

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ALERTA DE MAREJADAS CON
PROPUESTA DE CATEGORIZACIÓN PARA AVISO PÚBLICO**

MAURICIO MOLINA¹
SEBASTIÁN CORREA²
CRISTIAN PARRA³
CARLOS TAPIA⁴
DAPHNE VARGAS⁵
DANIELA VILLALOBOS⁵
FRANCISCO PINTO⁵
ALMENDRA HERMOSILLA⁵
MAGDALENA VÁSQUEZ⁵

RESUMEN

La ocurrencia de eventos de marejadas destructivos junto con el aumento en el número de avisos por parte de la autoridad marítima ha dejado en evidencia un problema asociados al nivel de detalle de los avisos que no permite responder con certeza el ¿Cuándo?, ¿Dónde? y ¿Cuánto? respecto al impacto de una marejada. Por ello la Universidad de Valparaíso desarrolló un Sistema de Alerta de Marejadas que entrega pronósticos detallados a nivel costero del oleaje y sus impactos en un horizonte de 7 días que se actualiza diariamente y que se encuentra disponible en marejadas.uv.cl. Dado que el impacto que el fenómeno produce tiene variadas características, se propone una escala de 5 categorías desde aquella condición que no permite el desarrollo de las actividades habituales hasta aquella que produce destrucción de la infraestructura costera. La propuesta permite comunicar de manera efectiva y rápida a la población sobre los impactos esperados ante un determinado evento, mientras que una propuesta de asignación de umbrales por medio de probabilidades permite automatizar el envío de información empleando las categorías.

¹ Académico Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso– mauricio.molina@uv.cl

² Ingeniero Civil Oceánico, Ingeniero de Proyecto Sistema de Alerta de Marejadas–sebastian.correar@gmail.com

³ Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María– cristian.parra.m@gmail.com

⁴ Ingeniero Civil Informático, Universidad de Valparaíso– carlos.tapia.g@gmail.com

⁵ Estudiante Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso–marejadas@uv.cl

1. MAREJADAS EN CHILE

Las marejadas de 3 de julio 2013, 8 de agosto 2015 y enero 2016 generaron daños cuantiosos en la infraestructura costera, mobiliario y enseres públicos y privados a lo largo de Chile, sin embargo, cada evento presentó impactos diferenciados dependiendo del tramo costero que se observó. En el caso del evento de 2013, los impactos se observaron en las porciones de costa orientadas al suroeste en todo el territorio continental, esto dado que el evento fue generado en el Pacífico Sur. En el caso del evento de 2015, dado que su generación fue de carácter local pero con gran magnitud los impactos fueron importantes debido a que afectaron a las bahías y costas abiertas al noroeste de la IV y V región, sectores que habitualmente enfrentan condiciones de oleaje bastante calmas al estar abrigadas de la componente principal de oleaje que viene del suroeste (Winckler *et.al.* 2017). Luego de ello, durante todo el mes de enero de 2016, en un contexto en el que se hablaba de El Niño Godzilla ocurrieron condiciones de oleaje de gran magnitud generadas en el Pacífico Norte que arribaron sucesivamente a la costa del país en todas las porciones orientadas al noroeste. Estos eventos provocaron impactos especialmente sensibles en la costa central dado el impacto producido por el evento de 2015.

En el periodo en el que estos eventos ocurrían, el Servicio Meteorológico de la Armada incorporó en 2013 el aviso de “Marejada Anormal” con el fin de distinguir aquellos eventos de oleaje capaces de producir daño a la infraestructura costera. La Figura 1 da cuenta del número de avisos emitidos en las categorías marejada normal y anormal para la última década, donde es posible observar en ambos casos una marcada tendencia al incremento del número de avisos.

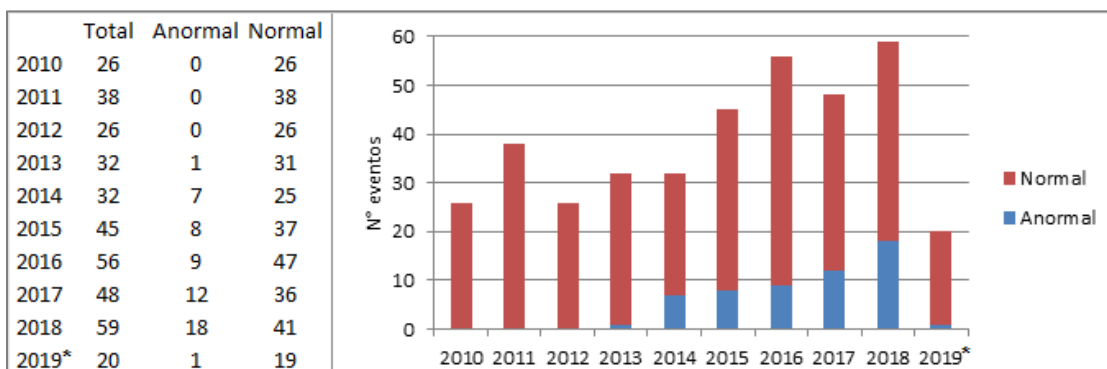


Figura 1 Avisos de marejadas por año emitidos por el Servicio Meteorológico de la Armada.

*avisos contabilizados hasta junio

La combinación de estos factores ha provocado un aumento importante en la cobertura periodística del fenómeno, y por ende una mayor visibilización que ha trascendido a los usuarios costeros, alcanzando también al público en general, incluido el turismo.

