

# Tabla de Contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.2.1. Generales . . . . .	3
1.2.2. Específicos . . . . .	3
1.3. Metodología . . . . .	3
1.3.1. Marco teórico . . . . .	3
1.3.2. Simulaciones numéricas . . . . .	4
1.3.3. Análisis experimental . . . . .	4
1.3.4. Análisis de resultados . . . . .	4
1.4. Contenidos del informe . . . . .	4
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>6</b>
2.1. Introducción . . . . .	6
2.2. Termo-hidrodinámica de lagunas someras . . . . .	7
2.3. Estudio Teórico . . . . .	9
2.3.1. Dinámica de Fluidos . . . . .	9
2.3.2. Tasas de Decaimiento . . . . .	12
2.3.3. Dispersión . . . . .	13
2.4. Conclusiones . . . . .	14
<b>3. Análisis Numérico</b>	<b>16</b>
3.1. Aspectos generales . . . . .	16
3.1.1. Malla Numérica . . . . .	16
3.1.2. Parámetros utilizados . . . . .	17
<b>4. Estudio Experimental</b>	<b>19</b>
4.1. Descripción general . . . . .	19
4.2. Instrumentación . . . . .	23
4.2.1. Acelerómetro . . . . .	23
4.2.2. ADV . . . . .	24
4.2.3. Tacómetro . . . . .	24
4.2.4. GoPro . . . . .	25
4.3. Metodología Experimental . . . . .	25
4.3.1. Experimentos de Dinámica de Modos . . . . .	25
4.4. Experimentos de Coeficiente de Dispersión . . . . .	26

4.5. Procesamiento de Datos . . . . .	27
<b>5. Resultados Numéricos y Experimentales de la Dinámica de los Modos</b>	<b>28</b>
5.1. Resultados numéricos . . . . .	28
5.2. Resultados experimentales . . . . .	30
5.2.1. Análisis de Series de Velocidad . . . . .	30
5.2.2. Velocidades Máximas . . . . .	44
5.2.3. Tasas de Decaimiento . . . . .	45
<b>6. Resultados Experimentales de Dispersión de Sustancias</b>	<b>51</b>
6.1. Relación entre la saturación en la escala de grises y la concentración integrada en la vertical . . . . .	51
6.2. Procesamiento de Videos y Coeficientes de Dispersión Resultantes . . . . .	53
<b>7. Conclusiones y Comentarios</b>	<b>66</b>
<b>8. Bibliografía</b>	<b>68</b>

# Índice de Tablas

5.1.	Frecuencias normales encontradas con el modelo numérico ( $w_1, w_2$ y $w_3$ ) y encontradas experimentalmente ( $w_1^*, w_2^*$ y $w_3^*$ ) . . . . .	28
5.2.	Frecuencias definitivas a utilizar en los experimentos de las series de velocidades en el agua y en los del coeficiente de dispersión. . . . .	30
5.3.	Velocidades máximas en el eje x para todos los puntos ( $V_{x-n}$ corresponde a la velocidad medida en el punto n de medición). . . . .	44
5.4.	Velocidades máximas en el eje y para todos los puntos ( $V_{y-n}$ corresponde a la velocidad medida en el punto n de medición). . . . .	44
5.5.	Tasas de decaimiento e intervalo de confianza de un 95% para las series de velocidad en su componente x ( $b_{x-n}$ , donde n es el punto de medición). . . .	45
5.6.	Tasas de decaimiento e intervalo de confianza de un 95% para las series de velocidad en su componente y ( $b_{y-n}$ , donde n es el punto de medición). . . .	45
5.7.	Estadística de los valores de las tasas de decaimiento de las series de velocidad en el eje x. . . . .	47
5.8.	Estadística de los valores de las tasas de decaimiento de las series de velocidad en el eje y. . . . .	47
5.9.	Promedio de las tasas de decaimiento con distinta frecuencia y para una misma altura. Los datos corresponden a las tasas de decaimiento de las series de velocidad en el eje x. . . . .	49
5.10.	Datos de decaimiento y profundidad presentados por Wüest et al. (2000) en distintos cuerpos de agua. . . . .	49
6.1.	$K_{ax}$ y el intervalo de confianza para todas las frecuencias y para todas las alturas. . . . .	58
6.2.	$K_{ay}$ y el intervalo de confianza para todas las frecuencias y para todas las alturas. . . . .	58
6.3.	Largo en el eje x de las manchas asociadas a los coeficientes de dispersión en el mismo eje. . . . .	60
6.4.	Largo en el eje y de las manchas asociadas a los coeficientes de dispersión en el mismo eje. . . . .	60
6.5.	Estadística de los valores de los coeficientes de dispersión en el eje x. . . . .	61
6.6.	Estadística de los valores de los coeficientes de dispersión en el eje y. . . . .	61
6.7.	Datos Okubo (1995). . . . .	63

