

Flotabilidad de unidad de monitoreo remoto

1 Introducción

Este reporte describe el desarrollo analítico y numérico llevado a cabo para determinar el grado de estabilidad de una unidad de monitoreo remoto. Este concepto engloba los siguientes componentes: boya, instrumentos de medida de parámetros de calidad de agua, sistema transmisor de datos y batería de almacenamiento.

Los cálculos que a continuación se plantean podrían requerir un conocimiento previo de conceptos como flotabilidad y estabilidad, centro de flotación, metacentro, momento restaurador y movimientos oscilatorios de una boya. Para ello se recomienda la consulta de las siguientes fuentes bibliográficas:

- Mecánica de los fluidos (9ª edición), Streeter, V. L. (2000). Santa Fe de Bogotá. McGraw-Hill Interamericana.
- Mecánica de fluidos (5ª edición) White F. M. (2004) McGraw-Hill Interamericana.
- Mecánica de los fluidos: Fundamentos y aplicaciones (2ª edición), Cengel, Y. A., Cimbala, J. M. (2012). México D.F. McGraw-Hill Interamericana.
- Factores que influyen en la estabilidad de boyas dedicadas al monitoreo de calidad de agua en ambientes lacustres (2021). Jardín, M. Tesis de grado. Universidad Metropolitana. Caracas, Venezuela.

2 Flotabilidad y estabilidad de la boya

Para el estudio del comportamiento hidrostático de la boya se inició con el modelado de la misma en el programa Solidworks y se utilizó la herramienta “propiedades de masa” para poder determinar su centro de gravedad. Los cálculos de estabilidad se realizaron asumiendo como zona de operación la sección cónica de la boya ya que se estimó una baja influencia de las demás secciones en la estabilidad de la misma. La Figura 1 muestra el esquema de la boya.

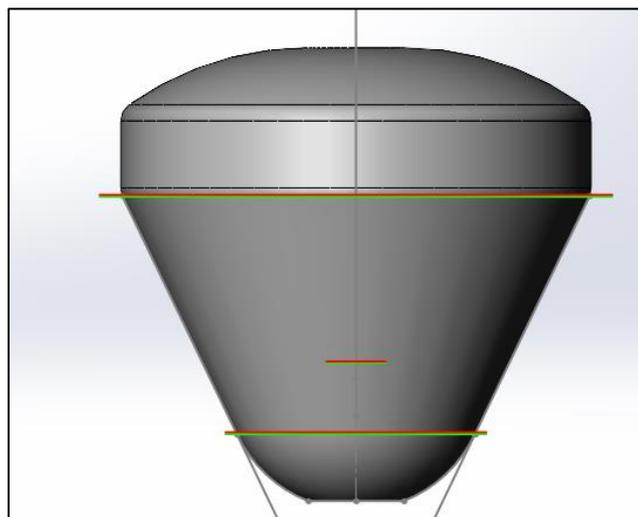


Figura 1 Representación de la boya. Fuente: elaboración propia con el programa Solidworks y con datos de la empresa Innovex.

2.1 Metacentro y zona de estabilidad de la boya

Conociendo el punto de flotación (B) como el centroide del volumen de agua desplazado por la boya, metacentro, M, se calcula por medio de la expresión 1:

$$M = \frac{I}{V} \quad 1)$$

donde I es el segundo momento de área de la sección sumergida referida al nivel del agua y V el volumen de agua desplazado debido a la parte de boya sumergida.

Para calcular la ubicación del metacentro de la boya, se procedió a integrar el volumen de la boya utilizando metodologías numéricas. Se genera la siguiente figura, Figura 2.

