

EsIA PROYECTO FENIX

Área Cuenca Marina Austral I

Apéndice 1 del Capítulo 8

Documento de Modelación Matemática

Parte 3

**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA
VERTIDOS DE RECORTES Y LODOS DE PERFORACIÓN (BASE AGUA)
DERRAMES DE HIDROCARBUROS
PROPAGACIÓN DE SONIDO**

**Para
Total AUSTRAL S.A.**

Por

Ezcurra & Schmidt S.A. (ESSA)

Blanco Encalada 1721 P10 E, (1428)

Buenos Aires, Argentina. Tel / Fax: 54 11 4786-0851

www.essa.com.ar

Marzo 2023

ÍNDICE PARTE 3

6. DERRAMES DE HIDROCARBUROS.....	119
6.1. INTRODUCCIÓN.....	119
6.2. HIDROCARBUROS	120
6.3. SIMULACIONES	122
6.4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE LOS POTENCIALES DERRAMES DE HIDROCARBUROS	133
7. MODELACIÓN ACÚSTICA	149
7.1. INTRODUCCIÓN.....	149
7.2. ALCANCE	150
7.3. MÉTRICA.....	151
7.4. GENERALIDADES SOBRE EL PROYECTO	153
7.5. FUENTE DE RUIDOS.....	153
7.6. GENERALIDADES SOBRE EL MODELO UAS	162
7.7. BATIMETRÍA.....	164
7.8. POSICIÓN DE LA FUENTE	164
7.9. EL LUGAR Y EL PUNTOS DE MODELACIÓN.....	164
7.10. SEDIMENTOS MARINOS.....	165
7.11. DIRECTIVIDAD DE LA FUENTE	167
7.12. ÉPOCA PREVISTA PARA LAS TAREAS DE PILOTAJE	167
7.13. TEMPERATURA (T), SALINIDAD (S), DENSIDAD (ρ) Y VELOCIDAD DEL SONIDO (C)	167
7.14. COEFICIENTE DE ATENUACIÓN EN AGUA	169
7.15. COEFICIENTE DE ATENUACIÓN EN LOS SEDIMENTOS.....	169
7.16. PÉRDIDAS POR TRANSMISIÓN, TL	171
7.17. BATIMETRÍAS.....	172
7.18. GRILLADO DE LOS MODELOS.....	172
7.19. RESULTADOS: CORTES VERTICALES.....	172
7.20. RESULTADOS: MAPAS EN PLANTA.....	177
7.21. RESULTADOS: CURVAS LOGARÍTMICAS DE TL.....	181
8. CONCLUSIONES	185
8.1. CORRIENTES	185
8.2. VERTIDO DE RECORTES DE PERFORACIÓN.....	185
8.3. VERTIDO DE LODOS DE PERFORACIÓN.....	186
8.4. DERRAMES DE HIDROCARBUROS	187
8.5. MODELACIÓN ACÚSTICA	189
9. REFERENCIAS	190

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

°C	GRADOS CENTÍGRADOS
μPa	MICROPASCAL
0-p	PRESION ACUSTICA CERO A PICO
AD	ADVECCIÓN - DISPERSIÓN
ADCP	ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER
Ap	ATENUACIÓN ASOCIADA A LA ONDA COMPRESIONAL
APN	ADMINISTRACION DE PARQUES NACIONALES
C	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN
CEADO	CENTRO ARGENTINO DE DATOS OCEANOGRÁFICOS
CFL	COURANT-FRIEDRICH-S-LEWY NUMBER
cP	CEN TIPOISE
Cp	VELOCIDAD COMPRESIONAL
dB	DECIBEL
DEF	DICIEMBRE-EBERO-FEBRERO
DHI	DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (INSTITUTO HIDRÁULICO DANÉS)
EIA	EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL
EsIA	ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL
EU	EUTROFICACIÓN
f	FRECUENCIA DE LA ONDA ACÚSTICA
FM	FLEXIBLE MESH
g/m ²	GRAMOS POR METRO CUADRADO
g/m ³	GRAMOS POR METROS CÚBICOS
GEBCO	GENERAL BATHYMETRIC CHART OF THE OCEANS (CARTA BATIMETRICA GENERAL DE LOS OCEANOS)
h	HORA
ha	HECTÁREAS
HD	HIDRODINÁMICO
J	JOULES
JJA	JUNIO-JULIO-AGOSTO
kg	KILOGRAMOS
LBA	LINEA DE BASE AMBIENTAL
m	METROS
m/s	METROS POR SEGUNDO
m ²	METROS CUADRADOS
m ³	METROS CÚBICOS
MAM	MARZO-ABRIL-MAYO
mg	MILIGRAMOS
mg/l	MILIGRAMOS POR LITRO
MGO	MARINE GAS OIL

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

mm	MILÍMETROS
Mpa-m	MEGAPASCALS REFERIDOS A 1 M DE LA FUENTE
ms	MILISEGUNDOS
MT	MUD TRANSPORT
NCEP	NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL PREDICTION
NMFS	NATIONAL MARINE FISHERIES SERVICE (SERVICIO NACIONAL DE PESCA MARINA)
NMM	NIVEL MEDIO DEL MAR
NOAA	NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (OFICINA NACIONAL ADMINISTRACIÓN OCEÁNICA Y ATMOSFÉRICA)
OS	OIL SPILL
PA	PARTICLE
Pa	PASCAL
PNA	PREFECTURA NAVAL ARGENTINA
P-P	PICO A PICO
ppb	PARTES POR BILLÓN
ppm	PARTES POR MILLÓN
PW	PHOCID PINNIPEDS (PINNIPEDOS POSIDAE)
Q	QUALITY FACTOR
Qp	CALIDAD COMPRESIONAL
R	DISTANCIA A LA FUENTE EN METROS
r	DENSIDAD
R	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL
S	SALINIDAD
SAyDS	SECRETARÍA DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE
SEL	SOUND EXPOSURE LEVEL (NIVEL DE EXPOSICION SONORA)
SHN	SERVICIO DE HIDROGRAFIA NAVAL
SL	SOURCE LEVEL (NIVEL DE FUENTE)
SON	SEPTIEMBRE-OCTUBRE-NOVIEMBRE
SPL	NIVEL DE PRESION SONORA
T	TEMPERATURA
TL	TRANSMISSION LOSSES (PERDIDAS DE TRANSMISION)
ton	TONELADAS
UAS	UNDERWATER ACOUSTIC SIMULATOR (SIMULADOR ACÚSTICO SUBACUÁTICO)
UAS	UNDERWATER ACOUSTIC SIMULATION
UTM	UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR
VP	VEGA PLEYADE
WOD	WORLD OCEAN DATABASE (BASE DE DATOS DEL OCEANO MUNDIAL)
WQ	WATER QUALITY (CALIDAD DE AGUA)
Z	IMPEDANCIA ACÚSTICA

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA, DE VERTIDOS DE RECORTES Y LODOS DE PERFORACIÓN (BASE AGUA), DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS Y PROPAGACIÓN DE SONIDO

6. DERRAMES DE HIDROCARBUROS

6.1. Introducción

Generalidades y Base Matemática

El MIKE 3 Oil Spill (OS) es uno de los módulos que acompañan al MIKE 3 Flow Model FM (HD). Este módulo de seguimiento de hidrocarburos en MIKE 3 calcula los procesos relacionados con el transporte (advección y dispersión) basándose en el seguimiento de partículas. Entre los procesos que utiliza están:

- Evaporación
- Biodegradación
- Dispersión vertical
- Disolución
- Emulsificación
- Fotooxidación

Detalles pueden encontrarse en los manuales del modelo:

- https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/MIKE_FM_ELOS_3D.pdf
- [DHI Spill Analysis Data Sheets - Data Sheets for Different Oils \(mikepoweredbydhi.help\)](#)
- [DHI Oil Spill Model - Oil Spill Template \(mikepoweredbydhi.help\)](#)

Campo de Velocidades

El MIKE 3 (MT) funciona con la información acerca de las condiciones provistas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD), como una sucesión temporal de instantáneas del campo de velocidades en todo el dominio de modelación.

Grilla y batimetría

Se corresponde con la batimetría utilizada por los modelos MIKE 3 Flow Model FM (HD), discutida antes y presentada en la Figura 3.6. La grilla de elementos finitos se presenta en las Figuras 3.7.

Salinidad, Temperatura, Densidad y Viscosidad

Corresponden a las mismas utilizadas en las simulaciones con el MIKE 3 Flow Model FM (HD), cuyos bordes han sido alimentados por datos del reanálisis global de Copernicus (<https://resources.marine.copernicus.eu/products>).

Computacionales

El sistema MIKE 3 se basa en la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes de Reynolds incompresibles tridimensionales considerando los supuestos de Boussinesq y de la presión hidrostática. Por lo tanto, el modelo consta con las ecuaciones de continuidad, momento, temperatura, salinidad y de densidad que se cierra por un esquema turbulento. En el dominio horizontal se pueden utilizar coordenadas cartesianas y esféricas. La superficie libre se tiene en cuenta utilizando un enfoque de transformación de coordenadas sigma. La discretización espacial de las ecuaciones primitivas se realiza utilizando un método de diferencias finitas.

6.2. Hidrocarburos

Se han considerado 2 escenarios de contingencias asociadas a derrames de hidrocarburos.

- Blowout de condensado (producto líquido de Fenix)
- Derrames de MGO (combustible de las embarcaciones utilizadas para las operaciones)

Los volúmenes y tiempos vinculados a cada escenario son

- Blowout de condensado: 420 m³ por día durante 213 días con la fuente en el fondo del mar
- Derrames de MGO: 200 m³ durante 6 h con la fuente en superficie

En el derrame de Blowout se utiliza un hidrocarburo liviano altamente volátil (condensado), mientras el derrame de MGO posee características diferentes, con mayor proporción de componentes pesados. La Tabla 6.2.1 presenta los parámetros utilizados en las simulaciones para ambos hidrocarburos.

Tabla 6.2.1 Características de los hidrocarburos utilizados para realizar las simulaciones de los derrames

Variable	Unidad	Blowout	MGO
Masa volátil	%	100	30
Masa pesada	%	0	68.99
Masa de asfáltenos	%	0	0.01
Masa de ceras	%	0	1
Densidad de la fracción volátil	kg/m ³	731	780
Densidad de la fracción pesada	kg/m ³	-	880
Densidad media	kg/m ³	731	850
Viscosidad dinámica	cP	2.731	2.975
Temperatura de referencia para la viscosidad	°C	15	40

Datos utilizados en las simulaciones de derrames de condensado y MGO

Los modelos tienen numerosas características y parámetros de calibración que fueron usados. La Tablas 6.2.2 y 6.2.3 presentan un resumen de las características de la modelación.

Tabla 6.2.2 Características generales de las simulaciones hidrodinámicas y de derrames de hidrocarburos

Tema	Característica	Detalle
Batimetría	Tipo de grilla	Flexible (elementos finitos)
	Grillas	1 grilla irregular
	Espaciado	Irregular
	Nodos	9625
	Elementos	18708
	Capas	10 capas irregulares
	Datos batimétricos:	Batimetría GEBCO 2022
Variables tratadas	Niveles del agua	Variable 2D en tiempo y espacio
	Corrientes	Variable 3D en tiempo y espacio
	Temperatura	Variable en la columna de agua
	Salinidad	Variable en la columna de agua
	Concentraciones de los hidrocarburos	Variable 3D en tiempo y espacio
	Densidad de la película de los hidrocarburos	Variable 2D en tiempo y espacio
	Masa de los hidrocarburos sedimentada	Variable 2D en tiempo y espacio
Módulo hidrodinámico	Tipo de solución numérica	Orden bajo con algoritmo rápido
	Espaciado temporal	Implícito
	Celdas secas y húmedas	Si
	Viscosidad turbulenta horizontal	Formulación de Smagorinsky, coeficiente: 0.35
	Viscosidad turbulenta vertical	Log law formulation entre 1e-6 y 5e-1 m ² /s
	Rugosidad del fondo	0.2 (m)
	Condiciones de contorno	T y S provistas por el reanálisis de Copernicus
	Niveles en los bordes	Marea astronómica y de viento Astronómica: herramienta del MIKEZERO (DHI) Viento: reanálisis de Copernicus

Tabla 6.2.3 Características generales de las simulaciones de derrames de hidrocarburos, comunes a ambos productos considerados para la simulaciones (condensado y MGO)

Descripción de la variable	Unidad	Valor
Evaporación: número de Schmidt	adimensional	0.27
Factor de biodegradación (fracción volátil)	por día	0.005
Factor de biodegradación (fracción pesada)	por día	0
Difusión: Espesor terminal	m	0.0001
Fracción volátil de biodegradación: Tasa de descomposición	por día	0.005
Biodegradación fracción pesada: Tasa de descomposición	por día	0
Emulsión: Fracción máxima de agua	()	0.75
Emulsificación: Constante Kao igual a 3,3 a 293 K	adimensional	3.3
Emulsificación: Kaw constante igual a 200 a 293 K	adimensional	200
Emulsificación: tasa de emulsión	s/m ²	1.00E-06
Solubilidad en agua: fracción volátil	()	2.00E-05
Solubilidad en agua: fracción pesada	()	2.00E-07
Coefficiente de expansión volumétrica de la temperatura de la fracción volátil del aceite	1/°C	0.0007
Coefficiente de dilatación volumétrica por temperatura de la fracción pesada del petróleo	1/°C	0.0007
Fracción volátil de la fotooxidación: Tasa de descomposición a 100 vatios/m ²	por día	0
Fracción pesada de la fotooxidación: Índice de desintegración a 100 vatios/m ²	por día	0
Fotooxidación: Coeficiente de extinción de la luz	/m	1
Disolución: tasa, fracción volátil	por día	0.4
Disolución: tasa, fracción pesada	por día	0.4
Dispersión vertical: velocidad del viento para el inicio de la rotura de las olas	m/s	5
Dispersión vertical: tasa de disipación de energía de las olas por unidad de volumen	J/m ³ /s	1000
Distancia máxima por debajo de la superficie para pertenecer a la cantidad de superficie	m	0.05
Distancia por encima del lecho para pertenecer a la cantidad de fondo	m	0.05

6.3. Simulaciones

Corrientes

Utilizando el MIKE 3 FM Flow Model, se generaron los campos de corrientes donde se simularon los potenciales derrames de hidrocarburos. Los períodos de los campos de corrientes son los siguientes:

- Enero de 2008 a junio de 2011
- Enero de 2016 a diciembre de 2018
- Enero de 2019 a diciembre de 2021

Las Figuras 6.3.1 a 6.3.13 ilustran los campos de corrientes y niveles del mar de zona considerada para estudiar los derrames de hidrocarburos, durante un ciclo de marea.

Figura 6.3.1 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 1: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de marea creciente en la zona de Fenix.

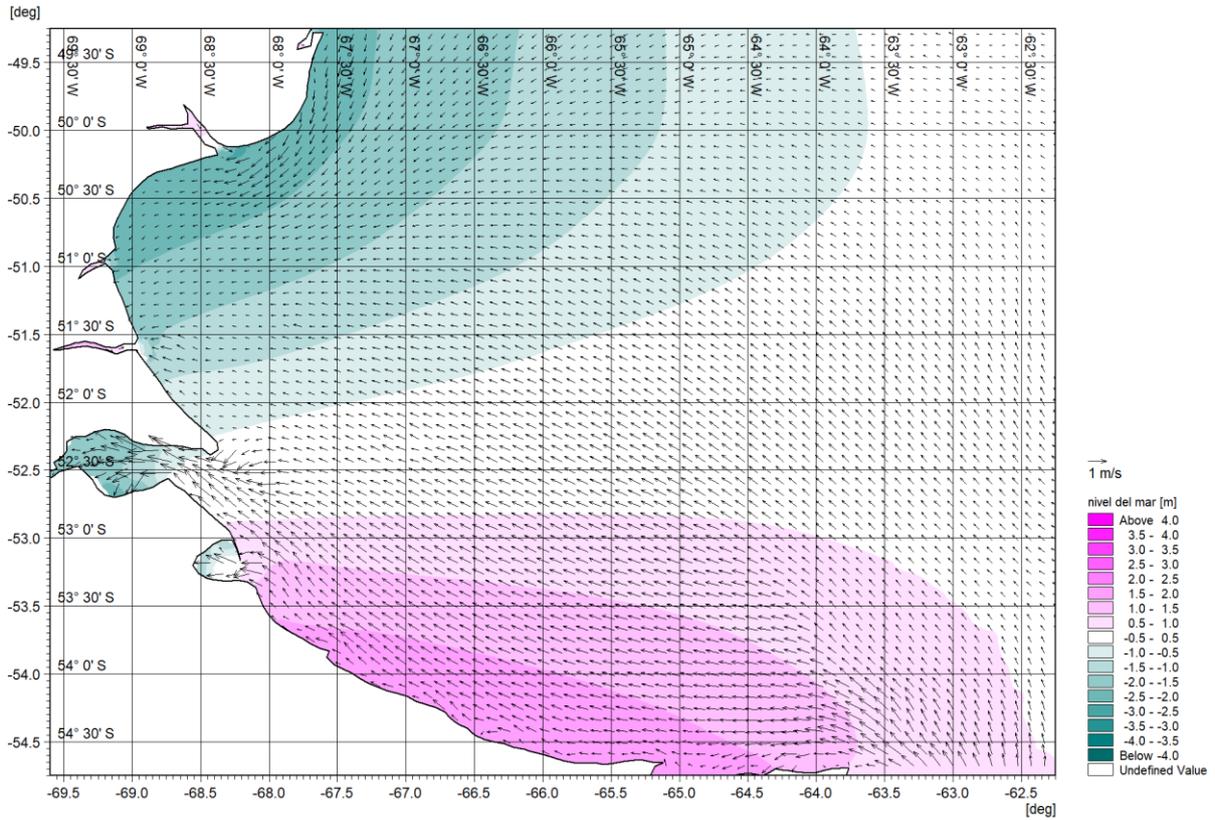


Figura 6.3.2 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 2: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de marea creciente en la zona de Fenix.

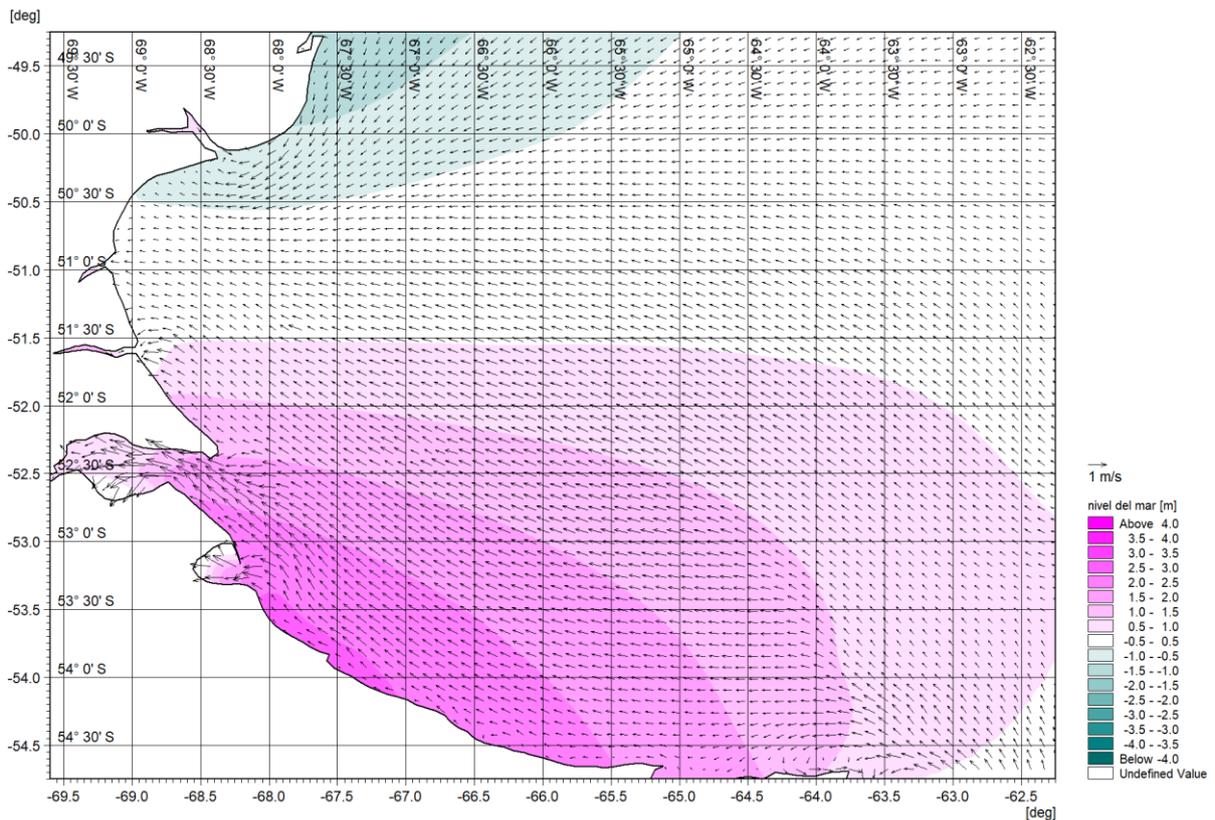


Figura 6.3.3 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 3: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de marea creciente en la zona de Fenix.

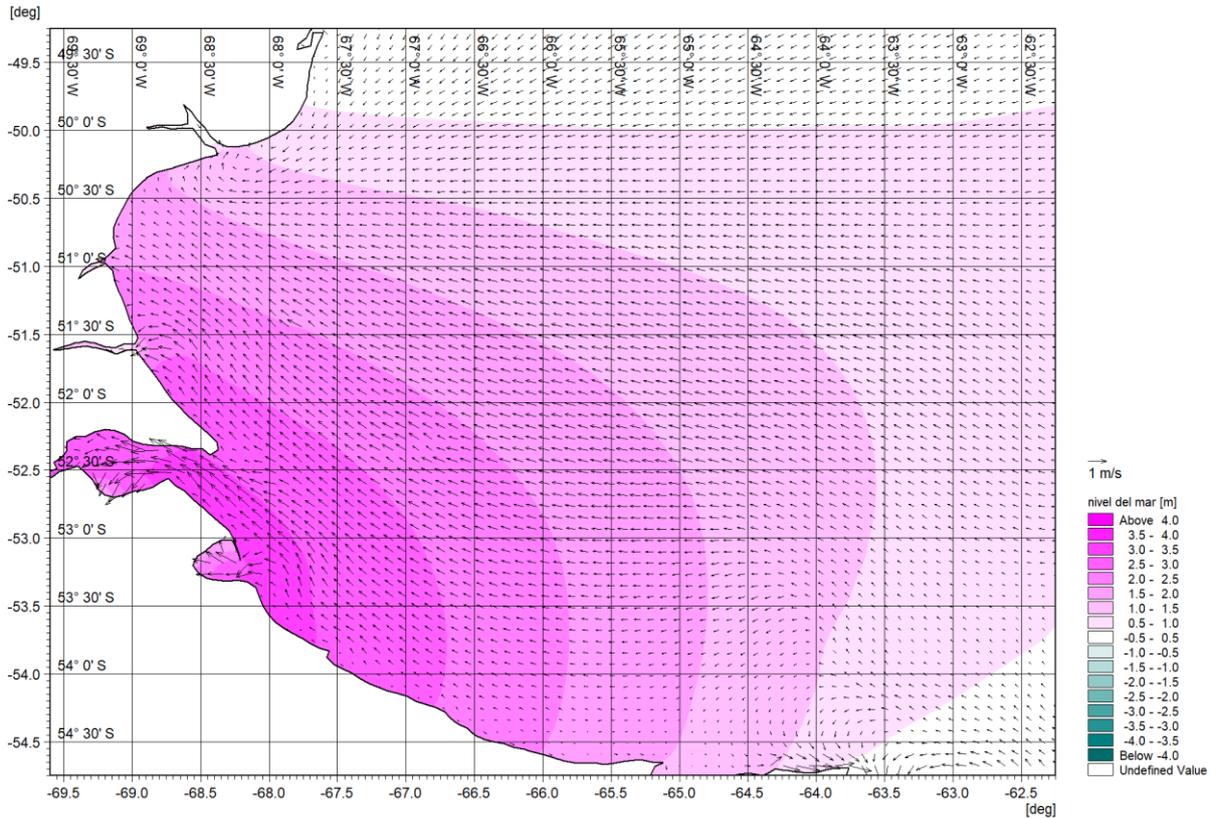


Figura 6.3.4 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 4: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de pleamar en la zona de Fenix.

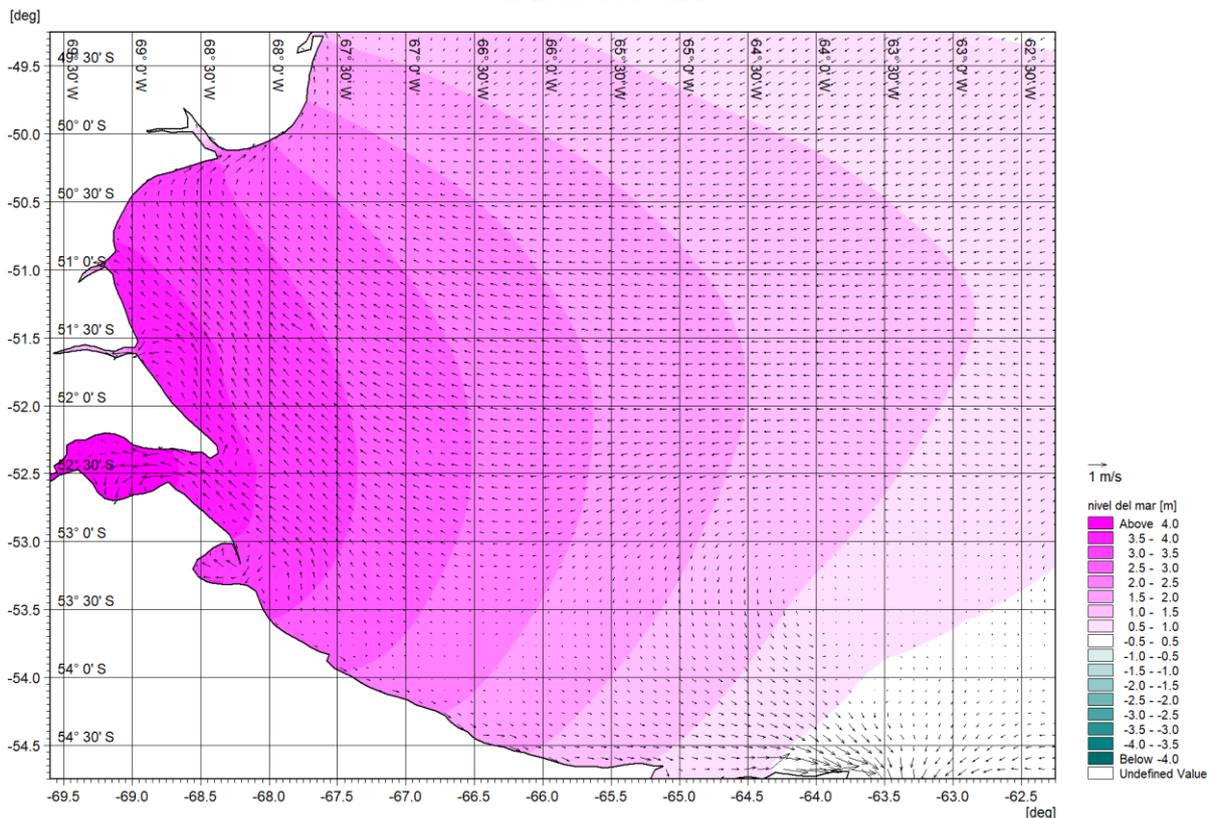


Figura 6.3.5 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 5: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de marea bajante en la zona de Fenix.

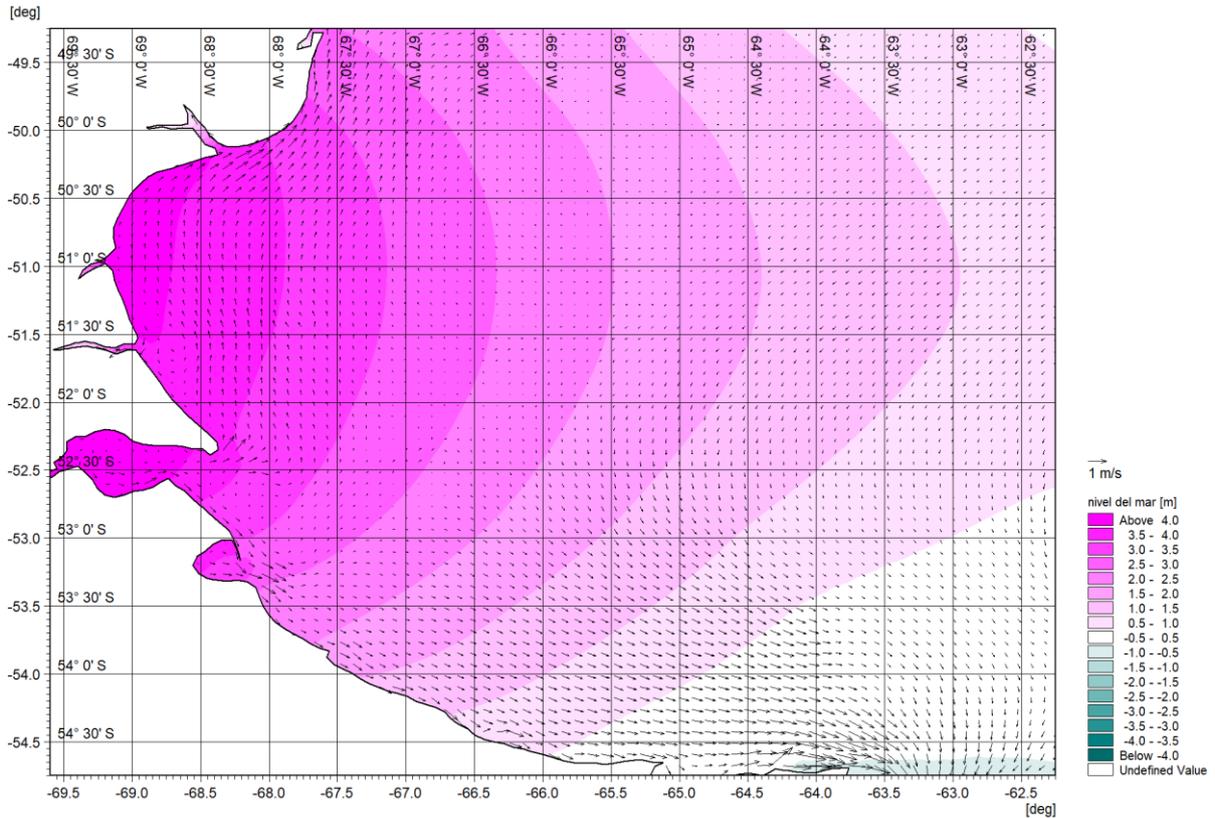


Figura 6.3.6 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 6: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de marea bajante en la zona de Fenix.

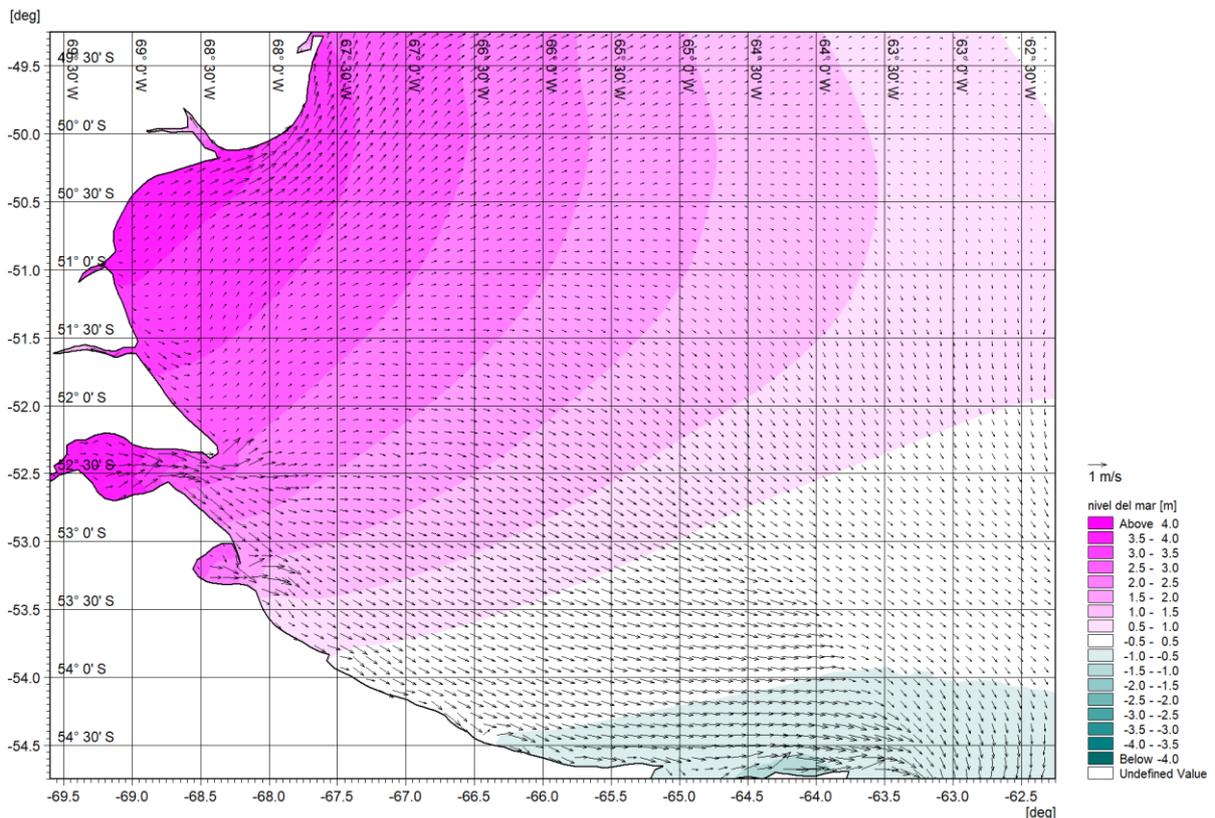


Figura 6.3.7 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 7: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de marea bajante en la zona de Fenix.

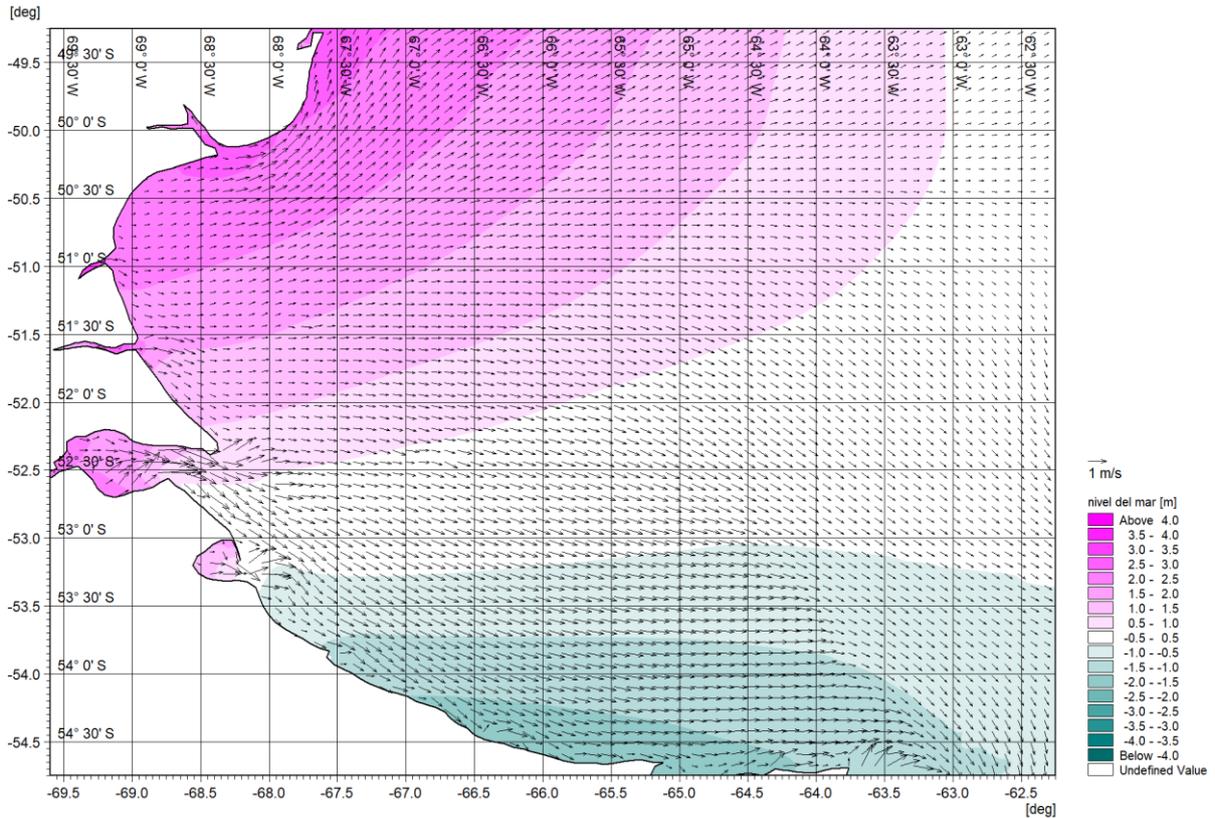


Figura 6.3.8 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 8: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de marea bajante en la zona de Fenix.

