



Universidad Austral de Chile
Conocimiento y Naturaleza

FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE GEOGRAFÍA

Análisis de la onda de marea en el río Calle-Calle con
Dataloggers de bajo costo (Arduino).

Trabajo de titulación presentado a la escuela de Geografía de la Universidad Austral de Chile en cumplimiento de los requisitos para optar al Título profesional de Geógrafo.

Gonzalo Nicolás Durán Vilches

Profesor Guía: Pablo Rodrigo Iribarren Anacona

Valdivia, Chile 2019

Índice de contenido

Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	viii
Resumen	ix
Abstract.....	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Sistemas de Monitoreo de bajo-costo.....	3
1.3. Hipótesis	4
1.4. Objetivo General.....	4
1.5. Objetivos Específicos.....	4
1.6. Área de estudio.....	5
1.6.1. Clima	6
1.6.2. Geomorfología y geología.....	6
1.6.3. Hidrografía	6
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Mareas.....	9
2.1.1. Marea de Equilibrio	9
2.1.2. Variaciones en las mareas Lunares.....	12
2.1.3. Sistema Tierra-Sol.....	13
2.1.4. Interacción de la Marea Solar y Lunar.....	14
2.1.5. Dinámicas de mareas.....	14
2.2. Estuarios.....	15
2.2.1. Clasificación de Estuarios	17
2.3. Marea en estuarios	20
2.4. Métodos de análisis de mareas.....	21
2.4.1. Captura de datos.....	21
2.5. Sensores de bajo costo	22
2.5.1. Métodos de análisis de datos.....	23

3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1.	Piezas y construcción del datalogger de ultrasonido.....	24
3.1.1.	Microcontrolador.....	26
3.1.2.	Lector de Tarjeta Micro SD.....	27
3.1.3.	Reloj.....	27
3.1.4.	Ultrasonido.....	28
3.1.5.	Sensor de temperatura.....	29
3.1.6.	Sistema de bajo consumo de energía.....	29
3.2.	Construcción del datalogger.....	29
3.3.	Software del datalogger.....	31
3.4.	Selección de sitio de medición e instalación en terreno.....	31
3.5.	Exactitud y precisión de los datos.....	32
3.6.	Filtro de datos anómalos.....	34
3.6.1.	Filtro por rango de distancia.....	34
3.6.2.	Filtro de mediana móvil.....	37
3.6.3.	Estacionalidad en la estación Purey.....	38
3.7.	Velocidad, tiempo de desfase y relación con la fase Lunar.....	38
3.7.1.	Velocidad de la onda de marea.....	38
3.7.2.	Cálculo del Tiempo de Desfase de la marea por día.....	41
3.7.3.	La altura de la marea y su relación con la declinación lunar.....	41
4.	RESULTADOS.....	42
4.1.	Exactitud y precisión de los datos.....	43
4.2.	Análisis de la onda de marea en el estuario fluvial.....	45
4.3.	Velocidad de la onda de marea.....	47
4.4.	Tiempo de Desfase de la marea por día.....	51
4.5.	La relación entre la altura de la marea y la fase Lunar.....	53
5.	DISCUSIÓN.....	55
5.1.	Sobre la exactitud de los datos y el datalogger.....	55
5.2.	Sobre análisis de onda de marea en el estuario fluvial.....	57
5.3.	Sobre la velocidad de la onda de marea.....	60

5.4. Sobre el tiempo de desfase por día.....	61
5.5. Sobre la relación entre la altura de la marea y la fase Lunar.....	62
6. CONCLUSIÓN	63
7. REFERENCIAS.....	65
8. ANEXOS	75

Índice de figuras

Figura 1. Mapa del área de estudio a lo largo del Estuario Fluvial del río Calle-Calle.....	5
Figura 3. Caudal medio mensual del río Calle-Calle de la estación Pupunahue de la DGA durante el periodo 2018-2019. Elaboración propia.....	7
Figura 2. Fotografías de la playa de Collico, a) marea baja, b) marea alta. La línea roja marca los sectores donde fluctúa la marea.....	7
Figura 4. Basado en el Libro “Waves, tides, and shallow-water processes”, capítulo 2 Tides, pagina 53. Esta Figura (no a escala) muestra el movimiento excéntrico del sistema Tierra-Luna, donde la Luna gira alrededor del centro de masa de dicho sistema una vez cada 27,3 días, al igual que el centro de la Tierra.	9
Figura 5. Fuerza generadora de mareas debido a la Luna o el Sol. Suponiendo que la Tierra es un planeta cubierto de agua y con un fondo marino uniforme. Ilustración sacada del Libro “Descriptive Physical Oceanography”, pagina 237.	11
Figura 6. Ciclos que afectan las mareas Lunares. a) La producción de mareas desiguales en latitudes medias es producto de la declinación de la Luna, es por ello, si un observador en Y experimentará una alta marea más alta que la de un observador en X, intercambiando después de 12 horas con 25 minutos las observaciones entre estos dos puntos. b) Posiciones sucesivas de la órbita Lunar, vista desde el polo norte (no a escala), en el ciclo de precesión de 18,6 años. Estas ilustraciones fueron sacadas de Open University. Oceanography Course Team., 1999, pp. 59–60.	13
Figura 7. Estas Figuras asumen que no existe declinaciones entre los astros (cuando en realidad si tiene) y que la Tierra está vista desde arriba del polo norte. a) muestra la alineación de la marea de sicigia. b) muestra la alineación de mareas muertas.	14
Figura 8. Principales sectores de un estuario según sus características físicas. Ilustración de Piccolo & Perillo (2000).	17
Figura 9. Variación del rango de marea y la amplitud de velocidad de la corriente en estuarios con diferentes geometrías (tomado de Dyer, 1997).	18
Figura 10. Arduino pro mini de 5 Voltios modificado. En el recuadro naranja se retiraron el Led con la resistencia y en el recuadro rojo, se retiró el regulador de voltaje.	26
Figura 11. Ensamblado del datalogger. a) es un diagrama de las conexiones que se realizan en el datalogger. b) es una imagen del ensamblado en físico del datalogger de ultrasonido.	30

Figura 12. Montaje del test de precisión de Datalogger de Ultrasonido ubicado a 4 metros de la pared.	33
Figura 13. Sitio en donde están instalados los sensores del proyecto R.E.M.A y el datalogger de ultrasonido.	34
Figura 14. Filtro realizado a partir de clasificación por distancia >4 metros. Diferencia en los datos, el gráfico A) contiene los datos de la baliza Lido sin filtro y B) los datos con filtro. Elaboración propia.	35
Figura 15. Figura que muestra la inversión de datos para generar mareograma para la Estación Lido. A) datos sin invertir y B) datos invertidos. Elaboración Propia.	36
Figura 16. Comparación del filtrado de datos mediante la mediana móvil. Se puede observar cómo esta fórmula limpia gran parte de los datos anómalos en la Estación Lido. A) se muestran los datos identificados para filtrar y B) muestra los datos que quedan luego de aplicar el filtro.	37
Figura 17. Mapa topográfico y perfil longitudinal de Elevación del trazo realizado en el mapa. El perfil muestra la elevación en metros extraída desde el DEM srtm de 30 metros, mostrando los cambios de pendiente que ocurren a lo largo de la sección del río.	40
Figura 18. Tabla con las fechas en que se capturaron datos efectivos. Existen días sin datos y eso fue producto de que sacaron el datalogger de Purey y se perdieron los datos de enero a febrero de esa estación.	42
Figura 19. Gráfico con los resultados de la prueba en laboratorio. A) corresponde a la distancia a 1 metro, B) corresponde a la distancia de 3 metros y C) a 4 metros.	43
Figura 20. Mareograma con los datos normalizados de la baliza Lido y el Sensor de presión del proyecto R.E.M.A. En este grafico se puede observar cómo calzan los distintos niveles de la marea en el río Calle-Calle.	44
Figura 21. Gráfico de correlación entre los datos obtenidos entre el sensor de ultrasonido de la Estación Lido y el sensor de presión del Proyecto R.E.M.A. Elaboración propia	44
Figura 22. Mareogramas de las estaciones Purey, Calle-Calle, Huellelhue y Lido. Nótese que mantienen las fluctuaciones de 1,40 metros aproximados, estando a unos 46 km de la bahía de corral, los datos de la estación Calle-Calle.	45
Figura 23. Gráfico que muestra los datos de la estación Purey desestacionalizados. Se percibe que el caudal va disminuyendo a lo largo de los días 17 al 29. Al quitar esta tendencia, se observa mejor la ciclicidad que existe en los días.	46
Figura 24. Mapas de horas de ocurrencia de marea más alta y baja de las distintas estaciones, durante la fecha 27-01-219. (Mapa de arriba marea más alta, mapa de abajo marea más baja del día.)	48

Figura 25. Mapas de horas de ocurrencia de marea más alta y baja de las distintas estaciones, durante el día 04-02-2019. (Mapa de arriba marea más alta, mapa de abajo marea más baja del día.).....	49
Figura 26. Mapas de horas de ocurrencia de marea más alta y baja de las distintas estaciones, durante el día 17-03-2019. (Mapa de arriba marea más alta, mapa de abajo marea más baja del día.).....	50
Figura 27. Mareogramas de las estaciones: A) Lido, B) Huellelhue, C) Calle-Calle, D) Purey. Con las fechas de las distintas fases de la Luna.	54
Figura 28. Mareograma de comparación entre los datos normalizados de la estación Lido y la Baliza R.E.M.A durante las fechas 12 de febrero al 19 del 2019.	56
Figura 29. Comparación de los rangos de marea de la baliza Lido y Calle-Calle, para el 21-03-2019. Nótese que ambas amplitudes se mantienen en esa sección, que es de aproximadamente 30 km.....	58
Figura 30. Caudal medio diario de la estación Pupunahue de la DGA durante los días de muestreo de la estación Purey.	59
Figura 31. Gráfico en donde se observan los datos normalizados de las estaciones Lido, Calle-Calle y Purey. En el gráfico de la derecha es un zoom a los datos de los días 25-29 de marzo.	59
Figura 32. Gráfico que muestra el tiempo que demora en recorrer la marea a lo largo del estuario para la marea alta (HW) y la baja (LW). A) corresponde a el día 27-01. B) corresponde a el día 04-02 y C) al 17-03.....	60

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla con el listado de los principales componentes del datalogger de ultrasonido, describiendo sus funciones y precio.....	24
Tabla 2. Tabla de consumo de RTC DS3231, en los distintos estados de modificación que se le realizaron para usar en el datalogger de ultrasonido. Las modificaciones están enmarcadas en un recuadro rojo. Para el RTC con las modificaciones finales se corta la conexión entre Cr2032 y Vbat, siendo reconectado a través de un diodo 1N4148. El pin Vcc del DS3231 está desconectado de la placa y se conecta a Tierra por medio de la pata del condensador 104.	28
Tabla 3. Rangos de filtro realizado a los datos de los distintos sensores instalados en terreno.	35
Tabla 4. Tabla que muestra la distancia desde Corral a cada estación en Kilómetros. La distancia se calculó utilizando Google Earth.	39
Tabla 5. Tabla resumen de velocidades. El cálculo de velocidad se realizó considerando la distancia y el tiempo del trayecto desde Corral hasta cada estación.	51
Tabla 6. Horas en que ocurre la marea más alta y baja por día para la estación Lido, y el desfase en horas y minutos (H:m).....	52

Resumen

Los sistemas de monitoreo están enfocados en coleccionar datos de recursos naturales, siendo uno de los más importantes el agua, ya sea en el océano, ríos, lagos y aguas subterráneas. Chile se caracteriza por poseer sistemas estuarinos como el del río Bio-Bio (Bertrán et al., 2001), siendo uno de los destacados por su rol ecosistémico y gran descarga, el estuario del río Valdivia (Garcés-Vargas et al., 2013). Dentro de la cuenca del río Valdivia, existen estuarios fluviales como el del río Calle-Calle, que se ven afectados por la propagación de la onda de marea. Presentando la mezcla de agua dulce y salada, y fluctuaciones de marea a lo largo del río. Las cuales poseen distintas características de propagación, como velocidad, rangos de marea y un límite efectivo, a lo cual el presente estudio pretende responder.

La recolección de datos como los de marea, requieren esfuerzos que van desde mediciones en terreno o la instalación de sensores que consumen tiempo, mano de obra y dinero, siendo limitados en el almacenamiento y horas de funcionamiento, además de limitar la resolución espacial por los altos costos. Arduino es una plataforma de código abierto que desarrolla microcontroladores programables, los cuales son compatibles con diferentes sensores, los cuales son de bajo costo y de fácil programación que son una alternativa a las necesidades de monitoreo ambiental. Considerando la falta de estudios del comportamiento de la marea del estuario del río Calle-Calle y la alternativa de los sensores de Arduino a los sensores comerciales. La presente investigación se enfoca en captar las variaciones de marea, utilizando Datalogger de ultrasonido de fabricación propia. El cual permitió captar las fluctuaciones de marea a lo largo de 45 km del río Calle-Calle, desde Valdivia hasta la localidad de Purey con 4 dispositivos, los cuales fueron validados por los datos de la estación Lido de la Red de monitoreo ambiental del estuario del río Valdivia (R.E.M.A).

La onda de marea que se propaga a lo largo del estuario mantiene su característica de ser micromareal semidiurna, poseyendo un rango de 1,38 m para marea vivas que se mantiene por 30 km. El límite efectivo de marea fue a los 62 km de la bahía de Corral durante marzo del 2019, distinto a lo descrito por la DGA que define el límite a 38 km. El datalogger de ultrasonido duró 34 días tomando datos cada 1 minutos, almacenando un total de 31600 datos con 4 pilas AA de 2700 mAh. El estudio demuestra que es una alternativa factible de bajo costo y se espera contribuir como orientación a otros investigadores para el desarrollo de sistemas de detección y monitoreo de bajo costo.

Palabras Clave: Estuario Fluvial, Río Calle-Calle, Mareas en ríos, Arduino, Datalogger ultrasonido, sistemas de bajo costo.

Abstract

Monitoring systems are focused on collecting data from natural resources, one of the most important being water, whether in the ocean, rivers, lakes and groundwater. Chile is characterized by having estuarine systems such as the rivers called Bio-Bio (Bertrán et al., 2001), being one of the outstanding for its ecosystemic role and great discharge, the Valdivia River estuary (Garcés-Vargas et al., 2013). Within the Valdivia river basin, there are fluvial estuaries such as the Calle-Calle river, which are affected by the propagation of the tidal wave. Not only with the mixture of fresh and salt water, but also having tidal fluctuations along the river. These have propagation characteristics, such as speed, tidal ranges and the limit reached that this study aims to answer.

The collection of data such as tide, require efforts ranging from field measurements or the installation of sensors that the time-consuming and labor, are expensive, limited in storage and hours of operation, in addition to being limited to having a small spatial resolution. Arduino is an open source platform that develops programmable microcontrollers, which are compatible with different sensors, which are low cost and easily programming that are an alternative to environmental monitoring needs. Considering the lack of studies of the tidal behavior of the Calle-Calle River estuary and the alternative of Arduino sensors to commercial sensors. This research focuses on capturing the tidal variations present in the estuary, using a proprietary ultrasound datalogger. Which allowed to capture tidal fluctuations along 45 km of the Calle-Calle river, from Valdivia to Purey with 4 devices, which were validated by data from the Lido station of the Environmental Monitoring Network of the Valdivia river estuary (R.E.M.A).

The tidal wave that propagates along the estuary maintains its characteristic of being semi-diurnal micromareal, possessing a range of 1.38 m for live tides that are maintained for 30 km. The effective tidal limit was 62 km from Corral Bay during March 2019, different from that described by the DGA that defines the limit at 38 km. The ultrasound datalogger lasted 34 days taking data every 1 minute, storage a total of 31600 data with 4 AA batteries of 2700 mAh. The study demonstrates that it is a feasible low-cost alternative and we hope to contribute as guidance to other researchers for the development of low-cost detection and monitoring systems.

Key words: Fluvial estuarine, tidal rivers, River Calle-Calle, Arduino, Datalogger ultrasonic, low cost sensors.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema.

La sostenibilidad ambiental está estrechamente ligada al monitoreo ambiental (Anweiler & Piwowarski, 2017), siendo este último la base para la gestión, planificación y manejo sustentable recursos naturales. El monitoreo ambiental tiene como objetivo la colección de datos para una mejor comprensión del medio y sus problemas, que lleva a una posterior toma de decisión (Anweiler & Piwowarski, 2017). Pero para que ello ocurra es necesario obtener una calidad y cantidad de datos acorde a las necesidades y objetivos del sistema de monitoreo ambiental (J. F. Artiola & Warrick, 2004; Rohrer et al., 2013).

Entre los desafíos que tienen las redes de monitoreo ambiental, se cuentan: monitorear en múltiples sitios, la duración de energía para periodos largos de tiempo, el almacenamiento de una gran cantidad de datos, las observaciones y mediciones en tiempo real y, la actualización de datos. Esto provoca muchas veces el aumento de los costos del sistema, dando como resultado restricciones a la hora de realizar el monitoreo (Allouhi et al., 2015; Corbellini et al., 2018).

Los sistemas de monitoreo están enfocados en coleccionar datos de recursos naturales, siendo uno de los más importantes el agua, ya sea en el océano, ríos, lagos y aguas subterráneas. El recurso hídrico se ha visto afectado por intervenciones humanas, las cuales producen cambios en temperatura, régimen y calidad del agua, amenazando la seguridad hídrica y la biodiversidad. Por ello, proyectos de investigación que aporten datos respecto al comportamiento del recurso hídrico podrían tener efectos económicos positivos (Carpenter et al., 2011; Gimeno et al., 2018; Hernandez-Suarez et al., 2018).

El monitoreo ambiental en ríos se enfoca comúnmente en la medición de características físicas y químicas del agua y en el estudio de la morfología de corredores fluviales. Aspectos comúnmente medidos son: cambios geomorfológicos (Hemmelder et al., 2018), calidad y temperatura del agua, partículas en suspensión, PH, cantidad de contaminantes, pérdida de especies (Chapman et al., 2016) y caudal (Thomas & Marino, 2016). No obstante, estudios de ríos afectados por marea (Godin, 1999), son poco abordados por la oceanografía física y la hidrología (Hoitink & Jay, 2016).

Para identificar la influencia mareal en ríos, se han realizado distintos estudios que utilizan distintos instrumentos o técnicas como: correntómetro acústico *Doppler*, sonda *CTD YSI-CastAway*, mareógrafo, métodos de estimación de la descarga del río para periodos de tiempo con datos de mareas, pero sin registro

de flujo (Fraile Jurado & Fernández Díaz, 2016; Mofkakhari, et. al 2013; Thomas & Marino, 2016).

La comprensión de la propagación de la onda de marea y las propiedades la marea en los estuarios es de amplia importancia científica y social, para la gestión y modificación de canales para la navegación u otras intervenciones humanas que alteran la propagación de la marea lo cual produce cambios en el ecosistema estuarino (Buschman et al., 2009; Cai et al., 2012; Fossatia et al., 2014; Garel & Cai, 2018; Horrevoets et al., 2004).

El monitoreo de ríos influenciados por marea ayuda a la planificación de los sistemas hídricos, creando por ejemplo pronósticos de eventos futuros (Kisi & Cimen, 2011), predecir cambios de descarga de ríos que afectan la entrada de sedimentos al océano (Syvitski et al., 2003), predecir inundaciones ocasionadas por marejadas ciclónicas (Peng et al., 2004), la gestión de los recursos hídricos (Loitzenbauer & Bulhões Mendes, 2012) y el cuidado ecológico de los corredores fluviales (Froneman, 2004; Legendre et al., 1999; Simier et al., 2004).

En Chile existen diversos sistemas estuarinos que han sido estudiados como por ejemplo el estuario del río Bio-Bío fue abordado desde el punto vista sedimentológico y faunísticos (Bertrán et al., 2001), mientras que el estuario del río Aconcagua con un análisis hidrológico y sedimentológico (Martínez & Cortez, 2007). Pero uno de los que se destaca es el del río Valdivia ubicado en la región de Los Ríos. Este último es uno de los más importantes de Sudamérica por su gran descarga y rol ecosistémico para especies comerciales de jaibas como *Cancer edwardsii* y *Cancer coronatus* (Pardo et al., 2012), pero a pesar de ello en Chile se le ha dado escaso interés para conocer sus dinámicas y geografías a sistemas similares (Garcés-Vargas et al., 2013).

El origen del estuario se considera que es tectónico y se caracteriza por ser influenciado por el régimen micromareal que presenta la bahía de Corral, caracterizándose por tener un comportamiento semidiurno, con un rango promedio de 0,8 m, influyendo hacia el interior de la cuenca en niveles de salinidad y de las fluctuaciones de la columna de agua de los distintos estuarios presentes en la cuenca del río Valdivia (Garcés-Vargas et al., 2013; Pino et al., 1994). No obstante, faltan estudios sobre el límite del estuario del río (Heredía, 2008).

En Chile existen distintos organismos que realizan monitoreo a recursos hídricos, pudiendo ser gubernamentales y/o privadas, como el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI), Dirección General de Aguas (DGA), Instituto de Investigación Pesquera de Chile (INPESCA), empresas privadas enfocadas a

desarrollar sistemas de monitoreo ambiental como Nawi (“Nawi - Monitoreo Ambiental - Chile,” n.d.) o INERCO (“Inicio,” n.d.) y la Red de Monitoreo Ambiental (R.E.M.A) del estuario del Río Valdivia (“Quiénes Somos – REMA,” n.d.). Pero a pesar de tener una gran cantidad de organizaciones que se encargan del monitoreo, no poseen sensores que den cuenta de la dinámica de la onda de marea en la zona alta del estuario del río Calle-Calle.

Por ello aún existen preguntas de investigación sin respuestas respecto al estuario que este trabajo pretende responder. Por ejemplo ¿cuál es el límite superior del estuario? ¿Con qué velocidad se desplaza la onda de marea río arriba? ¿Cuándo sube el nivel del río a causa de la marea?

1.2. Sistemas de Monitoreo de bajo-costos.

Los avances de la ciencia han podido ayudar a tener tecnología que sirva para diseñar diversos sistemas de monitoreo ambiental, los cuales en muchos casos son de altos costos, ya sea en su implementación o adquisición. Además se suma las distintas necesidades que presenten los objetivos del estudio, como el requerir mayores capacidades de almacenamiento, eficiencia energética o muestrear grandes áreas geográficas, aumentando los costos del proyecto (Gandra et al., 2015).

Es por ello, en la actualidad, gracias al desarrollo tecnológico es que se puede apelar a una alternativa que puede ser de mucha ayuda. Los sensores económicos o de bajo costo, son la alternativa que se presenta actualmente, ya que tienen como objetivo el desarrollo de sistemas robustos, económicos y libres, que permiten a los usuarios crear sus propios sistemas, para abordar sus propios problemas (Di Gennaro et al., 2014; Lockridge et al., 2016; Oates et al., 2017).

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en un hardware y software de fácil uso (www.arduino.cc), el cual tiene múltiples configuraciones y sensores que pueden ser de ayuda para abordar las problemáticas antes planteadas. Además posee una amplia comunidad de comunicación entre usuarios, quienes brindan apoyo para el continuo desarrollo de distintos enfoques de proyectos (Fisher & Sui, 2013; Guerriero et al., 2017; Soler-Llorens et al., 2016).

La plataforma de Arduino posee y ha desarrollado diversos sensores que miden distintos parámetros (Jo & Baloch, 2017; Koenka et al., 2014). Considerando la falta de estudios del comportamiento de la marea del estuario del río Calle-Calle y la alternativa de los sensores de Arduino a los sensores convencionales, en la presente investigación se enfoca en captar las variaciones de marea presente en el estuario, utilizando Datalogger de fabricación propia.

1.3. Hipótesis

La tesis tiene dos hipótesis una relacionada con los dataloggers Arduino y otra respecto a la dinámica de la marea en el estuario del Río Calle-Calle.

1. Los dataloggers desarrollados en la plataforma Arduino son una alternativa confiable y de bajo costo para el análisis de marea en estuarios.
2. La onda de marea puede afectar el nivel del río decenas de kilómetros aguas arriba de la costa.

1.4. Objetivo General.

Demostrar que datalogger con sensor de ultrasonido de la plataforma Arduino, es un sistema viable y de bajo costo para el análisis de cambios de nivel del agua en el Estuario Calle-Calle.

1.5. Objetivos Específicos.

- 1) Construir un datalogger que permita la medición de los cambios de marea en el río Calle-Calle con la plataforma Arduino.
- 2) Caracterizar la onda de marea en el estuario fluvial del río Calle-Calle producto de la influencia de los cambios de marea, a partir del datalogger construido.
- 3) Analizar, comparar y evaluar los datos obtenidos del datalogger de plataforma Arduino con los datos de sensores comerciales presentes en el estuario.

1.6. Área de estudio

El área de estudio se ubica en el estuario fluvial del río Calle-Calle, la cual se encuentra entre la localidad de Valdivia y el sector de Purey, comuna de Los Lagos. El presente río es parte del sistema hídrico de la cuenca del río Valdivia con una superficie de 11.280 km² (Muñoz-Pedrerros, 2003), el cual adquiere el nombre desde la comuna de Los Lagos ubicada de la Región de Los Ríos.

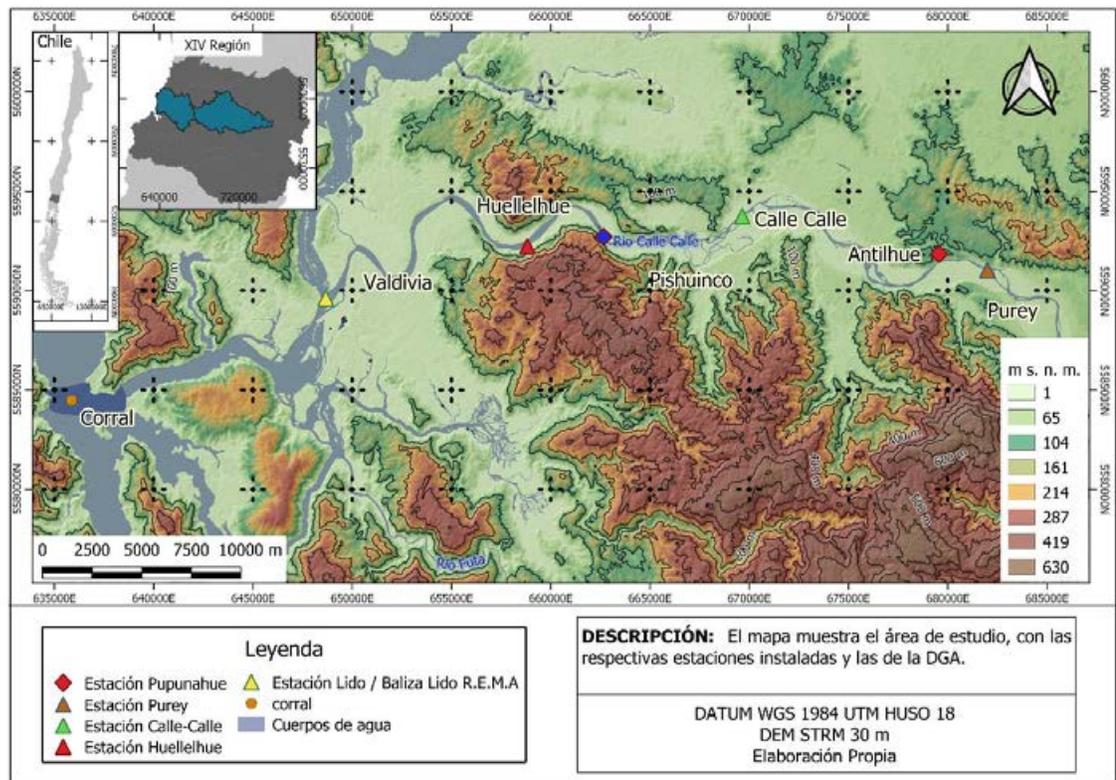


Figura 1. Mapa del área de estudio a lo largo del Estuario Fluvial del río Calle-Calle. Elaboración propia.

El río Calle-Calle nace de la unión del río San Pedro y el río Quinchilca, y termina en la unión con el río Cau-Cau (DGA, 2004). El río es parte de un sistema fluviolacustre que se caracteriza por que sus aguas vienen desde la cadena de ocho lagos ubicados aguas arriba, los cuales contribuyen con un caudal abundante y constante a lo largo del año (DGA, 2004), perteneciendo en este caso, a la descarga fluvial del sistema de lagos norpatagónicos (Thomasson, 1963), los cuales poseen una gran importancia ecológica y turística en el País (Habit & Parra, 2012).