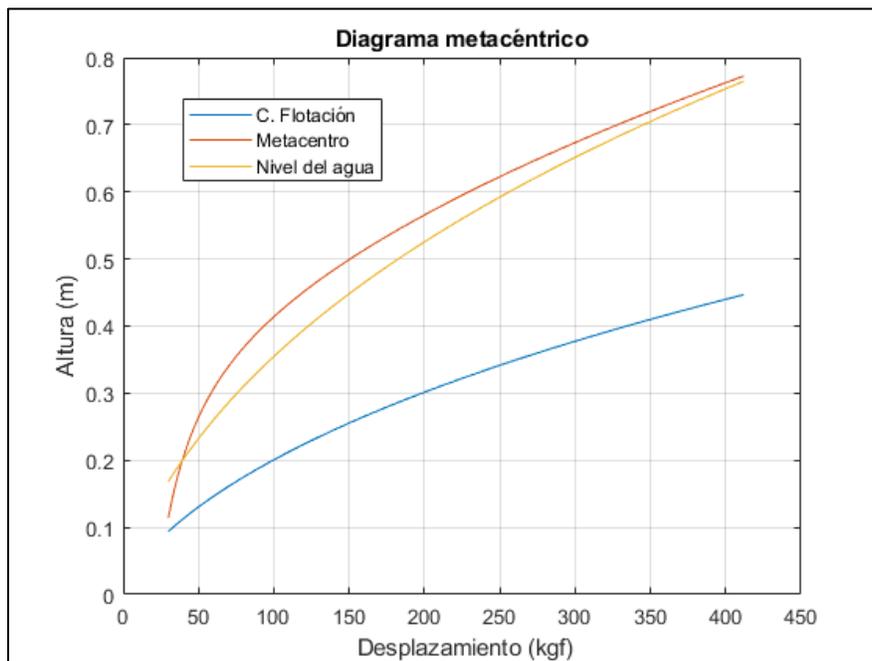


Figura 2 Diagrama metacéntrico de la boya. Fuente: elaboración propia con datos de la empresa Innovex.

La línea azul muestra en centro de flotación (B), lugar donde confluyen las fuerzas que actúan sobre la boya, en función del volumen de agua desplazado. El metacentro M, punto imaginario donde se interceptan la línea vertical ascendente de las fuerzas presentes en el centro de flotación y la línea de equilibrio normal, está representado con la línea de color naranja. De acuerdo con Cengel y Cimbala [1], una condición de estabilidad de cuerpos flotantes indica que

un cuerpo flotante es estable si su fondo es pesado y, por tanto, el centro de gravedad G está debajo del centroide B del mismo, o bien si el metacentro M está arriba del punto G Sin embargo, el cuerpo es inestable si el punto M está abajo del punto G

La Figura 3 muestra los casos de estabilidad de cuerpos flotantes sometidos a fuerzas.

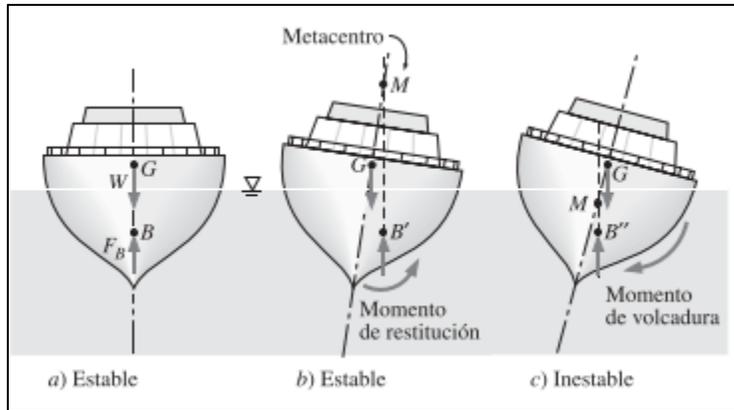


Figura 3 Casos de estabilidad de cuerpos flotantes. Cuerpos estables, casos a) y b) donde $y_M > y_G$. Cuerpos inestables, caso c) $y_M < y_G$. Fuente: Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones, Cengel-Cimbala [1]

Conociendo lo anteriormente mencionado y haciendo uso del diagrama metacéntrico, Figura 2, se genera un gráfico donde se representa las zonas de mayor estabilidad de la boya según donde esté ubicado el centro de gravedad, ver Figura 4.

