

INFORME DE MODELACION DE CORRIENTES Y DISPERSION DEBIDO A RUPTURA ACCIDENTAL DE TUBERIAS – PLAYA PUNTA ARENAS

INDICE

1.0	INTRODUCCIÓN	4
2.0	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	4
2.1	UBICACIÓN.....	4
2.2	CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS	6
3.0	OBJETIVOS.....	6
4.0	DATOS EMPLEADOS PARA LA MODELACIÓN	7
5.0	RECURSOS BIOLÓGICOS	7
6.0	TRANSPORTE DE PETROLEO.....	9
6.1	UBICACIÓN DE LAS TUBERÍAS Y CAUDAL DE DESCARGA.....	9
7.0	MODELACION NUMÉRICA	11
7.1	MODELACIÓN DE CORRIENTES	12
7.2	MODELO DE DISPERSIÓN.....	16
8.0	RESULTADOS.....	18
8.1	MODELACION DE CORRIENTES	18
8.2	DERRAME DE PETROLEO.....	23
9.0	CONCLUSIONES	37
9.1	CORRIENTES MARINAS.....	37
9.2	DISPERSIÓN	37
10.0	RECOMENDACIONES	38
11.0	BIBLIOGRAFIA	38
12.0	ANEXOS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	Área de Estudio. Playa Punta Arenas.	5
Figura 02	Mapa de ubicación y área de influencia	6
Figura 03	Mapa de ubicación del área de influencia biológico	8
Figura 04	Ubicación de las tuberías submarinas.....	9
Figura 05	Ubicación de los puntos de ruptura de las tuberías.....	11
Figura 06	Grilla de cálculo para la modelación de corrientes y dispersión	13
Figura 07	Batimetría interpolada a la grilla de cálculo y ubicación de puntos de control.....	14
Figura 08	Modelación de corrientes superficiales. Marea descendente	18
Figura 09	Modelación de corrientes 5 metros. Marea descendente.....	19
Figura 10	Modelación de corrientes superficiales. Marea ascendente	20
Figura 11	Modelación de corrientes a 5 metros. Marea ascendente	21
Figura 12	Rosa de dirección de velocidad en los puntos de control.....	22
Figura 13	Modelación de derrame de petróleo a los 20 minutos de modelación. Marea Descendente. Zona Embarque desembarque.....	24
Figura 14	Modelación de derrame de petróleo a los 40 minutos de modelación. Marea Descendente. Zona Embarque desembarque.....	24
Figura 15	Modelación de derrame de petróleo a los 1 hora de modelación. Marea.....	25
Figura 16	Modelación de derrame de petróleo a 1.5 hora de modelación. Marea Descendente. Zona Embarque desembarque.	25
Figura 17	Modelación de derrame de petróleo a 20 minutos de modelación. Marea Descendente. Centro de la tubería.	26
Figura 18	Modelación de derrame de petróleo a 40 minutos de modelación. Marea Descendente. Centro de la tubería	26
Figura 19	Modelación de derrame de petróleo a 1 hora de modelación. Marea	27
Figura 20	Modelación de derrame de petróleo a 1.5 horas de modelación. Marea Descendente. Centro de la tubería	27
Figura 21	Modelación de derrame de petróleo a 20 minutos de modelación. Marea Descendente. Zona de rompiente de olas.....	28
Figura 22	Modelación de derrame de petróleo a 40 minutos de modelación. Marea Descendente. Zona de rompiente de olas.....	28
Figura 23	Modelación de derrame de petróleo a 1 hora de modelación. Marea Descendente. Zona de rompiente de olas.....	29
Figura 24	Modelación de derrame de petróleo a 1.5 horas de modelación. Marea Descendente. Zona de rompiente de olas.....	29
Figura 25	Modelación de derrame de petróleo a 20 minutos de modelación. Marea Ascendente. Zona de embarque y desembarque	30
Figura 26	Modelación de derrame de petróleo a 40 minutos de modelación. Marea Ascendente. Zona de embarque y desembarque	30
Figura 27	Modelación de derrame de petróleo a 1 hora de modelación. Marea	31
Figura 28	Modelación de derrame de petróleo a 1.5 hora de modelación. Marea Ascendente. Zona de embarque y desembarque	31
Figura 29	Modelación de derrame de petróleo a 20 minutos de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería	32
Figura 30	Modelación de derrame de petróleo a 40 minutos de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería	32
Figura 31	Modelación de derrame de petróleo a 1 hora de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería.....	33
Figura 32	Modelación de derrame de petróleo a 1.5 hora de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería	33
Figura 33	Modelación de derrame de petróleo a 20 minutos de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería	34
Figura 34	Modelación de derrame de petróleo a 40 minutos de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería	34
Figura 35	Modelación de derrame de petróleo a 1 hora de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería.....	35
Figura 36	Modelación de derrame de petróleo a 1.5 hora de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería	35

LISTA DE CUADROS

Cuadro 01	Coordenadas del Área de Estudio	4
Cuadro 02	Ubicación de terminal de las tuberías submarinas en la playa Punta Arenas en coordenadas UTM y geográficas.	9
Cuadro 03	Características del posible flujo derramado por futura de la tubería.....	10
Cuadro 04	Características del posible flujo derramado por futura de la tubería.....	10
Cuadro 05	Parámetros de simulación.....	14
Cuadro 06	Coordenadas de los puntos de control para modelación de corrientes	15
Cuadro 07	Datos empleados para la modelación de derrame	17
Cuadro 08	Cuadro estadístico de la variación de velocidad en los puntos de control.....	22
Cuadro 09	Resumen de resultados de la modelación de dispersión.....	36

1.0 INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se ha realizado la modelación numérica de la influencia de la ruptura accidental de tuberías de petróleo, ubicadas dentro del área acuática de la playa Punta Arenas. Se empleó como condición de entrada para el modelo numérico de corrientes, los datos medidos en campo y la información de batimetría, vientos, mareas, corrientes, temperatura y salinidad. Para el modelo de dispersión se utilizó las características de la descarga (ubicación, densidad, caudal, entre otros).