El proceso de comunicación de los avisos de marejadas hasta ahora ha seguido una lógica en la que quien avisa da cuenta de fechas de arribo del fenómeno, indicando las características del oleaje en el área oceánica, dejando a los usuarios costeros la interpretación de los impactos que se pueden esperar en un determinado lugar a partir de la experiencia que ellos poseen.

Esto ocurre dado que el oleaje en su aproximación a la costa desde el área oceánica puede sufrir variadas transformaciones debidas principalmente a la orientación de la costa en relación a la dirección del oleaje y a las características del fondo marino de la zona costera que se observa.

Así, es posible observar diferencias importantes en el oleaje costero que se presenta entre dos zonas cercanas (ejemplo, dentro de una misma bahía), llegando a presentarse ocasiones en las que eventos extremos en el área oceánica no lo son en la zona costera y viceversa (Molina 2016).

Dado lo anterior, el aumento de personas que no tienen experiencia en el comportamiento del oleaje en la zona costera interpretando avisos regionales de marejadas llevan a situaciones en las que se generan altas expectativas de impacto de marejadas en zonas en las que, por las características particulares del evento, no se producirán induciendo con ello un juicio de falsa alarma. El caso más habitual es ante el aviso de marejada que proviene del Pacífico Sur y las personas en la bahía de Valparaíso van a observar los impactos de las marejadas en Av Perú en Viña del Mar, lugar que se encuentra protegido ante dichas condiciones de oleaje por la presencia de Punta Ángeles, cuando debieran ir a observar el fenómeno en Reñaca (ver Figura 2).

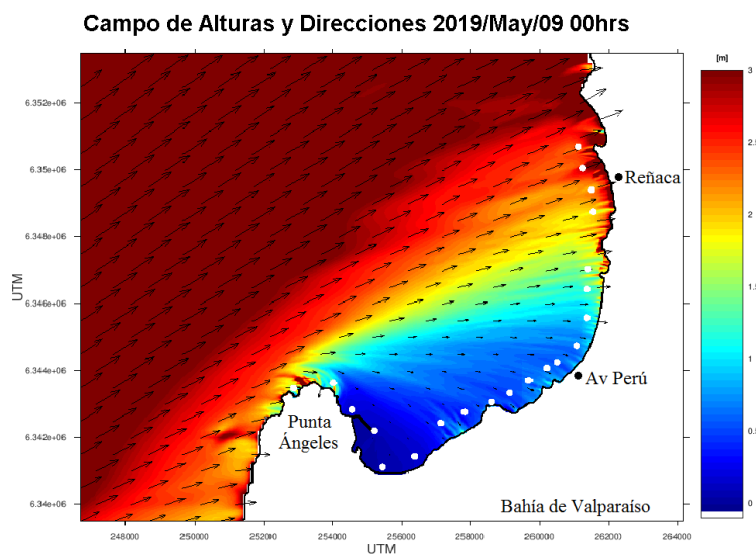


Figura 2 Ejemplo de la magnitud del oleaje en condiciones de marejadas en la bahía de Valparaíso

De esta manera queda en evidencia la necesidad de contar con un sistema de pronóstico de oleaje que tenga la capacidad de evaluar detalladamente a nivel costero la magnitud que presentará un evento de marejadas en una porción de costa determinada, que sea de fácil acceso y que se actualice diariamente.

Sin embargo, aun cuando sea posible obtener de manera precisa las condiciones de oleaje en un determinado lugar, esto no implicará necesariamente que se pueda tener certeza de los impactos que dicha condición de oleaje presentará, esto porque el impacto del oleaje depende de la combinación de tres factores: i) la magnitud del oleaje en la costa; ii) el nivel de marea, que presenta dos máximos por día; y iii) la estructura de la costa, tanto natural como artificial, considerando geometría y materialidad. Estos factores combinados explican la ocurrencia de los distintos tipos de impactos que se producen por el oleaje como agitación y fuerte rompiente, run-up y erosión de playas, sobrepaso y daño de estructuras. Así resulta necesario contar también con un mecanismo que permita comunicar de manera rápida y efectiva la magnitud del impacto esperado, como una categorización, con el objetivo de que usuarios costeros y público en general puedan hacer una adecuada evaluación preliminar de lo que se espera.

2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE ALERTA DE MAREJADAS

El Sistema de Alerta de Marejadas es una herramienta desarrollada por la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso, que permite pronosticar a nivel costero el oleaje con hasta 7 días de anticipación. Los pronósticos de oleaje se combinan con pronóstico de marea y características geométricas de la costa (sección) lo que permite realizar también pronósticos de impacto (marejadas) con una resolución de 1 hora, los cuales se actualizan todos los días y se encuentran disponibles a través de marejadas.uv.cl.

El funcionamiento general del sistema se encuentra resumido en el diagrama de la Figura 3 y consta de diferentes fases que incluyen pronóstico de oleaje para todo el Océano Pacífico, pronóstico de oleaje a nivel costero, determinación de impacto a partir de información histórica, generación de gráficos, evaluación de pertinencia de aviso y difusión de resultados.