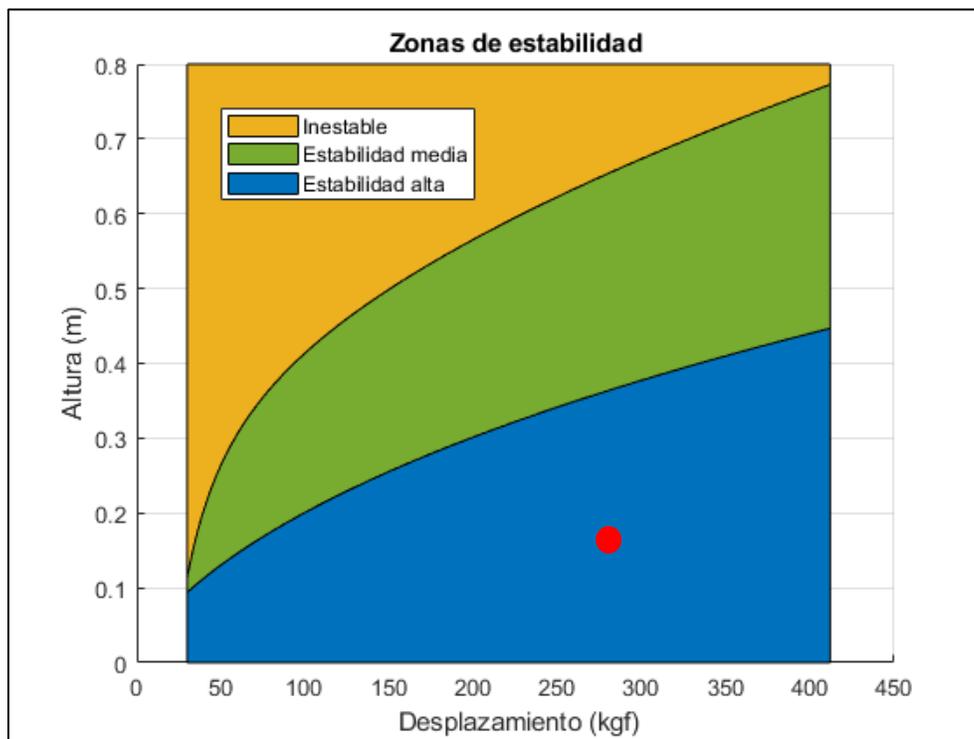


Figura 4 Zonas de estabilidad de la boya en función del desplazamiento (kgf) y la altura sobre la superficie del agua (m). La boya en estudio (punto rojo) está en la zona de estabilidad alta. Fuente: elaboración propia.

Para la configuración de la boya actual, considerando el peso de la torre y los contrapesos, se tiene que el centro de gravedad (G) se ubica aproximadamente 0.16 m con respecto a la base de la boya con un desplazamiento de 270 kgf, lo cual lo posiciona cómodamente dentro de la zona de estabilidad alta, ver el punto rojo de la Figura 4. Este gráfico, aunque

proporciona una buena idea de la estabilidad, no asegura que la boya no pueda volcarse. Esto se debe a que tanto el metacentro (M) como el centro de flotación (B) varían según el ángulo de inclinación de la boya debido al cambio de la distribución del volumen desplazado. Este cambio de B provoca la generación de un brazo de restitución (GZ) que mientras sea positivo generará un momento que permitirá a la boya volver a su posición central. Determinar este brazo de restitución no resulta tarea sencilla, la fórmula más utilizada según la teoría es la “wall-sided formula”, ecuación 2.

$$GZ = \sin \phi \left(GM + \frac{1}{2} BM \tan^2 \phi \right) \quad 2)$$

Sin embargo, esta solo aplica para cuerpos cuya sección transversal tenga lados que sean paralelos entre sí. Debido a que la boya bajo estudio no cumple con las condiciones de paralelismo resulta altamente complicado determinar este brazo de restauración, por lo cual se decidió usar la fórmula

$$GZ = GM \cdot \sin \theta \quad 3)$$

La cual asume un metacentro fijo. Sin embargo, a partir de ella se puede evaluar de forma preliminar el GZ de la boya, el cual está representado en Figura 5.

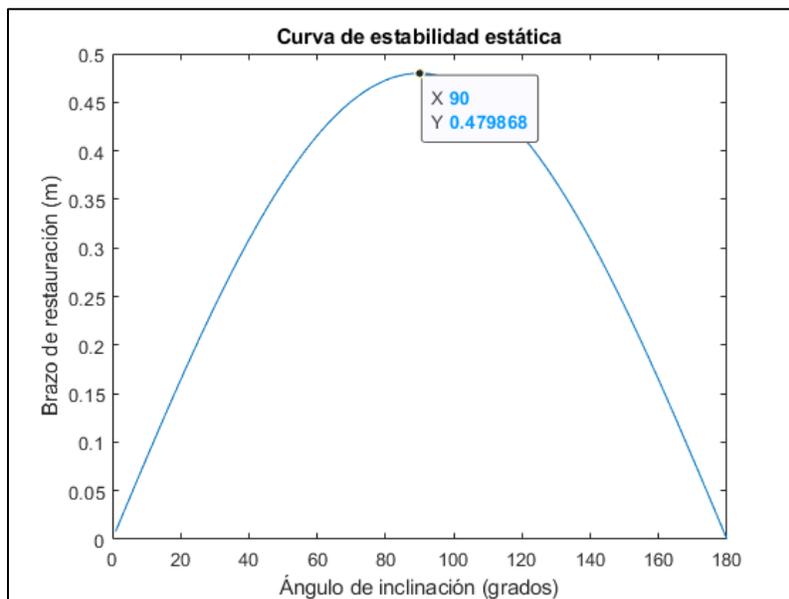


Figura 5 Curva de estabilidad estática a partir del ángulo de inclinación de la boya. Fuente: elaboración propia.

