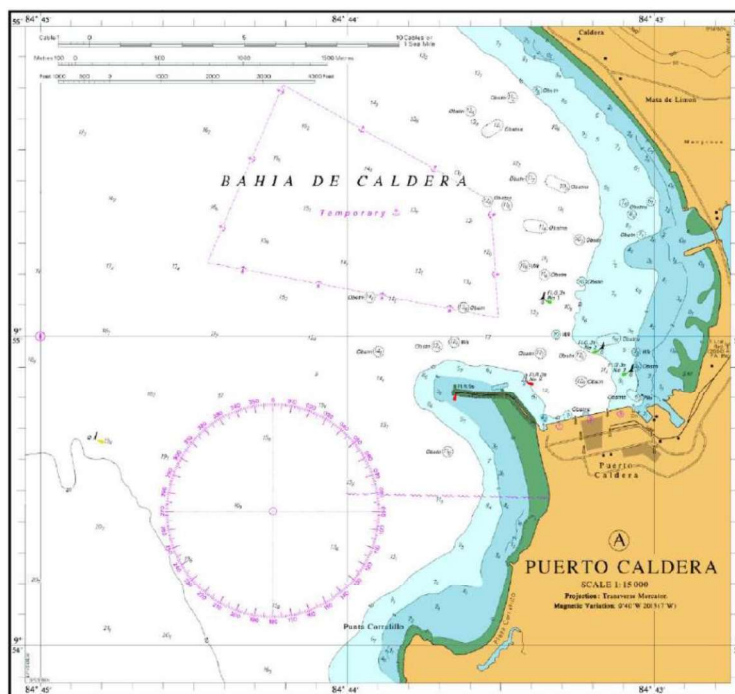


Figura 2.209: Extracto de Carta Náutica de Puerto Caldera



2.8.2.1.5. Rompeolas

El terminal está protegido por un rompeolas de tipología en talud que consta de un terraplén de roca y elementos prefabricados de hormigón en el manto superior. Con los años ha presentado daños frecuentes por su condición de diseño, ya que se construyó para soportar condiciones de oleaje que se superan con frecuencia. Los antecedentes del rompeolas de Caldera se resumen en la tabla a continuación.

Tabla 2.106: Resumen de antecedentes del rompeolas de Caldera

Año	Dato
1981	Inicio de operaciones en Puerto Caldera. Longitud del rompeolas: 250 m.
1981-1992	Ampliaciones sucesivas, hasta 315 m adicionales. Longitud adicional final: 272 m, después de pérdidas por oleaje.
2001	Extensión de 123 m con coraza de dolos de 3.5tn. Longitud total rompeolas: 250 m + 395 m.
2002	Avería en el rompeolas. Pérdida por oleaje: 60 m. Longitud total rompeolas: 250 m + 335 m.
2004	Estudio de revisión del rompeolas y análisis morfológico de Puerto Caldera (Royal Haskoning)
-	No hay nueva construcción, sólo inversiones de mantenimiento
2010	Plan de rehabilitación de Puerto Caldera (Convenio JICA-MOPT)
2011	Retroceso de 16 m de rompeolas. Longitud total: 250 m + 320 m. Reconstrucción con roca de 3 y 8 ton hasta alcanzar 250 m + 344 m.

Fuente: TYPSA, 2019.

Este rompeolas cumple una doble función: proteger los sitios de atraque del oleaje proveniente del SW, y contener el sedimento que proviene del S evitando su ingreso dentro de la zona de operación del terminal. Cabe destacar que las sucesivas extensiones del rompeolas siempre se han realizado para aumentar la capacidad de retención de sedimentos, y no para aumentar la protección del puerto frente al oleaje.

En el año 2021 se realizó una reparación significativa del avanzado estado de deterioro que presentaba el rompeolas, como se muestra en la figura a continuación. La reparación consistió en reconstruir el morro colocando cubos de hormigón, y realizar una mínima extensión de la longitud del rompeolas, en consecuencia, la reparación del rompeolas es meramente estructural, por lo cual no se espera un aumento en su capacidad de retener sedimentos ni en su capacidad de reducir la agitación en el interior de la dársena.

