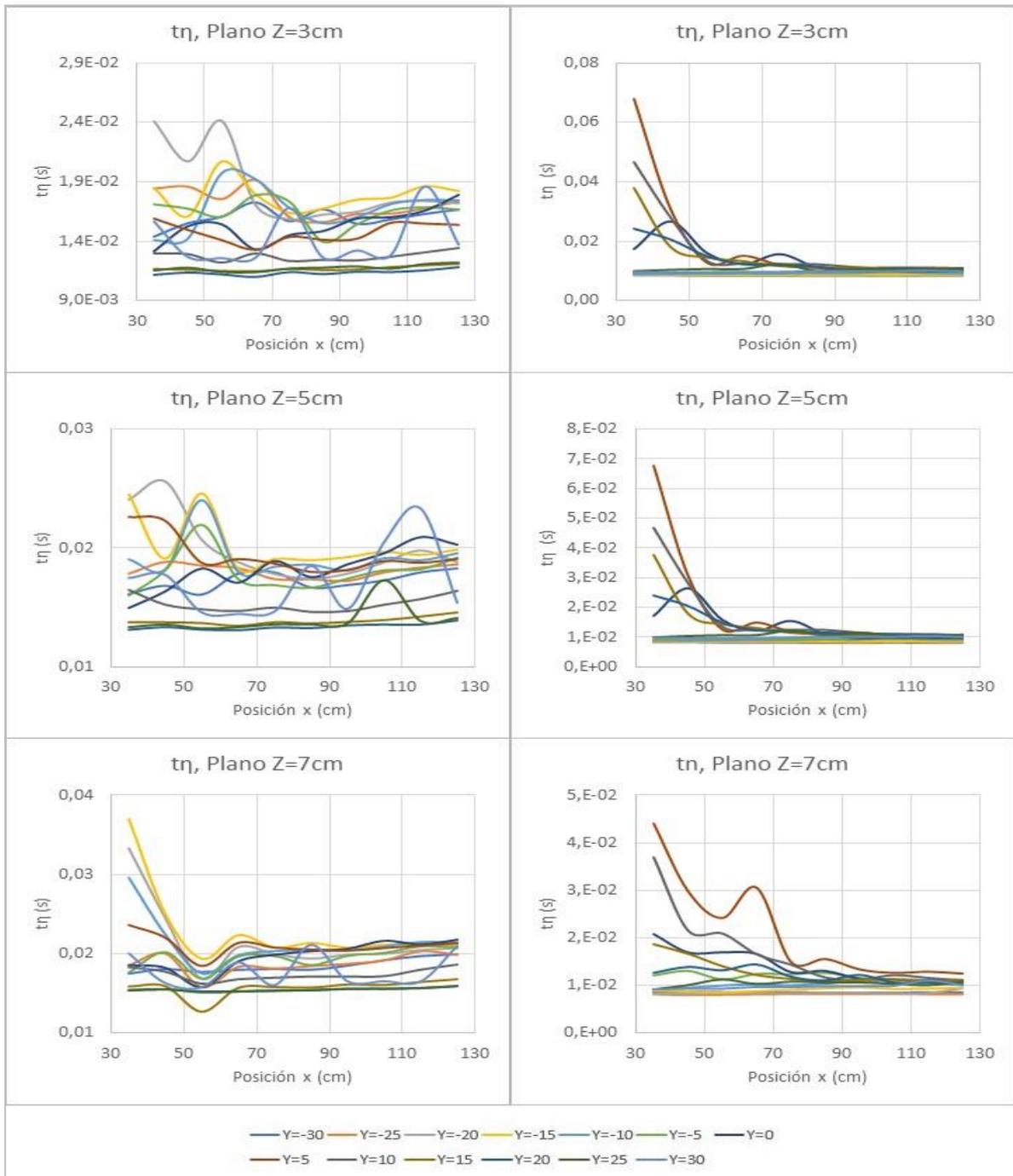


Figura 4-136 Comparación escala de tiempo (t_η) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