# Índice de Ilustraciones

2.1.	(A) Imagen satelital del salar del Huasco. (B) Imagen general de las cercanías del salar. (C) Condiciones de terreno sin presencia de viento y (D), con presencia de viento en la tarde en donde se generan olas y se observa resuspensión del sedimento. <i>Fuente: de la Fuente &amp; Niño (2014)</i> . . . . .	7
2.2.	Sección transversal y distribución de velocidades promediadas en la vertical en el plano $x=0$ . El perfil de velocidades promediadas muestra jets en las regiones someras. <i>Fuente: Kranenburg (1992)</i> . . . . .	8
2.3.	Ciclos temporales de las variables meteorológicas. Velocidad del viento, dirección del viento, temperatura del aire, humedad relativa, radiación de onda corta entrante al sistema y presión atmosférica. <i>Fuente: de la Fuente &amp; Niño (2010)</i> . . . . .	9
2.4.	Relación entre el coeficiente de dispersión aparente y la escala de difusión para los experimentos señalados. <i>Fuente: Okubo (1995)</i> . . . . .	14
3.1.	Implementación de la malla alternada o staggered. Los cuadrados negros son los nodos en donde se resuelve la variable $\eta$ . Los triángulos que apuntan hacia la derecha son los nodos de la componente $x$ de velocidad y los triángulos que apuntan hacia arriba son los nodos de la componente $y$ de velocidad. El espaciamiento entre puntos está aumentado para facilitar la visualización. B) Distribución espacial de batimetría. <i>Fuente: Pérez (2015)</i> . . . . .	17
4.1.	Instalación experimental . . . . .	19
4.2.	Esquema instalación experimental. <i>Fuente: Pérez, 2015</i> . . . . .	20
4.3.	Motor . . . . .	21
4.4.	Tacómetro. . . . .	21
4.5.	Acelerómetro . . . . .	21
4.6.	Cabezal ADV. <i>Fuente: Pérez (2015)</i> . . . . .	22
4.7.	ADV montado en la instalación. . . . .	22
4.8.	GoPro. . . . .	23
4.9.	GoPro montada en la instalación. . . . .	23
4.10.	Puntos de medición ADV. $R/4$ corresponde a $1/4$ del radio $R$ cuyo valor es de $20[\text{cm}]$ , es decir, los puntos 1, 2, 3 y 4 se encuentran a $5[\text{cm}]$ del centro. . . . .	26