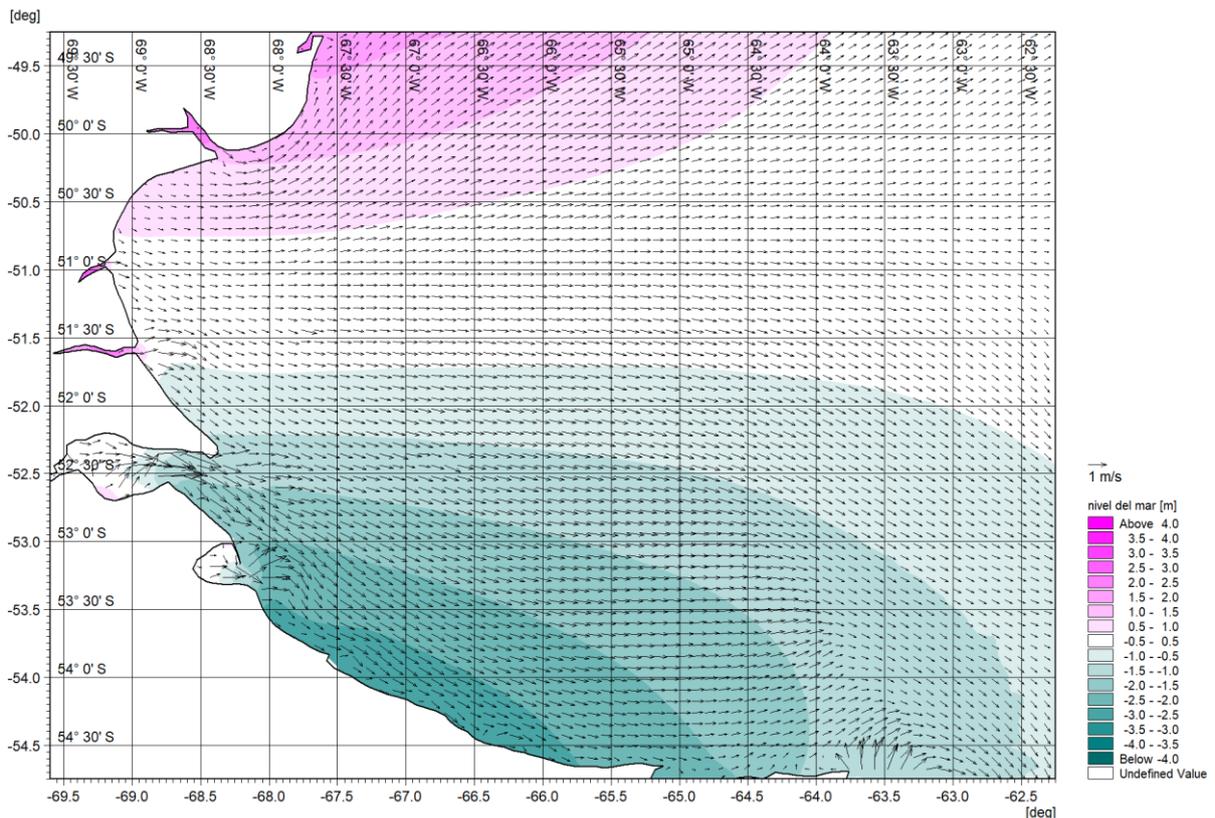


Figura 6.3.9 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 9: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de marea bajante en la zona de Fenix.

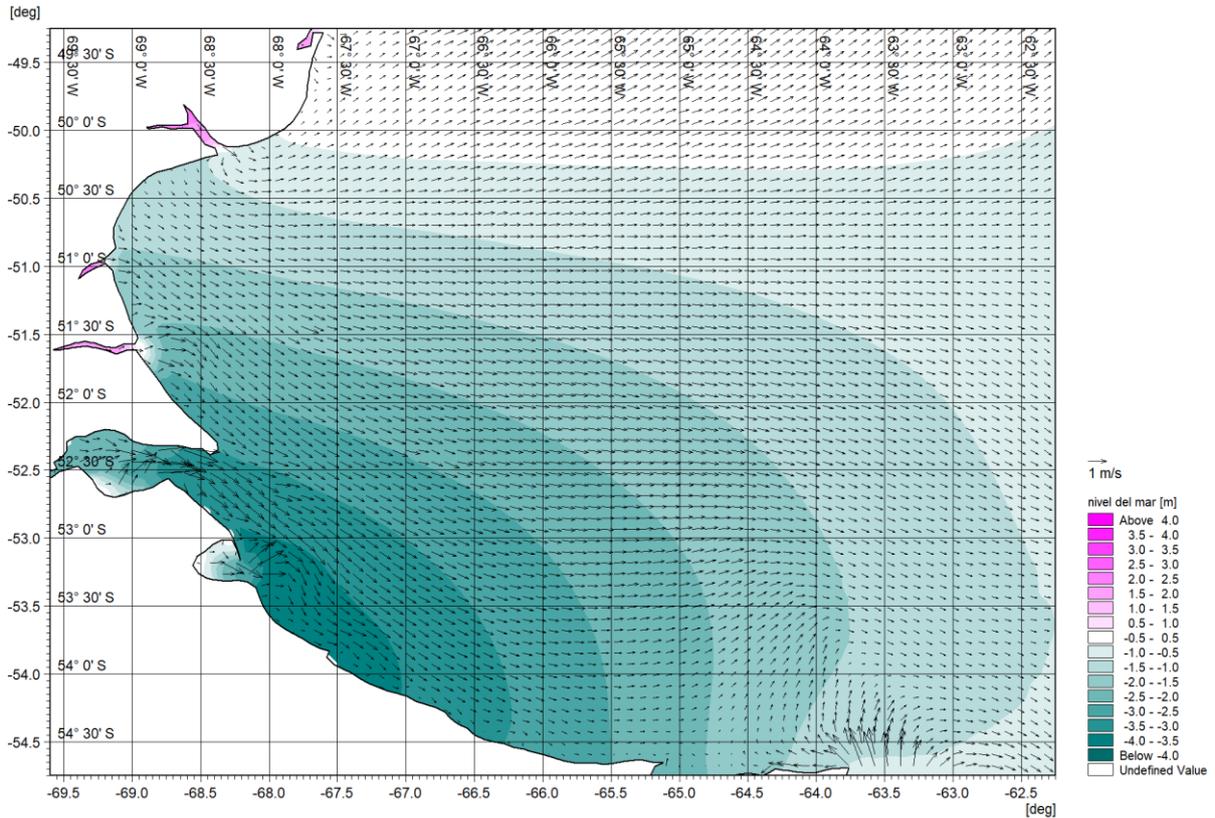


Figura 6.3.10 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 10: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de marea bajante en la zona de Fenix.

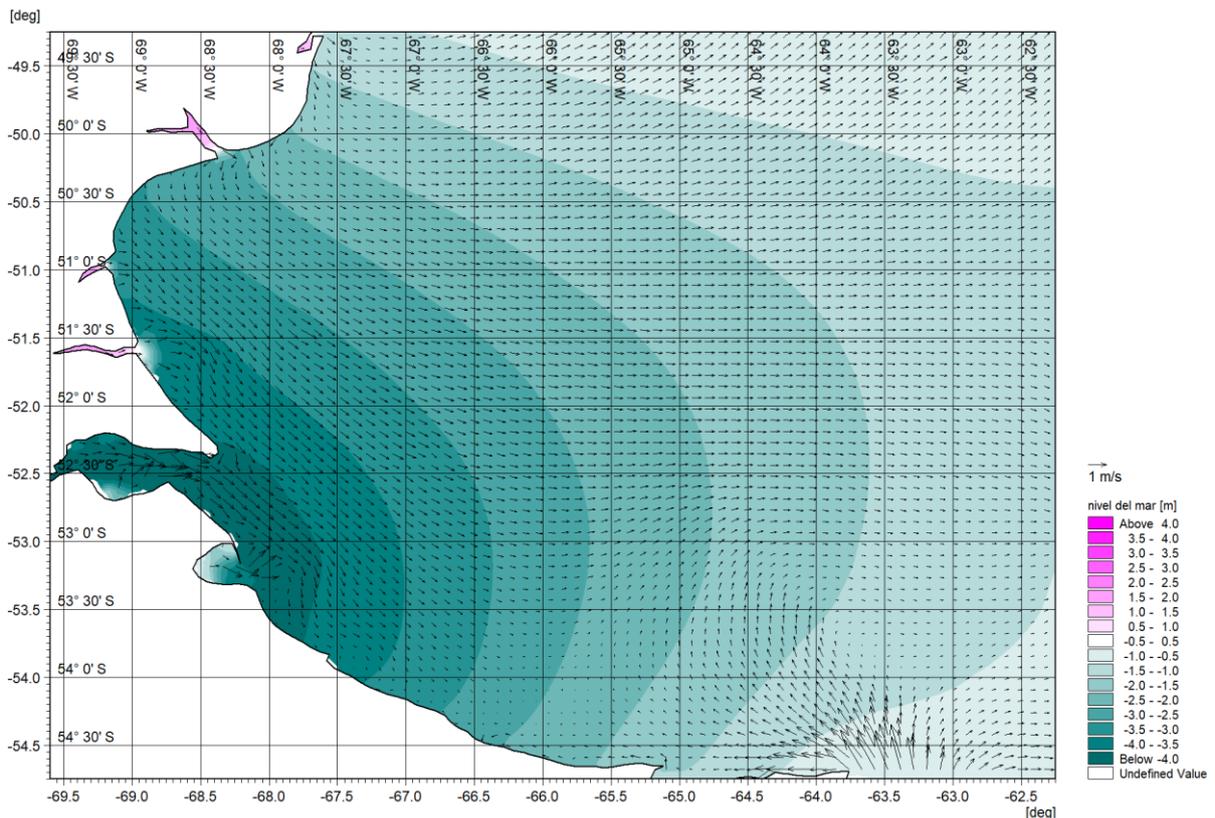


Figura 6.3.11 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 1: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de bajamar en la zona de Fenix.

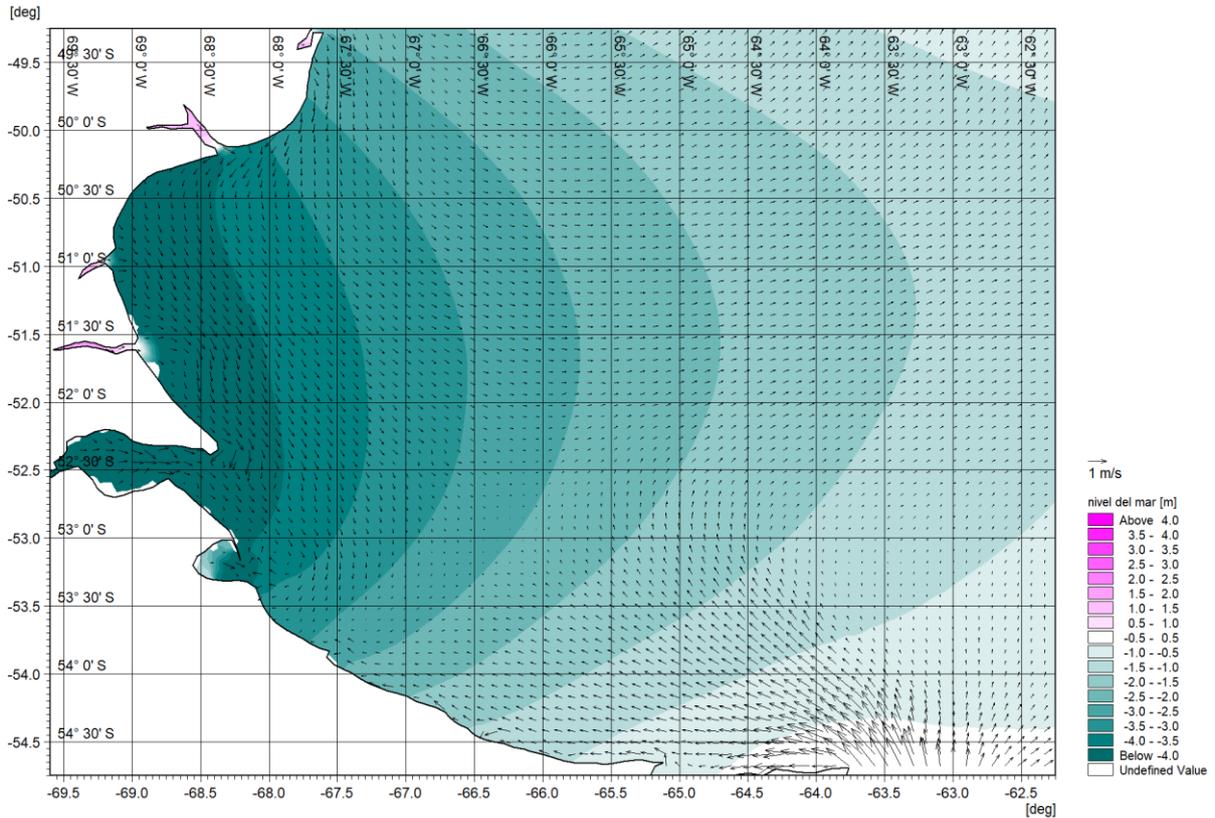


Figura 6.3.12 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 12: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de marea creciente en la zona de Fenix.

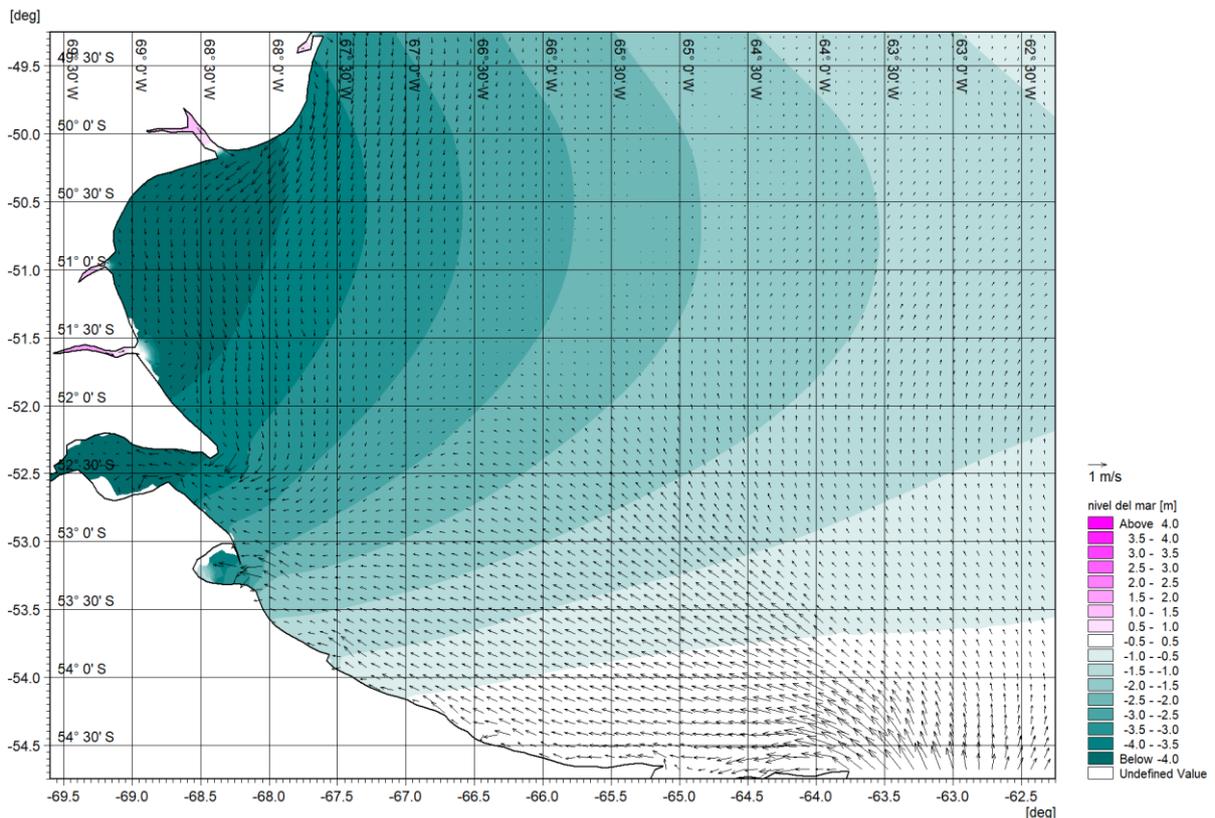


Figura 6.3.13 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 13: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de marea creciente en la zona de Fenix.

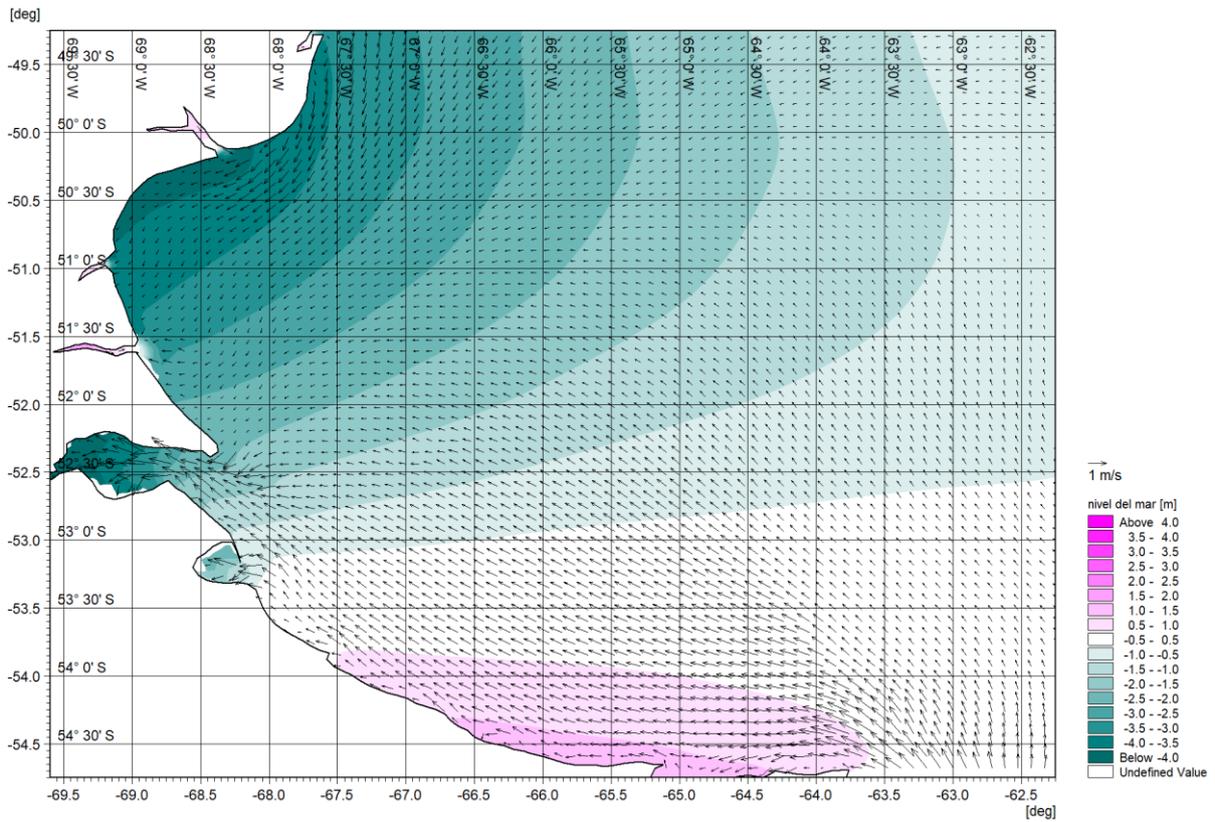


Figura 6.3.14 Ejemplo del campo regional de corrientes y niveles del mar (referidos al NMM) utilizado para la modelación de derrames. Instante 14: corrientes superficiales y niveles del mar en condiciones de marea creciente en la zona de Fenix.

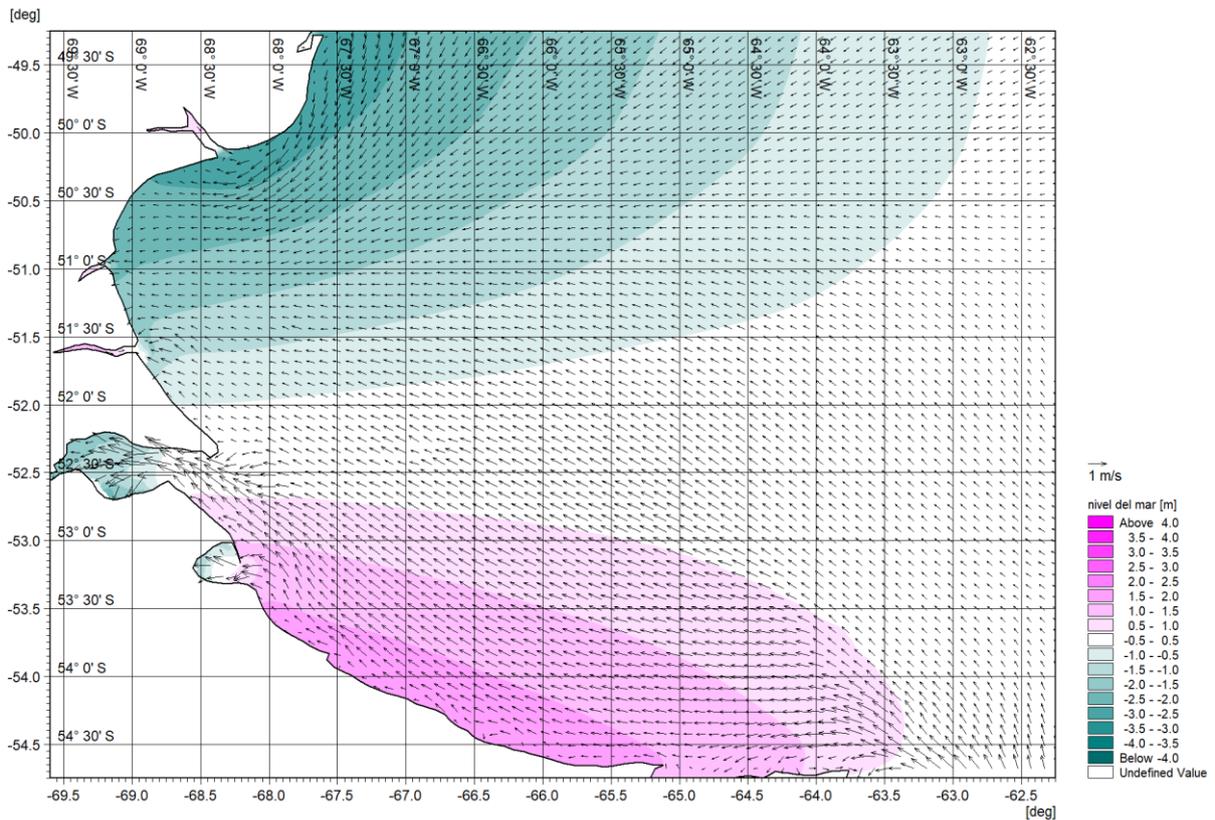


Tabla 6.3.4 Cronograma de simulaciones del derrame de MGO para el campo de corrientes del año 2008.

Corrida	2008																							
	ene		feb		mar		abr		may		jun		jul		ago		sep		oct		nov		dic	
	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15
1	█																							
2		█																						
3			█																					
4				█																				
5					█																			
6						█																		
7							█																	
8								█																
9									█															
10										█														
11											█													
12												█												
13													█											
14														█										
15															█									
16																█								
17																	█							
18																		█						
19																			█					
20																				█				
21																					█			
22																						█		
23																							█	
24																								█

Tabla 6.3.5 Cronograma de simulaciones del derrame de MGO para el campo de corrientes del año 2008.

Corrida	2016																							
	ene		feb		mar		abr		may		jun		jul		ago		sep		oct		nov		dic	
	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15
25	█																							
26		█																						
27			█																					
28				█																				
29					█																			
30						█																		
31							█																	
32								█																
33									█															
34										█														
35											█													
36												█												
37													█											
38														█										
39															█									
40																█								
41																	█							
42																		█						
43																			█					
44																				█				
45																					█			
46																						█		
47																							█	
48																								█

Tabla 6.3.6 Cronograma de simulaciones del derrame de MGO para el campo de corrientes del año 2008.

Corrida	2018																								
	ene		feb		mar		abr		may		jun		jul		ago		sep		oct		nov		dic		
	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	
49	█																								
50		█																							
51			█																						
52				█																					
53					█																				
54						█																			
55							█																		
56								█																	
57									█																
58										█															
59											█														
60												█													
61													█												
62														█											
63															█										
64																█									
65																	█								
66																		█							
67																			█						
68																				█					
69																					█				
70																						█			
71																							█		
72																								█	

Tabla 6.3.7 Cronograma de simulaciones del derrame de MGO para el campo de corrientes del año 2008.

Corrida	2020																										
	ene		feb		mar		abr		may		jun		jul		ago		sep		oct		nov		dic				
	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	
73	█																										
74		█																									
75			█																								
76				█																							
77					█																						
78						█																					
79							█																				
80								█																			
81									█																		
82										█																	
83											█																
84												█															
85													█														
86														█													
87															█												
88																█											
89																	█										
90																		█									
91																			█								
92																				█							
93																					█						
94																						█					
95																							█				
96																								█			

6.4. Resultados de las simulaciones de los potenciales derrames de hidrocarburos

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones de los derrames de hidrocarburos. El modelo MIKE 3 OS simula el derrame como una fuente de producto durante cierto tiempo, 213 días para el caso del Blowout y 6 h para el derrame de MGO. El hidrocarburo se mueve con las corrientes y el viento, se dispersa, se evapora (la porción volátil), se biodegrada y sedimenta, en diferentes proporciones, dependiendo de las condiciones ambiente, en espacio y tiempo. Entonces para estudiar los resultados de estas simulaciones se calcularon los campos de las condiciones promedio y máximas de las siguiente variables:

- Densidad de la película de hidrocarburo sobre la superficie del mar (g/m^2)
- Concentración de hidrocarburo en la columna de agua (ppb)
- Masa de hidrocarburo depositada en el fondo (g/m^2)

Para las simulaciones del Blowout se han realizado 19 corridas del modelo con la fuente activa durante 213 días, liberando 420 m^3 de condensado por día. Los resultados se colapsaron en mapas de condiciones medias y máximas, y sobre éstos se obtuvieron las distancias máximas a las que ocurren algunos datos útiles para las evaluaciones ambientales. Para estas simulaciones se utilizaron unos 10 años de condiciones hidrodinámicas. Estos resultados se presentan en las Tablas 6.4.1 a 6.4.3.

Tabla 6.4.3 Resultados de las simulación del Blowout. Densidad de la película del hidrocarburo máximas y asociadas a la masa en g/m^2 .

Corrida	Campo de concentraciones promedio			Campo de concentraciones máximas			
	Máxima densidad observada (g/m^2)	Máxima distancia (km) a la que ocurre		Máxima densidad observada (g/m^2)	Máxima distancia (km) a la que ocurre		
		0.5 g/m^2	1 g/m^2		0.5 g/m^2	1 g/m^2	5 g/m^2
1	2.1	15.4	3.7	10.4	51.4	32.1	5.5
2	2.1	15.4	3.7	8.0	50.2	33.4	10.1
3	2.1	14.6	3.7	9.7	59.5	54.0	15.4
4	2.1	15.4	3.7	8.1	65.3	54.7	11.3
5	2.0	15.4	1.0	6.9	54.1	50.3	2.1
6	2.1	18.1	3.7	6.8	62.5	51.1	17.2
7	2.1	14.6	3.7	6.9	51.8	40.3	15.4
8	2.1	22.0	22.0	7.1	53.2	38.0	10.1
9	2.1	21.6	21.6	7.5	81.9	49.5	14.8
10	2.1	13.8	3.7	7.4	59.2	50.9	15.4
11	2.1	13.2	3.7	8.5	59.8	51.4	15.4
12	2.1	15.4	3.7	7.4	59.6	54.9	27.8
13	2.2	30.9	20.4	9.6	61.5	55.8	28.2
14	2.2	13.8	3.7	7.6	65.3	34.1	13.2
15	2.1	14.6	3.7	7.2	59.8	53.8	12.0
16	2.3	15.4	3.7	7.6	58.6	53.3	15.4
17	2.1	13.2	3.7	7.2	56.8	43.6	25.1
18	2.1	25.4	3.7	8.4	55.1	30.5	16.0
19	2.2	26.1	3.7	8.2	51.8	42.5	13.8
Promedio	2.1	15.4	3.7	7.8	53.8	32.6	6.1
Máximo	2.3	30.9	22.0	10.4	81.9	55.8	28.2

Tabla 6.4.2 Resultados de las simulación del Blowout. Concentraciones máximas y asociadas a diferentes límites de interés para el medioambiente. Se discriminan los resultados de los campos de concentraciones promedio y máximas.

Corrida	Campo de concentraciones promedio			Campo de concentraciones máximas			
	Máxima concentración observada (ppb)	Máxima distancia (km) a la que ocurre		Máxima concentración observada (ppb)	Máxima distancia (km) a la que ocurre		
		5 ppb	10 ppb		10 ppb	50 ppb	100 ppb
1	27.6	23.5	6.7	142.3	35.7	16.5	1.0
2	28.4	18.1	6.7	109.3	35.3	20.0	2.1
3	27.5	15.4	6.7	133.3	54.0	15.4	5.5
4	27.6	16.8	10.1	109.9	54.7	21.3	1.0
5	27.1	18.1	10.1	93.5	50.3	16.5	0.0
6	28.0	20.5	10.1	92.7	51.1	20.0	0.0
7	27.9	20.2	6.7	93.8	40.3	15.4	0.0
8	27.7	30.9	22.0	96.7	43.2	19.4	0.0
9	28.0	22.0	22.0	102.7	62.3	23.4	2.1
10	27.8	59.3	10.1	100.0	59.3	21.3	0.0
11	27.9	63.3	7.9	118.4	67.0	19.4	1.0
12	28.3	18.1	10.1	100.0	55.8	33.8	0.0
13	29.4	48.3	30.9	132.4	57.2	34.1	1.0
14	28.7	18.1	5.2	104.5	47.6	19.9	2.1
15	28.7	20.4	10.1	98.4	53.8	16.5	0.0
16	30.3	17.6	15.4	103.9	53.3	15.4	2.1
17	28.6	21.4	10.1	99.2	48.0	28.4	0.0
18	28.5	27.0	10.1	114.8	35.7	16.7	3.3
19	28.8	29.6	20.2	112.8	42.5	20.2	1.0
Promedio	28.3	15.4	10.1	106.7	37.4	16.5	1.0
Máximo	30.3	63.3	30.9	142.3	67.0	34.1	5.5

Tabla 6.4.3 Resultados de las simulación del Blowout. Masa media y máxima acumulada en el fondo para las 19 corridas realizadas

Corrida	Campo de masa acumulada promedio			Campo de masa acumulada máxima			
	Máxima acumulación observada (mg/kg)	Máxima distancia (km) a la que ocurre		Máxima acumulación observada (mg/kg)	Máxima distancia (km) a la que ocurre		
		0.01 mg/kg	0.05 mg/kg		0.01 mg/kg	0.1 mg/kg	0.2 mg/kg
1	0.06	36.0	20.0	0.27	50.3	20.5	14.8
2	0.06	29.4	16.5	0.30	53.3	26.4	15.4
3	0.05	26.6	0	0.24	68.5	21.0	12.5
4	0.05	27.0	13.0	0.29	72.7	21.9	13.0
5	0.05	48.2	0	0.23	63.2	20.2	9.2
6	0.07	59.0	21.6	0.27	59.8	21.0	15.4
7	0.06	40.4	15.4	0.25	62.1	19.4	14.8
8	0.06	24.8	13.0	0.23	65.0	21.1	15.4
9	0.06	27.8	13.0	0.25	65.0	29.4	16.5
10	0.09	60.7	59.3	0.26	72.2	60.7	59.3
11	0.20	67.0	67.0	0.52	72.4	67.0	67.0
12	0.07	58.2	16.5	0.26	69.1	41.5	16.5
13	0.06	50.4	13.0	0.27	72.0	23.7	13.0
14	0.06	23.6	15.4	0.24	76.2	25.3	16.5
15	0.07	24.8	15.4	0.30	59.8	20.5	16.5
16	0.07	24.8	15.4	0.29	66.8	20.5	15.4
17	0.07	24.8	15.4	0.26	74.0	21.7	15.4
18	0.06	23.6	13.0	0.27	65.0	19.8	13.0
19	0.06	24.8	15.4	0.30	56.8	19.4	13.0
Promedio	0.06	24.8	13.0	0.24	60.7	20.5	13.0
Máximo	0.20	67.0	67.0	0.52	76.2	67.0	67.0

Para las simulaciones del derrame de MGO se realizó un análisis similar, pero dado que el tiempo de la fuente activa en este caso es de 6 h, se realizaron una mayor cantidad de simulaciones (96) distribuidas en 4 años de condiciones hidrodinámicas. El volumen derramado en las mencionadas 6 h fue de 200 m³.

En las Tablas 6.4.4 a 6.4.6 se presentan los resultados de las simulaciones de los derrame de MGO con condiciones máximas, y las distancias máximas a las que ocurren algunos valores característicos. Estas tablas incluyen los resultados resumen de las simulaciones del Blowout. Para interpretar correctamente estas tablas, considerar el siguiente ejemplo: el campo de concentraciones promedio asociado al derrame de MGO (ver Figura 6.4.8 y Tabla 6.4.5 con el resumen de algunos valores característicos), mostró una máxima concentración de 16.1 ppb, además puede verse que la máxima distancia a la que ocurren los 10 ppb es de 3.7 km y a la que ocurren 5 ppb es de 37.1 km.

Tabla 6.4.4 Densidad de la película de hidrocarburo sobre la superficie del mar.

Escenario	Campo de densidades promedio			Campo de densidades máximas			
	Máxima densidad observada (g/m ²)	Máxima distancia (km) a la que ocurre		Máxima densidad observada (g/m ²)	Máxima distancia (km) a la que ocurre		
		0.5 g/m ²	1 g/m ²		0.5 g/m ²	1 g/m ²	5 g/m ²
Derrame de MGO en Fenix	1.2	11.3	3.7	8.7	357.8	349.0	35.3
Blowout en Fenix	2.1	15.4	3.7	10.4	81.9	55.8	28.2

Tabla 6.4.5 Concentración de hidrocarburo en la columna de agua

Concentración del MGO en la columna de agua	Campo de concentraciones promedio			Campo de concentraciones máximas			
	Máxima concentración observada (ppb)	Máxima distancia (km) a la que ocurre		Máxima concentración observada (ppb)	Máxima distancia (km) a la que ocurre		
		5 ppb	10 ppb		10 ppb	50 ppb	100 ppb
Derrame de MGO en Fenix	16.1	37.6	3.7	113.1	85.9	39.5	5.5
Blowout en Fenix	28.3	15.4	10.1	142.3	67.0	34.1	5.5

Tabla 6.4.6 Masa de hidrocarburo depositada en el fondo

Masa de MGO depositada en el fondo	Campo de masa acumulada promedio			Campo de masa acumulada máxima			
	Máxima acumulación (mg/kg)	máxima distancia (km) a la que ocurre		Máxima acumulación (mg/kg)	máxima distancia (km) a la que ocurre		
		0.01 mg/kg	0.05 mg/kg		0.01 mg/kg	0.1 mg/kg	0.2 mg/kg
Derrame de MGO en Fenix	0.04	58.9	0.0	0.17	312.2	53.0	0.0
Blowout en Fenix	0.06	24.8	13.0	0.52	76.2	67.0	67.0

Las características del producto condensado que se utiliza en la simulación del Blowout son diferentes de las del MGO. La simulación del Blowout considera un volumen importante de condensado liberado al mar de un producto muy volátil que el modelo muestra que no permanece mucho tiempo en suspensión. El MGO posee una importante cantidad de la fracción pesada en su composición y también algo de ceras y naftalenos, por lo que, aunque el volumen considerado en el derrame es menor al considerado para simular el Blowout, su permanencia en suspensión es mayor.

Las simulaciones de ambos derrames muestran variaciones espaciotemporales de uno y otro producto, con la acumulación temporal del hidrocarburo dependiendo de la condiciones hidrodinámicas de cada nodo de cálculo, forzado por la marea astronómica, los vientos y las corrientes de mayor escala. Sobre estos resultados se han generado los campos medios y máximos de las concentraciones en ppb y densidades de la película del hidrocarburo sobre la superficie del mar en g/m^2 .

A continuación, se presenta algunos valores de concentraciones (ppb) máximas y medias y las densidades de la película del hidrocarburo:

- **Blowout en Fenix.** Puede verse que la máxima concentración asociada al Blowout es 142.3 ppb (10.4 g/m^2) y que las concentraciones superiores a 100 ppb ocurren hasta unos 5.5 km de la fuente. Estas condiciones máximas corresponden a una condición puntual ocurrida durante los 10 años de simulaciones. Si bien para los análisis ambientales los valores máximos son indicadores útiles no siempre son realistas porque pueden ser condiciones que ocurren anormalmente. En este sentido resulta interesante analizar los resultados del campo medio (correspondiente al promedio temporal de las zonas donde se identificó hidrocarburo) que indica una concentración promedio máxima de 28.3 ppb y 2.1 g/m^2 para la densidad promedio máxima de la película del hidrocarburo (ver curvas rojas en las Figuras 6.4.1 y 6.4.2) y que solo se superan los 10 ppb a hasta unos 10.1 km de distancia de la fuente (Fenix).
- **Derrame de MGO en Fenix.** Los resultados de las simulaciones indican que la máxima concentración asociada al derrame de MGO en Fenix es 142.3 ppb (10.4 g/m^2 para la densidad de la película del hidrocarburo) y que las concentraciones superiores a 100 ppb ocurren hasta unos 5.5 km de la fuente. Los resultados del campo medio (correspondiente al promedio temporal de las zonas donde se identificó hidrocarburo) que indica una concentración promedio máxima de 28.3 ppb y 2.1 g/m^2 para la densidad promedio máxima de la película del hidrocarburo (ver curvas rojas en las Figuras 6.4.5 y 6.4.6) y que solo se superan los 10 ppb a hasta unos 10.1 km de distancia de la fuente (Fenix).

Las Figuras 6.4.1, 6.4.2, 6.4.5 y 6.4.6 presentan las series de tiempo de las densidades de la película y concentraciones máximas del hidrocarburo, de las todas las simulaciones superpuestas (19 para el Blowout y 96 para los derrames de MGO) y el valor promedio de cada instante (arriba). Series de tiempo superpuestas de todas las simulaciones y los valores de referencia asociados a las zonas de alta, moderada y baja exposición (abajo).

Las Figuras 6.4.3, 6.4.4, 6.4.7 y 6.4.8 presentan las distribuciones espaciales de los campos medios donde se ha encontrado hidrocarburo. Este cálculo se obtiene de la siguiente manera: para cada instante temporal de la simulación se identifican los nodos de la grilla en los que hay presencia de hidrocarburo, luego se suman las concentraciones o las densidades y se las divide por la cantidad de instantes en los que hubo hidrocarburo allí. De manera que no es un promedio sobre tiempo de la simulación, lo es para el período donde hubo hidrocarburo.

Las Figuras 6.4.9 y 6.4.10 presentan las distribuciones de probabilidad porcentual de encontrar el hidrocarburo en alguna parte del dominio, si el derrame ocurre. Las figuras muestran los resultados para el Blowout y para el derrame de MGO.

