

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**PROPAGACIÓN DE ONDAS SUPERFICIALES E INTERNAS INDUCIDAS POR
IMPACTOS EN CUERPOS DE AGUA ESTRATIFICADOS**

Catalina Salazar Celle¹
Tomás Trehwela²

RESUMEN

Este estudio experimental aborda la propagación de ondas internas generadas por el impacto de una masa con un cuerpo de agua estratificado, un fenómeno relevante para determinar el potencial de mezcla que puede tener este tipo de impactos en la mezcla interna de la columna de agua. Para los experimentos, se deslizaron tres masas de hormigón sobre una rampa inclinada 30 y 45° que impactan un volumen de agua estratificado, i.e. con agua dulce posada sobre agua salada teñida con rodamina. A través de la toma de imágenes se capturó no sólo el impacto sino que también las posteriores ondas de impulso que viajan a lo largo del canal experimental. Los resultados preliminares de las alturas y velocidades de las ondas superficiales e internas muestran un frente inicial rápido que se disipa también rápidamente, pero que muestra velocidades superficiales e internas distintas que no entran en resonancia. Se identifica también un segundo frente, que a ratos es oscilatorio en su velocidad pero que cualitativamente posee cierto potencial de mezcla. Nuestros resultados entregan una primera aproximación de la cinemática de las ondas con sus diferencias, poniendo en valor la posibilidad de mezcla debido a la propagación de estas ondas.

¹ Estudiante Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería y Ciencias,
Universidad Adolfo Ibáñez - catasalazar@alumnos.uai.cl

² Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería y Ciencias,
Universidad Adolfo Ibáñez - tomas.trehwela@uai.cl

1. INTRODUCCIÓN

La interacción entre deslizamientos de tierra y cuerpos de agua genera complejos procesos físicos con profundas implicaciones ambientales y ecológicas (Watt *et al.*, 2009; Bregoli *et al.*, 2017). Estos impactos en cuerpos de agua generan ondas impulsivas que se traducen muchas veces en tsunamis de alta energía, cuyo modelado representa un desafío importante (Fritz *et al.*, 2004; Robbe-Saule *et al.*, 2021; Rauter *et al.*, 2022). Casos recientes, como la erupción volcánica de Tonga en 2022, ilustran la complejidad de estas perturbaciones con sus consecuencias devastadoras (Imamura *et al.*, 2022). Estas interacciones no solo generan ondas superficiales, sino que en medios estratificados también producen ondas internas que viajan a lo largo de interfaces de densidad. La dinámica de estas ondas, incluso en regímenes completamente no lineales y de gran amplitud, es un campo de estudio crucial. Si bien existen modelos teóricos para la propagación de ondas internas (e.g. Choi & Camassa, 1999) no está claro si estas ondas de impulso superficiales o internas se reproducen con dichos modelos (Zhang *et al.*, 2024). A diferencia de sus contrapartes superficiales, las ondas internas se propagan a través de las interfaces de densidad de la columna de agua, transfiriendo energía verticalmente (Henderson & Deemer, 2012) y alterando la estabilidad y dinámica de mezcla en sistemas acuáticos como lagos y embalses, donde impulsan flujos verticales y horizontales (Michalski & Lemmin, 1995; Hodges *et al.*, 2000).

La estabilidad de la columna de agua está intrínsecamente ligada a su estratificación de densidad (Hetland, 2005). No obstante, un disturbio súbito puede generar ondas internas capaces de superar esa estabilidad (Lee & Beardsley, 1974). Este fenómeno implica que las ondas tienen la energía cinética para romper la estratificación, generando turbulencia que mezcla las capas de diferente densidad. La capacidad de las ondas para 'superar' la estabilidad depende directamente de la intensidad del disturbio y de la robustez de la estratificación inicial. Mientras que las ondas superficiales disipan su energía principalmente en la interfaz aire-agua, las ondas internas penetran capas más profundas, induciendo mezcla vertical vital para la redistribución de propiedades (Chaudhry *et al.*, 1983; Michalski & Lemmin, 1995). A pesar de su relevancia, la investigación sobre ondas de impulso ha priorizado las ondas superficiales, dejando una brecha en la comprensión de la dinámica de las ondas internas inducidas por impacto y sus implicaciones para la mezcla vertical (Zitti *et al.*, 2016; Robbe-Saule *et al.*, 2021; Meng *et al.*, 2023). El enfoque se debe a la ya complicada interacción masa-superficie libre, que desafía el modelado predictivo (Darvenne *et al.*, 2024), y deja poco espacio para ahondar en dinámicas secundarias. No obstante, han surgido modelos predictivos que combinan la dinámica de esparcimiento granular y la hidrodinámica de ondas en aguas poco profundas, logrando predecir la amplitud de ondas impulsivas y racionalizar el papel de números adimensionales (Sarlin *et al.*, 2021). Ya entendiendo mejor la propagación de las ondas superficiales, se podría entonces ir a lo que ocurre internamente.

