

Estudio de Revisión del Rompeolas y Análisis Morfológico de Puerto Caldera

Informe Final

Contratación Directa: CD 4638-2003

Ministerio de Obras Publicas y
Transportes / SENTER

Octubre de 2004

9M8010.21



HASKONING NEDERLAND BV
MARITIME

Barbarossastraat 35
Apartado de correo 151
6500 AD Nijmegen
los Países Bajos
+31 (0)24 328 42 84
+31 24 3609 634
info@nijmegen.royalhaskoning.com
www.royalhaskoning.com
Arnhem 09122561

Teléfono
Fax
E-mail
Internet
CdC

Título del documento	Estudio de Revisión del Rompeolas y Análisis Morfológico de Puerto Caldera Informe Final
Título de documento abreviado	Rompeolas Puerto Caldera
Estado	
Fecha	Octubre de 2004
Nombre del proyecto	Estudio de Revisión de Rompeolas y Análisis Morfológico de Puerto Caldera
Número del proyecto	9M8010.21
Comitente	Ministerio de Obras Publicas y Transportes / SENER
Referencia	9M8010.21/R002/jwj/Nijm

Redactado por	Jan-Willem Jongbloed
Controlado por	J-W Jongbloed
Fecha/rúbrica control
Aprobado por	R. Moor
Fecha/rúbrica aprobación

INDICE

	Página
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos del Estudio	2
1.3 Estructuración del Informe	2
2 DIAGNÓSTICO DE FALLA DEL ROMPEOLAS	4
2.1 Generalidades	4
2.2 Falla de diseño	5
2.2.1 Fórmula de diseño	5
2.2.2 Parámetros de diseño	8
2.2.3 Dimensionamiento de las capas	11
2.3 Falla por sobrecarga de la estructura	12
2.3.1 Inventario y evaluación de las posibles sobrecargas	12
2.3.2 Causa del inicio de la falla	16
2.4 Falla por construcción defectuosa	19
2.5 Conclusión	20
3 MODELACIÓN MORFOLÓGICA	22
3.1 Introducción	22
3.2 Objetivos de la Simulación	23
3.3 Área del modelo y balance de sedimentos	23
3.3.1 Área del Modelo	23
3.3.2 Balance de Sedimentos	25
3.4 Modelación del transporte litoral	26
3.5 Modelación de cambios costeros y bypass de sedimentos	27
3.5.1 Transporte de sedimentos	27
3.5.2 Calibración del Modelo	28
3.5.3 Análisis de Sensibilidad	31
4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS	33
4.1 Las alternativas planteadas	33
4.2 Evaluación de la Sedimentación para cada Alternativa	35
4.2.1 Alternativa 1-Opción-cero	35
4.2.2 Alternativa 2-Prolongación rompeolas existente (A y B)	35
4.2.3 Alternativa 3, prolongación rompeolas a 312° (A y B)	37
4.2.4 Alternativa 4, Prolongación rompeolas a 222° (A y B)	38
4.2.5 Alternativa 5- Espigón al Sur del rompeolas	39
4.3 Evaluación de la penetración de Oleaje	42
4.3.1 Introducción	42
4.3.2 Resultados y conclusión	42
4.4 Comparación de costos de las alternativas	43
4.4.1 Alternativa 1-Opción cero	43
4.4.2 Alternativa 2 A- Prolongación del rompeolas en 150m	44
4.4.3 Alternativa 2 B- Prolongación del rompeolas en 250m	45
4.4.4 Alternativa 3 A- Prolongación paralelo a las olas en 150 m	46
4.4.5 Alternativa 3 B- Prolongación paralelo a las olas en 250 m	47

4.4.6	Alternativa 4 A- Prolongación perpendicular a las olas en 150 m	48
4.4.7	Alternativa 4 B- Prolongación perpendicular a las olas en 250 m	48
4.4.8	Alternativa 5A- Espigón de 150 m al sur del rompeolas	50
4.4.9	Alternativa 5B- Espigón de 250 m al sur del rompeolas	51
4.5	Evaluación de las alternativas	52
4.6	Conclusiones y Recomendaciones	52
5	DISEÑO DE LA EXTENSIÓN DEL ROMPEOLAS Y EL DRAGADO	55
5.1	Diseño del Rompeolas	55
5.2	Evaluación de Canteras	59
5.3	Diseño de las obras de Dragado	62
5.4	Los Pliegos de Licitación	65
6	EVALUACIÓN AMBIENTAL DE ALTERNATIVA ESCOGIDA	67
6.1	Descripción breve del medio ambiente	67
6.1.1	Morfología	67
6.1.2	Clima	67
6.1.3	Socio-economía	69
6.1.4	Ecología	69
6.2	La alternativa recomendada	71
6.3	Aspectos críticos del proyecto	71
6.4	Evaluación del Rompeolas	72
6.4.1	La vida acuática en el sitio de construcción y los alrededores	72
6.4.2	Origen de los materiales de construcción	72
6.4.3	La población local	73
6.4.4	Los turistas	73
6.5	Evaluación del dragado	74
6.5.1	La vida acuática en el sitio de dragado y de depósito	74
6.5.2	Los pescadores	74
6.5.3	Los turistas	74
6.6	Conclusiones	75
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76

Lista de Anexos

Anexo A	Clima del Oleaje
Anexo B	Geotécnica
Anexo C	Planos Generales
Anexo D	Penetración del Oleaje
Anexo E	Rompeolas (Especificaciones Técnicas, Planos, Lista de Cantidades)
Anexo F	Dragado (Especificaciones Técnicas, Planos, Lista de Cantidades)
Anexo G	Valores utilizados en los modelos matemáticos
Anexo H	Diseño conceptual del morro de rompeolas existente

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 3-1 Área del modelo	23
Figura 3-2 Corte Transversal longitudinal	24
Figura 3-3 Posición de isóbatas y rompeolas en los años 1983 y 2000.....	25
Figura 3-4 Relación ángulo de costa versus transporte de sedimentos.....	28
Figura 3-5 Prolongación del rompeolas y by-pass entre los años 1979 y 2000	29
Figura 3-6 Extensiones y reducciones del rompeolas y by-pass de sedimentos.....	30
Figura 3-7 Cambios de costa al sur del rompeolas modelado por UNIBEST	31
Figura 3-8 Análisis de Sensibilidad; Alimentación del modelo con 90%, 100% y 110% del volumen de arena en el borde sudoeste del modelo.	32
Figura 4-1 Alternativa 1-Opción-cero; sin extensión del rompeolas.....	35
Figura 4-2 Alternativa 2-A; extensión de 150 metros del rompeolas existente.....	36
Figura 4-3 Alternativa 2-B; extensión de 250 metros del rompeolas existente.....	36
Figura 4-4 Alternativa 3-A; extensión de 150 metros en dirección 312 grados	37
Figura 4-5 Alternativa 3-B; extensión de 250 metros en dirección 312 grados	38
Figura 4-6 Alternativa 4-A; extensión de 150 metros en dirección 222 grados	39
Figura 4-7 Alternativa 4-B; extensión de 250 metros en dirección 222 grados	39
Figura 4-8 Alternativa 5-A; construcción espigón de 150 m al sur de rompeolas en 2008	40
Figura 4-9 Alternativa 5-A; espigón de 150 metros al sur de rompeolas en 2008 y 2016	41
Figura 4-10 Alternativa 5-B; espigón de 250 metros al sur de rompeolas.....	41
Figura 6-1 Temperatura y precipitación mensual en Libera, 'Pacífico Norte' (IMN de Costa Rica).....	67
Figura 6-2 Localización del Puerto de Caldera con los elementos geográficos del área (escala 1: 50,000 'Barranca' del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica, 1969; las retículas miden 1 x 1 km)	68
Figura 6-3 Puerto Caldera, con las áreas de manglares y el área de depósito de dragado (imagen LandSat; cerca 1990).....	70
Figura 6-4 Puerto Caldera, con el rompeolas existente, la extensión, el área de sedimentación y el área a dragar (aproximadamente).....	70
Figura 6-5 Localización de la cantera "Dantas", 28 km al este de Puerto Caldera (la carretera planificada (línea interrumpida) se ha realizado más al norte).....	73

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 4-1 Costos de inversión de alternativa 1	43
Tabla 4-2 Costos de inversión de alternativa 2-A.....	44
Tabla 4-3 Costos de inversión de alternativa 2-B.....	45
Tabla 4-4 Costos de inversión de alternativa 3-A.....	46
Tabla 4-5 Costos de inversión de alternativa 3-B.....	47
Tabla 4-6 Costos de inversión de alternativa 4-A.....	48
Tabla 4-7 Costos de inversión de alternativa 4-B.....	49
Tabla 4-8 Costos de inversión de alternativa 5-A.....	50
Tabla 4-9 Costos de inversión de alternativa 5-B.....	51
Tabla 4-10 Comparación de alternativas (valores en USD 1000).....	52
Tabla 5-1 Comparación de diferentes Elementos de Armadura en el morro.....	58
Tabla 5-2 Duración del ciclo de dragado.....	64
Tabla 5-3 Características de draga propuesta	65



Lista de Profesionales Participantes del Consorcio Haskoning Nederland B.V. – Ballast Ham B.V.

Ing. Ronald Moor – Director de Proyecto
Ing. Olman Elizondo - Coordinador
Ing. Jan-Willem Jongbloed – Ingeniero Portuario
Ing. Bas Wijdeven – Especialista en Modelos Morfológicos
Ing. Marco de Groote - Especialista en Modelos Geotécnicos
Ing. Hans Murre – Especialista en Canteras
Ing. Pieter van der Klis – Especialista en Obras de Dragado
Ing. Filip Augustyns – Especialista en Evaluación Económica
Ing. Geert Hendriks – Especialista en Cantidades de Obra
Ing. Peter Encelen – Ingeniero Geotécnico
Ing. Merijn Zuidgeest – Ingeniero Portuario
Ing. Marco Westra – Especialista en Modelos de Propagación de Oleaje

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Puerto Caldera está ubicado a unos 100 kilómetros de la capital San José y es el principal puerto para tráfico de comercio internacional por la costa del pacífico de Costa Rica.

Hace aproximadamente 30 años se realizaron los estudios, diseños, construcción y financiamiento de Puerto Caldera, bajo un programa de asistencia técnica del Gobierno Japonés, y la construcción física del puerto se realizó en los años 1979, 1980 y 1981. El puerto se construyó con tres puestos de atraque con profundidades variando entre 7.5 y 11m. Con el fin de crear abrigo al oleaje proveniente de direcciones variables del Sur, y proveer tranquilidad suficiente en la dársena para las maniobras de frenado y de los buques y permitir la operación portuaria, se construyó un rompeolas de 250 metros de longitud. Este rompeolas, además de reducir la penetración del oleaje a la zona de muelles, tuvo un efecto secundario, el de funcionar como un obstáculo para el transporte de arena que ocurre principalmente dentro de la zona de rompiente de las olas, a lo largo de la costa, de sur a norte, generando sedimentación (azolve) al Sur y erosión al Norte del Puerto.

Al sur del rompeolas, la arena depositada generó el avance del perfil de la costa. Después de unos años desde el inicio de la construcción del rompeolas el perfil había avanzado lo suficiente para iniciar el paso del transporte de sedimentos por delante del morro del rompeolas, y a continuación formar un bajo alrededor de este morro. El bajo continuó prolongándose al costado interior del rompeolas ingresando al puerto y generando sedimentación en el puesto 1, reduciendo la profundidad disponible para los buques de mayor calado.

El Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) es la autoridad responsable del puerto. Antes de contratar el dragado para eliminar la arena sedimentada en el puerto se decidió prolongar el rompeolas para incrementar la capacidad de retención de arena y así reducir el ingreso al puerto. De esta manera se posterga en el tiempo la contratación de la siguiente campaña de dragado. Para definir la prolongación del rompeolas, se contó con el apoyo del Gobierno Japonés, y se construyó bajo un ángulo más perpendicular a las crestas de las olas, que el rompeolas inicial, con el fin de que la extensión sirva principalmente para retención de arena y menos para generar mayor protección al oleaje dentro del puerto.

El proceso de acumulación de arena continuó así como el avance del perfil de la costa hacia el morro de la extensión del rompeolas. Hasta 1995 se extendió sucesivamente en obras por administración el rompeolas, con unos 270 metros. Entre junio de 2000 y marzo de 2002 se realizó la contratación de la prolongación en simultáneo con la reparación y el mantenimiento del rompeolas original.

Dentro del mes de recibida la obra de prolongación, en la última semana de mayo del año 2002, y después de la ocurrencia de varios días de oleaje extraordinario, la extensión del rompeolas sufrió daños severos. Aproximadamente la mitad de la última prolongación se destrozó, rompiéndose los dolos que constituían la armadura de la estructura y se trasladó gran parte de estos y de las capas de roca intermedia de la estructura, con un ángulo de casi 90° con el alineamiento originalmente construido.

A raíz de la falla el MOPT contrató al consorcio de Haskoning Nederland B.V. y Ballast Ham Dredging para la ejecución el presente estudio. El consorcio había solicitado una donación no reembolsable del programa PESP del Gobierno de Los Países Bajos la cual fue otorgada.

En los años desde la construcción del puerto el proceso de sedimentación en el puerto ha generado la necesidad de varias campañas de dragado, y en la actualidad es imperativo realizar una nueva campaña de dragado a corto plazo.

Controles regulares por medio de batimetrías muestra que la acumulación de los sedimentos se efectúa primeramente al sur del rompeolas, luego alrededor del morro de éste y a continuación al costado interior del rompeolas.

1.2 Objetivos del Estudio

Los objetivos de este estudio se pueden resumir de la siguiente manera:

- a) Diagnóstico de la falla de la prolongación del rompeolas
- b) Estudio y evaluación de las alternativas para detener y/o dragar la sedimentación en el puerto, en conjunto con una evaluación del oleaje en el puerto, considerando combinaciones de obras de prolongación del rompeolas y/o espigones, y el dragado dentro del puerto.
- c) Análisis de Costo – Beneficio para seleccionar la alternativa a ser recomendada
- d) Diseño de las estructuras y las obras de dragado de la alternativa seleccionada, incluyendo una descripción del método de ejecución, especificaciones técnicas y estimados de costos

1.3 Estructuración del Informe

El informe se ha estructurado en tres partes independientes, a saber:

Parte A: el diagnóstico y evaluación de la falla de rompeolas y la conclusión

Parte B: la modelación del proceso morfológico en Puerto Caldera, se plantean alternativas para reducir la sedimentación dentro del puerto, se comparan los costos y se formula una recomendación.

Parte C: el diseño de las estructuras y el dragado que conforman la solución recomendada.

En Anexos se presentan las Especificaciones Técnicas, Planos y Lista de Cantidades para la solución recomendada.



PARTE A

DIAGNOSTICO DE FALLA DEL ROMPEOLAS

2 DIAGNÓSTICO DE FALLA DEL ROMPEOLAS

2.1 Generalidades

En la última semana de mayo del año 2002 falló el morro y parte del cuerpo del rompeolas de Puerto Caldera, tan solo unas semanas después de haber terminado la construcción del mismo, desplazándose la parte interior de la estructura hacia el norte, como se puede observar en la siguiente foto.

En este capítulo se analiza la o las causas probables de la falla. En principio se pueden definir cuatro causas para la falla de una estructura, a saber:

- **Falla de diseño.** Esto ocurre cuando la estructura en su totalidad o parte de ella no puede resistir las cargas a la que es sometida la estructura. También se considera falla de diseño si la estructura no cumple la función para la cual fue diseñada
- **Falla por sobrecarga de la estructura.** Esto sucede cuando la estructura esta sometida a cargas superiores a las cargas anticipadas en el diseño.
- **Falla por construcción defectuosa.** Esto ocurre si la estructura no fue construida tal como se diseño y/o por el uso de materiales defectuosos.
- **Falla por deterioro.** Esto ocurre por falta de mantenimiento de la estructura. A continuación se analizarán las tres primeras posibles causas de falla, la cuarta, falla por deterioro no se considera puesto que la obra acababa de ser recibido cuando falló, por lo tanto no había entrado a la fase de mantenimiento.



2.2 Falla de diseño

El diseño incluye los siguientes elementos que se evaluarán a continuación:

- a. La fórmula utilizada para el cálculo del peso de los elementos de la coraza
- b. Los valores de los parámetros de diseño utilizados
- c. El dimensionamiento de las capas de la estructura

2.2.1 Fórmula de diseño

El diseño que se utilizó para la extensión del rompeolas se encuentra en el informe “Study on the Maintenance Project of the Port of Caldera in the Republic of Costa Rica” [Ref. 1] de fecha 1986.

Este diseño se basa en la aplicación de la denominada fórmula de Hudson. Es necesario, hacer un breve comentario sobre el desarrollo de las fórmulas de diseño de rompeolas. La ingeniería civil para diseñar estructuras tradicionalmente se basa en una secuencia que comienza por construcciones sin diseño estructural, como los rompeolas de la edad media en el Mar Mediterráneo, luego se identifican unos parámetros representativos y se elabora una fórmula empírica, incluyendo factores supuestamente constantes que incorporan todo lo que no se sabe y que a veces se llaman “factores de ignorancia” y que son determinados por experimentos ya sea a escala o por falla. Con el tiempo estas fórmulas van incorporando mas parámetros, entre otras, por los resultados de modelaciones a escala, por profundización y mayor conocimiento de los fenómenos físicos que intervienen, por avances en métodos de computación y por experiencias prácticas. De esta manera el “factor de ignorancia” va siendo menos impreciso. En el caso particular de todos los procesos físicos que tienen que ver con el mar se presenta un problema adicional ya que estos fenómenos tal como el oleaje son procesos probabilísticos. Usualmente las fórmulas desarrolladas son fórmulas de tipo determinístico.

El elemento de mayor relevancia en el diseño de rompeolas es el peso y la configuración de la coraza. Primero Iribaren (1938) desarrolló una fórmula que fue modificada por el Waterways Experiment Station (1955) y luego por Hudson. Todas estas fórmulas sin embargo tienen la misma base, se calcula el peso de la coraza, donde las variables definidas son el tipo de material, el talud del rompeolas y la altura de ola (determinística) al cubo. El período de la ola no se incluye en la fórmula, pero como fue desarrollada para rompeolas en el Mar Mediterráneo, se supone que la fórmula se aplica para periodos de olas del orden de 10 a 12 segundos como máximo y provenientes de tormentas cercanas. Es decir un oleaje tipo Sea producido por vientos locales y no de oleaje generado a gran distancia con periodos de olas de 14-20 segundos tipo Swell producidos por tormentas lejanas. El factor K_D incorpora toda la “ignorancia” o falta de conocimiento fundamental sobre el comportamiento de los fenómenos físicos en interacción con la estructura del rompeolas.

$$W \geq \frac{(r_r H^3)}{(\Delta^3 K_D \cot a)}$$

en donde:

W es el peso de la roca (ton)

ρ_r es la densidad específica de la roca (ton/m³)

H es la altura de la ola (m)

Δ es $(\rho_r - \rho_a) / \rho_a$ (-)

ρ_a es la densidad específica del agua (ton/m³)

K_D es el factor empírico de acuerdo al tipo de elemento de la armadura (-)

α es el talud del rompeolas (-)

En la literatura se encuentran diferentes valores para el K_D para situaciones similares ([Ref. 3], [Ref. 4]. Se obtienen valores diferentes para coraza de roca y una variedad de elementos de concreto.

En vista de los altos pesos de roca necesarios, durante muchas décadas la atención ha estado en inventar elementos de concreto de gran variedad de formas, para obtener un K_D mayor y poder reducir el peso de armadura necesaria. Es así como han surgido los cubos, el tribar, los tetrápodos y los dolosse entre los más prominentes. Otros elementos han aparecido y desaparecido sin llegar a reconocimiento internacional. Estos elementos pasan de moda, cuando surge un nuevo elemento que parece muy eficiente y por lo tanto de bajo costo se utiliza hasta que falla.

Hoy en día están de moda los accropods (similar al core-lock) y recientemente se ha desarrollado el X-bloc.

En 1988 Van der Meer [Ref. 4] realizó ensayos extensivos de laboratorio, no para establecer mejores valores de K_D , como se había hecho durante décadas, sino justamente para reducir la dependencia del diseño de este factor y propuso nuevas fórmulas de diseño de rompeolas que no incluyen un K_D sino que se basan completamente en parámetros de oleaje y las condiciones del entorno físico.

Las fórmulas de van der Meer para olas rompientes son, para olas saltantes ('plunging waves'):

$$\frac{H_{2\%}}{\Delta D_{n50}} = 8.7 P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} x_m^{-0.5}$$

Para olas rizantes (surging waves)

$$\frac{H_{2\%}}{\Delta D_{n50}} = 1.4 P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right) \sqrt{\cot(\alpha)} x_m^p$$

en donde:

$H_{2\%}$ = altura de ola alcanzada y excedida el 2% del tiempo (m)

Δ = densidad relativa $(\rho_{roca} - \rho_{agua}) / \rho_{agua}$ (-)

D_{n50} = diámetro nominal [m]

P = permeabilidad [-]

S = nivel de daño [-]

N = número de olas [-]

ξ_m = parámetro de ola rompiente ($x_m = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{g T_m^2}{2 H_s p}}}$) (-)

α = pendiente del talud de la estructura [rad]

T_m = período promedio de ola [seg.]

Las fórmulas de van der Meer incorporaron parámetros que no se habían incluido antes en las fórmulas de diseño, como son:

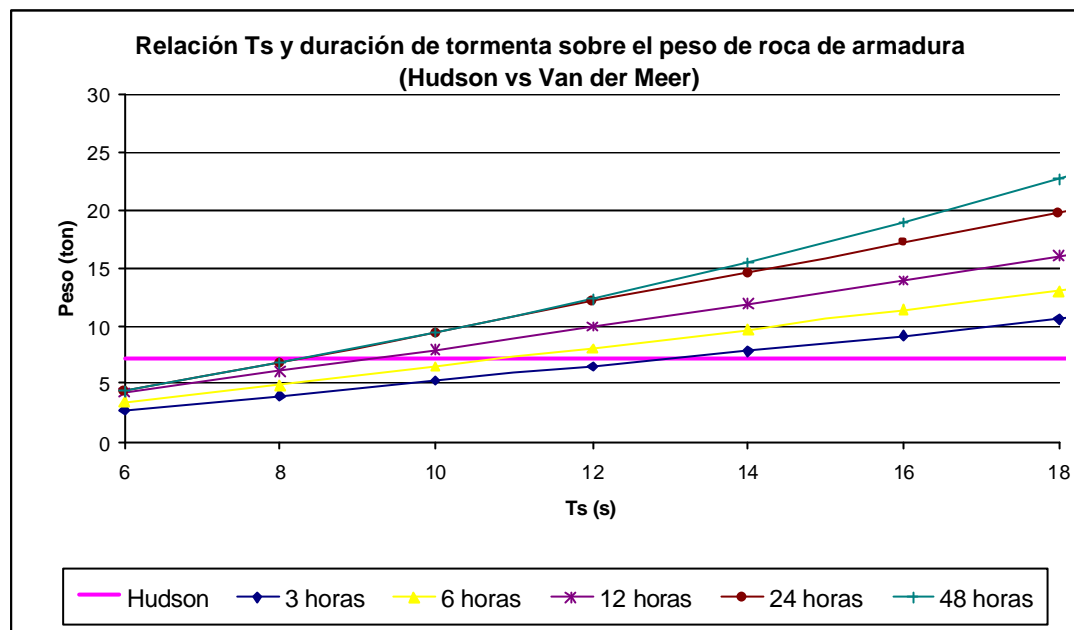
- el nivel de daño que se admite, con lo cual se incorpora un factor probabilístico en el diseño
- las fórmulas anteriores solo contemplaban el tipo de ola saltante (plunging), la nueva fórmula distingue entre los tipos de rompiente de ola
- el periodo de la ola, que es un elemento muy importante p. ej. En el océano pacífico por las olas de período grande (12-20 segundos) que se presentan con frecuencia.
- la permeabilidad de la estructura, que tiene una importancia sobre la capacidad de la estructura de disipar energía.
- la duración de la tormenta, importante en relación a la carga repetitiva

Estas fórmulas calculan solo el peso de roca natural para la coraza. Por lo tanto el cálculo es independiente de cualquier factor de ignorancia K_D . Para utilizar elementos de concreto en la coraza en vez de roca, se debe hacer una relación que es completamente la responsabilidad del diseñador. Por lo usual el diseñador asigna valores de K_D a la roca y al elemento de concreto que considere y hace una multiplicación simple. La selección de K_D 's dependen exclusivamente de su conocimiento y experiencia en el tema.

Se concluye que la fórmula utilizada para el diseño fue la última variante de una fórmula empírica y determinística, utilizada durante 40 años, sin haber sido modificada en su concepto original. Desde 1988 esta fórmula ha sido superada por la fórmula de Van der Meer (para roca), que se basa en investigación fundamental en modelo a escala reducida de los fenómenos físicos e incorpora un enfoque probabilístico avanzado.

Para evaluar la importancia de la fórmula, se realiza una comparación para determinar la influencia tan solo del período de la ola sobre el resultado. Para este fin se calcula con la fórmula de Hudson y la de van der Meer, el peso de roca de coraza necesario, utilizando los valores de los parámetros reportados en el informe [Ref. 1].

La siguiente figura ilustra como ejemplo, el peso de la roca de armadura calculado por las dos fórmulas, donde se han mantenido constantes e iguales todos los parámetros de diseño excepto el período de la ola y la duración de la tormenta. Mientras que la fórmula de Hudson da un solo valor, en este caso 7 toneladas, la fórmula de van der Meer da un peso requerido que varía según los parámetros seleccionados entre 3 y 23 toneladas!