5.1. Estructuras espaciales de los modos normales calculados. De arriba hacia abajo, el modo $n=1$ , modo $n=2$ y el modo $n=3$ con simetría longitudinal. El color rojo simboliza $1 \cdot \eta_{max}$ , es decir, a la máxima altura de superficie libre alcanzada, mientras que el color azul representa $-1 \cdot \eta_{max}$ , es decir, a la mínima altura de superficie libre alcanzada. R corresponde al radio de la maqueta el cual tiene un valor de a 20 [cm], mientras que x e y corresponden a las coordenadas cartesianas del modelo. . . . .	29
5.2. Envoltente de los últimos 60 segundos de datos, para $h_0 = 3.6$ [cm] y frecuencia $w_2^*=125.5$ [RPM] en el punto 5 de medición. . . . .	31
5.3. Ajuste de los últimos 60 segundos de datos. $h_0 = 3.6$ [cm] y frecuencia $w_2^*=125.5$ [RPM] en el punto 5 de medición. . . . .	31
5.4. Análisis de Wavelets para altura máxima. $h_0 = 3.6$ [cm] y frecuencia $w_2^*=125.5$ [RPM] en el punto 5 de medición. En línea blanca continua la frecuencia forzante y en línea discontinua la frecuencia fundamental ( $n=1$ ) . . . . .	32
5.5. Componentes x e y para altura máxima $h_0 = 3.6$ [cm] y frecuencia $w_2^*=125.5$ [RPM] en el punto 5 de medición. . . . .	33
5.6. Espectro de la serie de aceleración para $h_0 = 3.6$ [cm] y frecuencia $w_2^*=125.5$ [RPM] en el punto 5 de medición. En línea continua el espectro, en discontinua la frecuencia forzante . . . . .	34
5.7. Análisis de Wavelets para altura máxima. $h_0 = 3.6$ [cm] y frecuencia $w_{2-3}^*=149.8$ [RPM] en el punto 5 de medición. En línea blanca continua la frecuencia forzante y en línea discontinua la frecuencia fundamental ( $n=1$ ) . . . . .	35
5.8. Ajuste exponencial y tasa de decaimiento para altura máxima $h_0 = 3.6$ [cm] y frecuencia $w_{2-3}^*=149.8$ [RPM]] en el punto 5 de medición. . . . .	36
5.9. Componentes x e y para altura máxima $h_0 = 3.6$ [cm] y frecuencia $w_{2-3}^*=149.8$ [RPM]] en el punto 5 de medición. . . . .	37
5.10. Espectro de la serie de aceleración para $h_0 = 3.6$ [cm] y frecuencia $w_{2-3}^*=149.8$ [RPM]] en el punto 5 de medición. En línea continua el espectro, en discontinua la frecuencia forzante. . . . .	37
5.11. Análisis de Wavelets para altura máxima. $h_0 = 4.5$ [cm] y frecuencia $w_2^*=139.0$ [RPM] en el punto 5 de medición. En línea blanca continua la frecuencia forzante y en línea discontinua la frecuencia fundamental ( $n=1$ ) . . . . .	38
5.12. Ajuste exponencial y tasa de decaimiento para altura máxima $h_0 = 4.5$ [cm] y frecuencia $w_2^*=139.0$ [RPM]] en el punto 5 de medición. . . . .	39
5.13. Componentes x e y para altura máxima $h_0 = 4.5$ [cm] y frecuencia $w_2^*=139.0$ [RPM]] en el punto 5 de medición. . . . .	40
5.14. Espectro de la serie de aceleración para $h_0 = 4.5$ [cm] y frecuencia $w_2^*=139.0$ [RPM]] en el punto 5 de medición. En línea continua el espectro, en discontinua la frecuencia forzante. . . . .	40
5.15. Análisis de Wavelets para altura máxima. $h_0 = 4.5$ [cm] y frecuencia $w_{2-3}^*=168.0$ [RPM] en el punto 5 de medición. En línea blanca continua la frecuencia forzante y en línea discontinua la frecuencia fundamental ( $n=1$ ) . . . . .	41
5.16. Ajuste exponencial y tasa de decaimiento para altura máxima $h_0 = 4.5$ [cm] y frecuencia $w_{2-3}^*=168.0$ [RPM]] en el punto 5 de medición. . . . .	42
5.17. Componentes x e y para altura máxima $h_0 = 4.5$ [cm] y frecuencia $w_{2-3}^*=168.0$ [RPM]] en el punto 5 de medición. . . . .	43