Figura 6.4.1 Resultados de la simulaciones del Blowout. Densidad de la película del hidrocarburo máxima observada durante las 19 simulaciones realizadas (cobertura temporal de 10 años). Series de tiempo superpuestas de las 19 simulaciones y el valor promedio de cada instante (arriba). Series de tiempo superpuestas de las 19 simulaciones y los valores de referencia asociados a las zonas de alta, moderada y baja exposición (medio). Distribución espacial de las máximas densidades observadas durante las 19 simulaciones.

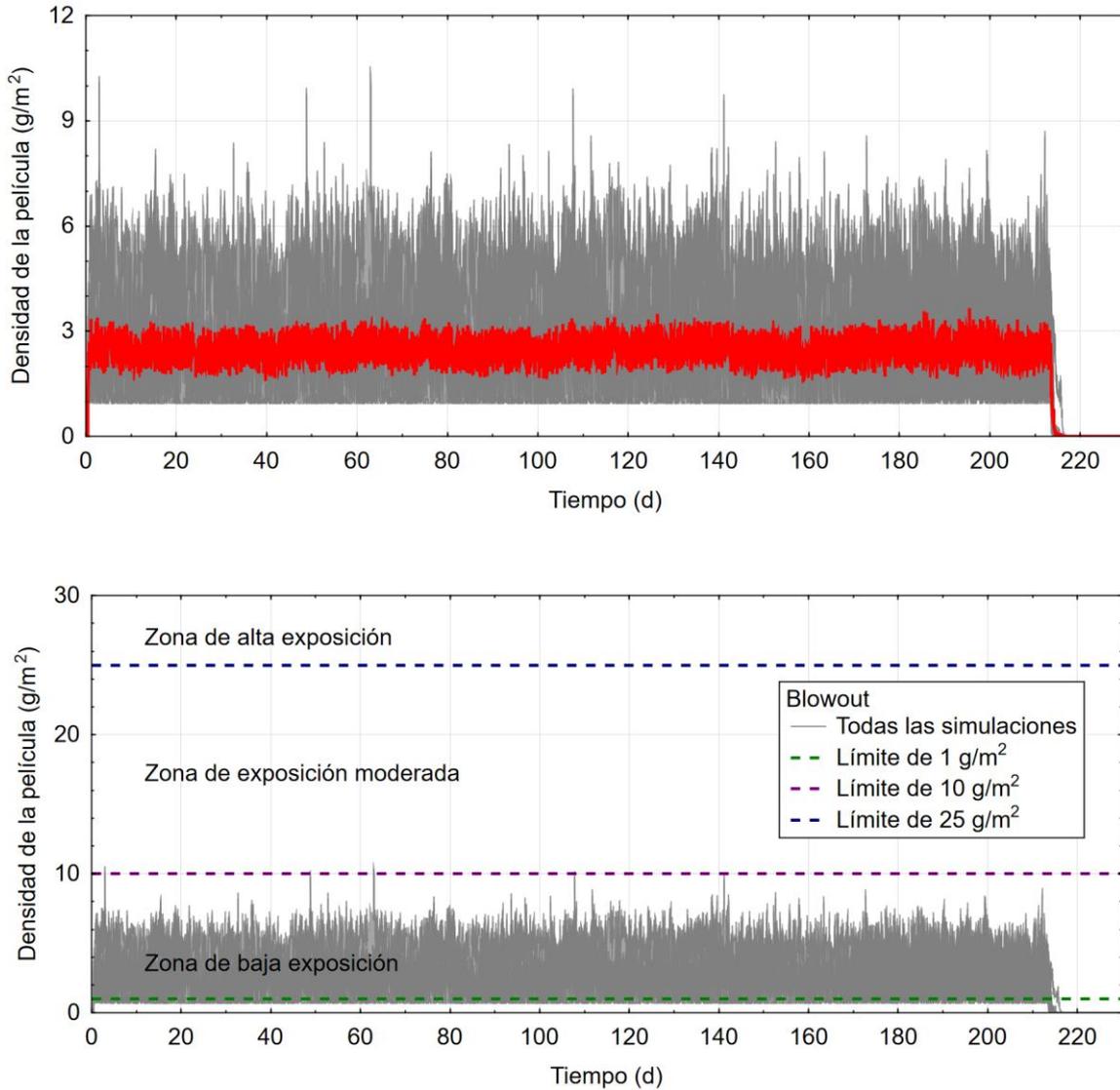


Figura 6.4.2. Resultados de la simulaciones del Blowout en Fenix. Concentración del hidrocarburo máxima observada durante las 19 simulaciones realizadas (cobertura temporal de 10 años). Series de tiempo superpuestas de las 19 simulaciones y el valor promedio de cada instante (arriba). Series de tiempo superpuestas de las 19 simulaciones y los valores de referencia asociados a las zonas de alta, moderada y baja exposición (medio). Distribución espacial de las máximas concentraciones observadas durante las 19 simulaciones.

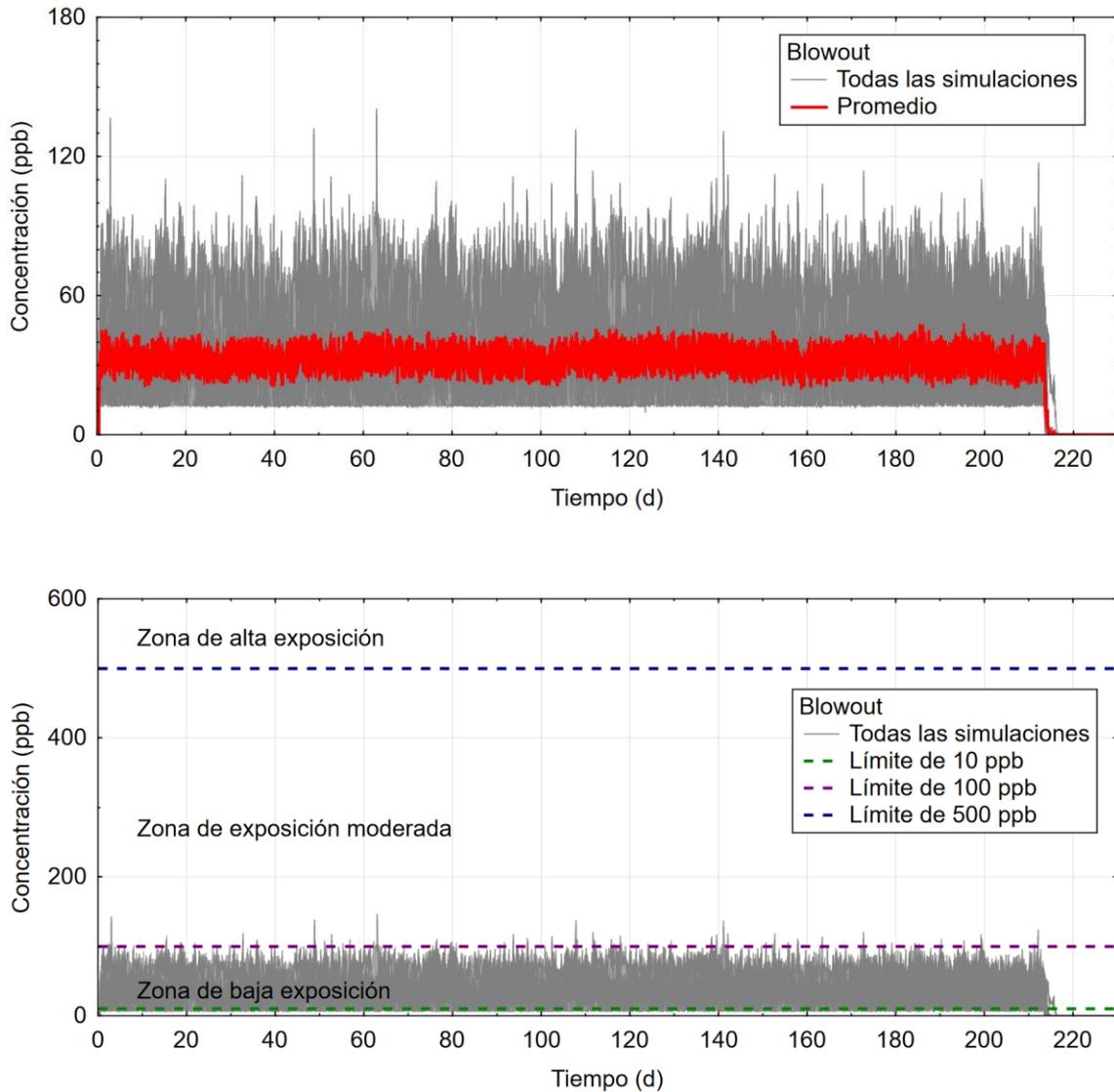


Figura 6.4.3. Resultados de la simulaciones del Blowout Fenix. Densidad de la película del hidrocarburo promedio observada durante las 19 simulaciones realizadas (cobertura temporal de 10 años).

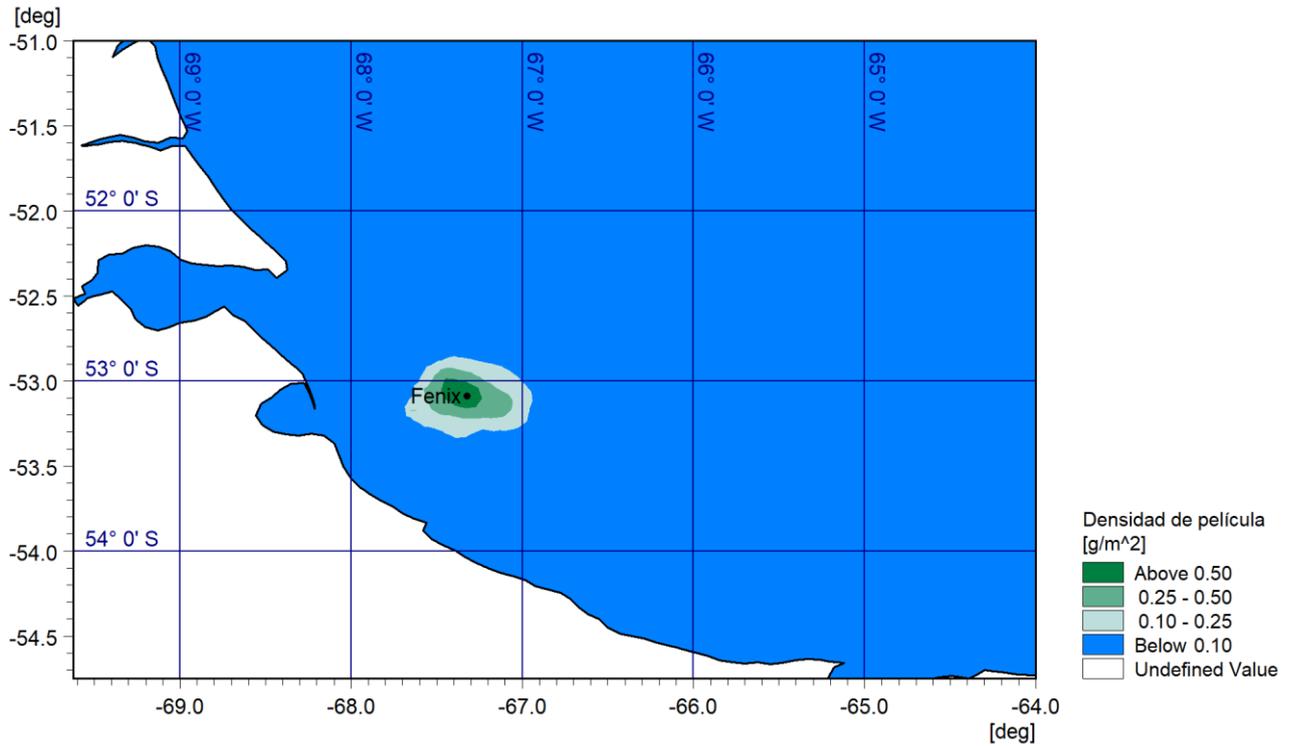


Figura 6.4.4. Resultados de la simulaciones del Blowout Fenix. Concentración del hidrocarburo promedio observada durante las 19 simulaciones realizadas (cobertura temporal de 10 años).

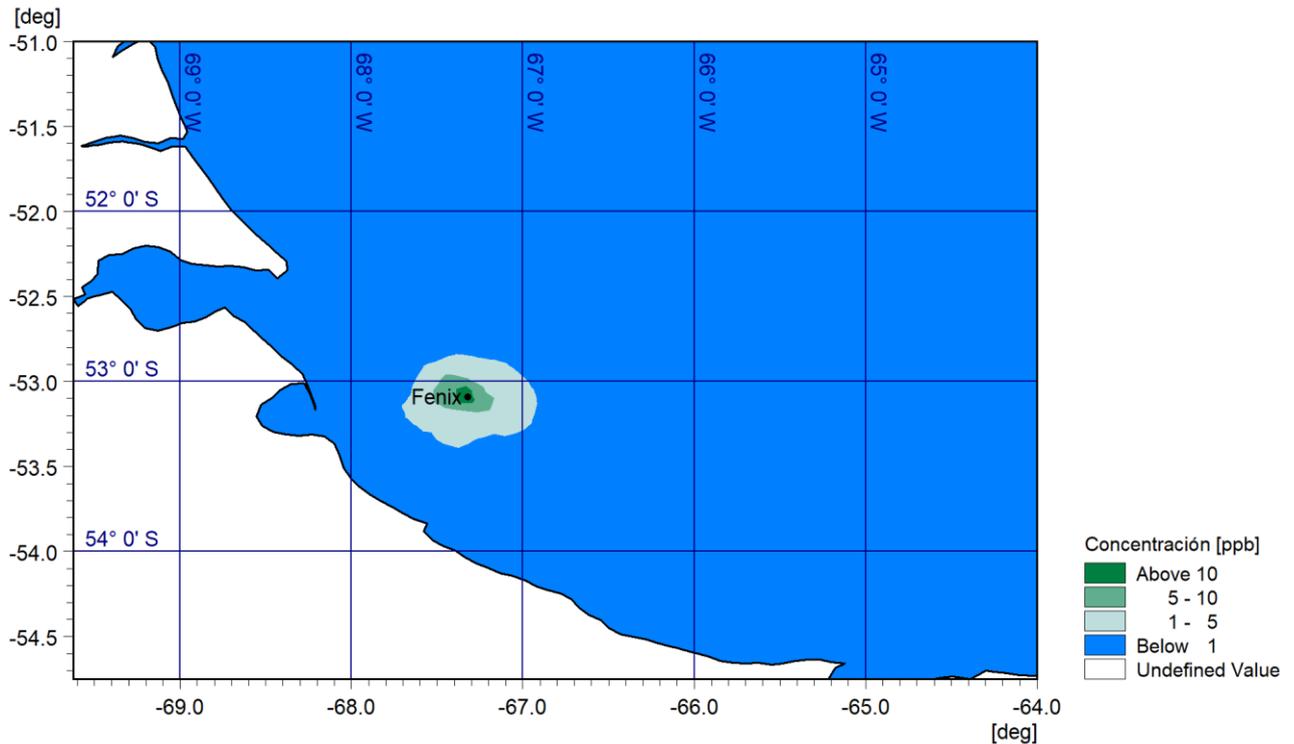


Figura 6.4.5 Resultados de la simulaciones del derrame del MGO Fenix. Densidad de la película del hidrocarburo máxima observada durante las 96 simulaciones realizadas (cobertura temporal de 4 años). Series de tiempo superpuestas de las 96 simulaciones y el valor promedio de cada instante (arriba). Series de tiempo superpuestas de las 96 simulaciones y los valores de referencia asociados a las zonas de alta, moderada y baja exposición (medio). Distribución espacial de las máximas densidades observadas durante las 96 simulaciones.

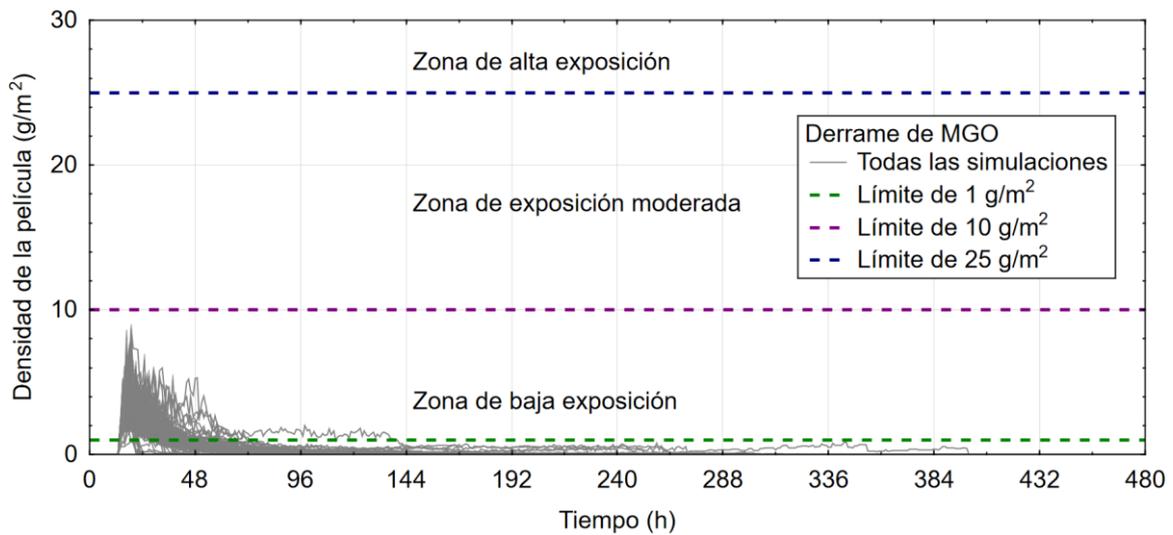
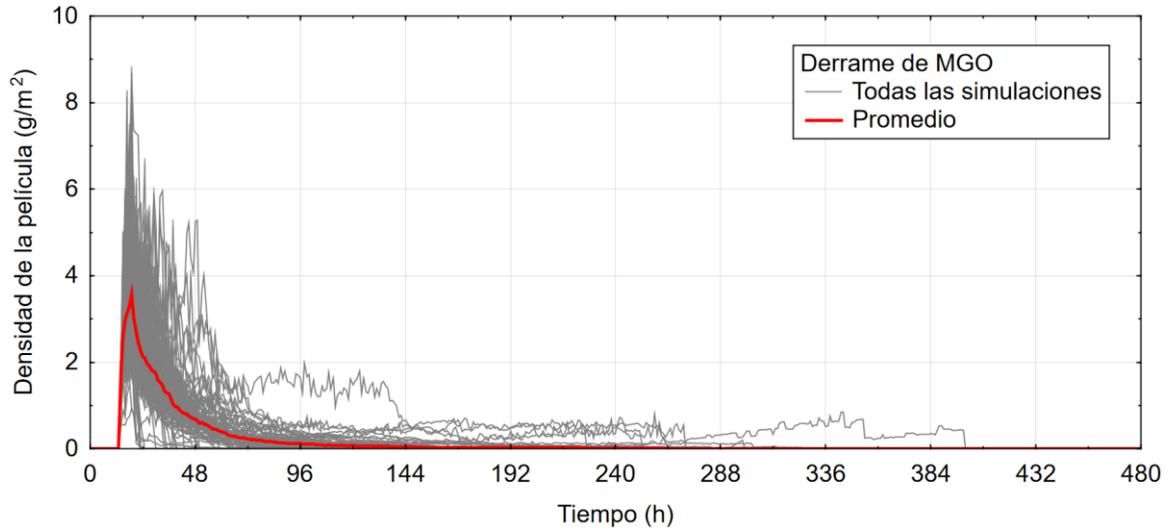


Figura 6.4.6 Resultados de la simulaciones del derrame del MGO en Fenix. Concentraciones del hidrocarburo máxima observada durante las 96 simulaciones realizadas (cobertura temporal de 4 años). Series de tiempo superpuestas de las 96 simulaciones y el valor promedio de cada instante (arriba). Series de tiempo superpuestas de las 96 simulaciones y los valores de referencia asociados a las zonas de alta, moderada y baja exposición (medio). Distribución espacial de las máximas concentraciones observadas durante las 96 simulaciones.

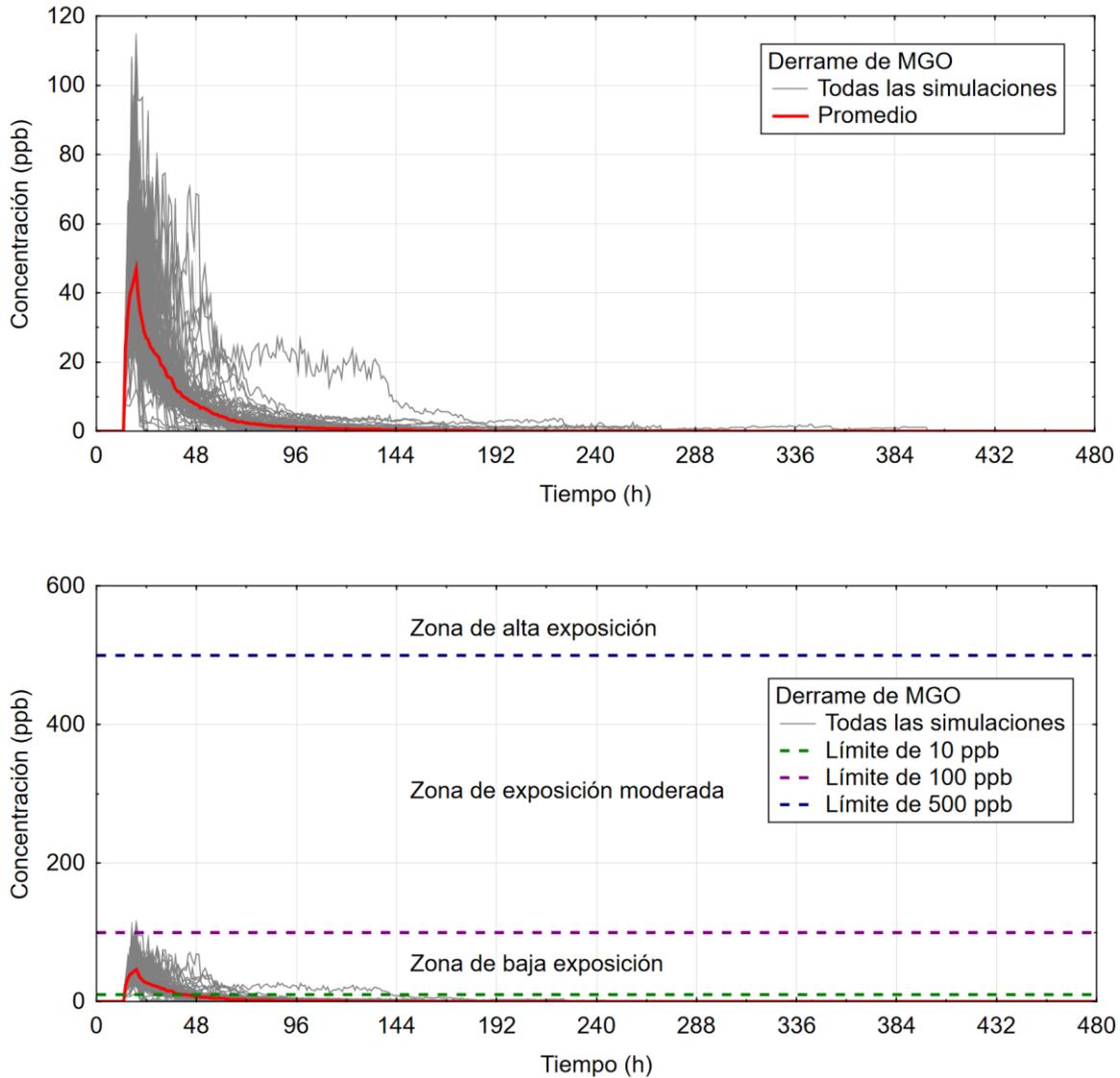


Figura 6.4.7 Resultados de la simulaciones del derrame del MGO en Fenix. Densidad de la película del hidrocarburo promedio observada durante las 96 simulaciones realizadas (cobertura temporal de 4 años).

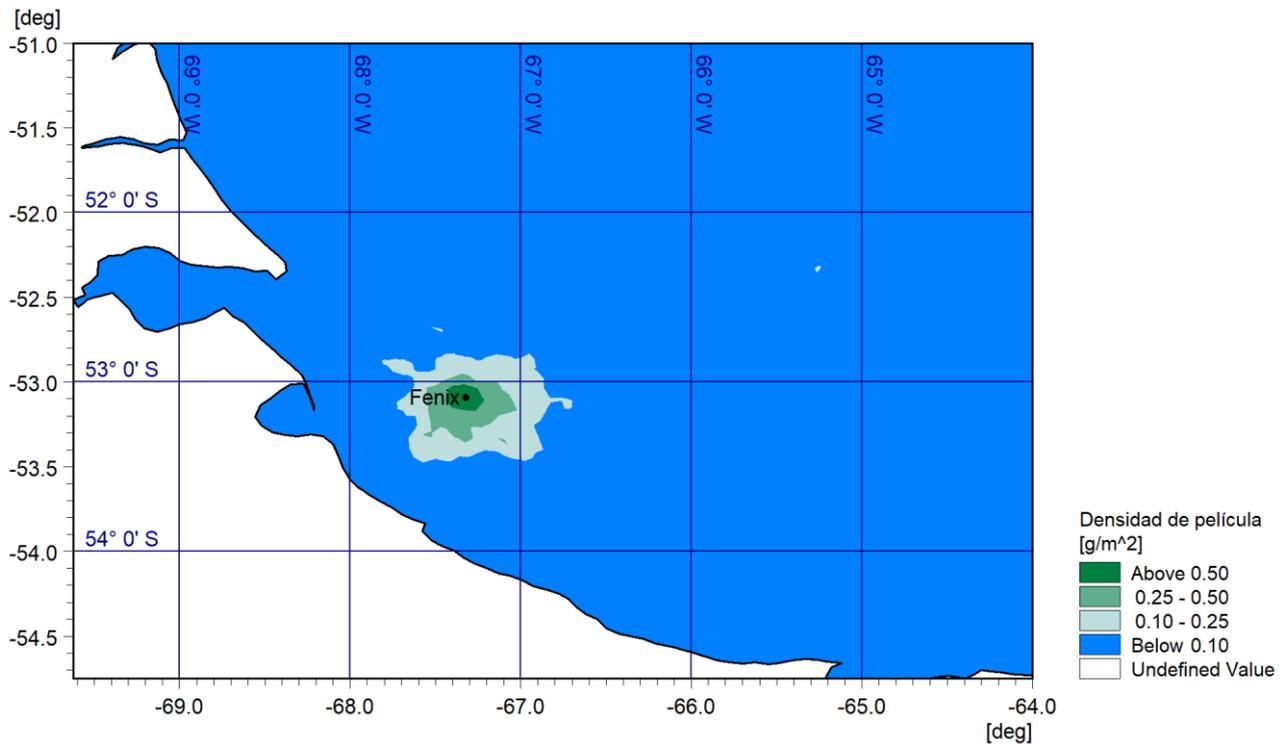


Figura 6.4.8 Resultados de la simulaciones del derrame del MGO en Fenix. Concentraciones del hidrocarburo promedio observada durante las 96 simulaciones realizadas (cobertura temporal de 4 años).

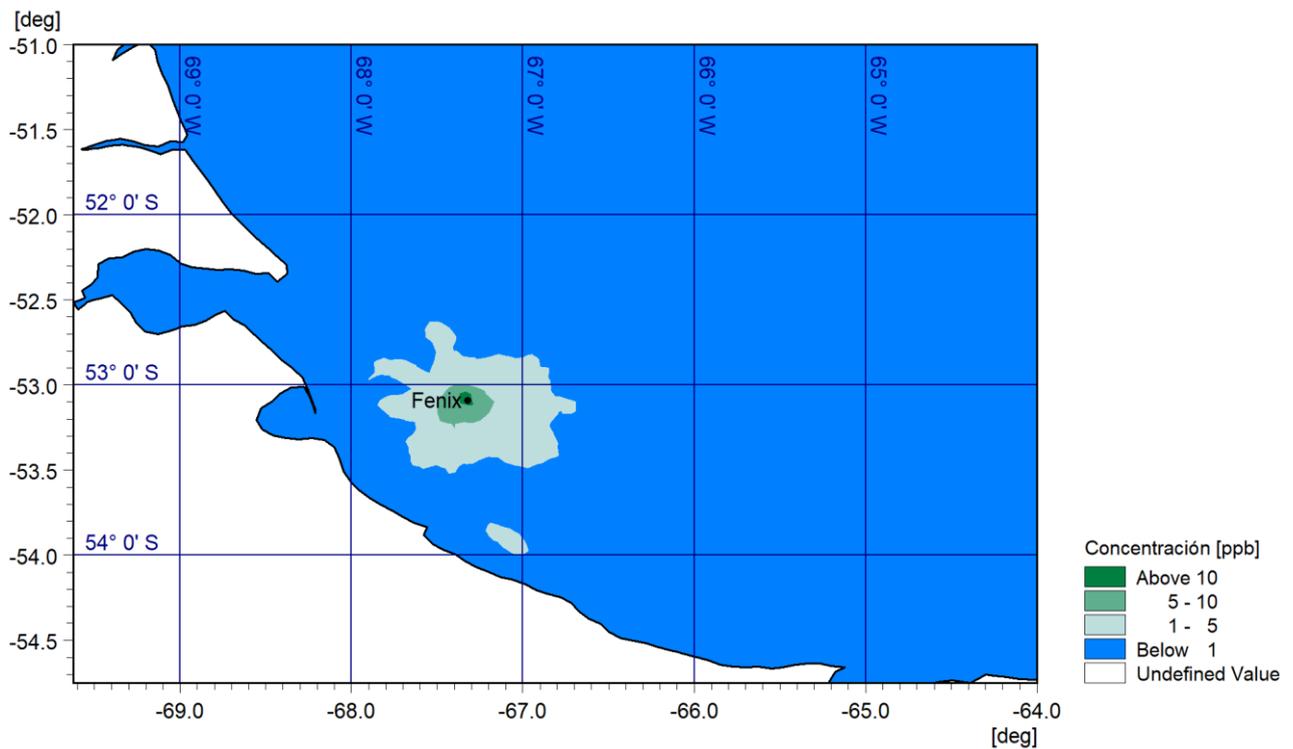


Figura 6.4.9 Resultados de la simulaciones del Blowout en Fenix. Probabilidad porcentual de encuentro de la película del hidrocarburo observada durante las 19 simulaciones realizadas (cobertura temporal 10 años). Esta probabilidad las posibilidades de encontrar hidrocarburo si el derrame ocurre.

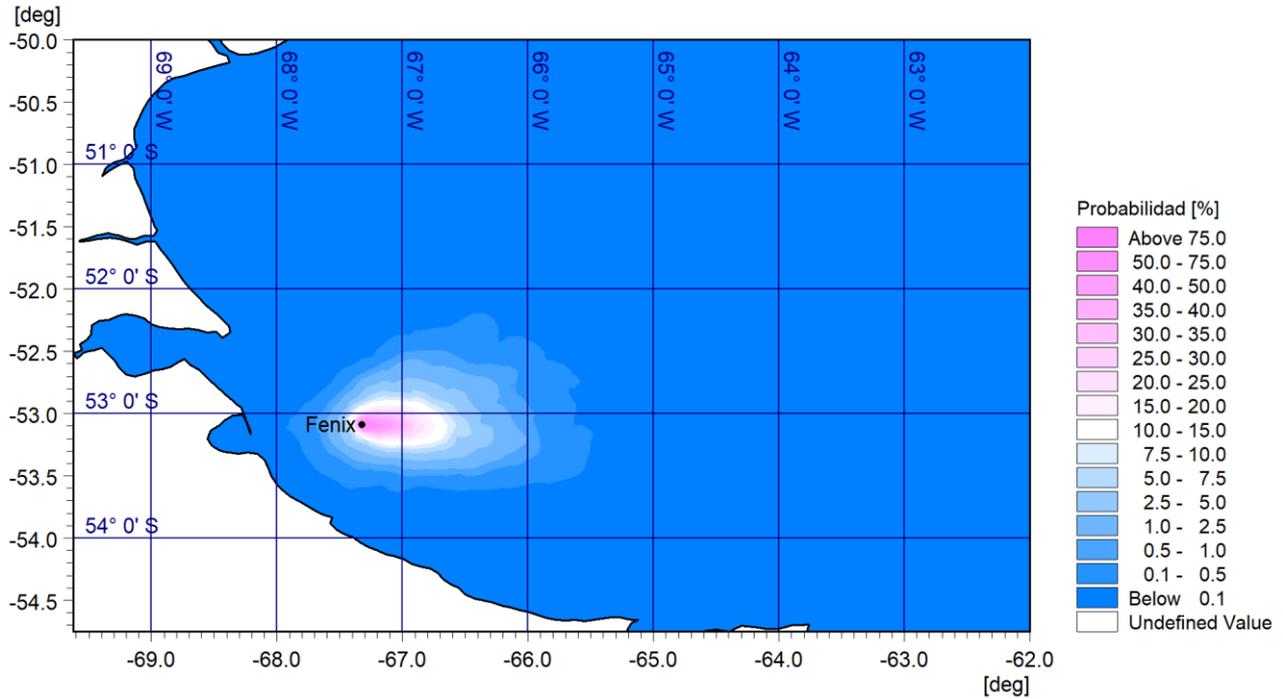
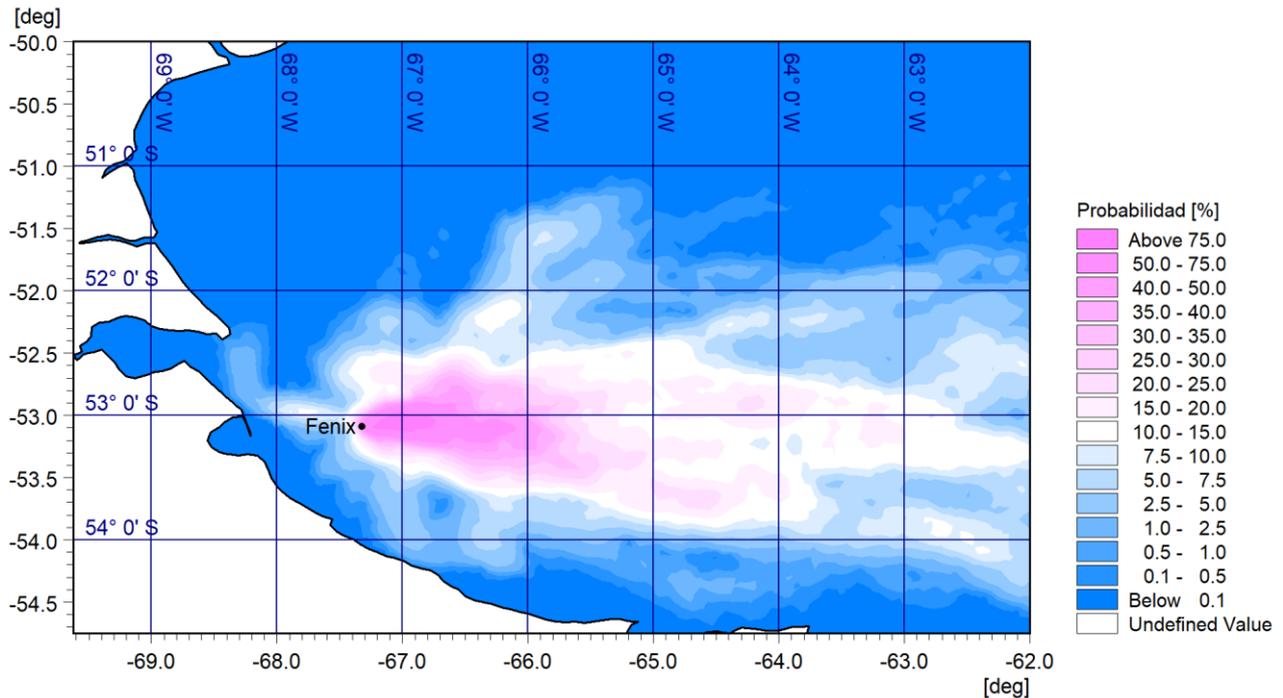


Figura 6.4.10 Resultados de la simulaciones del derrame del MGO en Fenix. Probabilidad porcentual de encuentro de la película del hidrocarburo observada durante las 96 simulaciones realizadas (cobertura temporal 4 años). Esta probabilidad las posibilidades de encontrar hidrocarburo si el derrame ocurre.



Áreas afectadas por los derrames

Para los campos promedios y máximos se analizaron las áreas a las ocurren 1 g/m^2 y 10 ppb tanto para las simulaciones del Blowout como para el derrame de MGO. Las áreas asociadas a concentraciones superiores a 10 ppb para los campos promedio son de 79 km^2 (Blowout) y 52 km^2 (derrame de MGO). Los resultados encontrados se presentan en la Tabla 6.4.7.

La similitud entre los resultados de las condiciones presentadas en la Tabla 6.4.7, radica en que no se han considerado los tiempos en los que se sostienen los derrames.

- Para el Blowout, en la peor condición los límites (10 ppb y 1 g/m^2), se sostienen 2.5 días posteriores a la finalización del derrame. En promedio, a las 12 h de terminado el derrame las concentraciones están por debajo de los límites (10 ppb y 1 g/m^2). Por lo tanto, la escala temporal del Blowout es de 215.5 días.
- Para el derrame de MGO de 6 h en Fenix, en el peor de los casos a los 5.5 días de comenzado el derrame ya no se observan concentraciones de 10 ppb o más (tampoco de 1 g/m^2). En promedio, los límites de interés (10 ppb y 1 g/m^2) se alcanzan a 1.1 días de comenzado el derrame. Por lo tanto, la escala temporal del derrame de MGO en Fenix es de 5.5 días.

Tabla 6.4.7 Áreas ocupadas por la densidad de la película de hidrocarburo de 1 g/m^2 y las concentraciones de 10 ppb , para el Blowout y el derrame de MGO.

Simulación de	Campos promedio		Campos máximos	
	área (km^2) con densidad $> 1 \text{ g/m}^2$	área (km^2) con concentración $> 10 \text{ ppb}$	área (km^2) con densidad $> 1 \text{ g/m}^2$	área (km^2) con concentración $> 10 \text{ ppb}$
Blowout	25	79	4266	5383
Derrame de MGO	37	52	5067	5422

En las Figuras 6.4.11 a 6.4.14 se presentan mapas con los campos máximos de la densidad de la película y concentraciones del hidrocarburo. En las 4 figuras las áreas verdes sumadas se corresponden con las superficies presentadas en la Tabla 6.4.7 para los campos máximos con densidades superiores a 1 g/m^2 y a 10 ppb .