Nota: para el ejemplo se utilizaron los siguientes parámetros:

Profundidad (m)	10
Densidad Roca (kg/m ³)	2600
P (-)	0.4
S (-)	3
Pendiente de talud (-)	1:2,5
Hos (m)	4.6
K _D (-)	4

Se menciona que en muchos países se sigue utilizando la fórmula de Hudson por familiaridad y experiencia con esta fórmula.

2.2.2 Parámetros de diseño

Los principales parámetros de diseño son:

- La altura de ola
- El talud del rompeolas
- El valor de K_D supuesto para el dolos
- El periodo de la ola
- El porcentaje de daño admisible
- La permeabilidad
- La altura de coronación

Sin embargo como la fórmula de Hudson solo utiliza los primeros tres parámetros: la altura de ola, el talud del rompeolas y el valor de K_D, nos limitaremos a comentar estos parámetros.

H - Altura de la ola de diseño

La altura de ola de diseño que se aplicó en la fórmula de Hudson fue la ola significativa, H_s, que es el promedio del tercio de las olas más altas. Si bien la fórmula original de

Hudson recomienda este valor, en la literatura [Ref. 4] se recomienda utilizar $H_{10\%}$, que es el promedio del 10% de las olas más altas.

Para el diseño se utilizó una altura de ola de $H_s = 4,6$ m.

La relación teórica entre H_s y $H_{10\%}$ es aproximadamente $H_{10\%} = 1,27 H_s$ [Ref. 6], [Ref. 7]

En el informe [Ref. 1] se calculó que el dolos debería ser de 2,5 toneladas, se fabricaron dolos de 3,5 toneladas; sin embargo una aplicación variando solamente la altura de la ola en la fórmula de Hudson, con una ola de diseño $H_{10\%} = 4,6 * 1,27 = 5,84$ m habría determinado que se necesitaban dolos de 5,1 toneladas.

Talud del rompeolas

La estabilidad de los elementos de coraza se obtiene por:

- Peso propio, la resistencia a ser elevado y sacado del talud
- Entrelazamiento, para transmitir cargas a los elementos vecinos
- Forma; determina la porosidad (capacidad de disipar energía), la esbeltez y las protuberancias ofrecen resistencia al volteo

Para dolos, que son elementos de mucha esbeltez, se requiere un talud no muy empinado. El talud de 1:2,5 utilizado en el morro del rompeolas es correcto así como un talud de 1:2 para el cuerpo.

K_D

El seleccionar un valor para K_D es un tema complejo, que tiene un alto grado de subjetividad y depende mucho del momento, de la experiencia, el conocimiento y juicio del diseñador. En este K_D que determina el peso del elemento de coraza, se esconden principalmente los siguientes fenómenos:

- El ángulo de ataque de las olas
- La efectividad del entrelazado de los elementos
- La efectividad de la forma del elemento
- La interacción olas y estructura

En las fórmulas antiguas como la de Hudson, además en este factor se reunían todas las demás incógnitas tales como: el periodo de la ola, la duración de una tormenta, la porosidad de la estructura, daño admisible, tipo de rompiente de ola, etc.

Se distingue un K_D para el cuerpo del rompeolas con ataque de las crestas de las olas más o menos paralelo al rompeolas y el morro. El morro es más importante porque el oleaje rompe sobre el (o justo delante) y ataca los costados donde el apoyo de un elemento por otro es menor. Por consiguiente los valores de K_D para el morro casi siempre son menores a los del cuerpo. Asimismo se distingue entre olas rompientes o no-rompientes.

El valor de K_D para prácticamente todos los elementos de coraza varía en el tiempo, inclusive para la roca que es el elemento más simple y más estudiado, y con el que se tiene la mayor experiencia. El valor de K_D recomendado por el SPM [Ref. 6] para el morro de roca ha bajado de 3,5 en 1973 a 2,0 en 1984.

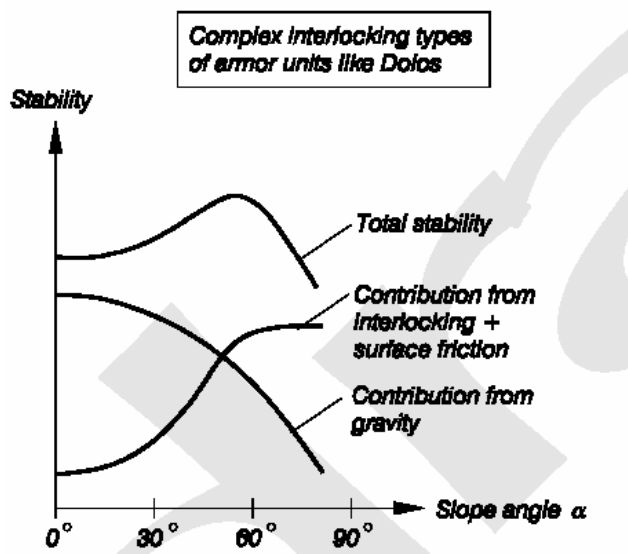
Con respecto a los dolos, este fue inventado hace por la década de 1960-1970 por Eric Merrifield en Sudáfrica. De ensayos de laboratorio se encontró un $K_D = 24$ para la condición de no-daño y un $K_D = 38$ para 2% de daño aceptable [Ref Design & Construction of Ports and Marine Structures, Alonzo DeF. Quinn, 1972}. El autor de la de la referencia recomienda, en 1972, utilizar un $K_D = 6$ para olas que rompen sobre el morro y hasta máximo un $K_D = 15$ para ola no-rompiente. Estos valores se basan, como todos los elementos de concreto nuevos que se inventan, en ensayos en laboratorio hidráulico. Se utilizó exclusivamente un talud de 1:2.5. En los ensayos a escala reducida se debe compatibilizar las características hidráulicas del agua y las características físicas de las estructuras sobre las que actúa el agua. Esto lleva a esquematización de la realidad, a distorsiones de escalas, y a modificaciones del entorno físico que se desea representar. Un aspecto importante es que no se reduce a escala el material de los elementos de coraza, ni sus propiedades físicas. Por lo tanto, en los modelos solo se evalúa el desplazamiento de los elementos de concreto mas no su integridad física o su resistencia estructural.

Al romperse los primeros dolos en la práctica se pasó a reforzarlos con acero, para mejorar la resistencia a la rotura por tensión del concreto y luego se pasó a reducir el valor de K_D a valores del orden de 14 a 18.

En 1975-78 ocurrió un fenómeno desastroso para los dolos. El rompeolas del puerto de Sines en Portugal construido con dolos, prácticamente se destruyó a raíz de una tormenta. Los dolos habían sido ensayados en modelo a escala, pero con taludes de 1:1,5 que nunca se habían utilizado a la fecha. Este incidente generó una suspicacia a nivel mundial de los dolos que durante muchos años no se usaron. Durante largo tiempo se desestimaron los elementos de concreto muy esbeltos y sofisticados y se prefirieron los cubos y otras formas más sólidas

Investigaciones posteriores, y el hecho que la forma del dolos presenta un gran potencial de entrelazado, rehabilitaron los dolos y se comenzaron a usar de nuevo. En la actualidad el valor de K_D se estima entre 10-12.

La estabilidad del dolos se obtiene por una suma de peso propio y entrelazado; la siguiente figura muestra un ejemplo de la contribución relativa a la estabilidad del dolos para diferentes ángulos del talud del rompeolas. Para un talud de 1:2,5 aproximadamente el 20% de la estabilidad del dolos se obtiene por entrelazado. Esta distribución supone un oleaje dentro de los parámetros de diseño. Si el oleaje excede los criterios de diseño el componente de estabilidad por entrelazado debe aumentar exponencialmente puesto que el componente de estabilidad por gravedad no puede aumentar.



El tema del refuerzo de los dolos es otro de discusión y apreciación importante. El criterio de Haskoning es que para dolos de poco peso y oleaje de corto periodo no hace falta reforzarlos (con carácter indicativo se mencionan dolos menores a 2 toneladas de peso y periodos de oleaje menores a 6 segundos). Para dolos de mayor peso y olas de periodo mayor, como el que se presenta en Puerto Caldera, se deben reforzar los dolosse.

Un recalcu de peso de dolos necesario, con la fórmula de Hudson, utilizando $H_{10\%} = 5,84$ m y $K_D = 10$ resulta en un dolos de 10,2 toneladas.

Considerando el cálculo inverso, se puede estimar que los dolosse de 3,5 toneladas construidos, equivalen a una ola de diseño, por la fórmula de Hudson, de $H_{10\%} = 5,15$ m utilizando el factor de $K_D = 20$. Si se reduce el factor de K_D a 10, la ola de diseño utilizada equivale a $H_{10\%} = 4,1$ m, equivalente a un H_s de 3,2 m.

Se concluye que el peso de los dolosse construidos es insuficiente debido a la aplicación de la ola de diseño H_s en vez de $H_{10\%}$ y el valor de K_D (20 en vez de aproximadamente 10), y la falta de refuerzo la cual ha reducido significativamente la estabilidad de los dolos por efecto de entrelazado.

2.2.3 Dimensionamiento de las capas

La estabilidad de la coraza depende de dos factores importantes:

- Las características del oleaje, altura, período, duración y ángulo de ataque.
- La estabilidad de las capas interiores, la subcoraza y el núcleo

Ya se trató el primer tema y a continuación se entrará en el tema de la estabilidad de la subcoraza y el núcleo. La función de estas capas es de crear una transición entre el fondo marino que consiste de arena y los dolos, graduando las capas de tal forma (graduación de las rocas y dimensión de la capa) que se realice una función de filtro que no permita la succión de la arena debajo del rompeolas, en especial del pie, a través de la estructura, lo cual llevaría a asentamientos del pie, a continuación a deslizamiento de la coraza provocando la rotura de algunos elementos para luego con una tormenta desplazarse los elementos rotos de dolos.

El diseño del rompeolas de Caldera especifica una capa de subcoraza de 0,2 a 1 tonelada. Usualmente se usa roca de W/10-W/15 siendo W el peso de la armadura. Esto resultaría en un rango de 230-350 kg. Sin embargo en vista de la porosidad de los dolos es conveniente aumentar el nivel superior de roca, un rango de 0,2-1 tonelada parece adecuado. No se indica la graduación que debe cumplir esta capa por lo cual no se puede establecer si la función de filtro se cumplió cabalmente.

Se cambió en la zona interior del rompeolas la subcoraza por dos capas, una de 1-4 toneladas que en realidad viene a actuar como coraza en algunas zonas y una segunda capa que se mantiene en 0,2-1 tonelada. Consideramos que el cambio ha mejorado el diseño original.

Para el núcleo las guías indican W/200-W/4000, es decir de 1- 20 kg. Este tamaño de roca es demasiado pequeño para poder ser construido con el oleaje, se necesita roca del orden de 300-350 kg para que se pueda avanzar la construcción del núcleo sin perder demasiado material en el proceso. El cambio de especificación del material del núcleo (roca de cantera) de 20-200 kg y/o piedra bola de río de mayor a 70 kg según pliego de licitación original, a 27-270 kg lo consideramos una mejora para la ejecución y la estabilidad de la obra.

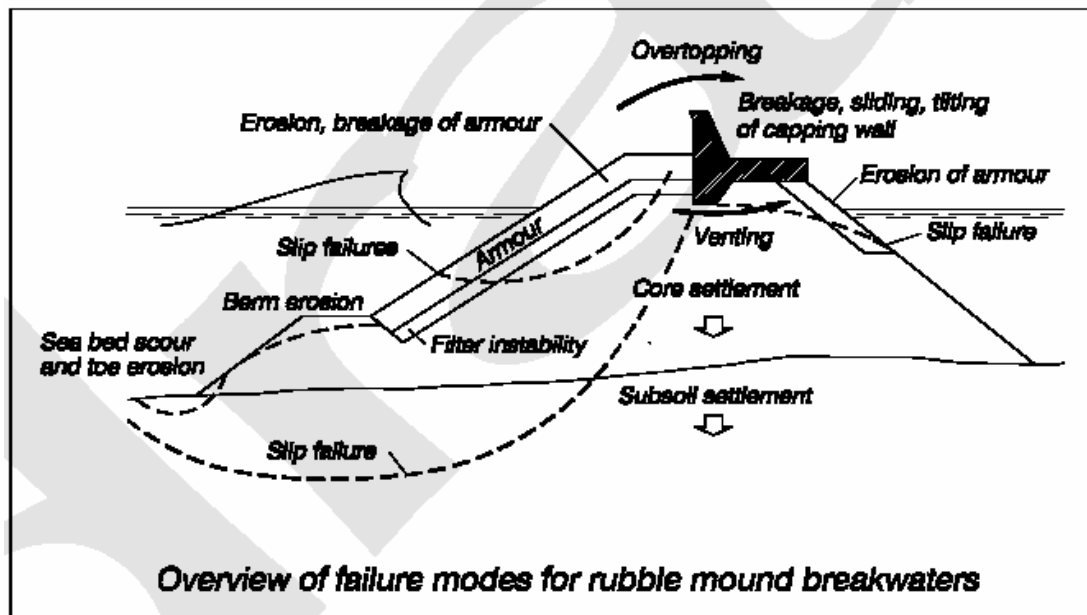
Los cambios relacionados a la capa de filtro original de dos hileras de roca de 0.2 - 1 ton, por una hilera de 0.2 - 1 ton y otra hilera de 1-4 ton mejora de función de filtro y por consiguiente también la estabilidad de la estructura.

Se concluye que los pesos de las rocas en la subcoraza y el núcleo están dentro de los rangos aceptables pero no se han especificado graduaciones por lo cual no se puede establecer si la función de filtro es correcta.

2.3 Falla por sobrecarga de la estructura

2.3.1 Inventario y evaluación de las posibles sobrecargas

La siguiente figura muestra en forma esquemática las principales causas teóricamente posibles de falla de un rompeolas.



Fuente: CEM 2003

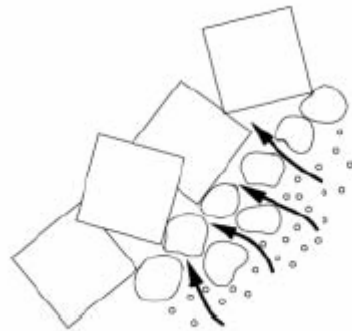
Las posibles causas de falla son:

- Asentamiento del subsuelo
- Falla por deslizamiento (slip) al lado interior
- Rebase (overtopping)
- Inestabilidad de filtro
- Socavación de la berma (pie del talud)
- Rotura e inestabilidad de los elementos de la coraza
- Falla por deslizamiento (slip) al lado exterior

A continuación se presenta una evaluación de cada una de estas posibles causas

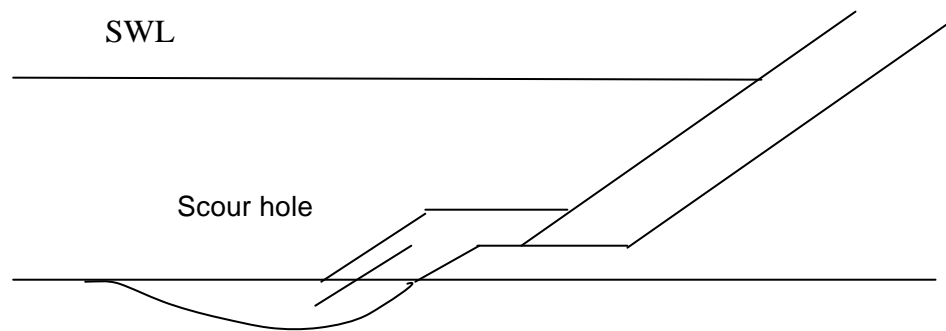
- El suelo es granular y el asentamiento debe haber ocurrido durante la construcción, no después.
- El ataque y el daño ha sido en el morro, no se aplica el daño por deslizamiento de la cara interior.
- Igual al punto b (overtopping).
- Debido a que el filtro no contó con una especificación de gradación existe la posibilidad que haya habido succión de arena del subsuelo a través del rompeolas en la zona del pie del talud. Se estima que esto ha sucedido.

La siguiente figura ilustra lo que sucede si la función de filtro no se cumple, generando asentamiento del pie.



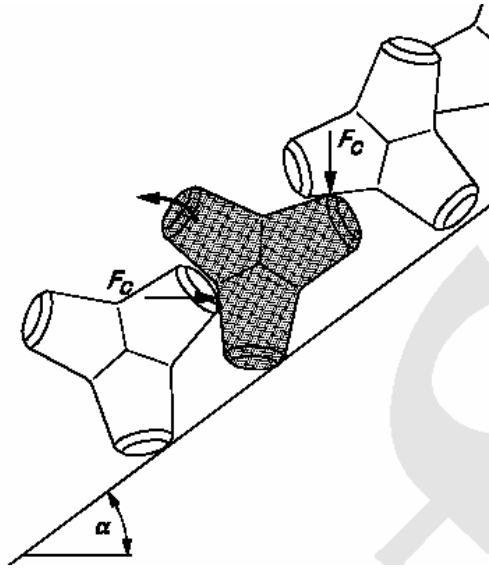
- e. La socavación de la berma se estima que puede haber ocurrido.

En los planos “as built” se observa la colocación de un montículo de roca de núcleo fuera del pie del rompeolas. Si el filtro fuera defectuoso podría haber socavación en el pie del talud. En caso de ocurrir, las rocas se deslizan para llenar el hueco. En la siguiente figura se muestra esquemáticamente el caso.



- f. Falla por rotura e inestabilidad de los elementos de coraza.

El peso de los elementos de la coraza es insuficiente para el oleaje que se presentó. Esto tuvo como consecuencia que los elementos fueron extraídos de la coraza. La falla de la estructura se facilitó por la falta de refuerzo de los elementos. Este fenómeno de inestabilidad y rotura constituye la principal causa de la destrucción de la estructura. La figura siguiente ilustra esquemáticamente el fenómeno mencionado.



Los elementos extraídos durante la tormenta son la principal causa de la falla.

La foto ilustra la rotura típica



A continuación los dolosse se desplazaron como se puede apreciar en la siguiente foto.



- g. Se ha evaluado la estabilidad del subsuelo del rompeolas de Puerto Caldera con el objeto de comprobar si la inestabilidad del subsuelo puede haber causado la falla del rompeolas de Caldera (slip a través del subsuelo). .

Para el cálculo de estabilidad, se ha utilizado la Figura X-6 del anexo B. Esta sección transversal constituye el diseño típico del rompeolas [Ref. 1] y fue el contratado para ser construido. En el Anexo B se realizan los cálculos demostrándose que no ha ocurrido falla de estabilidad del talud.

Se concluye que la principal causa de la falla es la extracción y rotura de los elementos de dolos del talud por el oleaje.

2.3.2 Causa del inicio de la falla

Usualmente las estructuras marinas flexibles como son las obras permeables en roca, con el paso del oleaje van asentándose y acomodándose aumentando su nivel de estabilidad con relación a la obra recién construida. Sobre todo el morro que usualmente es el último en terminarse. En el caso de la prolongación del rompeolas en Puerto Caldera este proceso de aumento de estabilidad no pudo tener lugar.

El rompeolas falló durante un periodo de oleaje extraordinario de unos tres días, tal como se puede observar en las fotografías siguientes. Si bien no hay mediciones del oleaje, con las fotografías y observaciones visuales se puede estimar de manera aproximada la altura del oleaje que ocurrió en esos días.

En el comunicado a la Comisión Nacional de Emergencia el día 28 de mayo se menciona que se estaba presentando una condición atmosférica extraordinaria frente a las costas de Perú y Ecuador, que se ha mantenido durante tres días, y ha generado vientos del sureste de hasta 24 nudos, lo cual produjo un oleaje asociado con máximos

superiores a los 4 metros de altura, en sitios como la ciudad de Puntarenas, Paquera, Caldera, Tárcoles, Jacó y Punta Leona. La comunicación de la CNE se basa en información de la NOAA de la cual se sabe que subestima la altura de las olas en condiciones extraordinarias.

Se muestran dos de fotos tomadas durante la tormenta. Si bien es difícil estimar la altura del oleaje de las fotos con exactitud, tomando la altura del rompeolas (MLWS +8.7m) y el nivel del agua durante la tormenta como referencia, se confirma que las olas significantes alcanzaron alturas superior a los 4 metros.

Por lo tanto se puede concluir que las olas ocurridas en los últimos días de mayo del 2002, han excedido considerablemente la ola de diseño real (H_s 3,2 m). Al aproximarse las olas desde el mar hacia el morro aumenta en altura por un bajo que se presenta delante de la estructura. Si se supone que este aumento es del orden de 20% esto equivale a una ola de $H_s > 5$ metros. Esto causa la extracción y rotura por choques de los dolos, y el desplazamiento. Esto sin duda fue la causa de la destrucción, en pocos días, del rompeolas de Caldera.

El traslado de los dolosse, los pedazos de dolosse rotos y el material de sub coraza y núcleo unos 60 m hacia el costado interior del rompeolas tiene que haber sido durante el oleaje extremo. Las olas se aproximan en forma oblicua al morro, al romper sobre éste se genera un gran traslado de masa de agua el cual es lo suficientemente fuerte para mover los dolosse, los pedazos de dolosse y piedras en forma horizontal, hasta llegar a una zona mas tranquila donde la energía de la ola se ha disipado en fricción con el costado del rompeolas, por difracción y refracción y por fricción de fondo.





2.4 Falla por construcción defectuosa

La construcción del rompeolas se ha hecho totalmente desde tierra, es decir por encima de la estructura en construcción. Normalmente se coloca el núcleo y luego se coloca la subcoraza sin dejar mucho espacio libre (según los informes de avance este espacio normalmente estaba por los 6 m). Cuando los pesos de la subcoraza lo permiten se deja un espacio mas largo antes de avanzar la coraza misma, ya que esta operación es muy laboriosa y se pierde tiempo. Donde la subcoraza es de 0,2-1 ton se ha debido avanzar rápido también con los dolosse.

La parte mas difícil del avance está en la correcta construcción del pie del talud. Este se encuentra bajo agua, las olas mueven el material del núcleo y lo desagregan. Con los pesos de las rocas del núcleo es prácticamente imposible construir el diseño con la precisión necesaria en presencia de oleaje.

Una evaluación rápida de los planos “as built” hace suponer que se ha procurado construir bien el perfil exterior del rompeolas, sin embargo la precisión con la que se presentan las capas interiores son difíciles de verificar.



Se concluye que no hay evidencia de que la construcción tuviera influencia en la causa de la falla.

2.5 Conclusión

Se han evaluado tres causas de falla con las siguientes conclusiones:

- El diseño del rompeolas es deficiente. Un recálculo del peso necesario de los dolosse, con la fórmula de Hudson, suponiendo que el oleaje de diseño es correcto y utilizando $H_{10\%} = 5.54$ m y un $K_D = 10$ resulta en un dolos de 10.2 toneladas. (dolos construido 3,5 toneladas y diseñado 2,5 toneladas).
- La altura del oleaje que ocurrió en los tres días a fines de mayo del 2002, excedió en más del 25% el oleaje de diseño. El oleaje ha causado la extracción de los dolosse el talud y el desplazamiento de los mismos.
- El dolos obtiene su estabilidad por una suma de estabilidad por peso y estabilidad por entrelazado. Primero entra a trabajar la estabilidad por peso, a medida que las olas van aumentando la estabilidad por peso llega a su máximo y aumenta rápidamente la estabilidad por entrelazado. En vista de que el peso es insuficiente hubo una rápida y alta demanda sobre la estructura de aumentar la estabilidad por entrelazado. La falta de refuerzo no permitió aumentar la estabilidad por entrelazado significativamente llevando a la rotura de los dolosse.

PARTE B

COMPARACION DE ALTERNATIVAS PARA REDUCIR LA SEDIMENTACION

3

MODELACIÓN MORFOLÓGICA

3.1 Introducción

Para la modelación de los procesos morfológicos en Puerto Caldera y la evaluación de efectos de posibles obras marítimas, se utiliza el modelo de simulación morfológica UNIBEST. Este es un modelo uni-linear, desarrollado por el Laboratorio de Hidráulica de Delft (Países Bajos) es adecuado para evaluar balances de sedimento en el tiempo. Proporciona las opciones para modelar el transporte de sedimento en tiempo y espacio, así como los cambios correspondientes en la línea de la costa considerando tanto una costa no perturbada como una costa con estructuras.

El modelo se compone de dos módulos:

- Un modulo para el transporte litoral de sedimentos (LT) y
- Un modulo para evaluar la dinámica de la línea de costa (CL).

UNIBEST son las siglas en inglés para el transporte uniforme de sedimentos a lo largo de la costa. El módulo LT permite simular corrientes y transporte litoral inducidos por corrientes de marea y oleaje en un perfil de costa arbitrario. La dinámica de la zona se deriva de un módulo incorporado para las olas, considerando los procesos principales de refracción linear y disipación no linear de energía por rompimiento de la ola y fricción de fondo.

El transporte litoral y la distribución de éste sobre el perfil de la costa se pueden evaluar con diferentes fórmulas disponibles de transporte de sedimentos. Para cada caso se debe seleccionar la fórmula más adecuada para representar la situación específica.

En la naturaleza el transporte litoral es función de una serie de parámetros, entre los que más influencia tienen sobre el resultado, está el ángulo entre las olas rompientes y la línea de costa, y la altura del oleaje. Entre más grande el ángulo, mayor es el transporte y lo mismo vale para la altura de la ola. En caso de que la orientación de la costa cambie p.ej. debido a la sedimentación causada por la construcción de un rompeolas o un espigón, el transporte litoral también cambia a lo largo de la costa afectada por la sedimentación. UNIBEST genera una gráfica con un rango de ángulos posibles de la costa y el transporte de sedimentos correspondiente para cada ángulo. Esto, a lo largo de la costa genera un gradiente de transporte de sedimentos.