Figura 2.210: Estado del rompeolas antes de la reparación de 2021



Figura 2.211: Estado del rompeolas después de la reparación de 2021



Fuente: Google Earth

En las figuras puede verse cómo ha ido aumentando la acumulación de sedimentos, visible en la parte inferior del rompeolas. La causa principal del fenómeno es el desarrollo de un perfil de arena sumergido relativamente suave cerca de la cabeza del rompeolas. Como resultado de la acumulación de arena, este área disponible para retener arena se ha vuelto menos profunda y las ondas entrantes generan un transporte local alrededor de la cabeza del rompeolas. Debido a esto, el ingreso del sedimento se transporta con mayor facilidad a la parte interna del puerto (la dársena).

Figura 2.212: Terminal Puerto Caldera – Sedimentos en Rompeolas



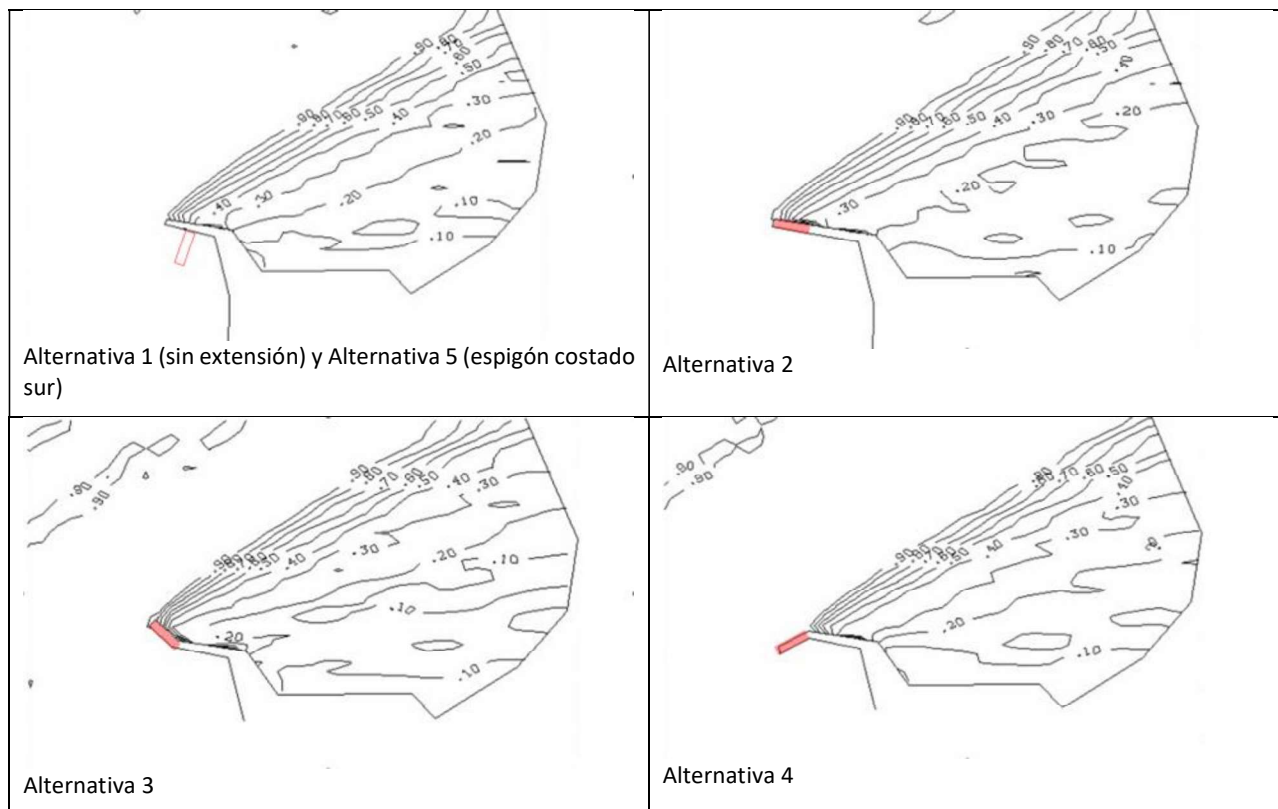
Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Cabe destacar que cualquier obra de extensión del rompeolas sin dragado de mantenimiento o bypass de sedimentos solo retendrá los sedimentos por algunos años hasta que se colmate el volumen adicional generado. En estudios anteriores (Royal Haskoning, 2004), se han evaluado distintas opciones de extensión del rompeolas para el manejo de sedimentos, incluyendo también un análisis conceptual de agitación:

- Alternativa 1: Sin extensión, realizando únicamente dragado de mantenimiento.
- Alternativa 2: Extensión alineada con el rompeolas actual.
- Alternativa 3: Extensión paralela al frente de oleaje.
- Alternativa 4: Extensión perpendicular al frente de oleaje
- Alternativa 5: Espigón en el costado sur del rompeolas.