El presente estudio experimental aborda esta brecha investigando la generación y propagación de ondas superficiales e internas en un tanque acrílico estratificado, mediante el impacto de bloques sólidos. El objetivo es caracterizar la respuesta del fluido estratificado, centrándose en las velocidades de propagación y los números de Froude asociados, para comprender la transición desde la dinámica impulsiva inicial a la propagación de ondas secundarias. Nuestros resultados preliminares muestran que hay diferencias en la propagación de las ondas internas respecto a las superficiales, y que dichas diferencias responden a la condición inicial de impacto.

2. METODOLOGÍA

2.1. Instalación Experimental

La instalación experimental se presenta en la Figura 1 y consiste en un estanque de acrílico transparente de largo $L = 120$ cm, altura $H = 35$ cm y ancho $W = 10$ cm equipado con una rampa inclinada también de acrílico de posición variable, definiendo así el ángulo de inclinación θ . Para estratificar el fluido en dos capas, se utilizó agua con salinidad del 4% mezclada con rodamina 6G para ayudar a la visibilización del fluido. La capa de rodamina y mayor densidad corresponde a la capa inferior, sobre la cual se posicionó lentamente una capa de agua dulce. Esta estratificación se logró utilizando una esponja porosa durante el llenado de la capa superior, garantizando así una mezcla mínima durante la preparación de cada experimento.

Los ensayos para este trabajo utilizaron un volumen total de fluido $V = 15$ l, lo que resultó en una altura total de $h = 15,9$ cm. Se consideró un set de ensayos experimentales con estratificación fija, aproximadamente la mitad del volumen corresponde a la capa de agua salada con rodamina (inferior), de altura $h_r = 7,95$ cm, y la otra mitad con agua dulce $h_a = 7,95$ cm, lo que resulta en la altura mencionada $h = h_r + h_a = 15,9$ cm.

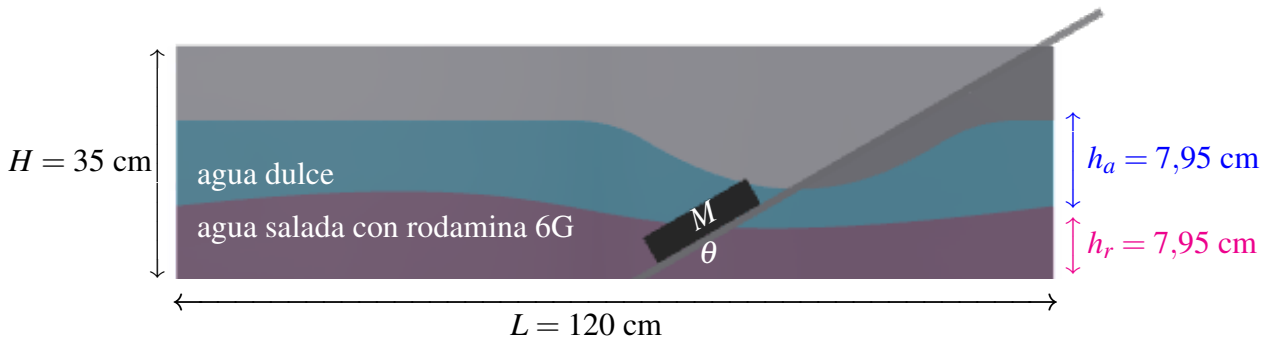


Figura 1: Esquema de la instalación experimental utilizada para este estudio. Una masa M se desliza sobre un plano inclinado θ generando una onda de impulso en un medio estratificado. El medio estratificado está compuesto por una capa de agua salada con rodamina y altura $h_r = 7,95$ cm sobre el cual se posa una segunda capa de agua dulce con igual altura $h_a = 7,95$ cm.

Los impactos fueron generados deslizando distintos bloques de hormigón sobre la rampa inclinada. Para un primer set preliminar se dejó la rampa a una inclinación de $\theta = 30^\circ$, desde la cual se dejaron caer bloques con distinta masa y geometría: (1) bloque cúbico pequeño con masa $M_1 = 120$ g; (2) bloque cúbico mediano con masa $M_2 = 230$ g; y (3) bloque grande $M_3 = 500$ g.

Las imágenes experimentales fueron registradas usando una cámara Basler acA2000-165uc montada con un lente Thorlabs tipo C que posee una distancia focal fija de 25 mm. Las imágenes tienen resolución 2040 px x 1086 px y fueron adquiridas a una tasa de 50 imágenes por segundo (fps). Cada ensayo duró 40 s, generando 2000 imágenes por experimento. Para lograr un buen contraste entre las capas de agua, se iluminó el experimento con un panel LED del largo del experimento, 1 m.