Los transportes calculados para una serie de líneas de costa se utilizan como datos de entrada del módulo CL, que calcula el cambio en la línea de costa en el tiempo. Este modelo simula los cambios de la línea de costa debido a los gradientes de transporte litoral a lo largo de una costa semi-uniforme, con base en la teoría de línea simple (single line theory). El módulo CL simula el efecto morfológico de diferentes configuraciones y obras costeras, tales como cerros, espigones permeables y no-permeables, enrocados, malecones, rompeolas, molos, sistemas artificiales de alimentación de playa como relleno hidráulico, etc. El modelo puede utilizarse para el estudio y análisis de medidas de control de erosión así como para el diseño y del impacto sobre franjas costeras adyacentes.

3.2 Objetivos de la Simulación

El principal objetivo del modelo es simular el comportamiento de la línea de costa al sur del rompeolas del puerto y cuantificar el volumen de sedimentos que entra al puerto en el tiempo. Se ha evaluado y calibrado el transporte litoral con base en información histórica de la costa y volúmenes de sedimentos dragados en la dársena del puerto. La sedimentación dentro del puerto se simula con el modelo y se compara con los valores reales de los volúmenes de dragado en el puerto de acuerdo con la información existente.

Con base en este procedimiento, se calibra el modelo para representar el transporte de sedimentos litoral esquematizado. Sin embargo, se debe observar que el transporte litoral modelado es un promedio a largo plazo que en la realidad puede mostrar fluctuaciones considerables en el corto plazo, de un año a otro. Después de la calibración se introducen medidas de obras costeras posibles en el modelo y se evalúan los efectos de estas medidas sobre el ingreso de arena al puerto, para a continuación determinar la eficiencia de cada medida y su costo para el proceso de selección de la alternativa de solución a ser recomendada.

3.3 Área del modelo y balance de sedimentos

3.3.1 Área del Modelo

Las siguientes figuras muestran la zona de interés para la modelación del proceso morfológico.

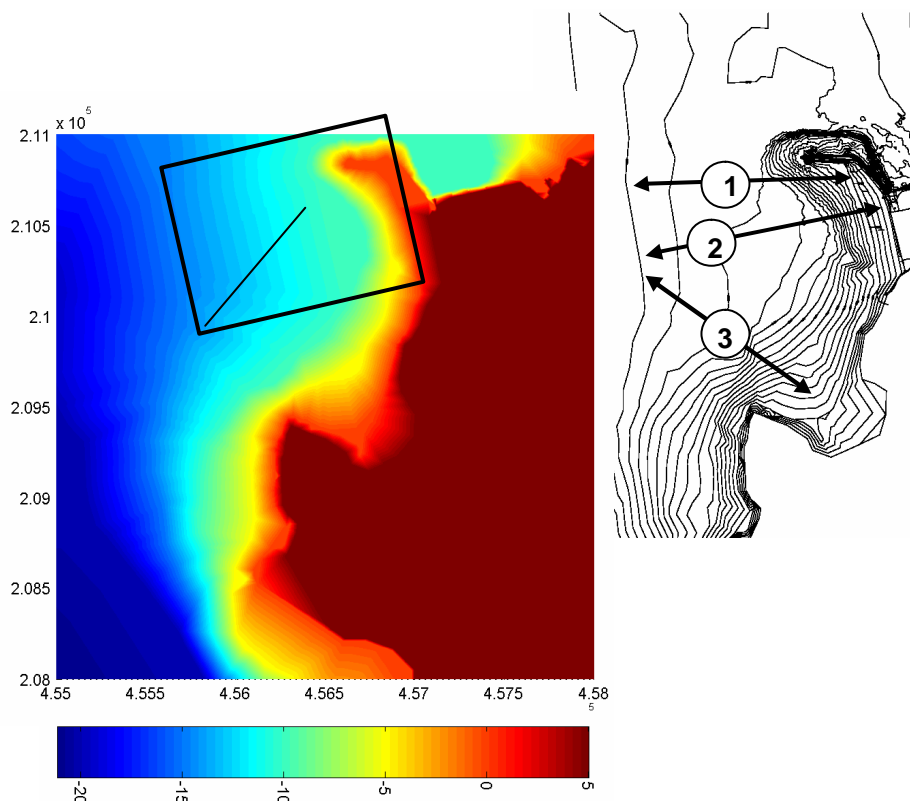


Figura 3-1 Área del modelo

La costa al sur de Puerto Caldera consiste de bahías sucesivas. El extremo mas al sur se encuentra en la sombra del punto llamado Coralillo, que se extiende unos varios cientos de metros mar adentro. La figura anterior muestra la batimetría de la zona, y la ubicación de tres perfiles transversales típicos de la costa. La pendiente de la costa aumenta de sur a norte, teniendo una gradiente de casi 1:25 hacia el rompeolas. La figura anterior muestra el modelo y la dirección predominante del oleaje.

Se ha escogido el área del modelo de tal forma que los efectos de difracción sean mínimos con el fin de asegurar un oleaje esquematizado relativamente uniforme en el borde del modelo. La orientación del modelo es paralela a la línea de costa, 168 grados norte, con la perpendicular a la playa a 258 grados (ver figura 3.1).

En dirección longitudinal los límites del modelo se encuentran en el sur cerca del enrocado construido y al norte detrás del rompeolas.

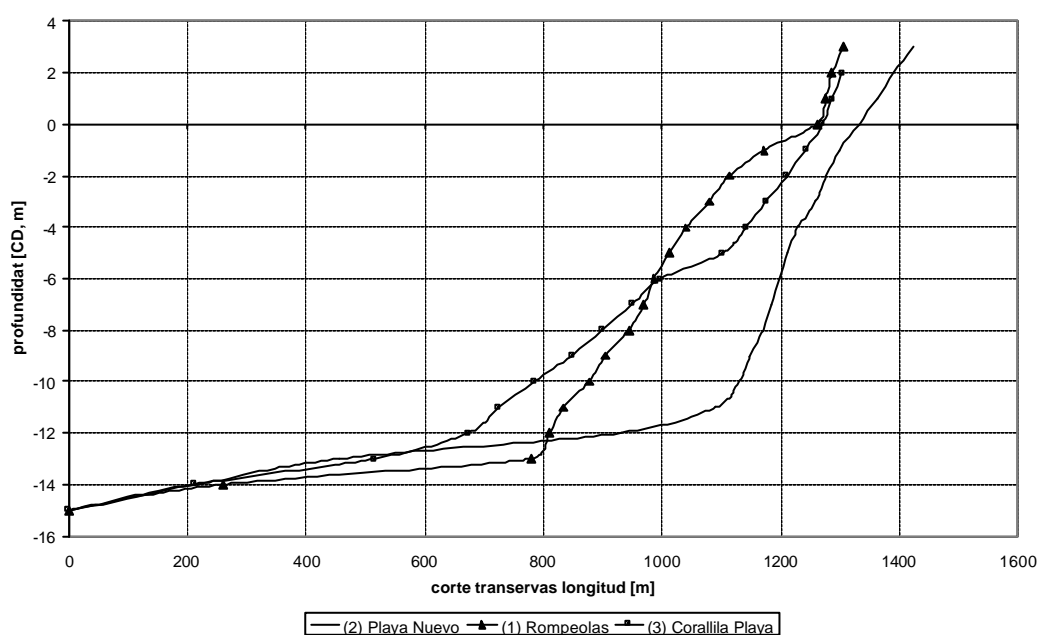


Figura 3-2 Corte Transversal longitudinal

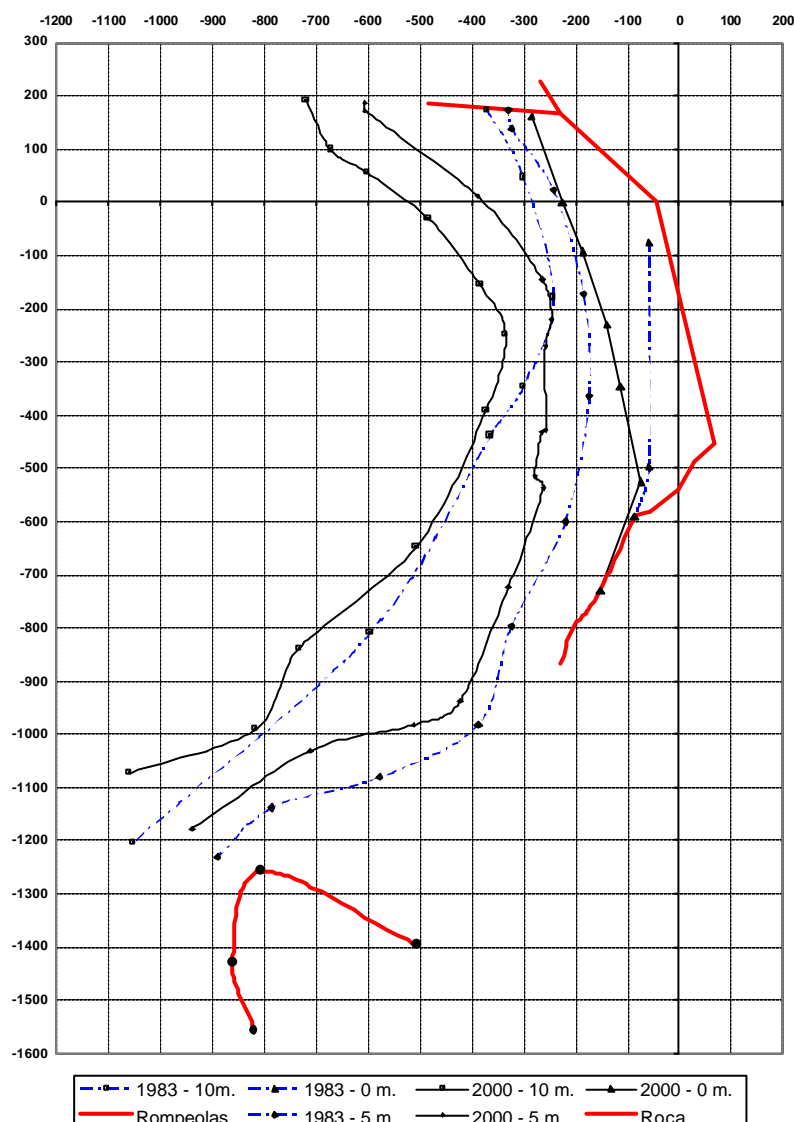


Figura 3-3 Posición de isóbatas y rompeolas en los años 1983 y 2000

3.3.2 Balance de Sedimentos

Con base en los cambios históricos de la línea de costa se ha estimado el avance promedio de la línea de costa cerca del rompeolas. Las comparaciones de la línea de costa en el área del balance (-600m a 150 m en el eje vertical) resultan en un volumen total de sedimento acumulado en el período 1983-2000 de 1.4 millones de m³. A partir del año 1980 hasta 1999, se ha dragado en el puerto un total de 1.086.515 millones de m³ de sedimento. En el año 2000, el volumen de sedimento al oeste del morro del rompeolas y justo al norte del mismo era del orden de 420.000 m³. El total de los volúmenes de dragado acumulados y el bajo que se encontraba adyacente al rompeolas resulta en un by-pass promedio, equivalente a unos 80.000-85.000 m³/año.

3.4 Modelación del transporte litoral

Para la modelación del transporte litoral de sedimentos a lo largo del perfil, se ha utilizado la fórmula de Bijker [Ref 4].

La fórmula de Bijker calcula el transporte del sedimento en función del oleaje y una corriente litoral. Consiste de dos componentes, un componente de transporte de sedimentos de fondo y un componente de transporte de sedimentos suspendidos. La fórmula de transporte de sedimentos de fondo proviene de la fórmula de Kalinske-Frijlink para el transporte de sedimentos de arrastre en ríos. A esta fórmula se le ha agregado la fórmula de transporte de sedimentos suspendidos de Einstein, que es directamente proporcional al transporte de sedimentos de fondo. El transporte total consiste en la suma de los transportes de sedimentos de fondo y suspendido.

La fórmula de Bijker utiliza los siguientes parámetros:

- d_{50} : Diámetro que representa el 50% del tamaño de la arena [m]
- r : factor que representa la fricción de fondo [m]
- g : aceleración de gravedad [m/s^2]
- Δ : densidad relativa del material de fondo [-]
- μ : factor de ondulación del fondo, que representa el efecto de fricción en la forma del fondo [-]
- d_{90} : Diámetro del tamaño de la arena excedida en 10% [m]

Además de los parámetros de capacidad de transporte de sedimento tales como oleaje y corrientes de mareas, existen parámetros de resistencia al transporte, de los cuales la fricción de fondo y el diámetro de la partícula son los más importantes.

La fricción de fondo influye en el transporte del sedimento de dos maneras. En primera instancia, cuando la fricción aumenta, la velocidad de la corriente litoral disminuye. En segundo lugar, para una velocidad determinada, la fórmula de Bijker generalmente calcula un transporte de sedimentos inferior cuando aumenta la fricción. Estas dos influencias se refuerzan mutuamente.

La influencia de la gradación del material de fondo sobre el transporte del sedimento es significativa. El tamaño del material de fondo influye en la velocidad de caída e incluso, en el factor de ondulación. Un aumento en diámetro disminuye el transporte del sedimento.

La pendiente de la costa tiene poco efecto en el transporte de sedimentos. Un aumento en la pendiente resulta en un aumento de la velocidad de la corriente litoral, resultando en un transporte más alto del sedimento por unidad de ancho. Sin embargo, puesto que se reduce el ancho de la zona de rompiente, el transporte neto del sedimento no es muy diferente al transporte sobre un perfil más ancho.

Para la simulación morfológica de la zona de Caldera se escogieron los siguientes valores del sedimento y el fondo:

D_{50} : 250 μm

D_{90} : 400 μm

Velocidad de caída: 0.025 m/s

Fricción de fondo: 0.05 m.

Densidad de material arenoso: 2650 kg/m^3 (en la realidad existe un porcentaje de vacíos de un 40% por lo cual un metro cúbico de arena pesa unos 1.8 ton/m^3 .)

Factor de ondulación: 0.05

Se ha corrido el modelo LT con un clima de oleaje esquematizado. Las olas entran en el modelo en aguas profundas y se transforman de acuerdo al ángulo con las líneas de igual profundidad por los fenómenos de refracción y poca profundidad. Se ha incluido un total de 125 condiciones medias de ola, extraídas del clima costa afuera, que representan el clima medio anual del oleaje. Cada una de las condiciones representa una combinación única de altura de ola, período, dirección y duración. Cabe mencionar que para el transporte de sedimentos solo interesa el oleaje promedio y no los extremos tanto altos como bajos.

Las corrientes de marea tienen duraciones y velocidad prácticamente iguales y opuestas para cada ciclo de marea (hacia el sur y hacia el norte), se ha supuesto que el efecto neto superpuesto sobre la corriente litoral, aunque exista, sea insignificante y por consiguiente, no se consideran en los cálculos del transporte litoral.

La capacidad teórica de transporte litoral calculado, tomando en consideración la orientación de la línea de costa en la localización del rompeolas del puerto está por el orden de 1,3 millones de $\text{m}^3/\text{año}$.

Aparentemente, la capacidad de transporte de sedimentos es muy superior a la oferta de sedimentos disponible. Esto significa que la sedimentación al sur del rompeolas y en la dársena del puerto es determinada por la oferta de sedimentos que pasa por Punta Coralillo y no por la capacidad de transporte. Por otro lado esto significa que los cambios de forma de la costa y del perfil cuando cambia el oleaje, ocurren en muy corto tiempo.

La gran capacidad de transporte disponible significa que en momentos de oleaje alto hay un proceso rápido de transporte de sedimentos transversal y paralelo a la costa formando bajos. Esto implica que puede ingresar arena al puerto aún cuando según el modelo esto no tiene lugar. Asimismo se puede formar un bajo alrededor del morro antes de lo pronosticado por el modelo.

3.5 Modelación de cambios costeros y bypass de sedimentos

3.5.1 Transporte de sedimentos

Antes de efectuar los cálculos de variación de la línea de costa, se calcula con el módulo LT de UNIBEST el transporte del sedimento. El transporte se calcula para el ángulo básico (0 grados), que representa el ángulo de la línea de costa en el área del modelo seleccionado. Luego los transportes se calculan para un número de ángulos diferentes que puedan presentarse en la evaluación de las variaciones de la línea de costa.

La orientación de la zona activa del perfil de la sección transversal de la costa puede cambiar junto con el ángulo de la línea de costa para cada cálculo del transporte, con el fin de poder modelar la refracción de ola para otras orientaciones de la línea de costa correctamente. Con base en las características del oleaje, y los cálculos del transporte

de sedimentos para los ángulos de la línea de costa, se puede aproximar la función del transporte mediante la siguiente función analítica:

$$S = C_1 * q_r * e^{-(C_2 * q_r)^2}$$

En donde: $q_r = q - q_{equilibrium}$

El ángulo de equilibrio es el ángulo de la costa para el cual el transporte de sedimentos es cero. En la siguiente figura se muestra el transporte de sedimentos resultante para diferentes ángulos entre la línea de costa y las crestas de las olas, para la costa de Caldera. Se observa que el ángulo de equilibrio de la costa de Caldera es de 31 grados con respecto a la orientación básica de la línea de costa. En 31 grados la línea cruza el eje horizontal. Asimismo, se observa que la línea cruza el eje vertical en 1,3 millones de m³ de transporte de sedimentos por año.

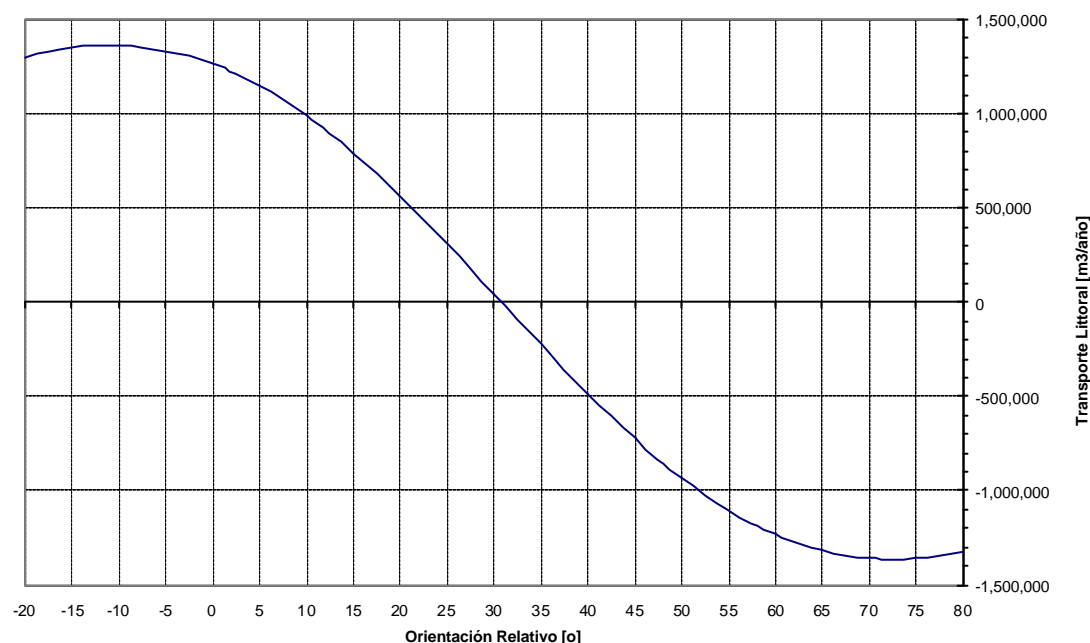


Figura 3-4 Relación ángulo de costa versus transporte de sedimentos

Los coeficientes C_1 y C_2 son: -0.054 y -0.017. El ángulo de equilibrio es de 31 grados relativo a la línea base del modelo que es de 168 grados norte por lo cual el ángulo de equilibrio es e 199 grados norte.

3.5.2 Calibración del Modelo

Para calibrar el modelo de la línea de costa, se ha simulado con CL de UNIBEST el desarrollo de la línea de costa y el by-pass desde la construcción del puerto hasta el año 2000. Se ha corrido el modelo a partir del 1979 hasta el año 2000, aplicando una alimentación en el borde cerca de Punta Coralillo de 125,000 m³/año. El modelo se ha

calibrado sin considerar la extracción de arena de la playa que se ha estimado en 10,000 m³/año. Haskoning considera que la extracción de arena de la playa nueva debe ser incentivada puesto que contribuye a reducir la arena que ingresa al puerto, aumentando la capacidad de almacenar arena al sur del rompeolas.

A continuación se mencionan las principales esquematizaciones del modelo. Se aplicó un factor de reducción de la longitud del rompeolas para tener en cuenta la influencia de procesos costeros que el modelo no toma en consideración por ser un modelo unidimensional. Por ejemplo la existencia de corrientes localizadas ("rip-currents") al costado del rompeolas, que causan transporte de sedimento perpendicular a la costa.

Generalmente se estima la longitud efectiva del rompeolas en el modelo UNIBEST entre el 90 y 95 % de la longitud perpendicular real. Esto por el hecho de que el transporte de sedimentos comienza a profundidades mayores al nivel de la línea de playa. En este caso se ha tomado un valor de 95%.

La Figura siguiente muestra las prolongaciones sucesivas del rompeolas desde la construcción inicial. En la figura se calcula para cada prolongación el volumen del by-pass anual (línea verde), el by-pass acumulado (línea azul), el volumen almacenado al sur del rompeolas (línea naranja) y la posición del extremo del rompeolas (línea morada).

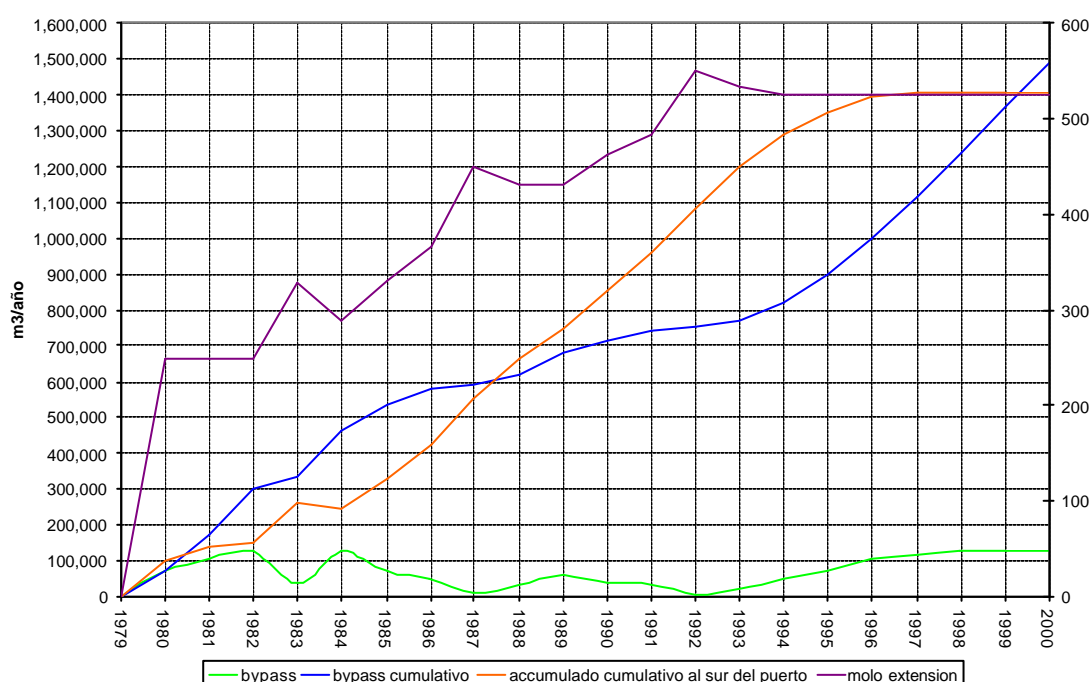


Figura 3-5 Prolongación del rompeolas y by-pass entre los años 1979 y 2000

El by-pass anual fluctúa como resultado de las extensiones del rompeolas y también por retroceso del mismo por destrucciones parciales.

Del balance de sedimentos presentado se observa que en el año 2000, se han almacenado cerca de 1.4 millones de metros cúbicos de arena al sur del rompeolas. El modelo muestra un incremento en el volumen de arena en la costa al sur del puerto que va de 0.2 en 1983 hasta 1.4 millones de metros cúbicos de arena en el año 2000, esto significa un aumento de 1.2 millones de metros cúbicos de arena. El by-pass según el equilibrio de los volúmenes de sedimentos está por el orden de 1.5 millones de metros cúbicos de arena. El modelo muestra un volumen de by-pass de 1.5 millones de metros cúbicos en el 2000.

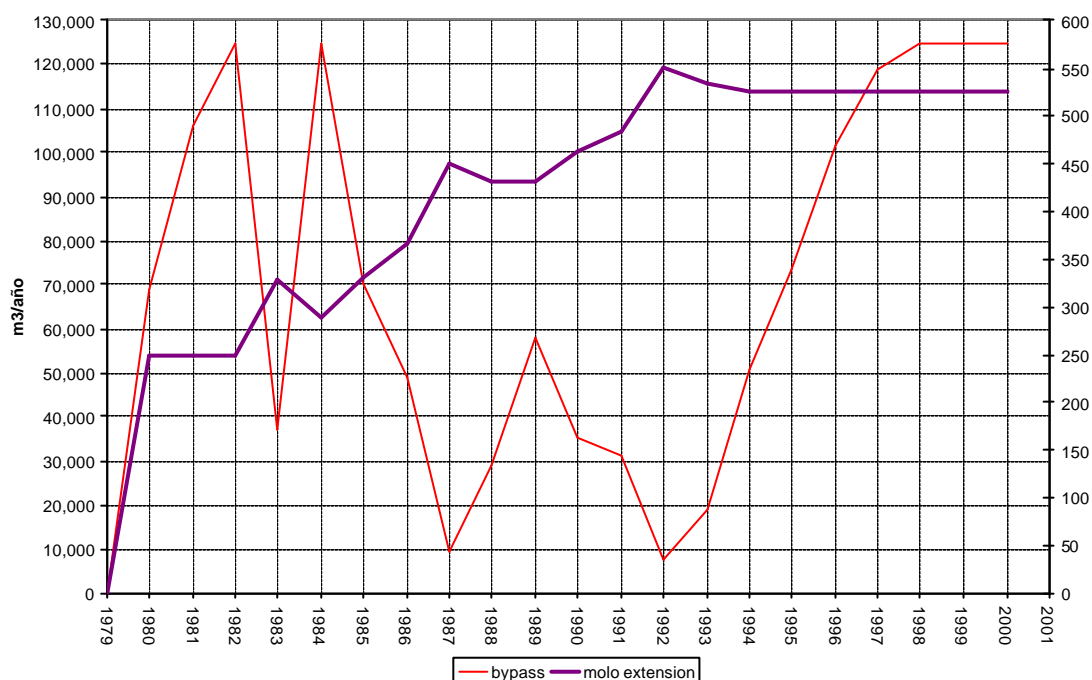


Figura 3-6 Extensiones y reducciones del rompeolas y by-pass de sedimentos

La figura anterior muestra las extensiones y reducciones del rompeolas por fallas del mismo en combinación con los cambios del volumen de by-pass.