1.6.1. Clima

La cuenca está ubicada en la zona oceánica o lluviosa, donde durante los meses del año son húmedos, donde el promedio de precipitación anual es de 3000 mm (Solari et al., 2011). A lo largo de la cuenca del río Valdivia, se presentan dos tipos de climas, el templado frío lluvioso con influencia mediterránea en el sector precordillerano de la cuenca y el clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea presente en la zona centro y baja de la cuenca, al cual pertenece el Calle-Calle (Heredía Carrasco, 2008).

El clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea se caracteriza por estar presente entre las regiones administrativas de La Araucanía y Los Ríos (sector norte). Presenta precipitaciones a lo largo de todo el año, pero éstas disminuyen en el periodo de verano, las temperaturas no presentan una gran oscilación a lo largo de la zona (Heredía Carrasco, 2008).

1.6.2. Geomorfología y geología.

EL río Calle-Calle se extiende por el sector medio de la cuenca denominada depresión Occidental, con un desarrollo meándrico y con una escasa pendiente (Solari et al., 2011), en donde se encuentran planicies fluviales y lomas que conforman el paisaje de este lugar. Donde abundan rocas metamórficas del basamento cristalino del paleozoico o del precámbrico, algunas rocas del Mioceno-Plioceno, las cuales son representadas por algunos sedimentos marinos o continentales que se intercalan con los mantos de carbón y pizarras bituminosas (Schwember et al., 1996). Los tipos de sedimentos que son transportados son material de relleno o depósitos no consolidados de origen glacial (DGA, 2004).

1.6.3. Hidrografía

Dentro de las características hidrográficas del Río Calle-Calle, se presenta la caracterización que realizó Garcés-Vargas et al., (2013), en donde menciona que a lo largo del año la marea, caudal del río, viento y radiación Solar; modifican las características de la estructura termal y halina del estuario del río Valdivia. Lo cual sirve como referencia para determinar el comportamiento del estuario río arriba o incluso hasta dónde llega la influencia de la marea en los estuarios de los ríos aguas arriba, por ejemplo, en el sector de Collico donde ocurren fluctuaciones de marea (Figura 2).

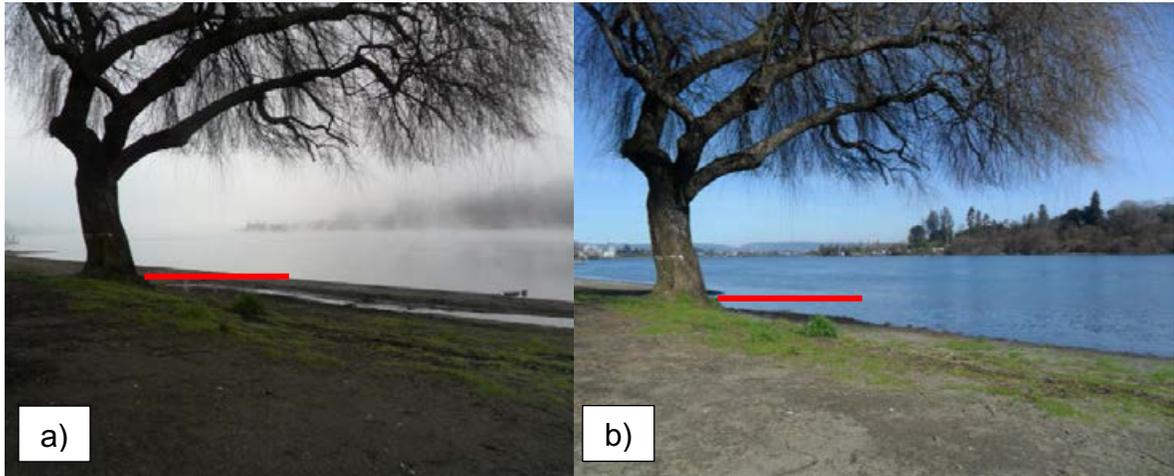


Figura 3. Fotografías de la playa de Collico, a) marea baja, b) marea alta. La línea roja marca los sectores donde fluctúa la marea.

El comportamiento del estuario cambia a lo largo del año producto de los distintos forzantes como la marea, el caudal del río, viento y la radiación Solar (Garcés-Vargas et al., 2013). En enero el estuario se comporta como parcialmente mezclado, ya que la influencia del agua salada llega hacia el interior debido a que el caudal del río es mucho menor que en las épocas de invierno-primavera (junio y septiembre). En junio es clasificado de Cuña salina, donde el caudal del río es alto y los vientos se dirigen hacia la boca del estuario, forzando que la cuña salina ingresara hacia el interior.

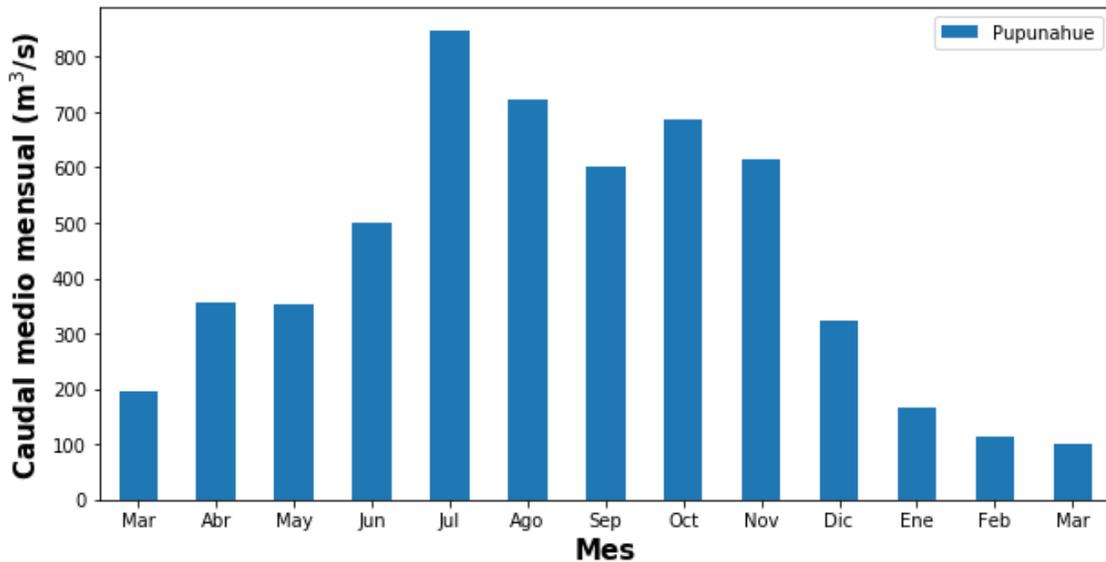


Figura 2. Caudal medio mensual del río Calle-Calle de la estación Pupunahue de la DGA durante el periodo 2018-2019. Elaboración propia.

En definitiva, el estuario es clasificado como de cuña salina (donde se considera en la clasificación como factor determinante a la descarga del río Figura 3), donde la cuña de sal se establece cuando el caudal del río es alto, mientras que cambia a parcialmente mezclado cuando el flujo es bajo. Esto debido a que también las mareas tienen un comportamiento micromareal (Garcés-Vargas et al., 2013). La influencia de la marea en el río Calle-Calle se extiende más allá de la presencia medible de sal y llega hasta la localidad de Pishuinco según (Schwember et al., 1996).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Mareas

Las mareas son un fenómeno oceanográfico regular de variación del nivel del mar que consiste en un movimiento vertical de ascenso y descenso, y otro horizontal de flujo y reflujo de las aguas del océano. Estas son producidas por distintos factores, siendo mayormente influenciados (un 98%) por la atracción gravitacional que ejercen sobre la Tierra la Luna y el Sol (Gómez Díaz, 2009), siendo mayor la influencia Lunar producto de su cercanía con la Tierra (Balmforth et al., 2005). Además, se le suman factores internos de la Tierra como la presencia de los continentes, la batimetría del fondo oceánico, la configuración de la cuenca y el clima.

2.1.1. Marea de Equilibrio

El movimientos de los astros que generan las mareas o la fuerza generadora de mareas, se ven descritas por Open University (1999) en el capítulo 2 del libro, sintetizada a continuación. El sistema Tierra-Luna gira en torno a un centro de masa común, que tiene un periodo de 27.3 días. El tipo de orbita es elíptica, haciendo que la Tierra gire de forma excéntrica sobre el centro común de masa (sistema Tierra-Luna) que se encuentra a unos 4700 Km del centro de la Tierra. Esto produce que todos los puntos que están sobre y dentro de la Tierra deben girar alrededor del centro de masa común del sistema Tierra-Luna, siguiendo el mismo camino elíptico dando como resultado que cada punto tenga la misma velocidad angular ($2\pi/27.3$ días) y la misma fuerza centrífuga (que es proporcional a la aceleración hacia el centro, al producto del radio y al cuadrado de la velocidad angular). A esto se le conoce como Movimiento Excéntrico.

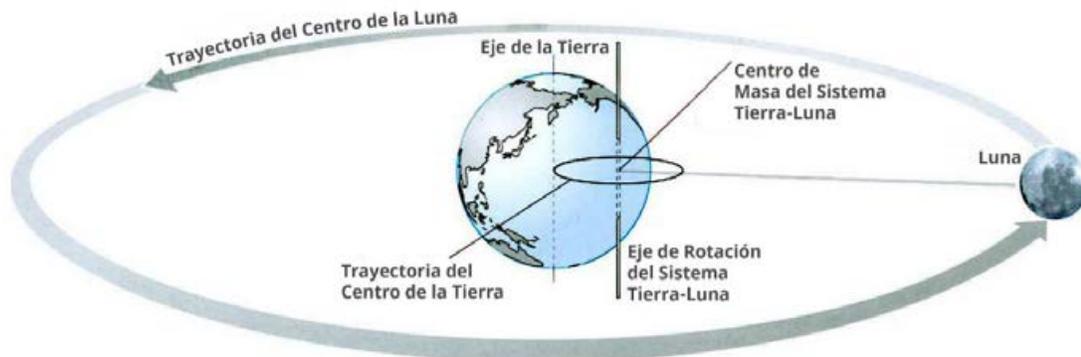


Figura 4. Basado en el Libro “Waves, tides, and shallow-water processes”, capítulo 2 Tides, pagina 53. Esta Figura (no a escala) muestra el movimiento excéntrico del sistema Tierra-Luna, donde la Luna gira alrededor del centro de masa de dicho sistema una vez cada 27,3 días, al igual que el centro de la Tierra.

La fuerza gravitatoria que ejerce la Luna sobre distintos puntos de la superficie de la Tierra varía la magnitud dependiendo de la distancia que posea el punto a la Luna. Es decir que el hemisferio que esté más cercano a la Luna, en el prevalecerá la fuerza gravitatoria de la Luna sobre la fuerza centrífuga, mientras que en el hemisferio más alejado de la Luna prevalecerá la fuerza centrífuga sobre la fuerza gravitatoria de la Luna, produciendo un abultamiento en los hemisferios opuestos, producto de estas fuerzas opuestas, produciendo dos mareas diarias (Balmforth et al., 2005, p. 3).

La fuerza gravitacional ejercida por la Luna y el Sol sobre la Tierra (incluyendo también las partículas del océano), tiene su base en la teoría gravitacional universal que formuló Isaac Newton en 1687, estableciendo que “toda partícula material del Universo atrae a cualquier otra partícula con una fuerza directamente proporcional al producto de las masas de ambas partículas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa”, siendo:

$$F = G \cdot \frac{mM}{r^2}$$

Donde:

F : fuerza de atracción gravitatoria sobre cada partícula (N)

m, M : Masas de los objetos

r : Distancia que separa ambas partículas (metros)

G : Constante de gravitación universal ($6.67 \times 10^{-11} Nm^2kg^{-2}$)

La marea de equilibrio es la forma que tomaría el océano producto de la atracción gravitacional de la Luna y del Sol, si la Tierra fuera un planeta cubierto de pura agua, sin continentes y con un fondo marino homogéneo. Siendo la fuerza generadora de las mareas la diferencia entre la fuerza centrífuga producida por el movimiento excéntrico del sistema Tierra-Luna y la fuerza gravitatoria de la Luna (o el Sol) sobre el océano, Figura 5 (Talley *et al.*, 2011).

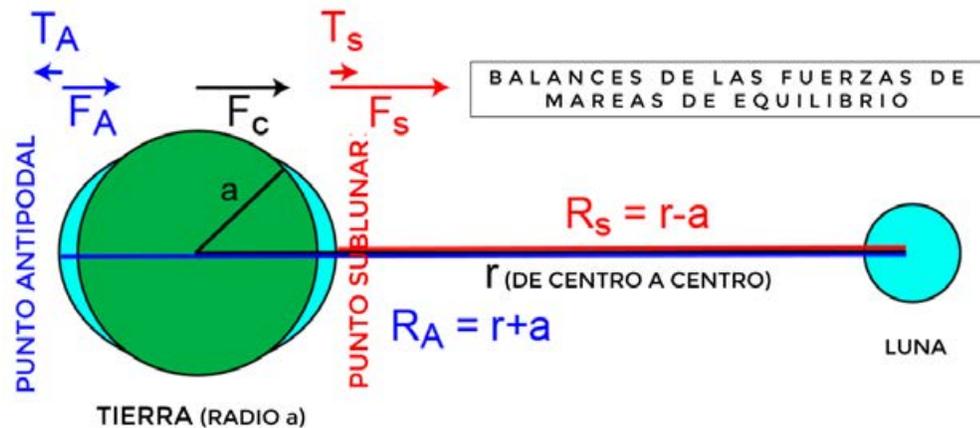


Figura 5. Fuerza generadora de mareas debido a la Luna o el Sol. Suponiendo que la Tierra es un planeta cubierto de agua y con un fondo marino uniforme. Ilustración sacada del Libro "Descriptive Physical Oceanography", pagina 237.

Como se muestra en la Figura 5, donde F_C es la diferencia de la fuerza del centro de la Luna y la Tierra, con la fuerza del lado lejano de la Tierra y la Luna. Siendo F_A el punto antipodal y F_S el punto sublunar. Las diferencias de las fuerzas son $T_A = F_A - F_C$ o $T_S = F_S - F_C$ las cuales son del mismo tamaño y apuntan en direcciones opuestas entre sí, dando origen a la protuberancia del océano hacia la Luna y hacia el lado opuesto de la Luna, lo cual explica que en el día existan 2 mareas altas.

Además en este mismo tema (Open University. Oceanography Course Team., 1999, p. 57) añade que la marea de equilibrio no ocurre solamente debido a que la Tierra no esté toda cubierta de agua, sino que se debe a que la Tierra gira entorno a su propio eje, siendo una vez cada 24 horas, y a que la Luna gira en torno al eje de masa Tierra-Luna (en la misma dirección que la Tierra) una vez cada 27,3 días. Generando que haya desfases en las mareas altas de una hora aproximadamente por día consecutivo.

2.1.2. Variaciones en las mareas Lunares.

Las posiciones y las orientaciones que tienen la Tierra y la Luna son variables según una serie de ciclos. De los cuales, dos son los que tienen un efecto en mareas Lunares (Open University. Oceanography Course Team., 1999, pp. 59–60):

1. La declinación de la órbita de la Luna. Esta no está paralela a la línea del ecuador, sino que está declinada a $28,5^\circ$ con respecto de la línea del Ecuador (Figura 6 a). Esto trae como consecuencia que las protuberancias de las mareas se desplacen del Ecuador, produciendo que a una latitud dada los efectos serán desiguales, sobre todo en latitudes medias. Es decir que las mareas altas Semidiurnas mostrarán desigualdades diarias. Cuando la Luna se encuentra en un ángulo de declinación distinto de cero, el plano de las dos protuberancias de marea se desplazará con respecto al ecuador y sus efectos en una latitud dada serán desiguales, particularmente en latitudes medias. Por lo tanto, las alturas alcanzadas por las mareas altas semidiurnas (es decir, dos veces al día) mostrarán desigualdades diurnas, siendo más grandes cuando la Luna esté en su máxima declinación.
2. La órbita elíptica de la Luna. Esta se caracteriza por que la Luna gira alrededor del centro de masa del Sistema Tierra-Luna teniendo una forma elíptica (Figura 6. b). Este tipo de variable trae como consecuencia que varíen la fuerza que produce marea en este ciclo. Cuando la Luna está más cerca de la Tierra se le denomina Perigeo, dando un 20% más de fuerza sobre el promedio. Cuando la Luna está más alejada de la Tierra, denominado apogeo, la fuerza que produce marea se ve reducida en un 20% en comparación con el promedio.

Además, la órbita elíptica de la Luna se mueve o precede, llevando 18,6 años para completar el ciclo. Este se puede identificar a largo plazo y teniendo un largo periodo de registros de mareas. Los efectos que trae este movimiento es que al estar combinados con los movimientos anteriores descritos se producen variaciones, además de que la forma elíptica de órbita de la Luna produce que en el perigeo viaje más rápido que, en el apogeo, dando variaciones en los ciclos de marea.

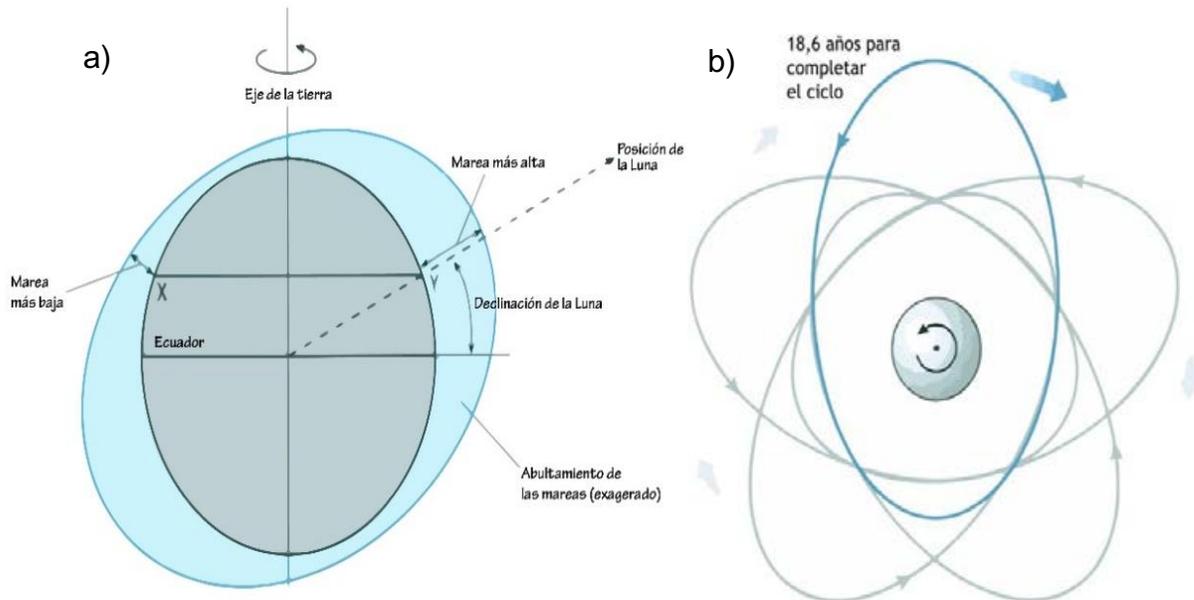


Figura 6. Ciclos que afectan las mareas Lunares. **a)** La producción de mareas desiguales en latitudes medias es producto de la declinación de la Luna, es por ello, si un observador en Y experimentará una alta marea más alta que la de un observador en X, intercambiando después de 12 horas con 25 minutos las observaciones entre estos dos puntos. **b)** Posiciones sucesivas de la órbita Lunar, vista desde el polo norte (no a escala), en el ciclo de precesión de 18,6 años. Estas ilustraciones fueron sacadas de Open University. Oceanography Course Team., 1999, pp. 59–60.

2.1.3. Sistema Tierra-Sol

Como se había mencionado anteriormente, otro de los que producen la fuerza de la marea es el Sol al igual que la Luna, pero en un menor grado producto de la gran distancia que hay entre estos cuerpos Celestes. El Sol produce dos mareas de Equilibrio, que recorre hacia el oeste alrededor de la Tierra, mientras esta última gira hacia el este, tiendo así un periodo semidiurno de 12 horas.

Al igual que la Luna, el Sol producto de la declinación que posee, produce desigualdades diurnas en los componentes de la marea inducidos por el Sol. La Tierra tiene un movimiento elíptico alrededor del Sol. Cuando la distancia es mínima entre ambos cuerpos se denomina Perihelio y cuando está la distancia máxima es Afelio.

2.1.4. Interacción de la Marea Solar y Lunar.

Para entender como interactúan estas dos fuerzas generadoras de marea, es útil la ilustración modificada de Talley et al., (2011, p. 238). Cuando la Tierra, la Luna y el Sol están alineados, o cuando la Luna y el Sol están en posiciones opuestas con respecto a la Tierra, las fuerzas de marea se potencian entre si produciendo que las mareas altas sean las más altas y las bajas sean las más bajas en comparación al promedio (Figura 7 a)), estas mareas se conocen como mareas de primavera (*spring tide* en inglés) o mareas de sicigia. Cuando la Luna está en forma perpendicular al eje Tierra-Sol, las fuerzas no se potencian entre sí produciendo que ocurran durante el mes las mareas más pequeñas, llamadas mareas muerta (en inglés *neap Tide*) Figura 7 b).

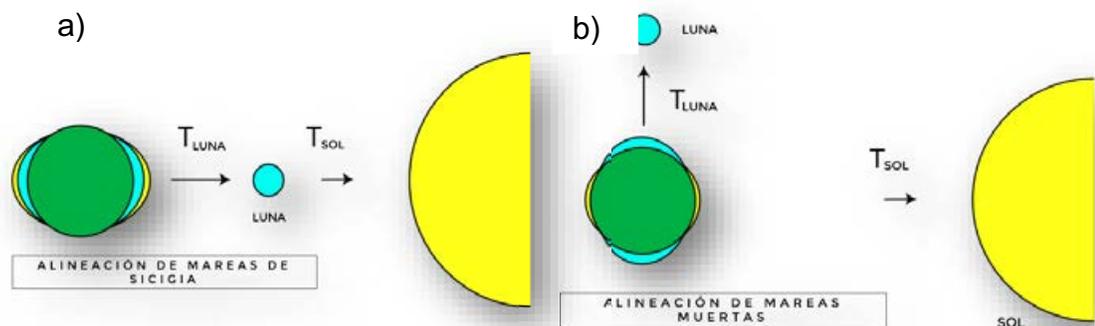


Figura 7. Estas Figuras asumen que no existe declinaciones entre los astros (cuando en realidad si tiene) y que la Tierra está vista desde arriba del polo norte. a) muestra la alineación de la marea de sicigia. b) muestra la alineación de mareas muertas.

2.1.5. Dinámicas de mareas

Si bien la marea de equilibrio ayudada a entender las principales fuerzas que generan las mareas, esto es mucho más dinámico y complejo de entender, visto en que las mareas predichas, no se ajustan a las mareas concebidas. Uno de los motivos por el cual se produce esta desigualdad es producto de que la longitud de onda de las mareas es más larga en relación con la profundidad que tienen los océanos y genera que la velocidad cambie producto de la profundidad; existe una marea de retraso en comparación al paso de la Luna o el Sol con la velocidad lineal de la Tierra que disminuye en latitudes más bajas; y aumenta el retraso de la marea; la masa de Tierra o continentes que presenta el planeta, bloquean la propagación libre de la marea de equilibrio mientras la Tierra gira; y todos los movimientos de agua laterales menos en el ecuador, están sujetos a la Fuerza de Coriolis, que desvía vientos y corrientes oceánicas. Dando como resultado

que exista un sistema complejo de mareas en las distintas cuencas oceánicas. (Open University. Oceanography Course Team., 1999; Talley et al., 2011a).

La suma de los factores de la forma de la cuenca oceánica, más la influencia de la fuerza de Coriolis dan como resultado un sistema Andrónico que consiste en que la fuerza gravitatoria produce una onda que viaja a lo largo de la cuenca, pero siente el efecto de rotación de la Tierra y se propaga a lo largo de la frontera. La línea recta que genera la onda sin rotación, se degenera en un punto nodal que es el punto anfidrónico (Balmforth et al., 2005).

Las frecuencias de cada componente se determinan astronómicamente, mientras que su amplitud se determina por la ubicación, Además, existen distintos tipos de mareas, que se diferencian dependiendo del periodo de tiempo en el que son susceptibles a las fuerzas productoras de marea, que son: semidiurna que equivale a dos ciclos (dos mareas altas y dos bajas) en el día producidos principalmente por la Luna, la diurna que tiene un ciclo al día (una alta y baja marea) producidos principalmente por el Sol, y mixtas con predominio semidiurno o diurno (Bird, 2008).

Las mareas se expresan en constituyentes o armónicos de marea, siendo los principales, en orden de amplitud; Lunar Principal Semidiurna (M_2), declinación Luni-Solar diurna (K_1), Solar Principal Semidiurna (S_2), Diurna Lunar que representa la declinación de la Luna (O_1), Elíptica Semidiurna Lunar Mayor (N_2), Diurna Solar Principal (P_1) que representa la declinación del Sol, Declinación Luni-Solar semidiurna (K_2) además de otras que se utilizan para periodos largos de tiempo que describen estos autores (Open University. Oceanography Course Team., 1999; Stewart, 2008; Talley et al., 2011a).

2.2. Estuarios

Los estuarios son ambientes de transición muy complejos, dinámicos y vulnerables, teniendo una enorme relevancia social y ambiental. Como por ejemplo el hecho de que los estuarios hayan sustentado asentamientos humanos históricos, producto de sus posibilidades de navegación, agua dulce y Tierra fértil de llanuras adyacentes. Además, se le suma que producto de la mezcla de agua dulce y salobre, han proporcionado un hábitat para distintas especies animales y vegetales (Bolla Pittaluga et al., 2015).

En estricto rigor los estuarios se forman en la desembocadura de un río, donde el río se encuentra con el mar (Dyer, 1997). Pero producto de ser ambientes tan complejos, también existen múltiples definiciones, llegando a tener 40 definiciones según (Perillo, 1995), las cuales abarcan las características y

procesos esenciales de los estuarios. Por ejemplo la topografía, la acción de la marea y el caudal del río son importantes factores para la mezcla de agua dulce con agua salada (Dyer, 1997).

Dentro de las definiciones que existen sobre estuarios, se encuentra la propuesta por Cameron & Pritchard (1963) citada en (Talley et al., 2011) que dice *“un cuerpo de agua costero semicerrado que tiene una conexión libre con el mar abierto y dentro el cual el agua de mar se diluye de manera medible con el agua dulce derivada del drenaje de la Tierra”*. Esta definición presenta problema, debido a que no incluye la influencia de la marea en el estuario, siendo de suma importancia en los procesos que ocurren encima de la intrusión salina (Dyer, 1997).

Según Dyer (1997), existe una definición que incluye y enfatiza el efecto de las mareas en el estuario, describiéndolo como:

“una entrada del mar, que llega hasta el valle del río hasta el límite Superior del aumento de la marea, dividiéndose generalmente en 3 secciones: 1) Un estuario marino o inferior, en conexión libre con el mar abierto; 2) un estuario medio, sujeto a una mezcla entre agua dulce y agua salada; 3) un estuario superior o fluvial, caracterizado por poseer agua dulce, pero estando sujeto a la acción diaria de la marea”.

Existe otro factor que igual es importante a considerar en la definición, el sedimento. Teniendo implicaciones a considerar para las dinámicas geomorfológicas que existen dentro del estuario. La definición de Dalrymple *et al.* (1992) define al estuario como

“la porción hacia el mar de un sistema de valles ahogados que recibe sedimentos de fuentes marinas y fluviales, que tiene facies influenciadas por los procesos fluviales, marea y oleaje. Se considera que el estuario se extiende desde el límite terrestre de las fases de marea en la cabecera hasta el límite marino de las facies costeras en su boca”

Una definición que intenta integrar las características de los estuarios, siendo una de las definiciones físicas más completas (Dyer, 2001), es una definición realizada por investigadores latinoamericanos, que lo declaran como:

“un cuerpo de agua costero semicerrado que se extiende hasta el límite efectivo de la influencia de la marea, dentro del cual el agua salada que ingresa por una o más conexiones libres con el mar abierto, o cualquier otro cuerpo de agua salino, es diluida significativamente con agua dulce derivada del drenaje terrestre, y puede sustentar especies biológicas eurihalinas ya sea por una parte o la totalidad de su ciclo de vida” (Perillo, 1995).