Figura 6.4.11 Resultados de la simulaciones del Blowout Fenix. Densidad de la película del hidrocarburo máxima observada durante las 19 simulaciones realizadas (cobertura temporal de 10 años).

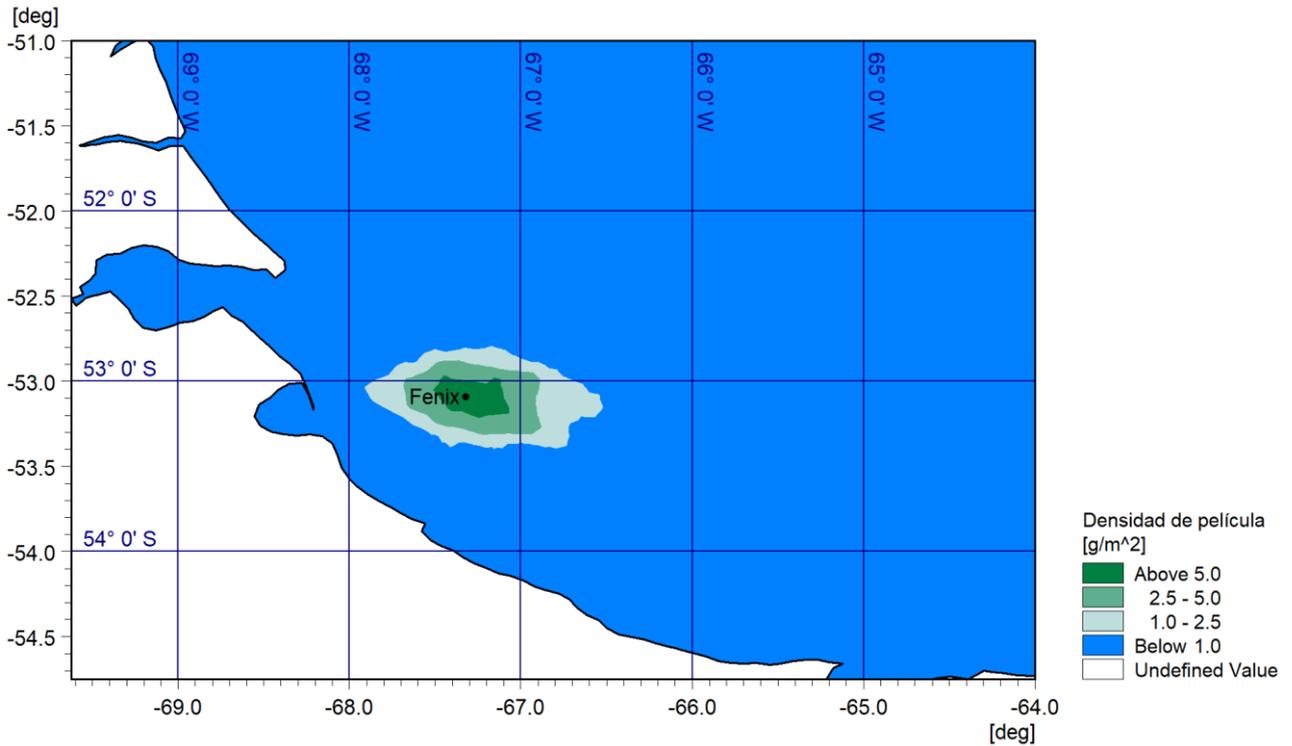


Figura 6.4.12 Resultados de la simulaciones del Blowout Fenix. Concentración del hidrocarburo máxima observada durante las 19 simulaciones realizadas (cobertura temporal de 10 años).

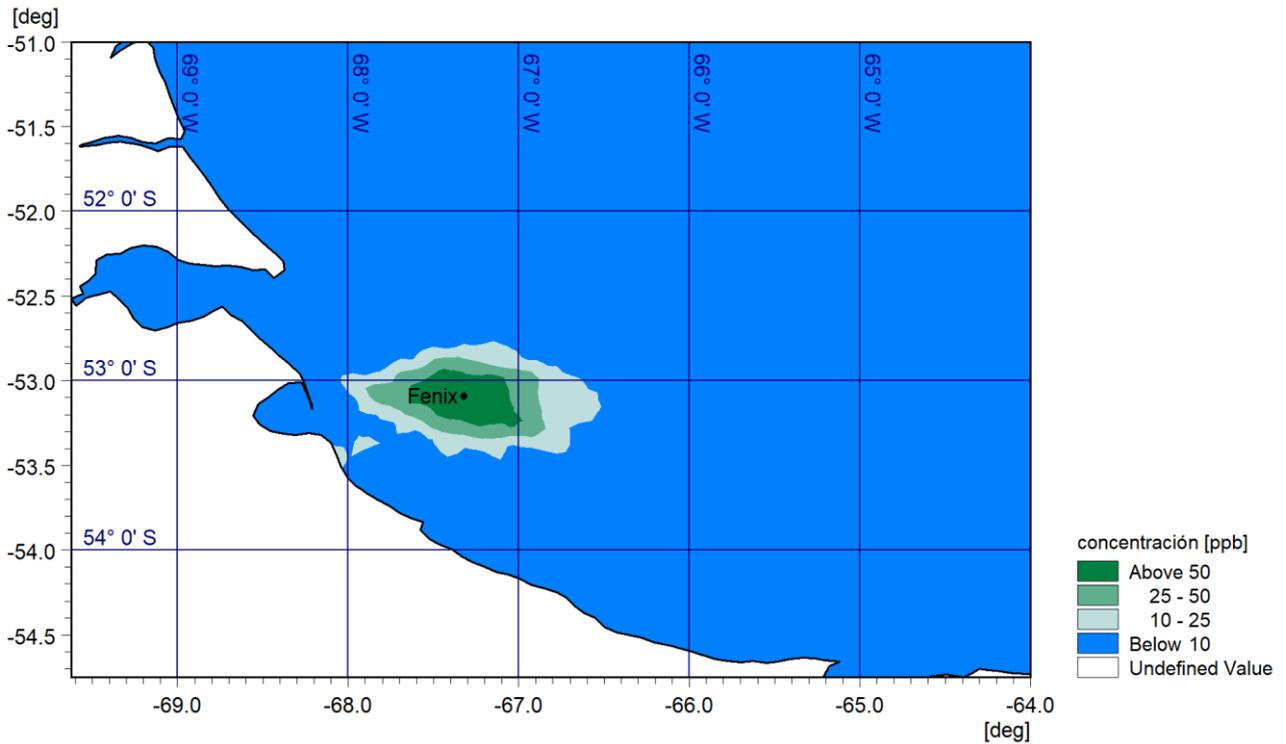


Figura 6.4.13 Resultados de la simulaciones del derrame del MGO en Fenix. Densidad de la película del hidrocarburo máxima observada durante las 96 simulaciones realizadas (cobertura temporal de 4 años).

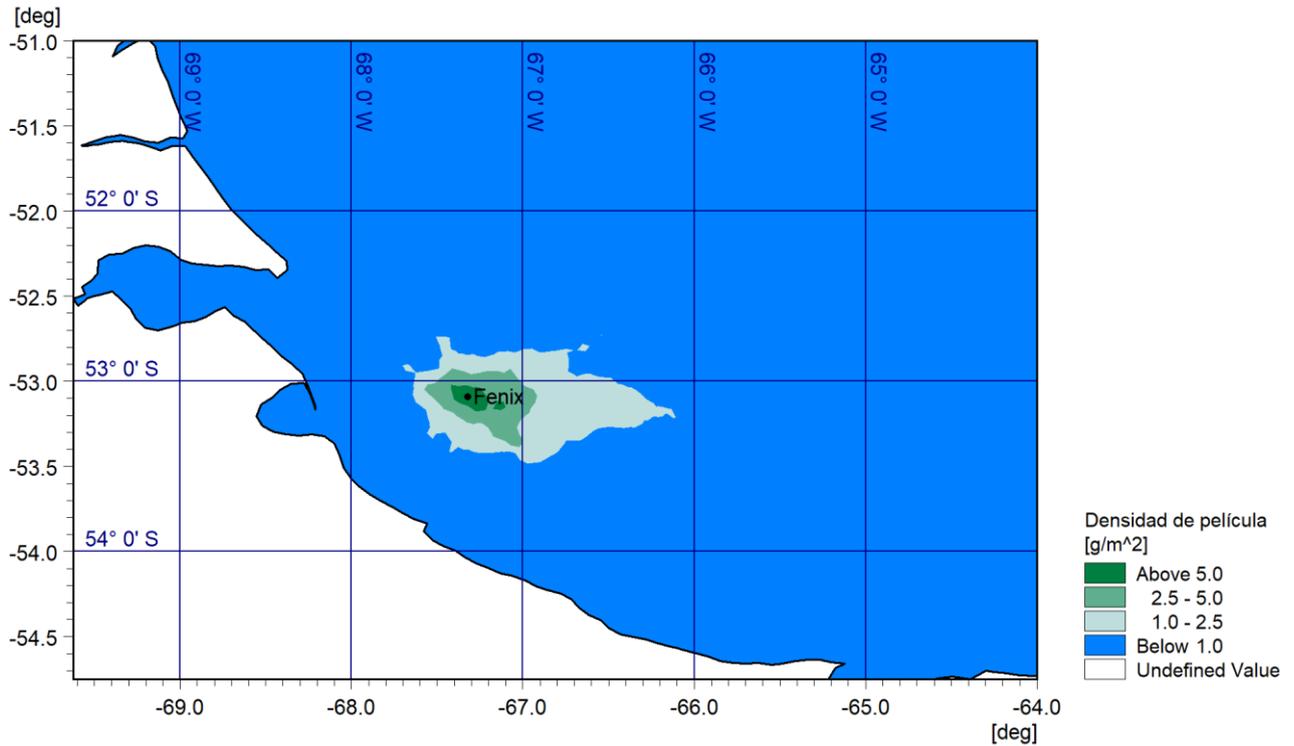
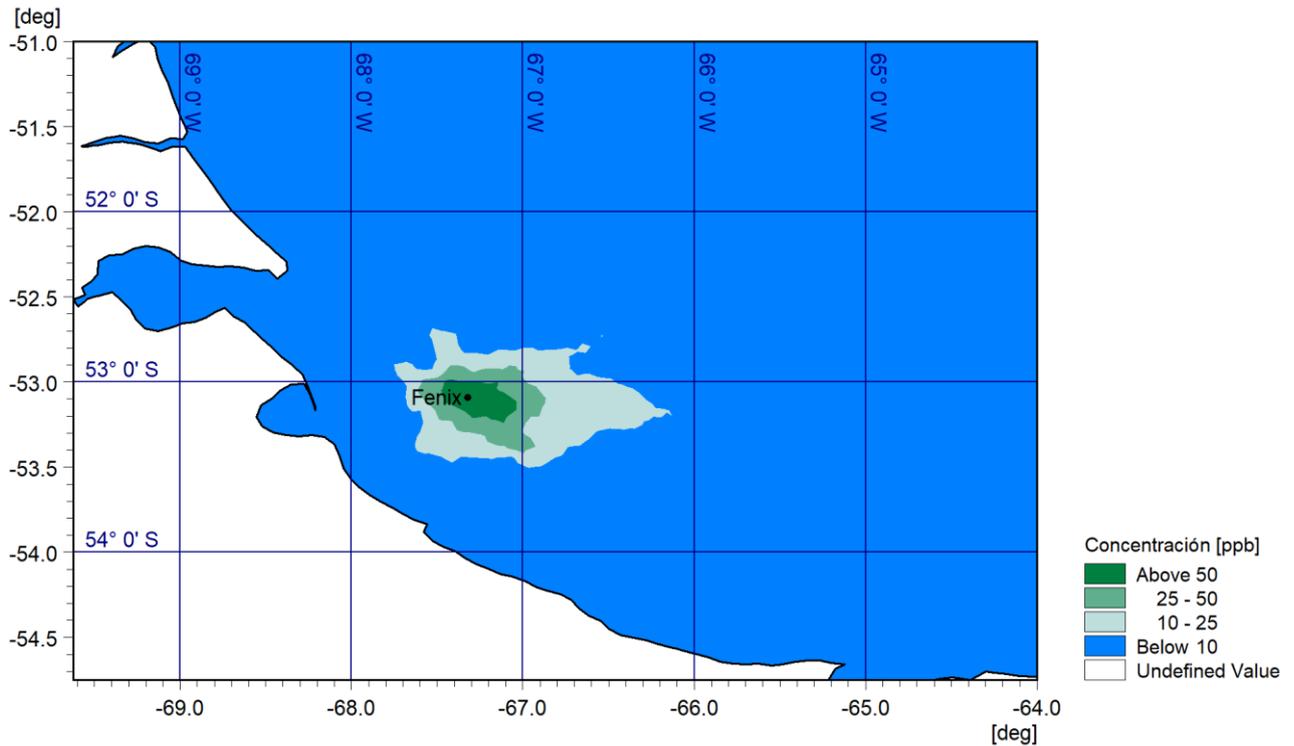


Figura 6.4.14 Resultados de la simulaciones del derrame de MGO en Fenix. Concentración del hidrocarburo máxima observada durante las 96 simulaciones realizadas (cobertura temporal de 4 años).



Hidrocarburos en la costa

Los resultados de la simulaciones de Blowout indican que el hidrocarburo llega a la costa en 8 veces en 19 corridas. La Tabla 6.4.8 presenta las características del hidrocarburo en la costa: el tiempo de arribo, la máxima concentración, la máxima densidad de la película y la máxima masa sedimentada.

En todas las simulaciones el arribo a la costa del hidrocarburo ocurre una vez en los 213 días, menos para la corrida 11 en la que se lo observa en 2 ocasiones. La primera ocurre 7 días después de comenzado el derrame y la segunda 158 días después de comenzado el derrame. Por lo tanto, en 10 años de simulaciones, el hidrocarburo arriba a la costa 9 veces (9 condiciones hidrodinámicas).

Probabilidad de arribo a la costa - derrame en Fenix

De las simulaciones del Blowout y del derrame de MGO se puede observar que el derrame arriba a la costa 1 vez por año, considerando 10 años de condiciones hidrodinámicas. En consecuencia, si el derrame dura 213 días (~7 meses) puede pensarse que la probabilidad de que llegue a la costa es del 58.4% ($213/365 \cdot 100$), ahora si el derrame dura 1 mes la probabilidad de arribo a la costa es 8.2% ($30/365 \cdot 100$).

Por lo tanto, considerando una probabilidad de ocurrencia de un Blowout en Fenix de 1 vez en 2000 años (Holand, 2017), la probabilidad de que un derrame de 7 meses alcance la costa es de 1 en 3427 años ($1/2000 \cdot 213/365$).

Respecto al derrame de MGO, la probabilidad es de 1 por año considerando un derrame de 6 h. Por lo tanto, la probabilidad de manera análoga es 0.0685 % ($0.25/365 \cdot 100$). Considerando que la probabilidad de ocurrencia de este tipo de accidentes es de 1 en 40 años, la probabilidad de que un derrame de MGO de 6 h alcance la costa es 1 en 58479 años ($1/40 \cdot 0.25/365$).

Derrame de 5 m³

Utilizando el modelo de derrames se realizaron ensayos para comparar el derrame de MGO de 200 m³ en 6 h y un derrame de 5 m³ en 10 minutos.

Se observa que las características del derrame (forma y posición en el tiempo) son similares en ambos casos. La diferencia está en las concentraciones, ya que, en el segundo caso, a causa de su inferior cantidad de masa derramada, son de un 6% de la primera con desvío estándar del mismo orden. Por lo tanto, las concentraciones del derrame de 5 m³ se encuentran entre un 0 y 12 % de las del derrame de 200 m³. Las concentraciones observadas por el modelo no superan en ningún caso los 10 ppb o 1 g/m².

Tabla 6.4.8 Características del hidrocarburo en la costa: el tiempo de arribo, las concentraciones, la densidad de la película de hidrocarburo y la masa sedimentada. Sombreado en azul los resultados del Blowout y en verde el derrames de MGO.

Derrame	Corrida	Tiempo (d)	Máxima concentración (ppb)	Máxima densidad de película máxima (g/m ²)	Máxima masa sedimentada (g/m ²)
Blowout	2	82	2.3e-1	3.5e-3	2.8e-4
	3	178	3.1e-1	4.4e-3	3.1e-4
	6	47	2.2e+0	2.4e-2	7.1e-3
	10	66	1.1e+1	1.2e-1	4.8e-2
	11	7	2.3e-1	3.5e-3	2.8e-4
		158	1.5e+1	9.6e-2	1.0e-1
	12	130	2.9e-1	3.2e-3	4.5e-4
	13	9	3.9e-1	6.8e-3	1.26e-3
14	211	4.3e-1	5.0e-3	1.19e-3	
MGO en Fenix	14	9.1	1.2e-2	3.1e-4	2.5e-5
	38	1.6	1.2e-1	6.7e-4	1.8e-4
	66	5.0	1.3e-1	1.3e-3	7.3e-5
	85	6.8	3.9e-2	1.0e-3	2.5e-5
MGO en VP	9	9.3	1.5e-2	1.7e-3	7.9e-5
	14	8.1	1.1e-1	1.0e-3	1.8e-4
	15	1.6	2.2e+2	9.6e-1	9.1e-2
	27	1.1	4.2e+1	4.2e-1	9.3e-2
	38	1.2	1.4e+1	2.6e-1	6.9e-2
	43	7.0	6.7e-2	1.7e-3	8.3e-5
	65	9.7	2.8e-2	1.8e-3	9.8e-5
	66	2.3	9.6e+0	6.0e-2	1.1e-1
	69	1.8	4.8e+1	7.1e-1	1.1e-1
	85	6.0	7.5e+1	2.0e-1	2.7e-1
	86	3.4	1.2e+1	1.9e-1	1.7e-2
93	2.6	2.1e+1	1.6e-1	1.3e-1	

7. MODELACIÓN ACÚSTICA

7.1. Introducción

Esta parte del estudio detalla los métodos y resultados del análisis de propagación acústica asociado a las tareas vinculadas con la construcción, operación y abandono de la plataforma que Total tienen previstas en Fenix. Esta información resulta de utilidad para los estudios ambientales asociados a los efectos potenciales del sonido de origen antropogénico, sobre la biota marina.

La estrategia de este estudio se basa en la utilización de técnicas de modelación matemática, usando datos característicos del medio ambiente marino como salinidad, temperatura, batimetría y sedimentos del fondo marino, complementados por antecedentes científicos y técnicos, nacionales e internacionales que completan la información requerida por la modelación.

La transmisión del sonido dependerá, además, de la posición de la fuente y también de la interacción del campo sonoro con el fondo oceánico. En este sentido, las experiencias internacionales sobre propagación del sonido en el mar originadas en necesidades militares, científicas y medioambientales, la disponibilidad de programas (códigos) y de computadoras veloces, es posible simular con confianza la transmisión del sonido. Claro está que es necesaria cierta masa crítica de información del medio ambiente marino para que el modelo simule la propagación el sonido contemplando las características del medio.

Para el presente estudio se utilizará el modelo de propagación acústica del DHI, Underwater Acoustic Simulator (UAS), licenciado por Ezcurra & Schmidt SA, en 2019.

Figura 7.1 Licencia de UAS a Ezcurra & Schmidt SA, con los códigos correspondientes.



Underwater Acoustic Simulator (UAS) desarrollado por el DHI (<https://www.dhigroup.com/>), es un modelo acústico subacuático centrado en la propagación del ruido con el objetivo de producir información de apoyo a evaluaciones de impacto ambiental. Este modelo pertenece a una gama de productos de software para analizar, modelar y simular cualquier tipo de desafío en entornos acuáticos (MIKE by DHI, 2019) y se basa en las soluciones de la Ecuación Parabólica. El núcleo del UAS, es un modelo acústico 2D dependiente de la distancia a la fuente que simula pérdidas de transmisión (TL) en un transecto vertical, para una fuente de sonido omnidireccional para condiciones ambientales dadas. UAS permite simular el efecto de un ruido fuente con firma de banda ancha. El modelo es capaz de manejar dominios de modelos de aguas poco profundas y profundas con frecuencias de hasta 40 kHz.

El nivel de ruido generado por los arreglos sísmicos puede afectar la biota marina y el grado de afectación depende principalmente del nivel de ruido de la fuente, la distancia entre el arreglo, del organismo que se trate y del tiempo de exposición al ruido. Esta distancia depende también de las

características del medio como la distribución de la salinidad y temperatura del agua de mar, la batimetría y la naturaleza de los sedimentos marinos. Todos estos factores afectan la velocidad de propagación del sonido, producen pérdidas de energía de las ondas acústicas y desvían la dirección de los haces acústicos, produciendo patrones sonoros complejos, de difícil predicción sin la ayuda de modelos numéricos de propagación del sonido.

La exactitud del campo sonoro predicho por un modelo acústico es limitada por la calidad de los datos ambientales disponibles. Hay tres clases básicas de datos ambientales requeridos por un modelo de propagación acústica, que afectan la propagación del sonido en el océano: batimetría, perfiles de velocidad del sonido y las propiedades geoacústicas de los sedimentos del fondo marino.

La información batimétrica es especialmente importante en aguas poco profundas, donde la propagación del sonido es muy influenciada por la interacción del sonido con el fondo del mar.

El perfil de la velocidad del sonido (versus profundidad) puede influenciar significativamente a la propagación acústica a grandes distancias, refractando y atrapando energía sonora en la columna del agua.

La velocidad del sonido en agua de mar es una función de la temperatura, de la salinidad y de la profundidad. Sin embargo, la temperatura y la salinidad no son estacionarias, y los cambios ocurren en escalas de tiempo diurnas y estacionales debido a los procesos oceanográficos de mezcla y transporte de masas de agua.

Estos cambios en temperatura y salinidad afectan el perfil de la velocidad del sonido. Estos perfiles representativos de una región en particular pueden ser determinados por medio de perfiles históricos de temperatura y de la salinidad.

La variabilidad en la pérdida de energía por transmisión (Transmission Lost, TL) debido a los cambios en el perfil de la velocidad del sonido, puede ser acotada calculando la pérdida de transmisión para formas extremas de perfiles de velocidad del sonido.

Las características geoacústicas de los materiales del fondo oceánico, que incluyen la velocidad de compresión (compression), la velocidad corte (shear), la densidad y la atenuación, gobiernan el grado con que el sonido se refleja y se absorbe en el fondo del mar. Frecuentemente, estos datos ambientales son los más difíciles de obtener.

7.2. Alcance

Este estudio trata los aspectos físicos de la transmisión sonora desde la fuente hacia el espacio oceánico a partir de las especificaciones técnicas de los espectros de energía sonora asociados al hincado de pilotes y motores de un buque, y de las características del medio. El alcance de este estudio se puede resumir como sigue:

1. Simular matemáticamente la transmisión sonora asociados al hincado de pilotes y motores de un buque
2. Pronosticar las pérdidas por transmisión (TL), para distintos puntos del espacio marino estudiado, combinando las frecuencias de la fuente sonora con distintas propiedades del medio
3. Presentar los resultados de forma clara, gráfica y tabulada, para maximizar su utilidad en posteriores evaluaciones ambientales.

Durante el trabajo se utiliza información ambiental disponible producto de fuentes confiables tales como informes técnicos y papers científicos.

7.3. Métrica

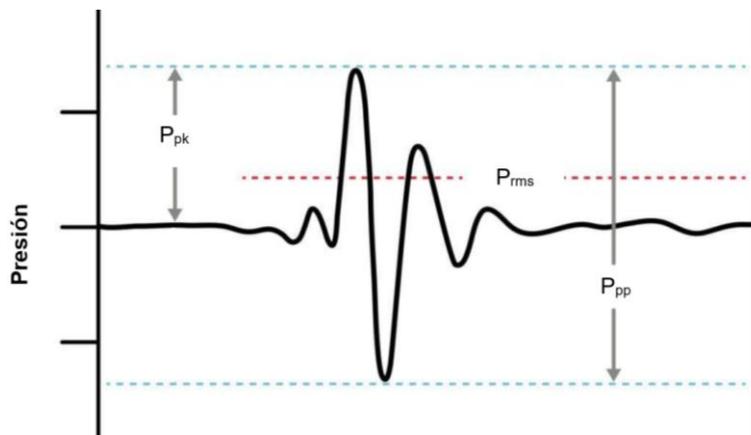
Dadas las múltiples métricas que se usan comúnmente para expresar los niveles de sonido y evaluar los impactos potenciales para la fauna marina, es importante asegurar que las comparaciones entre los valores de niveles de sonido específicos se realicen utilizando las mismas métricas.

También se debe tener cuidado al comparar los niveles de sonido en decibeles (dB) en el aire con los niveles de sonido bajo el agua. La escala de decibeles es una escala logarítmica que expresa la relación de dos valores de una cantidad física. Se utiliza para medir la amplitud o la "sonoridad" de un sonido. Como la escala de dB es una relación, se denota en relación con algún nivel de referencia, que debe incluirse con los valores de dB para que sean significativos. El nivel de presión de referencia en la acústica subacuática es un micro pascal (1µPa), mientras que el nivel de presión de referencia usado en el aire es de 20 µPa, que se seleccionó para que coincida con la sensibilidad auditiva humana. Como resultado de estas diferencias en los estándares de referencia, los niveles de sonido en el aire no son iguales a los niveles bajo el agua.

SL: El nivel de la fuente (SL o Source Level) es una medida del sonido a una distancia nominal de 1 m de la fuente y se indica en dB con 1µPa@1m.

SPL: El sonido subacuático se mide típica y genéricamente en términos del nivel de presión sonora instantánea (SPL), en dB re1µPa. SPL para un sonido impulsivo se expresa en términos de SPL_{pk} o SPL_{pp}. SPL también se puede expresar como una medida "rms" (root mean square), que es una presión promedio durante un período de tiempo o SPL_{rms}. Esta medida se asocia comúnmente con los sonidos continuos, pero también se utiliza para caracterizar los sonidos del pulso donde la duración del tiempo se relaciona con la duración del pulso o un porcentaje de energía de la señal del pulso. Llamando P_{pp} a la amplitud de la presión, desde el valor más alto negativo y el más alto positivo, P_{pk} el nivel desde el nivel medio, o cero, hasta el pico máximo y P_{ref} = 1µPa, SPL_{pp}, SPL_{pk} y SPL_{rms} se definen de la siguiente manera (Figura 3.1).

Figura 3.1 Ilustración de las presiones pico a pico (P_{pp}), cero a pico, (P_{pk}) y rms, (P_{rms}) sobre un pulso genérico



En términos del SPL las diferentes expresiones se formulan de la siguiente manera:

$$\text{SPL}_{pp} = 20\log_{10}[P_{pp} / P_{ref}]$$

$$\text{SPL}_{pk} = 20\log_{10}[P_{pk} / P_{ref}]$$

$$\text{SPL}_{rms} = 20\log_{10}[P_{rms} / P_{ref}]$$

SEL_{ss}: Genéricamente, SEL o Sound Exposure Level es una métrica utilizada para describir la cantidad de energía acústica de un evento que puede recibir un receptor, como un animal marino. SEL_{ss} es el nivel de dB de la presión de sonido al cuadrado, integrada en el tiempo, T₉₀, normalizada

a un período de un segundo, y se expresa como dB re1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$. Cuando un período de tiempo de exposición, T_{90} , es inferior a 1s, SPL_{rms} resulta mayor que el SEL.

SEL_{ss} corresponde al SEL asociado a un solo pulso (ss: single stroke, en términos asociados al hincado de pilotes), también se lo llama SEL simplemente. T_{90} es el período aproximado del pulso o también el tiempo de exposición (Southall et al, 2007). La relación entre SPL_{rms} y el SEL_{ss} es:

$$\text{SEL}_{\text{ss}} = \text{SPL}_{\text{rms}} + 10 \log_{10} T_{90}$$

Por ejemplo, para pulsos con una duración $T = 0.1$ s, el SPL_{rms} medido en dB re1 μPa representa, en promedio, unos 10 dB más alto que el SEL_{ss} en dB re1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$.

SPL_{rms} se ha utilizado históricamente para evaluar los posibles impactos en la vida marina, pero SEL_{ss} y SPL_{pk} se utilizan cada vez más en su lugar. SEL_{ss} tiene en cuenta la duración de la exposición al sonido y permite la comparación entre el sonido de diferentes señales (diferentes fuentes) con diferentes características.

TL: Las pérdidas por transmisión, TL (Transmisión Losses) que surgen de la modelación acústica realizada para este trabajo, representan la pérdida de energía acústica a medida que uno se aleja de la fuente, es decir que depende de la distancia a la fuente, R. Por lo tanto, si RL (Received Level) es el nivel de presión sonora lejos de la fuente que puede percibir una ballena, por ejemplo, y SL (Source Level) el nivel de presión sonora a 1 m de la fuente, RL resulta:

$$\text{RL} = \text{SL} - \text{TL}$$

Típicamente, los modelos de propagación acústica calculan los valores de TL y luego los niveles de RL, a partir de los valores de SL y las distintas características de la fuente y el medio.

SEL_{cum} : Nivel de exposición acústica acumulativa. Cuando se producen múltiples eventos de ondas de presión transitorias como durante la conducción de pilotes u operaciones sísmicas, el nivel de exposición acústica total o acumulativa de múltiples eventos se puede calcular sumando el nivel de exposición al sonido de una serie de eventos individuales. Cuando el SEL es el mismo para todos los pulsos, el SEL_{cum} (dB re1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$) se puede calcular de la siguiente manera:

$$\text{SEL}_{\text{cum}} = \text{SEL}_{\text{ss}} + 10 \log_{10}(\text{número de pulsos, N})$$

Si el animal permanece a la misma distancia de la fuente durante la exposición a $N = 10$ pulsos, el SEL_{cum} es

$$\text{SEL}_{\text{cum}} = \text{SEL}_{\text{ss}} + 10 \log_{10}(10) = \text{SEL}_{\text{ss}} + 10 \text{ dB re1}\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$$

Son variadas las métricas que se utilizan en la literatura. La Tabla 7.3.1 muestra algunas de las nomenclaturas.

Tabla 7.3.1 Formas usuales de métrica en acústica submarina

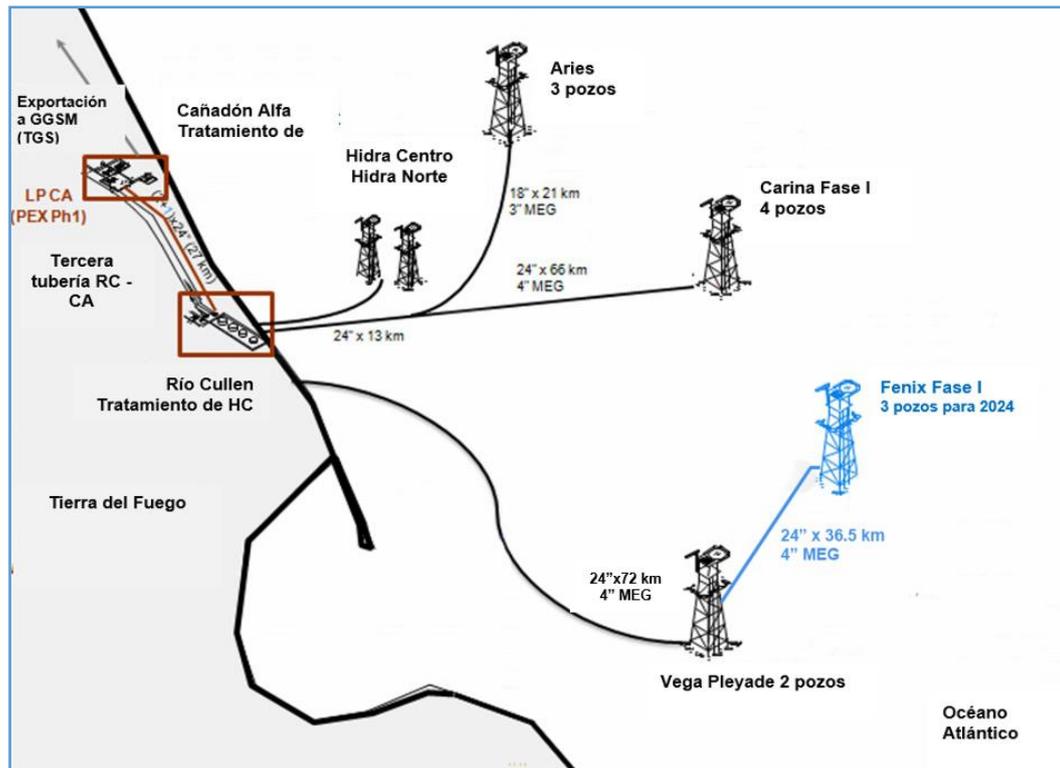
Métrica		Este informe	Otras referencias
Nivel de presión sonora (Sound Pressure Level)	Pico a pico	SPL_{pp}	$\text{SPL}(\text{p-p})$, $N_{\text{p-p}}$
	Cero a pico	SPL_{pk}	PK, L_{peak} , L_{pk} , $N_{0\text{-p}}$
	rms	SPL_{rms}	SPL , L_{p}
Nivel de Exposición Sonora (Sound Exposure Level)	Un golpe	SEL_{ss}	SEL
	Acumulado (múltiples pulsos)	SEL_{cum}	cSEL, $\text{SEL}_{24\text{h}}$, $L_{\text{E},24\text{h}}$

7.4. Generalidades sobre el Proyecto

El proyecto comprende la instalación de una plataforma, la perforación de 3 pozos, la instalación de una tubería entre Vega Pleyade (una plataforma existente) y Fenix (ver Figura 7.4.1), la explotación de los 3 pozos perforados y el abandono de las obras una vez finalizado el período de explotación.

Fenix es un yacimiento de gas ubicado en la Cuenca Austral, Tierra del Fuego. Está situado a unos 60 km de la costa y a 77 km de las instalaciones existentes de Río Cullen (RC) (Ver Figura 7.4.1). La profundidad del sitio es de unos 70 m.

Figura 7.4.1 Esquema con las instalaciones existentes y las previstas para Fenix (en azul). Fuente: Total Austral.



7.5. Fuente de ruidos

En el marco de estos estudios ambientales, se han previsto modelaciones de propagación del ruido producido, principalmente, por el hincado de pilotes, aunque las operaciones generan otros ruidos, pero de menor significación, como se verá luego.

Hincado de pilotes

Para la instalación de la plataforma de producción se requerirá del hincado de 4 pilotes por dentro de las 4 patas tubulares de la plataforma. La operación de hincado de pilotes es, comúnmente, es una fuente importante de energía acústica en los sitios de construcción de obras en el mar. El ruido generado por el impacto del martillo sobre la cabeza del pilote se introduce en el ambiente submarino aumentando el nivel del ruido natural del lugar.

El ruido submarino depende en gran medida de la geometría del pilote. La Tabla 7.5.1 muestra las características de los pilotes para los trabajos en Fénix.

Tabla 7.5.1 Características básicas de los pilotes. Fuente: Total Austral

Parámetro	Valor
Longitud estimada (m)	18.75 m
Diámetro (mm)	1.68 m

En términos de cronograma, las actividades de pilotaje se llevan a cabo en un solo frente de trabajo, esto es, habrá solamente un martillo en operación. El proyecto Fénix tiene una duración total para la instalación de la plataforma de operación de 4 meses, pero solamente una fracción muy pequeña de ese tiempo habrá tareas de hincado de pilotes. La Tabla 7.5.2 resume los valores de los parámetros asociados al hincado de pilotes en Vega Pléyade que ha sido instalada cerca de Fénix en el año 2015.

Tabla 7.5.2 Parámetros del hincado para un solo pilote. Nota: datos basados en la instalación de la plataforma de VP. Fuente: Total Austral

Máxima penetración (m)	Número de golpes por metro	Número de golpes por pilote	Duración del hincado del pilote (min)	Número de golpes promedio por minuto
18.75	152	2850	49	58

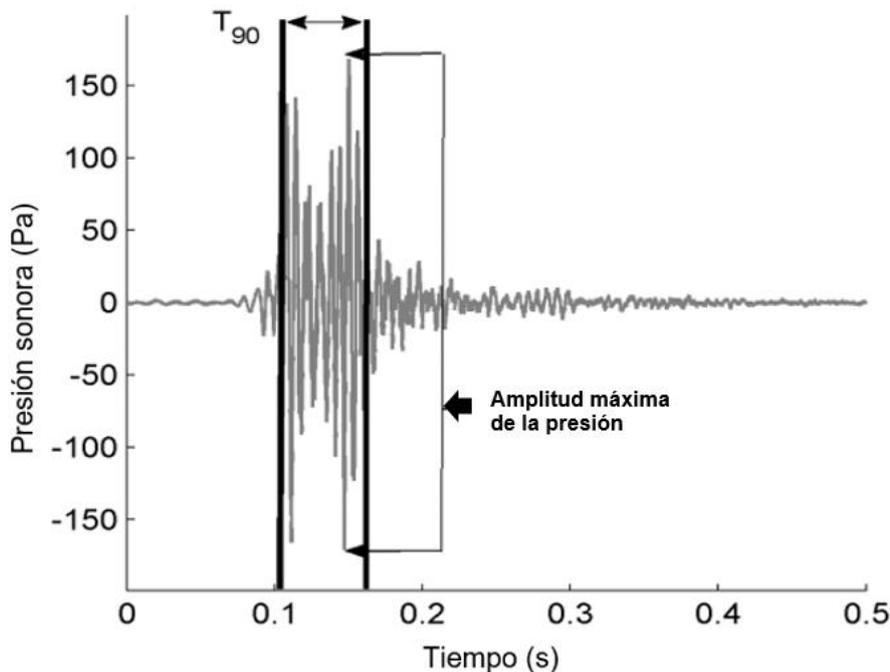
Pulso típico de la presión en agua debido a un golpe de martillo

El hincado de pilotes por impacto produce un sonido impulsivo y repetitivo que se encuentra entre los sonidos subacuáticos más fuertes, particularmente cuando se usan pilotes de acero. El hincado de pilotes generalmente se lleva a cabo utilizando un martillo o un peso de caída. Una vez que el martillo golpea la cabeza del pilote de produce una variación de la presión inmediata al pilote que varía en el tiempo y el espacio. Las tasas de golpes son generalmente de 15 a 60 por minuto. El número total de golpes puede variar de 500 a más de 5000, dependiendo de las propiedades del suelo y de la profundidad de penetración requerida del pilote.