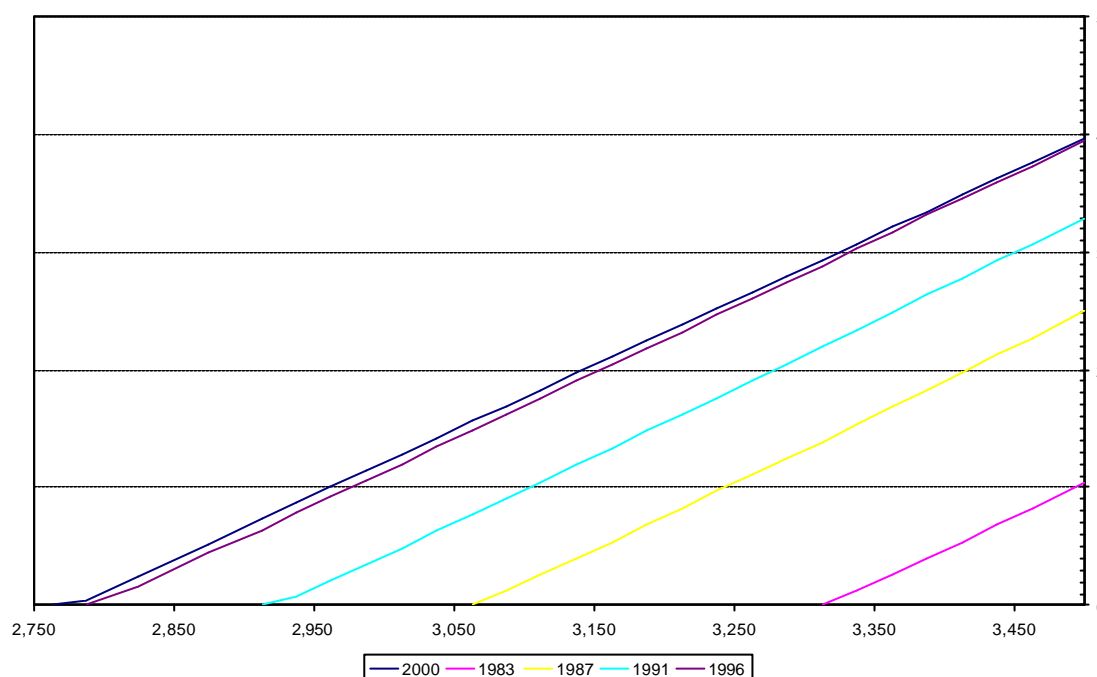


Figura 3-7 Cambios de costa al sur del rompeolas modelado por UNIBEST

La figura anterior muestra el avance de la línea de costa al sur del rompeolas modelado por UNIBEST. El eje vertical al lado derecho corresponde a la proyección del rompeolas perpendicular a la línea costa con un azimuth de 168 grados.

3.5.3 Análisis de Sensibilidad

La calibración del modelo ha resultado en la selección de un determinado número de valores. La mayoría de estos parámetros se han seleccionado con base en datos de mediciones. Otros valores se han aplicado por experiencia y porque se sabe que el impacto sobre el resultado no es significativo. El valor más importante que ha sido encontrado mediante la calibración es el volumen de entrada de sedimentos en el borde suroeste de 125,000 m³/año. Sin embargo, con el fin de analizar la sensibilidad de este valor se han efectuado dos corridas adicionales con una diferencia de 10% mayor y menor con respecto al valor encontrado. Las corridas adicionales se realizaron con un valor de 90% del by-pass calibrado y otra con 110% de dicho by-pass. En la siguiente gráfica se muestran los resultados, donde se observan los volúmenes de by-pass en el tiempo si no se realizan obras para detener el ingreso de arena al puerto y sin variar los volúmenes de extracción de arena en la playa nueva.

La línea morada representa la longitud del rompeolas mientras que la línea roja muestra el efecto de la última extensión del rompeolas sobre el by-pass. El eje izquierdo muestra el volumen de transporte de arena por año y el eje derecho muestra la longitud del rompeolas.

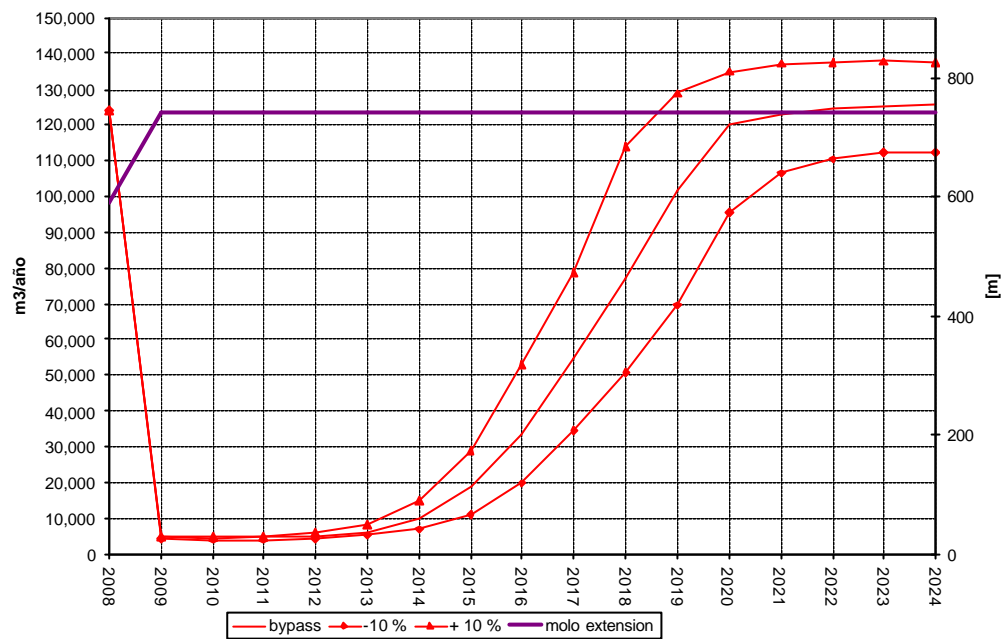


Figura 3-8 Análisis de Sensibilidad; Alimentación del modelo con 90%, 100% y 110% del volumen de arena en el borde sudoeste del modelo.

4

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

4.1 Las alternativas planteadas

Para analizar soluciones al problema de sedimentación de Puerto Caldera, en principio solo hay dos alternativas globales factibles del punto de vista técnico, a saber:

- Dragar la arena que entra al puerto en campañas de dragado sucesivas
- Detener el ingreso de arena ya sea mediante la construcción de un espigón independiente al sur del puerto o la prolongación del rompeolas. Estas alternativas no pueden detener el ingreso de arena en su totalidad pero reducen la necesidad y por ende la frecuencia de las campañas de dragado

De estudios anteriores realizados por Haskoning (1997) se determinó que ninguna de las soluciones que involucran la retención de arena, incluyendo soluciones de by-pass de arena del sur del puerto hacia el norte, evita el ingreso de arena al puerto en su totalidad. Asimismo, las soluciones con base en bypass son más costosas en operación y mantenimiento y tienen un nivel de riesgo de falla mayor al aceptable.

Por lo tanto, además de la alternativa de resolver la sedimentación únicamente por dragados sucesivos, se han planteado solo alternativas de retención de arena ya sea mediante la prolongación del rompeolas para posiblemente reducir en simultáneo, el nivel de oleaje en el puerto o mediante la construcción de un espigón al sur del puerto, específicamente para retener arena.

Para detener y reducir el ingreso de arena al puerto la solución más eficiente es la de construir un espigón o un rompeolas perpendicular a la dirección predominante de las cresta de las olas. Esto significa un alineamiento con el Norte de 222 grados, es decir un ángulo de 45° hacia el sur a partir del morro existente.

En este caso la arena se extiende hacia el sur pero va creciendo la costa y en un momento dado la arena comienza a pasar por delante del morro. El volumen de arena que pasa aumenta gradualmente y forma un bajo alrededor del mismo. Después de un tiempo se debe decidir si se prolonga el rompeolas o espigón o se continúa el dragado.

El alineamiento óptimo del rompeolas para reducir el oleaje en el puerto requiere un ángulo paralelo a la dirección de las crestas de las olas, es decir en una dirección de 312 grados o bajo un ángulo de 45 grados hacia el norte partiendo del morro del rompeolas existente. En este caso en teoría no se detiene mas arena y se debe continuar dragando el puerto similar a la opción cero.

Además, es posible la construcción de un rompeolas con un alineamiento intermedio entre las dos alternativas mencionadas. Esta solución contribuye a ambos aspectos, detener arena y mejorar las condiciones de oleaje dentro del puerto.

También existe la "opción-cero" que es la alternativa de no implementar ninguna extensión del rompeolas o espigón retenedor, sino dejar la situación tal como esta actualmente, construir un morro al final del rompeolas actual y dragar cualquier volumen de arena que ingrese al puerto.

Para el cuerpo se prevé que ocurrirán fallas sucesivas localizadas para la cual se recomienda realizar monitoreos y cuando la magnitud y extensión de las fallas lo justifique realizar un trabajo de reparación con cubos de concreto. No se considera viable de punto de vista de costos reemplazar los dolos existentes en el cuerpo.

Tanto para la opción cero como para las alternativas de construir un espigón al sur del puerto, deberá preverse la protección del morro del rompeolas existente para evitar falla futura del mismo.

La solución intermedia resulta en una reducción de entrada de sedimentos en combinación con una mejora de las condiciones de oleaje en el puerto. En este momento no parece ser necesario generar mayor tranquilidad en el puerto sin embargo considerando el Plan Maestro Preliminar para Puerto Caldera, más allá de los próximos 20 años, que contempla la ampliación del puerto hacia el este y nordeste, en algún momento será deseable una mejora en la tranquilidad.

Se plantean 5 alternativas las cuales se muestran en la siguiente tabla:

Alternativa	Descripción
1	Opción-cero; dragar todo el volumen de sedimento que entra en el puerto y reforzar el morro del rompeolas existente
2-A	Extensión del rompeolas en el alineamiento actual con 150 metros y dragado
2-B	Extensión del rompeolas en el alineamiento actual con 250 metros y dragado
3-A	Extensión del rompeolas actual con 150 metros, dirección 312 grados y dragado
3-B	Extensión del rompeolas actual con 250 metros, dirección 312 grados y dragado
4-A	Extensión del rompeolas actual con 150 metros, dirección 222 grados y dragado
4-B	Extensión del rompeolas actual con 250 metros, dirección 222 grados y dragado
5-A	Espigón de 150 m al Sur del rompeolas existente y dragado y reforzar el morro del rompeolas existente
5-B	Espigón de 250 m al Sur del rompeolas existente y dragado y reforzar el morro del rompeolas existente

En el Anexo C se muestra esquemáticamente la ubicación de las cuatro alternativas de extensión del rompeolas y el espigón al sur. En las alternativas con extensión se ha supuesto que esta extensión se realizará en el año 2008, considerando el tiempo prudencial necesario para realizar las gestiones administrativas de aprobación, reserva de recursos y proceso de licitación y adjudicación de contrato de obra.

Para cada alternativa se evaluarán los siguientes aspectos:

- La sedimentación dentro del puerto
- La penetración de oleaje
- El costo de la alternativa

4.2 Evaluación de la Sedimentación para cada Alternativa

4.2.1 Alternativa1-Opción-cero

La siguiente figura representa el ingreso de sedimentos para el caso de que no se prolongue el rompeolas ni se construya un espigón. La extensión realizada entre los años 2000 y 2002 ha generado una reducción en el ingreso de arena al puerto por by-pass. Sin embargo la sedimentación empieza a crecer directamente después de haberse terminado la extensión. A largo plazo se estima que el by-pass llegue a ser del orden de los 125,000m³/año. Asimismo, se espera que alrededor del año 2006 ya se haya llegado a un 90% del by-pass máximo a largo plazo.

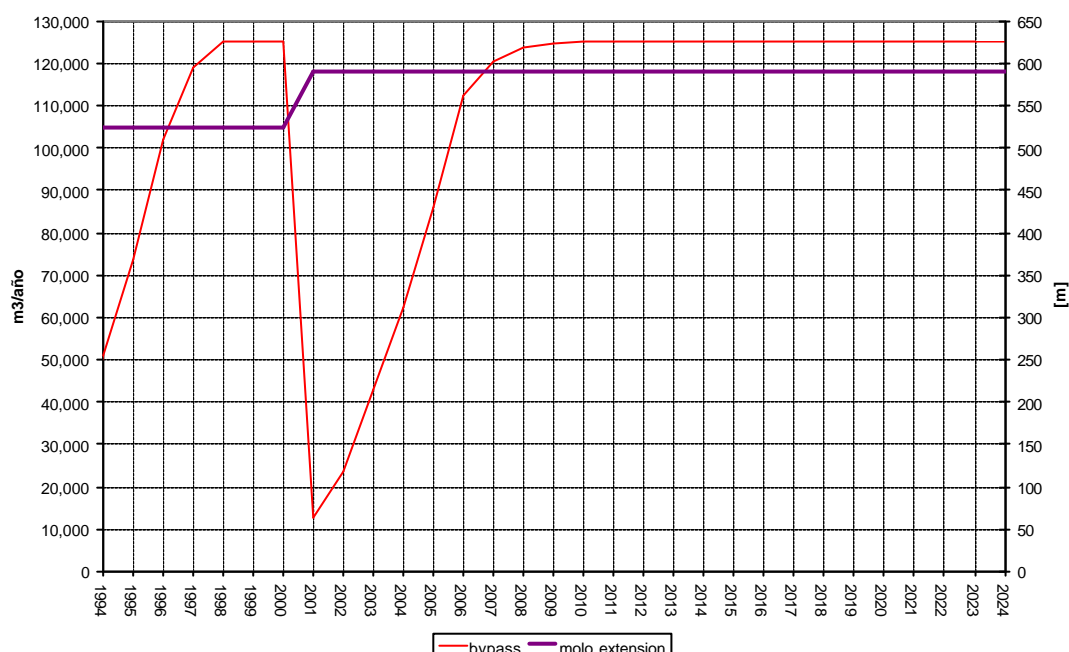


Figura 4-1 Alternativa 1-Opción-cero; sin extensión del rompeolas

4.2.2 Alternativa 2-Prolongación rompeolas existente (A y B)

Se observa que ambas alternativas resultan en una reducción del by-pass después de la construcción de la extensión de hasta unos 5,000 m³/año inmediatamente después de terminada la obra. Para la extensión de 150 metros tarda unos 5 años antes de que el by-pass pase los 10,000m³/año, mientras que para la extensión de 250 metros dura alrededor de 11 años para alcanzar dicho valor. Una vez que el by-pass empieza a crecer ambas alternativas muestran la misma velocidad de crecimiento del by-pass.

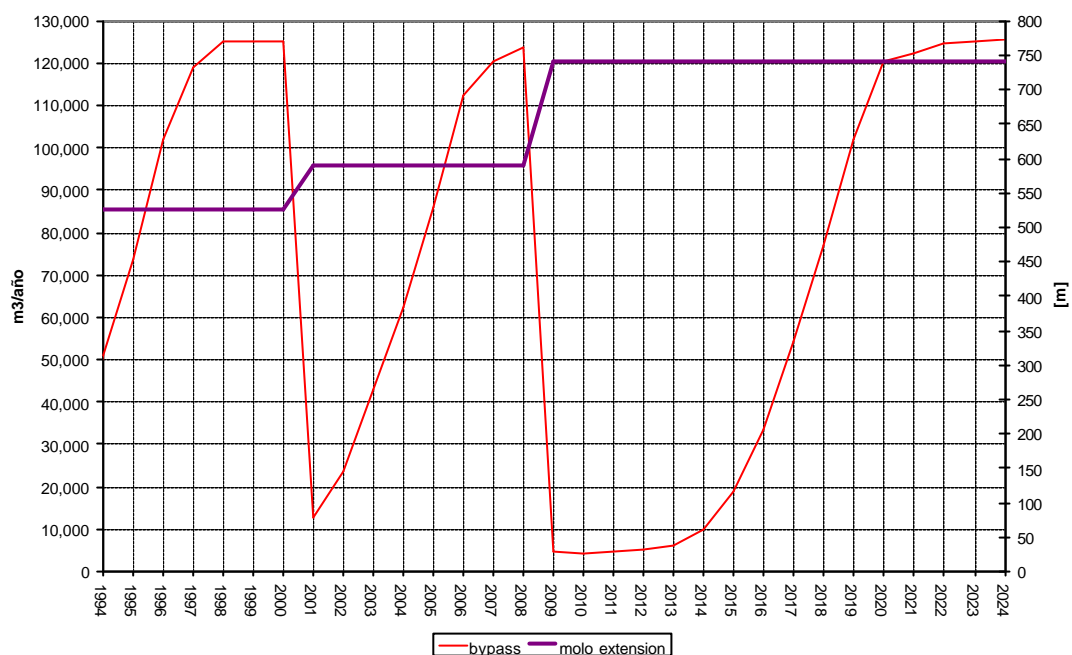


Figura 4-2 Alternativa 2-A; extensión de 150 metros del rompeolas existente

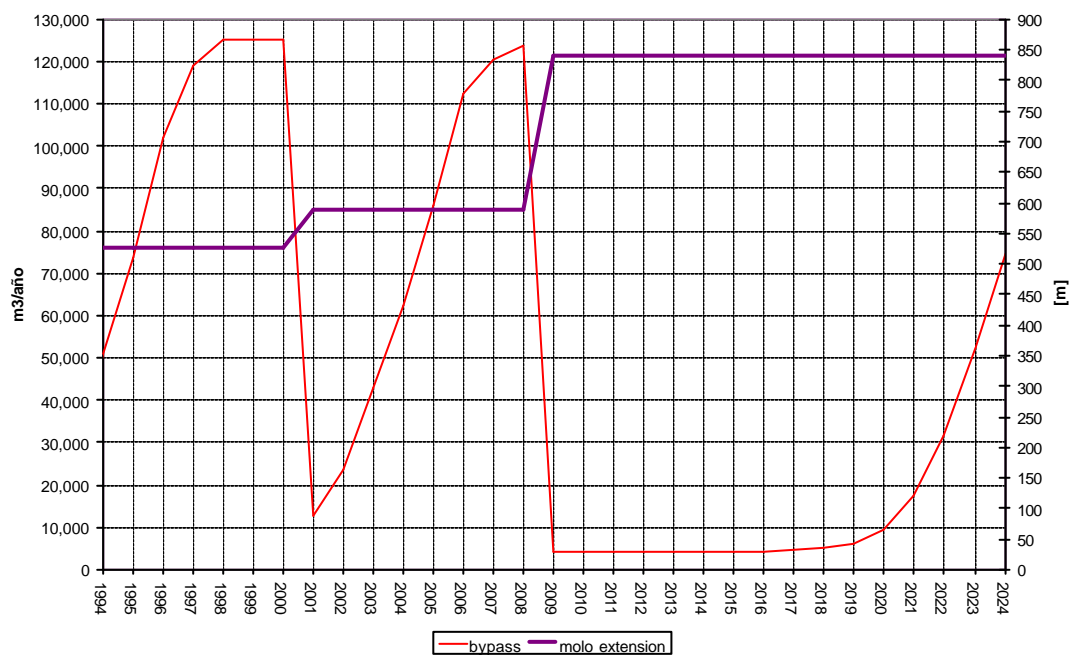


Figura 4-3 Alternativa 2-B; extensión de 250 metros del rompeolas existente

4.2.3 Alternativa 3, prolongación rompeolas a 312° (A y B)

Se observa que esta alternativa reduce el by-pass de arena justo después de construir la extensión del rompeolas hasta alrededor de 5,000 m³/año. Sin embargo el by-pass empieza a crecer inmediatamente después. En el caso de la extensión de 150 metros en la dirección de 312 (42 grados hacia el norte partiendo del morro del rompeolas existente) el by-pass habrá llegado al 90 % del by-pass máximo en no más de 7 años. Por supuesto, la extensión de 250 metros evita el by-pass durante un periodo mas largo. El 90% del by-pass máximo se alcanza después de unos 10 años de construida la prolongación.

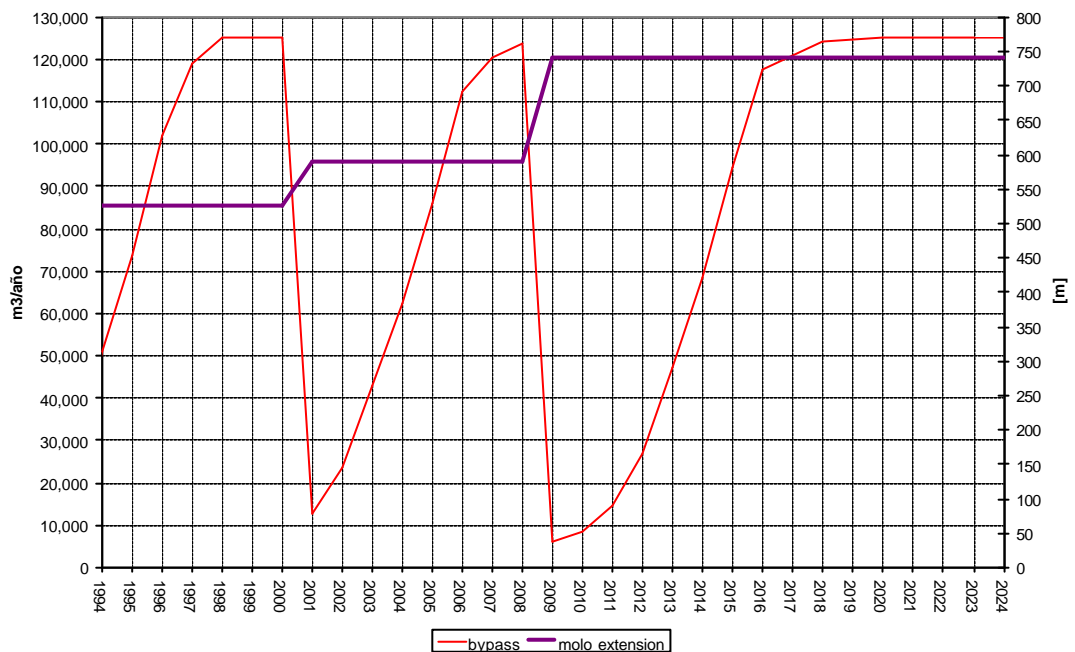


Figura 4-4 Alternativa 3-A; extensión de 150 metros en dirección 312 grados

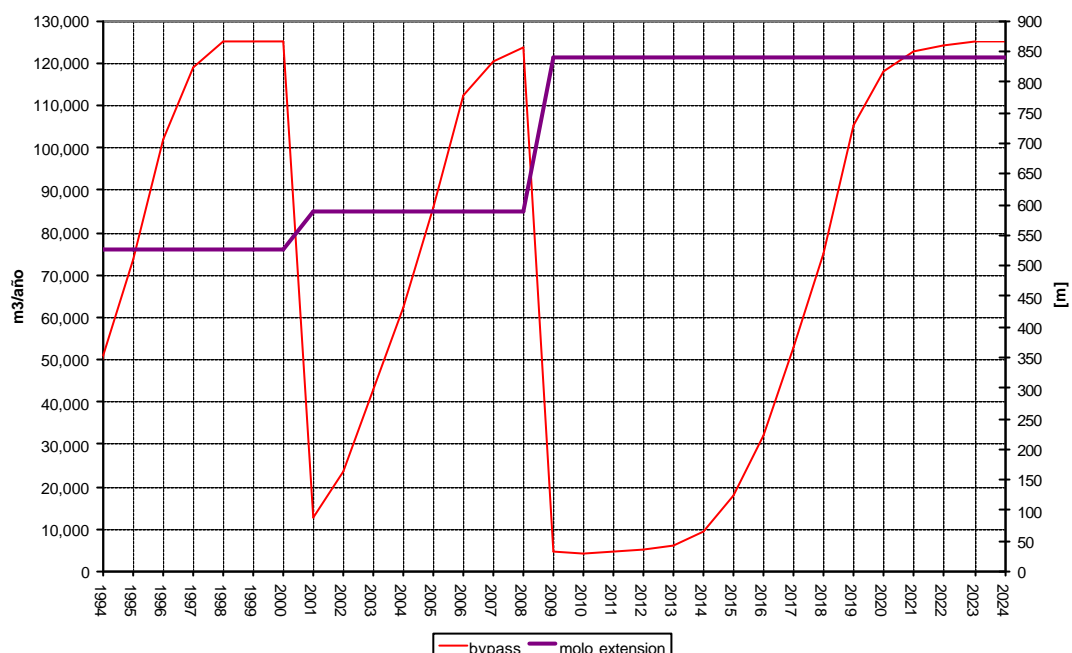


Figura 4-5 Alternativa 3-B; extensión de 250 metros en dirección 312 grados

4.2.4 Alternativa 4, Prolongación rompeolas a 222° (A y B)

Se observa que ambas alternativas resultan en una reducción del by-pass después de la construcción de la extensión, de hasta unos 5,000 m³/año. La extensión de 150 metros tarda unos 5 años antes de que el by-pass pase los 10,000m³/año, mientras que la extensión de 250 metros dura alrededor de 11 años para alcanzar dicho valor. Una vez que el by-pass empieza a crecer ambas alternativas muestran la misma velocidad de crecimiento del by-pass.