Para complementar la información de la curva de estabilidad estática se evaluó, utilizando Solidworks, el GZ para la boya horizontal, ver Figura 6 y así compararlo con el valor obtenido en la Figura 5.

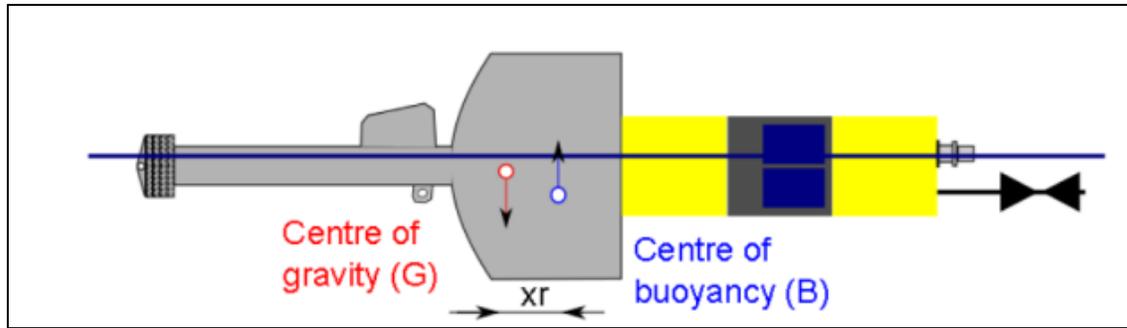


Figura 6 Esquema de la unidad de monitoreo remoto inclinada 180° como comportamiento extremo. La parte izquierda de la figura corresponde al contrapeso de la boya. Fuente: elaboración propia.

El GZ que se obtuvo fue de 0,51 m lo cual representa una diferencia del 9,05 % con respecto al de la curva de estabilidad. Aun con las asunciones que se realizaron para la curva de estabilidad se puede esperar que el comportamiento de la boya en la configuración actual no debe separarse mucho de ella, al menos para valores no mucho mayores de 90°, ya que al tener un centro de gravedad tan bajo y al ser la forma de la boya cónica, lo cual empuja el centro de flotación hacia el extremo superior de la boya, se espera la generación de un brazo de restitución positivo para grandes ángulos de inclinación, lo que sugiere una gran estabilidad de la boya.

2.2 Movimiento de cabeceo de la boya

El oleaje genera una fuerza sobre el objeto flotante dada por la ecuación 4:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_d A_s V^2 \quad 4)$$

donde F es la fuerza experimentada por el objeto sumergido, en este caso la boya de 750 L, medida en Newtons (N); ρ es la densidad del agua (agua dulce aproximadamente 1000 kg/m³), C_d es el coeficiente de arrastre de la boya, adimensional, el cual varía en función de la configuración de la boya, A_s es la superficie sumergida de la boya expuesta a la fuerza del oleaje, en m²; a efectos del análisis en este trabajo, se consideran fuerzas unidireccionales; V^2 representa la velocidad del oleaje al cuadrado, en m²/s².

Para recrear las condiciones de movimiento de una boya se recurre a programas de modelado los cuales, una vez introducidas las condiciones iniciales y restricciones, simulan las variables de interés. En este caso se utilizó un programa CFD (Computational Fluid Dynamics), para desarrollar los análisis de movimiento de cabeceo. Las condiciones climáticas consideradas para el ejercicio de simulación (velocidad del viento, ráfagas de viento, altura de la ola y su intervalo) se obtuvieron de la página web Windfinder [2] para el periodo comprendido entre el 3 de agosto y 3 de septiembre de 2021. En la sección 4 se expone una tabla con los datos recopilados.

La Figura 7 muestra el movimiento de cabeceo de la boya ante situaciones de oleaje en condiciones climatológicas típicas. La amplitud total no supera los 15° recreando 60 segundos de movimiento. Se puede apreciar que, si bien la función se asemeja a una

sinusoide, el movimiento no puede predecirse ya que el oleaje es aleatorio en dirección y amplitud, hechos que el programa de modelado asume mediante una función aleatoria.