En el estudio de Royal Haskoning se estimó la agitación de manera conceptual utilizando el modelo DIFFRAC para cada una de las alternativas, considerando extensiones de 150 y 250 m, y para períodos de oleaje (T_p) de 13 y 17 s. En la figura a continuación se muestran algunos diagramas de agitación de este estudio ($T_p = 13$ s, extensión = 150 m) para las alternativas analizadas, mostrándose en rojo las posibles extensiones. Los diagramas de agitación muestran los contornos de igual porcentaje de altura de oleaje dentro de la dársena respecto al oleaje fuera de la dársena.

Figura 2.213: Diagramas de agitación en Puerto Caldera



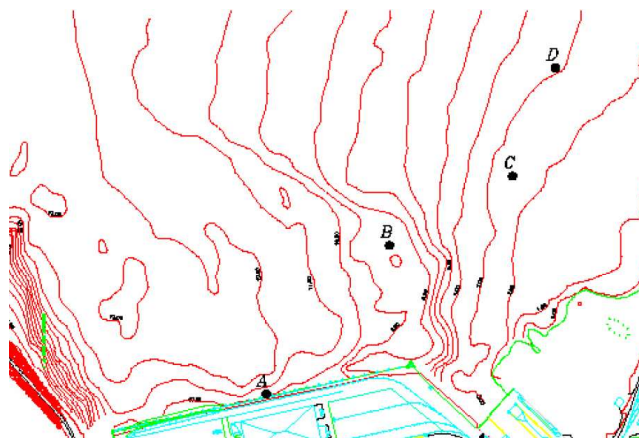
Fuente: Royal Haskoning (2004)

Para la modelación de los procesos morfológicos y la evaluación de efectos de posibles obras marítimas en el tiempo, en el estudio de Royal Haskoning se utilizó el modelo de simulación morfológica UNIBEST. Con ello se evaluó la reducción en la tasa de entrada de sedimentos a la dársena producto de la extensión, por cuanto tiempo se mantiene en niveles bajos y su aumento en el tiempo a medida que se van acumulando más sedimentos al sur del rompeolas. Un resumen de las conclusiones de este análisis se indica a continuación:

- En las Alternativas 2 y 4, una extensión de 150 m permitiría retener los sedimentos (mantener una tasa de entrada de sedimentos menor a 10.000 m³/año hacia la dársena) por 5 años., mientras que una extensión de 250 m lo haría por 11 años.
- En la Alternativa 3 la capacidad de retención es menor, produciéndose el aumento de la tasa por sobre 10.000 m³/año en menos de un año.
- En la Alternativa 5, con un espigón de 150 m se mantendrían tasas menores a 10.000 m³/año por 4 años, y notándose por 10 años el efecto del espigón en la reducción de la tasa de transferencia de sedimentos hacia la dársena.

En la figura a continuación se muestran las ubicaciones donde se analizó la agitación en el estudio del 2004.

Figura 2.214: Ubicaciones consideradas en el análisis conceptual de agitación



Fuente: Royal Haskoning (2004)

Estas ubicaciones corresponden con:

- El centro del muelle de contenedores (A)
- El centro del muelle granelero proyectado en esa época (B). Se compara con la ubicación final del muelle granelero, que parece estar entre las ubicaciones B y C.
- Dos ubicaciones en la zona prevista para expansión futura del puerto (C y D).

Adicionalmente, se estimó la agitación en la ubicación del muelle de carga general previsto contiguo al rompeolas (ubicación E) por simple inspección visual de los diagramas de agitación mostrados anteriormente. La tabla a continuación muestra los coeficientes de agitación en diferentes ubicaciones del puerto.

Tabla 2.107: Coeficiente de agitación en diferentes ubicaciones del puerto

Alternativa	Ubicación				
	A	B	C	D	E (*)
0 y 5	< 10%	12%	17%	22%	10% - 20%
2	< 10%	12%	15%	20%	10% - 20%
3	< 10%	11%	12%	12%	~ 10%
4	< 10%	12%	17%	22%	10% - 20%

(*) Estimado por inspección visual de los diagramas de agitación.