Esta última definición implica que se pueden diferenciar tres sectores; un cuerpo marino o estuario inferior, el cual está en conexión libre con el mar abierto; un estuario medio, sujeto a una fuerte mezcla de agua dulce y salada; y por último un estuario superior o fluvial, que presenta agua dulce y que posee variaciones de marea (Figura 8). No todos los estuarios poseen estas tres zonas, además cada una de estas puede ir migrando con el tiempo (Piccolo & Perillo, 2000).



Figura 8. Principales sectores de un estuario según sus características físicas. Ilustración de Piccolo & Perillo (2000).

2.2.1. Clasificación de Estuarios

Existen distintas clasificaciones para los Estuarios, debido a su diversidad en formas y los tipos de flujos que presentan. Se deben considerar varios criterios a usar, como la topografía, la estratificación y el forzante de la marea (Dyer, 1997; Talley et al., 2011).

2.2.1.1. Clasificación por rango de Altura de marea.

Uno de los puntos de vista para la clasificación de estuarios, es el rango de la altura de marea, realizado por Davies (1964) citado en (Dyer, 1997), el cual presenta:

Micromareal < un rango de 2 metros

Meso mareal < 4 m, > 2 m

Macromareal < 6m > 4 m

Hipermareal > 6 m

2.2.1.2. Clasificación por velocidad.

El rango y la fuerza de corriente de la marea es modificada por la morfología que presentan los estuarios. Producto que la convergencia de los lados del estuario hace que la onda de marea se comprima lateralmente, y en ausencia de fricción la conservación de energía requiere que el rango aumente. Pero la fricción en aguas poco profundas causa una disminución en el rango. Dicha clasificación está descrita por Dyer (1997) y se divide en los siguientes tres términos:

Estuario Hipersincrónico: en estos la convergencia excede la fricción, dando como resultado que el rango y las corrientes de marea aumenten hacia la cabecera del estuario, hasta que, en la sección fluvial, la convergencia disminuye. Son estuarios que generalmente tienen forma de embudo (Figura 9 A).

Estuario Sincrónico: en estos, la fricción y la convergencia tienen efectos iguales y opuestos en la marea, el rango es constante a lo largo del estuario hasta llegar a la sección fluvial (Figura 9 B).

Estuario Hiposincrónico: aquí la fricción supera los efectos de la convergencia, produciendo que el rango de marea disminuye a lo largo del estuario. Estos por lo general poseen bocas restringidas, y el agua que entra por la boca se extiende de manera efectiva dentro del estuario. Produciendo las velocidades más altas en la boca (Figura 9 C).

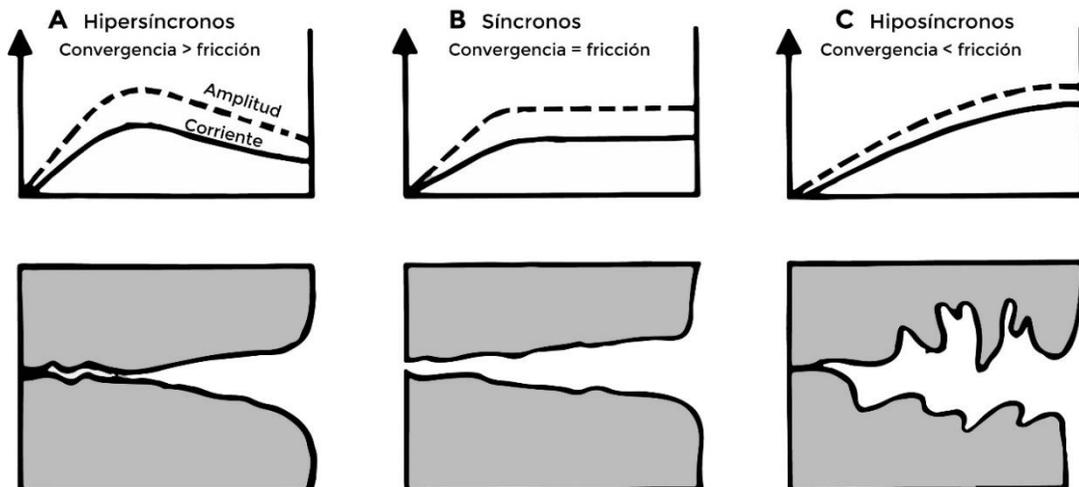


Figura 9. Variación del rango de marea y la amplitud de velocidad de la corriente en estuarios con diferentes geometrías (tomado de Dyer, 1997).

2.2.1.3. Clasificación por geomorfología.

A partir de la definición de Estuario de Perillo (1995), se extrae la siguiente clasificación de estuarios en términos geomorfológicos. Partiendo por una división general que se constituye por: estuarios primarios que son el resultado de procesos terrestres y o tectónicos más la acción del mar, los cuales no han producido cambios a las formas originales de los estuarios. Y los Estuarios Secundarios producidos por los procesos marinos y la influencia de estos a la descarga fluvial. (Dyer, 1997; Piccolo & Perillo, 2000; Talley et al., 2011b).

Dentro de los primarios encontramos antiguos valles fluviales, donde se subdivide en “Estuarios de planicies Costeras” y las “Rías”; Antiguos Valles Glaciares, donde se encuentran los Fiordos. Finalmente, los ríos influenciados por la marea, donde están ríos dominados por las mareas, deltas en la boca de los estuarios; y estuarios estructurales. Dentro de los estuarios secundarios encontramos las Lagunas Costeras (Knoppers et al., 1999; Piccolo & Perillo, 2000).

Los estuarios influenciados por la marea se caracterizan por poseer una gran descarga del río y por ser influenciados por la dinámica de la marea en su parte baja. Poseyendo corrientes inversas que dan lugar a patrones morfológicos que se pueden dividir en dos categorías mencionadas anteriormente (Knoppers et al., 1999; Perillo, 1995; Piccolo & Perillo, 2000).

Los ríos de marea se caracterizan por presentar influencia de la marea, pero la intrusión salina se limita a la desembocadura o está ausente a lo largo del valle y la descarga del río es mayor al flujo que viene desde el océano, un ejemplo de ello es el río de la Plata en Argentina. El grado de intrusión salina depende de la estación, caudal y del clima, no obstante los procesos costeros son importantes en la dinámica de transporte de sedimentos y la evolución morfológica dentro del valle (Guo et al., 2015; Perillo, 1995). Deltas en la boca de los estuarios, son deltas afectados por la dinámica de las mareas y/o la intrusión salina como el delta del río Mississippi (Hoitink & Jay, 2016; Perillo, 1995; Wells, 1995).

2.2.1.4. Clasificación por salinidad.

Otras de las características de los estuarios descrita, es la salinidad del mar. Producto de que estos se originan en las desembocaduras de los ríos, donde el agua dulce que es menos densa que el agua salada se mezclan (Funahashi et al., 2013). Esto genera que existan gradientes horizontales y verticales de la densidad hacen que la circulación del agua y la mezcla creada por las mareas sea muy variable en el espacio y tiempo (Dyer, 2001).

Estas características generan que se puedan clasificar los estuarios por la estructura vertical de salinidad que presentan, teniendo como principales factores la descarga del río, la mezcla y corrientes mareales (Garcés-Vargas et al., 2013). La relación de estos tres factores, distinguen a tres tipos de estuarios. Los de cuña salina que se caracterizan por presentar una alta descarga de río, escasa mezcla mareal y un rango de marea < 2 m (micromareal). Los estuarios bien mezclados presentan una descarga de río baja, una mezcla y corrientes mareales intensas por presentar un rango > 4 metros (Macromareal). Finalmente los estuarios parcialmente mezclados presentan condiciones intermedias de descargas del río y la mezcla mareal (Valle-Levinson, 2010).

2.3. Marea en estuarios

Como se ha mencionado, la onda de marea que viene desde el océano se propaga hacia los estuarios, lo cual genera que tengan un efecto importante en las características que estos presentan. La forma de la curva de marea va a depender de la topografía, la fricción entre el fondo marino con el agua, la energía de marea que se refleja hacia el mar y la descarga del río (Godin, 1999; Guo et al., 2015). Esto produce que el tiempo de marea alta y baja lleguen más tarde en la cabecera del estuario que en la boca, haciendo que la onda de marea tenga un componente progresivo. Esto se ve en distintos casos donde el *tidal prism* (volumen de agua que se encuentra entre la marea alta y baja) es mayor en comparación al volumen de agua en el estuario con marea baja (Dyer, 2001).

Además, la velocidad de propagación depende de la profundidad del canal, donde la marea alta viaja más rápido que la baja, causando que exista una asimetría en el ciclo de marea, con intervalos de tiempos largos entre la marea alta y la baja, y un intervalo corto entre la marea baja con la próxima alta. (Open University., 1999). Dependiendo del equilibrio entre la fricción, la convergencia del canal y el caudal del río, la amplitud de los principales constituyentes de marea se reduce, crecen o se mantienen constante a lo largo de la propagación (Guo et al., 2015).

Como se ha mencionado, la descarga de los ríos altera fuertemente la propagación de las mareas. Reduciendo la amplitud que esta lleva y retrasando la propagación de las ondas, lo cual redistribuye la energía de la marea (Godin, 1985). Dicha descarga de río no es constante, y puede ir variando rápidamente en un intervalo de tiempo, lo cual induce el comportamiento no estacionario en las señales de marea (Flinchem & Jay, 2000). Producto de todo esto, es que la marea en Estuarios no se puede estudiar y/o predecir como la marea en el mar, o con los análisis tradicionales. Trayendo consigo la necesidad de desarrollar

mejores medios de análisis y predicción de mareas no estacionarias y las corrientes de marea (Jay & Flinchem, 1997).

En estuarios micro mareales, la fricción supera los efectos de convergencia y el rango de marea disminuye hacia la cabeza del estuario. Las corrientes en la boca son más grandes que las que están dentro, y las velocidades de la corriente de reflujo son mayores que las corrientes de inundación, es decir el estuario sería dominado por el reflujo (Dyer, 2001).

2.4. Métodos de análisis de mareas.

2.4.1. Captura de datos.

La dinámica de las mareas ha sido estudiada a través del análisis y múltiples técnicas de modelamiento de mareas. Existen diversos sistemas que monitorean las mareas en las costas y puertos. Algunos para detectar Tsunamis, rango de mareas diarias, datos que sirven para la navegación como también para predecir el aumento del nivel del mar (Gomis et al., 2012).

El más tradicional es un mareógrafo mecánico con un pozo de amortiguación o *tide well*, haciendo que el nivel del agua sea un nivel medio (sacando las olas) y este sea detectado por un flotador que transmita por un cable a una grabadora el aumento del nivel del mar. El método la instalación, construcción y mantenimiento son costosos y periódicos (Satake, 2002). Un problema de los mareógrafos es el rango colección de datos, el cual comenta Satake (2002) que por lo general son de un intervalo de 12 horas, siendo inadecuados para la detección de tsunamis que ocurren en un periodo entre 5 a 30 min.

Existen otros tipos de mareógrafos, como el sistema de medición en base a sensores de presión, sistemas satelitales de altimetría (Cheney, 2001), y los que utilizan pulsos de ultrasonido ubicados sobre la superficie del agua para medir la distancia del sensor a la columna de agua (Gomis et al., 2012).

Los mareógrafos que utilizan el sistema de ultrasonido, se han desarrollado desde 1980 aproximadamente, los cuales son una respuesta como alternativa a los mareógrafos mecánicos o de pozos, los cuales son de costosa construcción, difícil ubicación y mantenimiento (Parker & Baird, 1982). El sensor de ultrasonido consiste básicamente en medir la distancia a través del tiempo en que tarda en ir y volver un pulso de ultrasonido (Armenio et al., 2016).

2.5. Sensores de bajo costo

Dentro de los desafíos que presenta la adquisición de los datos ambientales se presenta que los instrumentos posean automatización en la recolección de datos, que estos sean de bajo costo, capaces de resistir ambientes complejos, tener una alta resolución espacial y temporal (Beddows & Mallon, 2018; Fisher & Gould, 2012; Hund et al., 2016). Por lo cual, se desarrollan alternativas de sistemas de bajo costo, con base en sistemas de código abiertos y altamente personalizables (Gandra et al., 2015).

Los recientes avances del desarrollo de software y hardware de código abierto han mostrado un potencial para el desarrollo de sistemas de monitoreo de bajo costo. El proyecto Arduino (www.arduino.cc) es una plataforma electrónica de código abierto basada en el uso fácil del hardware y el software, el cual posee una amplia comunidad constituida por estudiantes, profesionales, programadores, etc; que contribuyen conocimiento para el crecimiento y aplicaciones de este tipo de plataforma.

El hardware consta de un microcontrolador programable el cual está montado en una placa de circuito que proporciona la entrada y salida a los distintos pines del microcontrolador, los cuales son compatibles con distintos tipos de sensores y dispositivos que pueden ser analógicos y digitales (Hut, 2013). Existen placas y sensores de distintos tamaños, con diferentes características, capacidades, voltajes y señales de salida compatibles entre sí. Las cuales dependerán de los requisitos del proyecto a desarrollar (Fisher & Gould, 2012).

La plataforma cuenta con conexión a computadores personales (con sistemas operativos de Linux, Mac OS y Windows) para la programación del microcontrolador. Esto se realiza a través del lenguaje de Programación de Arduino (basado en *Wiring*) y el software de Arduino *Integrated Development Environment* (IDE), donde el usuario integra las instrucciones para la operación del microcontrolador y carga la información compilada a este (Fisher & Gould, 2012).

La placa, junto con los sensores, se utilizó para el diseño de distintos tipos de proyectos desde artefactos de uso cotidiano a instrumentos científicos complejos. Algunos ejemplos del uso de la plataforma para investigaciones ligadas al monitoreo ambiental son, el desarrollo de dataloggers (Wickert, 2014), aplicaciones ecológicas (Gandra et al., 2015), análisis de contenido de agua en el suelo (Bitella et al., 2014), usos en climatología (Lopez & Villaruz, 2015), en el desarrollo de sistemas de detección de inundaciones (Iyekekpole et al., 2018) y otros estudios hidrológicos (Beddows & Mallon, 2018; S. D. Hicks et al., 2015;

Hund et al., 2016; Lockridge et al., 2016; Lopez & Villaruz, 2015; Paulsen et al., 2005).

Existen iniciativas de comunidades enfocadas en la ciencia y el monitoreo ambiental, las cuales utilizan la plataforma de Arduino. Un ejemplo es *EnviroDIY* (www.envirodiy.org) los cuales se enfocan en tener un espacio en donde se pueda divulgar y brindar apoyo con herramientas web para el diseño de sensores que ayudan al avance del conocimiento y la gestión del agua dulce. Existen otras iniciativas nacionales que siguen una línea similar. Se encuentra HIRI que es una plataforma social de calidad de aire en tiempo real, quienes desarrollan sus propios dispositivos de medición (www.hiri.cl).

2.5.1. Métodos de análisis de datos.

Los métodos tradicionales de análisis son el análisis armónico y el análisis Fourier (Guo et al., 2015), pero existe otra metodología que se utiliza para el análisis de marea en estuarios o mareas fluviales, conocida como *continuous wavelet transform* (CWT), la cual es una alternativa para estudiar los componentes no estacionarios de la marea (Jay & Kukulka, 2003).

El análisis armónico de mareas realiza las siguientes suposiciones: 1) que las mareas son estacionarias e independientes de otras influencias oceánicas y atmosféricas; 2) hay un número fijo de componentes de marea con periodicidades discretas, ángulos de fase y amplitudes; 3) los componentes de marea son mutuamente independientes (Flinchem & Jay, 2000; Jay & Flinchem, 1997).

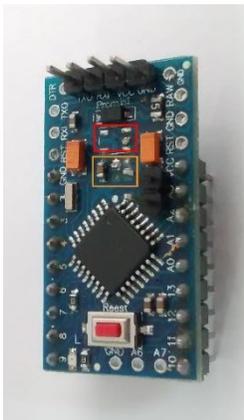
Este método determina las amplitudes y las fases de un número de componentes de marea, con la frecuencia determinada por la marea potencial a través de un mínimo cuadrado de ajuste aplicado a las alturas de marea medidos (Guo et al., 2015). Pero este método sirve en el océano, pero no se ajusta bien para utilizarlo en mareas no estacionarias cuando existe una variabilidad en el caudal de los ríos (Godin, 1999; Jay & Flinchem, 1997).

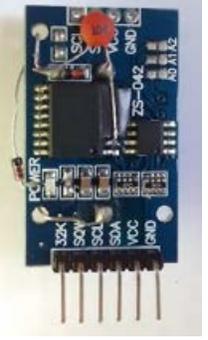
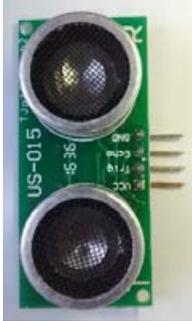
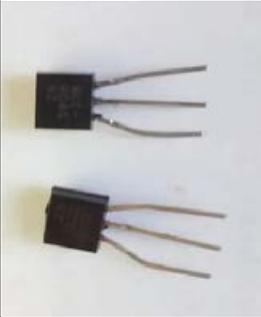
3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. Piezas y construcción del datalogger de ultrasonido.

En la siguiente sección, se presenta el diseño y los pasos de construcción del datalogger que detecta los cambios de marea. Los principales componentes se muestran en la Tabla 1, los cuales serán descritos a continuación:

Tabla 1. Tabla con el listado de los principales componentes del datalogger de ultrasonido, describiendo sus funciones y precio.

Modelo	Voltaje de funcionamiento	Resolución	Función	precio	Imagen
Microcontrolador Arduino Pro mini ATmega328	5 V	Funciona a 16 MHz	Como su nombre lo dice es el que se configura para que dé las ordenes en el sistema del datalogger y cuenta el tiempo de suspensión y activación del sistema.	\$ 4.900	
MicroSD Card Adapter	3,3 V o 5 V		Guarda los datos en la tarjeta MicroSD	\$ 3.000	

RTC (Real Time Clock) DS3231	3,3 V o 5 V	Fecha con segundos, minutos, horas, número día, día de la semana, mes y año. Compensación de año bisiesto. Formato de hora configurable en 12 o 24 horas	Como el reloj que controla los tiempos de captura de los datos, además de darle resolución temporal a los mismos.	\$ 4.200	
Ultrasonido US-015	5 V	2 a 400 cm	El sensor que mide la distancia.	\$ 4.000	
DS18B20 Waterproof thermometer	3,3 V o 5 V	-55°C hasta 125°C	Sensor que mide la temperatura para poder calibrar la señal de ultrasonido según la temperatura ambiente.	\$ 1.500	
transistores "NPN 2n222a" & "PNP 2n3906"			Los transistores son los que ayudan al sistema de bajo consumo, permitiendo abrir y cerrar los canales de corriente.	\$ 500 c/u	

3.1.1. Microcontrolador.

El microcontrolador es una tarjeta de fuente abierta de la plataforma de Arduino, la cual es programable a través del software de Arduino (IDE), conectándose al pc con un cable USB (<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction#>). Además, la placa proporciona la entrada y salida a los distintos pines del microcontrolador siendo compatibles con distintos tipos de sensores y dispositivos que pueden ser analógicos y digitales (Iyekekpolo et al., 2018). La placa utilizada para este estudio es la placa Arduino Pro mini ATmega328 con 16 MHz y de 5 Voltios, de la marca “The Simple”.

La placa viene preensamblada, por lo cual hay que Soldar los distintos pines, siendo de mucha ayuda ya que se puede adaptar a las necesidades que presente el proyecto. En este caso los pines que se utilizan para conectar al puerto USB y los pines analógicos A4 y A5, se Soldaron apuntando hacia arriba. Los demás pines se Soldaron mirando hacia abajo para poder insertar la placa a la board de trabajo. Dentro de los objetivos que se tienen para desarrollar el proyecto, se encuentra el reducir el consumo de energía del datalogger. Para ello al microcontrolador se le retiró la resistencia que está conectada al led de encendido, junto con el led y el regulador de voltaje (Figura 10).

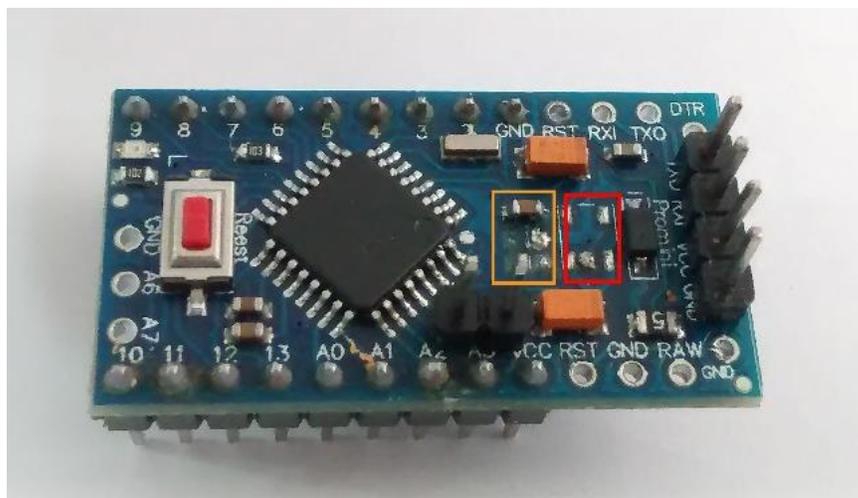


Figura 10. Arduino pro mini de 5 Voltios modificado. En el recuadro naranja se retiraron el Led con la resistencia y en el recuadro rojo, se retiró el regulador de voltaje.

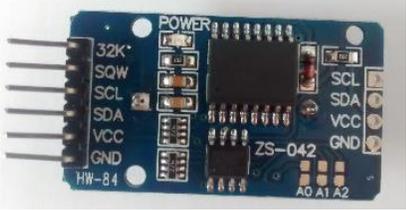
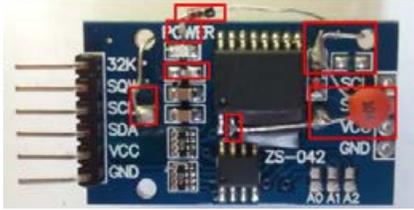
3.1.2. Lector de Tarjeta Micro SD

Los datos adquiridos por los sensores se guardan en una memoria micro SD de 16 GB a través de una tarjeta de interfaz producida por “The simple”, la cual permite la flexibilidad de agregar una función de almacenamiento de datos al datalogger. Esto amplía las capacidades de almacenamiento que posee los microcontroladores, siendo la tarjeta micro SD un respaldo (Iyekepolo et al., 2018) recolectando los datos de los sensores de ultrasonido, temperatura y los del reloj, por medio de un archivo “.csv”. El acceso a la memoria micro SD en modo SPI, por lo que las señales de control se etiquetan claramente con los nombres de las señales de dicho bus de comunicaciones. Puede ser alimentado con 5 V o 3,3 V y se puede conectar a cualquier microcontrolador. No se realizaron modificaciones al hardware del módulo (Tabla 1).

3.1.3. Reloj

Para la toma de datos es importante tener con exactitud la hora y fecha de captura de estos. Es por esto, que al sistema se le incluye el RTC (Real Time Clock) o reloj en tiempo real DS3231. Estos son de bajo consumo, de fácil acceso en el mercado y pueden ser alimentados por baterías externas sin perder la sincronización cuando el datalogger esté en modo de suspensión. El consumo del reloj (miliamperios) es alto tomando datos (tabla 1), lo cual es alto para poder desarrollar el bajo consumo que necesita el datalogger. Es por lo que se utiliza unas modificaciones propuestas en un blog del proyecto “The Cave Pearl Project” para reducir su consumo de energía. Este tipo de modificación se puede observar en la última imagen de la tabla 2.

Tabla 2. Tabla de consumo de RTC DS3231, en los distintos estados de modificación que se le realizaron para usar en el datalogger de ultrasonido. Las modificaciones están enmarcadas en un recuadro rojo. Para el RTC con las modificaciones finales se corta la conexión entre Cr2032 y Vbat, siendo reconectado a través de un diodo 1N4148. El pin Vcc del DS3231 está desconectado de la placa y se conecta a Tierra por medio de la pata del condensador 104.

Modificación	Consumo Reposo (mA)	Consumo dato (mA)	Imagen
Sin cambios	0,002	7,62	
Se retira resistencia led	0,003	5,00	
Se retira resistencia led y 201	0,003	0,88	
Final	0,003	0,773	

3.1.4. Ultrasonido

La distancia o las mediciones de esta son necesarias para distintos procesos o situaciones en los entornos en que estamos, por ejemplo, en entornos industriales, automóviles para evitar obstáculos, además para determinar la altura de una planta, niveles de fluidos, etc. Esto comúnmente se realiza a través de dos métodos, usando tecnología ultrasónica o infrarrojas (Fisher & Gould, 2012).

Los sensores de ultrasonido por lo general consisten en dos transductores, uno que emite un pulso ultrasónico y el otro que detecta la señal al rebotar en algún objeto, siendo determinada la distancia a través de la cantidad de tiempo en que se demora el envío y recepción del pulso. El sensor utilizado es el US-015, el cual es un sensor de distancia de bajo costo el cual utiliza ultrasonido para determinar la distancia, teniendo un rango de 2 a 400 cm.

3.1.5. Sensor de temperatura

El sensor de temperatura “DS18B20 *Waterproof thermometer*”, es un termómetro digital que proporciona mediciones de temperatura en grados Celsius. Este puede utilizar de 9 a 12 bits y se puede comunicar a través de un Solo bus por un cable, necesitando Solo una línea para la comunicación con el microprocesador. A esto se le suma que como cada sensor tiene su propio código de serie único, puede conectarse múltiples termómetros por un Solo cable para múltiples usos. Puede funcionar con 3,3 V o 5 V. su rango de trabajo es de -55°C hasta 125°C, teniendo una precisión de trabajo de -10°C hasta 85°C, con un error de 0,5°C. El sensor de temperatura es importante para el funcionamiento del datalogger, ya que cumple la función de calibrar la señal del sensor de ultrasonido, ya que esta última cambia su precisión con la temperatura a la que esté expuesta.

3.1.6. Sistema de bajo consumo de energía.

Dentro de los objetivos que tienen los sistemas de monitoreo ambiental de bajo costo, es que los dispositivos puedan durar largos periodos de tiempo funcionando. Es por lo que dentro del hardware se ha incluido transistores “NPN 2n222a” para el negativo y “PNP 2n3906” para el positivo, los cuales contribuyen a poner en estado de suspensión a los distintos sensores que se describieron anteriormente, pasando o cortando la energía que proviene del microcontrolador. Además, a esto se le suma una parte del código de programación, el cual genera que se pueda poner en estado de suspensión al microcontrolador, produciendo un bajo consumo.

3.2. Construcción del datalogger.

Los materiales utilizados para la construcción de cada datalogger están descritos en las fichas de terreno (anexos 1,2,3,4) donde aparece la ubicación de la instalación y las piezas que se utilizaron para cada datalogger. La construcción de los 4 dataloggers es la misma y se describe a continuación.

El primer paso de construcción fue el ensamblado de las piezas ya modificadas dentro de la protoboard, poniendo primero el microcontrolador (Figura 10) para saber en qué canales poner los demás sensores con sus respectivos pines.

Además, se le agregan las conexiones por medio de cables de una hebra, los cuales son de distintos colores. Siendo los negros utilizados para la conexión negativa y los rojos la positiva. Se ubican los transistores para el negativo y el positivo tal como aparece en la (Figura 11 A). El transistor positivo está conectado al pin 2 del microcontrolador mediante un cable rojo, en conjunto con una resistencia de 100 ohm. El transistor negativo está conectado al pin 3 mediante un cable negro y una resistencia de 100 ohm. A los transistores irán conectados todos los pines VCC y GRN del lector de tarjeta MicroSD, Reloj, Ultrasonido y temperatura. Los pines del lector de tarjeta “MOSI” conectado al pin 11, “MISO” conectado al 12, SCK al 13 y el CS al pin 10 del microcontrolador (Figura 11 A). El Reloj está conectado al microcontrolador por los pines analógicos, A4 con SDA y A5 con SCL. El ultrasonido está conectado a los pines digitales 9 a “Echo” y el pin 8 al “Trig” (Figura 11).