Duración del pulso, T_{90}

La duración de la señal acústica es un dato importante para la evaluación de impactos ambientales. A los efectos de ilustrar el significado de la duración, T_{90} , se incluye la Figura 7.5.1 que muestra la señal de presión sonora resultante de aplicar un golpe sobre un pilote. Los niveles de presión sonora de la onda sonora debido al hincado de pilotes son altos, pero la duración es muy corta. En base a las investigaciones de (Leunissen, 2017), (Bailey et al, 2010), (Nedwell et al, 2007), (Tougaard et al, 2009), (Blackwell et al, 2005), (de Jong et al, 2008) y (Lepper et al, 2009), se seleccionó un valor para el T_{90} igual a 0.1 s.

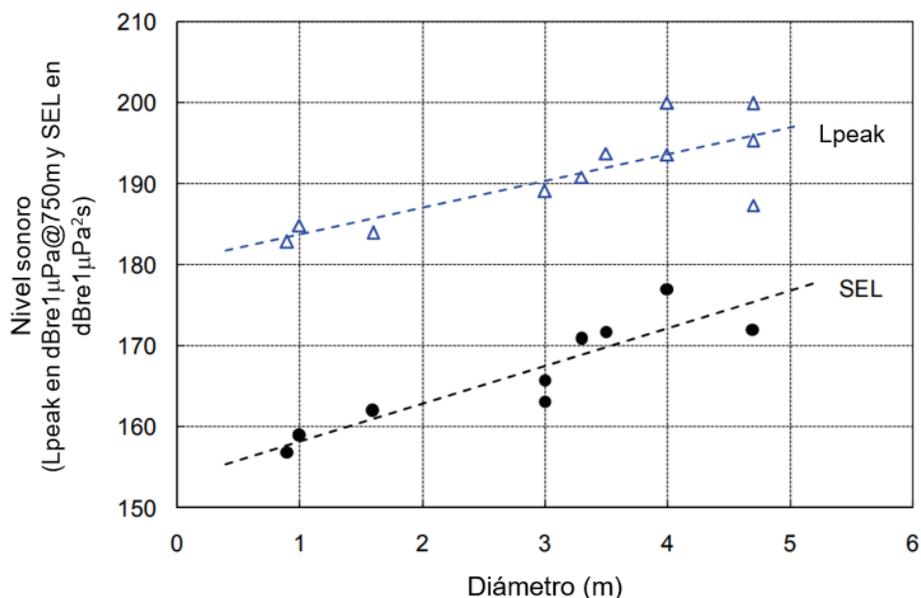
Figura 7.5.1 Forma de onda de presión debida a un solo golpe sobre un pilote. Las líneas verticales en negrita indican el inicio y el final de T_{90} . Esta duración incluye al 90% de la energía de la señal (entre el 5% y el 95%). En este caso, el T_{90} es 0.060s (o 60ms, ms: milisegundos), aproximadamente. Gráfico en base a (Leunissen, 2017).



Niveles de presión y exposición sonora

El hincado de pilotes como fuente acústica genera ruido de banda ancha, pero con la mayor parte de la energía entre 100–1000 Hz. (Matuschek y Betke, 2009) presentó datos de niveles de presión sonora (normalizados a 750 m de la fuente, para cumplir con las normas alemanas) en función del diámetro de los pilotes (Figura 7.5.2).

Figura 7.5.2 Niveles de presión sonora SPL_{pk} (L_{peak}) y SEL_{ss} (SEL), normalizados a 750 m de la fuente, versus el diámetro de los pilotes de varias operaciones de hincado (Matuschek y Betke, 2009)



(Bellmann, 2014) indica niveles de ruido (± 5 dB) a partir de una gran cantidad de mediciones durante el trabajo de construcción, con pilotes que tienen un diámetro entre 0.8–6 m (Figura 7.5.3). Está claro que el nivel de ruido aumenta a medida que aumenta el diámetro. El nivel de ruido se ajusta a curva exponencial en la Figura 7.5.4.

Figura 7.5.3 Niveles máximos medidos L_{peak} (o SPL_{pk}) y niveles de exposición al sonido (SEL) durante el trabajo de hincado de pilotes, sin utilizar sistemas de mitigación de ruido, en función del diámetro del pilote (Bellmann, 2014). Los niveles han sido normalizados para representar las condiciones a 750 m de la fuente para acordar con las normas ambientales alemanas. Los datos de la figura han sido obtenidos por itap, Institute for Technical and Applied Physics, GmbH, Germany

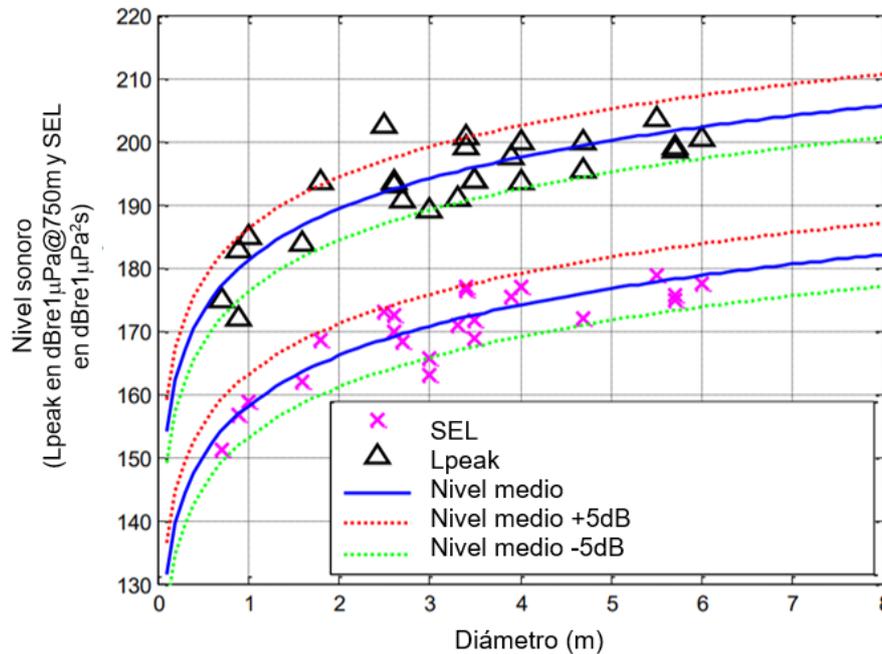
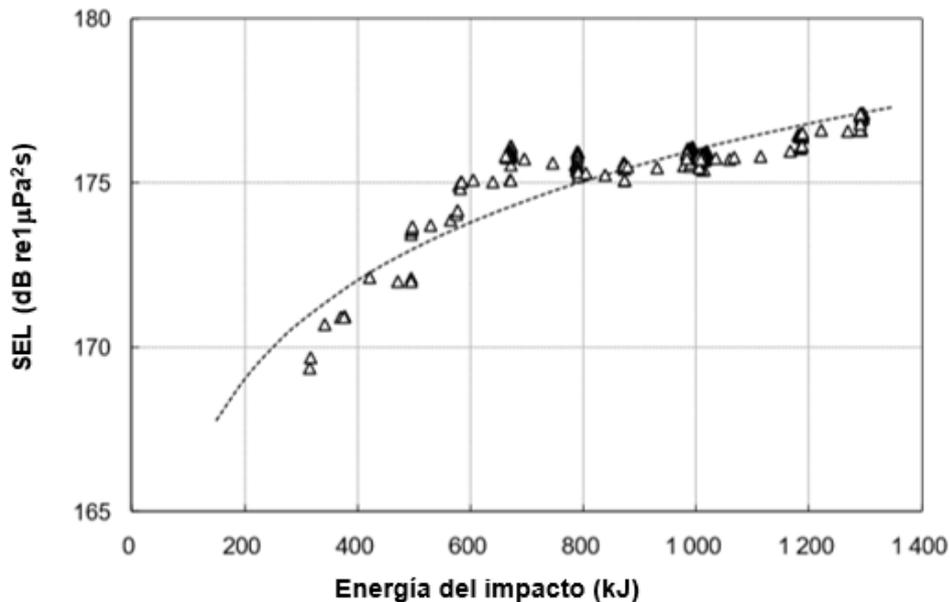


Figura 7.5.4 Nivel de exposición sonora SEL (SEL_{ss}) en función de la energía del impacto. Los datos se registran a una distancia de aproximadamente 200 m de la fuente. La profundidad es de entre 8 y 15 m; la línea discontinua es una curva logarítmica ajustada (Bellman, 2014). Datos en (Wilke et al, 2012) y mediciones de itap, Institute for Technical and Applied Physics, GmbH, Germany, en parques eólicos



Es posible expresar el nivel de exposición sonora en términos de la energía del impacto ya que afectará directamente la energía del ruido irradiado. El aumento de la energía del martillo conduce a una mayor energía radiada (Bellman, 2014) como indica la Figura 7.5.4. Una regla general simple es que, al duplicar la energía del impacto, el nivel de presión acústica aumenta en 3 dB.

De la información antes presentada y en función del diámetro del pilote y de la energía del impacto, puede estimarse el nivel de ruido generado por el pilotaje, como muestra la Tabla 7.5.3.

Tabla 7.5.3 Niveles de presión sonora generados por las tarea de pilotaje en función del diámetro del pilote y de la energía del impacto

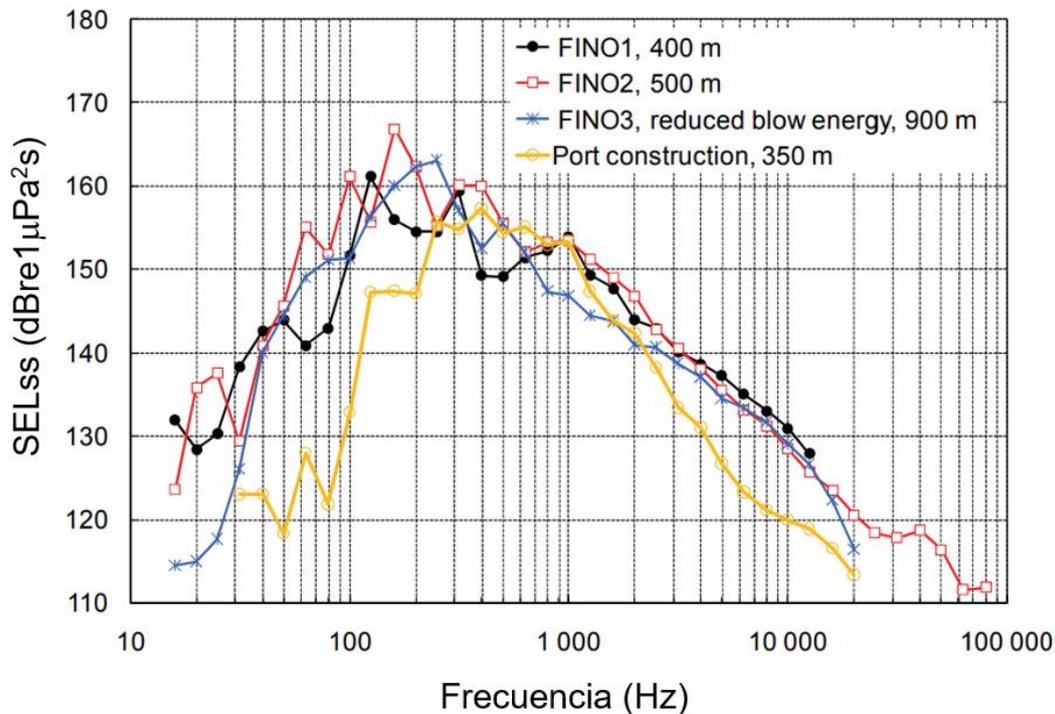
Nivel de presión sonora pico (SPL _{pk})	Nivel de exposición sonora (SEL)	Comentarios	Referencias
187 dB re1μPa @ 750 m de la fuente	162 dB re1μPa ² s @ 750 m de la fuente	SPL _{pk} o L _{peak} en la figura	Figura 4.10.2.2
188 dB re1μPa @ 750 m de la fuente	165 dB re1μPa ² s @ 750 m de la fuente	SPL _{pk} o L _{peak} en la figura	Figura 4.10.2.3
-	170 dB re1μPa ² s @ 200 m de la fuente	En VP se utilizó una energía máxima de 234.4 kj	Figura 4.10.2.4

Representación espectral de la señal de ruido

Respecto de las representaciones espectrales de la señal de ruido debida al hincado de pilotes, (Matuschek y Betke, 2009) presentan el nivel de exposición sonora, SELss (SEL), como muestra la Figura 7.5.5. Los espectros tienen formas similares, con un máximo entre 100 Hz y 400 Hz.

Figura 7.5.5 Espectros acústicos producto del hincado de pilotes para varias distancias de medición y diámetros de pilotes (FINO1: 1.6 m, FINO2: 3.5 m, FINO3: 4.7 m, energía del golpe reducida (reduced blow energy) al 30% del valor requerido durante la medición, construcción del puerto (port construction): 1.5 m).

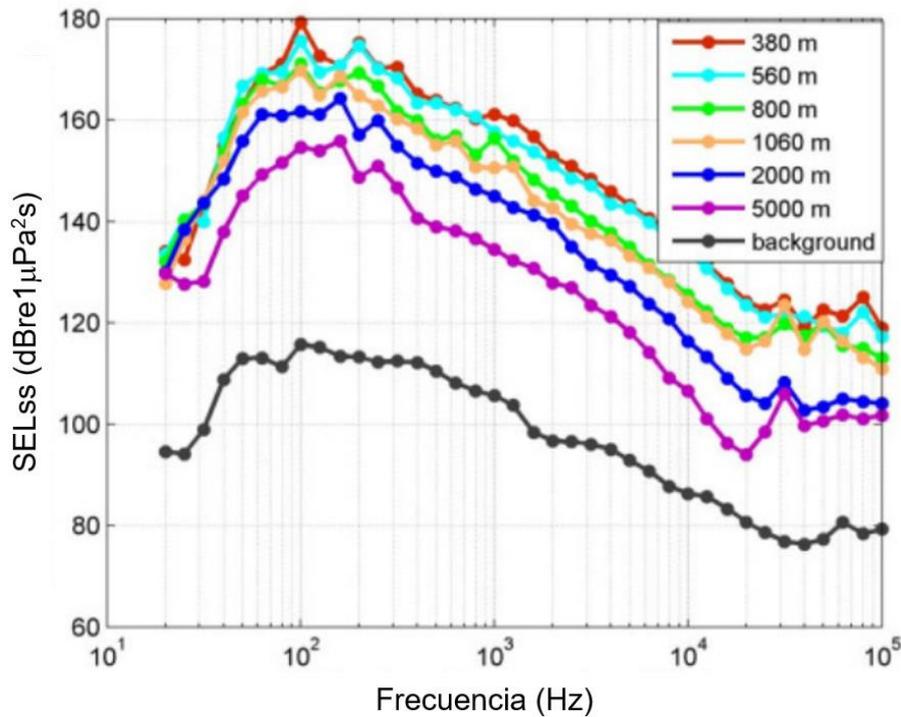
Todos los espectros son promedios de 10 a 30 golpes (Matuschek y Betke, 2009).



La Figura 7.5.6 muestra los espectros (banda de tercera octava) para pulsos grabados en una variedad de distancias a la fuente. Las mediciones se realizaron en presencia de fuentes de ruido debido a otras actividades asociadas con la construcción del parque eólico, como buques auxiliares en tránsito, ruido del equipo de pilotaje del buque (por ejemplo, equipo de elevación), ecosondas del buque, etc. El nivel a 100 Hz es más de 60 dB más alto que el ruido de fondo a 380 m, reduciéndose a menos de 40 dB sobre el ruido de fondo a 5 km. Los valores correspondientes sobre el ruido de fondo a 10 kHz son 45 dB y 20 dB (Robinson et al, 2012). Las frecuencias entre 50 y 400 Hz tienen la mayor energía asociada.

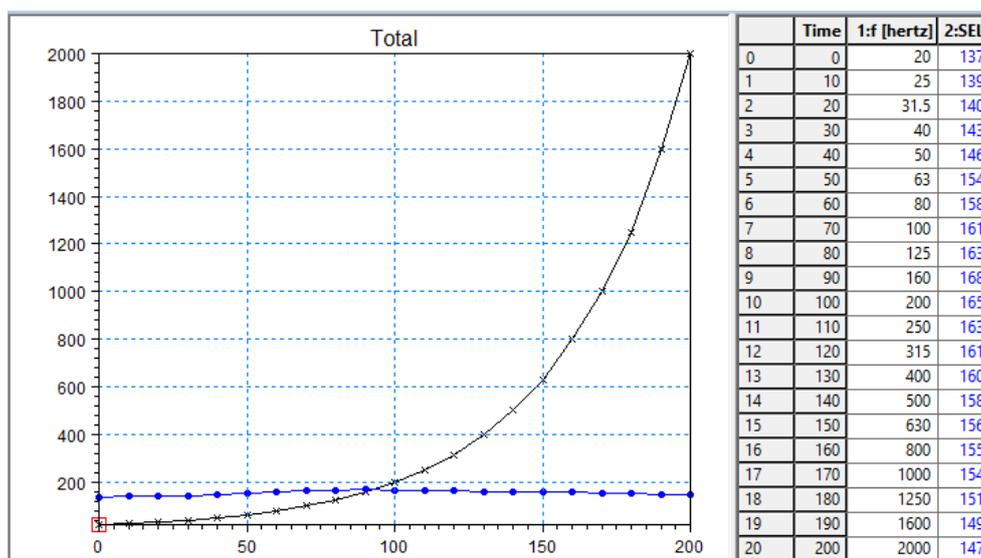
La Figura 7.5.7 presenta el espectro utilizado en las simulaciones correspondiente a una envolvente de los espectros de la Figuras 7.5.5 y 7.5.6.

Figura 7.5.6 Espectros (de banda de tercera octava) para pulsos grabados en una variedad de distancias a la fuente (Robinson et al, 2012). El diámetro del pilote para las mediciones que se muestran aquí fue de 5.2 m y el sedimento en el área consiste principalmente de arena y grava sobre un sustrato de tiza. La energía del martillo fue de alrededor de 1000 kj. Traducción: “background”, ruido de fondo.



Nota: Tercio de octava. El espectro audible se halla conformado por toda la gama de frecuencias que pueden ser percibidas por el oído humano. Se denomina octava al intervalo de frecuencias comprendido entre una frecuencia dada y el doble de ésta. La octava se puede dividir en intervalos más pequeños como la media octava o el tercio de octava, obtenidos dividiendo por 2 o 3, respectivamente, el segmento que representa una octava en una escala logarítmica.

Figura 7.5.7 Imagen de como el modelo UAS discretiza el espectro (Pilote).



Parámetros asociados a ruidos periódicos para la modelación acústica y evaluaciones ambientales

Las características de la fuente han sido adoptadas de la descripción del proyecto presentadas antes. Se ha indicado que, en ocasiones, los trabajos de hincado se harán en un solo frente. En base a la información presentada, las características adoptadas de la fuente se presentan en la Tabla 7.5.4.

Tabla 7.5.4 Hincado de pilotes. Características de la fuente adoptada para la modelación. Nota: los valores de presión sonora fueron reducidos a una distancia de referencia protocolar igual a 1 m de la fuente para las evaluaciones ambientales.

Ubicación de la fuente	Frecuencia dominante (Hz)	SPL _{pk} (dB re1μPa)	SEL (dB re1μPa ² s)	SPL _{rms} (dB re1μPa) Estimado	T ₉₀ (s)
A media agua	100 - 1000	231 dB re1μPa@1 m de la fuente	209 dB re1μPa ² s@ 1 m de la fuente	219 dB re1μPa@1 m de la fuente	0.1

Fuentes de ruidos continuos en agua

El mar es un entorno naturalmente ruidoso. El ruido ambiental natural suele estar relacionado con el estado del mar. En muchas áreas, la pesca comercial y la navegación son los principales contribuyentes al ruido submarino.

Tabla 7.5.5 Niveles de presión sonora asociados a perforaciones offshore. Notas: (1) cálculo a partir de los resultados de la modelación acústica (ver informe de modelación adjunto al presente estudio); (2) los ruidos generados por estos grandes buques serán asimilados a los barcos grandes asociados a las operaciones
 Todos los niveles de presión sonora son referidos a 1μPa@1m.

Condiciones Operativas	Nivel estimado de presión sonora, a partir de las referencias (dB re1μPa@1m)	Referencia
Plataforma en operaciones, sin perforación y supply	148 (rms) 176 (rms)	McCauley, 1998
Plataforma en operaciones de perforación	154 – 149 (rms)	McCauley, 1998
Plataforma sin operaciones y supply	156 (rms) 160 - 165 (rms)	McCauley, 1998
Plataforma en operaciones.	185 (rms)	WDCS, 2004
Plataforma sin operaciones	98 (rms)	Richardson, 1990
Plataforma en operaciones (tipo Jack-up)	85 - 127 (rms)	WDCS, 2004
Plataforma en operaciones	169 (rms)	Blackwell y otros, 2004
Plataformas en operación (Varios tipos)	154 (rms)	Green, 1987
Plataforma en operaciones anclada al fondo marino	167 - 171 (rms)	Richardson y otros, 1995
Buque de carga pesada (HLV)	188 (rms); 191 (pk) (188 dB re1μPa ² s @1m, SEL calculado para 1 s de exposición al ruido del buque)	Austin et al., 2005
Barcaza	178 (rms); 181 (pk) (188 dB re1μPa ² s @1m, SEL)	MacGillivray y Racca, 2006
Remolcador para el manejo de anclas x 2	191 (rms); 194 (pk) (191 dB re1μPa ² s @1m, SEL)	Xodus, 2016
Buque en standby	188 (rms); 191 (pk) (188 dB re1μPa ² s @1m, SEL)	Austin et al., 2005
Buque de tendido de tuberías	188 (rms); 191 (pk) (188 dB re1μPa ² s @1m, SEL)	Hannay et al, 2004
Perforación	186 (rms); 189 (pk) (186 dB re1μPa ² s @1m, SEL)	Nedwell et al., 2004
Plataforma perforación (Jack-up)	167 dB (rms)	Erbe y McPherson, 2017
Supply	179 dB (rms)	McCauley, 1998
Grandes buques de carga (2)	179 - 185 dB (rms)	(Peña et al., 2011), (McKenna et al., 2012).
Desmantelamiento (corte mecánico de patas de la estructura)	190 dB (rms)	McCauley, 2004

Muchas de las actividades realizadas por la industria del petróleo y el gas en alta mar dan como resultado un aumento de los niveles de ruido submarino en el entorno marino. Las fuentes de ruido continuo, como barcos, plataformas y generadores también producen niveles de ruido, en algunos casos altos. Los ruidos asociados a plataformas apoyadas en el fondo del mar no han sido muy estudiados, pero las evidencias indican que no son muy ruidosas. La información disponible sobre niveles de ruido generados por plataformas de exploración y buques de apoyo se resume en la Tabla 7.5.5.

Parámetros asociados a ruidos periódicos para la modelación acústica y evaluaciones ambientales

Los valores adoptados de los niveles de presión sonora en agua para las evaluaciones ambientales se presentan en la Tabla 7.5.6. La Figura 7.5.8 muestra un espectro asociado a los ruidos que produce un buque grande. En la Figura 7.5.9 presenta el espectro utilizado en las simulaciones correspondiente a una envolvente de los espectros de la Figura 7.5.8.

Tabla 7.5.6 Resumen de las principales fuentes de ruido durante operaciones offshore en términos de los niveles representativos de presión y exposición sonora en agua. Nota: el valor del SEL (para el hincado de pilotes) considera una duración del pulso, T_{90} , igual a 0.1 s. El valor del SEL para ruidos continuos calculado con 1 s de exposición al ruido del buque o plataforma y se aplicó una corrección de 3 dB al nivel de presión sonora (rms) para obtener el máximo nivel (pk). El valor del SEL_{cum} para el hincado de pilotes considera 30 golpes y para el resto se consideró una duración de 1 min.

Fuente	SPL _{rms} (dBre1μPa@1m)	SPL _{pk} (dBre1μPa@1m)	SEL (dBre1μPa ² s@1m)	SEL _{cum} (dBre1μPa ² s@1m)
Hincado de pilotes	219	231	209	223
Buque y plataforma de perforación en operaciones	185	188	185	203
Buques grandes para tendido de tuberías o transporte de las plataformas en navegación	185	188	185	203
Buques grandes para tendido de tuberías o transporte de las plataformas en espera	175	178	175	193
Buque del tipo supply en navegación	173	176	173	191
Buque del tipo supply en puerto o maniobras de entrada a puerto	163	166	163	181
Desmantelamiento (corte mecánico de patas de la estructura)	190	193	190	208

Figura 7.5.8 Espectros de ruidos del buque M/V OVERSEAS HARRIETTE a diferentes velocidades de navegación (Arveson y Vendittis, 2000). Traducción: “ship speed”, velocidad del buque; “1/3-octave band center frequency”, frecuencia central de la banda de 1/3 de octava, “1/3-octave band level”, Nivel de la banda de 1/3 de octava

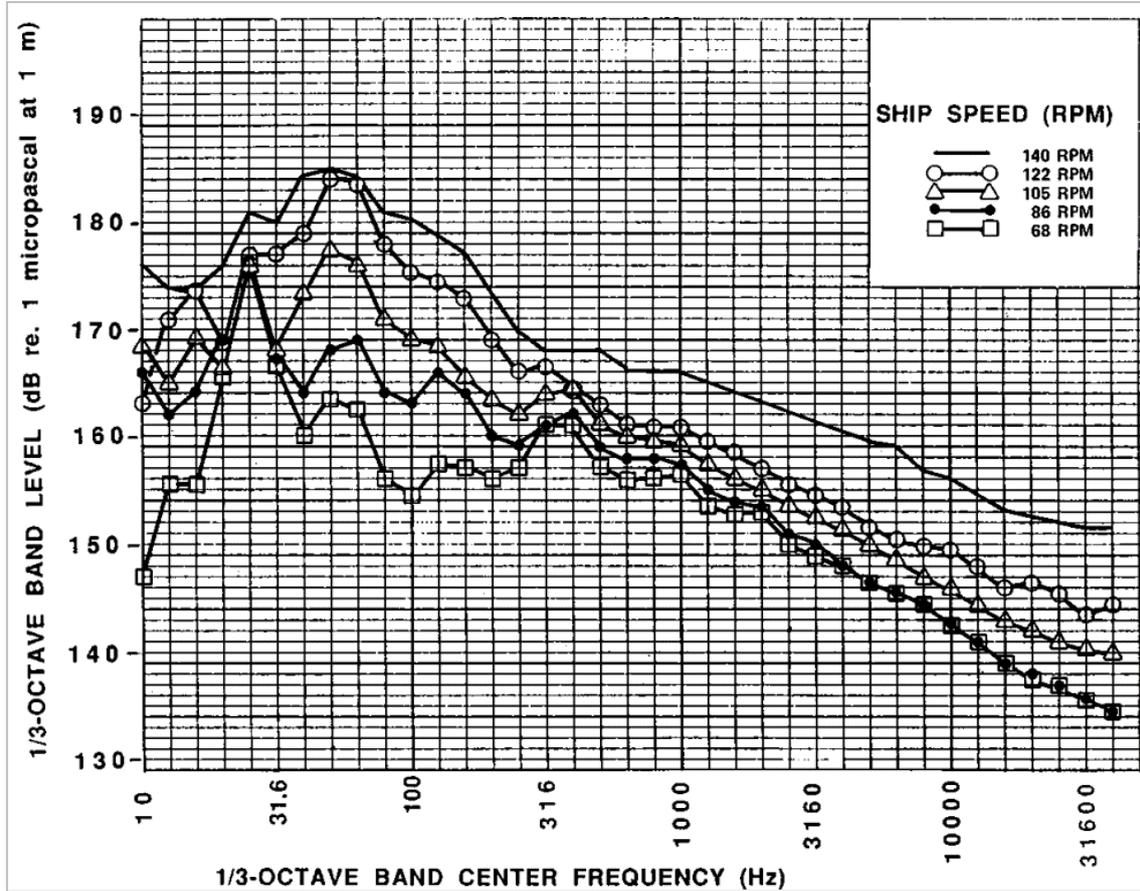
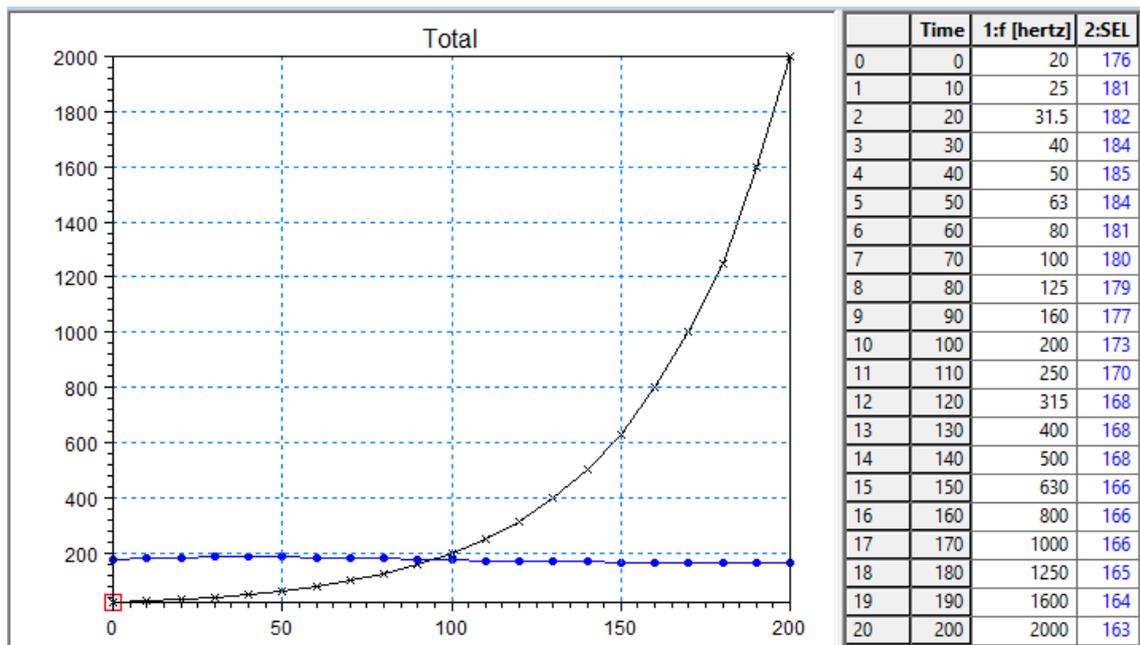


Figura 7.5.9 Imagen de como el modelo UAS discretiza el espectro (Buque).



7.6. Generalidades sobre el Modelo UAS

Underwater Acoustic Simulator (UAS) desarrollado por el DHI (<https://www.dhigroup.com/>), es un modelo acústico subacuático centrado en la propagación del ruido con el objetivo de producir información de apoyo a evaluaciones de impacto ambiental. Este modelo pertenece a una gama de productos de software para analizar, modelar y simular cualquier tipo de desafío en entornos acuáticos (MIKE by DHI, 2019) y se basa en las soluciones de la Ecuación Parabólica. El núcleo del UAS, es un modelo acústico 2D dependiente de la distancia a la fuente que simula pérdidas de transmisión (TL) en un transecto vertical, para una fuente de sonido omnidireccional para condiciones ambientales dadas. UAS permite simular el efecto de un ruido fuente con firma de banda ancha. El modelo es capaz de manejar dominios de modelos de aguas poco profundas y profundas con frecuencias de hasta 40 kHz. Los resultados del modelo están dados por los gráficos de pérdida de transmisión. Estos resultados pueden crear gráficos del transecto 2D (gráfico de cuadrícula) o perfiles 1D (gráfico de perfil). Las pérdidas por transmisión aumentan a lo largo del dominio. El archivo de transecto 2D puede incluir pérdida de transmisión, nivel de exposición al sonido (SEL) para cada frecuencia y para todo el espectro, y valores en el fondo marino. El archivo de transecto 1D puede incluir TL mínima sobre la profundidad para cada frecuencia y en general, la máxima SEL es sobre la profundidad para cada frecuencia y sobre todo el espectro, y la profundidad de las mínimas TL y en general. Detalles en (DHI, 2019).

Es un modelo acústico (Range dependent Acoustic Model, RAM) dependiente del alcance, basado en el modelo de propagación del sonido desarrollado por (Collins, 1993).

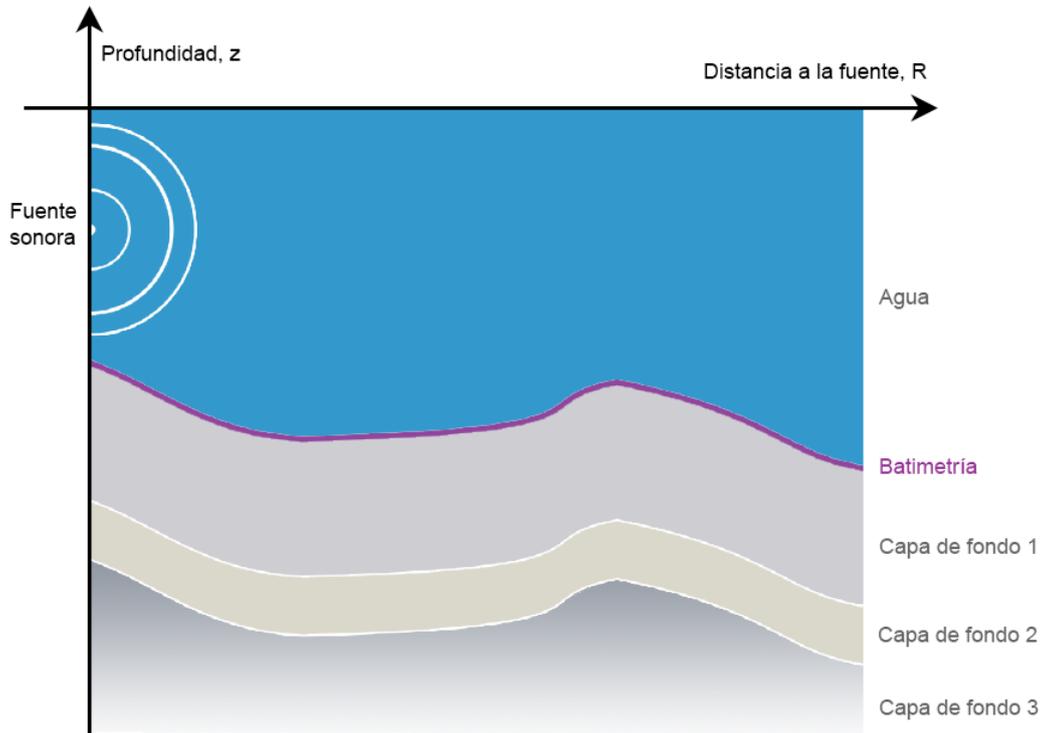
UAS tiene en cuenta el cambio en la velocidad del sonido en la columna de agua. UAS representa la atenuación en la columna de agua que se basa en información sobre salinidad, temperatura y pH en la columna de agua. Para un tratamiento realista del efecto del fondo marino sobre la propagación de las ondas sonoras en el océano, es necesario incluir la absorción en el material del fondo. El UAS incluye la propagación en el fondo marino, pero maneja solo ondas de compresión y no ondas de corte, es decir, los sedimentos del fondo del océano se modelan como fluidos. En UAS se puede definir una descripción de fondo simplificada basada en varias capas de densidad y espesor constantes. El modelo incorpora una superficie marina de agua quieta que refleja todo el sonido. La fuente de sonido se modela como una fuente puntual omnidireccional.

La aplicación UAS está dirigida al estudio de la propagación del sonido que se puede utilizar, por ejemplo, en todo tipo de proyectos de investigación o en evaluaciones de impacto ambiental (EIA) donde se investigan los impactos del sonido en la vida acuática. El modelo es capaz de manejar dominios de modelos de aguas poco profundas y profundas con frecuencias de hasta 40 kHz. Sin embargo, el tiempo computacional aumenta rápidamente por encima de 1 kHz. UAS simula el nivel de sonido recibido en todas las ubicaciones del transecto, incluido el fondo marino. Esta información se puede utilizar para determinar los rangos de impacto, según los criterios de exposición al ruido. Dado que el modelo no incluye la retrodispersión de energía, es decir, el eco, no es adecuado para situaciones donde los ecos pueden tener un impacto significativo en el resultado, es decir, si la fuente de sonido se coloca cerca de una superficie vertical reflectante, como una pared de roca.

Dominio del modelo

Los modelos resuelven la ecuación de onda en 2 dimensiones utilizando técnicas matemáticas diferentes, pero ambos lo hacen utilizando en un plano vertical 2D (r, plano z) denominado transecto (ver figura).

Figura 7.6.1 Dominio (2D)



Resultados del modelo

El modelo calcula las pérdidas por transmisión (TL o transmission losses en dB), en función de la distancia a la fuente. Las pérdidas por transmisión son aquellas caídas de intensidad sonora, que dependen de los siguientes factores:

- Aumento de la superficie (esférica en aguas profundas o cilíndrica en aguas poco profundas) por la que pasa la energía acústica a medida que las ondas sonoras se alejan de la fuente, también llamado “spreading” esférico o cilíndrico.
- Absorción del medio (biótico y abiótico) de la energía acústica.
- Dispersión o “scattering,” de la energía acústica por efecto de partículas en suspensión.
- Reflexión en fondo y superficie.

Por lo tanto, el nivel sonoro que recibe el receptor es igual al nivel emitido por la fuente (SL o source level en dB) menos todas las pérdidas debidas al medio y naturaleza del sonido.

Los parámetros que ingresan al modelo se relacionan principalmente con las propiedades acústicas del medio en el cual el sonido se propaga, tanto en agua como en los sedimentos del fondo marino.

En general, algunos parámetros influyen más que otros en la propagación del sonido. Por ejemplo, las características de la fuente y la batimetría son importantes, aunque no dependen del momento que se investigue el campo acústico.

La velocidad del sonido en el agua tiene importancia no sólo en su magnitud sino en su distribución en la columna de agua. Dado que, velocidad del sonido en el agua, es función de la temperatura y salinidad de la región analizada, para que los resultados sean representativos conviene que los datos utilizados posean densidad espacial y temporal, de manera que las mediciones utilizadas para generar los perfiles que ingresan como input al modelo, tengan cantidad de datos suficiente para que estos sean representativos de la zona para cada estación del año.