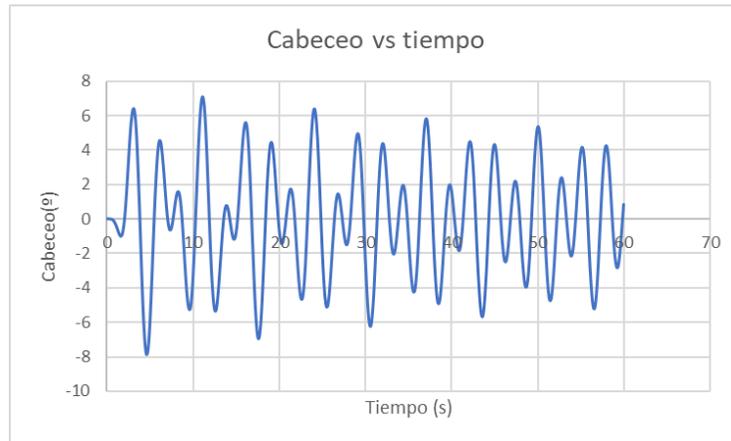


Figura 7 Movimiento de cabeceo de la boya de 750 L. Fuente: elaboración propia con la colaboración de Moisés Jardín [3]

El paso de embarcaciones genera unas condiciones de oleaje atípicas, caracterizadas por una mayor frecuencia del mismo pero una menor amplitud de la onda. El movimiento dependerá del tipo de embarcación, velocidad y distancia. Si la distancia de paso es cercana, el movimiento del oleaje será de mayor frecuencia, menor longitud de onda y menor amplitud; si la distancia de paso de la embarcación es más alejada, la estela se caracterizará por un movimiento de menor frecuencia y mayor longitud de onda. En la Figura 8 se refleja esta situación. Se aprecia que la amplitud del movimiento es mayor en la dirección predominante de la ola. Además, se observa el transitorio, es decir, disminución de la amplitud del movimiento a medida que desaparece este tipo de oleaje.

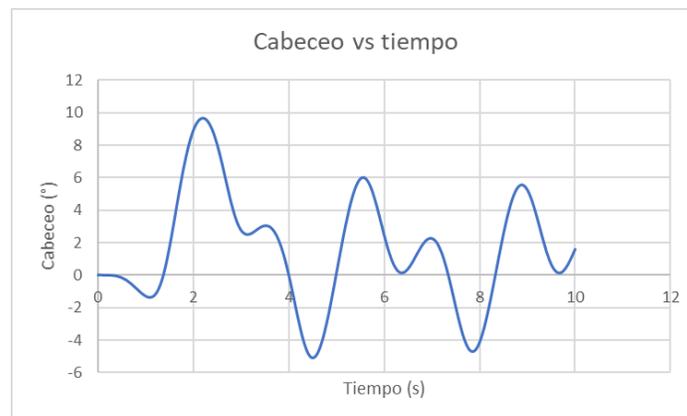


Figura 8 Movimiento de cabeceo de la boya de 750 L debido al paso de una embarcación. Fuente: elaboración propia con la colaboración de Moisés Jardín [3].

3 Boya modelada

La boya utilizada con fines de modelamiento es la boya de la empresa Austral Plastics [4] en la versión de 750 litros. Para más detalles, consultar la página web: <https://australplastics.com/>. La Figura 9 muestra los detalles fundamentales de la boya.

BOYA NIKO 750 L
Cod. 70010070







Especificación Técnica

Volumen:
750 litros

Cuerpo:

- polietileno rotomoldeado
- fabricado en mediana densidad (MDPE)
- Color: naranja
- espesor promedio en 8 mm
- estabilizado con aditivo anti UV

Flotabilidad:

- poliestireno expandido (EPS 15 Kg/m³ densidad)

Inserto:

- a partir de barra acero redondo macizo de 1 pulgada , plato central y de extremos en espesor de 3 mm .

cancamos:

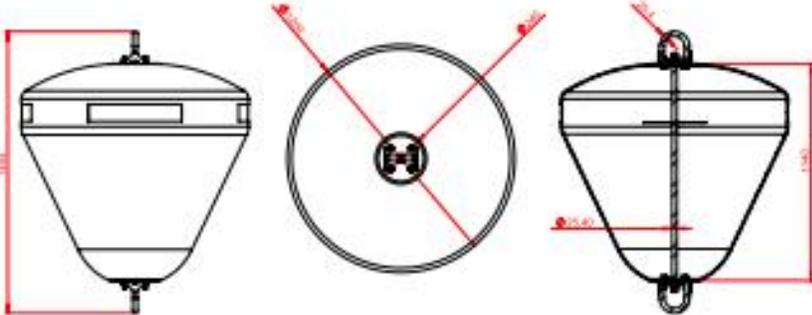
- barra de acero redondo macizo: curvado de 1 pulgada , plato en 4mm espesor

características especiales

- Cinta reflectora 3m (3 áreas perimetro)

the Niko Buoys are products certified by Noomas Certification Ltd.

Noomas Certifisering is authorised by Norwegian Accreditation to certify products within the requirements in NS 9415. through the authorisation from Norwegian Accreditation (PR00 013) we are empowered to make sure that certified products through the companies' 92 routines are in accordance with the requirements.