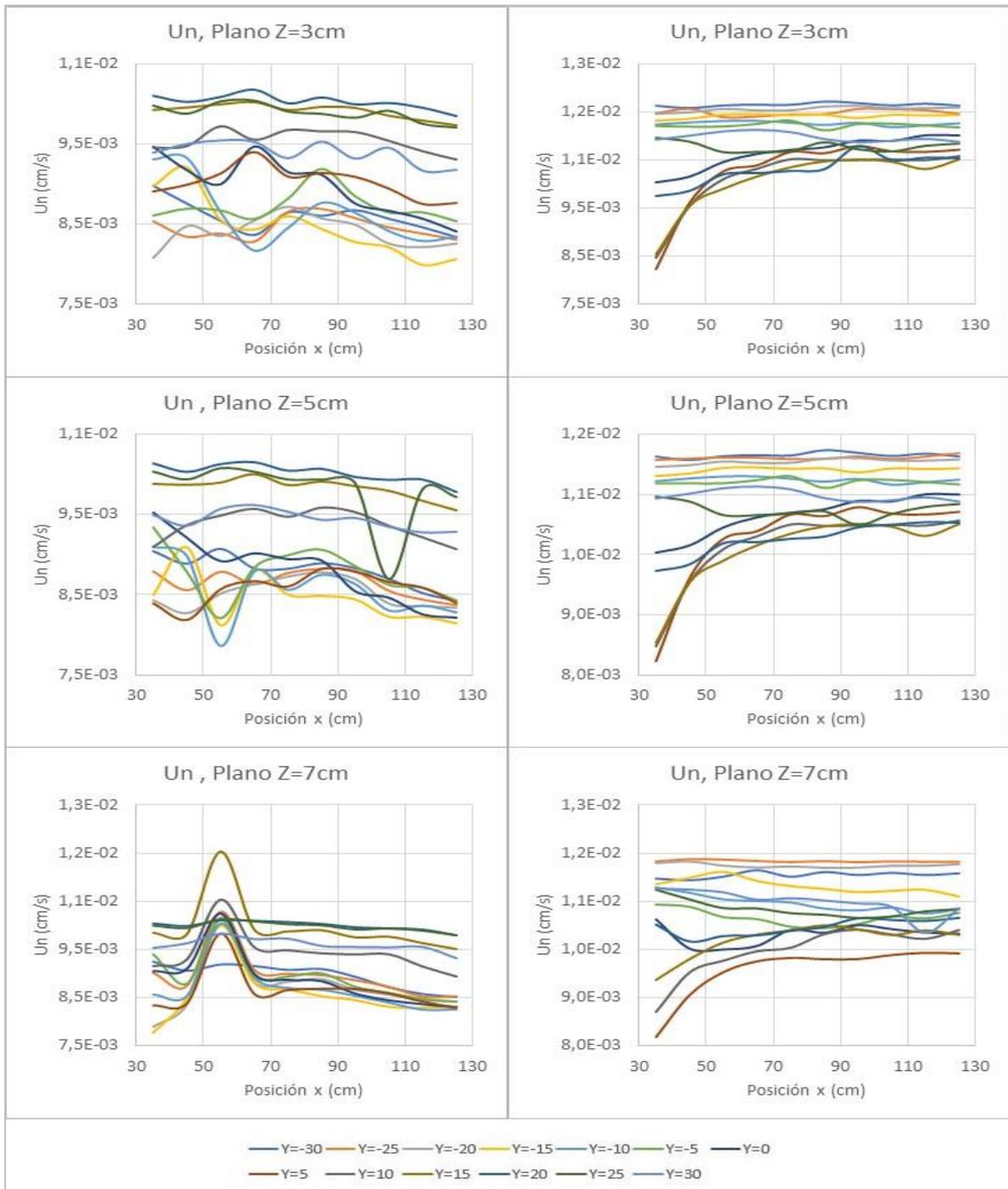


Figura 4-137 Comparación escala de velocidad (U_n) con paneles (izquierda) sin paneles (derecha) Pila circular

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

4.2.2.6 Socavación

Para este análisis se tomará como nivel 0 el valor que marcó el limnómetro antes de que se deje pasar el agua sobre la arena (22 cm) esto por facilidad de cálculo ya que las ecuaciones para calcular la socavación teórica miden este parámetro desde el nivel del lecho antes del proceso de erosión. El experimento sin paneles sumergidos arrojó un valor máximo de socavación de 10 cm correspondiente al fondo del canal, esto es una limitante debido a que no se conoce el valor máximo real de socavación del experimento. La Tabla 4-20 indican todos los valores teóricos máximos de socavación para la pila circular, se asumirá el valor de 15,1 cm correspondiente al promedio entre los diferentes métodos como el máximo real. De la figura 4-108 podemos obtener el valor de socavación máximo real con paneles sumergidos que es de 8,2 cm. con esos datos se puede estimar que el uso de paneles redujo hasta en un 45% la socavación local (Tabla 4-21).