2.2. Matriz experimental

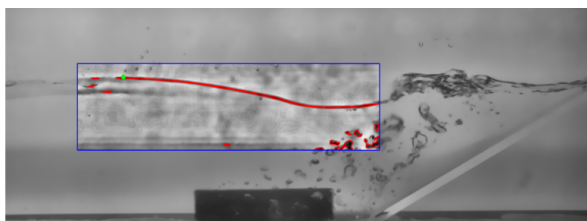
Ángulo °	Volumen l	Masa g	Código
30	7.5 + 7.5	120	E30-1
30	7.5 + 7.5	230	E30-2
30	7.5 + 7.5	500	E30-3
45	7.5 + 7.5	120	E45-1
45	7.5 + 7.5	230	E45-2
45	7.5 + 7.5	500	E45-3

Tabla 1: Matriz principal de ensayos a iguales volúmenes pero distintos ángulos y masas de impacto.

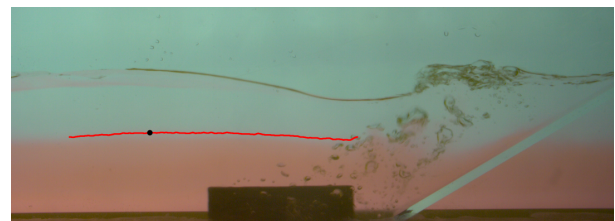
Antes de definir la matriz experimental principal, se realizó una etapa preliminar destinada a evaluar distintas proporciones entre rodamina y agua dulce con el objetivo de optimizar la visualización de los procesos de mezcla. Esta exploración permitió identificar que la configuración 50/50 (7.5 l de rodamina y 7.5 l de agua dulce) ofrecía el mejor contraste y desarrollo del frente de mezcla, lo que justificó su elección como base para todos los ensayos de la matriz principal.

2.3. Procesamiento de imágenes y análisis de datos

El procesamiento de las imágenes, con una resolución de 2040 px x 1086 pxy capturadas a color, se realizó con un código en python que convirtió las secuencias temporales en matrices de intensidad de píxeles para la detección de las características de onda. Para la onda interna (frente de rodamina), se detectó la interfaz entre el agua salada con rodamina y el agua dulce mediante un criterio de diferencia de intensidad entre los canales RGB. Específicamente, el cruce gráfico entre los canales rojo y verde, y las curvas de posición resultantes fueron suavizadas con un filtro gaussiano para mitigar el ruido. Para la onda superficial, las imágenes se procesaron en escala de grises con ecualización adaptativa del histograma, detectando el valle de la onda como el mínimo de intensidad local a lo largo de perfiles verticales (Figura 2).



(a) Superficie libre detectada con punto máximo detectado en · verde.



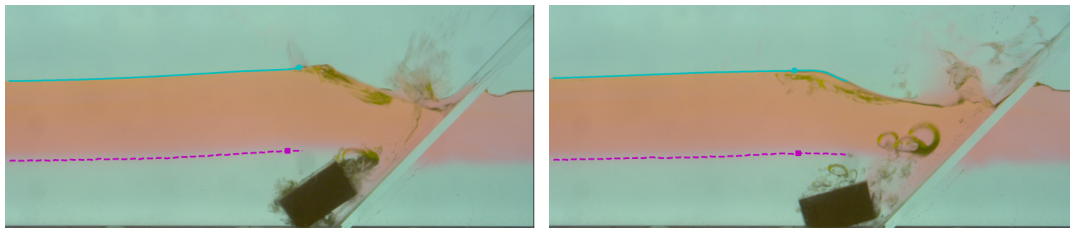
(b) Interfaz de rodamina detectada con el punto máximo detectado en · negro.

Figura 2: Detección de la interfaz superficial (a) y de rodamina (b) para el experimento E30-3 (Masa 3, 500 g) en el instante de tiempo 0.2 s. En ambas imágenes se muestra el punto máximo de la onda para su seguimiento.

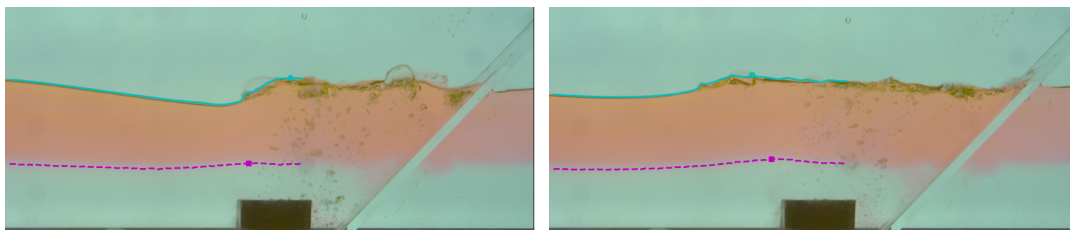
A partir de las posiciones detectadas, se calcularon las velocidades instantáneas, medias y máximas mediante diferenciación numérica con respecto al tiempo. Para analizar la evolución del sistema, se segmentaron las mediciones en dos fases: la Onda 1 para capturar la dinámica inmediata post-impacto, y la Onda 2 para caracterizar la propagación desarrollada. Finalmente, para clasificar el régimen de flujo, se calcularon los números de Froude. Para la onda interna, el número de Froude interno $Fr_i = v_i / \sqrt{g' h_r}$ se definió como la relación de la velocidad de la onda v_i con la velocidad de onda de gravedad de referencia $\sqrt{g' h_r}$, donde $g' = (\rho_r - \rho) / \rho$ es la gravedad relativa para el agua salada al 4%. Lo mismo para la onda superficial, con un número de Froude superficial $Fr_s = v_s / \sqrt{g' h_a}$ análogo.