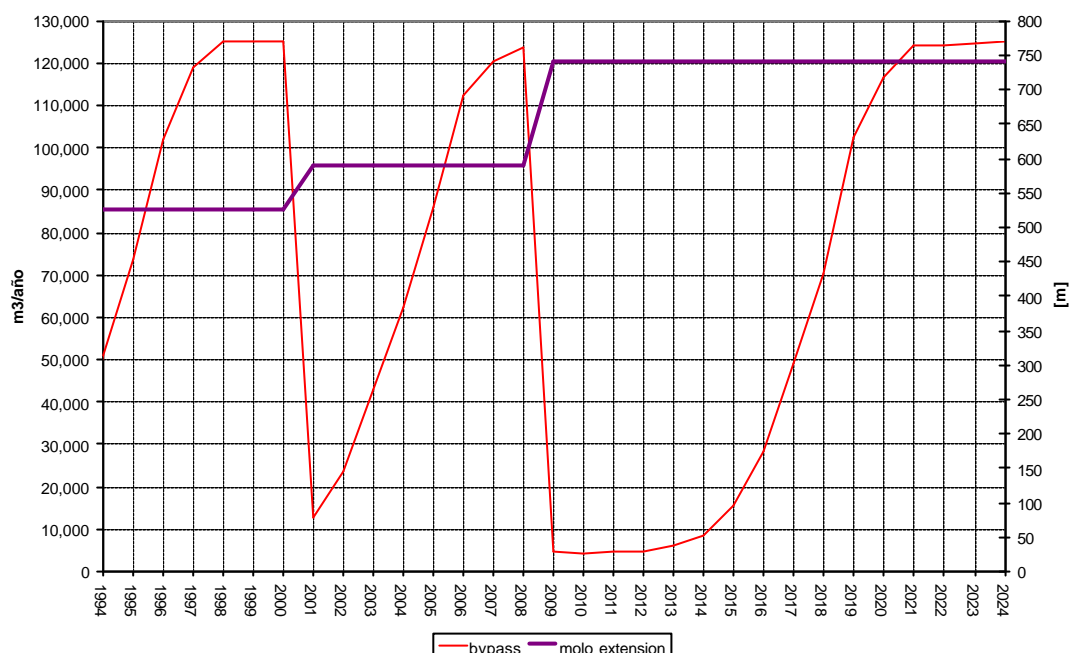


Figura 4-6 Alternativa 4-A; extensión de 150 metros en dirección 222 grados

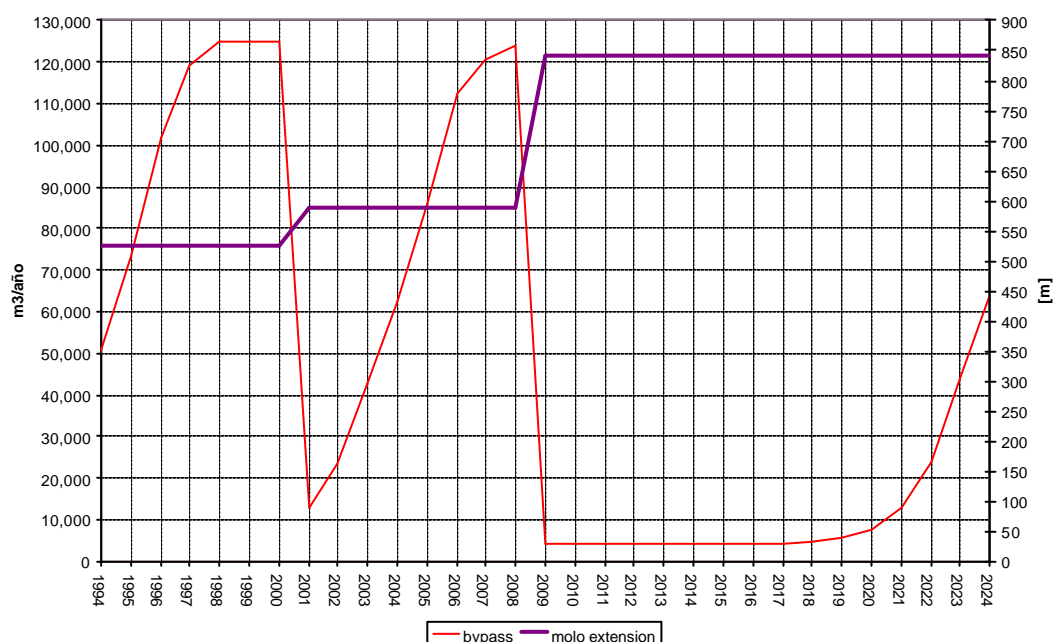


Figura 4-7 Alternativa 4-B; extensión de 250 metros en dirección 222 grados

4.2.5 Alternativa 5- Espigón al Sur del rompeolas

Se observa que la construcción de un espigón de 150 metros al sur del rompeolas existente reduce el by-pass hasta prácticamente cero. El espigón llega a una profundidad de aproximadamente MLWS -4m lo cual implica que durante el periodo

después de la construcción del espigón, éste evita que el sedimento llegue al rompeolas. Después de unos 3 a 4 años los sedimentos empiezan a pasar por el morro del rompeolas y el by-pass empieza a subir. A los 4 años el by-pass será del orden de unos 10,000 m³ / año. Después de aproximadamente 10 años el by-pass habrá llegado a un nivel máximo. Es decir, durante un periodo de 10 años se notará el efecto del espigón en la reducción del volumen del by-pass.

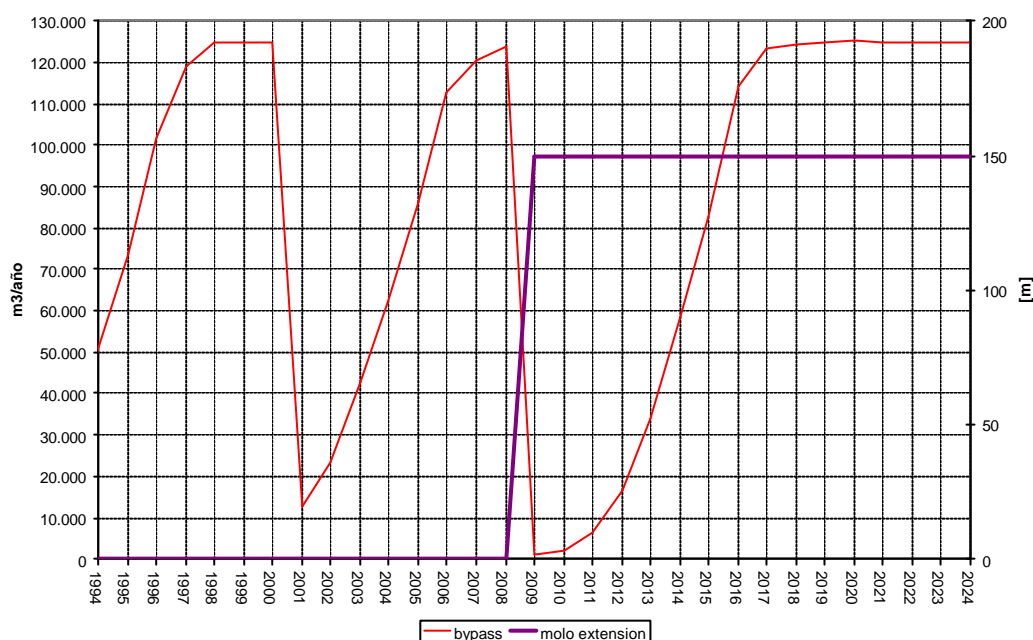


Figura 4-8 Alternativa 5-A; construcción espigón de 150 m al sur de rompeolas en 2008

Se observa que el efecto del espigón de 150 metros desaparece después de unos 10 años. Por lo tanto en esta alternativa se ha contemplado la construcción de una extensión del espigón con otros 150 metros en el momento que la funcionalidad del espigón ha disminuido en un 85-90%. En este momento se contempla una extensión del espigón con lo cual se reduce el by-pass aproximadamente durante otra década.

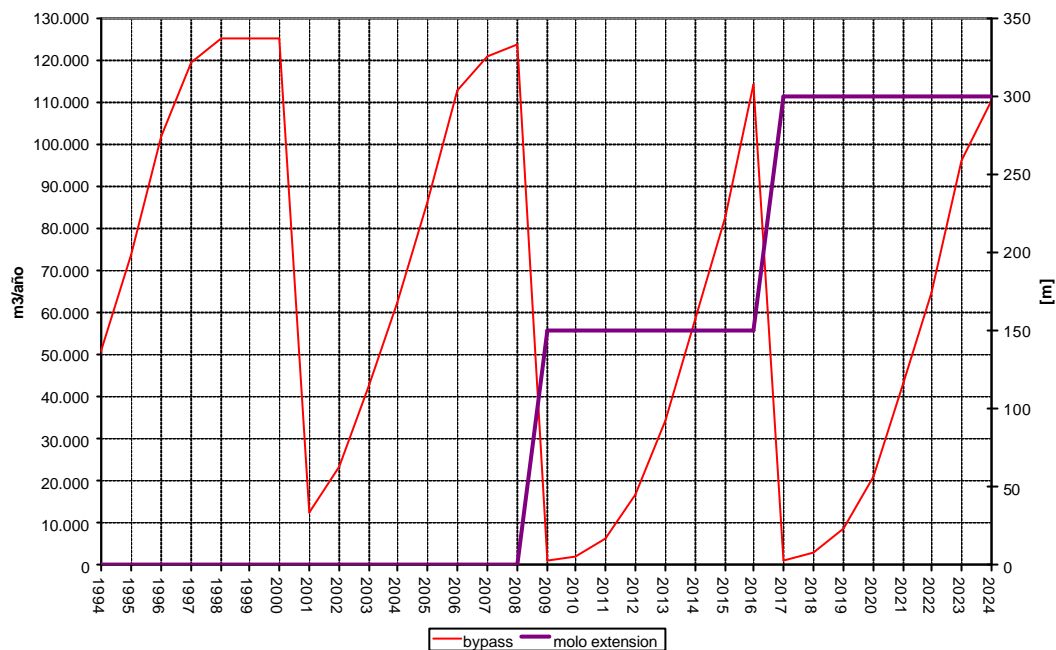


Figura 4-9 Alternativa 5-A; espigón de 150 metros al sur de rompeolas en 2008 y 2016

La construcción de un espigón de 250 metros de longitud reduce el by-pass durante los primeros 5 años a niveles muy bajos. A partir de este momento el by-pass empieza a aumentar para llegar al nivel máximo después de un periodo de casi 15 años.

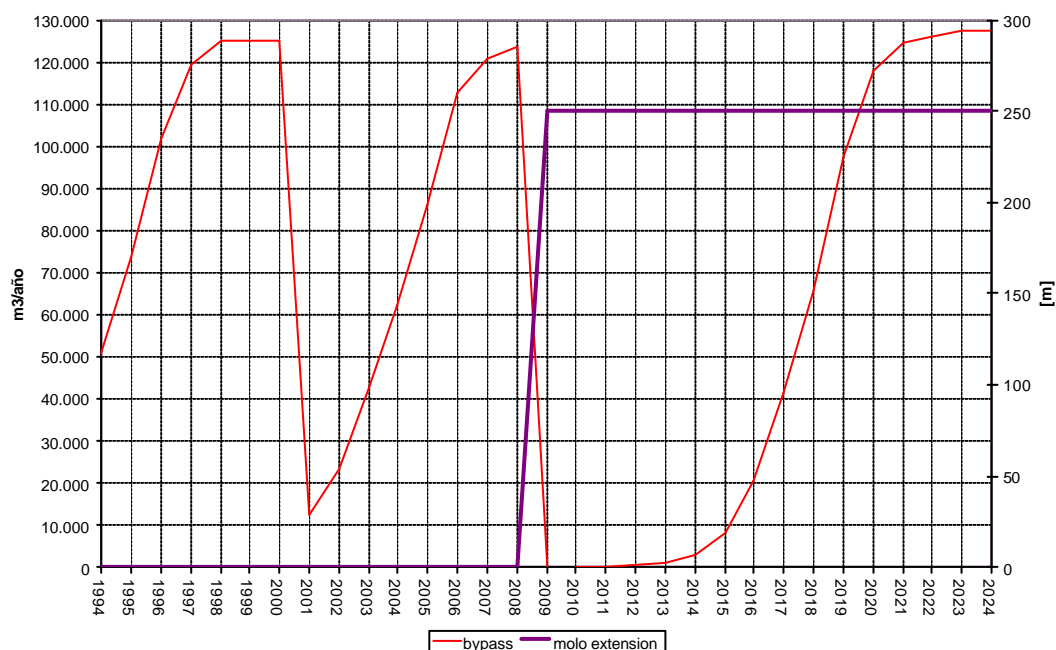


Figura 4-10 Alternativa 5-B; espigón de 250 metros al sur de rompeolas

4.3 Evaluación de la penetración de Oleaje

4.3.1 Introducción

En este capítulo se investiga el impacto de cada una de las alternativas sobre la penetración o la tranquilidad del oleaje en el puerto. Se menciona que el oleaje en la Alternativa 1 (opción cero-no hacer nada) es idéntica a la Alternativa 5- Espigón al sur del rompeolas, puesto que en ambas alternativas no hay obras que afectan la penetración de oleaje. .

Con el fin de evaluar la altura de las olas en el puerto se han distinguido dos situaciones principales, a saber la situación con la presencia del bajo alrededor del morro del rompeolas y la situación sin bajo.

Refracción

En el primer caso las olas cambian de dirección por la refracción. La refracción es el cambio de velocidad de la propagación de la ola cuando las olas entran en aguas menos profundas y bajo un ángulo con los isóbatas. Las olas tienden a girar hacia la línea de la costa. Cuando las olas llegan al morro del rompeolas, modifican la dirección y giran hacia el este para correr paralelamente al rompeolas. Una vez en la dársena, parte de las olas giran hacia el sur por la configuración del rompeolas. En anexo D se muestra la propagación de las olas. La diferencia en altura de la ola se puede calcular de acuerdo al cambio del ancho entre las ortogonales. Se ha estimado que la altura de la ola es en promedio entre 10 y 15% de la altura de la ola a MLWS -15m.

Difracción

El otro caso es la situación sin la presencia del bajo. La refracción no juega un papel importante puesto que no habrá cambios de profundidad. Cuando la ola llega al morro del rompeolas, la energía de la ola se dispersa en el área de abrigo por lo cual la altura de la ola se reduce. Se ha utilizado el modelo numérico Diffrac, desarrollado por el Laboratorio Hidráulico de Delft para simular la penetración del oleaje en este caso. En el anexo D se muestran los resultados.

4.3.2 Resultados y conclusión

La penetración del oleaje no juega un papel importante en los tiempos de espera de los buques. La alternativa 3 que consiste de la construcción de un rompeolas paralelo a las crestas del oleaje muestra un mejoramiento ligero sin embargo, el rompeolas actual protege el puerto en una forma aceptable del punto de vista de tiempos de espera.

Se concluye que la penetración del oleaje en Puerto Caldera para los próximos 20 años no es un criterio decisivo para seleccionar la alternativa mas conveniente.

Cuando se programe la extensión de los muelles del puerto hacia el Norte y Este del puesto 3 será necesario evaluar nuevamente la necesidad o no de prolongar el rompeolas con el fin de reducir la penetración del oleaje.

En la siguiente tabla se muestran los porcentajes de la ola con respecto a la altura de la ola frente al puerto en la zona de futura ampliación del puerto para toas las alternativas.

4.4 Comparación de costos de las alternativas

Para comparar las alternativas se han estimado los costos para cada una de ellas. A continuación se calculan los costos en el tiempo para cada una de las alternativas, en donde los costos comprenden dos rubros principales, a saber:

- Costo de la extensión de rompeolas o el espigón
- Costo del dragado

De los registros se ha deducido que el puerto se ha cerrado por alto oleaje en un promedio de 5 días por año, lo cual equivale a 1 - 2 % del tiempo. Las diferencias que presenta el modelo de difracción y refracción de olas sobre los porcentajes de penetración y dada la baja ocurrencia de espera de los buques por oleaje alto, este rubro no se ha tomado en cuenta.

La selección de la alternativa más adecuada se basa por lo tanto principalmente en una evaluación de costos de dragado y obras con comentarios al margen y en forma cualitativa sobre la condición de oleaje en la dársena del puerto.

4.4.1 Alternativa 1-Opción cero

En este caso no mejora la condición de oleaje dentro del puerto, la cual se toma como la situación base, para ser comparada con las otras alternativas. El sedimento ingresado se elimina en su totalidad por medio de dragados contratados. El ingreso de arena al puerto se obtiene de los resultados del modelo morfológico en el tiempo.

Con base en estos valores se pueden planificar las campañas de dragado cada vez que el volumen total en el puerto llegue a un valor por el orden de los 400.000 m³. La siguiente tabla muestra el costo estimado en el tiempo de las campañas de dragado de mantenimiento, excluyendo el dragado capital o inicial para el nuevo muelle de graneles. Se ha incluido el costo para la protección del morro del rompeolas existente. El diseño conceptual se muestra en el anexo H.

Tabla 4-1 Costos de inversión de alternativa 1

año	Ingreso/ año *1000	Acum. *1000	Dragado *1000	Observación	Mob/ demob	m3	Obras	Total USD
2000	125	263	-		-	-		-
2001	13	276	-		-	-		-
2002	23	299	-		-	-		-
2003	40	339	-		-	-		-
2004	61	400	-		-	-		-
2005	86	486	(486)	Dragado1	700,000	1,701,000		2,401,000
2006	114	114	-		-	-		-
2007	121	235	-		-	-		-
2008	124	359	-	Refuerzo Morro	-	-	3,900,000	3,900,000
2009	125	484	(484)	Dragado2	700,000	1,694,000		2,394,000
2010	125	125	-		-	-		-
2011	125	250	-		-	-		-
2012	125	375	-		-	-		-

	Ingreso/ año	Acum.	Dragado					
año	*1000	*1000	*1000	Observación	Mob/ demob	m3	Obras	Total USD
2013	125	500	(500)	Dragado3	700,000	1,750,000		2,450,000
2014	125	125	-		-	-		-
2015	125	250	-		-	-		-
2016	125	375	-		-	-		-
2017	125	500	(500)	Dragado4	700,000	1,750,000		2,450,000
2018	125	125	-		-	-		-
2019	125	250	-		-	-		-
2020	125	375	-		-	-		-
2021	125	500	(500)	Dragado5	700,000	1,750,000		2,450,000
2022	125	125	-		-	-		-
2023	125	250	-		-	-		-
2024	125	375	-		-	-		-
2025	125	500	(500)	Dragado proporcional	875,000	1,750,000		2,625,000
								18,670,000

4.4.2 Alternativa 2 A- Prolongación del rompeolas en 150m

En este caso el costo de dragado disminuye, hay un costo adicional del rompeolas en el año 2007. En la siguiente tabla se muestran las inversiones necesarias. Por supuesto que para el año 2019 puede considerarse una nueva prolongación del rompeolas.

Tabla 4-2 Costos de inversión de alternativa 2-A

	Ingreso/ año	Acum.	Dragado					
año	*1000	*1000	*1000	Observación	Mob/ demob	m3	Obras	Total USD
				Extensión rompeolas				
2000	125	263	-	MOPT	-	-		-
2001	13	276	-		-	-		-
2002	23	299	-		-	-		-
2003	40	339	-		-	-		-
2004	61	400	-		-	-		-
2005	86	486	(486)	Dragado1	700,000	1,701,000		2,401,000
2006	114	114	-		-	-		-
2007	121	235	-		-	-		-
2008	124	359	-	Rompeolas	-	-	9,000,000	9,000,000
2009	5	364	-		-	-		-
2010	5	369	-		-	-		-
2011	5	374	-		-	-		-
2012	6	380	-		-	-		-
2013	8	388	-		-	-		-
2014	10	398	-		-	-		-
2015	19	417	(417)	Dragado2	700,000	1,459,500		2,159,500
2016	34	34	-		-	-		-

	Ingreso/ año	Acum.	Dragado					
año	*1000	*1000	*1000	Observación	Mob/ demob	m3	Obras	Total USD
2017	52	86	-		-	-		-
2018	75	161	-		-	-		-
2019	100	261	-		-	-		-
2020	120	381	-		-	-		-
2021	122	503	(503)	Dragado3	700,000	1,760,500		2,460,500
2022	124	124	-		-	-		-
2023	125	249	-		-	-		-
2024	125	374	-		-	-		-
2025	125	499	(499)	Dragado4	873,250	1,746,500		2,619,750
								18,640,750

4.4.3 Alternativa 2 B- Prolongación del rompeolas en 250m

En éste caso el costo de dragado disminuye, hay un costo adicional del rompeolas en el año 2007. Del modelo morfológico se puede calcular la necesidad de dragado. El costo de las inversiones se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4-3 Costos de inversión de alternativa 2-B

	Ingreso/ año	Acum.	Dragado					
año	*1000	*1000	*1000	Observación	Mob/ demob	m3	Obras	Total USD
				Extensión rompeolas				
2000	125	263	-	MOPT	-	-		-
2001	13	276	-		-	-		-
2002	23	299	-		-	-		-
2003	40	339	-		-	-		-
2004	61	400	-		-	-		-
2005	86	486	(486)	Dragado1	700,000	1,701,000		2,401,000
2006	114	114	-		-	-		-
2007	121	235	-		-	-		-
2008	124	359	-	Rompeolas	-	-	18,165,000	18,165,000
2009	5	364	-		-	-		-
2010	5	369	-		-	-		-
2011	5	374	-		-	-		-
2012	5	379	-		-	-		-
2013	5	384	-		-	-		-
2014	5	389	-		-	-		-
2015	5	394	-		-	-		-
2016	5	399	-		-	-		-
2017	5	404	(404)	Dragado2	700,000	1,414,000		2,114,000
2018	5	5	-		-	-		-
2019	6	11	-		-	-		-
2020	10	21	-		-	-		-
2021	17	38	-		-	-		-

	Ingreso/ año	Acum.	Dragado					
año	*1000	*1000	*1000	Observación	Mob/ demob	m3	Obras	Total USD
2022	21	59	-		-	-		-
2023	53	112	-		-	-		-
2024	75	187	-		-	-		-
2025	100	287	-	Dragado proporcional	502,250	1,004,500		1,506,750
								24,186,750

4.4.4 Alternativa 3 A- Prolongación paralelo a las olas en 150 m

En este caso el rompeolas no detiene arena y el costo de dragado es igual al de la Alternativa 1. El costo adicional consiste en la construcción de la prolongación del rompeolas de 150 m. Se estima que esta construcción podría realizarse aproximadamente para el año 2007. La siguiente tabla muestra el calendario y los montos de inversión en el rompeolas y en los dragados.

Tabla 4-4 Costos de inversión de alternativa 3-A

	Ingreso/ año	Acum.	Dragado					
año	*1000	*1000	*1000	Observación	Mob/ demob	m3	Obras	Total USD
2000	125	263	-	Extensión rompeolas MOPT	-	-		-
2001	13	276	-		-	-		-
2002	23	299	-		-	-		-
2003	40	339	-		-	-		-
2004	61	400	-		-	-		-
2005	86	486	(486)	Dragado1	700,000	1,701,000		2,401,000
2006	114	114	-		-	-		-
2007	121	235	-		-	-		-
2008	124	359	-	Rompeolas	-	-	11,579,000	11,579,000
2009	8	367	-		-	-		-
2010	9	376	-		-	-		-
2011	15	391	-		-	-		-
2012	27	418	(418)	Dragado2	700,000	1,463,000		2,163,000
2013	48	48	-		-	-		-
2014	69	117	-		-	-		-
2015	95	212	-		-	-		-
2016	117	329	-		-	-		-
2017	120	449	(449)	Dragado3	700,000	1,571,500		2,271,500
2018	124	124	-		-	-		-
2019	125	249	-		-	-		-
2020	125	374	-		-	-		-
2021	125	499	(499)	Dragado4	700,000	1,746,500		2,446,500
2022	125	125	-		-	-		-
2023	125	250	-		-	-		-
2024	125	375	-		-	-		-
2025	125	500	(500)	Dragado5	700,000	1,750,000		2,450,000
								23,311,000

4.4.5 Alternativa 3 B- Prolongación paralelo a las olas en 250 m

En éste caso el rompeolas detiene algo de arena. El costo adicional consiste en la construcción de la prolongación del rompeolas de 250 m. Se estima que esta construcción podría realizarse aproximadamente para el año 2008.