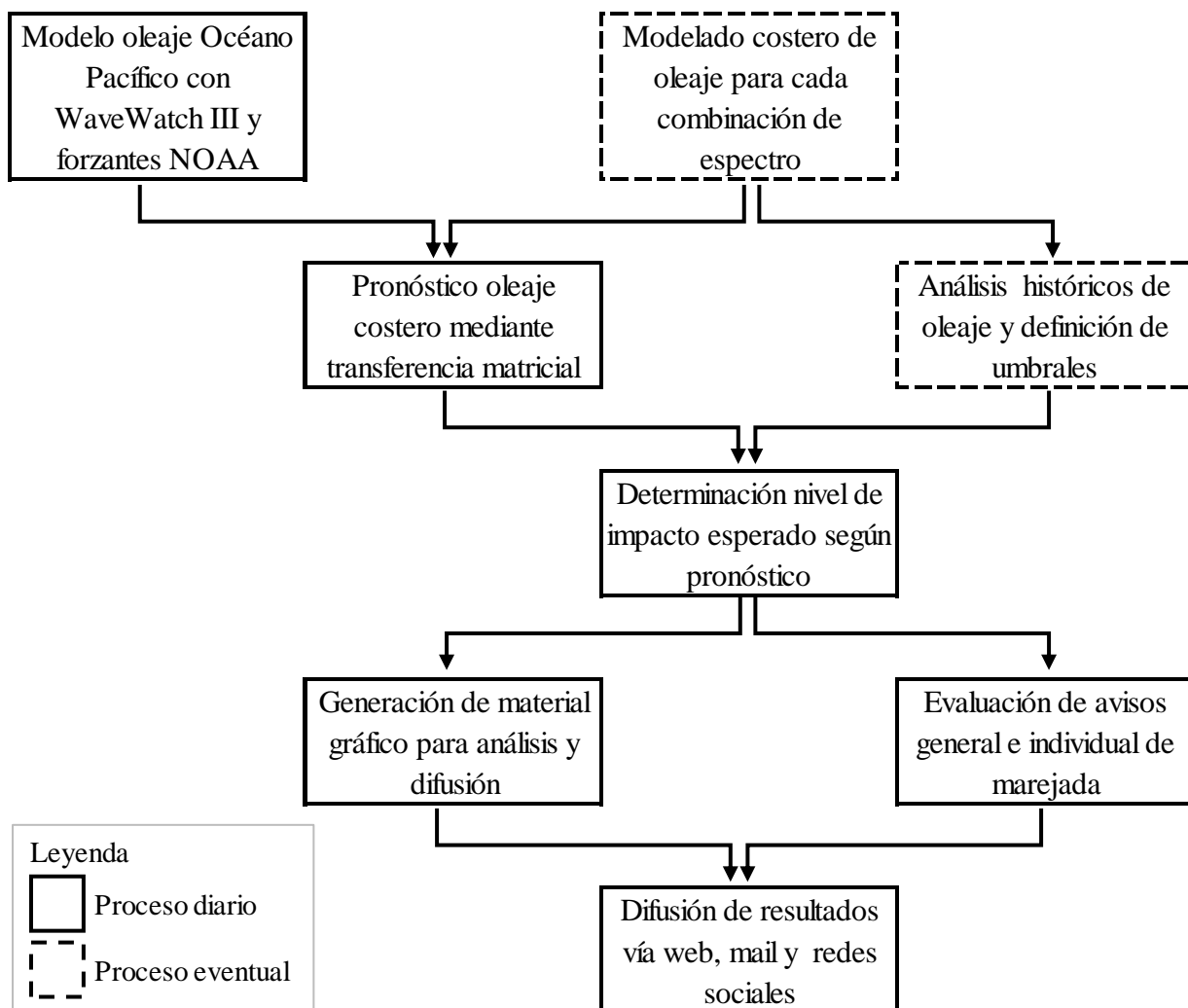


Figura 3 Diagrama simplificado del funcionamiento del Sistema de Alerta de Marejadas

Utilizando el software WAVEWATCH III v4.18 (Tolman, 1997, 1999a, 2009), y los pronósticos de campos de viento global desarrollados por NOAA/NCEP se obtiene el pronóstico de oleaje en el área oceánica (aguas profundas) para toda la cuenca del Océano Pacífico, obteniendo

información espectral (24 direcciones y 29 frecuencias) en 79 nodos oceánicos a lo largo de la costa de Chile continental e insular (ver Figura 1), los que se van actualizando todos los días, entregando información cada 3 horas y para los próximos 7 días, totalizando 61 estados de mar. La información obtenida del modelo se encuentra espaciada a 1° en latitud y la distancia a la costa fluctúa entre 90 y 250 [km] dependiendo del lugar. Este proceso se realiza empleando los resultados de Parra (2019).