3. RESULTADOS

El análisis de los 6 experimentos (E30;45-1 al 3) revela la existencia de dos fases u ondas de propagación claramente diferenciadas. La Onda 1 corresponde a la respuesta inmediata y altamente impulsiva al impacto, mientras que la Onda 2 representa una fase de propagación más desarrollada, posterior a la disipación de la energía inicial. Para ilustrar esta transición, la Figura 3 presenta una secuencia de imágenes del experimento E45-2, mostrando cómo la onda interna evoluciona desde un frente de perturbación inicial (Onda 1) hasta un régimen de propagación más organizado (Onda 2). Esta diferenciación es fundamental para comprender la transferencia de energía post-impacto y la complejidad hidrodinámica del fluido estratificado.



(a) Secuencia de la Onda 1, que representa la fase de impacto inicial en $t = 0,36 : 0,44$ s, con las interfaces identificadas.



(b) Secuencia de la Onda 2, que representa la fase de propagación desarrollada en $t = 0,74 : 0,92$ s, con interfaces detectadas.

Figura 3: Secuencia de imágenes correspondiente a la Onda 1 y Onda 2 del experimento E45-2 (bloque mediano, inclinación de 45°). La primera fase muestra el impacto inicial del cuerpo, mientras que la segunda evidencia la evolución de las ondas superficial e interna. Para todos los experimentos E45, la capa de rodamina fue posicionada sobre la solución salina con el objetivo de mejorar la detección óptica de la superficie libre.

3.1. Experimentos a 30°

3.1.1. Onda 1: Fase impulsiva inicial

La Onda 1, que representa la respuesta hidrodinámica inmediata al impacto, se caracteriza por ser una fase impulsiva y de alta energía. En este régimen, las fuerzas inerciales asociadas al movimiento del bloque predominan sobre las fuerzas de gravedad. Para todos los experimentos, los valores de velocidad media y número de Froude se consideraron en valor absoluto, con el objetivo de capturar la magnitud del fenómeno, independiente de la dirección del flujo. Los resultados presentados a continuación (Tablas 2 y 3) para los experimentos a 30° muestran las velocidades y los regímenes de propagación tanto para la onda superficial como para la onda interna en esta fase inicial, evidenciando una fuerte influencia de la masa del bloque en la magnitud de la perturbación.

Velocidad media m/s	E30-1 (Small)	E30-2 (Med)	E30-3 (Large)
Superficial v_s m/s	2,2290	1,8450	2,8160
Interna v_i m/s	2,0480	1,8744	0,7768

Tabla 2: Velocidades medias $v_{\{s,i\}}$ m/s de la Onda 1 para los experimentos a 30°.

Froude Fr	E30-1 (Small)	E30-2 (Med)	E30-3 (Large)
Superficial Fr_s	1,838	1,521	2,321
Interna Fr_i	13,859	12,684	5,257

Tabla 3: Números de Froude $Fr_{\{s,i\}}$ de la Onda 1 para los experimentos a 30°.

3.1.2. Comparación de ondas superficiales e internas en la Onda 1

La Onda 1 superficial del experimento E30-1 presentó una velocidad media de $v_s = 2,23$ m/s, mientras que la de la onda interna fue de $v_i = 2,05$ m/s. Se observa una similitud en la magnitud de las velocidades medias de ambas ondas en esta fase. Este resultado se atribuye a la naturaleza altamente impulsiva del impacto, que genera un movimiento significativo y casi simultáneo en ambas interfaces, dominado por la inercia más que por las fuerzas de gravedad o boyancia reducida. Ambas ondas se propagan bajo régimen supercrítico, evidenciando la alta energía transferida por el impacto inicial.

En los experimentos E30-1 y E30-2, los números de Froude de la onda interna son excepcionalmente altos, $Fr_i = 13.86$ y 12.68 , respectivamente. Esto indica un flujo fuertemente supercrítico, donde la inercia del movimiento domina por completo sobre la estabilidad gravitacional.

3.1.3. Onda 2: Fase de propagación desarrollada

Posteriormente, el sistema evoluciona hacia la Onda 2, una fase de propagación más desarrollada en la que la energía impulsiva inicial se ha disipado, y las dinámicas de onda se vuelven más organizadas. En este punto, las ondas internas comienzan a exhibir comportamientos distintos a