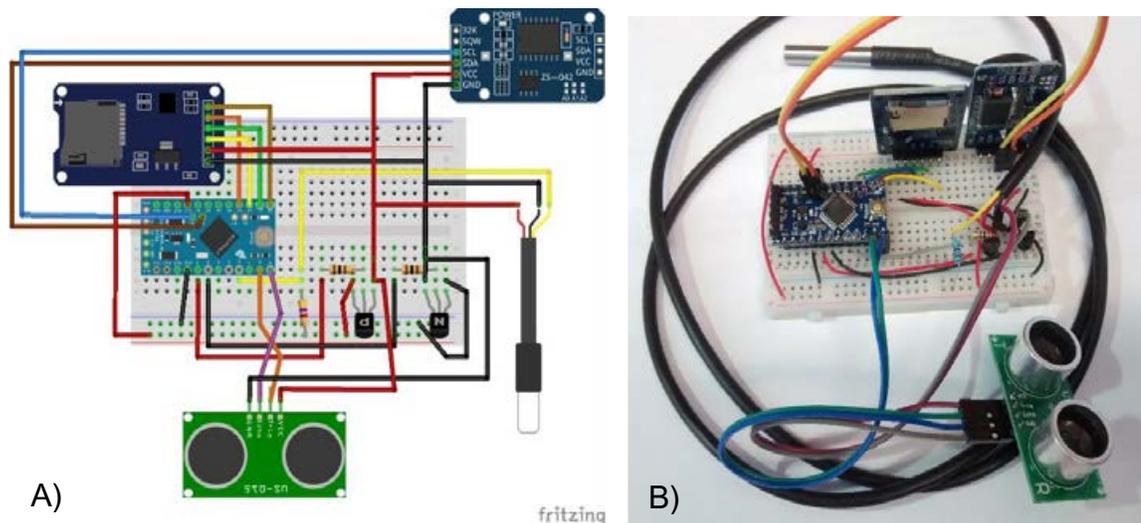


Figura 11. Ensamblado del datalogger. a) es un diagrama de las conexiones que se realizan en el datalogger. b) es una imagen del ensamblado en físico del datalogger de ultrasonido.

Para que el datalogger resista en las condiciones del terreno donde se instala, se ensambló dentro de una Caja estanca IP-65 la cual es altamente impermeable, de fácil manipulación y acceso en el mercado. Se le realizan tres orificios en donde estarán ubicados el sensor de ultrasonido y el sensor de temperatura. Además, para recubrir del agua y del Sol directo se pegaron tubos de PVC, y la caja se pintó de blanco para que la radiación directa y sobrecalentamiento no interfiera en la captura de datos.

3.3. Software del datalogger

El microcontrolador fue programado a través de su plataforma IDE en donde se le cargó el código desarrollado. Este se caracteriza por incluir las librerías *JeeLib* para poner al microcontrolador en estado de suspensión durante un periodo de tiempo, además se le suman las distintas librerías para cada tipo de componente que se utilizan en el datalogger. Para el sensor de Temperatura se utiliza la librería *OneWire* y *DallasTemperature*, para el Reloj se utiliza “*Wire*”, para el lector de tarjeta *SPI* y *SdFat*.

Una vez cargadas las librerías se procede a asignar los pines de los distintos componentes (los cuales fueron descritos anteriormente). Se instala el comando de bajo consumo del microcontrolador, se asignan los controles de los transistores, luego se abre el lector de tarjeta. Dentro de esta sección empieza a abrirse el *loop* en donde se dice que abran los transistores con un *delay* de 100 milisegundos. Con ello se activa el termómetro el cual señala la temperatura, luego se activan el pin *trig* del ultra sonido emitiendo el pulso para que luego se active el echo el cual capta el rebote de esta señal. La duración del pulso (en ir y venir) es traducido a la distancia con la siguiente formula:

$$Distancia\ en\ cm = \left(\frac{\frac{duración}{10000}}{2} \right) * (331.3 + 0.606 * T^{\circ}C)$$

Luego, el reloj es activado para dar paso a que se cierre el ciclo creando y rellenando el archivo.csv creado. En donde los datos se guardan en el siguiente orden: “Año/mes/día, Hora: minuto: segundo, duración, distancia, temperatura (°C)”. Se guarda en la micro SD y se procede a cerrar los transistores para cortar la energía, y luego se vuelve a poner el microcontrolador en estado dormido, para que luego de 60 segundos vuelva a despertar para seguir con el ciclo.

3.4. Selección de sitio de medición e instalación en terreno.

Los sitios se escogieron según un conjunto de parámetros; poseer un fácil acceso, que estén cercanos a la ribera del río y en donde existan estructuras para instalar los dataloggers (truncos de árboles o infraestructura como un muelle) sobre el agua y que fueran puestos a una distancia proporcional entre los distintos sitios.

En base a estos parámetros es que se determinó que la instalación de la estación LIDO (P5) fuese en donde está ubicada la baliza Lido del proyecto REMA (Red de Monitoreo Ambiental del río Valdivia). La ubicación de este datalogger (anexo 4) tiene una particularidad en cuanto a su ubicación, ya que se escogió dicho

lugar por que este se utilizó para comprobar la exactitud de los datos, comparando los datos con los del mareógrafo (datalogger) de la marca innovex que posee esta baliza. Siendo un sensor de presión el cual mide el nivel del agua en el río. Este detecta las variaciones de marea cada 10 minutos, teniendo la capacidad de funcionar durante aproximadamente 3 meses, con un almacenaje de 30.000 datos (Comunicación Personal con administrador del proyecto R.E.M.A. marzo 2019).

La estación HUELLELHUE (P4) se instaló en un muelle de un privado cercano a la localidad de Huellehue (anexo 3). Este sitio se escogió por la seguridad al tener poca concurrencia de personas, el fácil acceso desde la carretera T-35 Valdivia-Los Lagos y la infraestructura, que en este caso es un muelle que sirvió para instalar el sensor. Por otro lado, la estación CALLE-CALLE (P3) se instaló en el sector de Calle-Calle (anexo 2) en un sitio aledaño al río, poseyendo seguridad para dejar el sensor en el sitio y fácil acceso desde la carretera. Por último, se instaló en el sector de Purey la estación de monitoreo llamada PUREY (P2) (anexo 1), producto que en este sector existe un acceso público al río y es una zona alta del río en donde a simple vista no se observa una fluctuación del nivel del agua (Schwember et al., 1996). Este punto sirvió para analizar el límite superior efectivo del estuario.

3.5. Exactitud y precisión de los datos.

Para determinar la exactitud y precisión de los dataloggers de Ultrasonidos construidos y utilizados dentro de este estudio, se hicieron dos tipos de comparaciones. La primera consiste en determinar la exactitud y la precisión que tiene el sensor de ultra sonido del datalogger, haciendo pruebas de distancia en laboratorio. Dichas pruebas se realizaron ubicando el datalogger a distintas distancias (uno, tres y cuatro metros) de una pared, medidos con una regla topográfica (Figura 12). Para cada una de las distancias se utilizaron 500 datos medidos cada 10 segundos.

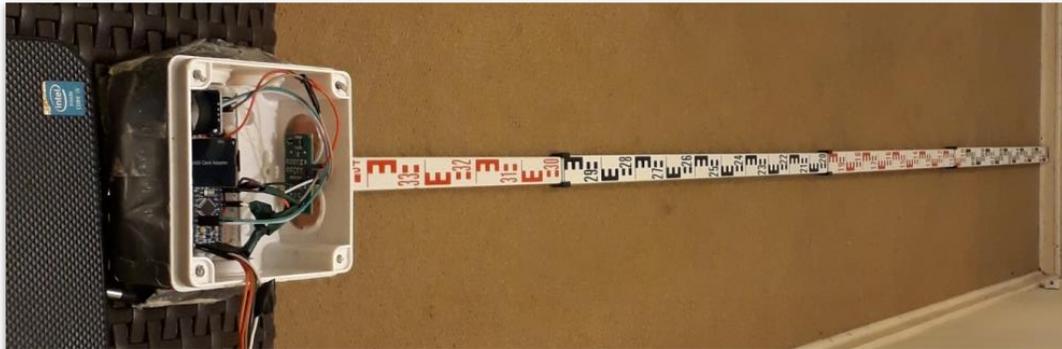


Figura 12. Montaje del test de precisión de Datalogger de Ultrasonido ubicado a 4 metros de la pared.

La segunda prueba que se realizó consistió en comparar los datos de la estación Lido que utiliza el sensor de ultrasonido con los datos del sensor de presión V303 Innovex del proyecto R.E.M.A. ubicados en el mismo sitio.

El sensor de presión V303 Innovex tiene una sensibilidad de ± 0.003 PSI (± 0.02 kPa). Este está instalado en la baliza Lido de la Red de monitoreo Ambiental del Río Valdivia, ubicada en la unión de los ríos Valdivia y Cruces en la comuna de Valdivia, Región de los Ríos. Este cuenta con conexión en línea para subir los datos, los cuales se pueden obtener en la página web <http://camahueto.innovex.cl:8888/static/reports.html>, siendo los datos recolectados cada 10 minutos. Cabe destacar que no presenta una corrección por salinidad (Figura 13).

Para comparar los datos entre el datalogger de ultra sonido y el sensor del proyecto R.E.M.A se seleccionaron los datos de un mismo periodo de tiempo, que parte del 23 de enero del 2019 al 22 de febrero del 2019. A los datos se les realizó una normalización para poder comparar dos tipos de medidas distintas, uno de ultrasonido que mide distancia en centímetros a la superficie del agua y el otro, diferencias de presión entre la columna de agua y la atmosfera. Luego ambos fueron comparados estadísticamente mediante una correlación lineal (Ali et al., 2016), y calculando su significancia estadística (*p-value*) para comprobar si la correlación es significativa.



Figura 13. Sitio en donde están instalados los sensores del proyecto R.E.M.A y el datalogger de ultrasonido.

3.6. Filtro de datos anómalos

Durante la recolección de los datos, existen factores externos al datalogger que afectan negativamente sus mediciones, por ejemplo, cuando el ángulo de instalación no es óptimo para permitir el rebote de la señal de ultrasonido, la estructura de instalación (árbol, muelle u otro) se mueve con el viento o corriente del río, la presencia de telarañas que se forman debajo del sensor o las ramas de arbustos o árboles produzcan que la señal de ultrasonido rebote antes de la columna de agua. Producto de ello, se realizaron tres tipos de filtros a los datos; el primero un filtro por distancia, el segundo un filtro a través de la mediana móvil y el tercero es una desestacionalización de los datos para la estación Purey, los cuales se explican a continuación.

3.6.1. Filtro por rango de distancia.

El primer filtro que se le realizó a los datos de distancia respecto del sensor de ultrasonido al espejo de agua de cada uno de los dataloggers se enfoca en quitar los datos que sean mayores o iguales a los 4 metros, ya que ese es el rango máximo en el que funciona el sensor de ultrasonido (Figura 14). Además, se

agrega un filtro según un rango menor a un valor determinado, estos rangos se asignaron dependiendo de la altura a la que se encuentra el sensor y a cómo se comportaba la onda de marea. Se pueden observar los rangos en la siguiente tabla:

Tabla 3. Rangos de filtro realizado a los datos de los distintos sensores instalados en terreno.

Rango menor o igual (cm)	Estación
120	Purey
180	Calle-Calle
1	Huellehue
120	Lido

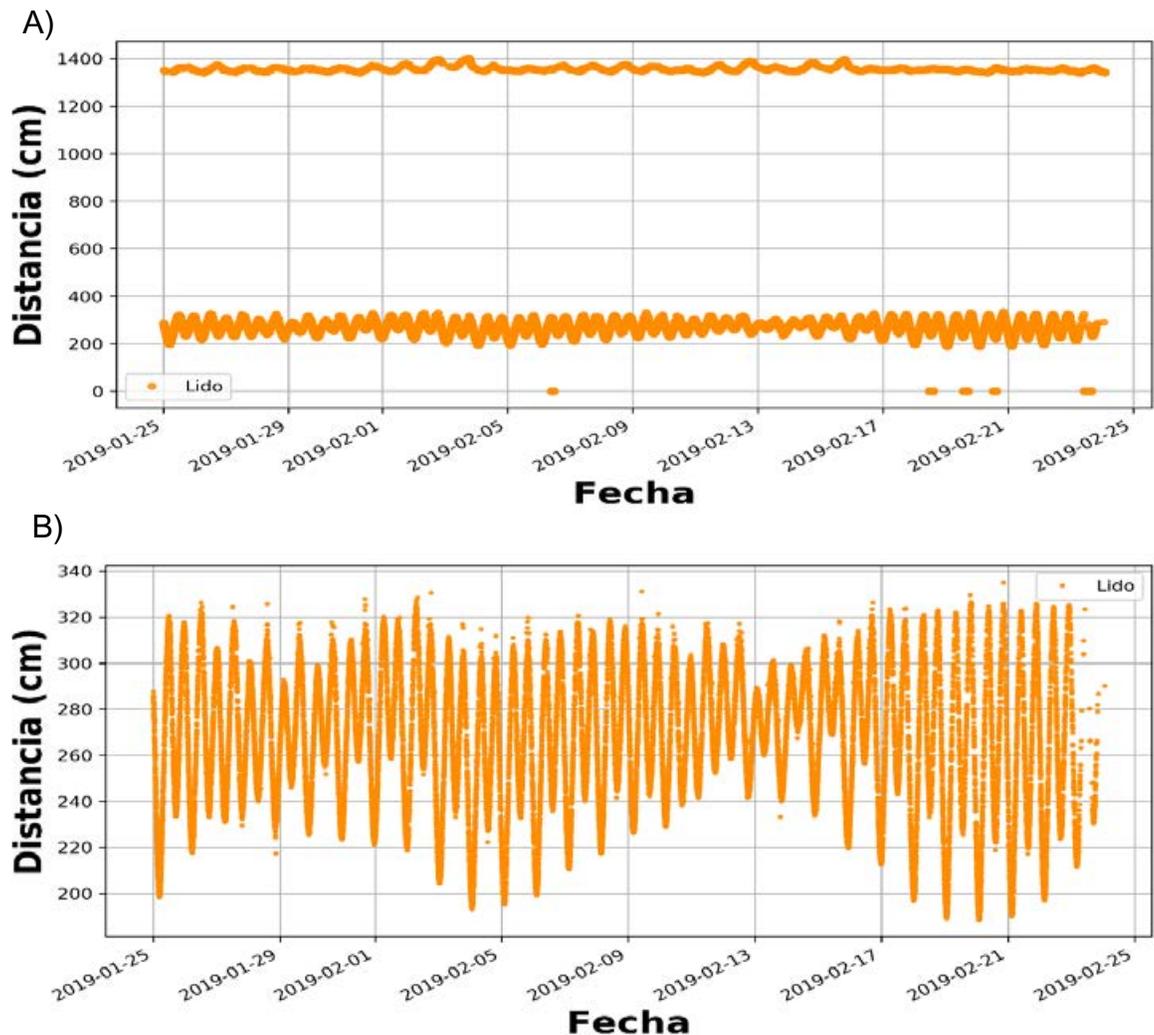


Figura 14. Filtro realizado a partir de clasificación por distancia >4 metros. Diferencia en los datos, el gráfico A) contiene los datos de la baliza Lido sin filtro y B) los datos con filtro. Elaboración propia.

Como el datalogger captura la distancia de este a la columna de agua, para calcular las fluctuaciones de la columna de agua es necesario invertir los datos obtenidos. Esto se obtuvo mediante una fórmula que consiste en restar el valor máximo de distancia de los datos obtenidos, por cada uno de los valores de distancia (Figura 15).

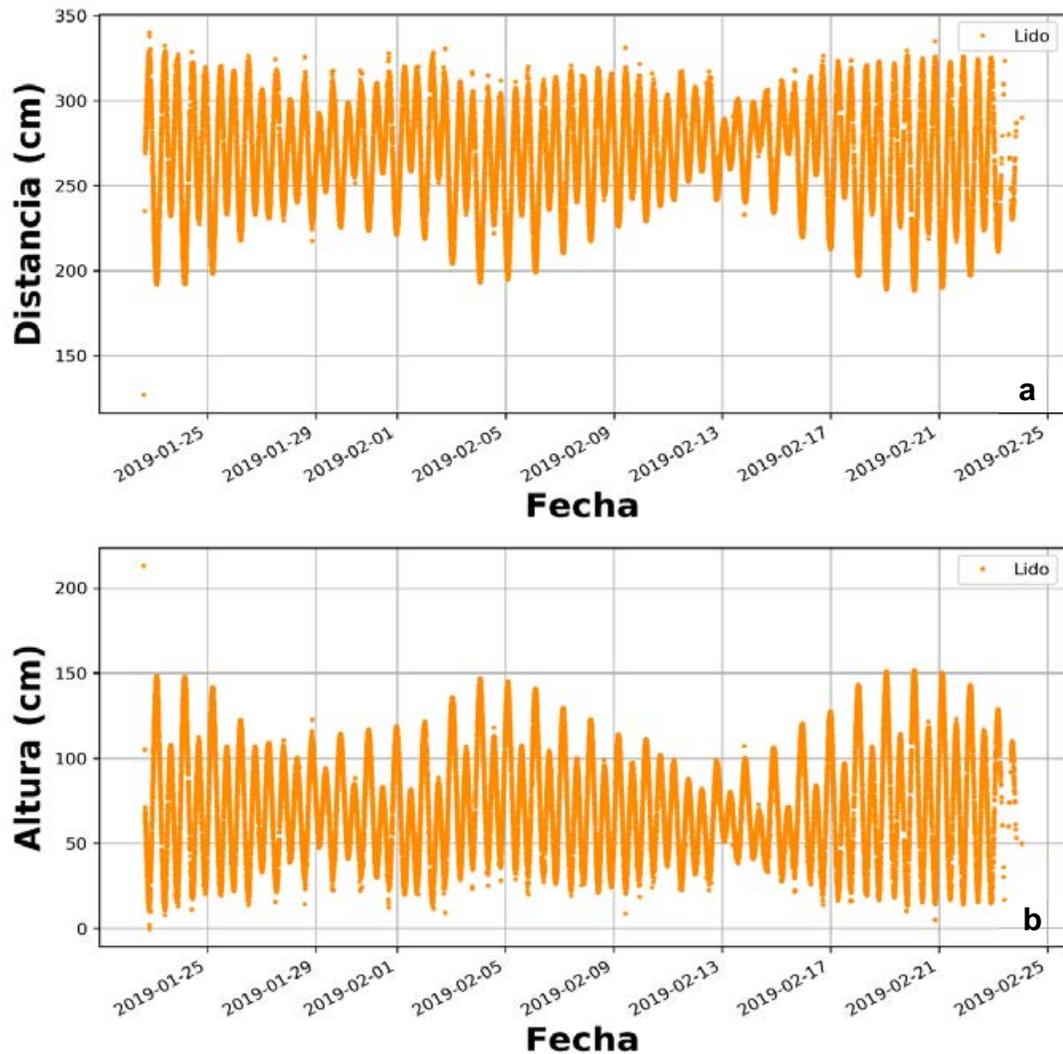


Figura 15. Figura que muestra la inversión de datos para generar mareograma para la Estación Lido. A) datos sin invertir y B) datos invertidos. Elaboración Propia.

3.6.2. Filtro de mediana móvil.

La mediana móvil es una fórmula que comúnmente se utiliza para el procesamiento digital de señales y el procesamiento de imágenes. En este caso se utilizó para mejorar la señal tomada por los distintos sensores instalados.

El filtro consiste en una fórmula reiterativa que calcula la mediana de una ventana de datos, en este caso 3 datos, la cual va se va moviendo alrededor de toda la nube de datos. Esta mediana es comparada con la diferencia que existe entre los

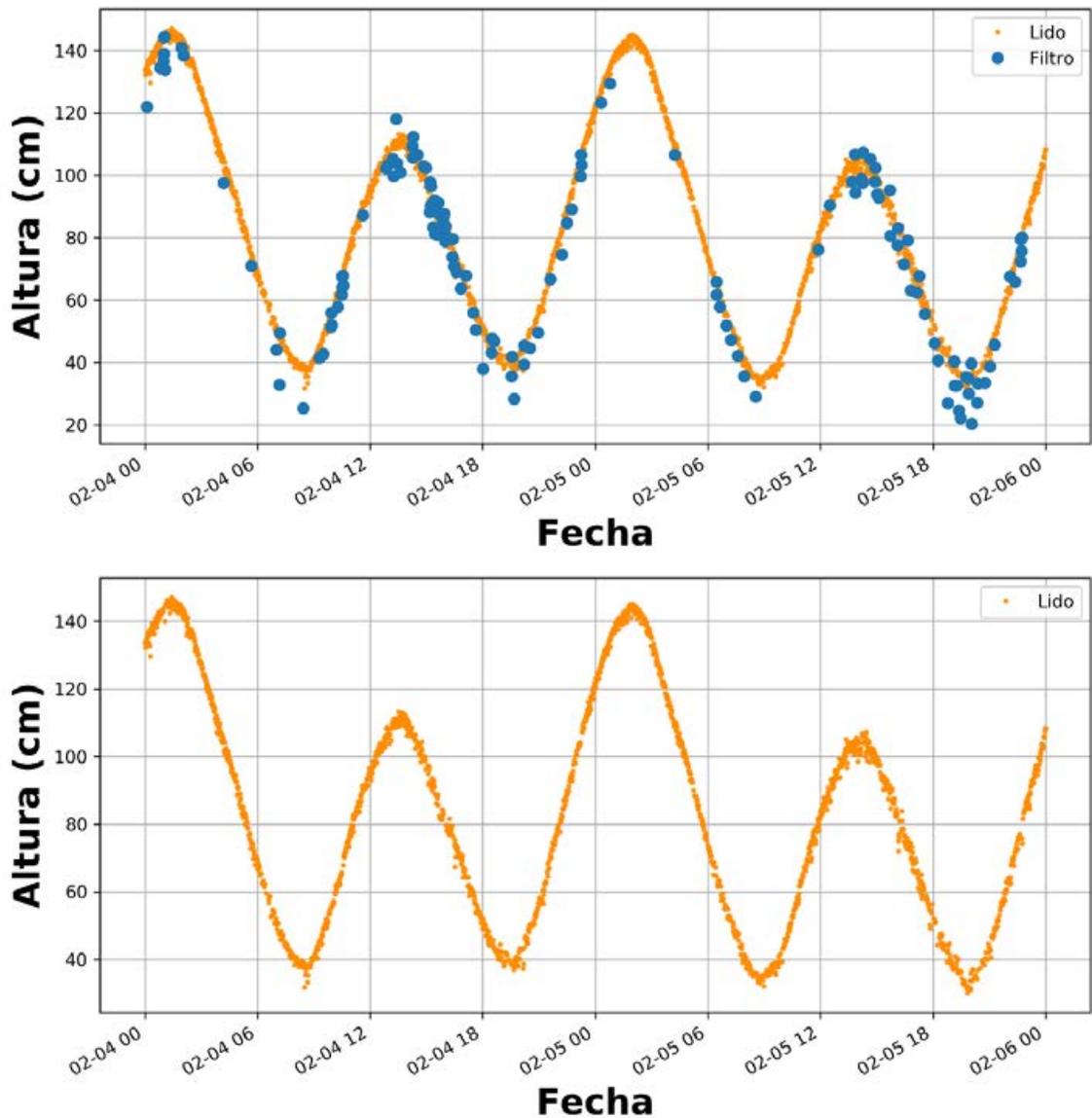


Figura 16. Comparación del filtrado de datos mediante la mediana móvil. Se puede observar cómo esta fórmula limpia gran parte de los datos anómalos en la Estación Lido. A) se muestran los datos identificados para filtrar y B) muestra los datos que quedan luego de aplicar el filtro.

datos y la mediana móvil. Se identifica los datos que sobrepasan la mediana móvil y se remueven para homogeneizar los datos (Figura 16).

3.6.3. Estacionalidad en la estación Purey.

El análisis visual de la estación de Purey muestra que puede haber cierta influencia de la marea, variando la altura de la columna de agua diariamente, a pesar de la influencia del caudal del río a esa distancia del mar. Para ello se realizó una descomposición estacional a través de la plataforma de Python, utilizando la librería “*seasonal decompose*” (Cady, 2017).

Esta descomposición desglosa una serie temporal como la suma de un término periódico, un término de "tendencia" suave y ruido aleatorio, es decir separa la serie temporal en tres componentes, la tendencia, estacionalidad y residuos. Siendo los residuos el componente de interés para el análisis, ya que muestra la serie temporal sin la tendencia y la estacionalidad (Haroon, 2017).

Los residuos son puestos a prueba estadísticamente a través de “*Dickey-Fuller*” que utiliza un modelo autorregresivo y optimiza un criterio de información a través de múltiples variables de retardo diferentes. Este análisis tiene como hipótesis nula (H_0) que la serie temporal puede representarse por una raíz unitaria, lo cual dice que la serie temporal no es estacionaria. La prueba se interpreta con el valor de P , cuando $P > 0,05$ no se rechaza la H_0 (no estacionaria), pero cuando $P \leq 0,05$ se rechaza H_0 , concluyendo que los datos son estacionarios (Brownlee, 2016; Haroon, 2017).

3.7. Velocidad, tiempo de desfase y relación con la fase Lunar.

Para la caracterización y el análisis de la marea, se realizaron tres tipos de estudio. El primero en relación con el cálculo de la velocidad a partir de las distancias recorridas por las mareas más altas y bajas del mes y del día. El segundo es una caracterización del desfase que tiene por día la marea en las distintas estaciones instaladas a lo largo del río. Y por último caracterizar las mareas con su relación con las declinaciones lunares.

3.7.1. Velocidad de la onda de marea

Para poder estimar la velocidad de la onda de marea, se calculó el tiempo que demora en llegar la marea más alta y baja por día a cada una de las estaciones, hasta llegar a Purey la estación más alejada, aunque esta última no se incluyó dentro del estudio producto de que los datos tienen mucha dispersión. Esto se

realizó calculando la distancia que existe desde la bahía de corral hasta las distintas estaciones que se utilizaron para la investigación (Tabla 4).

Tabla 4. Tabla que muestra la distancia desde Corral a cada estación en Kilómetros. La distancia se calculó utilizando Google Earth.

Estación	Lido y R.E.M.A.	Huellehue	Calle-Calle	Purey
Distancia (Km)	16,8	32,98	46,36	62,3

La distancia se obtuvo a partir del trazado de la línea media del río desde la bahía de corral hasta cada una de las estaciones utilizando *Google Earth*. Además, para la discusión se utilizó un perfil de elevación a partir de un Modelo de elevación Digital (DEM) utilizando el software *Quantum gis* con la herramienta *Terrain profile* y *python* para suavizar los datos de elevación con la herramienta *savgol_filter* (Figura 17).

Tras obtener las distancias existentes, se procedió a obtener la fecha y hora de ocurrencia de las mareas máximas y mínimas por día de cada estación, utilizando la herramienta *idmax* para los valores maximos e *idmin* para los valores minimos de la librería *pandas* de *python*. Además, se extrajeron las horas de ocurrencia de la marea alta y baja en la bahía de corral de la pagina web (“Tabla de mareas 2019 de Valdivia (Bahía de Corral), XIV Región de Los Ríos para la pesca,” 2019) para los días seleccionados para el estudio, ya que se necesitaban para tener un punto de partida para analizar la propagación de la marea en el estuario como en el caso del estuario *Modaomen* (Cai et al., 2012).

Una vez identificadas las fechas y horas, se porcedió a realizar el cálculo de velocidad en metros por segundo (m/s), el cual se utilizó para tener una aproximación teórica de la velocidad de la marea, ya que se entiende que la velocidad de marea es un proceso más complejo y dinámico (Cea & French, 2012; Dyer, 2001; Garrett & Cummins, 2008; Vennell, 2011; Zappa et al., 2003).