MEMBER



ISO 9001 REGISTERED



AUSTRAL PLASTICS
C.S.16 S.A.
Longitudinal Sur 40M229 Alto Bordo / Parcela 82
Puerto Montt - Chile
Fono: 56-650 2560 700 / 560 701
www.australplastics.com



LDPE

Figura 9 Ficha técnica de la boya. Fuente: Austral Plastics (<https://australplastics.com>)

7

4 Datos climáticos registrados

Los datos que se exponen han sido obtenidos del portal Windfinder [2] donde se recopila la información meteorológica de alrededor de veinte mil estaciones extendidas a nivel mundial. La Tabla 1 expone los parámetros de velocidad del viento (m/s), ráfagas (m/s), altura de olas (m) y su intervalo (s) obtenidos por [3] en dicho portal.

Tabla 1 Registro del clima en el lago Llanquihue (03 agosto 2021 al 03 septiembre 2021).

Fuente: Jardín, M. [3]

fecha	hora	Velocidad del viento (m/s)	Ráfagas de viento (m/s)	Altura de la ola (m)	Intervalo de la ola (s)
3-Aug-2021	2	2.68	5.81	0.03048	1
	5	3.58	7.60	0.24384	2
	8	3.58	7.15	0.3048	3
	11	3.13	5.81	0.27432	3
	14	3.58	5.36	0.42672	3
	17	4.02	8.05	0.48768	3
	20	3.13	7.15	0.36576	3
	23	2.24	3.13	0.24384	3
4-Aug-2021	2	1.34	3.13	0.12192	3
	5	0.89	0.89	0.09144	3
	8	2.24	3.13	0.09144	2
	11	1.34	3.13	0.09144	2
	14	2.24	4.47	0.06096	2
	17	1.34	3.13	0.03048	2
	20	4.47	14.31	0.12192	1
	23	4.47	13.86	0.42672	3
5-Aug-2021	2	4.47	14.31	0.48768	3
	5	6.71	14.75	0.6096	3
	8	6.26	13.41	0.79248	4
	11	5.81	13.86	0.94488	4
	14	4.47	11.18	0.762	4
	17	3.58	7.15	0.4572	4
	20	2.68	7.15	0.27432	3
	23	2.68	8.05	0.24384	2

6-Aug-2021	2	3.13	9.39	0.3048	2
	5	3.13	8.94	0.3048	3
	8	3.58	9.39	0.3048	3
	11	3.13	6.71	0.24384	3
	14	2.24	4.47	0.18288	3
	17	2.68	6.26	0.12192	2
	20	1.34	2.68	0.09144	2
	23	1.34	1.34	0.09144	2
7-Aug-2021	2	1.34	1.34	0.09144	1
	5	1.34	2.68	0.09144	1
	8	2.24	3.58	0.09144	2
	11	3.13	6.26	0.12192	3
	14	4.02	7.15	0.1524	2
	17	3.58	7.60	0.21336	2
	20	3.13	7.15	0.24384	3
	23	3.13	7.60	0.24384	3
8-Aug-2021	2	3.13	7.60	0.21336	3
	5	3.13	8.05	0.21336	2
	8	3.13	8.05	0.24384	2
	11	4.02	8.05	0.3048	3
	14	5.36	6.71	0.4572	3
	17	4.47	7.60	0.54864	3
	20	3.58	8.05	0.51816	3
	23	3.13	6.71	0.39524	3
9-Aug-2021	2	2.68	5.36	0.33528	3
	5	2.24	4.02	0.27432	3

	8	2.24	4.02	0.27432	3
	11	3.13	5.36	0.27432	3
	14	3.13	4.02	0.33528	3
	17	3.13	4.47	0.36576	3
	20	2.24	4.02	0.39624	3
	23	1.34	2.24	0.39624	3
	2	1.34	2.24	0.36576	3
	5	1.34	2.24	0.33528	3
	8	0.45	0.89	0.33528	3
	11	0.89	0.89	0.3048	3
	14	0.45	1.34	0.33528	3
	17	0.89	0.89	0.36576	3
	20	0.45	0.89	0.33528	3
10-Aug-2021	23	2.68	5.36	0.3048	3
	2	4.02	8.05	0.24384	3
	5	6.26	9.83	0.24384	3
	8	4.47	8.94	0.24384	3
	11	3.58	5.36	0.24384	3
	14	4.02	5.81	0.3048	3
	17	4.47	8.05	0.39624	3
	20	4.02	8.05	0.36576	3
11-Aug-2021	23	2.68	5.36	0.3048	3
	2	0.89	1.34	0.24384	3
	5	0.89	1.34	0.21336	3
	8	0.89	0.89	0.18288	3
12-Aug-2021	11	1.34	2.24	0.18288	3