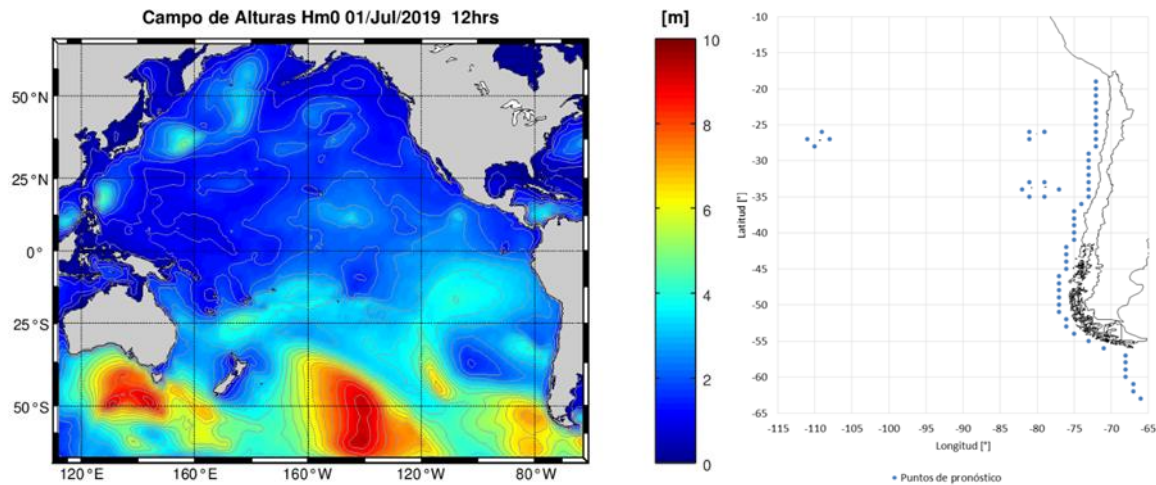


Figura 4 (Izq) Dominio del modelo WAVEWATCH III y el campo de pronóstico de oleaje, (der) nodos oceánicos en los que se obtiene información espectral

Para el modelado costero se definen los dominios según zonas de interés como ciudades y puertos en los cuales se requiere información de oleaje a nivel costero. Para ellos se realizan propagaciones de oleaje para una selección de 108 de las 696 combinaciones de dirección y periodo que poseen los espectros de aguas profundas utilizando el software SWAN⁶ (Holthuijsen *et.al.* 1993) que utiliza las ecuaciones de balance de la acción de la energía para modelar la propagación del oleaje en aguas cercanas a la costa. Los casos que no se corren son interpolados linealmente para obtener todas las modelaciones en cada una de las combinaciones, las cuales se realizan tanto en condición de pleamar como de baja mar. Con esto se obtienen mapas de coeficientes de transformación (k_a) y de dirección de llegada (k_d) para cada combinación del espectro tanto en condición de pleamar como en bajamar.

En el desarrollo de este paso, que se repite solo cuando se cuenta con nuevos antecedentes como batimetrías, datos, etc., se obtienen también las constituyentes armónicas de la marea (Foreman, 2004) mediante la metodología de análisis de series de Fourier y los datos de nivel del mar medidos por el SHOA⁷. Con estas constituyentes es posible generar un pronóstico del nivel de la marea.

Con los resultados de los pasos precedentes, espectros pronosticados en aguas profundas y mapas de matrices de transformación, se obtienen las condiciones de oleaje en el dominio costero empleando una metodología de transferencia espectral matricial (Monsalve 2010). En este paso, se toma el espectro de aguas profundas de cada estado de mar, se calcula el pronóstico de marea

⁶ Simulating WAVes Nearshore versión 41.31

⁷ Disponible en <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>

para el estado de mar correspondiente y se aplica la transformación interpolando los coeficientes k_a y k_d según el nivel de marea alcanzado. Con esto es posible obtener el espectro de oleaje en el punto que se estudia y sus correspondientes parámetros de resumen (H_{mo} , T_m , T_p , D_{irm} , D_{irp}), así como el mapa de los parámetros de resumen que dependen del momento de orden n (H_{mo} , T_m , D_{irm}) como el que se presenta en la Figura 5.

Estos pronósticos de oleaje, en conjunto con el pronóstico de marea y las características de la costa (sección) permiten evaluar impactos como Run Up (Ruggiero *et.al.* 2004) y sobrepaso (Bradbury & Allsop 1988). Se espera en un futuro próximo incorporar otros descriptores como erosión de playa, daño en escolleras de protección y en estructuras en general.