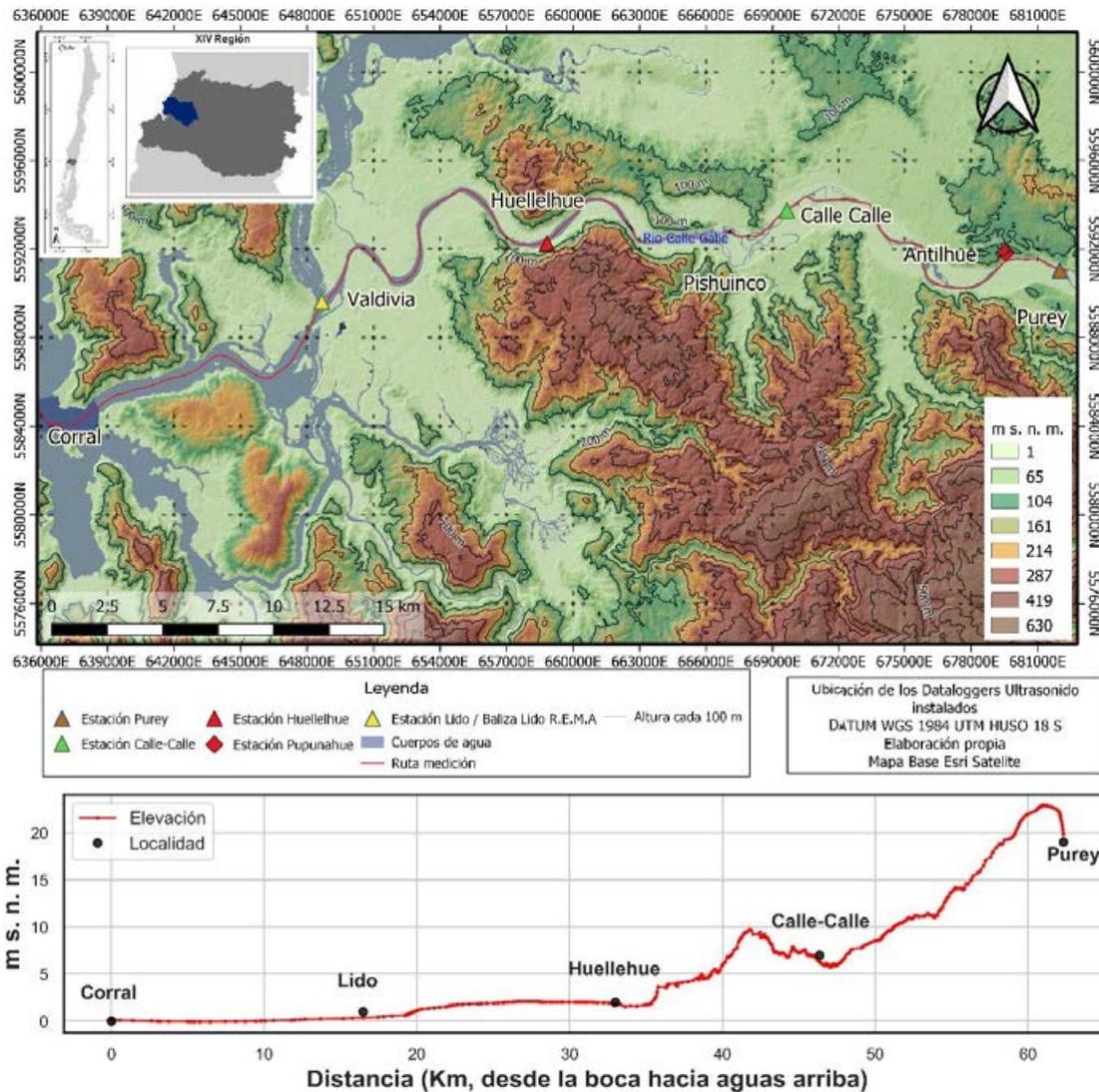


Figura 17. Mapa topográfico y perfil longitudinal de Elevación del trazo realizado en el mapa. El perfil muestra la elevación en metros extraída desde el DEM srtm de 30 metros, mostrando los cambios de pendiente que ocurren a lo largo de la sección del río.

El cálculo de la velocidad se realizó entre las distintas secciones, utilizando la distancia existente entre las balizas (Tabla 4) transformada a metros y calculando las diferencias de tiempo en que llega la marea alta y baja a las distintas secciones del cauce, transformada a segundos. Con esos datos se procedió a calcular la velocidad en m/s.

3.7.2. Cálculo del Tiempo de Desfase de la marea por día.

El tiempo de desfase que posee la marea se calculó a partir de la identificación de los valores más altos y bajos de marea por día en los datos obtenidos por las distintas estaciones puestas en el río, obteniendo las horas a las que ocurrieron dichos valores. La identificación se realizó utilizando la herramienta *idxmin* e *idxmax* de la librería de pandas de Python. Esto se realizó en el periodo de tiempo en que hubo datos efectivos para cada una de las estaciones (Figura 17).

Al ser identificarlos se calcula la diferencia en tiempo con la hora del día anterior, permitiendo identificar el tiempo de desfase por día en cada una de las estaciones. Además, se adjuntaron las tablas de horas por día para cada una de las estaciones, para las mareas más altas y bajas, con el objetivo de obtener una mejor visualización de los datos.

3.7.3. La altura de la marea y su relación con la declinación lunar.

Para caracterizar la relación que tienen las mareas con la declinación lunar, se compararon los datos de las distintas estaciones instaladas en el río Calle-Calle, con los datos de fases Lunares que fueron proporcionados por la página web del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) (<http://www.shoa.cl/php/luzyobscuridad.php?idioma=es>).

Con ambos datos se procedió a crear mareogramas que tengan tanto las mareas detectadas (en este caso se trabajó con los datos normalizados de las secciones anteriores) y las fases lunares para observar los cambios que producen a lo largo de los días de muestreo y poder caracterizar dicha relación.

En la bibliografía, para analizar las mareas y su relación con las fases lunares, se utiliza el análisis de armónicos (Friedrichs & Aubrey, 1988; Guo et al., 2015; Jay & Kukulka, 2003). Pero en este caso no se utilizó para el estudio, ya que el dentro de los objetivos era realizar una caracterización básica y enfocada al uso de sensores de bajo costo.

4. RESULTADOS

Los datos obtenidos por las distintas estaciones se capturaron durante el periodo de tiempo que se muestra en la Figura 18. Los días en los cuales no existen datos, son producto de distintos factores como falla de la batería, alcance de la columna de agua al sensor, días en que no se pudo ir a instalar el datalogger y robo de datalogger (estación Purey durante el mes de enero y febrero).

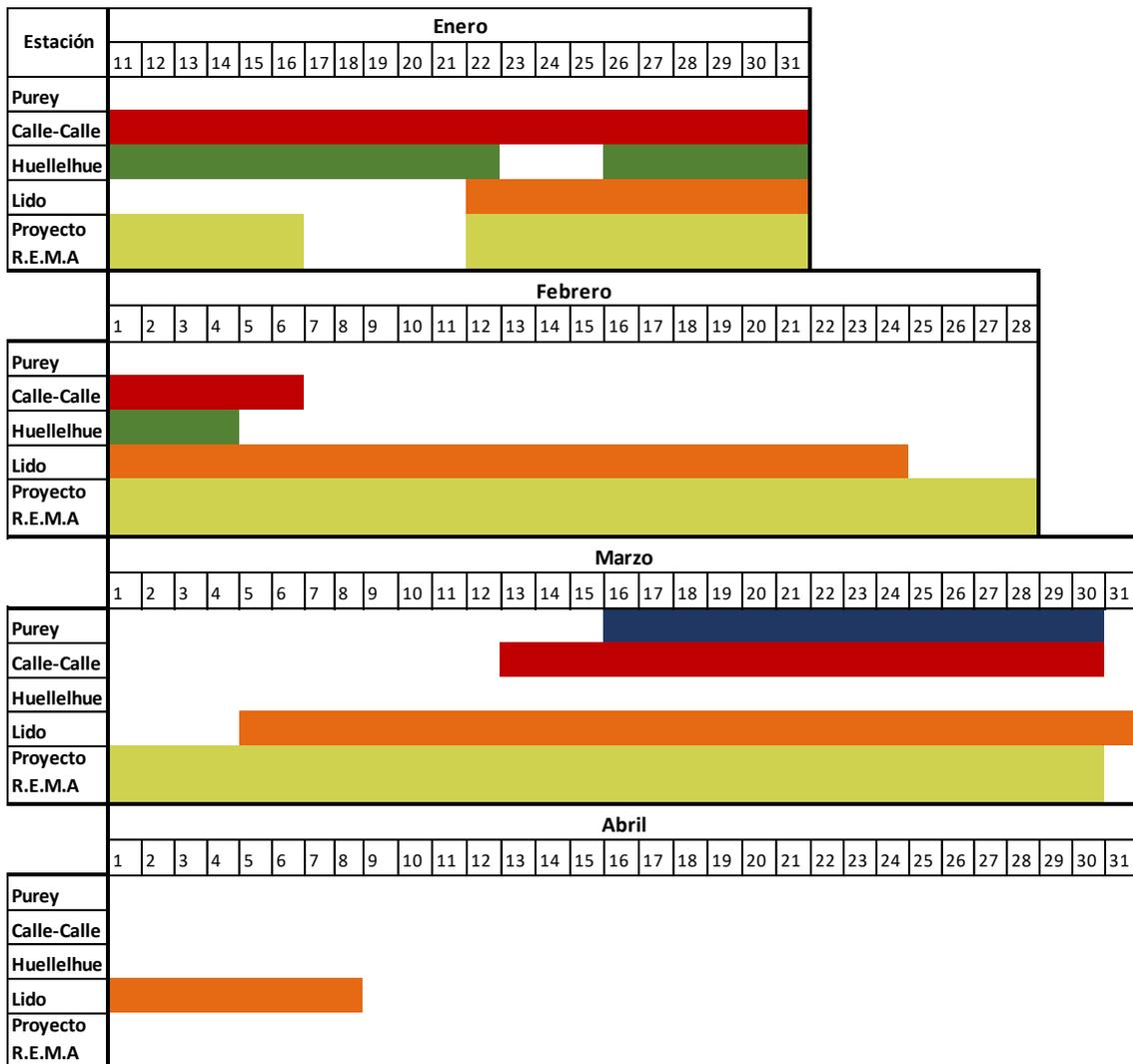


Figura 18. Tabla con las fechas en que se capturaron datos efectivos. Existen días sin datos y eso fue producto de que sacaron el datalogger de Purey y se perdieron los datos de enero a febrero de esa estación.

Los resultados de los análisis son presentados con el siguiente orden: la sección 4.1 se muestran los resultados de la exactitud de los datos, comparando las estaciones Lido y la Baliza Lido del proyecto R.E.M.A. Luego del análisis de los datos, se estudió el comportamiento de la onda de marea. Con un cálculo de velocidad se estudia el comportamiento de la onda de marea (4.2, 4.3, 4.4) y terminando con la relación entre la altura de la marea y declinación Lunar (4.4). Todo el análisis se realizó utilizando la plataforma *Jupyter Notebook*, la cual trabaja con el lenguaje de programación Python. Para visualizar los códigos y las librerías utilizadas en la investigación visite el siguiente link.

4.1. Exactitud y precisión de los datos.

Los resultados de la primera prueba de exactitud y precisión de los datos que consistió en las pruebas de laboratorio, donde se midió la distancia a una pared (uno, tres y cuatro metros), con una muestra de 500 datos medidos cada 10 segundos, se visualizan en la Figura 19. En el gráfico de la izquierda se observa que la desviación estándar es baja (0,05) a un metro, pero a medida que va aumentando la distancia, la desviación estándar aumenta, siendo de 0,07 a tres metros y de 0,08 a los cuatro metros.

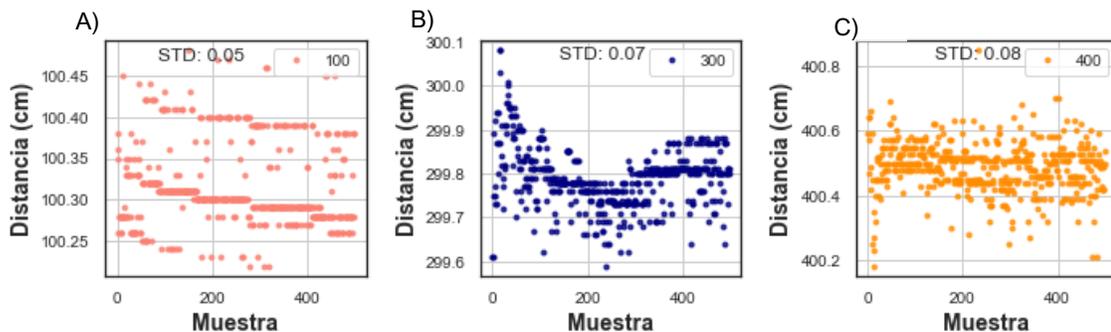


Figura 19. Gráfico con los resultados de la prueba en laboratorio. A) corresponde a la distancia a 1 metro, B) corresponde a la distancia de 3 metros y C) a 4 metros.

En la segunda prueba donde se compararon los datos entre el datalogger de ultra sonido y el sensor del proyecto R.E.M.A mediante una normalización de los datos que se realiza restando el dato obtenido por el promedio de todos los datos del datalogger, y ese resultado es dividido por la desviación estándar de los datos (Figura 20).

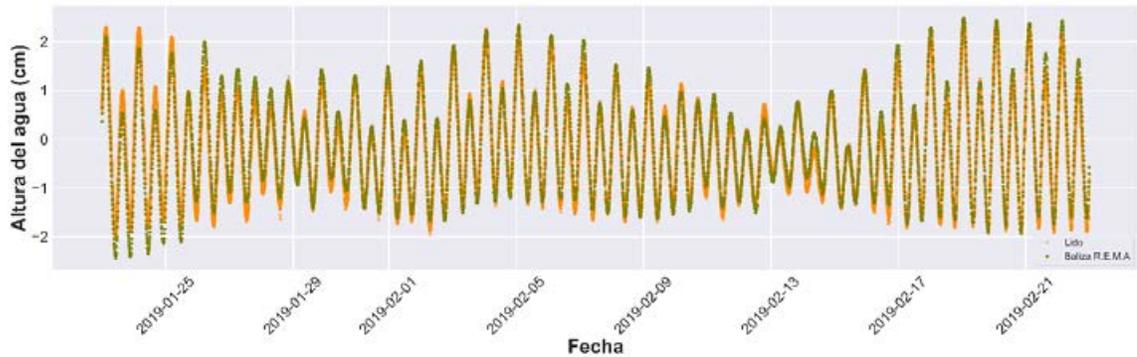


Figura 20. Mareograma con los datos normalizados de la baliza Lido y el Sensor de presión del proyecto R.E.M.A. En este grafico se puede observar cómo calzan los distintos niveles de la marea en el río Calle-Calle.

Para generar la comparación estadística, se realizó un análisis de correlación (Ali et al., 2016) entre ambos dando como resultado una correlación de 0,98 (Figura 21). Obteniendo un *p-value* de 0.

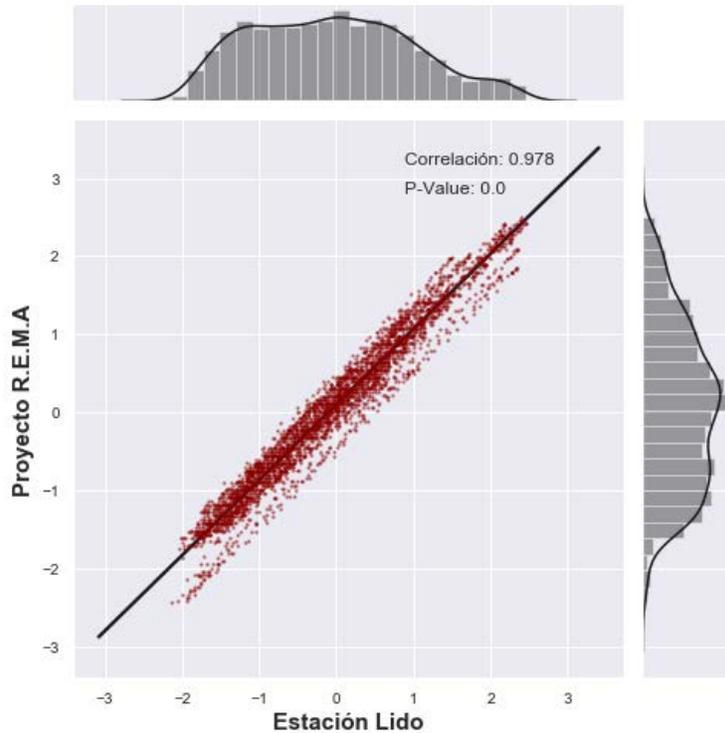


Figura 21. Gráfico de correlación entre los datos obtenidos entre el sensor de ultrasonido de la Estación Lido y el sensor de presión del Proyecto R.E.M.A. Elaboración propia

4.2. Análisis de la onda de marea en el estuario fluvial.

A continuación, se presentan algunos aspectos que corresponden al comportamiento de la onda de marea a lo largo del estuario fluvial del río Calle-Calle. Los primeros resultados del análisis corresponden a la obtención de los mareogramas para las distintas estaciones (Figura 22) en los cuales se puede observar claramente que hasta la estación Calle-Calle existe el comportamiento de marea semidiurna.

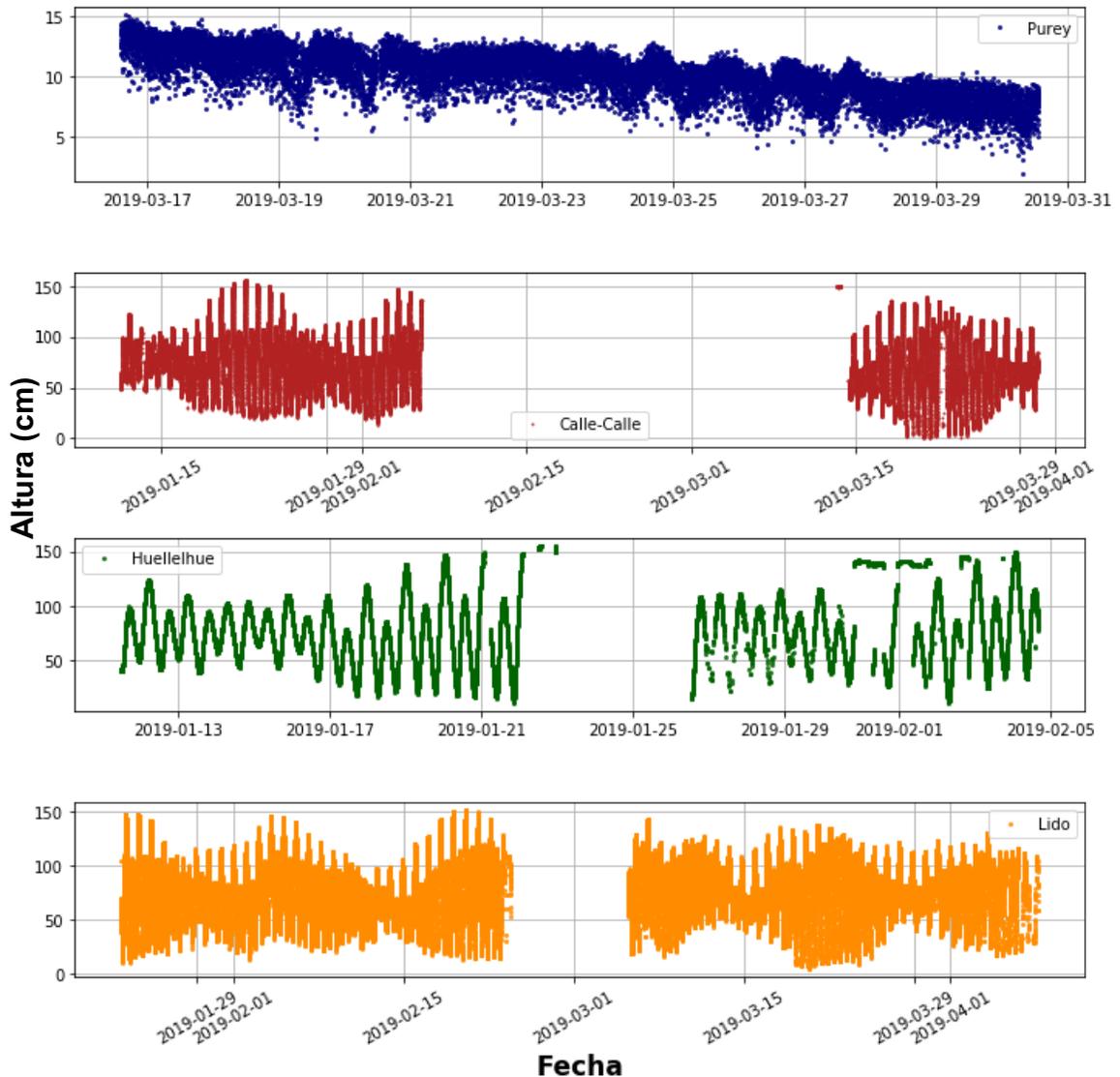


Figura 22. Mareogramas de las estaciones Purey, Calle-Calle, Huellehue y Lido. Nótese que mantienen las fluctuaciones de 1,40 metros aproximados, estando a unos 46 km de la bahía de Corral, los datos de la estación Calle-Calle.

El rango de altura de agua para la estación Lido durante las mareas más bajas del mes fue de 35 cm para el 14-02-2019 y para la marea más alta del mes es 132 cm durante el 20-02-2019. Para la estación Huellehue el rango durante las mareas más bajas del mes es de 28 cm durante el 16-01-2019 y durante las mareas más altas del mes se registraron 127 cm durante el 21-01-2019 y 22-01-2019. En la estación Calle-Calle el rango durante la marea más baja del mes fue de 30 cm el 16-01-2019 y el rango de las mareas más altas del mes fue de 138 cm durante los días 21-01-2019 y 22-01-2019.

En el caso de la estación Purey, no se logra observar una estacionalidad marcada en el mareograma. No obstante, en los datos de la estación Purey existe una fluctuación en los días de muestreo (Figura 23).

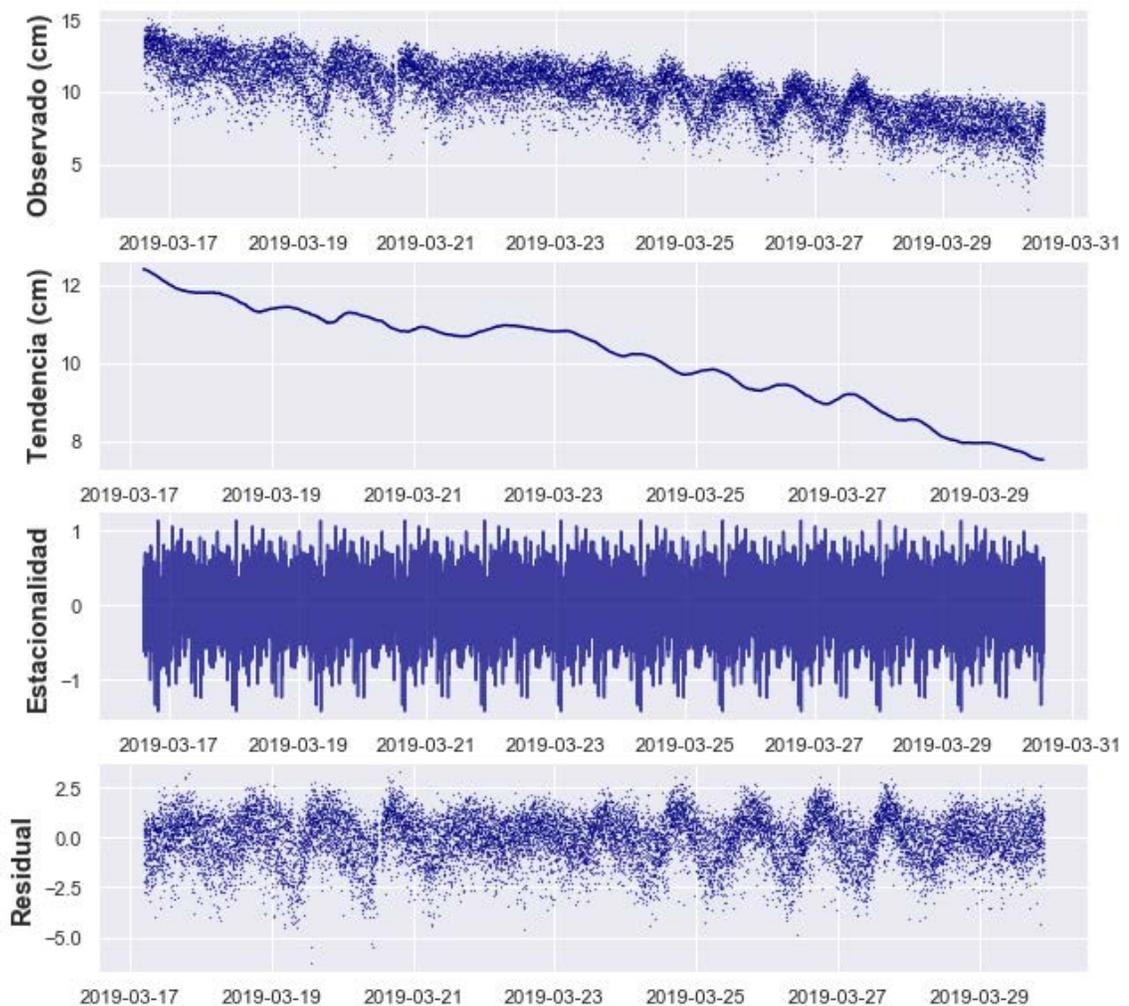


Figura 23. Gráfico que muestra los datos de la estación Purey desestacionalizados. Se percibe que el caudal va disminuyendo a lo largo de los días 17 al 29. Al quitar esta tendencia, se observa mejor la ciclicidad que existe en los días.

La estacionalidad observada parcialmente en el gráfico residual de la Figura 23, es corroborada por el test *Dickey-Fuller*, el cual demuestra que existe una estacionalidad en los datos. Esto es demostrado gracias al *p-value*, que en nuestro caso es menor que 0,05, rechazando la hipótesis nula del test descrito en capítulos anteriores.

El resumen estadístico que se realiza al aplicar la prueba estadística de *Dickey-Fuller* sobre los valores residuales es:

ADF Statistic: -6.459864574546884

p-value: 1.45^{-8}

Critical Values:

1%: -3.431

5%: -2.862

10%: -2.567

Este límite irá cambiando a medida en la época del año y específicamente el caudal del río varíe, produciendo que el límite efectivo se mueva dependiendo del caudal.

4.3. Velocidad de la onda de marea.

Los datos de velocidad se calcularon a partir de la distancia que recorre la onda de marea a lo largo de las distintas estaciones instaladas. Se visualizan a través de un mapa el cual muestra las distintas horas en donde ocurre la marea alta y más baja de los días 27-01-2019, 04-02-2019 y 17-03-2019. Además, se adjuntan gráficos de las mismas fechas en donde se observa el tiempo que dura el trayecto de la marea alta y baja en recorrer la sección del río desde Corral hasta la estación respectiva.