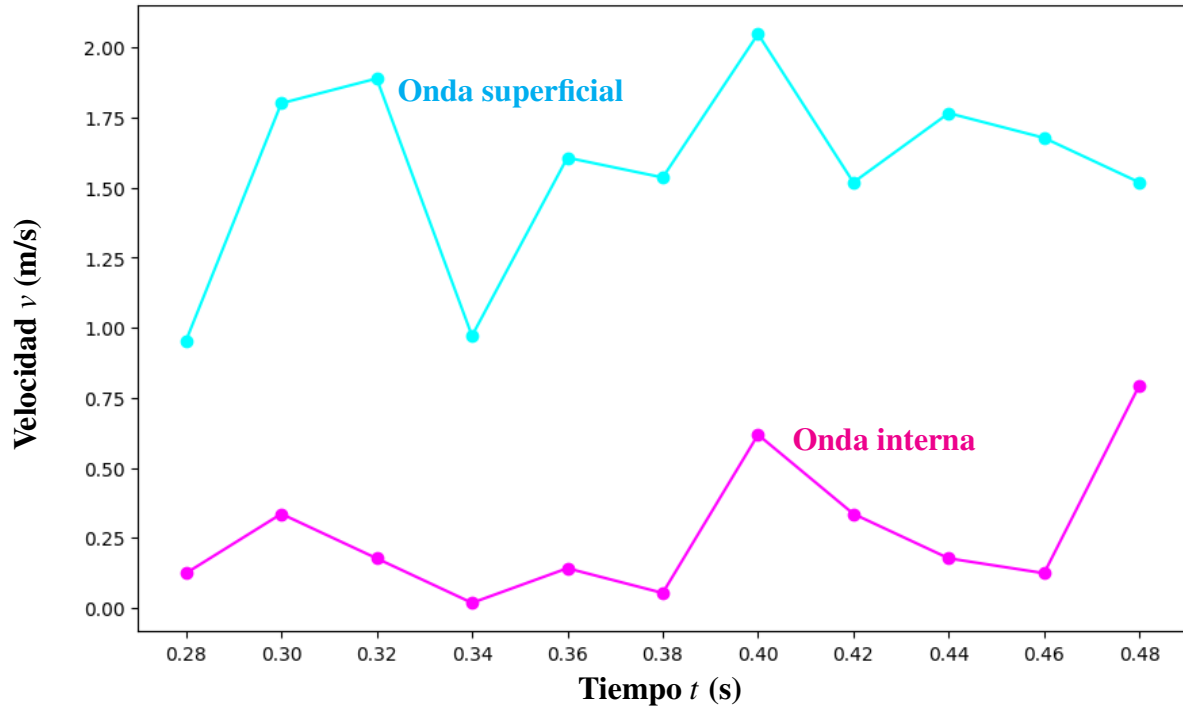


Figura 4: Comparación de las velocidades para E30-1 de la Onda Superficial y Onda Interna durante la etapa de propagación desarrollada (Onda 2), entre $t = 0,28 : 0,5$ s.

los superficiales, con velocidades y regímenes de propagación que reflejan una transición hacia un balance de fuerzas y una condición estable. Las Tablas 4 y 5 resumen los parámetros de la Onda 2 para los experimentos a 30° , permitiendo un análisis comparativo de la influencia de la masa del bloque en esta fase.

Velocidad media m/s	E30-1 (Small)	E30-2 (Med)	E30-3 (Large)
Superficial v_s m/s	1,5713	1,5978	0,0706
Interna v_i m/s	0,0064	0,3840	0,1607

Tabla 4: Velocidades medias $v_{\{s,i\}}$ m/s de la Onda 2 para los experimentos a 30° .

Froude Fr	E30-1 (Small)	E30-2 (Med)	E30-3 (Large)
Superficial Fr_s	1,295	1,317	0,058
Interna Fr_i	0,043	2,599	1,087

Tabla 5: Números de Froude $Fr_{\{s,i\}}$ de la Onda 2 para los experimentos a 30° .

3.1.4. Comparación general de ondas superficiales e internas en la Onda 2

La Onda 2, que representa la fase de propagación desarrollada, subraya la diferencia fundamental en los mecanismos de propagación de las ondas superficiales e internas en condiciones a mediano plazo. La Figura 4 muestra que para E30-1, la onda superficial mantiene un régimen supercrítico,

mientras que la onda interna exhibe velocidades considerablemente menores en régimen subcrítico. Esto se traduce en gradientes de velocidad internos bastante importantes que pensando en definiciones clásicas del número de Richardson

$$Ri = \frac{g\partial\rho/\partial z}{\rho(\partial v/\partial z)^2} \quad (1)$$

nos entrega valores de $Ri \approx 5e - 3$ y $\approx 0,02$ para E30-1 y E30-2. Esto indica condiciones propensas a producir mezcla, aun cuando no tenemos mediciones para comprobar el nivel de mezcla local. Esto no es el caso para el tercer experimento, E30-3, donde $Ri \approx 3 > 1$ que implica una condición más estable, i.e. sin mezcla. Estos valores calculados no corresponden con los que pueden ser estimados unicamente usando los valores del número de Froude superficial, calculando $Ri = 1/Fr^2$, lo que pone enfoque en la necesidad de estudiar con mejor detalle lo ocurrido en la onda interna y no sólo orientar el estudio a la onda superficial.