Fuente: Royal Haskoning (2004)

Un resumen de las conclusiones del análisis de agitación se indica a continuación:

- No hay una diferencia significativa del oleaje entre la extensión de 150 y la de 250 metros para ninguna de las alternativas.
- No hay una diferencia significativa del oleaje entre los casos con y sin extensión en las ubicaciones A y B.
- En la ubicación E, la agitación variaría desde un 10% en el centro del sitio hasta un 20% en el punto más expuesto, que es donde se produce el cambio de dirección del rompeolas.
- La Alternativa 3 es la única que generaría una reducción significativa de la agitación, especialmente en las ubicaciones C, D y E. En este caso, el nivel de agitación en esas tres ubicaciones podría ser similar a la ubicación B.
- Los niveles de agitación en la ubicación D sin expansión del rompeolas podrían llegar a ser el doble que en la ubicación B.

Los estudios analizados anteriormente son simplificados y de larga data, pero permiten obtener algunas conclusiones a nivel conceptual. Sin embargo, es recomendable complementarlos con los estudios básicos y agitación actualizados, análisis dinámico de respuesta de buque atracado y downtime según el tipo de carga y simulación dinámica de la operación de graneles, además de la actualización y extensión del estudio de sedimentos. Con esto se podrá obtener información más precisa del beneficio en la operación de cada una de las alternativas versus el costo de cada una de ellas, tanto desde el punto de vista del manejo de sedimentos como de la agitación al interior de la dársena. De todas maneras, con la información existente se puede justificar la no intervención del rompeolas basado en los siguientes puntos:

- Considerando que se realizó una reparación importante al rompeolas el año 2021, se espera que el riesgo de daños en el futuro se reduzca. De todas maneras, se recomienda verificar el diseño actual considerando los resultados de los estudios básicos actualizados (oleaje, niveles del mar, corrientes).
- Cualquier obra de extensión del rompeolas sin dragado de mantenimiento o bypass de sedimentos solo retendrá los sedimentos por algunos años hasta que se colmate el volumen adicional disponible. Además, se agudizaría el problema de la erosión en la playa al NE del puerto.
- Las alternativas de ampliación del rompeolas que generan mayor beneficio para la retención de sedimentos no coinciden con aquellas que reducen significativamente la agitación. Con ello es más difícil justificar el costo de la extensión, especialmente si hay alternativas que pudieran ser más económicas para enfrentar ambos problemas por separado.
- El downtime predominante en los muelles graneleros (puesto 4 y su extensión prevista) es debido a las precipitaciones. Es posible que el beneficio en la reducción del downtime por oleaje en los muelles graneleros no compense el costo de las mejoras del rompeolas, ya que el downtime promedio de 30% por precipitaciones seguirá presente. Esto se debe verificar con un estudio de análisis dinámico de buque amarrado que incluya el análisis de ondas largas, downtime según el tipo de carga y una simulación dinámica de la operación bajo ambas condiciones de downtime en forma simultánea.

Si bien los puntos anteriores ayudan a justificar la no intervención del rompeolas, es importante considerar lo siguiente:

- El nuevo puesto de carga general adyacente al rompeolas podría tener niveles de agitación similares o levemente superiores a los niveles de agitación del Puesto 4. Sin embargo, en el Puesto 4 el oleaje incide por la banda del buque, generando mayores movimientos. En el caso del puesto de carga general, el buque estaría mejor alineado con el oleaje. En caso de que los niveles estimados de downtime fueran mayores a los niveles aceptables, una alternativa más económica que la intervención del rompeolas sería la extensión de la escollera del muelle de carga general para reducir la agitación, o la optimización de la configuración de amarras. Esto deberá ser verificado y confirmado por los potenciales concesionarios del terminal a través de los estudios de agitación y de nave amarrada para obtener resultados refinados del downtime estimado y las tensiones en las líneas de amarre.
- Si la extensión del muelle granelero mantiene la misma orientación del Puesto 4, es posible que su downtime por oleaje sea significativamente mayor que la del Puesto 4. Preliminarmente la agitación podría ser el doble, y el oleaje también incidiría por la banda del buque. Si bien una extensión del rompeolas como la de la Alternativa 3 podría dejar este nuevo sitio con los mismos niveles de agitación del actual Puesto 4, hay otras alternativas para reducir el downtime como la reorientación del muelle, la optimización de la configuración de amarras o el potencial uso de dispositivos del tipo shoretension, según se explicará más adelante.
- El problema de sedimentación de la dársena seguirá presente con o sin una extensión del rompeolas. Como alternativa a la extensión, es posible retirar los sedimentos al sur del rompeolas antes de que ingresen a la dársena, lo cual puede ser mediante un plan de dragado periódico al sur del rompeolas, trampas de arena o un by-pass de sedimentos, según se explicará más adelante.