Tabla 4-5 Costos de inversión de alternativa 3-B

año	Ingreso/ año *1000	Acum. *1000	Dragado *1000	Observación	Mob/ demob	m3	Obras	Total USD
				Extensión rompeolas				
2000	125	263	-	MOPT	-	-		-
2001	13	276	-		-	-		-
2002	23	299	-		-	-		-
2003	40	339	-		-	-		-
2004	61	400	-		-	-		-
2005	86	486	(486)	Dragado1	700,000	1,701,000		2,401,000
2006	114	114	-		-	-		-
2007	121	235	-		-	-		-
2008	124	359	-	Rompeolas	-	-	20,670,000	20,670,000
2009	5	364	-		-	-		-
2010	5	369	-		-	-		-
2011	5	374	-		-	-		-
2012	6	380	-		-	-		-
2013	8	388	-		-	-		-
2014	10	398	-		-	-		-
2015	19	417	(417)	Dragado2	700,000	1,459,500		2,159,500
2016	32	32	-		-	-		-
2017	52	84	-		-	-		-
2018	75	159	-		-	-		-
2019	105	264	-		-	-		-
2020	118	382	-		-	-		-
2021	123	505	(505)	Dragado3	700,000	1,767,500		2,467,500
2022	124	124	-		-	-		-
2023	125	249	-		-	-		-
2024	125	374	-		-	-		-
2025	125	499	(499)	Dragado4	873,250	1,746,500		2,619,750
								30,317,750

4.4.6 Alternativa 4 A- Prolongación perpendicular a las olas en 150 m

La construcción de la prolongación el rompeolas está dirigida totalmente a reducir el costo de dragado. Las inversiones se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4-6 Costos de inversión de alternativa 4-A

año	Ingreso/ año *1000	Acum. *1000	Dragado *1000	Observación	Mob/demob	m3	Obras	Total USD
				Extensión rompeolas				
2000	125	263	-	MOPT	-	-		-
2001	13	276	-		-	-		-
2002	23	299	-		-	-		-
2003	40	339	-		-	-		-
2004	61	400	-		-	-		-
2005	86	486	(486)	Dragado1	700,000	1,701,000		2,401,000
2006	114	114	-		-	-		-
2007	121	235	-		-	-		-
2008	124	359	-	Rompeolas	-	-	11,577,000	11,577,000
2009	5	364	-		-	-		-
2010	5	369	-		-	-		-
2011	5	374	-		-	-		-
2012	6	380	-		-	-		-
2013	7	387	-		-	-		-
2014	9	396	-		-	-		-
2015	15	411	(411)	Dragado2	700,000	1,438,500		2,138,500
2016	28	28	-		-	-		-
2017	47	75	-		-	-		-
2018	70	145	-		-	-		-
2019	103	248	-		-	-		-
2020	117	365	-		-	-		-
2021	124	489	(489)	Dragado3	700,000	1,711,500		2,411,500
2022	125	125	-		-	-		-
2023	125	250	-		-	-		-
2024	125	375	-		-	-		-
2025	125	500	(500)	Dragado4	875,000	1,750,000		2,625,000
								21,153,000

4.4.7 Alternativa 4 B- Prolongación perpendicular a las olas en 250 m

La prolongación del rompeolas está dirigida totalmente a reducir el costo de dragado. En esta alternativa el costo de dragado se reduce más que en la alternativa 4 A. De

acuerdo a la modelación morfológica, si se construye el rompeolas en el año 2007, no habría que dragar el puerto antes del año 2027, el volumen de arena acumulado en el puerto para el año 2024, que es el año límite de la evaluación económica es del orden de 200.000m³. Para el año 2024 se incluye un costo proporcional del dragado remanente futuro. La siguiente tabla muestra las inversiones necesarias en el tiempo.

Tabla 4-7 Costos de inversión de alternativa 4-B

año	Ingreso/ año *1000	Acum. *1000	Dragado *1000	Observación	Mob/ demob	m3	Obras	Total USD
				Extensión rompeolas				
2000	125	263	-	MOPT	-	-		-
2001	13	276	-		-	-		-
2002	23	299	-		-	-		-
2003	40	339	-		-	-		-
2004	61	400	-		-	-		-
2005	86	486	(486)	Dragado1	700,000	1,701,000		2,401,000
2006	114	114	-		-	-		-
2007	121	235	-		-	-		-
2008	124	359	-	Rompeolas	-	-	19,462,000	19,462,000
2009	5	364	-		-	-		-
2010	5	369	-		-	-		-
2011	5	374	-		-	-		-
2012	5	379	-		-	-		-
2013	5	384	-		-	-		-
2014	5	389	-		-	-		-
2015	5	394	-		-	-		-
2016	5	399	-		-	-		-
2017	5	404	(404)	Dragado2	700,000	1,414,000		2,114,000
2018	5	5	-		-	-		-
2019	6	11	-		-	-		-
2020	8	19	-		-	-		-
2021	12	31	-		-	-		-
2022	24	55	-		-	-		-
2023	43	98	-		-	-		-
2024	62	160	-		-	-		-
2025	87	247	-	Dragado proporcional	432,250	864,500		1,296,750
								25,273,750

4.4.8 Alternativa 5A- Espigón de 150 m al sur del rompeolas

Esta alternativa consiste de la construcción de un espigón de 150 metros al sur del rompeolas existente. Dicho espigón reducirá la sedimentación en el puerto y por lo tanto los costos de dragado. No se elimina el dragado por completo sino que se reduce la frecuencia entre las diferentes campañas. Después de unos 10 años la efectividad del espigón ha disminuido al nivel que se debe considerar la extensión del mismo. La siguiente tabla muestra los costos del dragado y la construcción del espigón y la extensión del mismo.

Tabla 4-8 Costos de inversión de alternativa 5-A

año	Ingreso/ año *1000	Acum. *1000	Dragado *1000	Observación	Mob/ demob	m3	Obras	Total USD
				Extensión rompeolas				
2000	125	263	-	MOPT	-	-		-
2001	13	276	-		-	-		-
2002	23	299	-		-	-		-
2003	40	339	-		-	-		-
2004	61	400	-		-	-		-
2005	86	486	(486)	Dragado1	700,000	1,701,000		2,401,000
2006	114	114	-		-	-		-
2007	121	235	-		-	-		-
2008	124	359	-	Espigón	-	-	7,300,000	7,300,000
2009	0	359	-		-	-		-
2010	1	360	-		-	-		-
2011	7	367	-		-	-		-
2012	18	385	-		-	-		-
2013	35	420	(420)	Dragado2	700,000	1,470,000		2,170,000
2014	60	60	-		-	-		-
2015	61	121	-		-	-		-
				Prolongación espigón				
2016	115	236	-		-	-	3,400,000	3,400,000
2017	1	237	-		-	-		-
2018	3	240	-		-	-		-
2019	9	249	-		-	-		-
2020	21	270	-		-	-		-
2021	43	313	-		-	-		-
2022	65	378	-		-	-		-
2023	96	474	(474)	Dragado3	700,000	1,659,000		2,359,000
2024	110	110	-		-	-		-
				Dragado proporcional				
2025	125	235	-		411,250	822,500		1,233,750
								18,863,750

4.4.9 Alternativa 5B- Espigón de 250 m al sur del rompeolas

Esta alternativa consiste en la construcción de un espigón de 250 metros al sur del rompeolas existente. Dicho espigón reducirá la sedimentación en el puerto, y por lo tanto los costos de dragado, durante un periodo mas prolongado que el espigón de 150 metros. La frecuencia entre las diferentes campañas de dragado se reduce aún más que en la alternativa 5 A. La siguiente tabla muestra los costos de dragado y construcción de espigón.

Tabla 4-9 Costos de inversión de alternativa 5-B

año	Ingreso/ año *1000	Acum. *1000	Dragado *1000	Observación	Mob/ demob	m3	Obras	Total USD
				Extensión rompeolas				
2000	125	263	-	MOPT	-	-		-
2001	13	276	-		-	-		-
2002	23	299	-		-	-		-
2003	40	339	-		-	-		-
2004	61	400	-		-	-		-
2005	86	486	(486)	Dragado1	700,000	1,701,000		2,401,000
2006	114	114	-		-	-		-
2007	121	235	-		-	-		-
2008	124	359	-	Espigón	-	-	12,400,000	12,400,000
2009	0	359	-		-	-		-
2010	0	359	-		-	-		-
2011	0	359	-		-	-		-
2012	1	360	-		-	-		-
2013	2	362	-		-	-		-
2014	3	365	-		-	-		-
2015	8	373	-		-	-		-
2016	20	393	-		-	-		-
2017	40	433	(433)	Dragado2	700,000	1,515,500		2,215,500
2018	64	64	-		-	-		-
2019	98	162	-		-	-		-
2020	119	281	-		-	-		-
2021	124	405	(405)	Dragado3	700,000	1,417,500		2,117,500
2022	125	125	-		-	-		-
2023	125	250	-		-	-		-
2024	125	375	-		-	-		-
2025	125	500	(500)	Dragado poporcional	875,000	1,750,000		2,625,000
								21,759,000

4.5 Evaluación de las alternativas

La siguiente tabla muestra una comparación de los costos de todas las alternativas. Al final de la tabla se calcula el valor presente neto de cada alternativa para diferentes tasas de descuento.

Tabla 4-10 Comparación de alternativas (valores en USD 1000)

Año	Opción			Paralelo					
	Cero Alt1	Prolongar Alt2-A	Prolongar Alt2-B	Olas Alt3-A	Paralelo Alt3-B	Perpend Alt4-A	Perpend Alt4-B	Espigón Alt5-A	Espigón Alt5-B
2003									
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2005	(2,401)	(2,401)	(2,401)	(2,401)	(2,401)	(2,401)	(2,401)	(2,401)	(2,401)
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	(3,900)	(9,000)	(18,165)	(11,579)	(20,670)	(11,577)	(19,462)	(7,300)	(12,400)
2009	(2,394)	-	-	-	-	-	-	-	-
2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	-	-	-	(2,163)	-	-	-	-	-
2013	(2,450)	-	-	-	-	-	-	(2,170)	-
2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	-	(2,160)	-	-	(2,160)	(2,139)	-	-	-
2016	-	-	-	-	-	-	-	(3,400)	-
2017	(2,450)	-	(2,114)	(2,272)	-	-	(2,114)	-	(2,216)
2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2021	(2,450)	(2,461)	-	(2,447)	(2,468)	(2,412)	-	-	(2,118)
2022	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2023	-	-	-	-	-	-	-	(2,359)	-
2024	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2025	(2,625)	(2,620)	(1,507)	(2,450)	(2,620)	(2,625)	(1,297)	(1,234)	(2,625)

Valor Presente Neto

Interés									
0%	(18,670)	(18,641)	(24,187)	(23,311)	(30,318)	(21,153)	(25,274)	(18,864)	(21,759)
2%	(15,246)	(15,579)	(21,337)	(19,624)	(26,154)	(17,866)	(22,376)	(15,714)	(18,398)
3%	(13,884)	(14,354)	(20,116)	(18,127)	(24,425)	(16,536)	(21,126)	(14,440)	(17,038)
6%	(10,777)	(11,524)	(17,064)	(14,611)	(20,247)	(13,424)	(17,975)	(11,476)	(13,853)
8%	(9,286)	(10,139)	(15,418)	(12,857)	(18,083)	(11,873)	(16,262)	(10,015)	(12,265)

4.6 Conclusiones y Recomendaciones

De la tabla y las consideraciones de oleaje se pueden formular las siguientes conclusiones:

1. Las Alternativas 3 A y 3 B (rompeolas paralelo a las crestas de las olas) son las más caras, tanto en inversión inicial como en costo total. Si bien son las alternativas que más contribuyen a una mejora de las condiciones de oleaje dentro del puerto, se descartan por considerarse el costo muy alto en relación con el limitado beneficio.
2. Suponiendo una tasa de interés de 6%, el Valor Presente Neto (VPN) de las alternativas 1, 2 A y 5 A es comparable, siendo la alternativa 1 la más económica.
3. La Alternativa 1 tiene el menor costo inicial de USD 3,9 millones. La alternativa 5 A le sigue con un costo inicial de USD 7,3 millones.
4. A diferencia de la alternativa 1, 4 A y 5 A, la alternativa 2 A reduce la penetración del oleaje en el puerto, e incrementa el área abrigada del canal de acceso.
5. Se supone que la tasa de descuento esté por el orden del 6 % con lo cual la alternativa 2 A tiene un VPN de aproximadamente 11,5 millones de dólares.

Se recomienda implementar la Alternativa 2 A, es decir construir una extensión el rompeolas de 150 m en la dirección del rompeolas existente.

Se recomienda monitorear la sedimentación una vez construida la alternativa 2 A, para determinar (en unos 10 años) si es recomendable realizar otra extensión o contrarrestar la sedimentación mediante el dragado.

PARTE C

DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS DE LA SOLUCION RECOMENDADA

5

DISEÑO DE LA EXTENSIÓN DEL ROMPEOLAS Y EL DRAGADO

5.1 Diseño del Rompeolas

En los capítulos anteriores se ha evaluado la conveniencia de la extensión del rompeolas frente al dragado de mantenimiento. Se ha concluido que, entre las alternativas de prolongación del rompeolas y construcción de espigón, la mejor es la construcción de una extensión el rompeolas de 150 metros en la dirección actual. En los planos del anexo E se muestra la ubicación de la extensión.

El diseño del rompeolas consiste básicamente de dos partes, el morro y el cuerpo. El morro es la parte fundamental puesto que recibe el ataque directo del oleaje. La sección del morro se define como el medio círculo al final del rompeolas mas los primeros 50 metros detrás de dicho medio círculo. Lo demás se denomina el cuerpo. A continuación se diseñan las secciones transversales para el morro y el cuerpo.

La fórmula aplicada es la fórmula de Van der Meer (Laboratorio de Hidráulica de Delft, Los Países Bajos, 1988).

La fórmula de “Van der Meer”

El peso del elemento de la armadura del rompeolas, en primera instancia se calcula para roca natural y luego se hace la conversión para elementos artificiales, se calcula con las fórmulas de Van Der Meer, para olas saltantes (“plunging waves”) y/o olas rizantes (“surging waves”):

Las fórmulas de van der Meer para olas rompientes son, para olas saltantes (‘plunging waves’):

$$\frac{H_{2\%}}{\Delta D_{n50}} = 8.7 P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} x_m^{-0.5}$$

Para olas rizantes (surging waves)

$$\frac{H_{2\%}}{\Delta D_{n50}} = 1.4 P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right) \sqrt{\cot(a)} x_m^p$$

en donde:

$H_{2\%}$	=altura de ola alcanzada y excedida el 2% del tiempo (m)
Δ	=densidad relativa $(\rho_{roca} - \rho_{agua}) / \rho_{agua}$ (-)
D_{n50}	=diámetro nominal [m]
P	=permeabilidad [-]
S	=nivel de daño [-]
N	=número de olas [-]

$$\xi_m = \text{parámetro de ola rompiente } (x_m = \frac{\tan(a)}{\sqrt{\frac{g T_m^2}{2 H_s p}}}) (-)$$

α =pendiente del talud de la estructura [rad]
 T_m =período promedio de ola [seg.]

A continuación se tratan los parámetros de la fórmula en mayor detalle.

$H_{2\%}$:

En el anexo del oleaje se analiza la altura y periodo de ola de diseño. Se aplica la ola con un periodo de retorno de 50 años que es de 5,3 metros. La ola $H_{2\%}$ es de 6,72m.

Una vez construido el rompeolas con el morro a la profundidad de MLWS -8,5 m, de ocurrir la ola de diseño esta rompe sobre el talud del rompeolas. Con el tiempo se espera que se formará un bajo alrededor del morro el cual generará, por refracción localizada de olas un incremento en la altura de ola cerca del morro.

La ola de diseño de $H_{2\%} = 6,72$ m rompe con una columna de agua de aproximadamente 12,5 metros (MLWS -9,5m). Por consiguiente coincide aproximadamente con la profundidad del morro en marea alta, antes de la formación del bajo. A medida que el bajo aumenta de tamaño y se reduce la profundidad delante del morro, la ola de diseño romperá sobre el bajo antes de llegar a la estructura. Es decir, que la ola perderá energía al romper, y la carga sobre la estructura será menor. Por consiguiente no se prevé la necesidad de aumentar la ola de diseño por la presencia futura de un bajo.

Diámetro nominal, D_{n50}

El diámetro de la roca para estructuras hidráulicas se determina dependiendo del peso de la roca:

$$W_{50} = D_{n50}^3 \times \rho_r$$

en donde:

W_{50} =el peso que es sobrepasado por 50% de un grupo de elementos de coraza [kg]
 D_{n50} =diámetro nominal del elemento de armadura, suponiendo que tiene la forma de un cubo [m]
 ρ_r =densidad de material de elemento de armadura [kg/m^3]

Nivel de daño, S

Este parámetro estima el daño de la estructura medido en desplazamiento relativo de unidades de la capa de protección. Para una capa exterior con un espesor de dos diámetros ($2 \times D_{n50}$) en talud de 1:1.5 hasta 1:4 los valores son:

Sin daño	$S = 0.5$ hasta 2
Daño inicial:	$S = 2$ hasta 4 (movimiento)
Daño intermedio:	$S = 6$ hasta 9 (desplazamiento)
Falla:	$S > 12$

Se pueden diseñar estructuras marítimas de tal manera que se permita un nivel de daño aceptable, antes que la integridad estructural y los requisitos funcionales sean afectados. Para la roca y cubos de concreto se acepta algún daño menor $S = 4$, en

vista de que una falla limitada de una sección de la estructura no causa riesgos serios y la función de la estructura se continuará cumpliendo.

Número de olas, N

La duración de tormentas fuertes varía. Se ha calculado la ola de diseño de acuerdo a una duración de la tormenta de 3 horas con un periodo promedio de la ola de 15 segundos. Por lo tanto, el número de olas se estima en $3 \times 3600 / 15 = 725$.

Pendiente del talud, a :

Se ha tomado un talud de 1:2 para el morro y el cuerpo del rompeolas.

Densidad relativa, D

La densidad del agua de mar, ρ_a , en Puerto Caldera se estima en: $1,027 \text{ kg/m}^3$

La densidad de la roca natural es de $2,68 \text{ ton/m}^3$ resultando en una densidad relativa de 1,6. Para la construcción del rompeolas se debe utilizar elementos de concreto puesto que la roca sería demasiado grande. La densidad del concreto es de $2,35 \text{ ton/m}^3$ y la densidad relativa es de 1,28.

Permeabilidad, P

La permeabilidad de la estructura depende del número de capas y del tipo de material, para una estructura de 3 capas (dos capas de roca sobre el núcleo), la permeabilidad es de 0,4. Para una estructura que consiste de núcleo y coraza el factor de la permeabilidad es 0,5.

Reducción de W_{50} y D_{n50} para una corona baja:

Si la ola rompe sobre una estructura y la sobrepasa parcialmente, no toda la energía de la ola deberá ser absorbida por el rompeolas. En tal caso se aplica un factor de reducción por tener una altura de corona baja. Para estructuras con una corona baja se puede reducir el diámetro nominal D_{n50} de la roca en la capa exterior con un factor r_D . Este factor se aplica al valor D_{n50} de una estructura con una altura de corona alta (según Van Der Meer). En consecuencia el peso de roca W_{50} se puede reducir con un factor r_D^3 .

Se ha realizado un cálculo de control para la situación de marea baja; en este caso la reducción para una altura de corona baja no es aplicable, pero la altura de ola es menor.

Resultados de la fórmula de Van der Meer

Aplicando los valores mencionados se puede calcular el peso de la roca necesaria en el cuerpo del rompeolas, es de 13 ton. Este peso es el promedio de la roca en el cuerpo y el límite inferior de la roca en el morro. Por lo tanto, el peso promedio de la roca en el morro debe ser de 19 ton. Este peso no se puede obtener de las canteras y por consiguiente se debe recurrir a elementos artificiales de concreto.

Elementos de concreto

Existe una variedad de elementos artificiales para la armadura del rompeolas. Dichos elementos consisten de concreto sin o con refuerzo. Se han considerado los elementos más importantes con los correspondientes valores de K_D , todos para condiciones de ola rompiente sobre la estructura. El valor de K_D de elementos artificiales generalmente se

basa en modelación física a escala reducida, puesto que nunca hay un número suficiente de rompeolas contruidos con igual armadura para poder establecer una base de datos estadísticos que justifiquen la selección de un K_D fehacientemente comprobado. En la literatura ([Ref. 3], [Ref. 4], se encuentran recomendaciones de valores de K_D sin embargo en el momento que alguna estructura con un elemento particular falla, generalmente la comunidad de ingenieros portuarios reajusta el valor de K_D aceptable hacia abajo. En conclusión el valor de K_D seleccionado es muy subjetivo y tiene mucho que ver con la experiencia del diseñador. La siguiente tabla muestra los resultados del peso de la armadura, utilizando los valores de K_D que Haskoning utilizaría en este caso.

Los parámetros que resultan en valores diferentes de los elementos de concreto y la roca natural son el nivel de daño permisible (S), el peso específico y el factor de estabilidad (K_D). A continuación se muestran los resultados de los pesos requeridos para los diferentes elementos.

Tabla 5-1 Comparación de diferentes Elementos de Armadura en el morro

Armadura	K_D	Peso Específico	Nivel de Daño: S	Comentario
Roca	3,5	2,7 t/m ³	4	Peso necesario: 15-25 ton, no disponible
Cubo	4-5	2,3 t/m ³	4	Peso necesario: 27 ton; fabricación fácil.
Tetrápodo	6-7	2,3 t/m ³	1,5	Peso necesario: 31 ton, fabricación compleja.
Accropode	8	2,3 t/m ³	1,5	Peso necesario: 25 ton. Colocación 1 capa, sofisticado, alto riesgo. Construcción compleja. Aprobación por inventor y pago de derecho de patente.
Dolos	10-12	2,4 t/m ³	1,5	Reforzado. Peso necesario: 20 ton. Fabricación compleja. Combina efecto de peso y entrelazado.

Cualquiera de estos elementos puede ser utilizado, Haskoning ha considerado el cubo de concreto para los diseños. Dicho elemento combina una fabricación fácil, no requiere moldes sofisticados, con una colocación al azar en dos capas y libre de derechos e patente. El peso del cubo es de 27,5 ton. El espesor de la capa es de 4,5 metros.

Diseño de Morro

La capa de la coraza en el morro consiste de cubos de concreto de 27,5 toneladas. Los cubos consisten de 11,7 m³ de concreto con una altura de 2,25 metros. La capa consiste de dos elementos y por lo tanto tiene un espesor es de 4,5 metros y se coloca en una pendiente de 1:2.

De acuerdo a las relaciones para estabilidad y permeabilidad se recomienda que la relación entre el peso de la roca de la coraza y la del filtro se encuentre entre 1/10 y 1/15. En el caso del morro la capa del filtro consistirá de roca de 1,5 a 4 ton con un espesor de 1,75 metros.

El núcleo del morro consiste de ripio de cantera de 5 – 500 kg. El nivel superior de núcleo es de MLWS +3,5 metros y el ancho es de 4 metros. Por lo tanto, el nivel superior del morro es de MLWS +9,75 m.

Cuerpo

El cuerpo se define como la sección entre el morro del rompeolas actual y el inicio de la sección del morro de la extensión la cual se encuentra a 50 metros antes del centro del morro.

El cuerpo consiste de cubos de 12 ton al lado sur del rompeolas, mientras que al lado norte se coloca roca de 4 – 6 ton. Los taludes se mantienen en 1:2. De acuerdo con la relación entre el filtro y la coraza, el filtro entre el núcleo y los cubos consiste de roca de 0,5 - 1,5 ton con un espesor de la capa de 1,75 m. El filtro entre el núcleo y la roca de 4-6 ton consiste de roca e 0,5 – 1,5 ton.

5.2 Evaluación de Canteras

Existe un estudio de canteras preparado por Ingeotec-Insuma que menciona seis posibles canteras en la cercanía de Puerto Caldera. El informe concluye que las áreas de Hacienda Mercedes y Cerro San Miguel poseen las mejores posibilidades para la explotación de una cantera. Sin embargo, ninguna de las dos ha sido utilizada como cantera en el pasado. La explotación de estas canteras debería iniciarse desde cero.

Además se menciona la cantera de Dantas. El estudio menciona que no es un sitio apropiado por el difícil acceso, puesto que el ferrocarril no estaba funcionando en el momento de realizar el informe. Esta cantera ha sido utilizada, en los años ochenta, para extraer la roca para el rompeolas de Puerto Caldera en un inicio. En este momento no esta funcionando porque debe renovar la licencia ambiental. La roca de la cantera de Dantas consiste de basalto de buena calidad.

Visita de campo

Para este informe se han visitado las siguientes canteras en la cercanía de Puerto Caldera, que se comentan a continuación:

- Dantas
- Puerto Caldera
- Roca Carballo
- Doña Ana
- Hacienda Mercedes
- San Jerónimo (Río Barranca)
- Cambronerio (cerca de la Ruta No. 1)

Dantas

La cantera Dantas ha sido utilizada especialmente para extraer roca para el ferrocarril. Además se ha utilizado la roca de esta cantera para el rompeolas de Puerto Caldera. Actualmente se encuentra roca de 0,5 hasta 5 toneladas en esta cantera. El área de la cantera es de unos 100 por 100 metros. Se estima que en el pasado se ha extraído alrededor de un millón de metros cúbicos de roca. Se estima que la cantidad de roca en esta cantera es suficiente para la extensión del rompeolas.

El acceso a la cantera es a través de la vía pavimentada hasta Hacienda Vieja para continuar sobre una vía sin pavimentar de unos 3,5 kilómetros. Especialmente este

tramo requiere de una ampliación y mejoramiento general. Cerca de la cantera corre la ferrovía. Se ha discutido la posibilidad de utilizar el ferrocarril para el transporte de la roca hacia el puerto con INCOFER, concluyéndose que es posible.

Actualmente la cantera no tiene una licencia ambiental vigente, pero si ha tenido licencia en el pasado.

Roca Carballo

En el pasado se ha encontrado roca de peso considerable la cual se ha incorporado en el rompeolas. Sin embargo, la calidad de la roca es inferior a la que se ha encontrado en Dantas. Utilizando esta roca significa que a la larga se deteriora y se deberá reemplazar la roca por la falta de calidad. Asimismo el peso específico es menor por lo cual la roca de esta cantera solo podrá utilizarse en el núcleo.