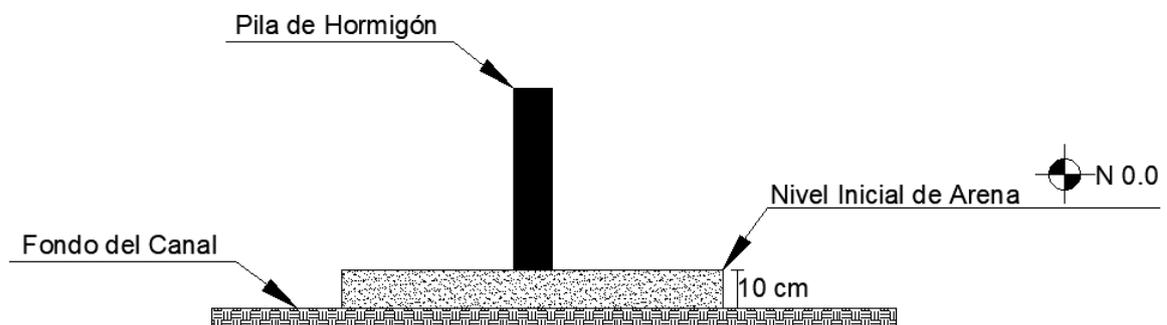


Figura 4-138 Esquema de niveles para comparar la socavación

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-20*Resumen de socavación teórica. Pila circular*

Método	Ds	Unidad
Universidad Estatal de Colorado	12,78	cm
Froehlich	13,45	cm
Laursen y Toch	18	cm
Maza-Sánchez	17	cm
Melville y Coleman	14,17	cm
Promedio	15,08	cm

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

Tabla 4-21*Comparación entre socavaciones. Pila circular*

Socavación sin paneles	10	cm
Socavación con paneles	8,2	cm
Reducción	18	%

Fuente: Barros y Echeverría (2020)

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- El uso de paneles sumergidos genera vórtices que se evidencian en el comportamiento de la velocidad a lo largo de la sección de control. Dos pares de curvas en dirección del flujo (u_x) con una misma numeración de “Y” y signos contrarios describen una hélice cuyos picos coinciden con el valle de su curva opuesta y a medida que el punto de medición se acercan al centro del canal las curvas tienden a tomar los mismos valores.
- La sección de la pila influye en la forma que tendrán las curvas de velocidad, la pila circular tiene curvas más suaves y planas a lo largo de la sección. Esto debido a que el cambio de dirección del flujo a su alrededor ocurre de forma suave y paulatina, en cambio con la pila cuadrada hay dos cambios de dirección bruscos de 90° que el agua debe hacer para rodear la pila lo que genera curvas más pronunciadas.
- El efecto de los vórtices formados es más notorio en la pila cuadrada debido al efecto que tiene en el flujo ya que requiere más tiempo y espacio para lograr disipar la turbulencia inducida.
- El foso de socavación fue más grande en la pila cuadrada en donde el uso de paneles sumergidos generó un mayor porcentaje de relleno de éste a comparación de la pila circular. El efecto de la erosión depende mucho de la forma de la sección de la pila siendo la pila con el cuerpo más romo la que genera menos erosión.
- Los paneles sumergidos inducen vórtices que altera la magnitud y dirección de la velocidad lo que provoca que la velocidad media se vea disminuida, esto influye en los rangos de variación de las tensiones de Reynolds que, al depender de la velocidad media y la velocidad instantánea, hará que sean rangos más pequeños en comparación para un caso sin paneles sumergidos.
- La dirección en la que son colocados los paneles influye en el desplazamiento y la dirección en que se moverá el sedimento según el ángulo de ataque del panel.