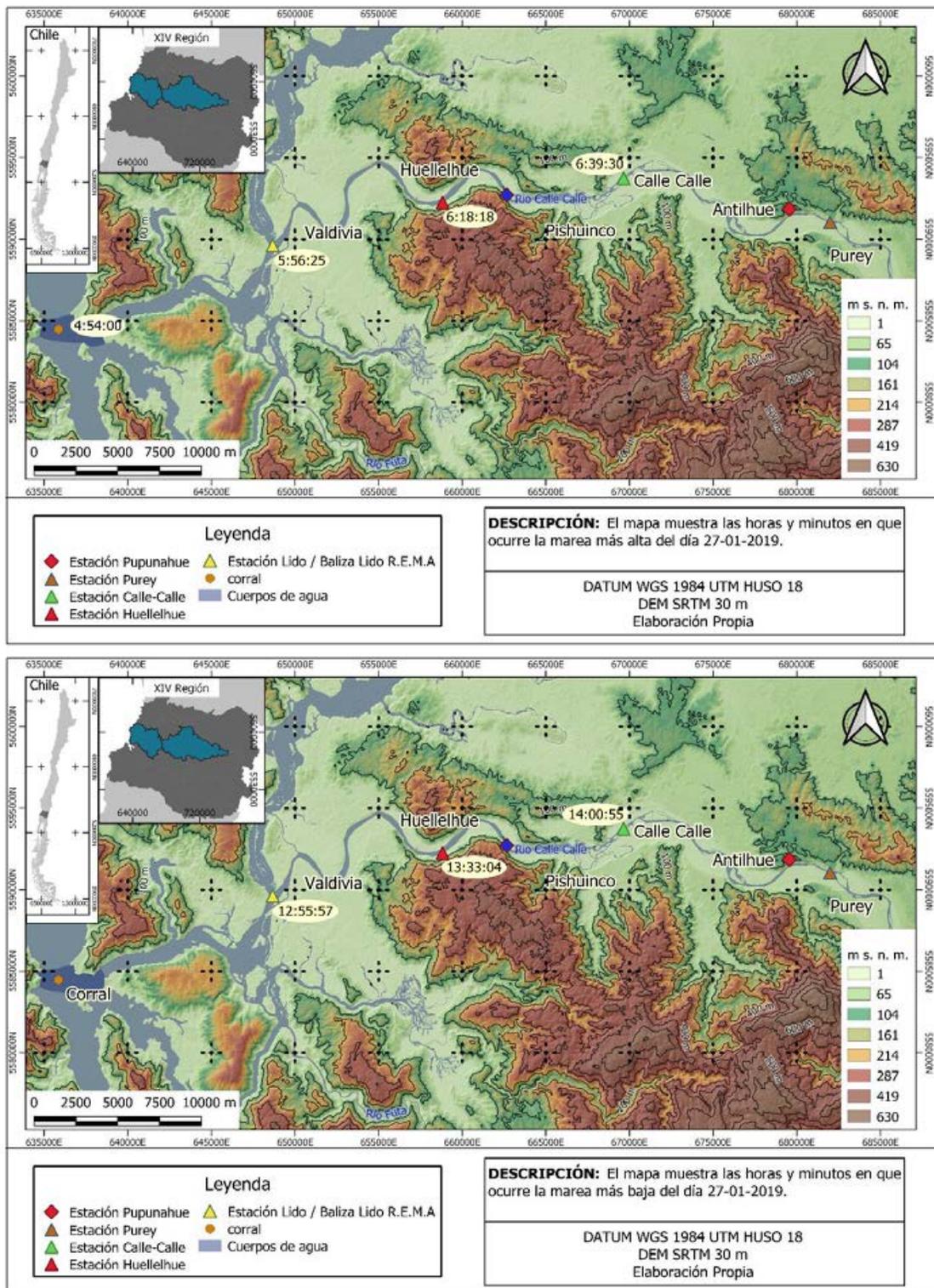


Figura 24. Mapas de horas de ocurrencia de marea más alta y baja de las distintas estaciones, durante la fecha 27-01-2019. (Mapa de arriba marea más alta, mapa de abajo marea más baja del día.)

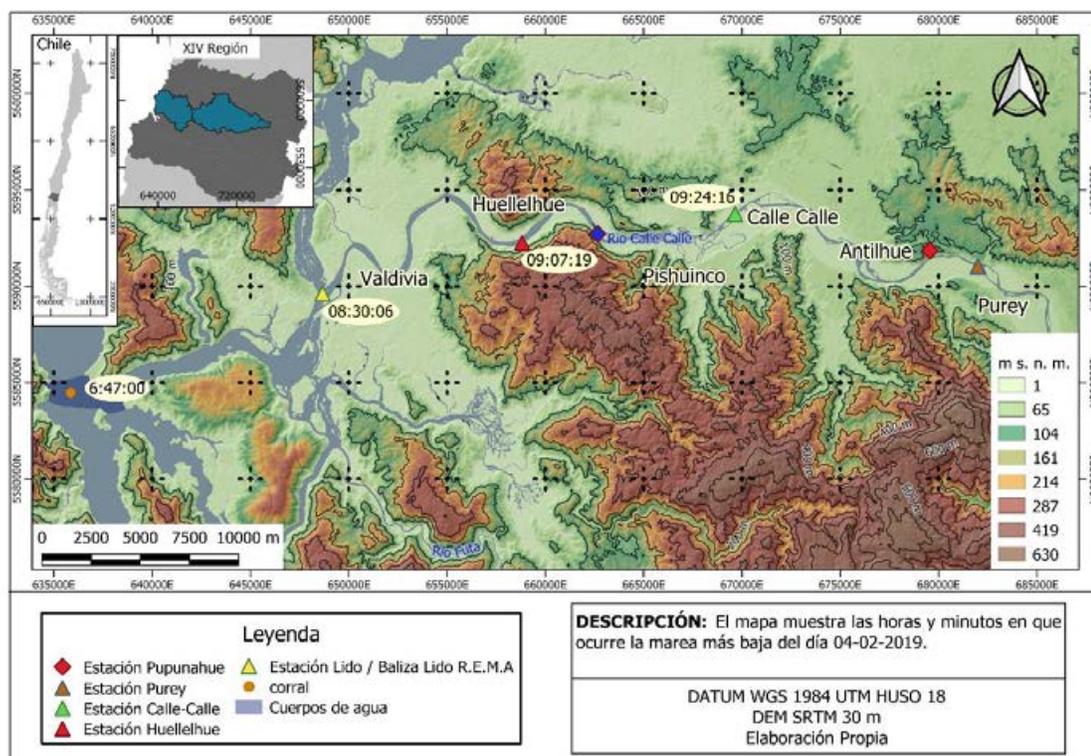
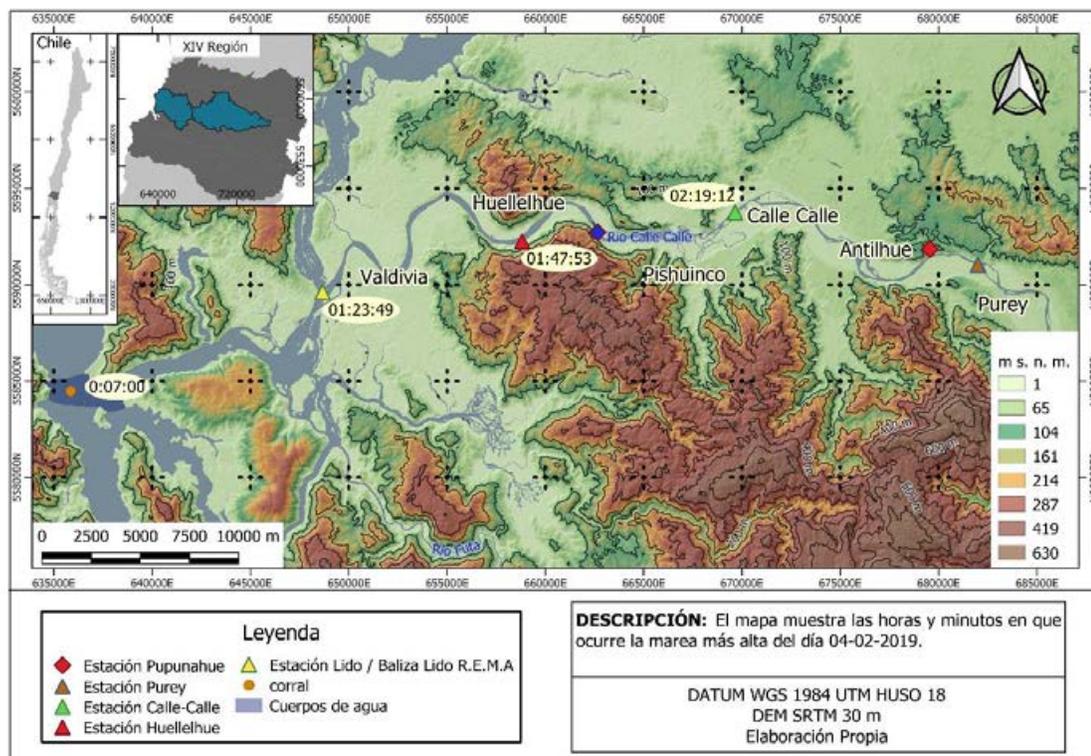


Figura 25. Mapas de horas de ocurrencia de marea más alta y baja de las distintas estaciones, durante el día 04-02-2019. (Mapa de arriba marea más alta, mapa de abajo marea más baja del día.)

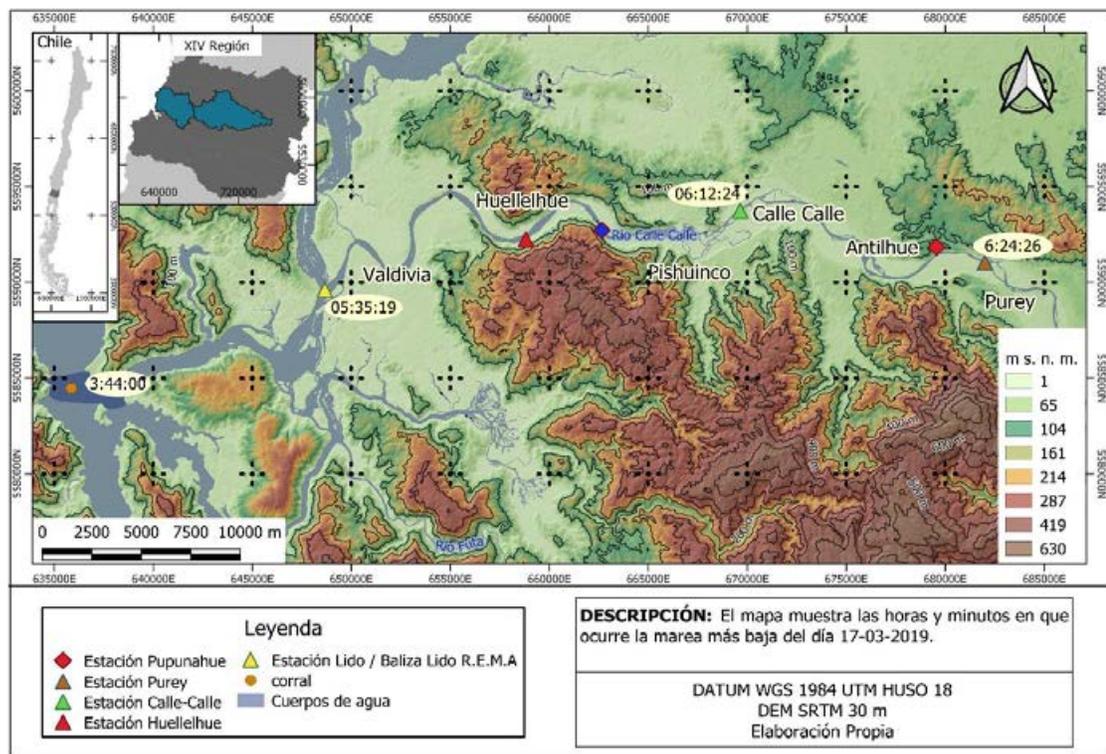
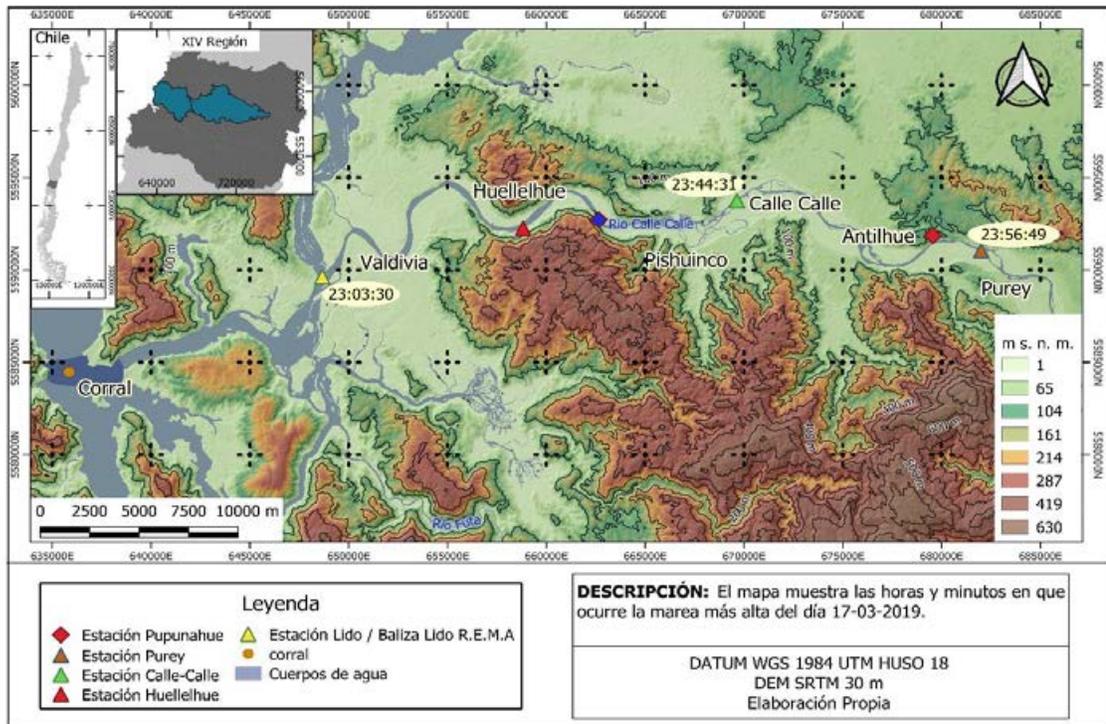


Figura 26. Mapas de horas de ocurrencia de marea más alta y baja de las distintas estaciones, durante el día 17-03-2019. (Mapa de arriba marea más alta, mapa de abajo marea más baja del día.)

La velocidad de la marea más alta y baja de las distintas fechas y a lo largo de las estaciones se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Tabla resumen de velocidades. El cálculo de velocidad se realizó considerando la distancia y el tiempo del trayecto desde Corral hasta cada estación.

Fecha	Sector	Velocidad marea más Alta (m/s)	Velocidad marea más Baja (m/s)
27-01-2019	Lido	4,34	3,63
	Huellehue	6,54	4,77
	Calle-Calle	7,35	5,44
04-02-2019	Lido	3,58	2,71
	Huellehue	5,49	3,92
	Calle-Calle	5,85	5,01
17-03-2019	Lido	5,28	2,52
	Calle-Calle	6,89	5,22
	Purey	8,37	6,48

4.4. Tiempo de Desfase de la marea por día.

Para evaluar el tiempo de desfase que posee la marea por día, se identifican las horas por día en que ocurre la marea más alta y bajas para cada estación. En esta sección se comparan las horas de ocurrencia con los del día anterior para calcular el desfase.

Para expresar mejor la información en esta sección se utilizarán los datos de la estación Lido y Calle-Calle de las fechas en que coinciden ambos. En la sección de anexos aparecen las tablas con las horas de ocurrencia de la marea alta y baja para la estación Lido (Anexo 5), Huellehue (Anexo 6), Calle-Calle (Anexo 7) y Purey (Anexo 8).

En la estación Lido las horas presentan desfase de casi una hora aproximadamente para la marea alta y para la baja varía de 20 a 30 minutos de desfase por día, durante el 24 al 27 de enero (Tabla 6, destacado en amarillo).

En el caso de los días 28-01 al 05-02 el programa identifica para las mareas más altas que cambian su horario de ocurrencia y se saltan a las 20:29 horas. El desfase empieza a variar disminuyendo de 1 hora a 30 minutos aproximadamente. Para las horas de las mareas bajas de esos días, se presenta

que desde el 28-01 al 31-01 van aumentando de 30 a casi 45 minutos el desfase, llegando al día 01-02 en donde el programa identifica que la marea baja se produce a las 6 A.M y a partir de ahí no presenta un desfase progresivo, sino más bien al azar, con una hora, 24 minutos y 58 minutos.

Tabla 6. Horas en que ocurre la marea más alta y baja por día para la estación Lido, y el desfase en horas y minutos (H:m).

Fecha	Lido				Calle-Calle			
	Baja	Desfase	Alta	Desfase	baja	Desfase	alta	Desfase
23-01-2019	10:17:33	nun	2:57:16	nun	10:53:18	nun	3:41:48	nun
24-01-2019	10:41:47	0:24	3:54:40	0:57	11:53:43	1:00	4:27:02	0:45
25-01-2019	12:02:07	1:20	4:24:57	0:30	12:23:30	0:29	5:26:34	0:59
26-01-2019	12:26:34	0:24	5:19:52	0:54	13:00:22	0:36	6:04:23	0:37
27-01-2019	12:55:57	0:29	6:18:18	0:58	14:00:55	1:00	20:22:02	14:17
28-01-2019	14:19:09	1:23	20:29:40	14:11	14:36:23	0:35	21:25:29	1:03
29-01-2019	14:51:12	0:32	21:46:10	1:16	16:26:00	1:49	21:58:53	0:33
30-01-2019	15:39:02	0:47	22:45:45	0:59	16:56:04	0:30	23:25:30	1:26
31-01-2019	16:20:06	0:41	23:16:56	0:31	17:59:39	1:03	23:59:38	0:34
01-02-2019	6:14:29	nun	23:46:17	0:29	7:10:55	nun	0:13:27	0:14
02-02-2019	7:16:20	1:01	23:59:51	0:13	7:57:53	0:46	23:57:58	23:44
03-02-2019	7:41:17	0:24	0:48:00	1:11	8:52:22	0:54	1:36:54	nun
04-02-2019	8:30:06	0:48	1:25:17	0:37	9:24:16	0:31	2:19:12	0:42
05-02-2019	19:50:12	11:20	1:58:35	0:33	9:32:41	0:08	2:50:37	0:31
14-03-2019	12:29:18	nun	18:57:16	16:58	13:07:03	3:34	21:42:59	18:52
15-03-2019	3:00:38	nun	20:31:05	1:33	3:18:23	nun	21:15:55	nun
16-03-2019	4:25:17	1:24	22:13:53	1:42	5:23:34	2:05	22:40:24	1:24
17-03-2019	5:35:19	1:10	23:03:30	0:49	6:12:24	0:48	23:44:31	1:04
18-03-2019	6:10:50	0:35	23:58:03	0:54	6:52:38	0:40	0:00:25	0:15
19-03-2019	18:17:47	12:06	0:04:18	0:06	7:47:36	0:54	0:47:22	0:46
20-03-2019	8:00:32	nun	0:35:32	0:31	20:09:30	12:21	1:41:33	0:54
21-03-2019	8:19:44	0:19	1:25:46	0:50	9:09:21	nun	2:27:32	0:45
22-03-2019	21:13:01	12:53	2:19:21	0:53	22:11:58	13:02	3:04:35	0:37
23-03-2019	21:47:04	0:34	2:58:23	0:39	22:55:08	0:43	3:43:11	0:38
24-03-2019	9:50:12	nun	15:51:32	12:53	11:21:27	nun	16:51:01	13:07
25-03-2019	10:31:24	0:41	17:04:07	1:12	11:17:19	nun	17:34:53	0:43
26-03-2019	0:00:18	nun	17:30:59	0:26	0:28:33	nun	18:25:43	0:50
27-03-2019	0:47:28	0:47	18:42:11	1:11	1:23:46	0:55	19:23:05	0:57
28-03-2019	2:05:31	1:18	20:17:54	1:35	2:49:07	1:25	20:16:15	0:53
29-03-2019	4:20:49	2:15	21:54:10	1:36	4:18:08	1:29	22:11:53	1:55

Durante los días 15-03 al 23-03, se presentan desfases de una tendencia de 1 hora aproximadamente para la marea alta, a excepción de los días 19 y 20 de marzo. Para la marea baja existe un desfase de 1:20 que luego va disminuyendo a una hora, 30, 20 minutos y luego aumenta a 40 minutos. Pero existen días en que el desfase se reconoce en otro horario el cual no coincide con la tendencia anterior.

Para la estación Calle-Calle se presenta que en los días 23-26 de enero existe un desfase de una hora aproximadamente. Los horarios cambian a partir del día 27 hasta el 31 continúa habiendo fluctuaciones de una hora y media hora aproximadamente. Desde el 16 al 23 de marzo se presentan desfases de varían de una 1:20 a 40 minutos aproximadamente. En el caso de la marea más baja los días 24 al 31 de enero existe una variación de una hora a 30 minutos aproximados, a excepción del día 29 que varía casi dos horas. Pero en el resto de los días, existe un comportamiento errático de identificación y sin muchas tendencias, a excepción de los días 2 al 5 de febrero y 15 al 19 de marzo, donde se observa un patrón de una hora aproximadamente.

4.5. La relación entre la altura de la marea y la fase Lunar.

Para analizar la relación de las mareas con las fases Lunares, se incluyeron las fases Lunares a los mareograma de las distintas estaciones a lo largo del estuario fluvial (Figura 27).

En la estación Lido se observa que coinciden las mareas más altas del mes con las de los días en donde la luna se encuentra en fase Llena y Nueva. Y los días de las mareas más bajas coinciden en los días de luna Creciente y Menguante, aunque la más baja es la Creciente (Figura 26 A). Estas mismas características se presentan en la estación Huellehue (Figura 26 B) y Calle-Calle (Figura 26 C), además de presentar que, durante las mareas altas, los niveles de estas se mantienen unas 24 horas, que sería el tiempo que transcurre entre la ocurrencia entre las dos crestas más altas del día, cuando ocurre luna Llena o Nueva.

En el caso de la estación Purey como no se observan bien las fluctuaciones, es difícil ver la relación que existe con la declinación lunar en comparación con los datos de las otras estaciones descritas.

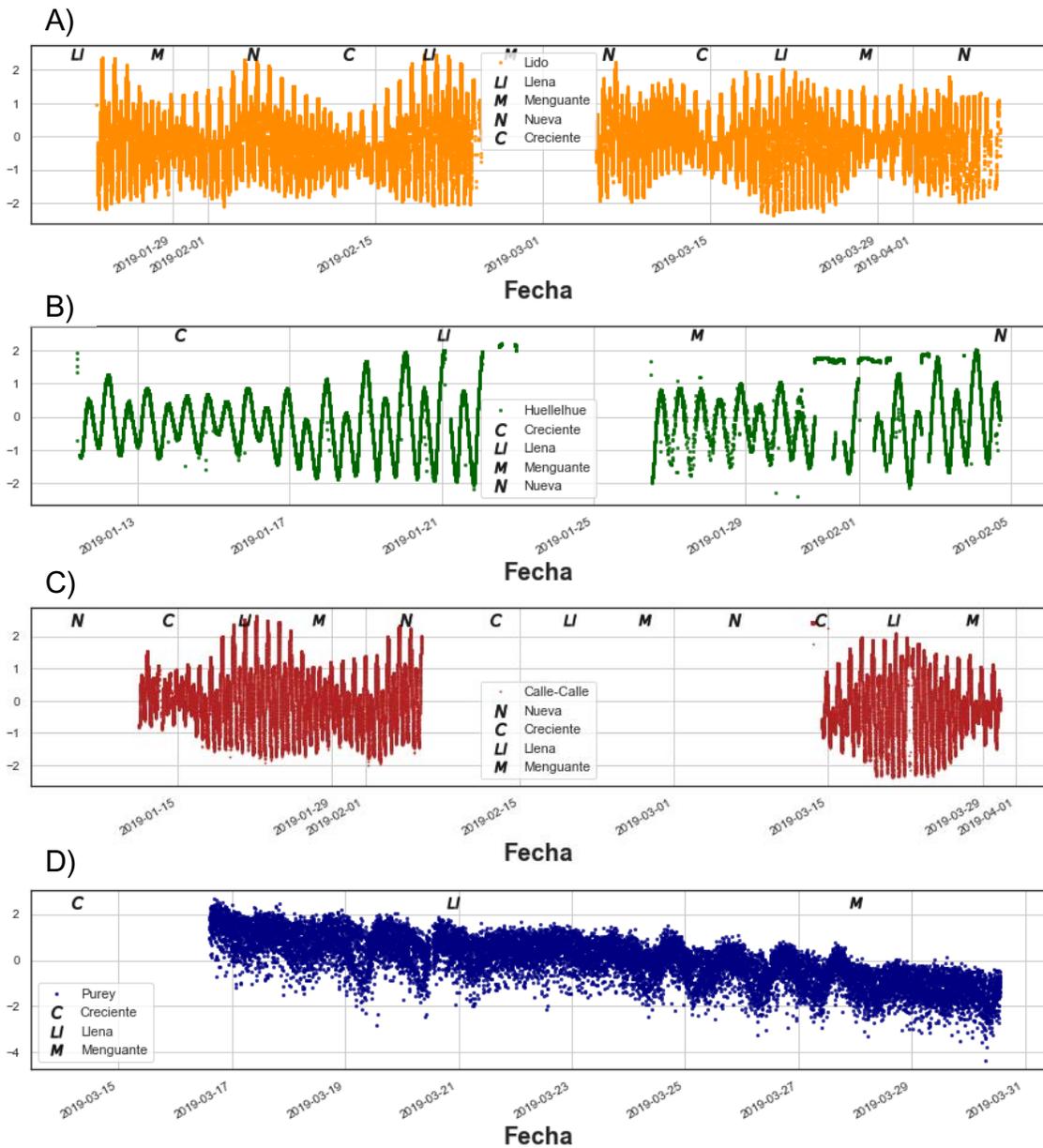


Figura 27. Mareogramas de las estaciones: A) Lido, B) Huellelhue, C) Calle-Calle, D) Purey. Con las fechas de las distintas fases de la Luna.

5. DISCUSIÓN

5.1. Sobre la exactitud de los datos y el datalogger.

La precisión obtenida mediante la prueba de laboratorio señala que el rango con precisión mayor se encuentra de 1 a 3 metros, ya que presenta las desviaciones estándar menores (Figura 19). Aunque las diferencias no son tan significativas a 4 metros ya que la desviación estándar aumenta en centésimas, de 0,07 para un metro a 0,08. Esto indica que no existe un nivel de error significativo para realizar mediciones en rangos de marea micromareal (Garcés-Vargas et al., 2013; Pino et al., 1994).

En la segunda prueba en donde se comparan los datos de la Baliza Lido del proyecto rema (sensor de presión) con los datos del datalogger construido con sensor de ultrasonido que corresponde a la estación Lido (Figura 20). La correlación realizada entre ambas nubes de datos demuestra que ambos datos son muy similares, con una correlación de 0,978 (Figura 21).

El nivel de correlación es significativo ya que en otros trabajos donde se realizan estudios similares, comparando sensores comerciales y de bajo costo (Abraham & Li, 2014; Ali et al., 2016; Fisher & Sui, 2013; Wijnen et al., 2014) son aceptados los sensores de bajo costo ya que coinciden perfectamente con su contraparte comercial.

Existe diferencias entre las amplitudes de los datos normalizados de ambos sensores, tanto para las mareas bajas y altas. Un ejemplo de ello es lo que se observa en la Figura 28, en donde el día 13-02-2019, ambas mareas altas de la baliza R.E.M.A tienen una amplitud mayor en comparación con la estación Lido. En cambio, esta última presenta en la marea más baja del día es menor que R.E.M.A, pero en la siguiente marea baja del día, presenta una amplitud más baja en comparación con su contraparte comercial.

Esta dinámica es interesante ya que durante el día anterior (12-02-2019) la dinámica viene de forma contraria y a partir del día 13 se invierte como se

describe anteriormente y permanece la tendencia a lo largo de las mareas más altas del mes.

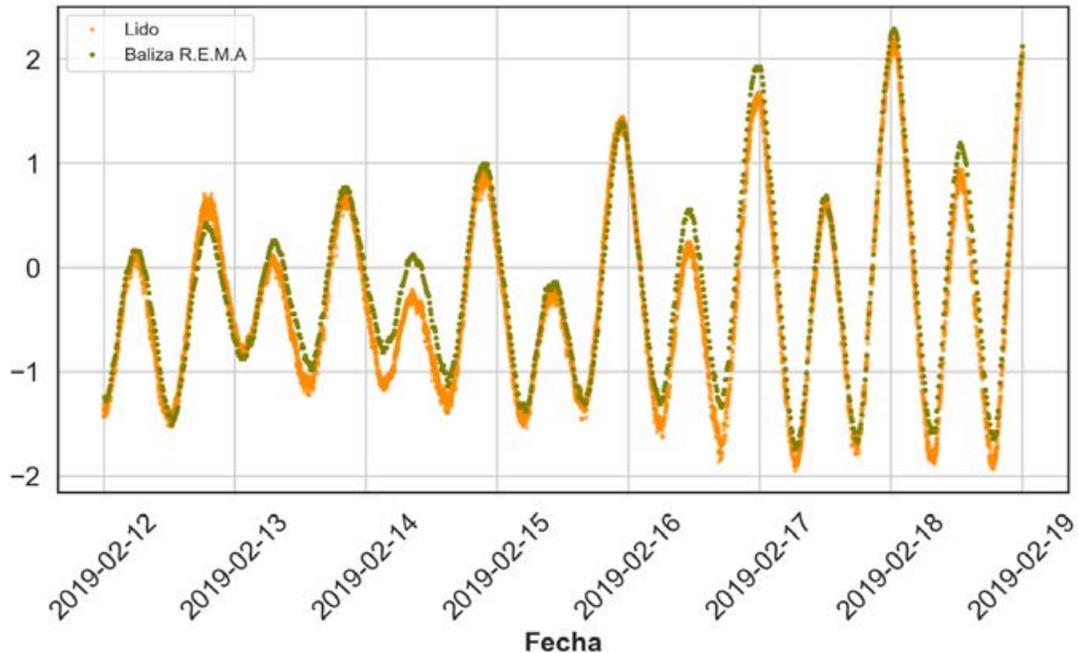


Figura 28. Mareograma de comparación entre los datos normalizados de la estación Lido y la Baliza R.E.M.A durante las fechas 12 de febrero al 19 del 2019.