3.2. Experimentos a 45°

De forma similar, los experimentos con la rampa a 45° (Tablas 6 a 9) permiten evaluar cómo una mayor inclinación, que acorta el recorrido de la masa y aumenta su componente vertical de impacto, modifica la dinámica de propagación en ambos estratos. Al comparar estos resultados con los obtenidos a 30°, se puede analizar cómo a mayor pendiente del deslizamiento se generan cambios en las velocidades, los números de Froude y la transición entre la fase impulsiva y la de propagación desarrollada.

3.2.1. Onda 1: Fase impulsiva inicial

Velocidad media m/s	E45-1 (Small)	E45-2 (Med)	E45-3 (Large)
Superficial v_s m/s	1,3960	0,9933	0,9056
Interna v_i m/s	0,0040	0,6778	0,5311

Tabla 6: Velocidades medias $v_{\{s,i\}}$ m/s de la Onda 1 para los experimentos a 45°.

Froude Fr	E45-1 (Small)	E45-2 (Med)	E45-3 (Large)
Superficial Fr_s	1,118	0,795	0,725
Interna Fr_i	0,027	4,587	3,594

Tabla 7: Números de Froude $Fr_{\{s,i\}}$ de la Onda 1 para los experimentos a 45°.

Los resultados de la Onda 1 para los experimentos con rampa a 45° muestran una clara diferenciación en la dinámica superficial e interna en función de la masa del bloque. A pesar del mayor componente vertical del impacto, las velocidades superficiales y los valores de Fr_s se mantienen bajos en todos los casos, como se muestra en las Tablas 6 y 7, lo que sugiere que el impulso no se transfiere eficientemente hacia la superficie libre. En cambio, los bloques mediano y grande exhiben valores elevados de Fr_i (4.587 y 3.594, respectivamente), lo que evidencia una transferencia

más efectiva del momentum hacia la interfase, generando ondas internas más energéticas. El bloque pequeño, en contraste, presenta valores de v_i y Fr_i muy reducidos, indicando que la inercia del impacto no logra superar la reacción boyante, inhibiendo la propagación interna. Este comportamiento indica que la respuesta impulsiva no depende solo del ángulo, sino también de la masa y del acoplamiento vertical generado en el momento del impacto.

3.2.2. Comparación de ondas superficiales e internas en la Onda 1

Los resultados de la Onda 1 en los experimentos con inclinación de 45° muestran un contraste significativo entre la propagación superficial e interna, especialmente al considerar la influencia de la masa del bloque. Las ondas superficiales mantienen valores de Fr_s relativamente bajos en todos los casos, indicando una respuesta acotada en la superficie libre. En cambio, las ondas internas exhiben una fuerte dependencia con la masa: mientras los bloques mediano y grande presentan valores de Fr_i supercríticos, el bloque pequeño no logra generar una propagación interna apreciable. Esta diferencia sugiere que, bajo una condición de impacto más vertical, el sistema favorece la transferencia de impulso hacia la interfase, donde se produce una respuesta más energética que en la superficie. El contraste entre ambas capas resalta la importancia del acoplamiento vertical inducido por el impacto y su modulación según la masa involucrada.

3.2.3. Onda 2: Fase de propagación desarrollada

Velocidad media m/s	E45-1 (Small)	E45-2 (Med)	E45-3 (Large)
Superficial v_s m/s	0,7188	0,6244	0,7680
Interna v_i m/s	0,1737	0,1622	0,4540

Tabla 8: Velocidades medias $v_{\{s,i\}}$ m/s de la Onda 2 para los experimentos a 45° .

Froude Fr	E45-1 (Small)	E45-2 (Med)	E45-3 (Large)
Superficial Fr_s	0,575	0,500	0,615
Interna Fr_i	1,176	1,098	3,072

Tabla 9: Números de Froude $Fr_{\{s,i\}}$ de la Onda 2 para los experimentos a 45° .

En la fase de propagación desarrollada, los experimentos a 45° muestran velocidades reducidas en comparación con la fase impulsiva, junto con una disminución general en el contraste entre capas. Como se observa en las Tablas 8 y 9, las ondas superficiales presentan un comportamiento homogéneo en todos los casos, manteniéndose en régimen subcrítico ($Fr_s < 1$), lo que sugiere una propagación amortiguada por efectos de disipación y confinamiento. En contraste, las ondas internas muestran una mayor sensibilidad a la masa del bloque: mientras el bloque grande mantiene un régimen supercrítico ($Fr_i = 3,072$), los bloques pequeño y mediano presentan Fr_i cercanos a la unidad, indicando una transición hacia un régimen dominado por la boyancia. Esta diferencia refleja una retención parcial del impulso en la capa inferior, condicionada por la masa que impacta.