La velocidad del sonido (compresional y de corte) en los sedimentos depende de las características de los sedimentos y no de la época del año. La atenuación del sonido en agua es menos importante que la atenuación en sedimentos, pues la onda sonora pierde mayor energía al penetrarlos (Clay y otros, 1977). El conocimiento de estas propiedades para la región de interés mejora el valor de los resultados. A continuación, se presentan los valores de los parámetros de ingreso al modelo de propagación acústica.

7.7. Batimetría

La información batimétrica fue obtenida en base a los datos de las cartas del SHN de que cubren la zona de interés del proyecto y de bases de datos digitales globales. Se dispone de la siguiente información cartográfica de la zona:

- Carta Náutica H-4 del Servicio de Hidrografía Naval (SHN), escala 1:1500000 “Archipiélago Fueguinos e Islas Malvinas”.
- Base de datos batimétrica digital GEBCO 2022 (General Bathymetric Chart of the Oceans) http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/

7.8. Posición de la fuente

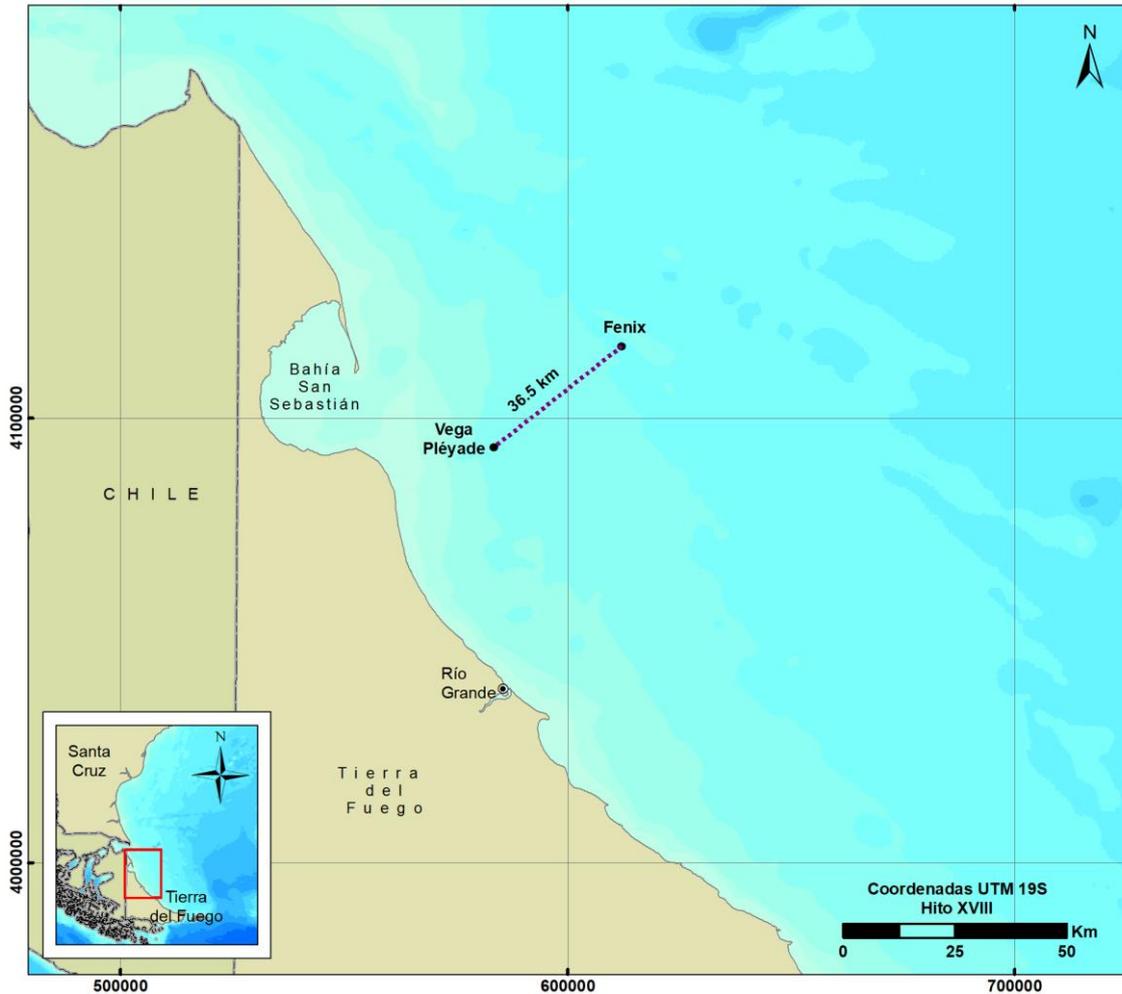
Corresponde a la distancia de la fuente hasta la superficie del mar. Para las simulaciones se ha considerado a la fuente, producto del hincado de pilotes, a 3 profundidades: en superficie (5 m), a media agua (35 m) y en el fondo (65 m). La fuente producto del ruido generado por un buque se ha considerado a 5 m.

7.9. El lugar y el puntos de modelación

El espacio previsto para el desarrollo de las operaciones se encuentra en torno a Fenix, donde se realizará el hincado de pilotes, las perforaciones y estarán los buques de apoyo. Por lo que se ha considerado la posición de Fenix como punto fuente para las simulaciones acústicas. La Figura 7.9.1 presenta la zona del proyecto con las posiciones de Fenix, Vega Pleyade y las tuberías que las unirán.

Las simulaciones de los modelos acústicos resuelven la ecuación de onda de manera estacionaria. Esta aproximación es adecuada ya que durante el momento en el que un sonido ocurre y su onda se propaga, a velocidad aproximada de 1500 m/s, el espacio sonorizado se mantiene constante el tiempo que se sostenga la fuente sonora.

Figura 7.9.1 Ubicación de la plataforma y tubería desde Fenix a VP



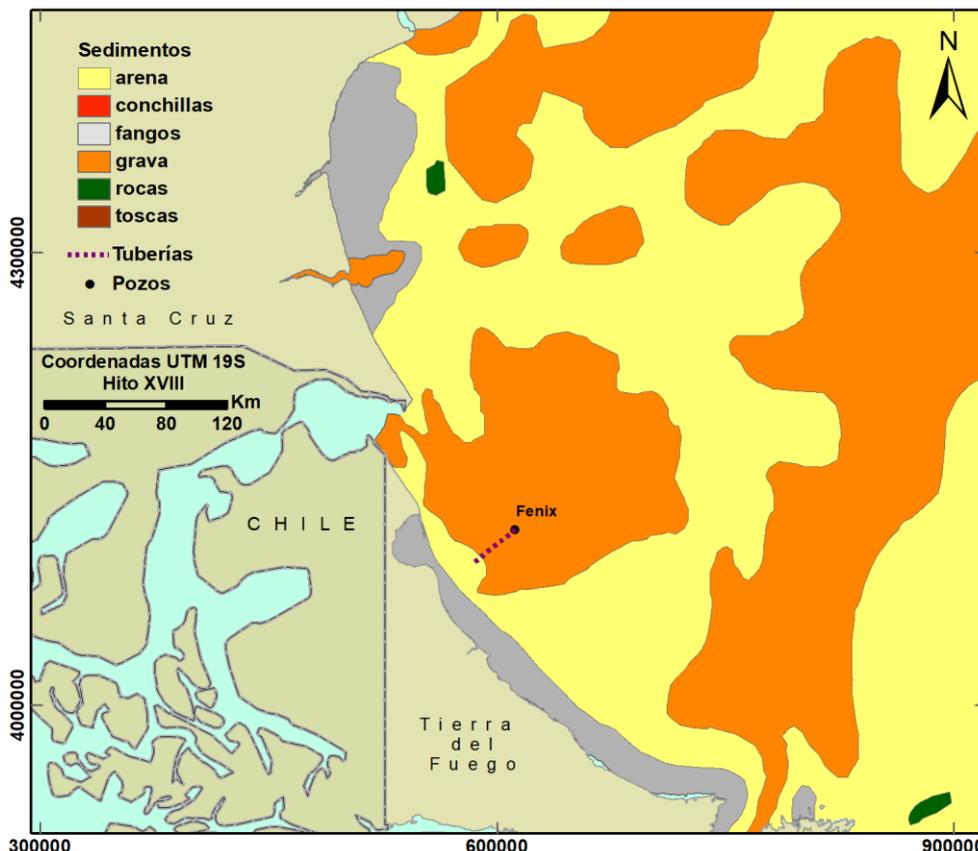
7.10. Sedimentos marinos

Como ya fue mencionado los sedimentos superficiales tienen la capacidad de modificar la energía sonora esperada en la columna de agua. Esto se debe que las reflexiones en el fondo dependen de la capacidad de absorber energía por parte de los sedimentos. Más adelante en este informe se caracterizan los coeficientes absorción utilizados por los modelos para incluir este fenómeno en sus cálculos.

Los estudios de los sedimentos en la plataforma argentina datan de trabajos del Servicio de Hidrografía Naval ya desde la década de 1920, con una primera publicación que comprendía a toda la plataforma (Servicio de Hidrografía Naval, 1974), a partir de la cual, y con la incorporación de información reciente (Parker y otros, 1997) elaboraron posteriormente la descripción de la zona de interés.

La plataforma continental argentina tiene una cobertura de sedimentos recientes originados en el continente y llevados al mar a través de diferentes procesos de transporte y depósito. No hay sedimentos originados en el mar. Ese manto alcanza un máximo de unos 15 m de espesor y la Figura 7.10.1 presenta los sedimentos superficiales para la zona de exploración según el Atlas de Sensibilidad Ambiental de la Costa y el Mar Argentino Geología y geomorfología de los ambientes costeros y marinos de 2008, por José Luis Cavallotto.

Figura 7.10.1 Sedimentos superficiales, área de prospección sísmica superpuestos a los sedimentos del fondo marino del Mar Argentino, (Parker y otros, 1997). El punto referenciado como Pozos corresponde a la posición Fenix utilizada como fuente sonora en el presente estudio.



La Tabla 7.10.1 presenta la posición del punto de modelación seleccionado para el área de prospección sísmica, la profundidad local y tipo de sedimentos superficiales asociados.

Tabla 7.10.1 Posición del punto seleccionado y su profundidad asociada.

PM	Latitud	Longitud	Profundidad de GEBCO (m)	Sedimentos Superficiales
Fenix	-53.089551	-67.322846	77	Gravas

En base a la información presentada en el Capítulo 6 LBA, se ha considerado una capa por debajo de los sedimentos superficiales, que alcanza los 78.3 m, de roca sedimentaria del terciario compuesta por areniscas arcillosas tobáceas, mencionadas por (Tassone et al., 2008), (Robbiano et al., 1996), (Russo et al., 1980) y (Raggio et al. 2011). Por la información presentada esta capa se asume presente en toda la extensión del área de interés del proyecto.

Según investigaciones previas de Total Austral, se establecieron las características del perfil del suelo que se compone de 3 capas típicas:

- Una capa de aproximadamente 50 cm de sedimentos gruesos mixtos sueltos que comprende arena fina a gruesa suelta a muy densa de color gris oscuro mezclada con arena fina a gruesa con fragmentos de grava y conchilla
- Otra capa de limo arcilloso gris oscuro muy rígida a muy dura de 0.5 m a 1.7 m, y
- Una capa con moderadamente fuerte a muy fuertemente piedra limosa cementada gris oscuro (y formaciones de arenisca) de 1.7 m a 80 m (final del pozo, la roca tiene rastros de conchilla y restos de materia orgánica).

7.11. Directividad de la fuente

El Modelo UAS considera a la fuente de manera omnidireccional, por lo que el fenómeno de directividad debe ser incorporado luego en base a las características de la fuente utilizada.

Los resultados presentados en el presente capítulo no consideran la directividad de la fuente. En caso de requerirse esta caída en la intensidad sonora en la horizontal se incorpora en el capítulo 8 del EsIA del presente estudio, para la evaluación de los impactos.

7.12. Época prevista para las tareas de pilotaje

En términos de cronograma, las actividades de pilotaje se llevan a cabo en un solo frente de trabajo, esto es, habrá solamente un martillo en operación. El proyecto Fenix tiene una duración total para la instalación de la plataforma de operación de 4 meses, pero solamente una fracción muy pequeña de ese tiempo habrá tareas de hincado de pilotes. El cronograma del proyecto indica que las tareas de pilotaje se realicen en verano.

7.13. Temperatura (T), Salinidad (S), Densidad (ρ) y Velocidad del sonido (c)

Se analizaron datos de temperatura y salinidad de las estaciones en el lugar de World Ocean Database 18 (WOD18 https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html), de la NOAA. Esta base de datos contempla todas las estaciones argentinas de CEADO (Centro Argentino de Datos Oceanográficos), más estaciones internacionales. Los datos fueron procesados, generando perfiles medios discriminados por profundidades.

Una vez determinados estos perfiles de T y S, se calcularon los valores de la densidad del agua de mar y la velocidad de propagación del sonido usando las funciones de Gibbs programas desarrollados en MATLAB, disponibles en librerías específicas del software. Los resultados se presentan a continuación.

La Figura 7.13.1 presenta la posición del sector en los que se obtuvieron los datos de temperatura y salinidad. El sector excede el área de prospección sísmica con el único objetivo de ampliar la cantidad de estaciones que permitan un cálculo promedio mejor sustentado.

Se presentan a continuación las Figura 7.13.2 y 7.13.3 con los perfiles promedios cuatrimestrales (EFMA) de temperatura, salinidad, densidad del agua de mar y velocidad de propagación del sonido de los datos de la WOD18, en el área de interés del proyecto.

Figura 7.13.1 Posición de las estaciones de temperatura, salinidad y pH, en la zona de interés del proyecto. Se incluye el área sísmica (Bloque MLO-122) y el sector en el que se hicieron los promedios trimestrales para realizar las simulaciones acústicas. El punto referenciado como Pozos corresponde a la posición Fenix utilizada como fuente sonora en el presente estudio.

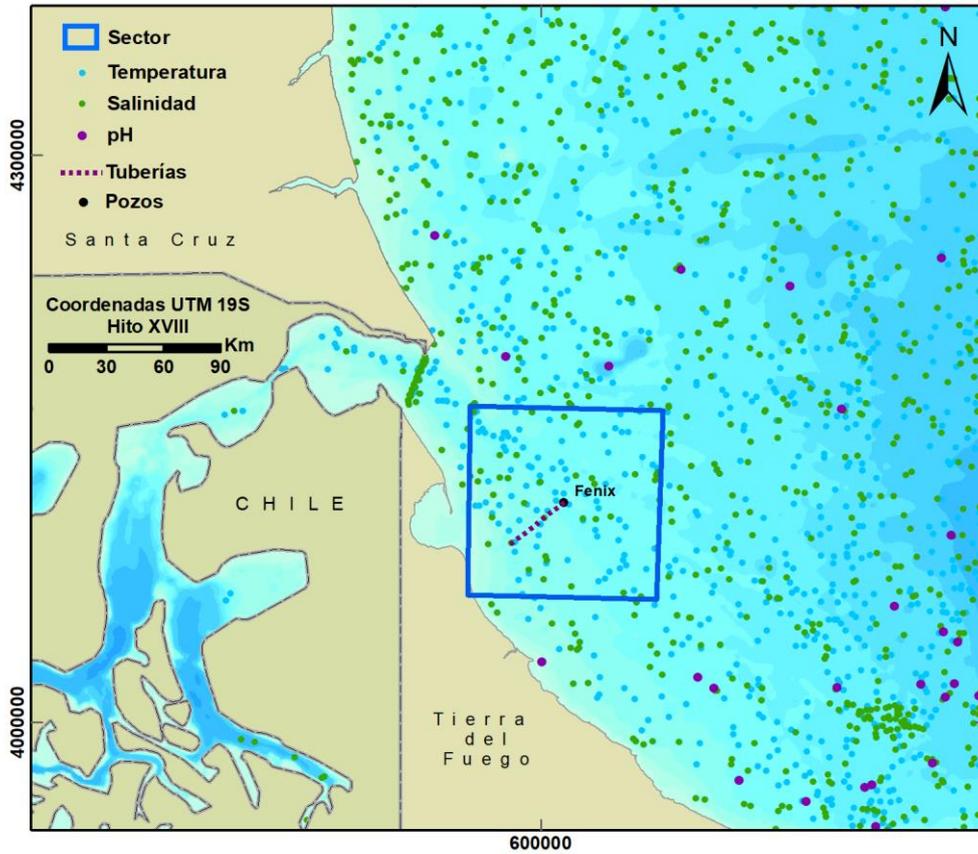


Figura 7.13.2 Perfiles medios de temperatura y salinidad para datos medidos en la columna de agua, para el cuatrimestre EFMA.

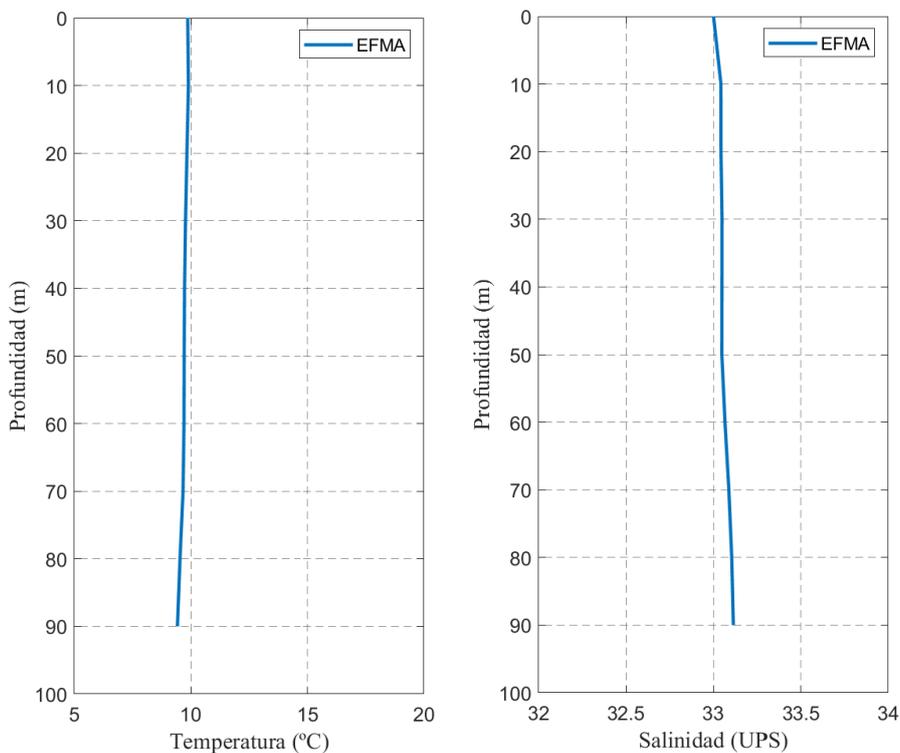
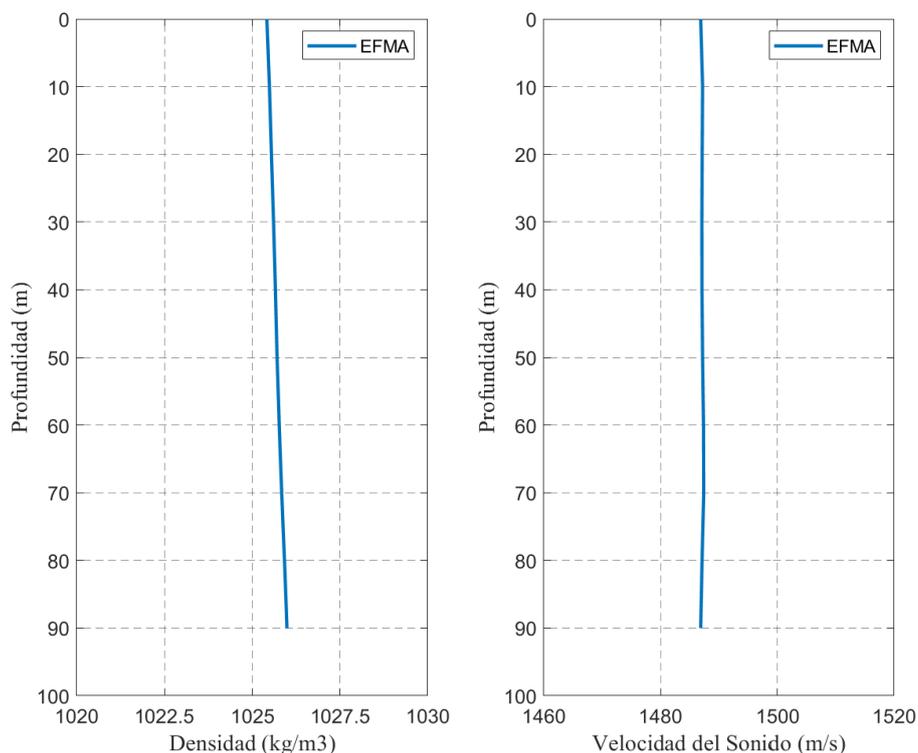


Figura 7.13.3 Perfiles medios densidad y velocidad del sonido para datos medidos en la columna de agua.



7.14. Coeficiente de Atenuación en Agua

La atenuación en agua es pobre y no influye en los resultados de la modelación acústica para la región, especialmente a las distancias que se investigan, de algunos kilómetros. De todos modos, el modelo UAS utiliza las formulaciones del modelo de Francois-Garrison (Francois y Garrison, 1982a y 1982b), donde el coeficiente de absorción se descompone en tres términos, correspondientes a las contribuciones del ácido bórico, el sulfato de magnesio y el agua pura (Lurton, 2010). Detalles se pueden encontrar en el manual científico del modelo:

https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/UAS_Scientific_Documentation.pdf

7.15. Coeficiente de Atenuación en los Sedimentos

Los sedimentos marinos superficiales son materiales granulares (como arenas y arcillas) que constituyen un medio para la propagación de ondas acústicas de compresión (compressional wave, longitudinal) y ondas de corte (shear wave, transversal), con propiedades para atenuar el sonido. El modelo de propagación de sonido utilizado en este estudio requiere de esta información básica para su funcionamiento, por lo que se ha realizado una investigación de la información disponible en la literatura internacional especializada, sobre los coeficientes que caracterizan los fenómenos mencionados. El coeficiente de atenuación asociado a los sedimentos se relaciona con las propiedades acústicas del medio y la naturaleza de la onda sonora, de la siguiente manera (Clay y otros, 1977):

$$A \left(\frac{dB}{m} \right) = \frac{8.686\pi f}{QC}$$

donde Q es un factor de calidad (o quality factor, adimensional) que depende de las características del medio, f (Hz) es la frecuencia de la onda acústica y C (m/s) su velocidad de propagación. La literatura suministra rangos de variación de Q, para distintos medios y en algunos casos indica directamente el coeficiente de atenuación, en otros casos ambos valores son incluidos. Debe aclararse que el modelo requiere los coeficientes de atenuación y velocidades asociados a la onda de compresión. La Tabla 7.15.1 presenta los valores requeridos por el modelo asociados a los

sedimentos en el sur de la plataforma continental argentina. Los valores fueron adoptados buscando el acuerdo razonable de la selección en vista de la dispersión de los datos presentados en la literatura. La Tabla 7.15.2 presenta los sedimentos asociados al punto de modelación seleccionado.

Tabla 7.15.1 Características geoacústicas adoptadas para los sedimentos superficiales más frecuentes en el frente marítimo de Argentina, (Jensen et al., 2011).

Tipos de sedimentos	ρ (g/cm ³)	Cp (m/s)	Ap (dB/ λ)
Grava	1.95	1750	0.6
Limo	1.7	1575	1.0

Tabla 15.2 Sedimento superficial en la zona del punto de modelación seleccionado.

Punto	Sedimentos	Profundidad de la Carta (m)
Fenix	Grava	77 (Gebco)

Por debajo de la capa superficial se consideró una capa de sedimentos consolidado formada por una roca sedimentaria del terciario compuesta por areniscas arcillosas tobáceas, mencionadas por Tassone et al., 2008, Robbiano et al., 1996, Russo et al., 1980 y Raggio et al. 2011. Detalles se pueden encontrar en Capítulo 6 con la Línea de Base Ambiental. Para obtener los coeficientes requeridos por el UAS se han consultado diferentes fuentes, para determinar la velocidad de propagación de sonido compresional en sedimentos compactados, (Kamaruddin et al., 2015), (Tendürüs et al. 2010), (Barton, N., 2006), (Wang et al., 2009) y (Zambrano, 1971).

El rango de velocidades de propagación del sonido en los sedimentos consolidados bajo la capa superficial es amplio en la literatura, indican variaciones entre 1400 a 4500 m/s (ver valores para sandstone). Como fue presentado, en esta capa los sedimentos son mencionados por los autores como roca sedimentaria del terciario, para los que (Zambrano y Urien, 1971) indica un rango de 2100 a 2700 m/s. Estos valores están de acuerdo al rango que determinó (Ewing, 1963) para el Terciario y Cuaternario en la zona por 1800 a 2900 m/s. Se ha considerado, para la capa de 78.3 m utilizada en la simulación, una velocidad de 2250 m/s en base a los rangos observados y a los datos presentados. En la capa más cercana a la superficie del fondo deben esperarse las menores densidades y mayores porosidades, y en consecuencia también las menores Cp, como puede verse en (Jadwiga A. Jarzyna et al., 2011), (Garia et al., 2019) o (Yeseul Kim et al., 2018), entre otros.

El estudio de (Garia et al., 2019) presenta una recopilación de diferentes investigaciones con datos de la velocidad de propagación del sonido compresional y la densidad aparente. También (Brocher, T., 2005) presenta una ecuación para Cp entre 1500 y 8500 m/s. Para Cp = 2250 m/s, se obtiene una densidad aparente de 2150 kg/m³.

El trabajo de (Wang et al., 2009) analiza la velocidad de propagación compresional y el factor de calidad compresional Qp, para diferentes litologías. Entre estas aparecen mezcla de areniscas, limolita, arcillitas de manera similar a las encontradas por lo diferentes autores en la zona de relevamiento sísmico. Se han considerado los valores asociados a los suelos similares a los encontrados en las zonas aledañas al punto Fenix correspondientes a Qp = 59 y 45. El trabajo de (Zhang and Stewart, 2007), realiza un ajuste entre la velocidad de propagación compresional (Cp) y el factor de calidad, que permite obtener un valor de Qp de 32, usando una Cp de 2200 m/s. Considerando un promedio de los Qp considerados se obtiene un coeficiente de atenuación representativo de 0.6 dB/ λ . En base a lo analizado los coeficientes geoacústicos vinculados a esta capa se presenta en la Tabla 15.3.

Tabla 15.3 Características geoacústicas adoptadas para la capa debajo de los sedimentos superficiales para la zona del Área MLO_122.

Tipos de sedimentos	ρ (g/cm ³)	Cp (m/s)	Ap (dB/ λ)
Roca sedimentaria del terciario, areniscas arcillosas tobáceas	2250	2150	0.61

7.16. Pérdidas por transmisión, TL

Luego de haber corrido el modelo para los casos indicados, se genera una base de datos con valores de las pérdidas por transmisión, TL, en función de la profundidad, z , y la distancia a la fuente. Para comparar los resultados obtenidos por el modelo y tener una referencia, es posible realizar cálculos simples de las pérdidas por transmisión utilizando las fórmulas de spreading esférico y cilíndrico, que excluyen las atenuaciones en agua y sedimentos que sí considera el modelo matemático.

Spreading cilíndrico: la propagación de sonido en un medio con límites superiores (superficie del mar) e inferiores (fondo del mar), puede ser estimada si se asume que el sonido está distribuido uniformemente sobre la superficie de un cilindro que tiene un radio igual a la distancia desde la fuente, R , y una altura igual a la profundidad del océano, h .

$$TL_{\text{cilíndrico}} = 10 \text{ Log} \left(\frac{R}{R_0} \right)$$

Spreading esférico: la propagación de sonido en un medio con sólo límites superiores (superficie del mar), puede ser estimada si se asume que el sonido está distribuido uniformemente sobre la superficie de una semiesfera que tiene un radio igual a las distancias desde la fuente, R . Esta es la definición del spreading esférico.

$$TL_{\text{esférico}} = 20 \text{ Log} \left(\frac{R}{R_0} \right)$$

donde $R_0=1$ m, es una distancia de referencia.

A modo de ejemplo, para $R=1000$ m, las TL para spreading cilíndrico y esféricos resultan:

$$TL_{\text{cilíndrico}} = 10 \text{ Log} \left(\frac{1000\text{m}}{1\text{m}} \right) = 10 = 30\text{dB}$$

$$TL_{\text{esférico}} = 20 \text{ Log} \left(\frac{1000\text{m}}{1\text{m}} \right) = 20 = 60\text{dB}$$

Los resultados obtenidos por los modelos muestran que a 1000 m las pérdidas por transmisión rondan los 50 dB, para todas las corridas realizadas.

Las pérdidas por transmisión integradas corresponden a la integración numérica de la todas las TLs de todas las frecuencias utilizadas. Detalles pueden encontrarse en manual del modelo:

https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/UAS_UserGuide.pdf

Hay que diferenciar los cálculos de las TLs integradas (notadas por el software como overall) para la condición en la que esté incorporado al cálculo del modelo el espectro o no. Para el caso en la que se considere la información sin el espectro, se puede utilizar la siguiente formulación para realizar la integración:

$$L_{OA} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_1}{10\text{dB}}} + 10^{\frac{L_2}{10\text{dB}}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10\text{dB}}} \right) \text{dB}$$

Donde L_{OA} son las pérdidas integradas u overall, L_n cada una de las pérdidas involucradas en el cálculo.

Para el caso en que se imponga un espectro como input del modelo, esto implica que cada frecuencia contará con una energía asociada diferente, el modelo sigue el siguiente procedimiento:

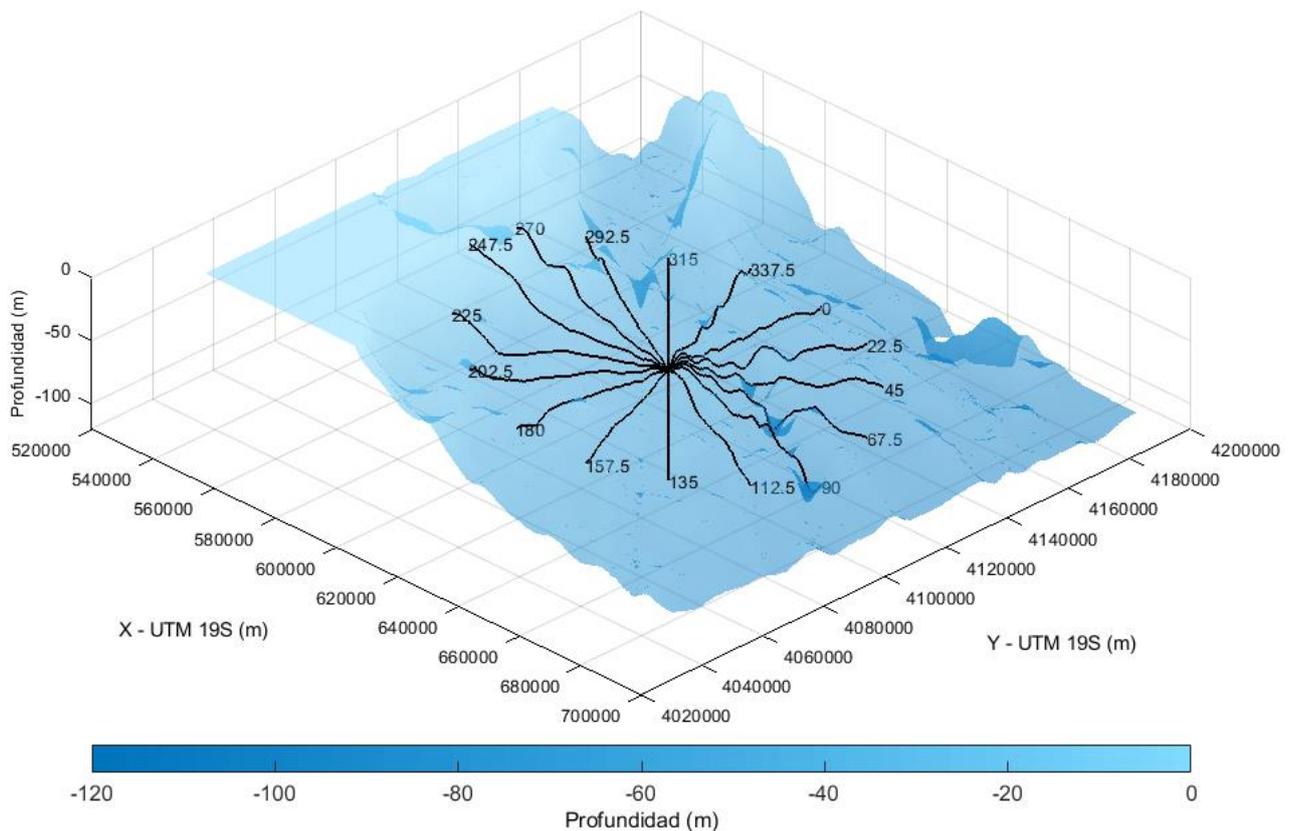
1. Calcula las TLs para cada frecuencia independientemente de la información espectral
2. Luego calcula el SEL de cada frecuencia incorporando la energía asociada a esa frecuencia
3. Después integra todos los SELs para obtener el SEL overall
4. Finalmente, para obtener las TLs integradas, toma el valor del SEL overall en todo el dominio y le resta la energía total del espectro, escrita en términos del SEL.

De esta manera se obtienen las pérdidas por transmisión asociadas a una corrida que incluyen en sus valores la información espectral que se ha impuesto por el espectro como input.

7.17. Batimetrías

La Figura 7.17.1 presenta la ubicación del punto de modelación (fuente sonora en Fenix) y las direcciones de las batimetrías seleccionadas. Cada dirección contempla 50 km desde el punto de modelación considerado.

Figura 7.17.1 Batimetría y cortes batimétricos a partir de la fuente en el punto Fenix para todas las direcciones, cada 22.5°. Siendo el N=0°, E=90°, S=180° y O=270°.



7.18. Grillado de los modelos

Ambos modelos se corrieron con igual grillado. En la dirección horizontal la grilla cuenta con 1 nodo de cálculo cada 5 m y en la vertical, 1 nodo de cálculo cada 2 m.

7.19. Resultados: cortes verticales

En este ítem, se presenta los resultados del modelo para algunas de las batimetrías utilizadas. Las condiciones ambientes se presentan en términos del promedio cuatrimestral: EFMA

Las Figuras 7.19.1 a 7.19.8 ilustran los resultados del modelo (en cortes 2D verticales) en términos del TL integrado en la columna de agua, para el hincado de pilotes en aguas superficiales, medias y de fondo, y para el buque, teniendo en cuenta diferentes batimetrías.

Figura 7.19.1 Resultados del modelo UAS en el punto Fenix, para el hincado de pilotes en aguas superficiales (5 m) en la dirección N (0°), con condiciones ambiente características del cuatrimestre EFMA. La escala de colores indica valores del TL en dB re1 μ Pa².

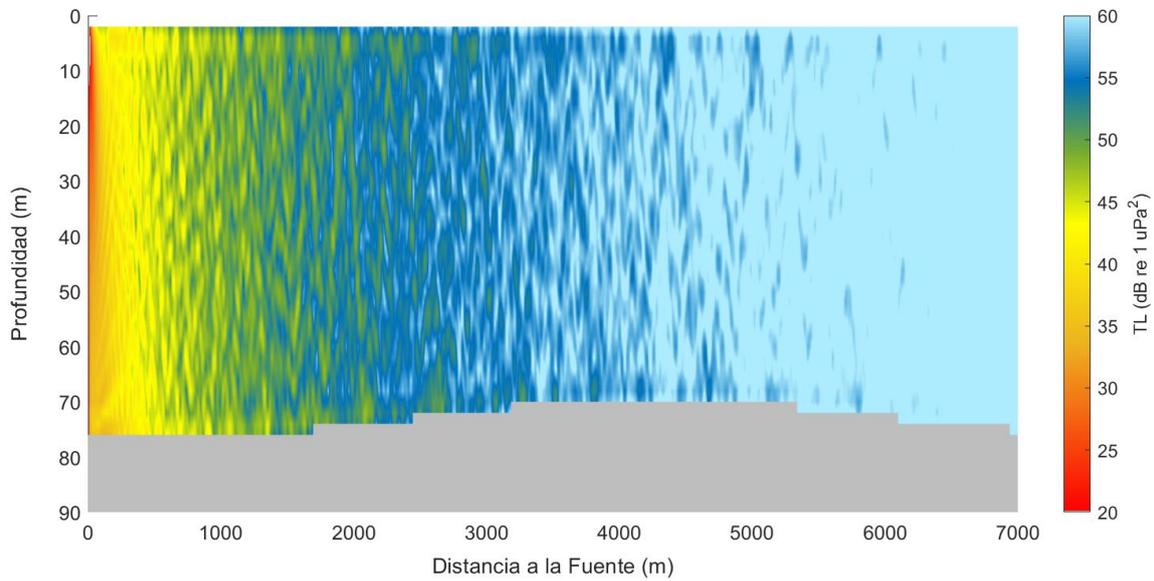


Figura 7.19.2 Resultados del modelo UAS en el punto Fenix, para el hincado de pilotes en aguas superficiales (5 m) en la dirección NE (45°), con condiciones ambiente características del cuatrimestre EFMA. La escala de colores indica valores del TL en dB re1 μ Pa².

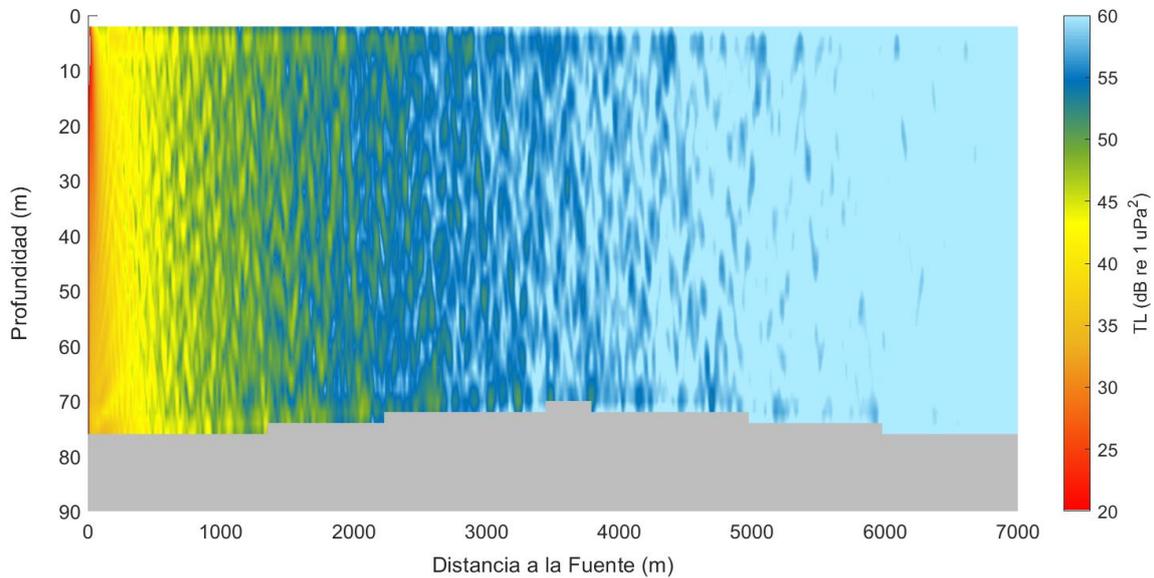


Figura 7.19.3 Resultados del modelo UAS en el punto Fenix, para el hincado de pilotes en aguas medias (35 m) en la dirección E (90°), con condiciones ambiente características del cuatrimestre EFMA. La escala de colores indica valores del SEL en dB re1 μ Pa².