	14	1.34	1.34	0.18288	2
	17	2.24	3.58	0.21336	2
	20	1.34	2.68	0.18288	3
	23	0.89	0.89	0.1524	2
13-Aug-2021	2	0.89	0.89	0.09144	2
	5	0.45	0.45	0.06096	2
	8	0.89	0.89	0.06096	2
	11	0.45	0.45	0.06096	1
	14	1.34	1.34	0.06096	1
	17	1.34	3.13	0.09144	1
	20	1.34	2.68	0.09144	1
23	1.34	2.24	0.09144	2	
14-Aug-2021	2	0.89	1.34	0.09144	2
	5	0.89	0.89	0.09144	2
	8	0.45	0.89	0.06096	2
	11	1.34	1.34	0.06096	2
	14	1.34	2.24	0.06096	1
	17	1.34	2.24	0.06096	1
	20	0.45	0.45	0.06096	2
23	1.34	2.68	0.06096	1	
15-Aug-2021	2	1.34	4.02	0.12192	1
	5	2.68	9.39	0.18288	2
	8	4.02	12.96	0.27432	2
	11	5.81	13.41	0.36576	2
	14	6.71	14.75	0.42672	3
	17	6.26	14.31	0.48768	3

	20	5.81	14.31	0.54864	4
	23	7.60	15.65	0.57912	4
16-Aug-2021	2	6.26	13.86	0.6096	4
	5	6.26	14.75	0.6096	3
	8	7.15	14.75	0.57912	3
	11	7.60	15.65	0.57912	3
	14	6.26	15.65	0.57912	3
	17	4.02	7.60	0.54864	3
	20	4.47	10.28	0.48768	3
	23	4.47	10.28	0.51816	4
17-Aug-2021	2	3.58	8.94	0.54864	3
	5	3.58	8.05	0.54864	3
	8	4.02	10.28	0.54864	3
	11	4.47	10.28	0.57912	3
	14	5.36	10.73	0.54864	3
	17	7.60	16.54	0.51816	3
	20	8.94	21.46	0.4572	3
	23	9.83	21.90	0.42672	3
18-Aug-2021	2	8.94	21.01	0.42672	3
	5	6.71	15.65	0.39624	3
	8	5.81	13.86	0.39624	3
	11	4.02	10.28	0.39624	3
	14	2.24	5.81	0.36576	3
	17	0.89	2.24	0.36576	3
	20	2.24	4.02	0.36576	3
	23	2.68	5.81	0.39624	3

19-Aug-2021	2	3.58	9.39	0.4572	3
	5	3.58	8.94	0.48768	3
	8	4.02	9.83	0.48768	3
	11	4.47	8.94	0.51816	3
	14	5.36	11.18	0.57912	3
	17	4.47	9.83	0.4572	3
	20	4.02	8.94	0.39624	3
	23	2.68	5.81	0.33528	3
20-Aug-2021	2	2.68	5.81	0.3048	3
	5	3.13	7.60	0.21336	3
	8	1.34	2.24	0.1524	3
	11	3.13	6.26	0.18288	2
	14	3.13	5.36	0.18288	2
	17	2.68	5.81	0.12192	2
	20	2.68	5.36	0.12192	2
	23	2.68	5.36	0.21336	2
21-Aug-2021	2	2.24	4.02	0.27432	3
	5	2.24	4.47	0.33528	3
	8	2.24	4.47	0.42672	3
	11	2.68	6.26	0.42672	3
	14	3.13	5.36	0.36576	3
	17	4.02	7.15	0.39624	3
	20	4.02	7.15	0.42672	3
	23	3.13	8.05	0.33528	3
22-Aug-2021	2	3.13	8.94	0.3048	3
	5	3.13	8.05	0.27432	2

	8	2.68	6.26	0.21336	2
	11	2.68	4.47	0.1524	2
	14	1.34	3.13	0.09144	2
	17	1.34	3.58	0.06096	2
	20	1.34	2.24	0.06096	2
	23	0.89	0.89	0.03048	1
23-Aug-2021	2	0.89	0.89	0.06096	1
	5	0.89	1.34	0.06096	1
	8	0.89	1.34	0.09144	1
	11	1.34	3.58	0.12192	2
	14	3.58	5.81	0.21336	2
	17	3.58	7.15	0.33528	2
	20	4.47	9.83	0.36576	3
	23	4.02	8.94	0.33528	3
24-Aug-2021	2	2.68	5.81	0.24384	3
	5	1.34	3.13	0.18288	3
	8	1.34	2.68	0.12192	3
	11	2.24	4.02	0.12192	2
	14	3.58	4.47	0.12192	2
	17	2.68	4.47	0.1524	2
	20	1.34	2.24	0.12192	2
	23	0.89	0.89	0.18288	2
25-Aug-2021	2	2.24	3.13	0.21336	2
	5	2.24	3.58	0.24384	2
	8	2.68	6.26	0.24384	2
	11	1.34	3.13	0.27432	3