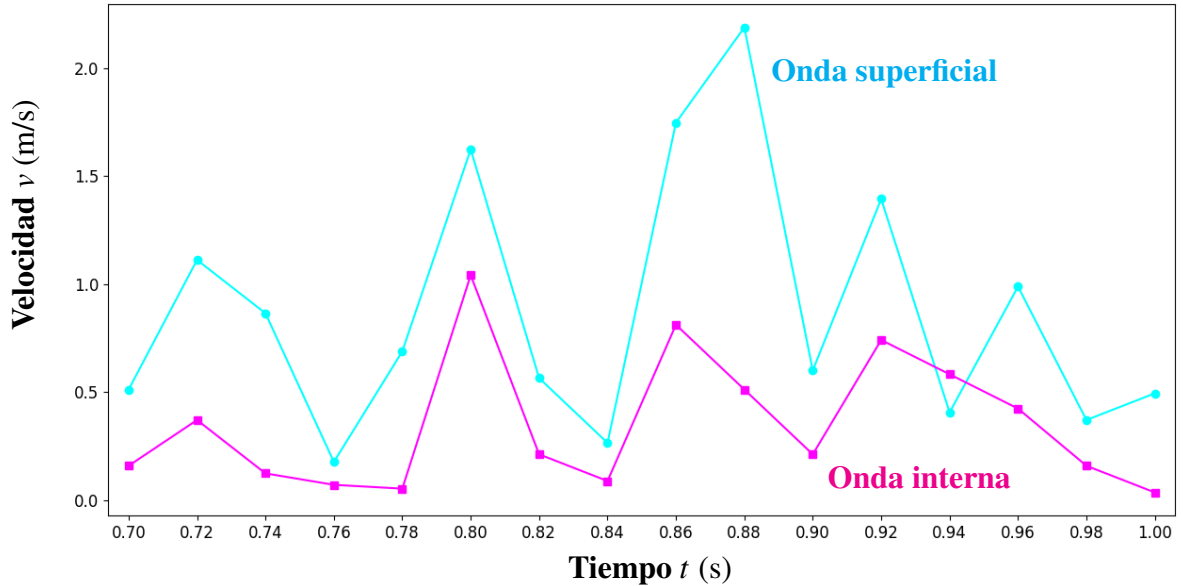


Figura 5: Comparación de las velocidades para E45-1 de las ondas superficial e interna durante la Onda 2, entre $t = 0,70 : 1,00$ s.

3.2.4. Comparación de ondas superficiales e internas en la Onda 2

En la Figura 5 se grafican las velocidades de propagación de la Onda 2 para la superficie y la interfaz. Se aprecia que la velocidad en la interfaz es sostenidamente menor y esta proporcionalmente correlacionada con la velocidad de la onda en la superficie. Esto muestra que hay un acople entre ambas ondas y responden de igual forma al impacto inicial. La diferencia en la magnitud de las velocidades (Figura 5) eventualmente conduce a cierto desacople, a tiempos largos, pero que no es suficientemente fuerte como para generar corte, y eventualmente mezcla. Esto se observa de forma tácita en los experimentos a 45° : luego del impacto, la interfaz que logra mezclarse no se propaga como si lo hace la perturbación en la superficie libre. Si repetimos lo realizado con la definición del Ri (ecuación 1), vemos resultados un poco distintos a los encontrados para 30° , sólo E45-1 tiene un valor de $Ri \approx 8e - 2 \ll 1$, lo que no ocurre con los otros dos experimentos, con $Ri \approx 0,12$ y $Ri \approx 0,25$ (valores cercanos a Ri críticos) para E45-2 y 3, respectivamente. Esto corrobora lo descrito, si bien los impactos a mayor inclinación tienen potencial de mezcla local en instantes iniciales (Onda 1), no generan gradientes de velocidad a mediano o largo plazo que tengan un potencial de mezcla alto.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron resultados experimentales para la propagación de ondas superficiales e internas por impactos de masa en cuerpos de agua estratificados. Se utilizó un canal hidráulico esbelto cerrado de acrílico con un plano inclinado para deslizar masas sobre este e impactar un volumen de agua compuesto por dos capas: una de agua salada al 4% bajo una capa de agua dulce. Como set experimental se consideró una condición de estratificación constante para la que se

realizaron tres impactos de tres masas distintas para dos inclinaciones del plano inclinado, a 30 y 45°. Mediante un algoritmo sencillo, se detectaron las superficies libres y la interfaz de estratificación gracias al uso de rodamina. De las imágenes experimentales se determinaron velocidades de propagación de las ondas y los números de Froude Fr asociados.