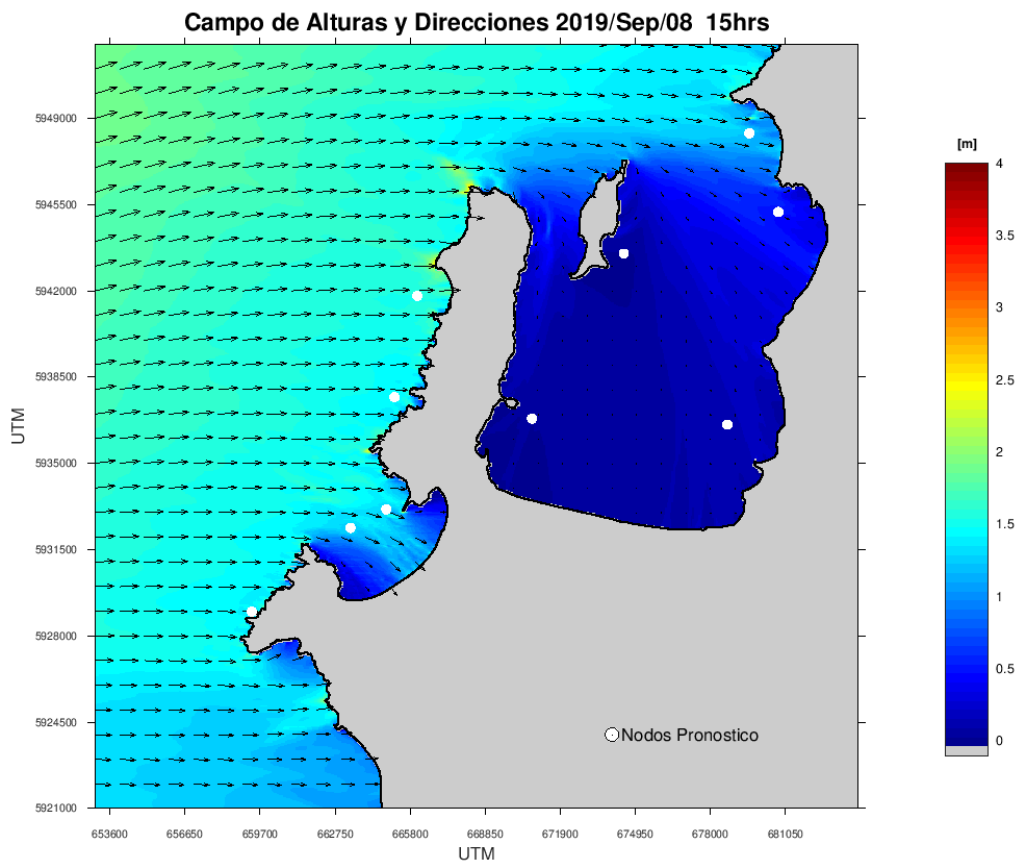


Figura 5 Ejemplo pronóstico de la Bahía de Talcahuano y San Vicente

Para un nodo costero específico, habiendo obtenido las matrices de transformación, empleando la serie histórica de oleaje obtenida del Atlas de Oleaje (Beyá *et.al.* 2016) y generando la serie de marea para el periodo correspondiente se realiza análisis estadístico que permitan obtener percentiles y periodos de retorno asociados a los distintos parámetros empleados en el pronóstico, para la definición de umbrales que permitan evaluar la magnitud de un evento que se aproxime.

Dado que el proyecto del Atlas de Oleaje, que se extiende de 1979 a 2015, fue extendido a 2017, y que el sistema de pronóstico de oleaje se encuentra en funcionamiento desde octubre de 2016, se realiza para la ventana sincrónica (octubre de 2016 a diciembre de 2017) una comparación

entre los modelos para realizar las correcciones necesarias a los umbrales, a fin de que exista homogeneidad en el proceso de cálculo.

La combinación del pronóstico de oleaje con la información histórica permite asociar al evento que se aproxima una medida de probabilidad que da cuenta de un nivel de impacto esperado, con lo cual en este proceso se realiza una asignación de categorías según la propuesta que se detalla en el capítulo siguiente.

Con la caracterización del impacto esperado en el pronóstico se realiza la confección de material gráfico (mapas, series de tiempo, composiciones espacio-temporales, GIF, entre otros.) para análisis general y difusión. Esto permite la evaluación de la pertinencia de envío de avisos de marejadas de carácter general a través de informes, y de avisos individuales a través de correo electrónico, los cuales se emiten para alertar a la población en general y a los usuarios que se han registrado en el sistema de aviso automático con el que cuenta el proyecto⁸.

Al final del proceso, toda la información relativa a pronósticos, avisos especiales e información general se sube a la página del proyecto marejadas.uv.cl.

Hasta el momento del desarrollo de este artículo, el Sistema de Alerta de Marejadas cuenta con pronósticos costeros detallados en Mejillones, Antofagasta, Quintero, Concón, Viña del Mar, Valparaíso, San Antonio, Talcahuano, San Vicente y el Golfo de Arauco. Se espera lograr en el 2020 tener pronósticos detallados en todas las ciudades costeras de Chile además del territorio insular.

3. VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA DE MAREJADAS

Como parte de las actividades relativas a verificar el funcionamiento del sistema de pronóstico, se han realizado campañas de medición de oleaje y observación de impacto que permitan entregar una primera aproximación a la calidad del pronóstico del proyecto.

En la Figura 6 se presenta la comparación de las mediciones realizadas con un ADCP en las cercanías de Av Perú con el pronóstico realizado por el Sistema de Alerta de Marejadas en el periodo correspondiente entre el 29 de junio y 19 de julio de 2018, que abarcó el desarrollo del evento de oleaje más fuerte de dicho año que se presentó en el lugar. La comparación da cuenta de una adecuada capacidad de representar el inicio, desarrollo y término del evento extremo tanto en la altura significativa (H_{mo}) como en el periodo peak (T_p), sin embargo en una mirada detallada es posible observar que se presentaron diferencias importantes en la magnitud máxima del evento, así como en el tiempo de arribo de la peor condición, ya que en la tarde del día 5 de julio el evento se adelanta en unas 6 horas con máximo cerca de 0.7 [m] mayor a lo pronosticado.

Para el evento en cuestión, se generó también un seguimiento del sobrepaso que se produjo en Av Perú a través de la instalación de cámaras Go Pro, las cuales registraron todo el evento en la modalidad time lapse. Allí es posible observar que hay una concordancia en la magnitud del

⁸ <https://marejadas.uv.cl/index.php/inscribete>

sobrepaso pronosticado con el observado, lo que permite establecer una equivalencia de impacto en función de la magnitud pronosticada.