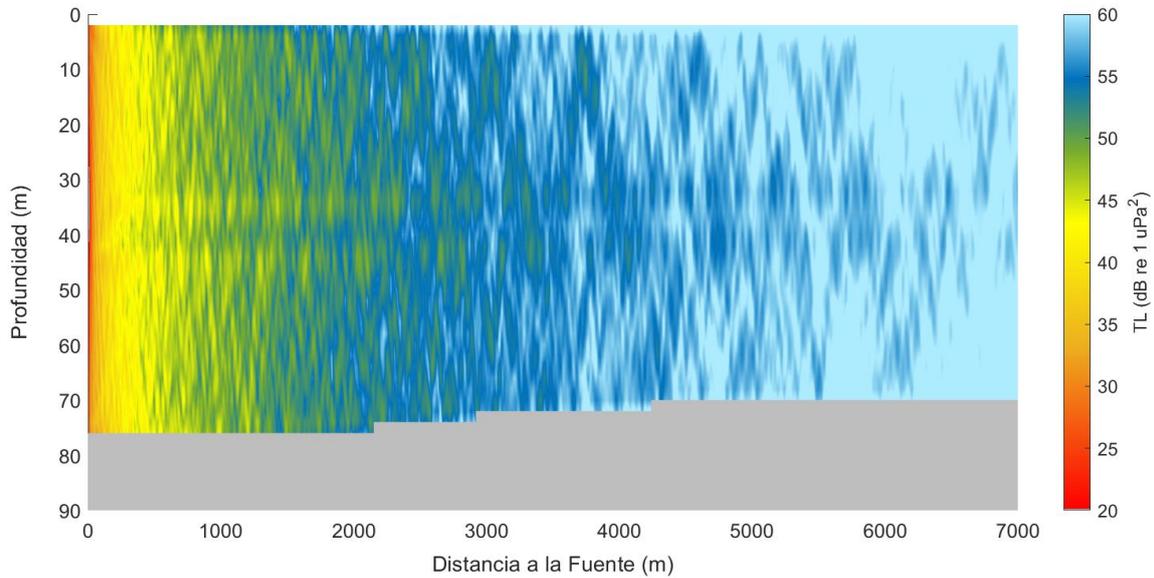


Figura 7.19.4 Resultados del modelo UAS en el punto Fenix, para el hincado de pilotes en aguas medias (35 m) en la dirección SE (135°), con condiciones ambiente características del cuatrimestre EFMA. La escala de colores indica valores del TL en dB re1 μ Pa².

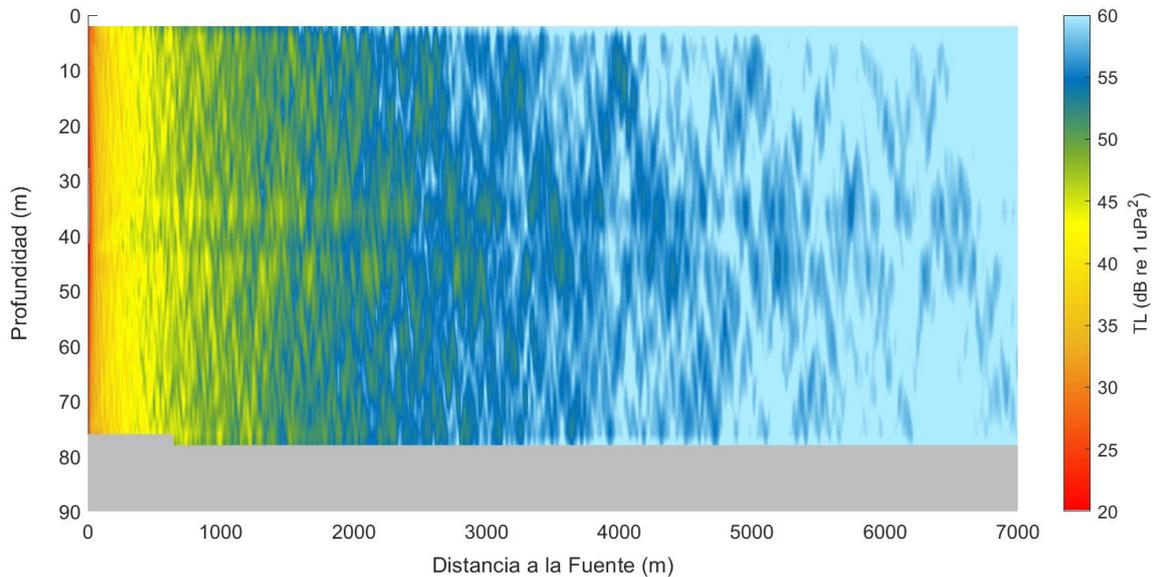


Figura 7.19.5 Resultados del modelo UAS en el punto Fenix, para el hincado de pilotes en aguas de fondo (65 m) en la dirección S (180°), con condiciones ambiente características del cuatrimestre EFMA. La escala de colores indica valores del TL en dB re1 μ Pa².

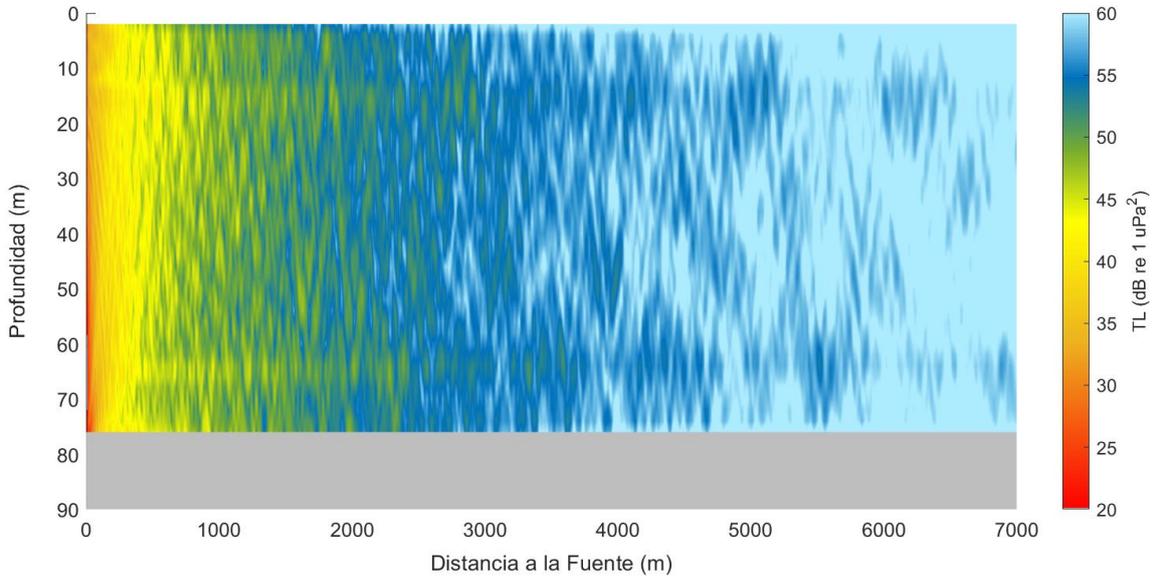


Figura 7.19.6 Resultados del modelo UAS en el punto Fenix, para el hincado de pilotes en aguas de fondo (65 m) en la dirección SO (225°), con condiciones ambiente características del cuatrimestre EFMA. La escala de colores indica valores del TL en dB re1 μ Pa².

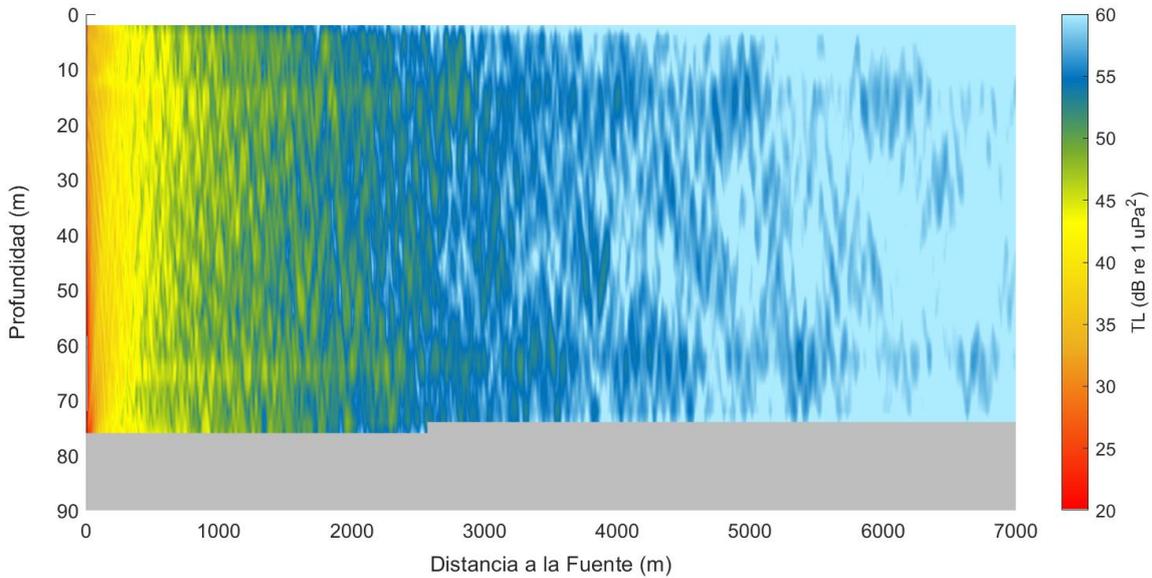


Figura 7.19.7 Resultados del modelo UAS en el punto Fenix, para el buque en la dirección O (270°), con condiciones ambiente características del cuatrimestre EFMA. La escala de colores indica valores del TL en dB re 1 μPa^2 .

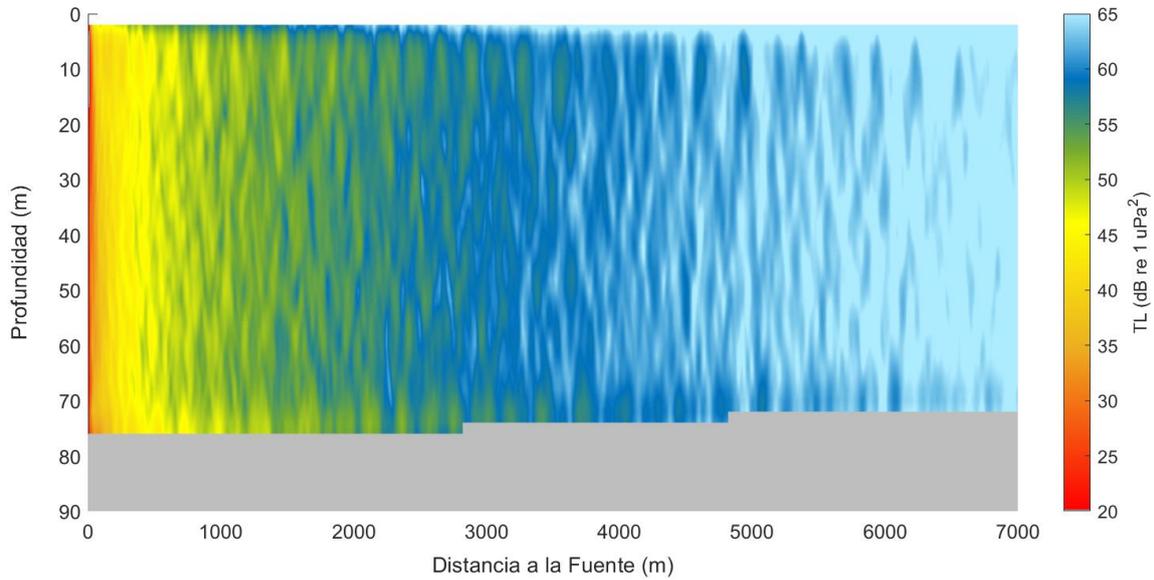
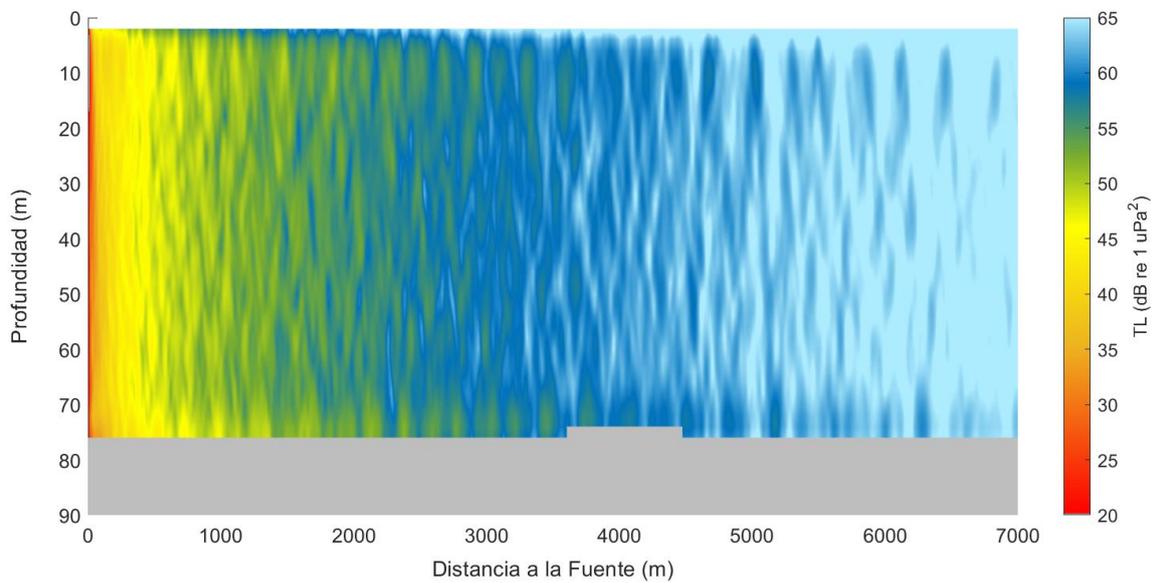


Figura 7.19.8 Resultados del modelo UAS en el punto Fenix, para el buque en la dirección NO (315°), con condiciones ambiente características del cuatrimestre EFMA. La escala de colores indica valores del TL en dB re 1 μPa^2 .



7.20. Resultados: mapas en planta

A continuación, se presentan las Figuras 7.20.1 a la 7.20.8 con la distribución 2D (en planta) de las pérdidas por transmisión en términos del TL, basado en las pérdidas por transmisión integradas en la banda frecuencias en la columna de agua. Estas figuras permiten identificar si existe alguna dirección en la que las condiciones fisicoquímicas de la zona de estudio (batimetría o sedimentos del fondo), favorecen la propagación del sonido por sobre otra.

Como puede verse en las figuras no se observa una dirección clara en la que el sonido se propague de una manera privilegiada por sobre otras, puede decirse entonces, que la propagación acústica es radial. En consecuencia, las variaciones batimétricas no aportan cambios de significancia a los resultados, y la propagación del sonido en esta zona podría independizarse de estas. Notar que las pérdidas por transmisión para el hincado de pilotes resultan de menor magnitud que para el caso del motor de un buque, debido a que los espectros de energía de uno y otro fenómeno son diferentes. El presente análisis concluye con la obtención de las curva logarítmica de las pérdidas por transmisión (TL) que ajustan a los resultados del modelo, de esta manera la incorporación al análisis de la intensidad sonora de las diferentes fuentes puede realizarse en cálculos posteriores.

Figura 7.20.1 Representación en planta de la intensidad sonora en términos del TL para el hincado de pilotes en superficie, que resulta de integrar las mínimas pérdidas por transmisión en la columna (para la banda espectral considerada 20 a 1000 Hz), para el trimestre EFMA en el punto Fenix. Esto resultados no incluyen la directividad de la fuente.

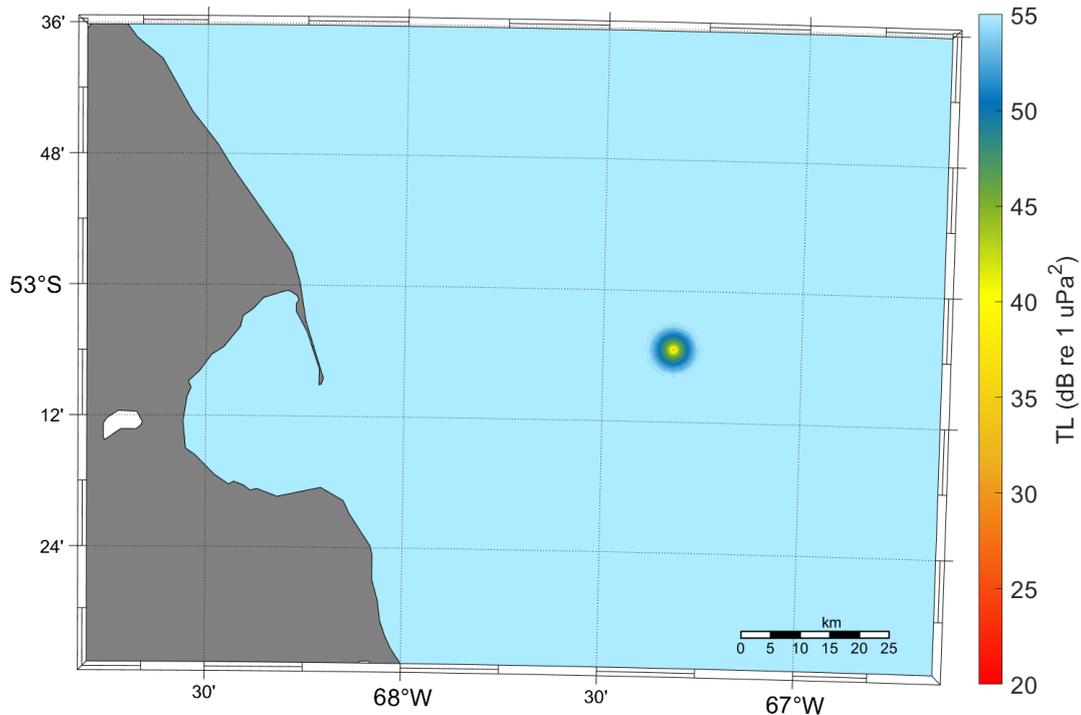


Figura 7.20.2 Vista en detalle de la Figura 7.20.1. TL para el hincado de pilotes en superficie.

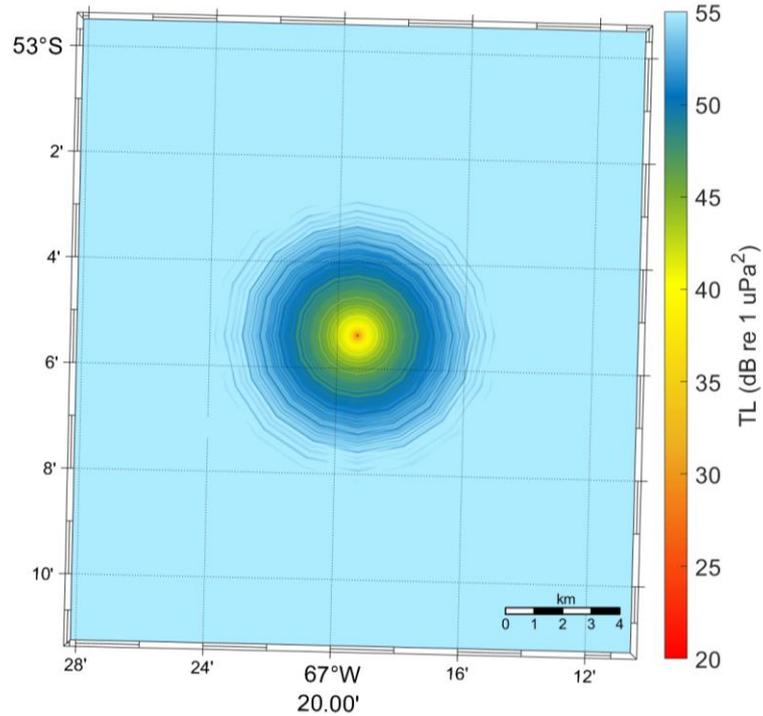


Figura 7.20.3 Representación en planta de la intensidad sonora en términos del TL para el hincado de pilotes a media profundidad, que resulta de integrar las mínimas pérdidas por transmisión en la columna (para la banda espectral considerada 20 a 1000 Hz), para el trimestre EFMA en el punto Fenix. Esto resultados no incluyen la directividad de la fuente.

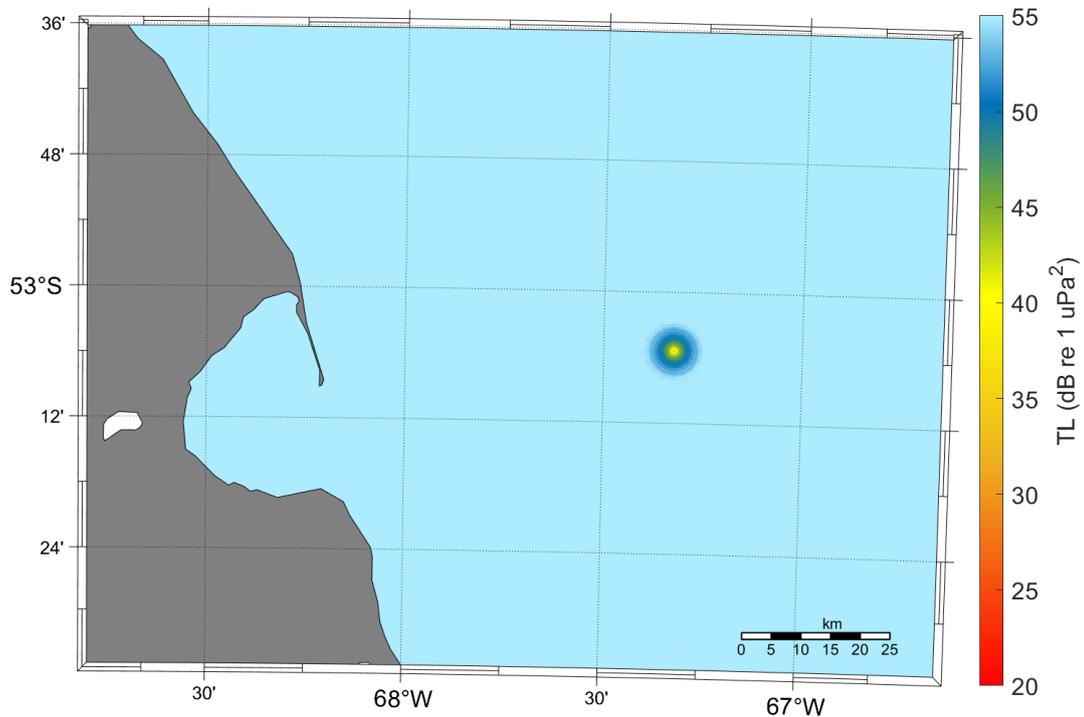


Figura 7.20.4 Vista en detalle de la Figura 7.20.3. TL para el hincado de pilotes a media profundidad.

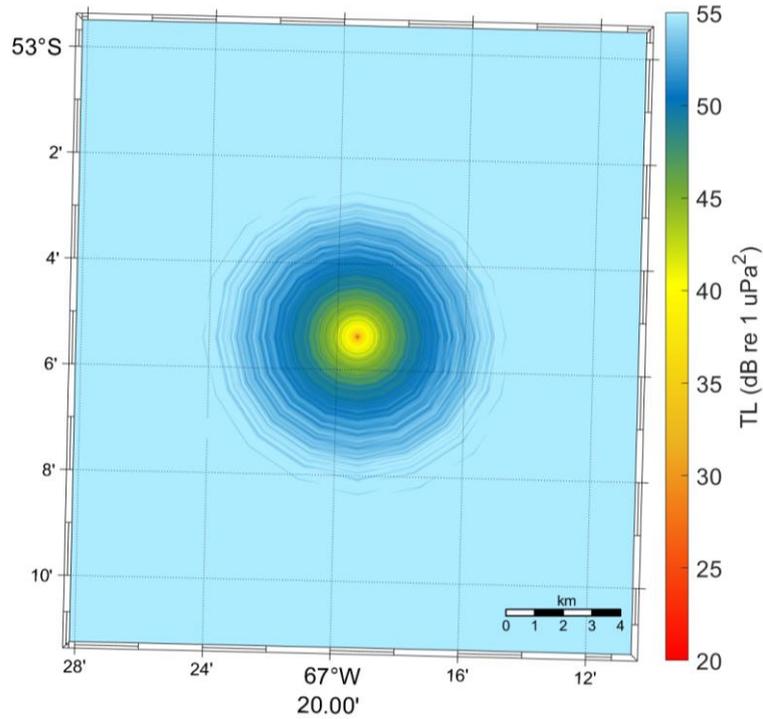


Figura 7.20.5 Representación en planta de la intensidad sonora en términos del TL para el hincado de pilotes en el fondo, que resulta de integrar las mínimas pérdidas por transmisión en la columna (para la banda espectral considerada 20 a 1000 Hz), para el trimestre EFMA en el punto Fenix. Esto resultados no incluyen la directividad de la fuente.

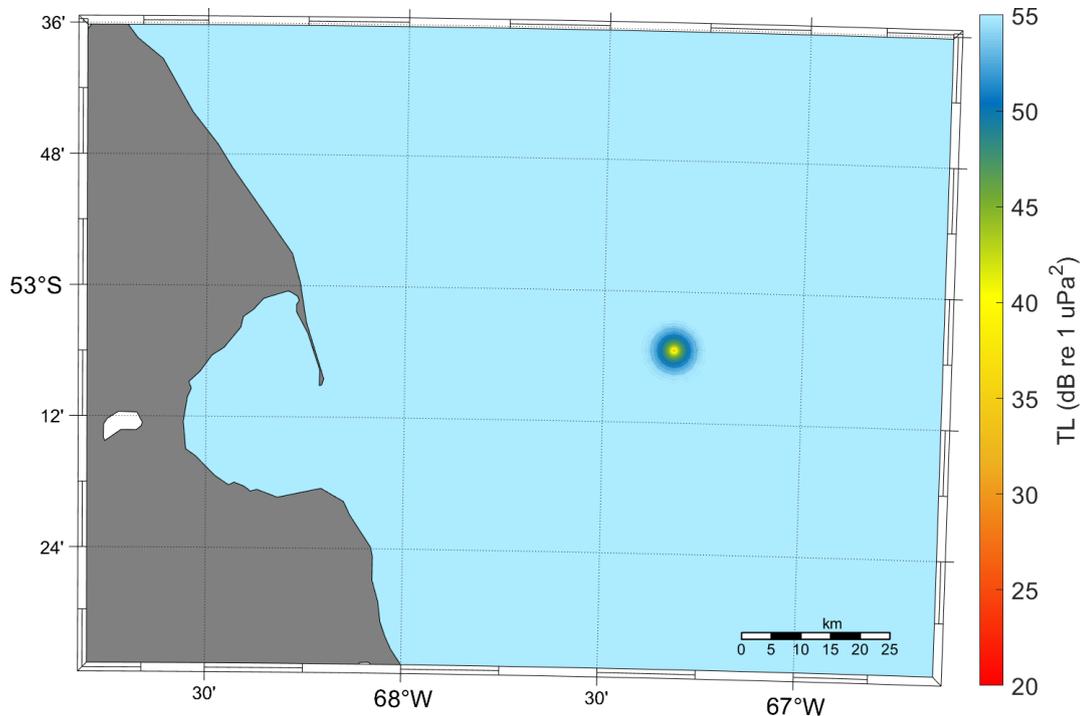


Figura 7.20.6 Vista en detalle de la Figura 7.20.5. TL para el hincado de pilotes en el fondo.

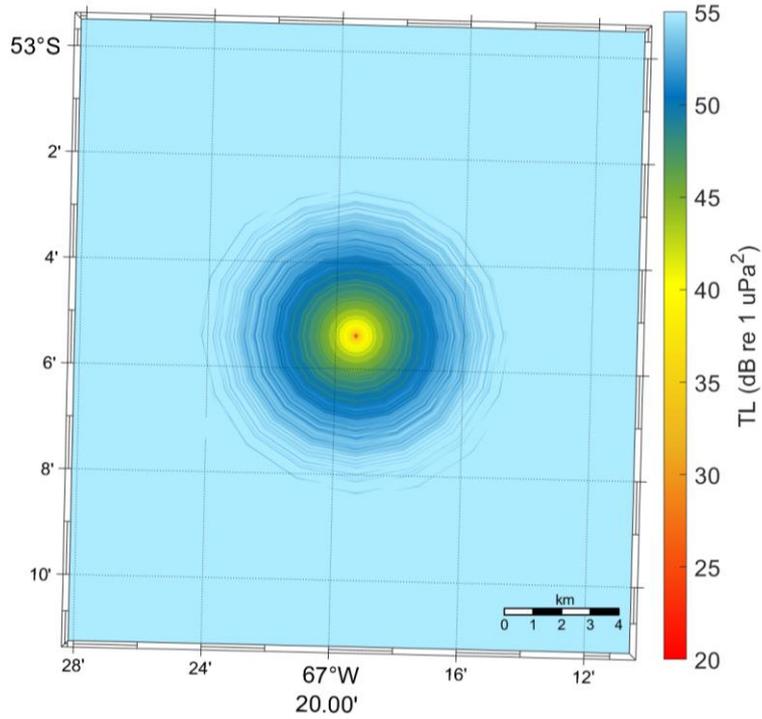


Figura 7.20.7 Representación en planta de la intensidad sonora en términos del TL para el buque en superficie, que resulta de integrar las mínimas pérdidas por transmisión en la columna (para la banda espectral considerada 20 a 2000 Hz), para el trimestre EFMA en el punto Fenix. Esto resultados no incluyen la directividad de la fuente.

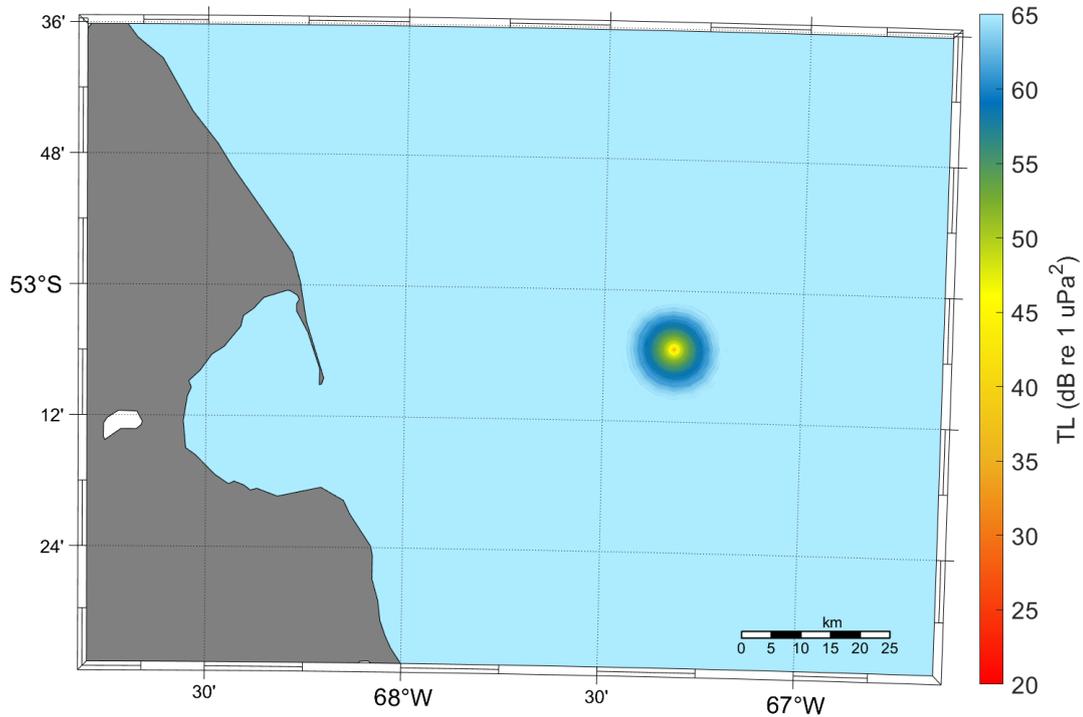
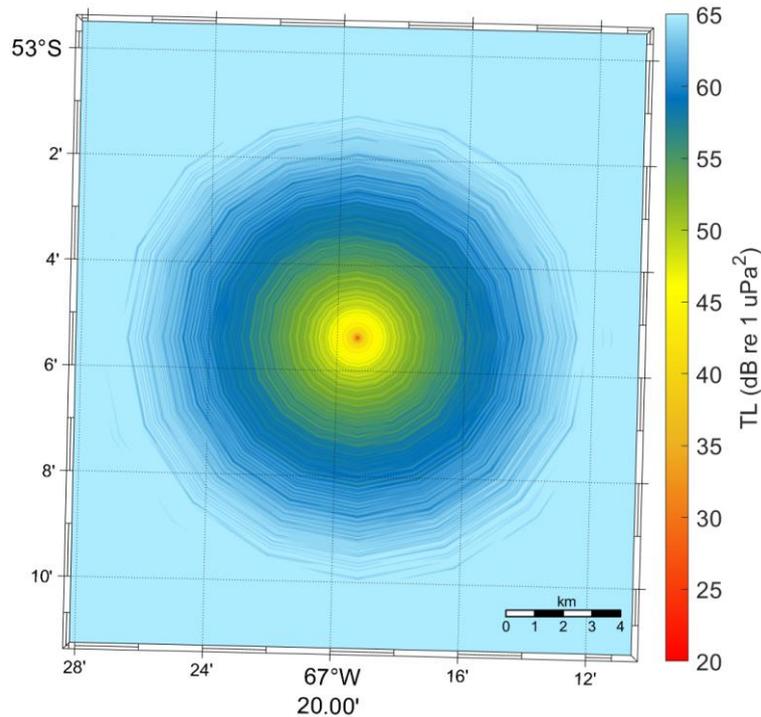


Figura 7.20.8 Vista en detalle de la Figura 7.20.7. TL para el buque en superficie.



7.21. Resultados: curvas logarítmicas de TL

En este ítem, se presenta los resultados del modelo para el promedio cuatrimestral, EFMA, en términos de las pérdidas por transmisión (TL) integradas para toda la banda de frecuencias utilizada. De las TL integradas en frecuencia se extrae la mínima para toda la columna de agua.

Los resultados se presentan en forma gráfica en término de las pérdidas por transmisión (TL) integradas y mínimas en la columna de agua en dB. Las Figuras 7.21.1 a 7.21.4 muestran los resultados de los modelos incluyendo todas las batimetrías (todas las direcciones), para los primeros 50 km desde la fuente, para el ruido generado por el hincado de pilotes y por el buque. En las figuras se muestra también la curva de spreading esférico y spreading cilíndrico:

$$\begin{aligned} \text{TL (dB)} &= 20 * \log (R) && \text{Spreading esférico} \\ \text{TL (dB)} &= 10 * \log (R) && \text{Spreading cilíndrico} \end{aligned}$$

Y también se presenta el ajuste de una función logarítmica modificada solo para los 50 km presentados, que tiene la siguiente la forma:

$$\text{TL (dB)} = a*\log(R)+b*R$$

Donde R es la distancia a la fuente y, a y b, son los coeficientes que surgen del ajuste de la función a los resultados de la modelación.

Como fue presentado en los mapas 2D, no se observa una dirección en la que el sonido se propague de manera privilegiada por sobre otras, puede decirse entonces, que la propagación acústica en estos casos es radial. En consecuencia, las variaciones batimétricas no aportan cambios de significancia a los resultados, indicando que la propagación de sonido en esta zona puede independizarse de la batimetría.

Figura 7.21.1 Resultados del UAS para pilotaje en superficie en Fenix. Pérdidas por transmisión integradas para todas las frecuencias (overall) mínimas en la columna de agua, en función de la distancia a la fuente. Promedio de las condiciones ambiente de enero, febrero, marzo y abril (EFMA).

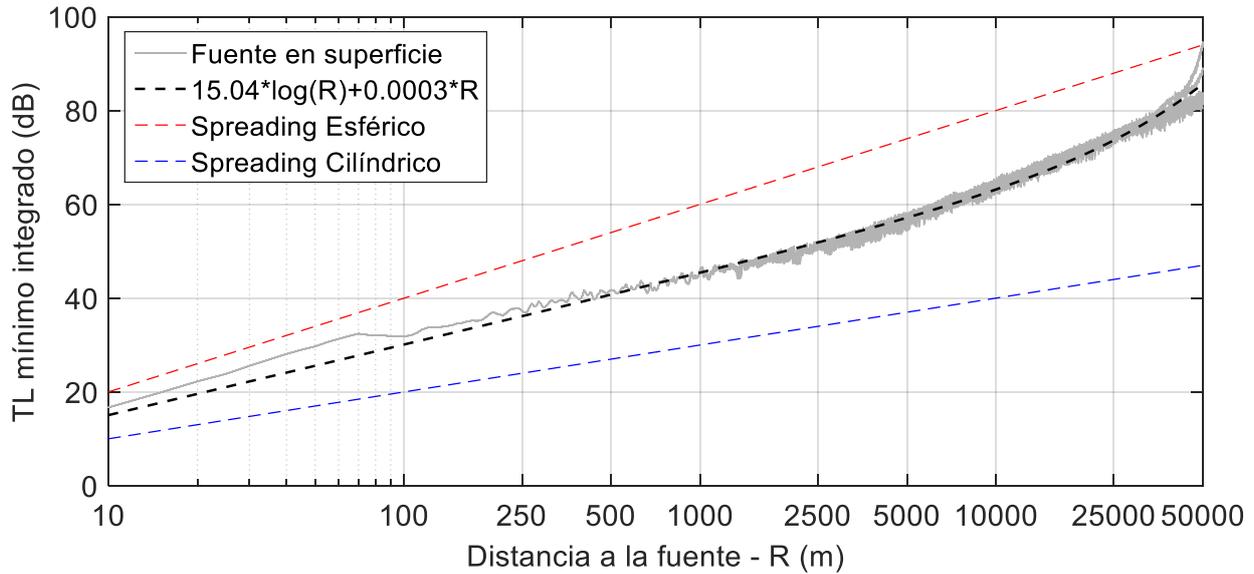


Figura 7.21.2 Resultados del UAS para pilotaje a media agua en Fenix. Pérdidas por transmisión integradas para todas las frecuencias (overall) mínimas en la columna de agua, en función de la distancia a la fuente. Promedio de las condiciones ambiente de enero, febrero, marzo y abril (EFMA).