Hacienda Mercedes

La roca de esta cantera parece ser de buena calidad. Sin embargo se encuentra por debajo de una capa de unos 10 metros de tierra y roca de calidad inferior. La perforación P-1 incorporada en el estudio de Ingeotec-Insuma confirma esta suposición. Dicha perforación muestra que los primeros 5,5 metros consisten de arcilla. Entre 5,5 y 8,6 metros de profundidad se encuentra una roca quebrada con una Calidad de Roca Designada (CRD) de 0%. Se define la CRD como la longitud cumulativa de pedazos de roca superior a los 10 cm, dividida por la longitud total de la roca. Entre las profundidades de 8,6 y 23,85 la CRD de la roca varía entre 47% y 89%, lo cual es aceptable para la roca del núcleo y la capa del filtro del rompeolas. A partir de esta profundidad se encuentra roca con un CRD de 100% la cual es apropiada para ser aplicada en la coraza del rompeolas. La perforación P-2 muestra la misma imagen con la diferencia que la roca con CRD 100% se encuentra a una profundidad de 17,75 metros.

Lo anterior significa que la extracción de la roca requiere de la remoción de un volumen considerable de arcilla y roca de calidad inferior por lo cual esta cantera no es muy atractiva.

Cerro san Miguel

En el pasado se ha realizado también en esta ubicación una perforación. La calidad de la roca encontrada en los primeros 20 metros de profundidad es de una CRD inferior a 34% lo cual demuestra que la calidad de la roca no es buena. Entre 35 y 60 metros de profundidad se encuentra roca de basalto de muy buena calidad. Sin embargo los costos relacionados con la remoción de 35 metros de material son prohibitivos por lo cual se descarta esta cantera.

San Jerónimo

Esta cantera consiste de roca de una densidad de 2,7 ton/m³. La roca consiste de rocas de un promedio de 20 hasta 40 kg, lo cual puede ser utilizado para el núcleo del rompeolas. La distancia de esta cantera hasta el puerto es alrededor de 22 kilómetros.

El río Barranca en la cercanía de esta cantera cuenta con canto rodado que pudiera ser utilizado para la construcción del rompeolas.

Resumen

La mejor opción de cantera parece ser la de Dantas, la cual se encuentra a una distancia de 28 kilómetros del puerto. La cantera es propiedad de INCOFER (Instituto Costarricense de Ferrocarriles). En la actualidad el ferrocarril está funcionando, semanalmente pasan uno o dos trenes de carga y uno de pasajeros.

La licencia ambiental de la cantera ya no está vigente por lo cual se debe iniciar un proceso para tramitar la renovación. Puesto que en la cercanía de la cantera no vive gente, y de acuerdo a conversaciones con el INCOFER y el MOPT, se estima que este proceso podrá durar del orden de 6 – 8 meses.

Se ha realizado un análisis del laboratorio de muestras de Dantas, que resultó en las siguientes características:

- Densidad 2,68 ton/m³
- Absorción de agua 1.2%
- La muestra se identificó como basalto

En estudios anteriores se ha estimado que la roca de la cantera de Dantas tiene

- Densidad > 2.8 ton/m³
- Compresión >80 MPa
- Abrasión (de acuerdo al ensayo de Los Angeles) <28%

Explotación de la cantera (Ejemplo Dantas)

Se estima que los vacíos de la roca en el rompeolas son del orden de 35 a 42%. Las actividades de explotación de la cantera así como el transporte y el almacenamiento de la roca conllevan a una pérdida de un determinado porcentaje de la roca. En el caso de extraer la roca mediante explosiones se produce un volumen de polvo que puede ascender hasta 15 o 20 % del volumen total de la roca. Asimismo habrá una pérdida por el transporte y almacenamiento de la roca la cual se estima del orden de 20%. Por ende, para cada metro cúbico que se coloca en la obra se debe extraer un metro cúbico de roca en la cantera.

La cantidad de roca total requerida es de unos 40,000 m³. Se distingue entre la roca primaria (superior a 1,5 ton) y secundaria (inferior a 1,5 ton).

La roca primaria que formará la coraza en algunas partes del rompeolas proviene de un área de la cantera que tiene una fachada de 25 metros de altura y una longitud de 40 metros. Esto significa que cada metro extraído corresponde a unos 1,000 m³ de roca. Considerando que la cantidad de roca primaria requerida (superior a 1,5 ton) es aproximadamente 25,000 m³, se deberá explotar la fachada sobre unos 25 metros. La explotación de la roca primaria conlleva automáticamente a una producción de roca secundaria. Sin embargo no se producirá toda la roca secundaria requerida.

El restante del material secundario que se utiliza para el filtro y el núcleo del rompeolas proviene de un área de la cantera que tiene una fachada de 40 metros de altura y 100 metros de longitud. Cada metro de explotación de esta fachada resulta en un volumen de 4,000 m³ de roca. Por lo tanto, se estima que se debe explotar la fachada sobre una distancia de entre 10 y 15 metros.

Finalmente cabe mencionar que existe la posibilidad de utilizar el material de río para el núcleo del rompeolas. Dicho material podrá provenir de la cantera de San Jerónimo.

Periodo de construcción

Se recomienda que la construcción del rompeolas se realice en una sola estación de poco oleaje de noviembre a abril. Para esto será necesario que el contratista organice una zona de acopio lo suficientemente grande para poder almacenar toda la roca necesaria para la obra antes de iniciar la obra misma.

5.3 Diseño de las obras de Dragado

Los trabajos consisten en el dragado del bajo que se encuentra al costado del rompeolas en la parte interna de Puerto Caldera y se muestra en los planos del anexo F. El material que se dragará consiste principalmente de arena fina gris, sobretodo en la zona del nuevo muelle granelero, y arena limpia al costado del rompeolas. El material dragado será depositado en el área señalada para el depósito a unos 5 kilómetros al sudoeste del puerto. Para la ejecución de la obra se debe movilizar y desmovilizar todo el equipo necesario para las obras del dragado tales como, la draga, los equipos topobatimétricos, etc.

Método de dragado

Se pueden dividir las distintas fases de realización de la obra en la movilización de la draga y los accesorios y la ejecución misma de la obra.

La movilización de los equipos

La draga se movilizará desde la localización donde está a la hora de firmar el contrato de obra. Para poder realizar un estimado de costos y tiempo, en este estudio se ha supuesto el dragado mediante la draga de succión en marcha HAM 311, sin embargo a la hora de realizar la obra, esta podrá ser ejecutada por un equipo similar. Se prevé que se utilizará una lancha contratada localmente para los controles batimétricos. Todo el equipo para la batimetría se instalará en esta lancha. Se estima que la movilización tomará unas 5 a 6 semanas dependiendo del lugar donde se encuentra la draga.

Operación de dragado

De acuerdo con los datos disponibles del subsuelo, se anticipa que el material de dragado consistirá de una arena fina gris. No se considera dragar ningún material duro o altamente compactado. La profundidad de dragado será de hasta MLWS - 12 m y la distancia del límite del área de dragado al pie del rompeolas es de 75 metros.

La draga, con el cabezal de arrastre sobre el fondo, pasará un número de veces por el área de dragado para poder llenar la tolva. Dependiendo del tamaño de los sedimentos y del grado de compactación de la arena en el fondo, se estima que se necesiten unos 6 a 8 pasos para el llenado óptimo de la tolva. En caso de que el material sea muy fino, podrá ser que el llenado óptimo de la tolva se consiga con menos pasos puesto que el material fino tiene un tiempo de sedimentación mayor y no tiene sentido permitir un rebose excesivo. En ese caso tan pronto como se llene la tolva, la draga navegará al área de depósito para descargar el material. En caso de que el material que se draga sea más grueso, se pueden realizar más pasos para optimizar el uso de la capacidad de la tolva.

Dependiendo de las corrientes a la hora de cargar se puede utilizar el rebose para descargar el material fino que, mediante el uso de las corrientes se dispersará hacia las zonas fuera del área de dragado. Los chorros de agua potentes instalados en el cabezal de arrastre aflojarán la arena para mejorar la capacidad de la carga de la tolva. Considerando el dragado mediante la draga HAM 311 la cual tiene el tubo de succión en el lado de estribor de la draga, el área cerca del rompeolas será dragada siempre del oeste al este. En caso de que se utilice otra draga con una posición diferente del tubo de succión el plan de dragado puede cambiar. Se ha estimado un proceso de carga teórico basado en los actuales datos del suelo. Sin embargo el proceso de dragado óptimo puede ser actualizado cuando se conozcan los detalles reales del suelo después de los primeros viajes. El material dragado será depositado en el área de depósito previsto ubicado a unos 5 kilómetros al suroeste del puerto.

En caso que el contratista debe dragar la esquina entre el puesto de atraque No. 1 y el rompeolas, y el frente de atraque de los muelles deberá contar con un equipo adecuado para realizar esta operación tal como grúa con almeja o n sistema similar y/o con chorros de agua.

Desmovilización

Cuando se hayan terminado las obras de dragado se procede a la desmovilización de la draga y demás equipos. Se anticipa un período de la movilización de unas 5 semanas (dependiendo de la localización de la draga a la hora de firmar u contrato) y un período de ejecución de la obra de unas 7 semanas (con la draga mencionada) como tiempo de trabajo efectivo.

Duración de las obras

Se anticipa un periodo de movilización de unas 5 semanas (dependiendo de la localización de la draga a la hora de firmar un contrato y un periodo de ejecución de la obra de unas 4 semanas (con la draga mencionada) como tiempo de trabajo efectivo.

Duración del dragado

Se estima que la cantidad a dragar es del orden de $700,000\text{m}^3$. La duración de la ejecución de la obra depende de una serie de factores, a saber:

- i. Tipo de draga a utilizar
- ii. Tamaño de draga a utilizar
- iii. Zona de depósito de material dragado
- iv. Tiempo efectivo de operación de la draga
- v. Movilización de la draga

- i. Tipo de draga

Los tipos de dragas mas frecuentes para la cantidad que se debe dragar en este proyecto son la draga de succión en marcha y la draga de corte. La draga mecánica de cangilones tiene un rendimiento demasiado bajo para poder realizar esta obra. La draga de succión en marcha draga el material en el sitio de dragado, lo almacena y lo lleva al sitio de depósito. La draga de corte draga el material en el sitio de dragado y lo bombea directamente al sitio de depósito mediante una tubería flotante.

El sitio de depósito para el material dragado en Puerto Caldera se encuentra a unos 5 kilómetros al suroeste del puerto. Dicha distancia es demasiado para el bombeo directo

por lo cual la mejor forma de dragar en Puerto Caldera es con la draga de succión en marcha.

La aplicación de una draga de corte requiere de un sitio de depósito del material dragado en la cercanía del puerto (menos de 2 kilómetros). El único sitio apto sería al norte del puerto. Como una draga de corte requiere de una tubería flotante, ésta cruzará el canal de acceso e imposibilita la entrada y salida de buques por lo cual se descarta esta opción. Puesto que el transporte litoral es de sur a norte, la playa al sur del puerto no puede ser utilizado para el depósito.

ii. Tamaño de draga

La cantidad a ser dragada requiere una draga de succión en marcha con una capacidad de tolva del orden de 3,000 a 4,000 m³.

iii. Zona de depósito

La zona de depósito del material dragado en el caso de utilizar la draga de succión en marcha se encuentra a 5 kilómetros al suroeste del puerto.

iv. Se estima que la draga opera durante aproximadamente 140 horas por semana.

Considerando los parámetros mencionados arriba, se puede estimar la duración y el volumen de un ciclo de dragado y por ende la duración total del dragado. El ciclo de dragado consiste del llenado en la zona de dragado en el puerto, la navegación del puerto hacia la zona de depósito, la descarga del material en la zona de depósito y, para cerrar el ciclo, el regreso de dicha zona hacia el puerto. Considerando las características del subsuelo y el método de dragado expuesto anteriormente se estiman los siguientes tiempos del ciclo de dragado.

Tabla 5-2 Duración del ciclo de dragado

Actividad	Duración (minutos)
Llenado de la tolva en el puerto	65
Navegación hacia zona de depósito (5 km)	30
Descarga de material dragado	10
Navegación hacia el puerto	20
Total ciclo de dragado	125

Se ha supuesto una carga promedio de unos 1,600 m³. Considerando el tiempo útil en una semana de 140 horas, la producción de una semana será del orden de 100,000 m³ lo cual resulta en una duración total de la obra de unas 4 semanas, de trabajo efectivo, sin considerar demoras por trámites, navegación, imprevistos, accidentes, etc.

El tipo de Draga

El tipo de draga que se pretende utilizar para esta obra es el HAM 311 o similar. Inclusive se puede utilizar una draga de un tamaño más pequeño para maniobrar con mayor facilidad cerca del rompeolas y permitir el dragado del área cerca del muelle.

Las características principales de esta draga de succión en marcha son

Tabla 5-3 Características de draga propuesta

Característica	Valor
Longitud	84.95 metros
Manga	17.02 metros
Calado	3,5 (vacío) hasta 5,68 (lleno)
Potencia total instalada	5.317 KW
Potencia de bomba	1545 KW
Volumen de tolva	3510 m ³
Capacidad de carga	5040 ton
Profundidad de dragado máxima	30,3 metros
Velocidad	11 nudos
Chorro en cabeza de arrastre	2.700 m ³ /hora a 8 bar
Clasificación	Oficina Veritas Draga de Tolva de Aguas Profundas
Acomodación	14 cuartos

La draga debe ser asistida por una lancha de mediciones batimétricas.

5.4 Los Pliegos de Licitación

Para poder contratar las obras del rompeolas y el dragado es necesario contar con Pliegos de Licitación (Cartel de Contratación). Los Pliegos que conforman los documentos de licitación, una vez seleccionado el contratista se convierten en parte del contrato.

En este momento se prevé que el futuro concesionario de Puerto Caldera realizará el dragado mientras que el MOPT realizará la construcción del rompeolas. En todo caso se recomienda contratar realizar las dos obras por separado, ya que el dragado es una actividad muy especializada que es mejor contratar directamente con un contratista especializado en dragados y que cuenta con los equipos propios, especializados para este tipo de trabajo.

Los documentos necesarios para las licitaciones de obra civil y dragado son los siguientes:

Un volumen no numerado con información general del sitio de las obras, donde se incluye información sobre las condiciones climatológicas, oceanográficas, el subsuelo, accesos por mar y tierra y otros aspectos generales relevantes. Este documento es informativo y no forma parte del contrato.

Una forma internacionalmente utilizada para conformar los Pliegos de Licitación es la siguiente

VOLUMEN 1	SECCION	(0)	Invitación a Proponentes
		(I)	Instrucciones para Proponentes
		(II)	Formularios de La Oferta
		(III)	Formularios de Información Adicional
		(IV)	Formularios de Contrato
VOLUMEN 2	SECCION	(V)	Condiciones Particulares de Contratación

		(VI) Condiciones Generales de Contratación ¹
VOLUMEN 3	SECCION	(VII) <i>Especificaciones Técnicas</i> ²
VOLUMEN 4	SECCION	(VIII) <i>Cantidades de Obra</i> ²
VOLUMEN 5	SECCION	(IX) <i>Planos</i> ²

Para poder iniciar los procesos de licitación es necesario preparar tanto para el Contrato de Obra Civil como para el Contrato de Dragado, los elementos faltantes que principalmente tienen que ver con el procedimiento de la licitación, la definición de las condiciones que la rigen, los requisitos legales, contractuales, de las garantías. Y los pagos. En los Anexos a este informe se adjunta la información correspondiente a los Volúmenes 3, 4 y 5 tanto para la obra del rompeolas como para el dragado. Los Volúmenes 1 y 2 deben ser preparados por la entidad licitante.

Se menciona que el Volumen 2 Sección VI-Condicion es Generales de Contratación es un documento Standard publicado por la FIDIC y puede adquirirse en idioma español.

¹ Son las Condiciones Generales de Contratación de Obras Civiles estándar distribuidas por la FIDIC (Federación Internacional de Ingenieros Consultores, Paris)

² Preparados por Haskoning Nederland BV para las dos obras, rompeolas y dragado, se incluyen como Anexo a este informe

6

EVALUACIÓN AMBIENTAL DE ALTERNATIVA ESCOGIDA

6.1 Descripción breve del medio ambiente

6.1.1 Morfología

El Golfo de Nicoya es un estuario de 80 km de largo que se extiende desde el océano Pacífico en el sur hasta el Río Tempisque en el norte. La parte norte del Golfo es poco profunda (<20 m) y está rodeada por manglares. La parte sur es más profunda y cuenta con una costa rocosa, playas y manglares. Durante la estación de lluvia el estuario está estratificado horizontalmente y verticalmente. Durante la estación seca la estratificación se desintegra y el sistema está dominado por vientos y mareas. La diferencia del nivel de agua por la marea en la cercanía de Puerto Caldera es de aproximadamente 2,6 m.

En capítulos anteriores se describe el proceso de sedimentación y la dinámica costera. Las zonas costeras con sedimentos provenientes de ríos y de la bahía resultan, en lugares de poca perturbación, en la formación de manglares. La figura 6.2 muestra donde se encuentran las áreas con manglares en los alrededores de Puerto Caldera.

La costa este del Golfo de Nicoya, en los alrededores de la Bahía de Caldera, consiste de una topografía ondulada con colinas de alturas hasta algo más de 100 metros. Cerca de la bahía los valles entre las colinas están rellenos con sedimentos de los ríos y riachuelos. A continuación, la costa está formada por rocas y playas entre ellas.

6.1.2 Clima

El clima de la región es del tipo denominado Pacífico ('Pacífico Norte', según la clasificación del IMN en Costa Rica): es decir con estaciones lluviosas y secas bien definidas, siendo la estación lluviosa entre mayo y octubre, presentando los máximos de precipitación en los meses de junio, septiembre y octubre; y la época seca de diciembre a marzo, con abril y noviembre como meses de transición entre las estaciones (ver figura 6.1).

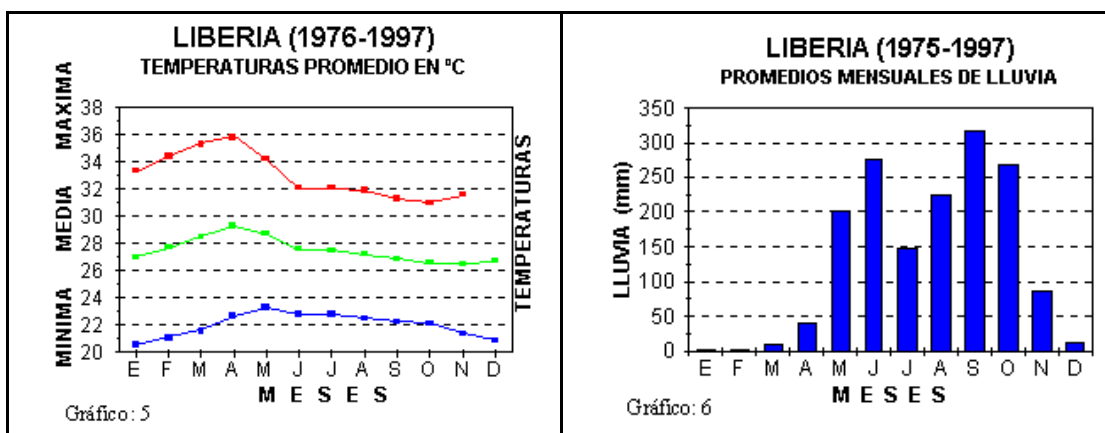


Figura 6-1 Temperatura y precipitación mensual en Liberia, 'Pacífico Norte' (IMN de Costa Rica)

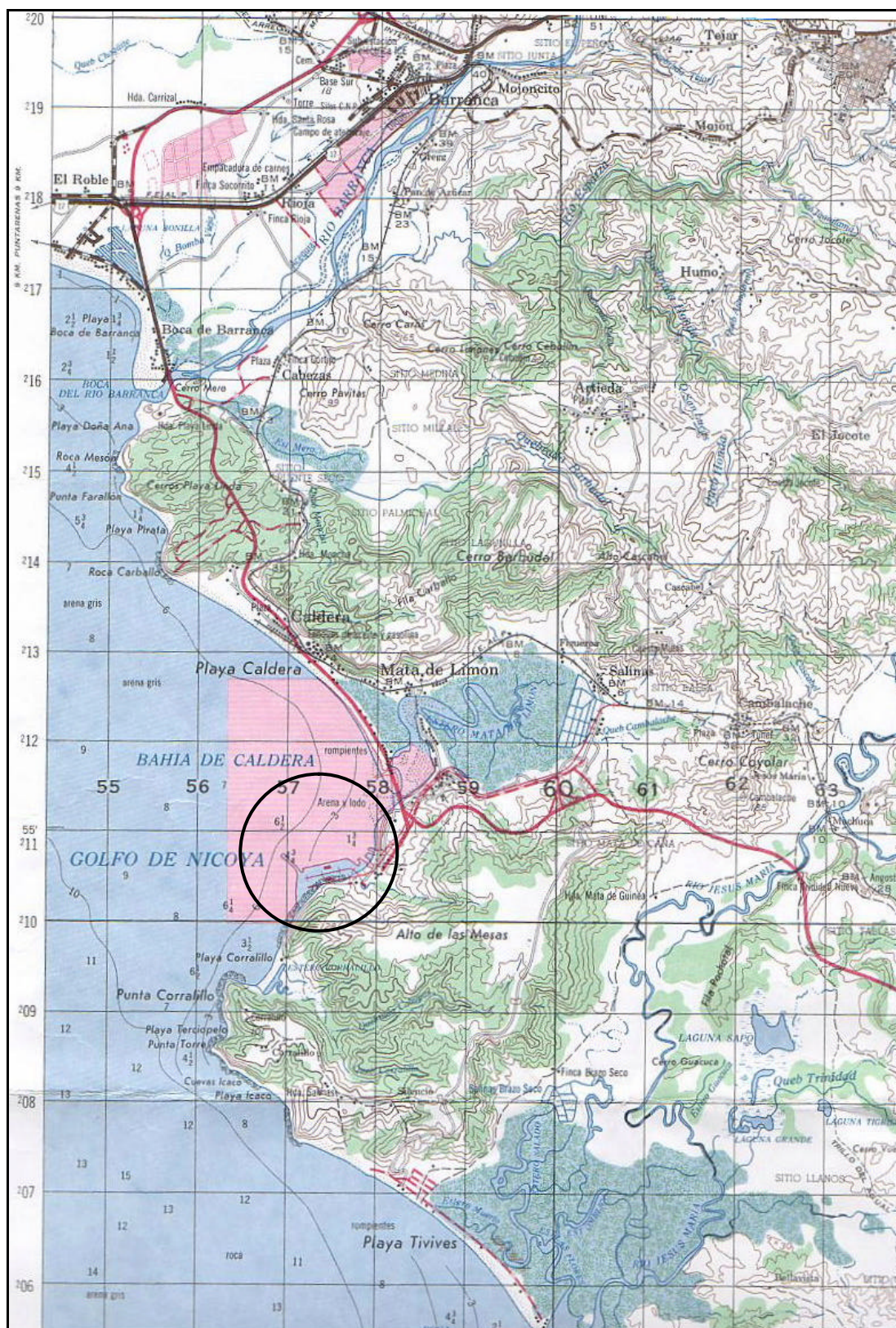


Figura 6-2 Localización del Puerto de Caldera con los elementos geográficos del área (escala 1: 50,000 'Barranca' del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica, 1969; las retículas miden 1 x 1 km)

6.1.3 Socio-economía

El clima permite el cultivo de una gran variedad de productos, sin embargo en la zona costera el turismo es la fuente principal de ingreso. El muelle en Puntarenas recibe un número substancial de cruceros por año. Puerto Caldera es el principal puerto para la importación y exportación de carga comercial por el Pacífico Costarricense, y además la conexión vial cuenta con conexión ferroviaria con la capital San José. La pesca en el Golfo mismo, esta dirigida esencialmente al mercado doméstico.

El pueblo más cercano al puerto es Mata de Limón ubicado a unos 2 kilómetros del puerto (ver Figura 6-2). Las casas están localizadas alrededor del Estero Mata de Limón.

6.1.4 Ecología

Costa Rica es conocida por sus parques nacionales, sin embargo estos no se encuentran en la cercanía de Puerto Caldera. El área protegida más cercana al puerto es la reserva Cabo Blanco, localizada en la parte sur de la península de Nicoya a una distancia de unos 50 km de Puerto Caldera. La vegetación natural terrestre en el entorno de Puerto Caldera está degradada por la influencia humana (agricultura, ganadería y urbanización).

Existen varios estudios sobre la fauna acuática del Golfo. En un estudio de CIMAR/ Universidad de Costa Rica (Campos, 1984) se encontró que los crustáceos representan un 58% del total de organismos presa encontrados y, de los crustáceos, los camarones constituyen un 46% del total. Los peces (18%), ofiúridos (8%), poliquetos (7%) y moluscos (4%) les siguen en importancia. Con esta información se construyó una pirámide trófica que indica que de la ictofauna analizada, un 52% es omnívoro, un 34% es carnívoro de primer orden y un 14% es carnívoro de segundo orden.

La pesca incluye varias especies de peces, crustáceos (camarones, cangrejos) y moluscos. Se ha prohibido el uso de redes de arrastre desde hace unos 40 años, pero se usa frecuentemente redes de enmalle pesadas. En el Pacífico se encuentran Cetáceos (ballenas, delfines). En los últimos 20 años se han registrado unos 33 encallamientos de ballenas en la zona costera.