5.18. Espectro de la serie de aceleración para $h_0 = 4.5 [cm]$ y frecuencia $w_{2-3}^* = 168.0 [RPM]$ en el punto 5 de medición. En línea continua el espectro, en discontinua la frecuencia forzante . . . . .	43
5.19. Tasas de decaimiento en función de la frecuencia del forzante. Los marcadores de mayor tamaño indican la tasa de decaimiento asociada al punto 5 de medición. . . . .	46
5.20. Tasas de decaimiento en función de la profundidad del cuerpo de agua. . . . .	46
5.21. Histograma de las tasas de decaimiento de las serie de velocidad en el eje x. . . . .	48
5.22. Histograma de las tasas de decaimiento de las serie de velocidad en el eje y. . . . .	48
5.23. Tasas de decaimiento en función de la profundidad del cuerpo de agua. En el gráfico se muestran los datos presentados por Wüest et al. (2000), los resultados del presente trabajo y una relación ajustada de forma potencial. La tasa de decaimiento es notada como “b” y la profundidad como “H”. . . . .	50
6.1. Muestras utilizadas para obtener la relación saturación-concentración. . . . .	52
6.2. Relación Saturación-Concentración integrada. . . . .	53
6.3. Imagen de experimento antes y después de filtrar. $h_0 = 4.0 [cm]$ y $w_{2-3} = 164.1 [RPM]$ . . . . .	54
6.4. Mancha con el modo $n=1$ ya inestabilizado. $h_0 = 4.5 [cm]$ y $w_1 = 53.0 [RPM]$ . . . . .	54
6.5. Mancha expandiéndose para 0.0 [s], 1.0 [s], 2.0 [s], 4.0 [s] , 8.0 [s] y 16.0 [s]. $h_0 = 4.0 [cm]$ y $w_{2-3} = 164.1 [RPM]$ . . . . .	55
6.6. $M_{0xy}$ para $h_0 = 4.0[cm]$ y $w_{2-3} = 164.1[RPM]$ . G1, G2, G3, G4 y G5 corresponden a los 5 experimentos realizados bajo las condiciones de altura y frecuencia antes mencionado. . . . .	56
6.7. $M_{2x}/M_{0xy}$ para $h_0 = 4.0[cm]$ y $w_{2-3} = 161.4[RPM]$ . G1, G2, G3, G4 y G5 corresponden a los 5 experimentos realizados bajo las condiciones de altura y frecuencia antes mencionado. . . . .	57
6.8. $M_{2y}/M_{0xy}$ para $h_0 = 4.0[cm]$ y $w_{2-3} = 161.4[RPM]$ . G1, G2, G3, G4 y G5 corresponden a los 5 experimentos realizados bajo las condiciones de altura y frecuencia antes mencionado. . . . .	57
6.9. Coeficientes de dispersión en función de la frecuencia del forzante. . . . .	59
6.10. Coeficientes de dispersión en función de la profundidad del cuerpo de agua. . . . .	59
6.11. Histograma de los coeficientes de dispersión en el eje x. . . . .	62
6.12. Histograma de los coeficientes de dispersión en el eje y. . . . .	62
6.13. Gráfico de Coeficiente de Dispersión en función de la Longitud característica. . . . .	64
6.14. Gráfico de Coeficiente de Dispersión en función de la Longitud característica para resultados de este trabajo. . . . .	64
8.1. A) Serie de aceleraciones sin filtrar para $h_0 = 3.6 [cm]$ y $w_3 = 173.8 [RPM]$ . B) Serie de aceleraciones filtradas y con media móvil en torno a 6 puntos aplicada para $h_0 = 3.6 [cm]$ y $w_3 = 173.8 [RPM]$ . . . . .	70
8.2. A) Serie de aceleraciones sin filtrar para $h_0 = 4.0[cm]$ y $w_3 = 187.0 [RPM]$ . B) Serie de aceleraciones filtradas y con media móvil en torno a 6 puntos aplicada para $h_0 = 4.0 [cm]$ y $w_3 = 187.0 [RPM]$ . . . . .	71
8.3. A) Serie de aceleraciones sin filtrar para $h_0 = 4.5 [cm]$ y $w_3 = 195.0 [RPM]$ . B) Serie de aceleraciones filtradas y con media móvil en torno a 6 puntos aplicada para $h_0 = 4.5 [cm]$ y $w_3 = 195.0 [RPM]$ . . . . .	71