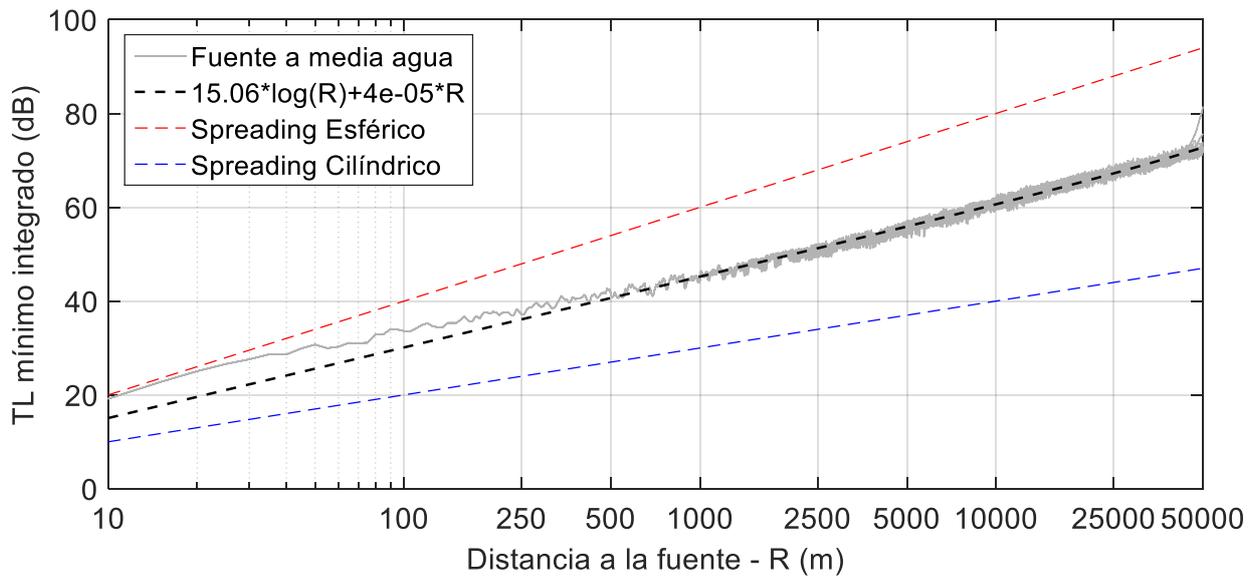


Figura 7.21.3 Resultados del UAS para pilotaje en el fondo en Fenix. Pérdidas por transmisión integradas para todas las frecuencias (overall) mínimas en la columna de agua, en función de la distancia a la fuente. Promedio de las condiciones ambiente de enero, febrero, marzo y abril (EFMA).

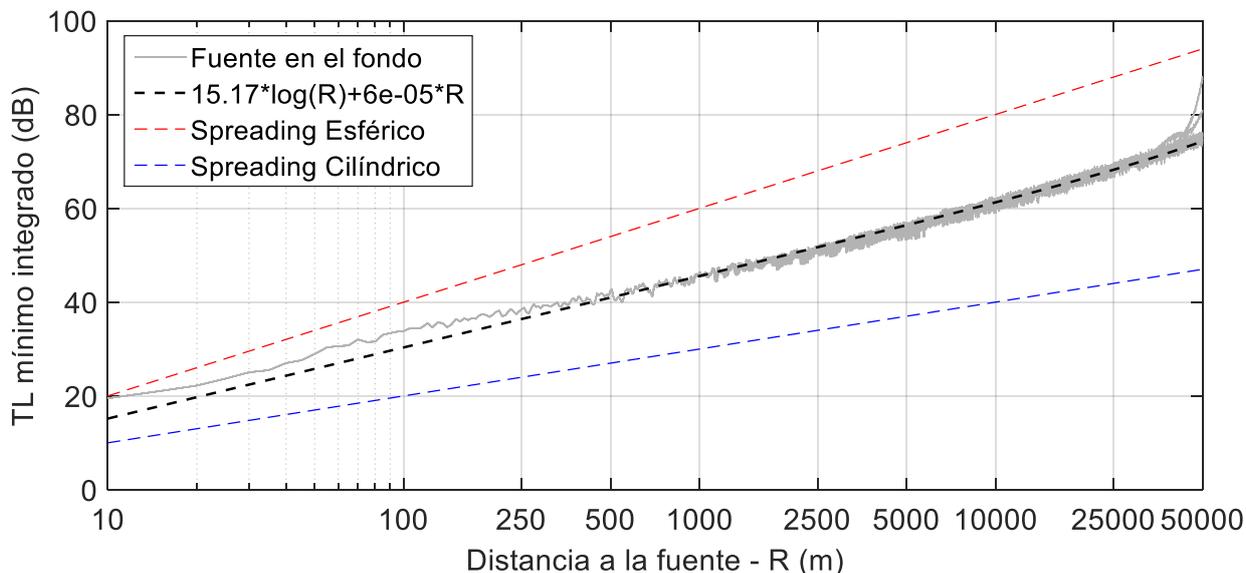
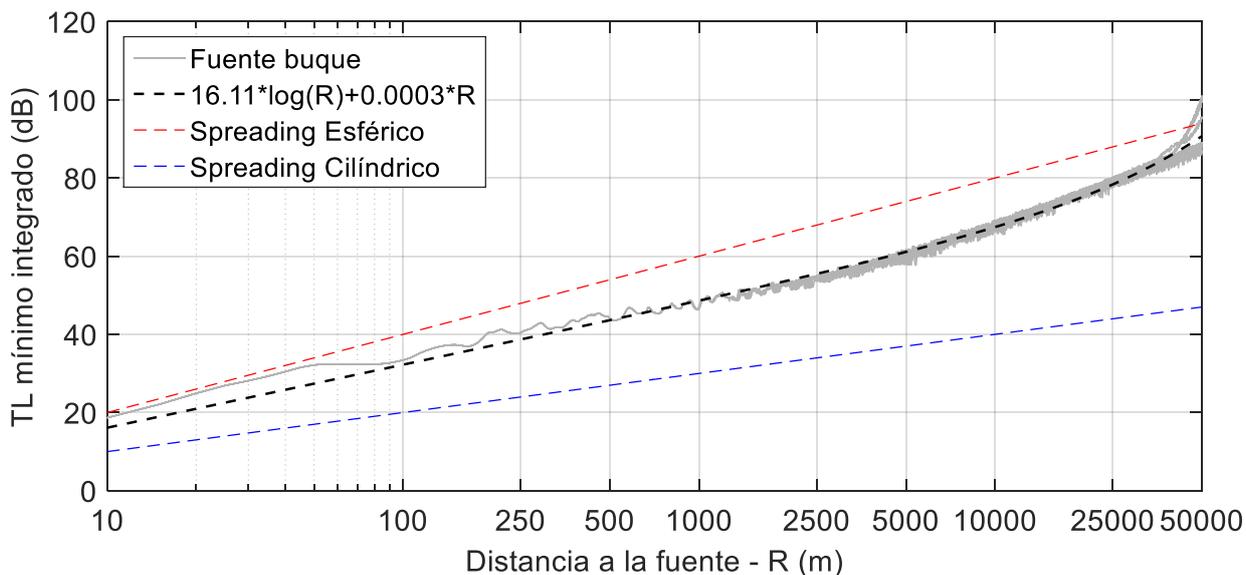


Figura 7.21.4 Resultados del UAS para el buque en Fenix. Pérdidas por transmisión integradas para todas las frecuencias (overall) mínimas en la columna de agua, en función de la distancia a la fuente. Promedio de las condiciones ambiente de enero, febrero, marzo y abril (EFMA).



Las pérdidas por transmisión (TL) resultantes del modelo acústico UAS, para el hincado de pilotes en el punto Fenix, muestra valores similares para la fuente ubicada a distintas profundidades. También muestran valores similares para las distintas batimetrías utilizadas. La Tabla 7.21.1 presenta el coeficiente “a” y “b” de la función de ajuste $TL (dB) = a \cdot \log(R) + b \cdot R$, donde R es la distancia a la fuente.

Tabla 7.21.1 Coeficiente N de la función de ajuste TL (dB) = a*log(R) + b*R, considerando todas las corridas.

FENIX (EFMA)		a	b
Hincado de pilotes	Superficie	15.04	3.0e-4
	Media	15.06	4.0e-5
	Fondo	15.17	6.0e-5
Motor de un buque	Superficie	16.11	3.0e-4

Dada la escasa diferencia entre los resultados se recomienda el uso de la curva ambientalmente más conservadora para el pilotaje de TL (dB) = 15.04 log (R) +0.0003*R, obtenida en superficie para el promedio del cuatrimestre EFMA y todas las direcciones en el punto Fenix. Respecto a las pérdidas por transmisión obtenidas para el motor de un buque la curva obtenida es TL (dB) = 16.11 log (R) +0.0003*R.

8. CONCLUSIONES

8.1. Corrientes

Para estudiar los aspectos ambientales vinculados al vuelco de recortes y lodos de perforación (base agua), y a consecuencias de potenciales derrames de hidrocarburos, se requiere de campos hidrodinámicos realistas, tridimensionales y variables en el tiempo. Para este proyecto de perforación en la plataforma Fenix se utilizó el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD) del DHI, alimentado por vientos, mareas y modelos globales, para generar corrientes y niveles del mar.

Se utilizaron dos configuraciones diferentes para estudiar las mencionadas condiciones:

- Un dominio con mucha resolución cercana a la fuente para simular los vertidos de lodos (base agua) y recortes de perforación,
- Otro dominio de menor resolución en torno a la fuente, pero con mayor alcance espacial para simular los derrames de hidrocarburos.

Este doble enfoque se debe al inherente comportamiento de uno y otro fenómeno analizado. Los lodos (base agua) y recortes una vez en el mar están muy definidos por lo que sucede en torno a la fuente. Allí estos sedimentos generarán las mayores concentraciones en suspensión y se depositarán en su gran mayoría. Por otra parte, los hidrocarburos no generarán un particular comportamiento cerca de la fuente, ya que una vez liberado tienden a permanecer en superficie y a viajar con las corrientes. Por sus características, tienden a alcanzar distancias mucho mayores que los lodos (base agua) y recortes de perforación.

El modelo representó correctamente (amplitud y fase) a las mediciones de niveles del mar y corrientes realizadas y se lo dio por calibrado. La correlación entre mediciones en la estación Pleyade METOCEAN y resultados del MIKE 3 Flow Model FM (HD), entre septiembre de 2008 a abril de 2010, para los niveles del mar y las componentes de las velocidades en 3 niveles de la columna de agua, es muy buena. Para ambas grillas los R^2 de los niveles del mar entre las mediciones y los resultados del modelo son de 0.980 y 0.987, para las componentes norte-sur de la velocidad el menor R^2 es de 0.919, mientras que para las componentes este-oeste el mínimo R^2 es 0.939.

Para las simulaciones del vertido de lodos (base agua) y recortes se simuló 3 años, dentro de los cuales se realizaron los vertidos de los lodos y recortes asociadas a las perforaciones de los 3 pozos en 2 años diferentes. Por lo tanto, la perforación se simuló 6 veces para diferentes condiciones hidrodinámicas.

Para las simulaciones de los derrames de hidrocarburos el modelo hidrodinámico se corrió durante 10 años particionado en 3 períodos:

- Enero de 2008 a junio de 2011
- Enero de 2016 a diciembre de 2018
- Enero de 2019 a diciembre de 2021

Luego, utilizando estos campos se simuló los derrames para un escenario de Blowout y otro de pérdida de combustible de un buque (MGO) durante diferentes condiciones de corrientes (incluye viento) y niveles de mar.

8.2. Vertido de recortes de perforación

Los recortes tendrán diámetros de entre 0.01 y 1 mm, lo que significa que la fracción más gruesa de los recortes precipitará o sedimentará en las vecindades del punto de vertido, cierta fracción de tamaño medio (más propensa a permanecer en suspensión) precipitará un poco más lejos y la porción más fina no precipitará en la zona de estudio. Los resultados indican que entre 300 y 150 ton de las 1300 vertidas (parte de la fracción más fina), se mantienen en suspensión o se depositan fuera del dominio de modelación. Esta diferencia genera concentraciones insignificantes y depósitos de espesores despreciables.

El área ocupada por espesores mayores a 6.5 mm es de 0.13 ha y se encuentra a una distancia de la fuente máxima de 15 m. El mayor espesor de recortes encontrado en el fondo del mar para un pozo individual es de 95 mm, y para la acumulación de los 3 pozos de 161 mm.

Las mayores concentraciones las producen los vertidos en la Fase 3, producto de una granulometría fina y un volumen relativamente importante, alcanzando valores máximos de 59 mg/l. Ocasionalmente, los recortes vertidos superan los 25 mg/l de concentración y lo hacen en torno a la fuente de vertido. La máxima distancia a la que se observa esta concentración es de 86 m y el volumen ocupado es de 59900 m³. Para comparar en el espacio, un paralelepípedo de 50 m por 50 m por 25 m tiene un volumen de 62500 m³.

8.3. Vertido de lodos de perforación

Se ha considerado para las simulaciones del vertido de lodos de perforación (base agua) a los componentes mayoritarios de los mismos como trazadores a cada una de las fases en las que éstos serán desechados al mar. Bentonita en las Fases 1 y 2, Baritina en las Fases 1, 2, 3 y 4 y CaCO₃ en las Fases 2 y 5.

Bentonita

- Para la Fase 1 el vertido de Bentonita se realiza en una capa cercana al fondo del mar. Las concentraciones máximas de Bentonita para todas las simulaciones son de 13 mg/l. El campo de corrientes variable en tiempo y espacio, principalmente asociado a las mareas dominantes en la zona, genera picos de concentraciones de Bentonita, como ilustran las estas figuras.
- Para la Fase 2 el vertido de Bentonita se realiza en la superficie del mar. Las concentraciones máximas de Bentonita alcanzan los 19 mg/l en una capa superficial de 10 m de espesor. El campo de corrientes variable en tiempo y espacio, principalmente asociado a las mareas dominantes en la zona, genera picos de concentraciones de Bentonita. Para esta fase las concentraciones máximas se mantienen por debajo de los 25 mg/l.
- Para ambas fases de la perforación, los vertidos puntuales e intermitentes generan plumas de sedimentos con concentraciones superiores a 1 mg/l cubriendo superficies de 1 ha aproximadamente. Estas concentraciones superiores a 1 mg/l ocurren en torno a la fuente (Fenix) se diluyen rápidamente, no se sostienen por más de media hora.
- Los espesores generados por las máximas acumulaciones de Bentonita en el fondo están muy por debajo del 1 mm.

Baritina

- El vertido de Baritina se realiza en una capa cercana al fondo del mar en la Fase 1 y en la superficie del mar para las Fases 2, 3 y 4.
- Para la Fase 1, el vertido de Baritina se realiza en una capa cercana al fondo del mar. Las concentraciones máximas de Baritina alcanzan los 40 mg/l en una capa profunda de unos 10 m de espesor. El campo de corrientes variable en tiempo y espacio, principalmente asociado a las mareas dominantes en la zona, genera picos de concentraciones de Baritina. Las concentraciones máximas caen por debajo de los 25 mg/l varias veces en los días considerados. En ningún caso las concentraciones máximas por sobre los 25 de mg/l se sostienen por más de 1 h.
- Para la Fase 2, el vertido de Baritina se realiza en la superficie del mar. Las concentraciones máximas alcanzan 41 mg/l asociados a una capa de unos 10 m de espesor, cercana a la superficie del mar. Este máximo se encuentra asociado al retorno de la lechada prevista para esta fase. El campo de corrientes variable en tiempo y espacio, principalmente asociado a las mareas dominantes en la zona, genera picos de concentraciones de Baritina. Las concentraciones máximas caen por debajo de los 25 mg/l varias veces por día. En ningún caso las concentraciones máximas por sobre los 25 de mg/l se sostienen por más de 1 h.
- Las concentraciones máximas de Baritina son de 100 mg/l y ocurren durante los vertidos en las Fases 3 y 4. Esto valores caen por debajo de los 25 mg/l 1 h después de iniciado el vertido.

- La acumulación de Baritina en el fondo del mar es pobre, se puede ver que, por las características de estas partículas tan finas, entre el 60 y 80 % de la masa vertida (variable dependiendo de las condiciones hidrodinámicas y el pozo perforado) permanece en suspensión o escapa del dominio de modelación con concentraciones despreciables. Potencialmente se espera que estas partículas se depositen en algún sitio fuera del dominio considerado generando acumulaciones sin significancia.
- Para las 4 fases de la perforación, los vertidos puntuales e intermitentes generan plumas de sedimentos con concentraciones superiores a 1 mg/l cubriendo superficies de 15 ha aproximadamente. Estas concentraciones superiores a 1 mg/l ocurren en torno a la fuente (Fenix) se diluyen rápidamente, no se sostienen por más de 1 hora.

CaCO₃

- Las concentraciones máximas de CaCO₃ son de 33 mg/l ocurren durante la Fase 2 y 5. Las concentraciones máximas caen por debajo de los 25 mg/l varias veces por día. En ningún caso las concentraciones máximas por sobre los 25 de mg/l se sostienen por más de media hora.
- Para ambas fases de la perforación en las que se vierte CaCO₃, los vertidos puntuales e intermitentes generan plumas de sedimentos con concentraciones superiores a 1 mg/l cubriendo superficies de 1 ha aproximadamente. Estas concentraciones superiores a 1 mg/l ocurren en torno a la fuente (Fenix) se diluyen rápidamente, no se sostienen por más de 1 hora.
- Se observa que, por las características de estas partículas, una importante cantidad de la masa vertida (entre el 40 y 75 %, dependiendo de las condiciones hidrodinámicas y del pozo perforado) permanece en suspensión o escapa del dominio de modelación con concentraciones despreciables. Potencialmente se espera que estas partículas se depositen en algún sitio fuera del dominio considerado generando acumulaciones sin significancia.

Bentonita – Baritina y CaCO₃ – 3 perforaciones previstas por Total Austral

- En ninguno de los casos se observaron concentraciones superiores a 25 mg/l más allá de 172 m de la fuente.
- El máximo volumen ocurrido con concentraciones sumadas de los 3 componentes superiores a los 25 mg/l, es de 53000 m³. Para dar una referencia una plataforma cuadrada de 30 m de lado en un profundidad de 70 m, genera un volumen debajo de la plataforma 63000 m³.
- La máxima acumulación de los componentes mayoritarios por unidad de área ocurrida considerando las 3 perforaciones previstas por Total Austral fue de 6.7 g/m², (con un área de cobertura de 1325 m²), que genera espesores que están muy por debajo del 1 mm. Para dar una referencia, el área ocupada con una densidad superior a 1 g/m² es de 2.25 ha. En promedio para estas 2.25 ha el modelo predice unos 2 g/m².

8.4. Derrames de hidrocarburos

Generalidades

Las simulaciones de los derrames de hidrocarburos utilizan los campos de corrientes para poder realizarse. Se utilizaron 19 simulaciones del Blowout (cobertura temporal de 10 años) y 96 corridas de derrames de MGO ambas con fuente en Fenix. Estas corridas permiten un análisis estadístico que generaron condiciones medias y máximas adecuadas para los análisis ambientales.

Las características del producto condensado que se utiliza en la simulación del Blowout (420 m³ por día durante 213 días) son diferentes de las del MGO (200 m³ en 6 h). La simulación del Blowout considera un volumen importante de condensado liberado al mar de un producto muy volátil que el modelo muestra que no permanece mucho tiempo en suspensión. El MGO posee una importante cantidad de la fracción pesada en su composición y también algo de ceras y naftalenos, por lo que, aunque el volumen considerado en el derrame es menor al considerado para simular el Blowout, su permanencia en suspensión es mayor.

Las simulaciones de ambos derrames muestran variaciones espaciotemporales de uno y otro producto, con la acumulación temporal del hidrocarburo dependiendo de las condiciones hidrodinámicas de cada nodo de cálculo, forzado por la marea astronómica, los vientos y las corrientes de mayor escala. Sobre estos resultados se han generado los campos medios y máximos de las concentraciones en ppb y densidades de la película del hidrocarburo sobre la superficie del mar en g/m^2 .

A continuación, se presenta algunos valores de concentraciones (ppb) máximas y medias y las densidades de la película del hidrocarburo:

- **Blowout.** Puede verse que la máxima concentración asociada al Blowout es 142.3 ppb ($10.4 \text{ g}/\text{m}^2$) y que las concentraciones superiores a 100 ppb ocurren hasta unos 5.5 km de la fuente. Estas condiciones máximas corresponden a una condición puntual ocurrida durante los 10 años de simulaciones. Si bien para los análisis ambientales los valores máximos son indicadores útiles no siempre son realistas porque pueden ser condiciones que ocurren anormalmente. En este sentido resulta interesante analizar los resultados del campo medio (correspondiente al promedio temporal de las zonas donde se identificó hidrocarburo) que indica una concentración promedio máxima de 28.3 ppb y $2.1 \text{ g}/\text{m}^2$ para la densidad promedio máxima de la película del hidrocarburo (ver curvas rojas en las Figuras 6.4.1 y 6.4.2) y que solo se superan los 10 ppb a hasta unos 10.1 km de distancia de la fuente (Fenix).
- **Derrame de MGO.** Los resultados de las simulaciones indican que la máxima concentración asociada al derrame de MGO en Fenix es 142.3 ppb ($10.4 \text{ g}/\text{m}^2$ para la densidad de la película del hidrocarburo) y que las concentraciones superiores a 100 ppb ocurren hasta unos 5.5 km de la fuente. Los resultados del campo medio (correspondiente al promedio temporal de las zonas donde se identificó hidrocarburo) que indica una concentración promedio máxima de 28.3 ppb y $2.1 \text{ g}/\text{m}^2$ para la densidad promedio máxima de la película del hidrocarburo (ver curvas rojas en las Figuras 6.4.5 y 6.4.6) y que solo se superan los 10 ppb a hasta unos 10.1 km de distancia de la fuente (Fenix).

Áreas afectadas por los derrames

Para los campos promedios y máximos se analizaron las áreas a las que ocurren $1 \text{ g}/\text{m}^2$ y 10 ppb tanto para las simulaciones del Blowout como para el derrame de MGO en Fenix. Las áreas asociadas a concentraciones superiores a 10 ppb para los campos promedio son de 79 km^2 (Blowout) y 52 km^2 (derrames de MGO).

- Para el Blowout, en la peor condición los límites (10 ppb y $1 \text{ g}/\text{m}^2$), se sostienen 2.5 días posteriores a la finalización del derrame. En promedio, a las 12 h de terminado el derrame las concentraciones están por debajo de los límites (10 ppb y $1 \text{ g}/\text{m}^2$). Por lo tanto, la escala temporal del Blowout es de 215.5 días.
- Para el derrame de MGO de 6 h en Fenix, en el peor de los casos a los 5.5 días de comenzado el derrame ya no se observan concentraciones de 10 ppb o más (tampoco de $1 \text{ g}/\text{m}^2$). En promedio, los límites de interés (10 ppb y $1 \text{ g}/\text{m}^2$) se alcanzan a 1.1 días de comenzado el derrame. Por lo tanto, la escala temporal del derrame de MGO en Fenix es de 5.5 días.

Hidrocarburos en la costa

Los resultados de las simulaciones de Blowout indican que el hidrocarburo llega a la costa en 8 veces en 19 corridas. En todas las simulaciones el arribo a la costa del hidrocarburo ocurre una vez en los 213 días, menos para una corrida en la que se lo observa en 2 ocasiones. Por lo tanto, en 10 años de simulaciones, el hidrocarburo arriba a la costa 9 veces (9 condiciones hidrodinámicas).

Probabilidad de arribo a la costa derrame en Fenix

De las simulaciones del Blowout y del derrame de MGO se puede observar que el derrame arriba a la costa 1 vez por año, considerando 10 años de condiciones hidrodinámicas. En consecuencia, si el derrame dura 213 días (~7 meses) puede pensarse que la probabilidad de que llegue a la costa es del 58.4% ($213/365 \cdot 100$), ahora si el derrame dura 1 mes la probabilidad de arribo a la costa es 8.2% ($30/365 \cdot 100$).

Por lo tanto, considerando una probabilidad de ocurrencia de un Blowout en Fenix de 1 vez en 2000 años, la probabilidad de que un derrame de 7 meses alcance la costa es de 1 en 3427 años ($1/2000 * 213/365$).

Respecto al derrame de MGO, la probabilidad es de 1 por año considerando un derrame de 6 h. Por lo tanto, la probabilidad de manera análoga es 0.0685 % ($0.25/365*100$). Considerando que la probabilidad de ocurrencia de este tipo de accidentes es de 1 en 30 años, la probabilidad de que un derrame de MGO de 6 h alcance la costa es 1 en 43800 años.

Derrame de 5 m³

Utilizando el modelo de derrames se realizaron ensayos para comparar el derrame de MGO de 200 m³ en 6 h y un derrame de 5m³ en 10 minutos.

Se observa que las características del derrame (forma y posición en el tiempo) son similares en ambos casos. La diferencia está en las concentraciones, ya que, en el segundo caso, a causa de su inferior cantidad de masa derramada, son de un 6% de la primera con desvío estándar del mismo orden. Por lo tanto, las concentraciones del derrame de 5 m³ se encuentran entre un 0 y 12 % de las del derrame de 200 m³. Las concentraciones observadas por el modelo no superan en ningún caso los 10 ppb o 1 g/m².

8.5. Modelación acústica

Se ha realizado una modelación acústica para investigar la propagación del sonido generado por el hincado de pilotes (asociado a la instalación de la plataforma Fenix) y el motor de un buque representativos de los que estarán presentes en las operaciones.

Se utiliza como posición de la fuente sonora a Fenix. Se ha utilizado el modelo de propagación acústica UAS del DHI. Para las simulaciones fueron consideradas las características del fondo marino y los perfiles de densidad y velocidad del sonido, calculados en función de la salinidad, temperatura y presión, considerando el cronograma de tareas de las operaciones, se han considerados perfiles batimétricos de 50 km de extensión, en 16 direcciones diferentes para estudiar si alguna de estas direcciones se encuentra favorecida por sobre otra.

Entre los resultados no se observa una dirección clara en la que el sonido se propague de manera privilegiada por sobre otras, puede decirse entonces, que la propagación acústica es radial. En consecuencia, las variaciones batimétricas no aportan cambios de significancia a los resultados, y la propagación del sonido en esta zona podría independizarse de esta.

Para las simulaciones de la propagación sonora asociada al hincado de pilotes se ha considerado la fuente en superficie, media agua y fondo. Para la propagación del sonido del motor de un buque se consideró la fuente en superficie.

Se han ajustado funciones logarítmicas representativas de los resultados del modelo. Dada la escasa diferencia entre los resultados de las simulaciones de se recomienda el uso de la curva ambientalmente más conservadora para el pilotaje de $TL (dB) = 15.04 \log (R) + 0.0003 * R$, obtenida en superficie para el promedio del cuatrimestre EFMA y todas las direcciones en el punto Fenix. Respecto a las pérdidas por transmisión obtenidas para el motor de un buque la curva obtenida es $TL (dB) = 16.11 \log (R) + 0.0003 * R$.

Estos resultados no incluyen la caída de energía producto de la directividad de la fuente. Se recomienda que este efecto se incorpore oportunamente dependiendo del tipo de fuente sonora utilizada.

9. REFERENCIAS

- Arveson, Paul & Vendittis, D.J. (2000). Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. The Journal of the Acoustical Society of America. 107. 118-29. 10.1121/1.428344.
- Bailey, H, B Senior, D Simmons, J Rusin, G Picken, and P Thompson. "Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals." Marine Pollution Bulletin, 2010: 60: 888-897.
- Barton, Nick. (2006). Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy.
- Bellman, M. A., 2014. Overview of existing Noise Mitigation Systems for reducing Pile-Driving Noise. 2014 inter-noise Conference, Melbourne, Australia
- Blackwell, S. B., and Greene, C. R., 2005. Underwater and in-air sounds from a small hovercraft. J. Acoust. Soc. Am.0001-4966 118(6), 3646–3652
- Brocher, Tom. (2005). Empirical Relations between Elastic Wavespeeds and Density in the Earth's Crust. Bulletin of the Seismological Society of America. 95. 2081 - 2092. 10.1785/0120050077.
- Buckingham, 1998. Theory of acoustic attenuation, dispersion, and pulse propagation in unconsolidated granular materials including marine sediments. J. Acoust. Soc. Am. 102 (5), 2579-2596.
- Buckingham, 2005. Buckingham MJ. "Causality, Stokes' wave equation, and acoustic pulse propagation in a viscous fluid". PHYSICAL REVIEW E 72 026610: 1-9 AUG 18, 2005.
- Clay y Medwin, 1977. Clay, C.S., Medwin, H., 1977. Acoustical Oceanography: Principles and Applications. Wiley, New York, 544pp.
- Collins M.D. A split-step Padé solution for the parabolic equation method J. Acoust. Soc. Am., 93 (1993), pp. 1736-1742, 10.1121/1.406739
- Danish Hydraulic Institute (DHI), 2019. Underwater Acoustic Simulator, Simulation of sound propagation User Guide.
- de Jong C.A.F. & Ainslie M.A., TNO report MONRPT-033-DTS-2007-03388, 2008: Underwater sound due to the piling activities for the Q7 Offshore wind park
- Erbe, C., and McPherson, C., 2017. "Underwater noise from geotechnical drilling and standard penetration testing," J. Acoust. Soc. Am. 142, EL281–EL285.
- Francois, R. E., and Garrison, G. R. (1982a). "Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption," J. Acoust. Soc. Am. 72, 1879–1890.
- Francois, R. E., and Garrison, G. R. (1982b). "Sound absorption based on ocean measurements. Part I: Pure water and magnesium sulphate contributions," J. Acoust. Soc. Am. 72, 896–907.
- Gallardo Jara, Rocío E, Ghiglione, Matías C, & Rojas Galliani, Lisandro. (2019). Tectonic evolution of the southern Austral-Magallanes Basin in Tierra del Fuego. Latin American journal of sedimentology and basin analysis, 26(2), 127-154.
- Garia S., Kumar A., Ravi P., Nair A. (2019). A comprehensive analysis on the relationships between elastic wave velocities and petrophysical properties of sedimentary rocks based on laboratory measurements.
- Hamilton, E.L., 1972. Compressional wave attenuation in marine sediments. Geophysics 37, 620-646.
- Hamilton, E.L., 1976. Sound attenuation as a function of depth in the seafloor. J. Acoust. Soc. Am. 59, 528-535.
- Holand, P., 2017. Loss of Well Control Occurrence and Size Estimators, Phase I and II.
- Hydronav, 2009. Mediciones Total Austral S.A. Vega and Pleyade Development Project.

- Jadwiga A. Jarzyna et al., 2012. Jerzy Dec, Jerzy Karczewski, Sławomir Porzucek, Sylwia Tomecka-Sucho?, Anna Wojas and Jerzy Zi?tek AGH University of Science and Technology, Faculty of Geology Geophysics and Environmental Protection, Krakow, Poland.
- Jarzyna, J., Bala, M., & Krakowska, P. (2011). Velocity models for seismics based on well log data. *Geology, Geophysics and Environment*, 37(3), 447.
- Jensen et al, 2011. *Computational Ocean Acoustics*, 2nd edition. Woodbury, NY: AIP Press.
- Jensen y otros, 1994. *Computational Ocean Acoustics*. Woodbury, NY: AIP Press.
- Kamaruddin, N.A. & Saad, Rosli & Nordiana, M.M. & Mokhtar, Saidin & Andika, Fauzi. (2015). Seismic study of rebound zone within Bukit Bunuh impact crater, Lenggong Perak. 20. 10027-10032.
- Lepper, P., Robinson, S., Ablitt, J., y Dible, S., 2009. Temporal and spectral characteristics of a marine piling operation in shallow water
- Leunissen, E., 2017. Underwater noise from pile-driving and its impact on Hector's dolphins in Lyttelton Harbour, New Zealand
- Lurton, 2010. *An introduction to underwater acoustics: Principles and applications*, Springer-Praxis.
- Maggi A. L. & Duncan A. J., 2016. AcTUP v2.2. Acoustic Toolbox User interface & Post processor. Centre for Marine Science & Technology. Installation & User Guide
- Marine Acoustics, Inc., 2011. Underwater Acoustic Measurement of the Spartan 151 Jack-up Drilling Rig in the Cook Inlet Beluga Whale Critical Habitat. Furie Operating Alaska, LLC
- Matuschek, R., Betke, K., 2009. Measurements of Construction Noise During Pile Driving of Offshore Research Platforms and Wind Farms
- McCauley, R. D., 2004. Measurement of underwater noise produced during wellhead cutting operations and an estimation of its environmental influence. Centre for Marine Science and Technology Report. CMST Report No. 2003-20, Curtin University, Perth, Australia.
- McCauley, R., 1998. Radiated Underwater Noise Measured From the Drilling Rig Ocean General, Rig Tenders Pacific Ariki and Pacific Frontier, Fishing Vessel Reef Venture and Natural Sources in the Timor Sea, Northern Australia." C98-20. Centre for Marine Science and Technology, Curtin University of Technology.
- Nedwell, J., A.W.H. Turnpenney, J. Lovell, S.J. Parvin, R. Workman, J.A.L. Spinks & D. Howell, 2007. A validation of the dBht as a measure of the behavioural and auditory effects of underwater noise
- Parker G, M Paterlini & R Violante, 1997. El fondo marino. In: Boschi E (ed) *El mar argentino y sus recursos pesqueros*, Tomo I: 65- 87. INIDEP, Mar del Plata, Argentina.
- Prasad K, Adrian RJ, Landreth CC, Offutt PW, 1992. Effect of resolution on the speed and accuracy of particle image velocimetry interrogation. *Exp. Fluids* 13:105–116.
- Raggio F., Welsink H., Fiptiani N., Prayitno W., Gerster R. Cuenca Malvinas. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos Simposio Cuencas Argentinas: visión actual. 2011.
- Richardson, W.J., Greene, C.R.J., Koski, W.R., Malme, C.I., Miller, G.W. and Smultea, M.A. (1990). Acoustic effects of oil production activities on bowhead and white whales visible during spring migration near Pt. Barrow, Alaska—1989 phase, LGL Ltd, Herndon, VA.
- Robbiano, J.A. y Arbe, H.A. y Gangui, A., 1996. Cuenca Austral marina. En Ramos, V.A. y Turic, M.A. (editores): *Geología y Recursos Naturales de la Plataforma Continental Argentina*. 13º Congreso Geológico Argentino y 31º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Relatorio, 323-341 p.
- Robinson, S., Theobald, P., Lepper, P., 2012. Underwater noise generated from marine piling

- Russo, A., M. A. Flores, and H. Di Benedetto, 1980, Patagonia austral extraandina: Geología Regional Argentina, Segundo Simposio, Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, 1976, v. 2, p. 1431–1462.
- SHN, 1974. Servicio de Hidrografía Naval, 1974. Sedimentología de la Plataforma Continental Argentina. S.H.N. Publ. H.669/1, Buenos Aires.
- Southall, Brandon & Bowles, Ann & Ellison, William & Finneran, J.J. & Gentry, R.L. & Green, C.R. & Kastak, C.R. & Ketten, Darlene & Miller, James & Nachtigall, Paul & Richardson, W. & Thomas, Jeanette & Tyack, Peter. (2007). Marine mammal noise exposure criteria. *Aquat. Mamm.* 33. 10.1121/AT.2021.17.2.52.
- Tassone, A.; Cominguez, A. H.; Iodolo, E.; 2003. Depth seismic-migration modeling, northern 'Isla de los Estados', Argentina (54° 25' S). Universidad de Concepción. Departamento de Ciencias de la Tierra. 10° Congreso Geológico Chileno.
- Tassone, A.; Iodolo, E.; Menichetti, M.; Yagupsky, D.; Caffau, M.; Vilas, J.F. Seismostratigraphic and structural setting of the Malvinas Basin and its southern margin (Tierra del Fuego Atlantic offshore) *Geologica Acta: an international earth science journal*, vol. 6, núm. 1, marzo, 2008, pp. 55-67 Universitat de Barcelona Barcelona, España.
- Tendürüs et al. Er, Melek & Wijngaarden, Gert & Kars, H.. (2010). Long-term effect of seismic activities on archaeological remains: A test study from Zakynthos, Greece. 10.1130/2010.2471(13).
- Tougaard, J., Carstensen, J. and Teilmann, J., 2009. Pile driving zone of responsiveness extends beyond 20 km for harbour porpoises (*Phocoena phocoena* (L.)) (L). *J. Acoust. Soc. Am.*, 126, pp. 11-14.
- Wang, Yun & Lu, Jun & Shi, Ying & Yang, Chun. (2009). PS-wave Q estimation based on the P-wave Q values. *Journal of Geophysics and Engineering*. 6. 386-389. 10.1088/1742-2132/6/4/006.
- Wilke F, Kloske K & Bellmann M (2012) Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl. Technischer Abschlussbericht für das geförderte Projekt ESRa, Fördernummer 0325307.
- Yeseul Kim, Changyeol Lee and Eun Young Lee, 2018, Numerical analysis of sedimentary compaction: Implications for porosity and layer thickness variation. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 54, no. 6, p. 631-640
- Zambrano, J.J. & Urien, C.M., 1971. Las cuencas sedimentarias en la plataforma continental argentina. *Petrotecnia*, 21(4): 29-37. Buenos Aires.
- Zhang, Z. and Stewart, R. 2007. Seismic attenuation and rock property analysis in a heavy oilfield: Ross Lake, Saskatchewan.