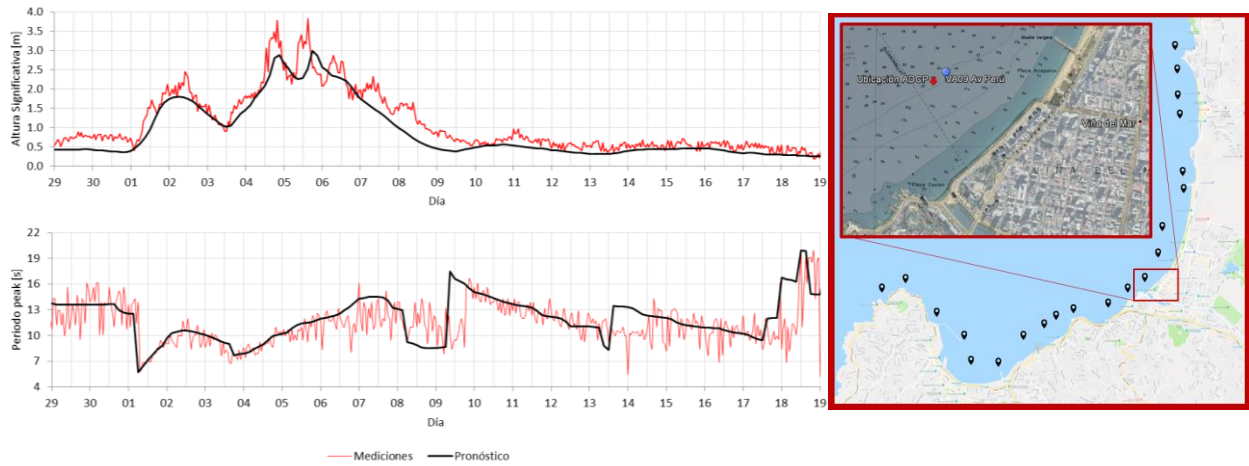


Figura 6 Comparación de medición de oleaje realizado con ADCP y pronóstico de oleaje en las cercanías de Av Perú (der) entre el 29 de junio y 19 de julio de 2018 para altura significativa (izq, arriba) y periodo peak (izq, abajo).

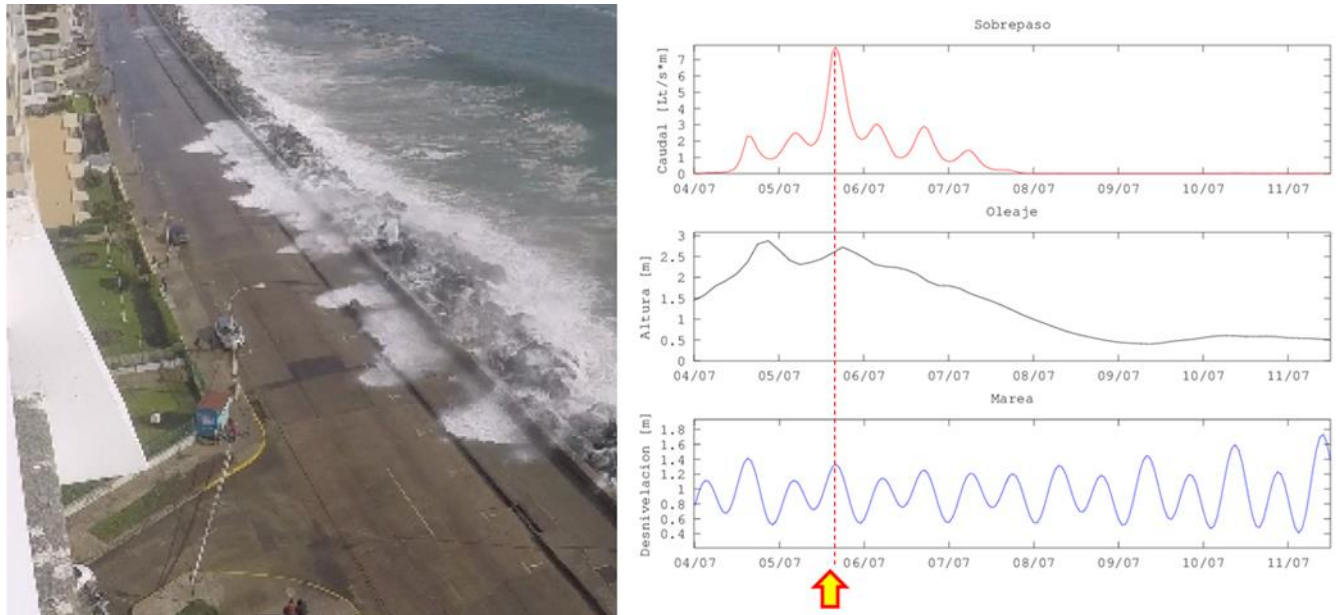


Figura 7 (Izq) Sobrepaso observado en Av Perú la tarde del 5 de julio de 2018, (der) pronóstico de marea, altura de ola y caudal de sobrepaso pronosticado. Línea indica momento en que fue tomada la foto.

No obstante lo anterior, las experiencias realizadas hasta ahora son solo un marco referencial que permite establecer que el Sistema de Alerta de Marejadas cumple de buena manera su propósito, sobre todo en consideración a la experiencia de los autores en el monitoreo de marejadas desde la puesta en marcha del proyecto en agosto de 2017. Sin embargo un estudio de validación más profundo, y amplio es necesario para refrendar esto, considerando además condiciones de oleaje de verano y observaciones en otros lugares del país, tanto a nivel costero como en el área oceánica.