A partir de nuestros resultados se pudieron identificar dos ondas características: una primera onda asociada a un impacto brusco y una segunda asociada a una propagación desarrollada. Pudimos encontrar diferencias marcadas entre las velocidades y Fr para las ondas internas y superficiales. Mientras la onda superficial presenta un comportamiento consistentemente supercrítico en los experimentos realizados, asociado a una propagación horizontal rápida y sostenida tras el impacto, la onda interna muestra una variación más significativa, desde valores subcríticos hasta fuertemente supercríticos según la masa del bloque. Este resultado sugiere que la propagación interna, caracterizada por un desplazamiento vertical de la interfaz de densidad, responde de manera distinta a los mecanismos de transferencia de momento generados por el impacto, en comparación con la propagación superficial. Nuestros resultados sugieren potenciales de mezcla vertical a partir de una definición clásica del número de Richardson Ri , pero que requiere validación experimental. Este análisis preliminar evidencia la necesidad de abordar el análisis de impactos en sistemas estratificados considerando no solo la cinemática superficial, sino también la evolución interna del sistema, incluso en fases desarrolladas del flujo. Estos hallazgos no sólo añaden mayor complejidad a un fenómeno ampliamente estudiado (e.g. Zitti *et al.*, 2016; Sarlin *et al.*, 2021; Rauter *et al.*, 2022; Meng *et al.*, 2023; Darvenne *et al.*, 2024) sino que abren la oportunidad de analizar la generación de ondas internas debido a aluviones o impactos—con el potencial de mezcla—en cuerpos de agua estratificados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo ANID a través del proyecto Fondecyt Iniciación 11240630.

Referencias

- Bregoli, Francesco, Bateman, Allen, & Medina, Vicente. 2017. Tsunamis generated by fast granular landslides: 3D experiments and empirical predictors. *Journal of Hydraulic Research*, **55**(6), 743–758.
- Chaudhry, M Hanif, Mercer, Albert G, & Cass, David. 1983. Modeling of slide-generated waves in a reservoir. *Journal of hydraulic engineering*, **109**(11), 1505–1520.
- Choi, Wooyoung, & Camassa, Roberto. 1999. Fully nonlinear internal waves in a two-fluid system. *Journal of Fluid Mechanics*, **396**, 1–36.
- Darvenne, Abigaël, Viroulet, Sylvain, & Lacaze, Laurent. 2024. Physical model of landslide-generated impulse waves: Experimental investigation of the wave-granular flow coupling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **129**(9), e2024JC021145.

- Fritz, Hermann M, Hager, Willi H, & Minor, H-E. 2004. Near field characteristics of landslide generated impulse waves. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, **130**(6), 287–302.
- Henderson, Stephen M, & Deemer, Bridget R. 2012. Vertical propagation of lakewide internal waves. *Geophysical research letters*, **39**(6).
- Hetland, Robert D. 2005. Relating river plume structure to vertical mixing. *Journal of Physical Oceanography*, **35**(9), 1667–1688.
- Hodges, Ben R, Imberger, Jörg, Saggio, Angelo, & Winters, Kraig B. 2000. Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnology and oceanography*, **45**(7), 1603–1620.
- Imamura, Fumihiko, Suppasri, Anawat, Arikawa, Taro, Koshimura, Shunichi, Satake, Kenji, & Tanioka, Yuichiro. 2022. Preliminary observations and impact in Japan of the tsunami caused by the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022. *Pure and Applied Geophysics*, **179**(5), 1549–1560.
- Lee, Chi-Yuan, & Beardsley, Robert C. 1974. The generation of long nonlinear internal waves in a weakly stratified shear flow. *Journal of Geophysical Research*, **79**(3), 453–462.
- Meng, Zhenzhu, Zhang, Jinxin, Hu, Yating, & Ancy, Christophe. 2023. Temporal Prediction of Landslide-Generated Waves Using a Theoretical–Statistical Combined Method. *Journal of Marine Science and Engineering*, **11**(6), 1151.
- Michalski, J, & Lemmin, U. 1995. Dynamics of vertical mixing in the hypolimnion of a deep lake: Lake Geneva. *Limnology and oceanography*, **40**(4), 809–816.
- Rauter, Matthias, Viroulet, Sylvain, Gylfadóttir, Sigríur Sif, Fellin, Wolfgang, & Løvholt, Finn. 2022. Granular porous landslide tsunami modelling—the 2014 Lake Askja flank collapse. *Nature communications*, **13**(1), 678.
- Robbe-Saule, Manon, Morize, Cyprien, Henaff, Robin, Bertho, Yann, Sauret, Alban, & Gondret, Philippe. 2021. Experimental investigation of tsunami waves generated by granular collapse into water. *Journal of Fluid Mechanics*, **907**, A11.
- Sarlin, Wladimir, Morize, Cyprien, Sauret, Alban, & Gondret, Philippe. 2021. Nonlinear regimes of tsunami waves generated by a granular collapse. *Journal of Fluid Mechanics*, **919**, R6.
- Watt, Sebastian FL, Pyle, David M, Naranjo, José A, & Mather, Tamsin A. 2009. Landslide and tsunami hazard at Yate volcano, Chile as an example of edifice destruction on strike-slip fault zones. *Bulletin of volcanology*, **71**, 559–574.
- Zhang, Tianyu, Wang, Zhan, Zhao, Binbin, Hayatdavoodi, Masoud, Ertekin, R Cengiz, & Duan, Wenyang. 2024. On the application of Miyata-Choi-Camassa model to surface waves. *Ocean Dynamics*, **74**(9), 725–741.
- Zitti, Gianluca, Ancy, Christophe, Postacchini, Matteo, & Brocchini, Maurizio. 2016. Impulse waves generated by snow avalanches: Momentum and energy transfer to a water body. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **121**(12), 2399–2423.