- Independientemente de la sección de la pila o del uso de paneles el mayor porcentaje de intensidad turbulenta, más del 70%, estará alrededor del eje Z
- El uso de paneles sumergidos provoca una disminución de la energía cinética en el flujo a medida que se va ascendiendo hacia la superficie, esto disminuiría la cantidad de sedimento arrastrado por el flujo.
- El uso de paneles sumergidos es efectivo para reducir la socavación local en pilas de puente, su efectividad estará influenciada por la sección que tenga la pila siendo menos efectiva en geometrías circulares.
- Los paneles pueden ser considerados como estructuras de protección fáciles de diseñar y con un gran desempeño por el alto porcentaje de reducción de socavación que producen (18-39%).
- En ambos casos; pila sección cuadrada y circular, los hoyos se generan en la esquina aguas arriba de los paneles coincidiendo con lo expuesto por Ghorbani & Kells (2008).
- El espesor de la capa de sedimento usado (10cm) es insuficiente y no permite visualizar la socavación por completo, se recomienda realizar el cálculo de la socavación teórica antes para tener un mínimo requerido.
- Una vez instalados los paneles sumergidos no son muy invasivos con el entorno, aunque se recomienda un estudio de fauna y flora para cada caso.
- Para la implementación de estos paneles sumergidos se sugiere un estudio completo de las características hidro morfológicas del río ya que podría ser necesario el diseño de una cimentación para evitar el volcamiento de los elementos.
- Los beneficios que tiene la aplicación de estos elementos son el bajo costo que tendría su aplicación, la reducida cantidad de materiales, su diseño simple y su mínimo o nulo mantenimiento.
- Se recomienda realizar un experimento en condiciones similares usando un material bien graduado, determinar la socavación teórica antes de cualquier ensayo con el fin de conocer el espesor mínimo que deberá tener la capa de sedimento para un mejor contraste entre los resultados teóricos y prácticos.
- Este experimento estuvo limitado por la cantidad de arena disponible y por el equipo necesario para hacer los levantamientos topográficos, para una

mayor precisión en los resultados finales se recomienda usar equipo que permita tomar datos lo más cercanos posible a las pilas puesto que es la sección de mayor interés, así como mayor cantidad de sedimento.

- En el presente trabajo se ensayó un sistema de paneles colocados en fila atrás de una pila, para futuros trabajos se propone el estudio de colocar varias filas de paneles y analizar la interacción entre paneles, así como también el efecto en pilas de sección conocida.
- Se recomienda realizar una comparación experimental entre este y otros métodos de protección de cauces a fin poder determinar cuantitativamente y cualitativamente los beneficios que tendría cada una de estas.
- Se recomienda realizar una modelación numérica del fenómeno donde se pueda solventar las limitaciones físicas presentes en esta investigación como el espesor de la capa de sedimento y las formas del fondo.

CAPÍTULO 6: REFERENCIAS

- Basile, P. (2018). *Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales* (1ra ed.). UNR Editora.
- Bermúdez, M. (2011). *Estudio experimental de la erosión local en pilas de puente cuadradas: Influencia de la anchura de la pila*. [Tesina]. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Carrillo, J. (2014). *Metodología numérica y experimental para el diseño de los cuencos de disipación en el sobrevertido de presas de fábrica*. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Cartagena]. <http://hdl.handle.net/10317/4038>
- Chamorro, S., Jimenez, C., De León, C., Rincón, K., Malaver, J. J., & Grau, V. (2018). *Análisis de las causas estructurales del colapso de puentes en Colombia*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16102.11842>
- Chiliquina, J., & Pinto, C. (2019). *Análisis experimental en modelo físico de fenómenos de turbulencia causantes de erosión alrededor de pilas de puente utilizando acoustic doppler velocimeter ADV*. [Tesis de ingeniería]. Escuela Politécnica Nacional.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Mc Graw Hill.
- Coleman, S. E., & Melville, B. W. (2001). *Case Study: New Zealand Bridge Scour Experiences*. 13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:7\(535\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:7(535))