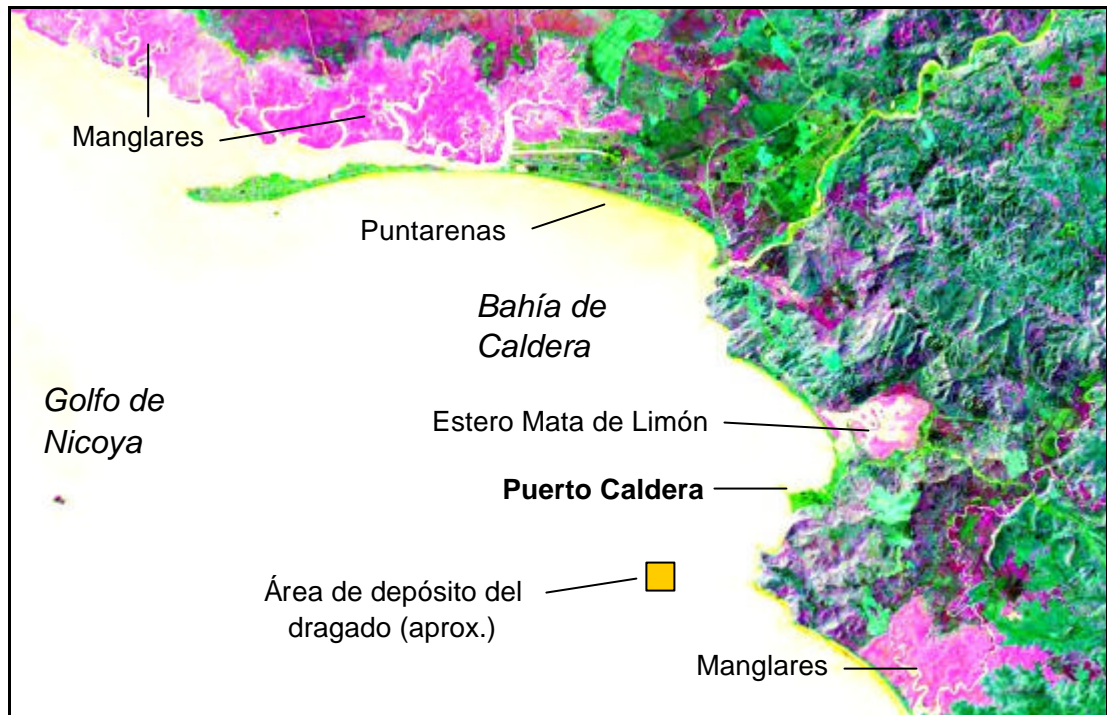


Figura 6-3 Puerto Caldera, con las áreas de manglares y el área de depósito de dragado (imagen LandSat; cerca 1990)

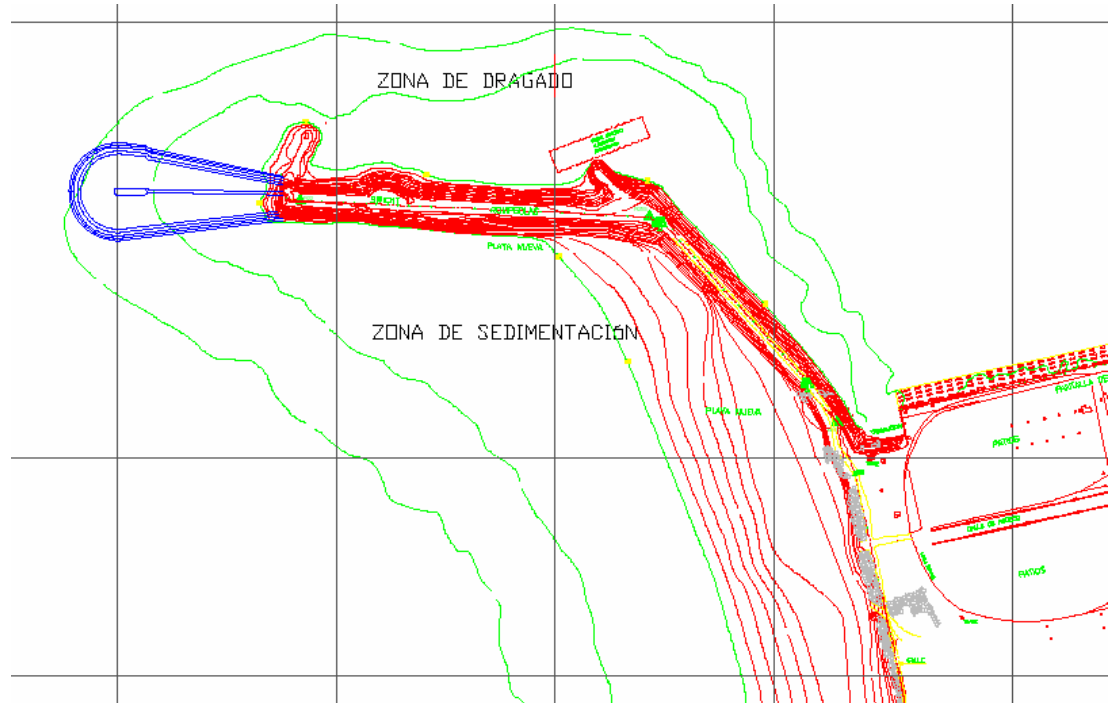


Figura 6-4 Puerto Caldera, con el rompeolas existente, la extensión, el área de sedimentación y el área a dragar (aproximadamente)

6.2 La alternativa recomendada

La alternativa recomendada es la 2 A, la cual consiste de la construcción de una extensión de aproximadamente 150 m en la dirección actual. El objetivo de la extensión es detener y reducir la velocidad de sedimentación de arena en el puerto durante un determinado periodo. Las simulaciones morfológicas muestran que después de unos 10 años el efecto de la retención de arena al sur del puerto desaparece.

Materiales:

En el siguiente capítulo se describe en mayor detalle los materiales que se necesitan para la construcción. Los materiales requeridos para la extensión incluyen rocas naturales (~40,000 m³) para el cuerpo y el morro de la obra, y concreto (~13,500 m³) para los cubos que cubrirán los taludes del morro. La roca provendrá de una cantera, el concreto se adquiere en el 'mercado'.

Dimensiones:

La altura máxima del morro del rompeolas es de MLWS +9,75 m, con una profundidad de alrededor de MLWS -8,5 m. La base del rompeolas tendrá un ancho de 90 m

El rompeolas consta de roca para el núcleo y la capa de filtro y una coraza de elementos de concreto.

6.3 Aspectos críticos del proyecto

Para evaluar los impactos de una extensión del rompeolas se debe comparar (a) la situación 'autónoma', es decir la situación futura solo con la protección del morro del rompeolas y el dragado de mantenimiento, con (b) la realización de la extensión del rompeolas, incluyendo la situación futura. La comparación tiene que incluir aspectos sociales y naturales (ecología), y se distingue entre la fase de construcción y la fase 'operacional'. El balance de los impactos positivos y negativos dará respuesta a la pregunta si la extensión del rompeolas es una solución deseada, desde el punto de vista ambiental o si se deben tomar medidas mitigativas.

La construcción de la extensión del rompeolas incorpora los siguientes componentes del medio ambiente social y natural que potencialmente pueden ser afectados:

A) El rompeolas

- La vida acuática en el sitio de construcción y los alrededores;
- El área de origen de los materiales de construcción (canteras + transporte);
- La población local;
- Los turistas.

B) El dragado

- La vida acuática en el sitio de dragado y depósito;
- Los pescadores;
- Los turistas.

En este capítulo se efectúa una evaluación preliminar cualitativa.

6.4 Evaluación del Rompeolas

6.4.1 La vida acuática en el sitio de construcción y los alrededores

Los datos de los estudios realizados en la cercanía no muestran la ocurrencia de especies amenazadas o en peligro de extinción, ni tampoco de especies interesantes para la pesca comercial. No se trata de un área significativa para la reproducción, dado que es una zona de sedimentación activa y la composición del sedimento denominado 'arena fina gris'. Las áreas con manglares, las cuales son de suma importancia en el Golfo de Nicoya para la vida acuática (nutrientes, reproducción, protección), se encuentran bastante fuera de la zona de influencia (ver figura 6.2).

Los sedimentos se depositan sobretodo cerca del morro (al sur y a lo largo al norte), sin y con obras, la sedimentación anual sigue ocurriendo. La diferencia es que con la obra se necesita dragar con menor frecuencia. Durante esta época los sedimentos se acumulan al sur del rompeolas donde no impactan la navegación, ni en el interior del puerto cerca de los muelles.

La construcción cubrirá un área de más o menos 13,500 m². Los zoobenthos y fitobenthos en esta área desaparecerán. El plancton, la ictofauna (peces) y otra macrofauna se desplazarán.

6.4.2 Origen de los materiales de construcción

El material principal para la construcción es la roca natural, que provendrá de canteras en la zona. Las cantidades de concreto no son grandes y se consigue en el mercado.

Se han visitado seis canteras como posibles fuentes de roca. Los criterios de evaluación fueron la calidad y cantidad disponible, el tamaño de la roca, la distancia de la cantera al puerto, los medios de transporte disponible (carretera, ferrocarril), la facilidad de obtener los permisos de explotación y el costo.

La cantera "Dantas" resultó ser una de las mejores opciones (ver Figura 6-5). Actualmente la roca es de buena calidad, la cantera se encuentra a 28 kilómetros del puerto, existe un ferrocarril que funciona, en la cercanía de la cantera no vive gente y el área a lo largo del ferrocarril es escasamente poblado. Sin embargo, la licencia ambiental de explotación de la cantera expiró. Para renovarla nos informan que se necesitará aproximadamente de 6 a 8 meses.

Considerando que:

- "Dantas" es una cantera existente (infraestructura),
- El transporte por tren es favorable comparado con transporte por camión (contaminación, riesgos y molestia para la población),
- Que vive poca gente cerca de la cantera y a lo largo del ferrocarril,
- Que no se encuentran áreas de alto valor ecológico cerca de "Dantas", y
- Que la licencia ambiental (a ser renovada) incorporará una revisión de los impactos ambientales de la cantera,

No se visualizan objeciones importantes del punto de vista medioambiental.

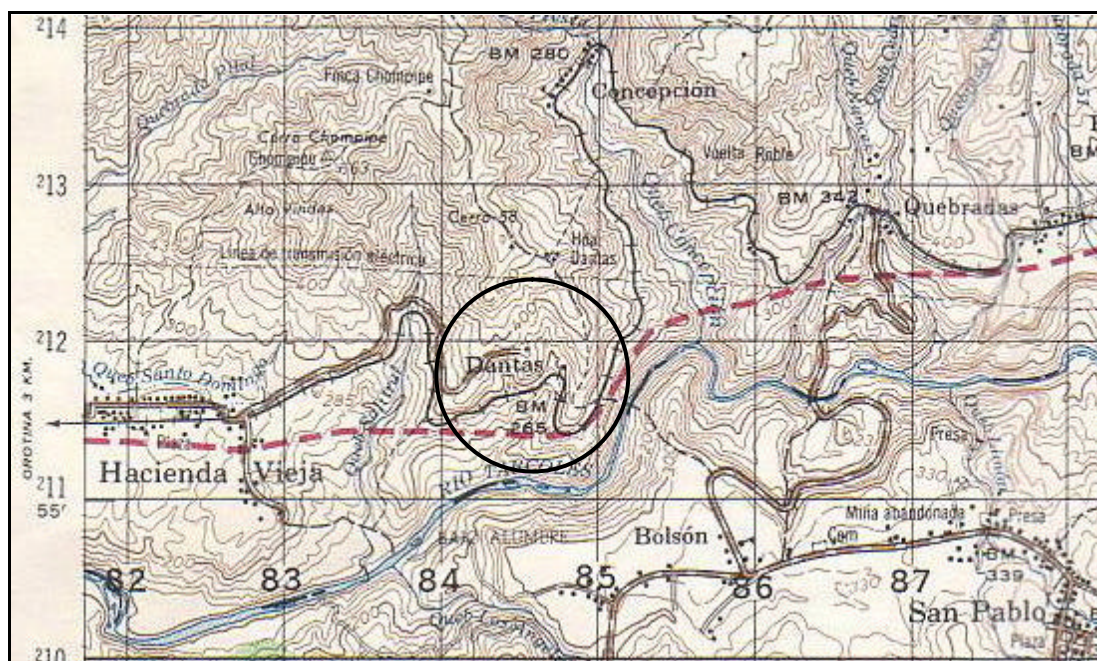


Figura 6-5 Localización de la cantera “Dantas”, 28 km al este de Puerto Caldera (la carretera planificada (línea interrumpida) se ha realizado más al norte)

6.4.3 La población local

Los impactos para la población local se limitan a la generación del empleo durante la construcción de la extensión del rompeolas. La construcción tarda aproximadamente un año y medio, generará empleo aproximadamente de 20 a 30 personas durante la construcción. Depende del contratista de donde viene la mano de obra. El personal especializado se recluta probablemente fuera de la zona. La presencia de la obra impacta positivamente el comercio local (Mata de Limón).

La construcción tiene lugar a más que 1 km de las casas de los habitantes de Mata de Limón. No habrá molestia tal como ruido y polvo a un nivel que pueda afectar a la población. En la pesca tampoco se espera deterioro por las obras durante ni después de la construcción.

Las simulaciones con el modelo morfológico UNIBEST que simula los procesos de sedimentación y erosión muestra que en la zona costera del estero de Mata de Limón no se pueden identificar cambios significativos.

6.4.4 Los turistas

El turismo es una fuente de ingresos importante para la región. Tanto la flora como la fauna terrestre y acuática atraen a los turistas. Los cruceros hacen escala en Puntarenas y Puerto Caldera. Sin embargo, el área cerca de Puerto Caldera no ofrece atracciones turísticas en particular, como buceo y deportes subacuáticos, y no se esperan impactos de las obras durante la construcción, ni después.

6.5 Evaluación del dragado

6.5.1 La vida acuática en el sitio de dragado y de depósito

Se prevé la realización de dragados de alrededor de 400,000 m³ con intervalos de 4 años, en la alternativa sin obras civiles. Con la alternativa 2 A escogida no hace falta dragar durante los primeros 10 años, después de un dragado inicial. Luego se draga al norte del rompeolas mientras que los sedimentos que se depositan en el sur se quedan allí.

El dragado tiene dos impactos negativos: se retiran los organismos que viven en los sedimentos (zoobenthos y fitobenthos) junto con el dragado, y se coloca parte de los sedimentos (sobretudo la parte fina) en suspensión (agua turbia), lo que estorba el funcionamiento de los organismos en el agua. Para que se reestablezca la ecología en una zona recién dragada y la zona afectada por el agua revuelta, puede tardar varios meses (depende de la complejidad de la ecología local). El depósito del material dragado en un ecosistema acuático también conlleva a impactos negativos. Los zoobenthos y fitobenthos locales se cubren una capa de sedimentos y se enturbia el agua (aún más que en el dragado).

Los detalles sobre el proceso y la metodología de dragado se encuentran en otros Capítulos de este informe. Los métodos utilizados tienen relevancia en el nivel del impacto. El botadero del material de dragado se encuentra a tres kilómetros al oeste de Punta Corralillo. El fondo está a 20 – 25 m debajo de la superficie del agua.

El impacto positivo de la alternativa 2 A, comparado con ‘no extensión’, es el de dragar y depositar el material dragado tres veces menos (durante los 10 años después de la construcción), aunque no se trata de una zona con flora y fauna acuática especial o de alto valor. La acumulación de sedimentos al sur del rompeolas puede prevenir el establecimiento de macrofitos durante este periodo, pero tampoco se esperan muchos macrofitos después por el oleaje y el carácter de los sedimentos.

6.5.2 Los pescadores

El bienestar de los pescadores esta relacionado a la vida acuática. En la sección anterior se describieron los impactos del dragado sobre la vida acuática.

Durante campañas anteriores de dragado, se descargó el dragado algunos kilómetros al noroeste de Puerto Caldera (cerca de Roca Carballo), pero los pescadores protestaron por que afectó un área de pesca. Desde entonces se depositó el material dragado a unos 5 kilómetros al suroeste de Puerto Caldera, fuera de Punta Corralillo. Los pescadores no tienen problemas con este lugar.

6.5.3 Los turistas

Las actividades principales del turismo en el Golfo de Nicoya son submarinismo y pesca. Ninguno de los dos se practica en la Bahía de Caldera ni en la zona donde se deposita el material dragado actualmente. Por consiguiente no se prevé impactos en el turismo.

6.6 Conclusiones

Los impactos negativos en general son pequeños, en particular para la población local, los pescadores y los turistas. La vida acuática afectada no se refiere a especies en peligro de extinción o de alto valor ecológico.

Los impactos positivos conciernen la navegación (acceso al puerto) y asimismo la economía local. Se estima que durante la construcción se genere empleo a unos 20 a 30 personas durante más o menos un año y medio.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente informe tiene dos objetivos principales, a saber:

- Determinar las causas de la falla de la extensión realizada del rompeolas de Caldera, que falló en mayo del 2002, y
- Recomendar la solución más adecuada para combatir la sedimentación de Puerto Caldera
- Diseñar la solución recomendada

Falla de rompeolas

En cuanto a las causas de la falla del rompeolas se han evaluado las tres principales causas posibles: falla de diseño, falla por sobrecarga y falla por ejecución deficiente, llegándose a las siguientes conclusiones:

- El dolos del rompeolas está subdimensionado, el peso de la coraza (dolos), calculado con la fórmula de Hudson, si se supone que los parámetros de oleaje utilizados son correctos ha debido ser unas tres veces mayor que lo construido (>10 toneladas, construido 3,5 toneladas y diseñado 2,5 toneladas). Sin embargo, con la fórmula y los criterios de diseño que utiliza Haskoning se llega a un dolos de 20 ton.
- El dolos obtiene su estabilidad por una suma de estabilidad por peso y estabilidad por entrelazado. Primero entra a trabajar la estabilidad por peso, a medida que las olas van aumentando la estabilidad por peso llega a su máximo y aumenta rápidamente la estabilidad por entrelazado. En vista de que el peso es insuficiente hubo una rápida y alta demanda sobre la estructura de aumentar la estabilidad por entrelazado. La falta de acero de refuerzo no permitió aumentar la estabilidad por entrelazado llevando a la rotura de los dolos.
- La subcoraza, el núcleo y el pie de talud no tienen requisitos de gradación y la construcción del núcleo y el pie del talud son de difícil ejecución por las condiciones mismas del entorno. No se ha podido verificar la configuración interna de la estructura construida pero se considera que este no debe ser la causa de la falla.
- El inicio de la falla ocurrió en los tres días a fines de mayo del 2002 cuando hubo un oleaje extraordinario y muy por encima de al ola de diseño real.

Evaluación de alternativas

En cuanto a la solución óptima para combatir la sedimentación en Puerto Caldera, primero se ha modelado el proceso morfológico para poder cuantificar los volúmenes de sedimento atrapados al sur, y los ingresos en el puerto para diferentes alternativas de solución, con el modelo UNIBEST. Se ha evaluado una serie de alternativas, unas haciendo énfasis en la retención del transporte litoral, otras con el objeto de reducir la penetración del oleaje en el puerto y otras que sirven los dos propósitos al tiempo. La siguiente tabla muestra las alternativas evaluadas:

Alternativa	Descripción
1	Opción-cero; para mantener el puerto operativo se deberá dragar todo el volumen de sedimento que entra en el puerto. Se protege el morro del rompeolas.
2-A	Extensión del rompeolas en el alineamiento actual con 150 metros
2-B	Extensión del rompeolas en el alineamiento actual con 250 metros
3-A	Extensión del rompeolas actual con 150 metros, paralelo a las crestas del oleaje
3-B	Extensión del rompeolas actual con 250 metros, paralelo a las crestas del oleaje
4-A	Extensión del rompeolas actual con 150 metros, perpendicular a las crestas del oleaje
4-B	Extensión del rompeolas actual con 250 metros, perpendicular a las crestas del oleaje
5-A	Construir Espigón retenedor de arena al Sur del puerto de 150 m y dragado
5-B	Construir Espigón retenedor de arena al Sur del puerto de 250 m y dragado

Se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Las Alternativas 3 A y 3 B (rompeolas paralelo a las crestas de las olas) son las más caras, tanto en inversión inicial como en costo total. Si bien son las alternativas que más contribuyen a una mejora de las condiciones de oleaje dentro del puerto, se descartan por considerarse el costo muy alto en relación con el limitado beneficio.
- El costo expresado en Valor Presente Neto de las alternativas 1, 2 A y 5 A es comparable.
- Sin considerar el costo del dragado, la Alternativa 1 tiene el menor costo inicial de obra de USD 3,9 millones para la protección del morro del rompeolas. La alternativa 2 A tiene un costo inicial de USD 9 millones para la prolongación del rompeolas, y en la alternativa 5 A el espigón cuesta USD 7,3 millones.
- A diferencia de la alternativa 1 y 5 A, la alternativa 2 A tiene el beneficio adicional de reducir la penetración del oleaje en el puerto, y protege una mayor distancia del canal de acceso.

Se recomienda implementar la Alternativa 2 A, es decir construir una extensión del rompeolas de 150 m en la dirección del rompeolas existente.

Diseño de la solución recomendada

La extensión del rompeolas de 150 metros llegará hasta una profundidad de aproximadamente MLWS -8,5m. La coraza del morro consistirá de cubos de concreto de 27,5 ton sobre un talud de 1:2 y una capa de filtro de 1-4 ton de roca de cantera. La altura máxima del morro del rompeolas es de MLWS +9.75 m. Para el cuerpo se prevé cubos de 12 ton al lado sur y roca de 4 – 6 ton al lado norte en un talud de 1:2. Se estima que el volumen de roca requerida para el rompeolas asciende a unos 60,000 m³. Como fuente para la roca se recomienda utilizar en lo posible la cantera Dantas, la cual se encuentra a una distancia de 28 kilómetros del puerto. La cantera es propiedad de

INCOFER (Instituto Costarricense de Ferrocarriles). En la actualidad hay acceso mediante el ferrocarril el cual esta funcionando, y carretera.

La licencia ambiental de la cantera se ha vencido y debe ser renovada.

Evaluación ambiental

Los impactos negativos en general son pequeños, en particular para la población local, los pescadores y los turistas. La vida acuática afectada no incluye especies en peligro de extinción o de alto valor ecológico o comercial.

Los impactos positivos conciernen el mejor acceso al puerto y la economía local. Se estima que durante la construcción se genere empleo directo para unas 20 a 30 personas aproximadamente durante un año y medio.

Bibliografía

- [Ref. 1] Study on the Maintenance Project of the Port of Caldera in the Republic of Costa Rica, Coastal Consultant Incorporated (CCI) y Overseas Coastal Area Development Institute (OCDI) financiado por Japan International Cooperation Agency (May 1986)
- [Ref. 2] Determinación de los regímenes de Oleaje en las Costas Costarricenses, Universidad de Cantabria (Agosto 2003)
- [Ref. 3] Bed, Bank and Shore Protection 2, Breakwaters and closure dams, Prof. Ir. D'Angremond/ ir. Van Roode (Octubre 1999)
- [Ref. 4] CUR 169; Manual on the Use of Rock in Hydraulic Engineering, Ministerio de Transporte, Obras Públicas y Manejo de Recursos Hídricos de los Países Bajos (Junio 1995)
- [Ref. 5] Manual de Protección Costera, Cuerpo de Ingenieros de Los Estados Unidos (1984)
- [Ref. 6] Shore Protection Manual; USACE (1984)
- [Ref. 7] Breakwater and Closure dams, d'Angremond – Van Roode (2001)
- [Ref. 8] BALTZ, Donald and CAMPOS, Jorge. Hydrophone identification and characterization of *Cynoscion squamipinnis* (Perciformes: Sciaenidae) spawning sites in the Gula of Nicoya, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 44: 743-751. 1 February 1995 / 3 July 1995 / 1996. Available on Internet: <<http://www.ots.duke.edu/tropibiojnl/claris/44-2/baltz~1.htm>>.
- [Ref. 9] CAMPOS, Jorge and CORRALES, Adolfo. Preliminary results on the trophic dynamics of the Gula of Nicoya, Costa Rica [scientific note]. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM* 13: 329-334. 3 mayo 1984 / 20 septiembre 1984. Available on Internet: <<http://www.biblioweb.dgsca.umam.mx/cienciasdelmar/instituto/1986-2/articulo232.html>>
- [Ref. 10] DEAN, Harlan and HAZEN, John. Subtidal benthic polychaetes (Annelida) of the Gulf of Nicoya, Costa Rica. *Rev. Biol Trop.* 44 (Suppl. 3): 69-80. 1996. Available on Internet: <<http://www.ots.duke.edu/tropibiojnl/claris/hensen/deans~1.htm>>.
- [Ref. 11] Navigation Safety System (NSS) of the Maritime Safety Information Division at the Nacional Geospatial-Intelligence Agency (NGA), USA. Sector 7. Coasts of Nicaragua and Costa Rica (Golfo de Nicoya, Puerto Caldera, Puntarenas). Pub. 153
- [Ref. 12] RODRIGUEZ-FONSECA, Javier and CUBERO-PARDO, Priscilla. Cetacean strandings in Costa Rica (1966-1999). *Rev. biol. trop.* [online]. June 2001, vol. 49, no.2, p.667-672. Available on Internet: <http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442001000200026&lng=en&nrm=iso>. ISSN 0034-7744.
- [Ref. 13] VARGAS, Rita and CORTES, Jorge. Biodiversidad marina de Costa Rica: Crustacea: Decapoda (Penaeoidea, Sergestoidea, Caridea, Astacidea, Thalassinidea, Palinura) del Pacífico. *Rev. biol. trop.* [online]. Dec. 1999, vol. 47, no.4, p.887-911. Available on Internet: <http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77441999000400025&lng=en&nrm=iso>. ISSN 0034-7744



Anexo A

Análisis de Oleaje



Anexo B

Geotécnica



Anexo C

Planos Generales



Anexo D

Penetración de Oleaje

Anexo E

Documentos Técnicos para la Alternativa 2 A (Extensión de Rompeolas de 150 metros)

- Especificaciones Técnicas
- Lista de Cantidades
- Planos



Anexo F

Documentos Técnicos del Dragado

- Especificaciones Técnicas
- Lista de Cantidades
- Planos



Anexo G

Valores utilizados y obtenidos de los modelos matemáticos



Anexo H

Diseño Conceptual de Morro de Rompeolas Existente