	14	2.24	3.58	0.24384	3
	17	0.89	1.34	0.21336	3
	20	0.45	0.89	0.21336	3
	23	0.89	0.89	0.18288	2
	2	0.45	0.89	0.18288	2
	5	0.89	1.34	0.1524	3
	8	0.89	1.34	0.12192	2
	11	1.34	3.58	0.12192	2
	14	3.13	4.02	0.12192	3
	17	3.13	4.02	0.09144	2
	20	2.24	3.58	0.09144	3
26-Aug-2021	23	0.89	0.89	0.09144	2
	2	0.89	0.89	0.12192	2
	5	1.34	2.24	0.1524	2
	8	1.34	3.13	0.21336	2
	11	2.24	3.13	0.24384	2
	14	1.34	3.13	0.27432	2
	17	1.34	3.13	0.27432	2
	20	2.24	5.36	0.27432	3
27-Aug-2021	23	4.02	7.60	0.3048	4
	2	5.36	9.39	0.3048	3
	5	4.47	9.83	0.3048	3
	8	4.47	9.83	0.27432	3
	11	3.58	8.94	0.27432	3
	14	3.58	6.71	0.27432	2
28-Aug-2021	17	2.24	4.02	0.24384	3

	20	0.45	0.89	0.21336	2
	23	0.45	0.45	0.21336	2
29-Aug-2021	2	5.36	12.96	0.51816	3
	5	4.02	10.73	0.48768	3
	8	4.02	10.73	0.39624	3
	11	3.58	10.28	0.33528	3
	14	3.13	7.60	0.27432	3
	17	2.24	5.81	0.21336	3
	20	2.24	5.36	0.24384	2
	23	2.24	5.81	0.24384	2
30-Aug-2021	2	2.24	5.81	0.24384	3
	5	1.34	4.02	0.24384	3
	8	1.34	3.13	0.24384	3
	11	1.34	3.58	0.24384	3
	14	0.89	2.68	0.24384	2
	17	1.34	1.34	0.21336	2
	20	1.34	2.68	0.21336	2
	23	0.89	0.89	0.27432	3
31-Aug-2021	2	0.89	0.89	0.27432	3
	5	0.89	2.24	0.24384	3
	8	0.89	1.34	0.24384	3
	11	0.45	1.34	0.24384	2
	14	0.89	0.89	0.24384	3
	17	1.34	2.68	0.24384	3
	20	1.34	4.02	0.24384	3
	23	0.89	0.89	0.27432	2

1-Sep-2021	2	0.89	0.89	0.3048	3
	5	1.34	2.24	0.3048	3
	8	2.24	4.02	0.3048	3
	11	2.24	4.02	0.27432	3
	14	2.24	4.02	0.24384	3
	17	2.68	6.26	0.21336	3
	20	3.13	8.94	0.18288	3
	23	2.68	7.60	0.18288	3
2-Sep-2021	2	2.68	8.94	0.18288	2
	5	2.68	7.15	0.18288	2
	8	3.13	7.60	0.18288	3
	11	3.58	8.05	0.21336	3
	14	3.13	6.71	0.21336	3
	17	3.58	9.39	0.18288	3
	20	3.58	9.83	0.1524	3
	23	4.47	10.73	0.1524	6
3-Sep-2021	2	5.81	12.52	0.1524	2
	5	5.81	12.52	0.18288	2
	8	2.68	6.26	0.21336	2
	11	3.13	6.26	0.27432	2
	14	4.02	7.60	0.27432	2
	17	4.02	8.05	0.24384	2

5 Bibliografía

- [1] Y. Cengel y J. Cimbala, Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones., Mc Graw-Hill, 2006.
- [2] Windfinder. [En línea]. Available: <https://es.windfinder.com/>. [Último acceso: Septiembre 2021].
- [3] M. Jardín, «Factores que influyen en la estabilidad de boyas dedicadas al monitoreo de calidad de agua en ambientes lacustres,» Universidad Metropolitana (Tesis de Grado), Caracas, Venezuela, 2021.
- [4] A. Plastics. [En línea]. Available: <https://australplastics.com>. [Último acceso: 09 Julio 2021].