- Davidson, P. (2004). *Turbulence: An introduction for scientists and engineers* (5ta ed.). Oxford University Press.
- Galiano, L., & Toapaxi, J. (2010). *Análisis de la socavación en cauces naturales [Tesis de ingeniería]. Escuela Politécnica Nacional.*
- Ghorbani, B., & Kells, J. A. (2008). *Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier. Journal of Hydraulic Research, 46(5), 610-619. <https://doi.org/10.3826/jhr.2008.3003>*
- Hamad, K. (2015). *Submerged vanes turbulence experimental analysis [Tesis de doctorado]. Universidad Politécnica de Cataluña.*
- Huei-Tau, O., & Jihn-Sung, L. (2013). *Journal of Marine science and technology. Design optimization of a submerged vane with streamlined profile for sediment management in rivers, 21. <https://doi.org/10.6119/JMST-012-0606-1>*
- Juárez, E., & Rico, A. (1974). *Mecánica de suelos: Flujo de agua en suelos* (Vol. 3). Limusa.
- Koschmieder, E. L. (1993). *Bénard Cells and Taylor Vortices. Cambridge University Press.*
- López, O. (2002). *Mecánica computacional. Modelamiento computacional de la calle de vórtices de Karman por dinámica de vorticidad, XXI.*
- Martín, J. (2003). *Ingeniería de ríos. Alfaomega.*

Meier, H. U., & Bradshaw, P. (2012). *Perspectives in Turbulence Studies: Dedicated to the 75th Birthday of Dr. J. C. Rotta International Symposium DFVLR Research Center, Göttingen, May 11–12, 1987*. Springer Science & Business Media.

Muñoz, E. (2003). *Estudio de las causas de colapso de algunos puentes en Colombia (p. 20)*. Pontificia Universidad Javeriana.

Odgaard, J., (2003). *River training and sediment management with submerged vanes*. ASCE PRESS.

Odgaard, J., & Spoljaric, A. (1986). *Journal of Hydraulic Engineering*. Sediment control by submerged vanes, 117.

Odgaard, J., & Wang, Y. (1990). *Sediment control in bridge waterways (N.º 336; p. 64)*. Iowa Institute of Hydarulic Research.

Odgaard, J., & Wang, Y. (1991). *Journal of Hydraulic Engineering*. Sediment management with submerged vanes. I: Theory, 117.

Palman, L., Montagnini, M., Pez, M., & Trento, A. (2015). *Mediciones en laboratorio con equipo Flowtracker ADV. IV Simposio sobre métodos experimentales en hidráulica, La Plata, Argentina*.

Raudkivi, A. (1998). *Loose boundary Hydraulics*. A.A. Balkema Publishers.

Richardson, E. V., & Davis, S. R. (1995). *Evaluating scour at bridges. (dot:1024)*. HEC 18. <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/1024>

- Richardson, E. V., & Davis, S. R. (2001). *Evaluating scour at bridges (Reporte técnico FHWA NHI 01-001 HEC-18; p. 378)*. National Highway Institute.
- Rodríguez, A. (2015). *Estudio comparativo de dos sistemas de medición de aforo (tiempo de travesía, efecto Doppler) [Tesis de ingeniería]*. Universidad autónoma metropolitana.
- Schmitt, F. G. (2007). *About Boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: Historical remarks and a direct evaluation of its validity*. *Comptes Rendus Mécanique*, 335(9), 617-627. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2007.08.004>
- Shrestha, C. (2015). *Bridge pier flow interaction and its effect on the process of scouring [Tesis de doctorado]*. University of Technology Sydney.
- Sotelo, G. (1997). *Hidraulica general: Fundamentos (Vol. 1)*. Limusa.
- Street, R., & Vennard, J. (1979). *Elementos de mecánica de fluidos (Segunda)*. Editorial continental S.A.
- Türkben, A. B. (2018). *Experimental Study of Submerged Vanes in Intakes under Sediment Feeding Conditions*. *E3S Web of Conferences*, 40, 03016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184003016>
- Vitanyi, P. M. B. (2007). *Andrey Nikolaevich Kolmogorov*. *Scholarpedia*, 2(2), 2798. <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.2798>
- Voulgaris, G., & Trowbridge, J. (1998). *Journal of atmospheric and oceanic technology*. *Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for turbulence measurements*, 15, 289.

White, F. (2003). Mecánica de fluidos (Quinta edición). Mc Graw Hill.