4. CATEGORIZACIÓN DE MAREJADAS

Considerando que el impacto que provoca el oleaje depende de su magnitud, de la marea y de la característica de la estructura costera, y que este impacto puede ser en diversos niveles (suspensión de actividades hasta destrucción de infraestructura) y abarcando diversas manifestaciones (desde aumento de la agitación hasta sobrepaso de estructuras y erosión de playas), a partir de la revisión de antecedentes históricos (Campos 2016) y de la experiencia de los autores en observaciones en terreno, se propone una escala de 5 categorías que permitan describir los niveles de impacto que las marejadas pueden producir en el borde costero, partiendo desde el momento en el que el agua comienza a salir de sus márgenes habituales hasta que se produce destrucción de las estructuras costeras, al cual se describe en la Tabla 1

Este concepto de 5 categorías ya se ha aplicado en otras disciplinas para desarrollar las escalas de Saffir-Simpson, Fujita-Pearson, entre otras, ya que permite dividir los impactos en mínimo, menor, medio, mayor y máximo. De este modo se puede acercar de manera simplificada la información a los usuarios del borde costero, empleando un concepto análogo a la escala de Mercalli en el caso de sismo, la cual está altamente internalizada en la población chilena.

De este modo, se entenderá una marejada como la combinación de oleaje y marea que tiene capacidad de afectar el normal desarrollo de actividades socioeconómicas en el entorno costero, pudiendo llegar a provocar daños en la infraestructura.





Estas categorías pueden aplicarse tanto a un estado de mar como a un evento en su conjunto, pero siempre aplicándolas a un lugar en específico. Esto permite generar comparaciones entre eventos históricos y recientes, así como calificar lo que se espera de un evento futuro sujeto de ser pronosticado considerando como base el supuesto de que si un fenómeno se repite y las condiciones del entorno no varían (infraestructura, nivel del mar, etc.) entonces es esperable que un impacto se repita.

A partir de lo anterior, se propone un esquema de asignación de categoría a cada estado de mar mediante umbrales asociados a probabilidad, con el objetivo de que el aviso de marejada se realice empleando la escala propuesta. Esto permite un proceso de comunicación preciso en la resolución horaria, en la resolución espacial y en la definición del impacto, respondiendo las preguntas ¿Cuándo?, ¿Dónde? y ¿Cuánto?, lo que permite a los usuarios costeros tomar los resguardos necesarios que minimicen los daños y pérdidas asociadas a marejadas.

Dado que en el sistema de alerta de marejadas se asignan categorías a cada estado de mar, y para facilitar el hecho de que siempre se asigne una categoría, se propone la incorporación de las categorías de Oleaje Normal (N) y Oleaje Fuerte (N+) con el propósito de servir de transición antes y después de un evento de marejada, tal como se muestra en la Figura 8.

Dentro de las restricciones de implementación de la propuesta, se encuentra que la definición por impacto solo es posible en los sectores costeros, dado que requiere de una costa y sus características para evidenciar el impacto, sin embargo en los nodos oceánicos y nodos costeros es posible definir la marejada como una amenaza asociada a la recurrencia de la combinación oleaje – marea a través, en este caso, de la evaluación del Run-Up.

Tabla 1 Propuesta de categorización de marejadas

Categoría		Combinación de oleaje y marea ...	Descripción general
	Oleaje Normal	que habitualmente se presenta.	Condición en la que se desarrollan las actividades usuales. Las restricciones son las habituales.
	Oleaje Fuerte	más intensa de lo normal, pero menor a una marejada.	Condición en la que actividades usuales en el agua se desarrollan con dificultad, pero que no afecta actividades de orilla o en tierra. Hay mayor restricción de acceso al mar de lo habitual.
	Marejada Categoría 1	que es capaz de afectar el normal desarrollo de actividades en el mar.	Condición en la que el ingreso al mar es peligroso y se debe tener precaución en actividades de orilla. Agua sale ocasionalmente en playas.
	Marejada Categoría 2	que no permite el desarrollo de actividades en el mar y afecta las actividades costeras.	Condición en la que la realización de actividades costeras es peligroso. Playas se inundan con frecuencia, se produce erosión de la arena. Agua sobrepasa ocasionalmente y en baja magnitud las estructuras.
	Marejada Categoría 3	de similar intensidad al evento máximo que normalmente se presenta cada año.	Condición en la que acercarse a la zona mojada es peligroso. Playas presentan erosión cercana al máximo anual, paseos costeros presentan sobrepasos frecuentes generando inundaciones menores, se producen daños en estructuras frágiles.
	Marejada Categoría 4	de similar intensidad a eventos poco frecuentes que pueden generar daños.	Condición en la que la evacuación de la costa es sugerida. Las playas se erosionan más de lo normal, estructuras definitivas sufren daños, agua sale de las fronteras de las playas, se inundan propiedades.
	Marejada Categoría 5	de similar intensidad a los eventos históricos que se usan para el diseño de estructuras costeras definitivas.	Condición en la que la evacuación de la costa es necesaria. Estructuras son severamente dañadas o destruidas, sobrepaso persistente genera flujos en paseos y calles, daño importante o destrucción en propiedades.