Este tipo de dinámica debe ser producto de las calibraciones que presentan o no los dos sensores. El sensor de ultrasonido de la estación Lido cuenta con una corrección por temperatura para las mediciones de distancia, en cambio el sensor de presión de la estación R.E.M.A no cuenta con una corrección por salinidad.

Esto último puede ser lo que genera que existan diferencias en las amplitudes de marea. Ya que existen diferencias de presión para las columnas con distintas cantidades de salinidad (Dyer, 2001). Esto se comprueba si comparamos la presión de una columna de agua de 1 metro para el agua dulce y agua de mar. La densidad para el agua dulce es de 1000 kg/m^3 y la del agua salada es de 1029 kg/m^3 . La fórmula de presión consiste en multiplicar la Densidad por la altura (que en nuestro caso es 1 metro de columna de agua) por la gravedad, que es un valor fijo de $9,8 \text{ m/s}^2$. Si reemplazamos las densidades, para el agua dulce obtenemos una presión de 9800 Pa y para la columna de agua salada es de $10084,2 \text{ Pa}$.

Esta diferencia de $284,2 \text{ Pa}$ entre ambas columnas genera que exista una diferencia de unos 2 cm . Esto si es que el sensor de presión usa la fórmula de cálculo de altura a partir de la presión ($h = \frac{p}{\rho g}$), la cual, si mantiene el valor de la densidad fijo que sería para agua dulce, produciría estas diferencias de altura al

comparar los sensores de presión y ultrasonido. Esto puede generar como conclusión que el datalogger de ultra sonido se acerca más a la realidad de cuanto es la fluctuación de la columna de agua ya que no tiene que la complicación en cuanto a la calibración por salinidad.

El datalogger de ultrasonido construido tiene un costo total de unos \$25.600 considerando las pilas y la caja estanca que recubre al datalogger. Este es un valor aproximado ya que muchas de las piezas se encuentran en menor precio si se compran una gran cantidad por internet. En comparación con un sensor de ultrasonido comercial de la marca *sommer messtechnik USH-8* que tienen un valor de US\$ 2360, el datalogger de ultra sonido muestra que es una alternativa de bajo-costó factible.

5.2. Sobre análisis de onda de marea en el estuario fluvial.

En cuanto al análisis de marea realizado a partir de los datos obtenidos con los datalogger de ultrasonido, se presenta que la característica principal de marea es que son semidiurnas a lo largo de 3 estaciones, que sería la Lido, Huellehue y Calle-Calle. Las cuales se encuentran a 16,8 km, 33 km, 46 km respectivamente de la bahía de corral (Tabla 4). Esta característica se mantiene y concuerda con el trabajo realizado en la zona por Pino et al.(1994) el cual presenta el régimen mareal del estuario como semidiurno (Dyer, 1997; H. H. G. (Hubert H. G. . Savenije, 2005).

Por otro lado, el rango promedio para mareas vivas en el estuario del río valdivia es de 0,8 m y con una variación entre 1,48 y 0,53 m (Garcés-Vargas et al., 2013), el cual va disminuyendo el rango a lo largo del que recorre el estuario fluvial (Pino et al., 1994). En nuestro caso encontramos que el rango de mareas vivas en el mes de enero fue de 1,38 m en la estación Lido, y a 46 km en la estación Calle-Calle se obtuvo un rango de 1,34 m. Durante marzo fue de 1,28 m en la estación Lido, y en Calle-Calle se obtuvo un rango de 1,37 m. El promedio de 0,76 m para la estación Lido y 0,74 m para la estación Calle-Calle (Figura 29).

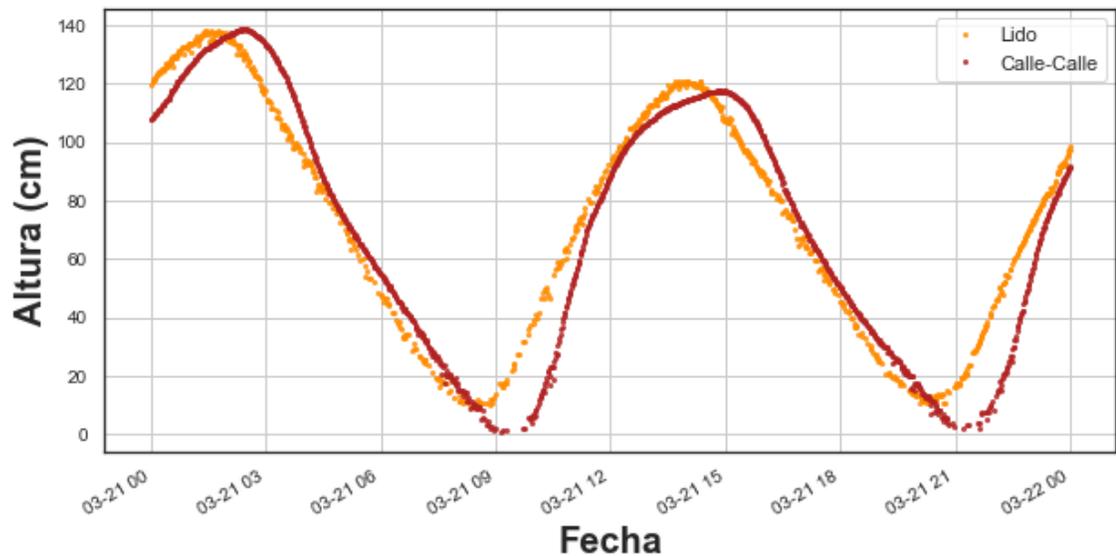


Figura 29. Comparación de los rangos de marea de la baliza Lido y Calle-Calle, para el 21-03-2019. Nótese que ambas amplitudes se mantienen en esa sección, que es de aproximadamente 30 km.

Este rango de marea se sigue manteniendo aproximadamente a lo largo de los 46 km en que se detectaron fluctuaciones de marea. Si bien en el estudio realizado por Pino et al. (1994) se señala que es un estuario hiposíncrono y que la amplitud de marea se reduce hacia el interior. Es interesante notar que el comportamiento se mantiene constante en esta cantidad de kilómetros. Esto podría ser producto de que el canal es relativamente plano y que los cambios de pendiente que se presenta a los 52 km aproximadamente, produciendo aumento en la velocidad del río, lo cual inhibe la influencia de la marea (Dyer, 1997; Godin, 1999; H. H. G. (Hubert H. G. . Savenije, 2005). Además se confirma que el tipo de onda que se percibe en esta sección del estuario, es de carácter progresiva, típico de los estuarios dominados por el caudal del río (Bolla Pittaluga et al., 2015; Garcés-Vargas et al., 2013; Garel & Cai, 2018; Steacy Dopp Hicks, 2006; H. H. G. (Hubert H. G. . Savenije, 2005).

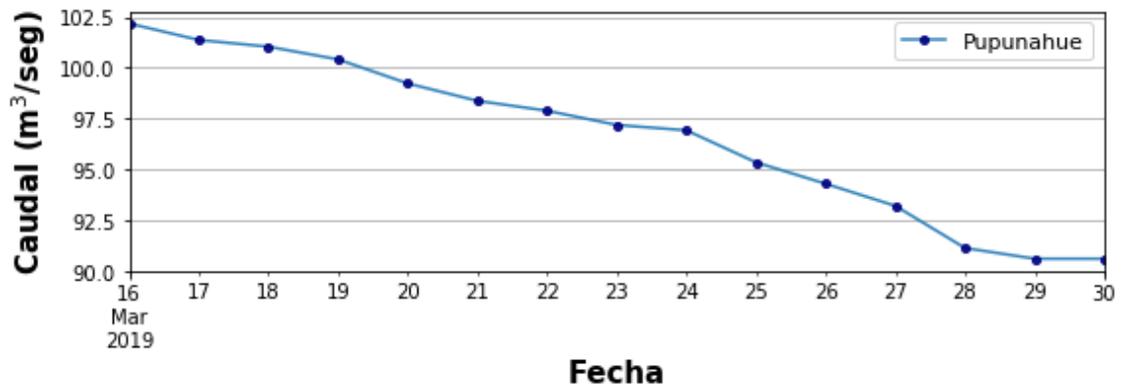


Figura 30. Caudal medio diario de la estación Pupunahue de la DGA durante los días de muestreo de la estación Purey.

En cuanto a los datos obtenidos en la estación Purey luego de usar el modelo estadístico “*seasonal decompose*”, la tendencia de la Figura 23, correspondería a la disminución del caudal de esos días (Figura 30). Además, al comparar los datos residuales del modelo con los datos de estaciones aguas abajo (Figura 31), muestran fluctuaciones diarias en la estación Purey a 62 km de distancia de la bahía de Corral, teniendo fluctuaciones de un rango de 6 cm.

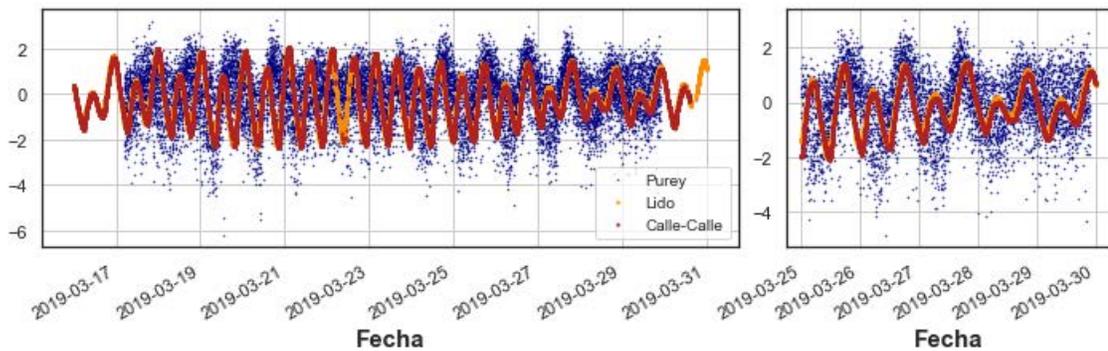


Figura 31. Gráfico en donde se observan los datos normalizados de las estaciones Lido, Calle-Calle y Purey. En el gráfico de la derecha es un zoom a los datos de los días 25-29 de marzo.

Estos datos se contrastan con los obtenidos por la DGA que asumen que el límite efectivo de la marea es hasta la zona de Pishuenco (unos 38 km desde la bahía) (Figura 16) 39°48' lat, 73°06' lon. (Schwember et al., 1996), con lo cual se podría asumir que el límite ha cambiado condicionado por el caudal, o que cuando se determinó el límite efectivo de marea se utilizó un rango mínimo distinto de fluctuaciones para asumir el límite efectivo de marea. Aunque para comprobar mejor estas características, es necesario obtener más días de datos.

5.3. Sobre la velocidad de la onda de marea.

Para el cálculo de velocidad que se realizó fue necesario considerar dos factores claves para los resultados obtenidos. Uno es que producto del ruido ocasionado por la gran cantidad de datos tomados de marea (cada 1 minuto) que no se pudo filtrar anteriormente con el filtro *de mediana móvil*.

Lo segundo es que, a causa de lo descrito anteriormente, la función que se utilizó para seleccionar las horas de ocurrencia por día de marea más alta y baja no pudo hacer una buena selección producto que confundía algún dato anómalo que ocurría mucho antes del real, o que como el día 27-01, ocurriera que las dos mareas altas del día fueron similares o que tuvieran poca diferencia de altura entre ambas, ocasionando que se seleccionara una hora de ocurrencia de marea alta distinta a la trabajada. Por ello los días 27-01-2019, 04-02-2019 y 17-03-

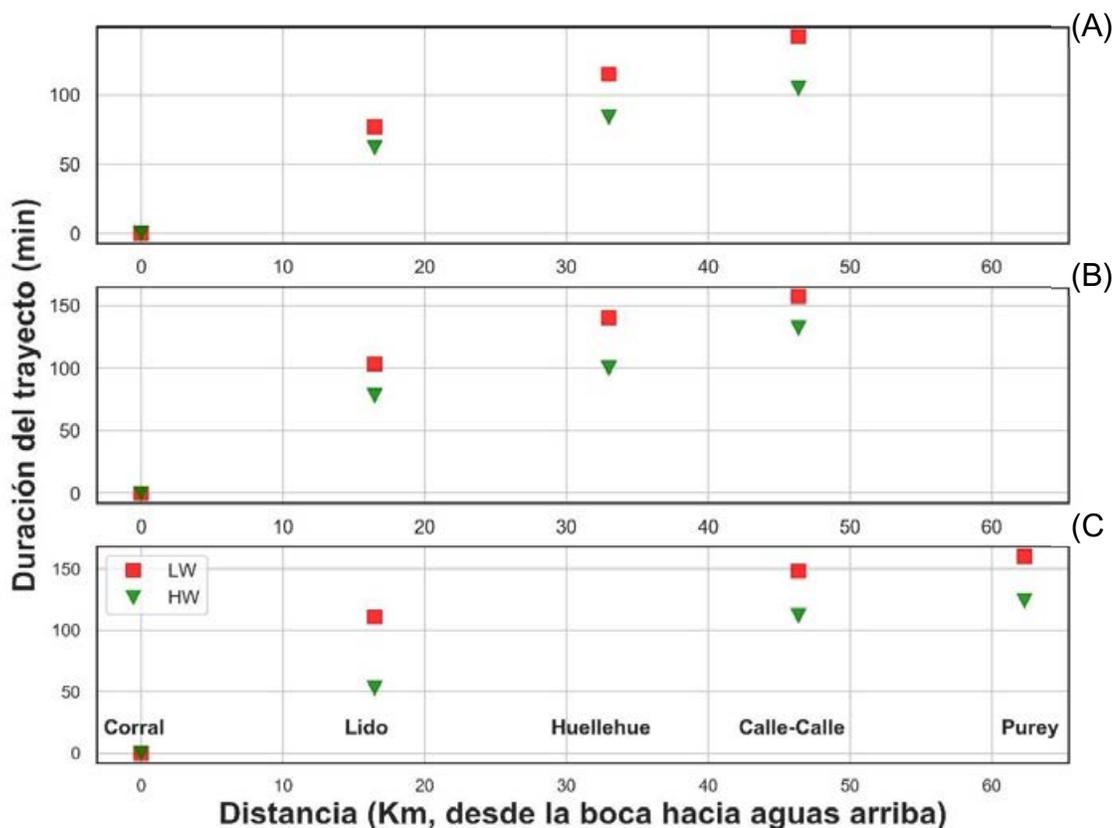


Figura 32. Gráfico que muestra el tiempo que demora en recorrer la marea a lo largo del estuario para la marea alta (HW) y la baja (LW). A) corresponde a el día 27-01. B) corresponde a el día 04-02 y C) al 17-03.

2019, se tuvo que realizar una corrección y selección manual de las horas de ocurrencia y se cambiaron para poder analizar la propagación de la marea.

La velocidad de propagación de la onda de marea nos muestra como primera instancia que en la marea más alta viaja más rápido que la baja (Figura 32, Tabla 5) teniendo un carácter progresivo, además de tener un aumento de la velocidad en el mes de marzo donde ocurre el menor caudal del río.

Asimismo, existe una diferencia entre los intervalos de tiempo en que ocurren la marea alta y baja del mismo lugar. Como en el caso del 17-03, donde la estación Lido tiene la mayor diferencia de tiempo entre la alta y baja marea, pero en las estaciones de más arriba como la Calle-Calle y Purey tienen una diferencia similar.

Es interesante observar que la velocidad en las estaciones aguas arriba son más rápidas que las de aguas abajo. Algo similar ocurre en distintos estuarios (Cai et al., 2012; Horrevoets et al., 2004) como el estuario *Modaomen*, donde las velocidades ocurren dentro del rango de 7 a 2 m/s, ocurriendo velocidades alrededor de 6 m/s a 20 km de la boca al igual que en la estación Huellelhue (Tabla 5).

Estas características descritas de la propagación de la onda de marea están condicionadas por el flujo (Horrevoets et al., 2004; H. H. G. (Hubert H. G. . Savenije, 2005), equilibrio entre la fricción y el flujo, la convergencia del canal, la fase lunar y el caudal del río (Dyer, 2001; Guo et al., 2015; Nathaniel, 2002; Open University. Oceanography Course Team., 1999; H. H. G. Savenije & Savenije, 2005). Siendo de gran importancia el estudiar los cambios del canal como por el dragado (Cai et al., 2012) o la sedimentación (Boon & Byrne, 1981; Dronkers, 1986; Lu et al., 2015) ya que esto ocasiona cambios en el comportamiento de la marea en el estuario.

5.4. Sobre el tiempo de desfase por día.

En cuanto al tiempo de desfase de la marea por día, producto de los problemas al identificar las horas de ocurrencia por día de la marea, hubo efectos negativos en el análisis del desfase. No obstante, de acuerdo con los resultados obtenidos por el programa existe una tendencia a que el desfase sea progresivo a lo largo de los días.

Este desfase identificado además muestra que existen días en los cuales el desfase sería entre 40 a 50 minutos aproximadamente para la marea alta y para la baja entre 20 a 30 min, aunque fue complejo identificar una tendencia clara. Se debería realizar otro tipo de identificador que pueda diferenciar otro tipo de

factores que influyan en esta dinámica como el caudal del río (Horrevoets et al., 2004; Jay & Kukulka, 2003; Lanzoni & Seminara, 1998; Wells, 1995).

5.5. Sobre la relación entre la altura de la marea y la fase Lunar.

De la evaluación de la relación de la marea con la fase lunar, muestra que existe una respuesta, donde se destaca la respuesta a las fases lunares, produciendo mareas de sicigia para las fases Llena y Nueva, y mareas muertas para los días de Luna Creciente y Menguante. Dicha respuesta se genera en todas las estaciones a excepción de la estación Purey, en donde la respuesta no se observa tan claramente debido a que existe mucho ruido y no existen datos de todo un mes como para poder analizar la respuesta a cada una de las fases lunares.

Además se puede observar un claro comportamiento de mareas semidiurnas, con un periodo aproximado de 12,3 hrs (H. H. G. Savenije & Savenije, 2005) concordando con lo señalado por Pino et al. (1994) y Garcés et al. (2013).

6. CONCLUSIÓN

El presente estudio tuvo como objetivo demostrar que datalogger con sensor de ultrasonido de la plataforma Arduino, es un sistema viable y de bajo costo para el análisis de cambios de nivel del agua, siendo testado en el Estuario Calle-Calle. En resumen, el estudio se divide en dos aspectos generales. Uno el análisis de la marea en el estuario Calle-Calle, y el otro la factibilidad del datalogger de ultrasonido como alternativa de bajo costo para monitoreo.

En cuanto al análisis de la onda de marea del estuario Calle-Calle, se concluye que el carácter semidiurno se presenta claramente desde la bahía de Corral hasta los 46 km aguas arriba, con un rango de marea alta de 1,40 m aproximadamente en este punto. Además, el tipo de onda es de carácter progresiva y es afectada principalmente por el caudal. Existen otros factores que pueden afectar como la rugosidad del cauce, pero es necesario otro tipo de estudios. No obstante, la disminución se presentaría después de los 52 km, ya que entre la estación Lido y la Calle-Calle (unos 30 km) se mantiene el rango de marea y a los 52 km se presentaría el cambio de pendiente. La marea alta llega mucho más alta que la marea baja, las velocidades calculadas, muestran que en la zona más alta del estuario se presentan las mayores velocidades.

Futuros estudios relacionados con el análisis de armónicos, mediciones de batimetría, rugosidad, medición de flujos, en conjunto con modelos matemáticos son necesarios para estudiar de mejor forma el análisis de mareas en estuarios fluviales y sus posibles cambios en la dinámica a causa de factores como la sedimentación y dragado del río.

Los resultados de la exactitud de los datos ya sea en la prueba de laboratorio y la comparación con los datos de un sensor comercial, demuestran que el datalogger de ultrasonido Arduino es un instrumento que se puede utilizar para detectar mareas en estuarios micromareales.

Otras de las características que presentó el datalogger de ultrasonido fue que tuvo una autonomía de 34 días aproximados, grabando datos cada 1 minuto con 4 pilas AA de 1.2V con una capacidad de 2700 mAh, almacenando unos 31600 datos. Esto es una ventaja considerable en cuanto al tiempo de autonomía del dispositivo. También como El datalogger de ultrasonido fue construido en base a la plataforma Arduino, esta posee una amplia gama de sensores que se pueden utilizar, siendo muy personalizable para distintos tipos de necesidades futuras. Asimismo, se le suma que es de código abierto y una opción económica que

permite tener una mejor resolución espacial al construir más dataloggers y abre paso a una amplia comunidad de desarrolladores que ayudan en los proyectos.

Los desafíos que presenta principalmente el datalogger es la forma y el sitio de instalación, ya que son factores que condicionan la calidad de los datos, además de la seguridad para que no sean quitados del lugar de monitoreo. La transmisión de datos es el próximo paso que se desea realizar para poder construir sistemas más grandes y robustos de monitoreo que puedan ayudar tanto a la comunidad científica y social.

Se espera que este trabajo sirva como una demostración que con pocos recursos se puede realizar sistemas de monitoreo ambiental que van a ayudar a un mejor manejo del territorio, conque, al obtener más datos con una distribución espacial amplia, es posible administrar el territorio.

7. REFERENCIAS.

- Abraham, S., & Li, X. (2014). A Cost-effective Wireless Sensor Network System for Indoor Air Quality Monitoring Applications. *Procedia Computer Science*, 34, 165–171. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2014.07.090>
- Ali, A. S., Zanzinger, Z., Debose, D., & Stephens, B. (2016). Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. *Building and Environment*, 100, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.010>
- Allouhi, A., El Fouih, Y., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraouli, Y., & Mourad, Y. (2015). Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends. *Journal of Cleaner Production*, 109, 118–130. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.139>
- Anweiler, S., & Piwowarski, D. (2017). Multicopter platform prototype for environmental monitoring. *Journal of Cleaner Production*, 155, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.132>
- Armenio, E., Meftah, M. Ben, Bruno, M. F., Padova, D. De, Pascalis, F. De, Serio, F. De, ... Monti, P. (2016). Semi enclosed basin monitoring and analysis of meteo, wave, tide and current data: Sea monitoring. In *2016 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/EESMS.2016.7504835>
- Artiola, J. F., & Warrick, A. W. (2004). 2 - SAMPLING AND DATA QUALITY OBJECTIVES FOR ENVIRONMENTAL MONITORING. In Janick F Artiola, I. L. Pepper, & M. L. B. T.-E. M. and C. Brusseau (Eds.) (pp. 11–27). Burlington: Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012064477-3/50004-7>
- Balmforth, N. J., Llewellyn-Smith, S., Hendershott, M., & Garrett, C. (2005). *2004 program of study: tides*. Woods Hole, MA: Woods Hole Oceanographic Institution. <https://doi.org/10.1575/1912/98>
- Beddows, P. A., & Mallon, E. K. (2018). Cave pearl data logger: A flexible arduino-based logging platform for long-term monitoring in harsh environments. *Sensors (Switzerland)*, 18(2). <https://doi.org/10.3390/s18020530>
- Bertrán, C., Arenas, J., & Parra, O. (2001). Macrofauna del curso inferior y estuario del río Biobío (Chile): cambios asociados a variabilidad estacional del caudal hídrico. *Revista Chilena de Historia Natural*, 74(2), 331–340. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2001000200010>
- Bird, E. C. F. (Eric C. F. (2008). *Coastal geomorphology: an introduction*. Wiley. Retrieved from <https://www.wiley.com/en-us/Coastal+Geomorphology%3A+An+Introduction%2C+2nd+Edition-p->

9780470517291

- Bitella, G., Rossi, R., Bochicchio, R., Perniola, M., & Amato, M. (2014). A novel low-cost open-hardware platform for monitoring soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. *Sensors (Switzerland)*, *14*(10), 19639–19659. <https://doi.org/10.3390/s141019639>
- Bolla Pittaluga, M., Tambroni, N., Canestrelli, A., Slingerland, R., Lanzoni, S., & Seminara, G. (2015). Where river and tide meet: The morphodynamic equilibrium of alluvial estuaries. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *120*(1), 75–94. <https://doi.org/10.1002/2014JF003233>
- Boon, J. D., & Byrne, R. J. (1981). On basin hyposmetry and the morphodynamic response of coastal inlet systems. *Marine Geology*, *40*(1–2), 27–48. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(81\)90041-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(81)90041-4)
- Brownlee, J. (2016). How to Check if Time Series Data is Stationary with Python. Retrieved May 16, 2019, from <https://machinelearningmastery.com/time-series-data-stationary-python/>
- Buschman, F. A., Hoitink, A. J. F., van der Vegt, M., & Hoekstra, P. (2009). Subtidal water level variation controlled by river flow and tides. *Water Resources Research*, *45*(10). <https://doi.org/10.1029/2009WR008167>
- Cady, F. (2017). Time Series Analysis. In *The Data Science Handbook* (pp. 243–260). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119092919.ch17>
- Cai, H., Savenije, H. H. G., Yang, Q., Ou, S., & Lei, Y. (2012). Influence of River Discharge and Dredging on Tidal Wave Propagation: Modaomen Estuary Case. *Journal of Hydraulic Engineering*, *138*(10), 885–896. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000594](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000594)
- Carpenter, S. R., Stanley, E. H., & Vander Zanden, M. J. (2011). State of the World's Freshwater Ecosystems: Physical, Chemical, and Biological Changes. *Annual Review of Environment and Resources*, *36*(1), 75–99. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-021810-094524>
- Cea, L., & French, J. R. (2012). Bathymetric error estimation for the calibration and validation of estuarine hydrodynamic models. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *100*, 124–132. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2012.01.004>
- Chapman, D. V., Bradley, C., Gettel, G. M., Hatvani, I. G., Hein, T., Kovács, J., ... Várbió, G. (2016). Developments in water quality monitoring and management in large river catchments using the Danube River as an example. *Environmental Science & Policy*, *64*, 141–154. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2016.06.015>

- Cheney, R. E. (2001). Satellite Altimetry. In *Encyclopedia of Ocean Sciences* (pp. 58–64). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00340-4>
- Corbellini, S., Di Francia, E., Grassini, S., Iannucci, L., Lombardo, L., & Parvis, M. (2018). Cloud based sensor network for environmental monitoring. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 118(September 2017), 354–361. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.049>
- Dalrymple, R., Zaitlin, B., & Ron Boyd, R. (1992). Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Research*, 62.
- DGA. (2004). *Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua segun objetivos de calidad - Cuenca del Rio Valdivia*.
- Di Gennaro, S. F., Matese, A., Mancin, M., Primicerio, J., & Palliotti, A. (2014). An open-source and low-cost monitoring system for precision enology. *Sensors (Switzerland)*, 14(12), 23388–23397. <https://doi.org/10.3390/s141223388>
- Dronkers, J. (1986). Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20(2–3), 117–131. [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(86\)90036-0](https://doi.org/10.1016/0077-7579(86)90036-0)
- Dyer, K. R. (1997). *Estuaries : a physical introduction*. John Wiley. Retrieved from <https://www.wiley.com/en-us/Estuaries%3A+A+Physical+Introduction%2C+2nd+Edition-p-9780471974710>
- Dyer, K. R. (2001). Estuarine Circulation. In J. H. B. T.-E. of O. S. (Second E. Steele (Ed.) (pp. 299–305). Oxford: Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00077-1>
- Fisher, D. K., & Gould, P. J. (2012). Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research. *Modern Instrumentation*, 01(02), 8–20. <https://doi.org/10.4236/mi.2012.12002>
- Fisher, D. K., & Sui, R. (2013). An inexpensive open-source ultrasonic sensing system for monitoring liquid levels. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(4), 328–334.
- Flinchem, E. P., & Jay, D. A. (2000). An Introduction to Wavelet Transform Tidal Analysis Methods. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51(2), 177–200. <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0586>
- Fossatia, M., Santoroa, P., Mosqueraa, R., Martíneza, C., Ghiardoa, F., Ezzattib, P., ... Piedra-Cuevai, I. (2014). Dinámica de flujo, del campo salino y de los sedimentos finos en el Río de la Plata. *Ribagua*, 1(1), 48–63.