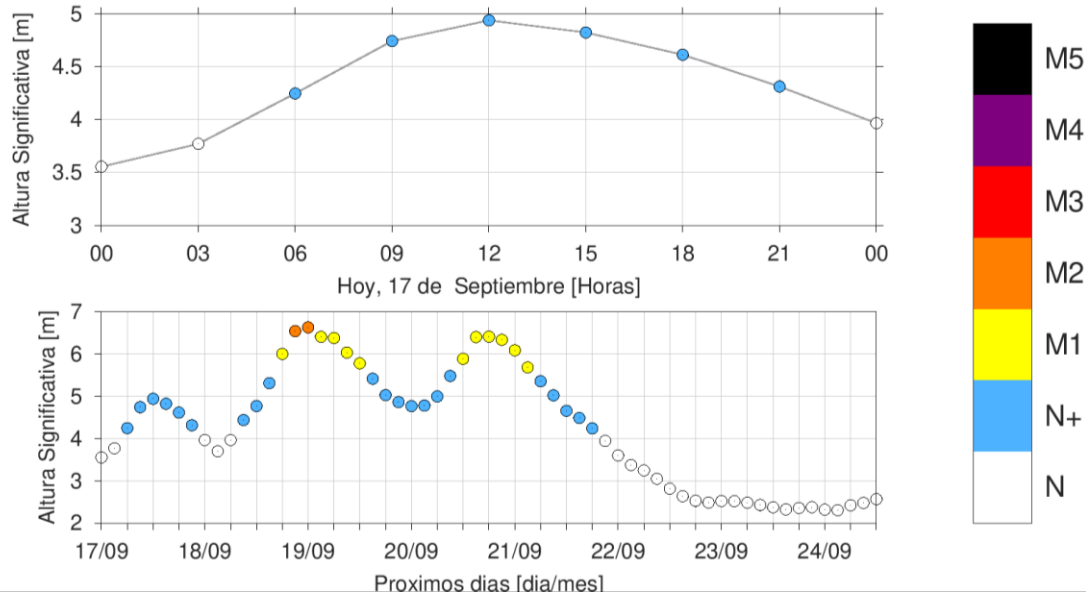


Figura 8 Ejemplo de Pronóstico de altura significativa de oleaje combinada con la propuesta de categoría de marejadas, caso Golfo de Penas

5. CONCLUSIÓN

Eventos extremos de oleaje que provocaron grandes impactos a nivel costero en combinación con un aumento en la cantidad de avisos de marejadas han provocado un aumento en el interés de este fenómeno, dejando en evidencia problemas asociados a la interpretación del aviso por parte de la ciudadanía en general. Esto justifica la necesidad de contar con un sistema de alerta de marejadas que responda con precisión a las preguntas ¿Cuándo? ¿Dónde? y ¿Cuánto? respecto al impacto de una marejada.

El Sistema de Alerta de Marejadas de la Universidad de Valparaíso logra dar respuesta a las preguntas planteadas al contar con pronósticos detallados de oleaje a nivel costero, los cuales, al combinarse con pronóstico de marea y de características de la costa (sección) permite estimar el impacto que producirán, lo que se conoce como marejada.

Mediciones de oleaje y observaciones de campo desarrolladas por los autores dan cuenta de un buen funcionamiento del sistema y una adecuada capacidad de pronóstico, sin embargo estudios profundos para validar estos hallazgos son necesarios.

La escala de marejadas que se propone constituye una herramienta versátil que permite comunicar de buena manera los impactos esperados por una marejada, además de tener la posibilidad e implementarla en el sistema a través de la asignación de umbrales asociados a probabilidad. La certidumbre de esta definición así como de la capacidad efectiva de implementación en un pronóstico deberá ser estudiada en profundidad en la medida que sea usada.

REFERENCIAS

- Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Aguirre C., Valdivia J., Parra C., Méndez L., Contreras F., Winckler P., Molina M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica – Universidad de Valparaíso.
- Bradbury, A. P., and Allsop, N. W. 1988. “Hydraulic Effects of Breakwater Crown Walls,” Proceedings of the Breakwaters '88 Conference, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford Publishing, London, UK, pp 385-396.
- Campos-Caba, R.V. 2016. Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile. Memoria de Título de Ingeniero Civil Oceánico, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, 136 pp.
- Foreman, M., 2004. Manual for Tidal Currents Analysis and Prediction. 78
- Holthuijsen, L.H., N. Booij and R.C. Ris, 1993, A spectral wave model for the coastal zone, Proceedings 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, Louisiana, July 25-28, 1993, New York, pp. 630-641
- Molina M. 2016. Eventos extremos de oleaje para el diseño de obras, ¿evaluar en aguas profundas o en el sitio? VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria, SIOP. San Antonio, Chile. Octubre 2016.
- Monsalve, E. 2010. Desarrollo e implementación de modelo de transferencia espectral de oleaje en bahía de Valparaíso. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico. Universidad de Valparaíso.
- Parra, C. 2019. Sistema automático de pronóstico de oleaje para las costas y puertos estatales de Chile. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Ruggiero, P., R. A. Holman, and R. A. Beach (2004), Wave run-up on a high-energy dissipative beach, *J. Geophys. Res.*, 109, C06025, doi:10.1029/2003JC002160.
- Tolman, H. L., 1997. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 151, 97 pp.
- Tolman, H. L., 1999a. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 166, 110 pp.
- Tolman, H. L., 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276, 194 pp.+ Appendices.
- Winckler P., M. Contreras-López, R. Campos-Caba, J. Beyá, M. Molina. 2017. El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 45(4): 622-648, 2017, DOI: 10.3856/vol45-issue4-fulltext-1.