[https://doi.org/10.1016/S2386-3781\(15\)30007-4](https://doi.org/10.1016/S2386-3781(15)30007-4)

- Fraile Jurado, P., & Fernández Díaz, M. (2016). Escenarios de subida del nivel medio del mar en los mareógrafos de las costas peninsulares de España en el año 2100. *Estudios Geográficos*, 77(280), 57–79. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201603>
- Friedrichs, C. T., & Aubrey, D. G. (1988). Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27(5), 521–545. [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(88\)90082-0](https://doi.org/10.1016/0272-7714(88)90082-0)
- Froneman, P. W. (2004). Food web dynamics in a temperate temporarily open/closed estuary (South Africa). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59(1), 87–95. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2003.08.003>
- Funahashi, T., Kasai, A., Ueno, M., & Yamashita, Y. (2013). Effects of Short Time Variation in the River Discharge on the Salt Wedge Intrusion in the Yura Estuary, a Micro Tidal Estuary, Japan. *Journal of Water Resource and Protection*, 05(03), 343–348. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.53A035>
- Gandra, M., Seabra, R., & Lima, F. P. (2015). A low-cost, versatile data logging system for ecological applications. *Limnology and Oceanography: Methods*, 13(3), 115–126. <https://doi.org/10.1002/lom3.10012>
- Garcés-Vargas, J., Ruiz, M., Pardo, L. M., Nuñez, S., & Pérez-Santos, I. (2013). Hydrographic features of Valdivia river estuary south-central Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 41(1), 113–125. <https://doi.org/103856/vol41-issue1-fulltext-9>
- Garel, E., & Cai, H. (2018). Effects of Tidal-Forcing Variations on Tidal Properties Along a Narrow Convergent Estuary. *Estuaries and Coasts*, 41(7), 1924–1942. <https://doi.org/10.1007/s12237-018-0410-y>
- Garrett, C., & Cummins, P. (2008). Limits to tidal current power. *Renewable Energy*, 33(11), 2485–2490. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.009>
- Gimeno, P., Severyns, J., Acuña, V., Comas, J., & Corominas, L. (2018). Balancing environmental quality standards and infrastructure upgrade costs for the reduction of microcontaminant loads in rivers. *Water Research*, 143, 632–641. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.002>
- Godin, G. (1985). Modification of River Tides by the Discharge. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 111(2), 257–274. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:2\(257\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:2(257))
- Godin, G. (1999). The Propagation of Tides up Rivers With Special Considerations on the Upper Saint Lawrence River. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48(3), 307–324. <https://doi.org/10.1006/ecss.1998.0422>

- Gómez Díaz, M. A. (2009). *Caracterización del régimen de mareas en la Bahía de Puerto Cisnes*. Universidad Austral de Chile.
- Gomis, D., Tsimplis, M., Marcos, M., Fenoglio-Marc, L., Pérez, B., Raicich, F., ... Monserrat, S. (2012). Mediterranean Sea-Level Variability and Trends. In *The Climate of the Mediterranean Region* (pp. 257–299). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416042-2.00004-5>
- Guerriero, L., Guerriero, G., Grelle, G., Guadagno, F. M., & Revellino, P. (2017). Brief Communication: A low-cost Arduino®-based wire extensometer for earth flow monitoring. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(6), 881–885. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-881-2017>
- Guo, L., van der Wegen, M., Jay, D. A., Matte, P., Wang, Z. B., Roelvink, D., & He, Q. (2015). River-tide dynamics: Exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Yangtze River estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(5), 3499–3521. <https://doi.org/10.1002/2014JC010491>
- Habit, E., & Parra, O. (2012). Fundamento y aproximación Metodológica del Estudio de peces del Río San Pedro. *Gayana (Concepción)*, 76, 01–09. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382012000100001>
- Haroon, D. (2017). Time Series. In *Python Machine Learning Case Studies* (pp. 95–128). Berkeley, CA: Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2823-4_3
- Hemmelder, S., Marra, W., Markies, H., & De Jong, S. M. (2018). Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery – A case study of the river Buëch, Hautes-Alpes, France. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 428–437. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2018.07.016>
- Heredía Carrasco, J. M. H. (2008). *Monitoreo Y Diagnóstico De Las Aguas Superficiales Asociadas a La Cuenca Hidrográfica Del Río Valdivia*. Valdivia.
- Hernandez-Suarez, J. S., Nejadhashemi, A. P., Kropp, I. M., Abouali, M., Zhang, Z., & Deb, K. (2018). Evaluation of the impacts of hydrologic model calibration methods on predictability of ecologically-relevant hydrologic indices. *Journal of Hydrology*, 564, 758–772. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.056>
- Hicks, S. D., Aufdenkampe, A. K., Montgomery, D. S., Damiano, S. G., & Brooks, H. P. (2015). A New Arduino Datalogger Board for Simple, Low Cost Environmental Monitoring and the EnviroDIY Web Community. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, Abstract Id. H23G-1658*. Retrieved from <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015AGUFM.H23G1658H>

- Hicks, Steacy Dopp. (2006). Understanding tides. *NOAA: Centre of Operational Oceanography*, 83.
- Hoitink, A. J. F., & Jay, D. A. (2016). Tidal river dynamics: Implications for deltas. *Reviews of Geophysics*, 54(1), 240–272. <https://doi.org/10.1002/2015RG000507>
- Horrevoets, A. C., Savenije, H. H. G., Schuurman, J. N., & Graas, S. (2004). The influence of river discharge on tidal damping in alluvial estuaries. *Journal of Hydrology*, 294(4), 213–228. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.02.012>
- Hund, S. V., Johnson, M. S., & Keddie, T. (2016). Developing a Hydrologic Monitoring Network in Data-Scarce Regions Using Open-Source Arduino Dataloggers. *Agricultural & Environmental Letters*, 1–5. <https://doi.org/10.2134/ael2016.02.0011>
- Hut, R. (2013). *New Observational Tools and Datasources for Hydrology*. Technische Universiteit Delft. <https://doi.org/10.4233/uuid:48d09fb4-4aba-4161-852d-adf0be352227>
- Inicio. (n.d.). Retrieved August 21, 2018, from <http://www.inercochile.com/>
- Iyekepolo, U. B., Idachaba, F. E., & Popoola, S. I. (2018). Early Flood Detection and Monitoring System Based on Wireless Sensor Network. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 1381–1394). Washington DC, USA. Retrieved from <http://ieomsociety.org/dc2018/papers/376.pdf>
- Jay, D. A., & Flinchem, E. P. (1997). Interaction of fluctuating river flow with a barotropic tide: A demonstration of wavelet tidal analysis methods. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C3), 5705–5720. <https://doi.org/10.1029/96JC00496>
- Jay, D. A., & Kukulka, T. (2003). Revising the paradigm of tidal analysis ? the uses of non-stationary data. *Ocean Dynamics*, 53(3), 110–125. <https://doi.org/10.1007/s10236-003-0042-y>
- Jo, B., & Baloch, Z. (2017). Internet of things-based arduino intelligent monitoring and cluster analysis of seasonal variation in physicochemical parameters of Jungnangcheon, an urban stream. *Water (Switzerland)*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/w9030220>
- Kisi, O., & Cimen, M. (2011). A wavelet-support vector machine conjunction model for monthly streamflow forecasting. *Journal of Hydrology - J HYDROL* (Vol. 399). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.041>
- Knoppers, B. A., Kjerfve, B. E., Perillo, G., Piccolo, C., & Piño-Quivera, M. (1999). *Estuaries of South America: their geomorphology and dynamics*. *Estuaries*

of South America. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-60131-6>

- Koenka, I. J., Sáiz, J., & Hauser, P. C. (2014). Instrumentino: An open-source modular Python framework for controlling Arduino based experimental instruments. *Computer Physics Communications*, 185(10), 2724–2729. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2014.06.007>
- Lanzoni, S., & Seminara, G. (1998). On tide Propagation in convergent estuaries. *Journal of Geophysical Research*, 103, 30793–30812.
- Legendre, L., Rassoulzadegan, F., & Michaud, J. (1999). Identifying the dominant process (physical versus biological) in pelagic marine ecosystems from field estimates of chlorophyll and phytoplankton production. *Journal of Plankton Research*, 21(9), 1643–1658. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1093/plankt/21.9.1643>
- Lockridge, G., Dzwonkowski, B., Nelson, R., & Powers, S. (2016). Development of a Low-Cost Arduino-Based Sonde for Coastal Applications. *Sensors*, 16(4), 528. <https://doi.org/10.3390/s16040528>
- Loitzenbauer, E., & Bulhões Mendes, C. A. (2012). Salinity dynamics as a tool for water resources management in coastal zones: An application in the Tramandaí River basin, southern Brazil. *Ocean and Coastal Management*, 55, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.10.011>
- Lopez, J. C. B., & Villaruz, H. M. (2015). Low-cost weather monitoring system with online logging and data visualization. In *2015 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HNICEM.2015.7393170>
- Lu, S., Tong, C., Lee, D.-Y., Zheng, J., Shen, J., Zhang, W., & Yan, Y. (2015). Propagation of tidal waves up in Yangtze Estuary during the dry season. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(9), 6445–6473. <https://doi.org/10.1002/2014JC010414>
- Martínez, C., & Cortez, C. (2007). Características hidrográficas y sedimentológicas en el estuario del río Aconcagua, Chile Central. *Revista de Geografía Norte Grande*, (37), 63–74. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022007000100005>
- Moftakhari, H. R., Jay, D. A., Talke, S. A., Kukulka, T., & Bromirski, P. D. (2013). A novel approach to flow estimation in tidal rivers. *Water Resources Research*, 49(8), 4817–4832. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20363>
- Muñoz-Pedrerros, A. (2003). *Guía de los Humedales del río Cruces*.
- Nathaniel, B. (2002). Tides and Tidal Current. *The American Practical Navigator*,

896.

- Nawi - Monitoreo Ambiental - Chile. (n.d.). Retrieved August 21, 2018, from <https://www.nawi.cl/>
- Oates, M. J., Ruiz-Canales, A., Ferrández-Villena, M., & López, A. F. (2017). A low cost sunlight analyser and data logger measuring radiation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143(May), 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.024>
- Open University. Oceanography Course Team. (1999). *Waves, Tides and Shallow-Water Processes*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-036372-1.X5000-4>
- Pardo, L. M., Mora-Vásquez, P., & Garcés-Vargas, J. (2012). Asentamiento diario de megalopas de jaibas del género *Cancer* en un estuario micromareal. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40(1), 142–152. <https://doi.org/10.4067/s0718-560x2012000100014>
- Parker, A., & Baird, A. (1982). The development of an ultrasonic tide gauge. In *OCEANS 82* (pp. 296–301). <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1982.1151744>
- Paulsen, R. J., Smith, C. F., O'Rourke, D., & Wong, T.-F. (2005). Development and Evaluation of an Ultrasonic Ground Water Seepage Meter. *Groundwater*, 39(6), 904–911. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2001.tb02478.x>
- Peng, M., Xie, L., & Pietrafesa, L. J. (2004). A numerical study of storm surge and inundation in the Croatan–Albemarle–Pamlico Estuary System. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59(1), 121–137. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2003.07.010>
- Perillo, G. M. E. (1995). Chapter 2 Definitions and Geomorphologic Classifications of Estuaries. In *Developments in Sedimentology* (Vol. 53, pp. 17–47). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(05\)80022-6](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(05)80022-6)
- Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2000). Geomorfología de los estuarios : una visión diferente. *Revista Universitaria de Geografía*, 9, 95–107.
- Pino, M., Perillo, G. M. E., & Santamarina, P. (1994). Residual Fluxes in a Cross-section of the Valdivia River Estuary, Chile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38(5), 491–505. <https://doi.org/10.1006/ecss.1994.1034>
- Quiénes Somos – REMA. (n.d.). Retrieved September 17, 2018, from <https://rema.uach.cl/quienes-somos/>
- Rohrer, M., Salzmann, N., Stoffel, M., & Kulkarni, A. V. (2013). Missing (in-situ) snow cover data hampers climate change and runoff studies in the Greater Himalayas. *Science of the Total Environment*, 468–469, S60–S70. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.056>

- Satake, K. (2002). Tsunamis. *International Geophysics*, 81, 437–451. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(02\)80231-5](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80231-5)
- Savenije, H. H. G. (Hubert H. G. . (2005). *Salinity and tides in alluvial estuaries*. Elsevier.
- Savenije, H. H. G., & Savenije, H. H. G. (2005). Tide and estuary shape. In *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries* (pp. 23–68). Elsevier Science Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-044452107-1/50003-4>
- Schwember, H., Cerda, C., & Egaña, J. M. (1996). *Cuenca del río Valdivia: Algunos Aportes para su Conocimiento*.
- Simier, M., Blanc, L., Aliaume, C., Diouf, P. ., & Albaret, J. . (2004). Spatial and temporal structure of fish assemblages in an “inverse estuary”, the Sine Saloum system (Senegal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59(1), 69–86. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2003.08.002>
- Solari, M. E., Cueto, C., Hernández, F., Rojas, J. F., & Camus, P. (2011). Procesos territoriales y bosques en la cuenca del río Valdivia (siglos XVI–XIX). *Revista de Geografía Norte Grande*, (49), 45–62. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022011000200004>
- Soler-Llorens, J. L., Galiana-Merino, J. J., Giner-Caturla, J., Jauregui-Eslava, P., Rosa-Cintas, S., & Rosa-Herranz, J. (2016). Development and programming of Geophonino: A low cost Arduino-based seismic recorder for vertical geophones. *Computers and Geosciences*, 94, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.05.014>
- Stewart, R. H. (2008). *Introduction To Physical Oceanography*. (T. A. U. Department of Oceanography, Ed.). Retrieved from https://ocean.tamu.edu/academics/resources/ocean-world/resources/Stewart_PObook.pdf
- Syvitski, J. P. M., Peckham, S. D., Hilberman, R., & Mulder, T. (2003). Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective. *Sedimentary Geology*, 162, 5–24. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(03\)00232-X](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(03)00232-X)
- Tabla de mareas 2019 de Valdivia (Bahía de Corral), XIV Región de Los Ríos para la pesca. (2019). Retrieved July 8, 2019, from <https://tablademareas.com/cl/los-rios/valdivia-bahia-de-corrall>
- Talley, L. D., Pickard, G. L., Emery, W. J., & Swift, J. H. (2011a). Chapter 8 - Gravity Waves, Tides, and Coastal Oceanography. In L. D. Talley, G. L. Pickard, W. J. Emery, & J. H. Swift (Eds.), *Descriptive Physical Oceanography (Sixth Edition)* (Sixth Edit, pp. 223–244). Boston: Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4552-2.10008-3>

- Talley, L. D., Pickard, G. L., Emery, W. J., & Swift, J. H. (Oceanographer). (2011b). *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Boston: Academic Press.
- Thomas, L. P., & Marino, B. M. (2016). Estimación del caudal a partir de la evolución del nivel del agua en un estuario con onda de marea estacionaria. *RIBAGUA - Revista Iberoamericana Del Agua*, 3(1), 8–17. <https://doi.org/10.1016/J.RIBA.2016.01.001>
- Thomasson, K. (1963). Plankton studies in North Patagonia with notes on terrestrial vegetation. *Acta Phytogeographica Suecica*, 47, 1–141.
- Valle-Levinson, A. (2010). Definition and classification of estuaries. In A. Valle-Levinson (Ed.), *Contemporary Issues in Estuarine Physics* (pp. 1–11). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511676567.002>
- Vennell, R. (2011). Estimating the power potential of tidal currents and the impact of power extraction on flow speeds. *Renewable Energy*, 36(12), 3558–3565. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.011>
- Wells, J. T. (1995). Chapter 6 Tide-Dominated Estuaries and Tidal Rivers. In *Developments in Sedimentology* (Vol. 53, pp. 179–205). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(05\)80026-3](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(05)80026-3)
- Wickert, A. D. (2014). The ALog: Inexpensive, Open-Source, Automated Data Collection in the Field. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 95(2), 166–176. <https://doi.org/10.1890/0012-9623-95.2.68>
- Wijnen, B., Anzalone, G. C., & Pearce, J. M. (2014). Open-source mobile water quality testing platform. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 4(3), 532–537. <https://doi.org/10.2166/washdev.2014.137>
- Zappa, C. J., Raymond, P. A., Terray, E. A., & McGillis, W. R. (2003). Variation in surface turbulence and the gas transfer velocity over a tidal cycle in a macrotidal estuary. *Estuaries*, 26(6), 1401–1415. <https://doi.org/10.1007/BF02803649>

8. ANEXOS

Anexo 1

Ficha de instalación de sensores

Sensor:	PUREY		
Fecha:	11/01//2019	Hora:	01:21PM
Coordenadas (UTM):	681997.00 m E	5591034.00 m S	Sector: Purey
FOTOGRAFÍA LUGAR DE INSTALACIÓN		FOTOGRAFÍA DATALOGGER	
			
Descripción de los componentes			
<p>Modelo Arduino: The Simple. Modelo tarjeta micro sd: Genérico. Modelo Reloj: DS3231 Genérico. Modelo Termómetro: DS18B20 Waterproof thermometer Modelo Ultrasonido: US-015 Ultrasound sensor. Tipo de pilas: 4 Pilas Macrotel 2700 mAh. Cubierta</p>			
Observaciones	<p>Voltaje: 5.54v Distancia sensor-agua: 3.90m Fue robado y posteriormente reemplazado por el datalogger instalado en Huellelhue. Fue instalado el 16-03-2019 a las 14:29 hrs y retirado el 30-03-2019 a las 13:28 hrs. A una distancia de 1,50 mts.</p>		

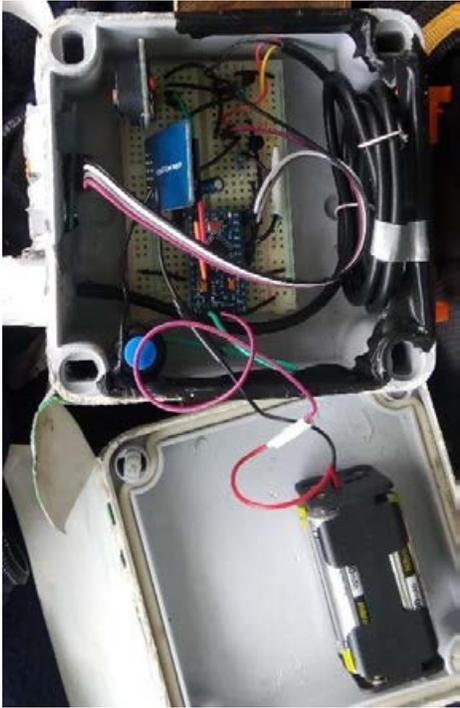
Anexo 2.

Ficha de instalación de sensores

Sensor:	CALLE-CALLE		
Fecha:	11/01//2019	Hora:	12:08PM
Coordenadas (UTM):	669648.00 m E	5593745.00 m S	Sector: Calle-Calle
FOTOGRAFÍA LUGAR DE INSTALACIÓN		FOTOGRAFÍA DATALOGGER	
			
Descripción de los componentes			
<p>Modelo Arduino: The Simple. Modelo tarjeta micro sd: Datax. Modelo Reloj: DS3231 Genérico. Modelo Termómetro: DS18B20 Waterproof thermometer Modelo Ultrasonido: US-015 Ultrasound sensor Tipo de pilas: 4 Pilas Macrotel 2700 mAh</p>			
Observaciones	<p>Voltaje: 5.56v Distancia sensor-agua: 2.98m Fecha y hora de retiro del datalogger: 16/02/2019 20:06 Voltaje total pilas: 2,13; 0,12; 1,07; 0,06; 0,89. Distancia: 2,735</p>		

Anexo 3.

Ficha de instalación de sensores

Sensor:	HUELLELHUE		
Fecha:	11/01/2019	Hora:	11:23 AM
Coordenadas (UTM):	658824.08 m E	5592247.63 m S	Sector: Huellelhue
FOTOGRAFÍA LUGAR DE INSTALACIÓN		FOTOGRAFÍA DATALOGGER	
			
Descripción de los componentes			
<p>Modelo Arduino: The Simple. Modelo tarjeta micro sd: Genérico. Modelo Reloj: DS3231 Genérico. Modelo Termómetro: DS18B20 Waterproof thermometer Modelo Ultrasonido: US-015 Ultrasound sensor Tipo de pilas: 4 Pilas Macrotel 2700 mAh</p>			
Observaciones	<p>Voltaje: 5.58v Distancia sensor-agua: 1.16m Fecha y Hora del retiro del datalogger: 18-2-2019 18:25 Distancia: 136,5 Voltaje pilas: 1,020; 0,971; 1,080; 0,987</p>		

Anexo 4.

Ficha de instalación de sensores

Sensor:	LIDO		
Fecha:	22/01//2019	Hora:	01:08PM
Coordenadas (UTM):	648668.46 m E	5589619.56 m S	Sector: Baliza Lido
FOTOGRAFÍA LUGAR DE INSTALACIÓN		FOTOGRAFÍA DATALOGGER	
			
Descripción de los componentes			
<p>Modelo Arduino: The Simple. Modelo tarjeta micro sd: Genérico. Modelo Reloj: DS3231 Genérico. Modelo Termómetro: DS18B20 Waterproof thermometer Modelo Ultrasonido: US-015 Ultrasound sensor Tipo de pilas: 4 Pilas Macrotel 2700 mAh</p>			
Observaciones	<p>Voltaje: 5.68v Distancia sensor-agua: 2,70 m.</p>		

Anexo 5.

Tabla en donde se identifican las horas en que ocurren las mareas más altas y bajas por día de la estación Lido.

Fecha	Hora Marea más Baja	Hora Marea más alta			
22-01-2019	20:28:42	16:30:57	19-02-2019	19:55:31	1:18:29
23-01-2019	10:17:33	2:57:16	20-02-2019	20:34:17	1:47:43
24-01-2019	10:41:47	3:54:40	21-02-2019	21:21:31	2:39:14
25-01-2019	12:02:07	4:24:57	22-02-2019	22:02:13	3:24:16
26-01-2019	12:26:34	5:19:52	23-02-2019	9:05:14	4:01:31
27-01-2019	12:55:57	6:18:18	05-03-2019	19:05:08	23:58:48
28-01-2019	14:19:09	20:29:40	06-03-2019	8:38:03	1:40:06
29-01-2019	14:51:12	21:46:10	07-03-2019	20:05:18	2:10:52
30-01-2019	15:39:02	22:45:45	08-03-2019	9:30:17	2:10:31
31-01-2019	16:20:06	23:16:56	09-03-2019	9:17:24	2:45:09
01-02-2019	6:14:29	23:46:17	10-03-2019	9:36:34	15:39:29
02-02-2019	7:16:20	23:59:51	11-03-2019	10:43:30	16:06:29
03-02-2019	7:41:17	0:48:00	12-03-2019	11:03:54	17:13:45
04-02-2019	8:30:06	1:25:17	13-03-2019	10:58:48	18:01:09
05-02-2019	19:50:12	1:58:35	14-03-2019	12:29:18	18:57:16
06-02-2019	20:17:37	2:15:25	15-03-2019	3:00:38	20:31:05
07-02-2019	9:46:30	3:03:54	16-03-2019	4:25:17	22:13:53
08-02-2019	9:56:09	3:21:52	17-03-2019	5:35:19	23:03:30
09-02-2019	10:15:40	3:51:44	18-03-2019	6:10:50	23:58:03
10-02-2019	10:18:00	4:13:53	19-03-2019	18:17:47	0:04:18
11-02-2019	12:17:43	5:02:59	20-03-2019	8:00:32	0:35:32
12-02-2019	12:17:57	18:25:22	21-03-2019	8:19:44	1:25:46
13-02-2019	13:24:36	20:04:11	22-03-2019	21:13:01	2:19:21
14-02-2019	14:49:11	21:48:02	23-03-2019	21:47:04	2:58:23
15-02-2019	5:15:37	22:52:28	24-03-2019	9:50:12	15:51:32
16-02-2019	16:28:03	23:39:24	25-03-2019	10:31:24	17:04:07
17-02-2019	6:22:08	23:55:39	26-03-2019	0:00:18	17:30:59
18-02-2019	18:42:00	0:16:30	27-03-2019	0:47:28	18:42:11
			28-03-2019	2:05:31	20:17:54
			29-03-2019	4:20:49	21:54:10
			30-03-2019	5:00:17	22:19:26

Anexo 6.

Tabla en donde se identifican las horas en que ocurren las mareas más altas y bajas por día de la estación Huellelhue.

Fecha	Marea Baja	Marea Alta
12-01-2019	12:27:01	5:14:48
13-01-2019	12:47:48	5:35:31
14-01-2019	18:36:24	20:08:05
15-01-2019	15:19:14	21:42:40
16-01-2019	16:09:06	22:18:54
22-01-2019	0:00:17	13:33:03
26-01-2019	13:02:34	12:29:22
27-01-2019	13:33:04	19:34:15
28-01-2019	14:05:34	21:01:57
29-01-2019	18:58:44	22:14:59
30-01-2019	8:54:43	22:12:22
31-01-2019	17:01:49	3:06:43
01-02-2019	16:57:43	18:18:42
02-02-2019	7:26:09	18:51:31
03-02-2019	8:24:27	17:37:33
04-02-2019	9:07:19	1:47:53

Anexo 7.

Tabla en donde se identifican las horas en que ocurren las mareas más altas y bajas por día de la estación Calle-Calle.

Fecha	Marea Baja	Marea Alta			
12-01-2019	12:54:20	5:46:41	03-02-2019	8:52:22	1:36:54
13-01-2019	13:41:27	5:39:38	04-02-2019	9:24:16	2:19:12
14-01-2019	14:11:47	20:21:55	05-02-2019	9:32:41	2:50:37
15-01-2019	15:10:28	21:21:31	14-03-2019	13:07:03	21:42:59
16-01-2019	16:36:55	22:57:37	15-03-2019	3:18:23	21:15:55
22-01-2019	21:06:43	2:48:41	16-03-2019	5:23:34	22:40:24
23-01-2019	10:53:18	3:41:48	17-03-2019	6:12:24	23:44:31
24-01-2019	11:53:43	4:27:02	18-03-2019	6:52:38	0:00:25
25-01-2019	12:23:30	5:26:34	19-03-2019	7:47:36	0:47:22
26-01-2019	13:00:22	6:04:23	20-03-2019	20:09:30	1:41:33
27-01-2019	14:00:55	20:22:02	21-03-2019	9:09:21	2:27:32
28-01-2019	14:36:23	21:25:29	22-03-2019	22:11:58	3:04:35
29-01-2019	16:26:00	21:58:53	23-03-2019	22:55:08	3:43:11
30-01-2019	16:56:04	23:25:30	24-03-2019	11:21:27	16:51:01
31-01-2019	17:59:39	23:59:38	25-03-2019	11:17:19	17:34:53
01-02-2019	7:10:55	0:13:27	26-03-2019	0:28:33	18:25:43
02-02-2019	7:57:53	23:57:58	27-03-2019	1:23:46	19:23:05
			28-03-2019	2:49:07	20:16:15
			29-03-2019	4:18:08	22:11:53

Anexo 8.

Tabla en donde se identifican las horas en que ocurren las mareas más altas y bajas por día de la estación Purey.

Fecha	Marea Baja	Marea Alta
16-03-2019	17:30:33	16:10:54
17-03-2019	21:37:14	20:03:01
18-03-2019	6:14:10	22:20:26
19-03-2019	13:30:29	22:05:49
20-03-2019	9:55:50	15:32:01
21-03-2019	6:08:19	9:17:26
22-03-2019	13:13:36	2:24:19
23-03-2019	6:52:22	16:28:31
24-03-2019	8:24:01	16:30:31
25-03-2019	12:32:14	22:22:50
26-03-2019	6:28:15	17:09:23
27-03-2019	9:39:15	15:38:54
28-03-2019	5:33:38	3:03:25
29-03-2019	20:17:51	14:43:37
30-03-2019	7:25:56	2:35:11