Para la modelación numérica se empleó el modelo Princeton Ocean Model (POM), que permitió obtener los campos de corrientes. El modelo POM junto con el modelo de dispersión, permitirán evaluar el comportamiento de una posible fuga de material debido a una ruptura accidental en la zona de embarque y desembarque de los buques, en el centro de la tubería y en la zona de rompiente de olas, con la finalidad de observar el impacto que producirían dicho material sobre el ecosistema marino.

2.0 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 UBICACIÓN

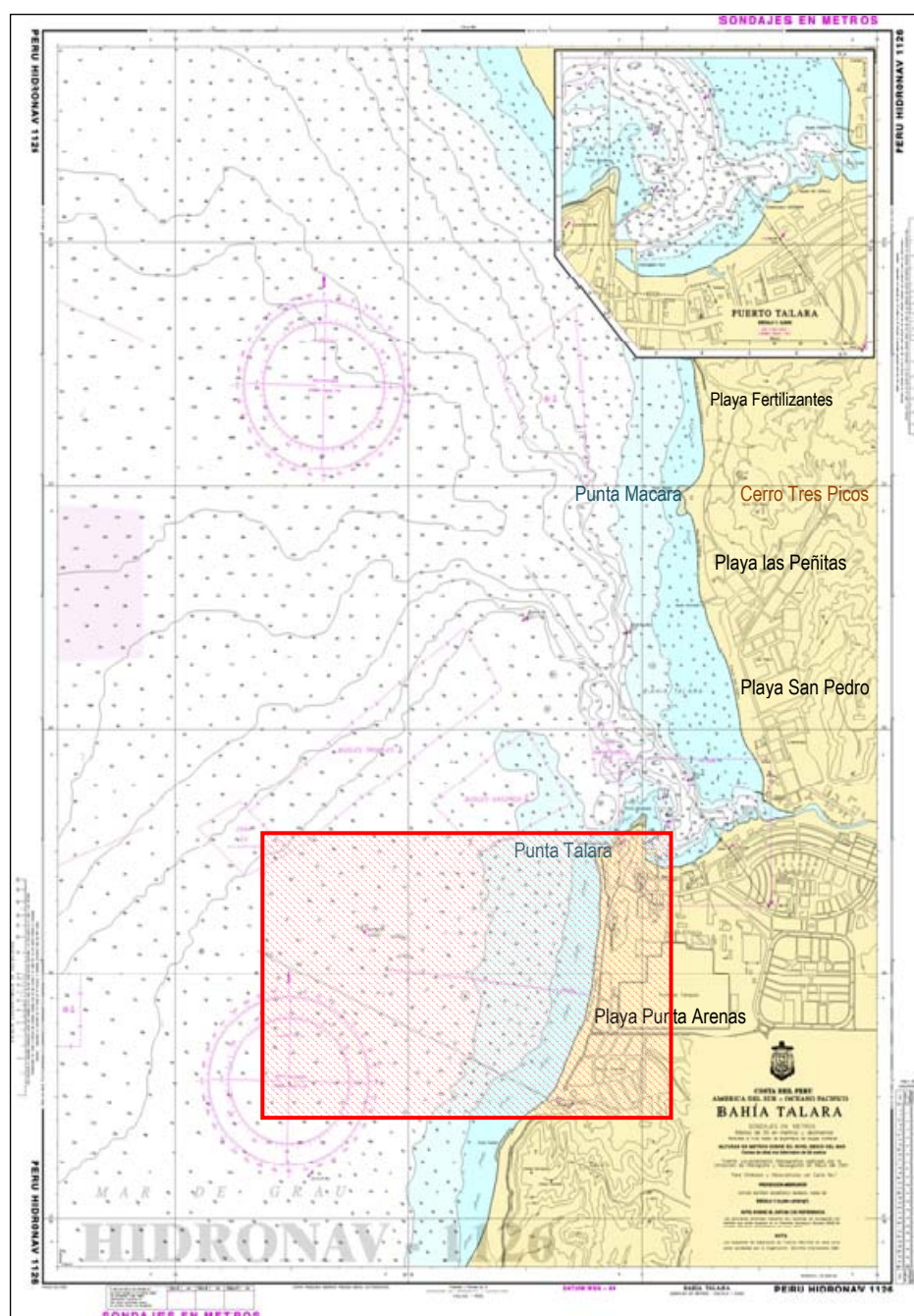
El área de estudio se ubica en la parte nor occidental del departamento de Piura en la provincia de Talara. Esta provincia limita por el norte con el departamento de Tumbes, por el sur con la provincia de Paita, por el este con la provincia de Sullana y por el oeste con el océano Pacífico.

La zona de interés para el presente estudio, comprende el área marítima de la playa Punta Arenas, ubicadas dentro de las coordenadas que se presentan en el cuadro 01 y figura 01 y 02.

Cuadro 01 Coordenadas del Área de Estudio

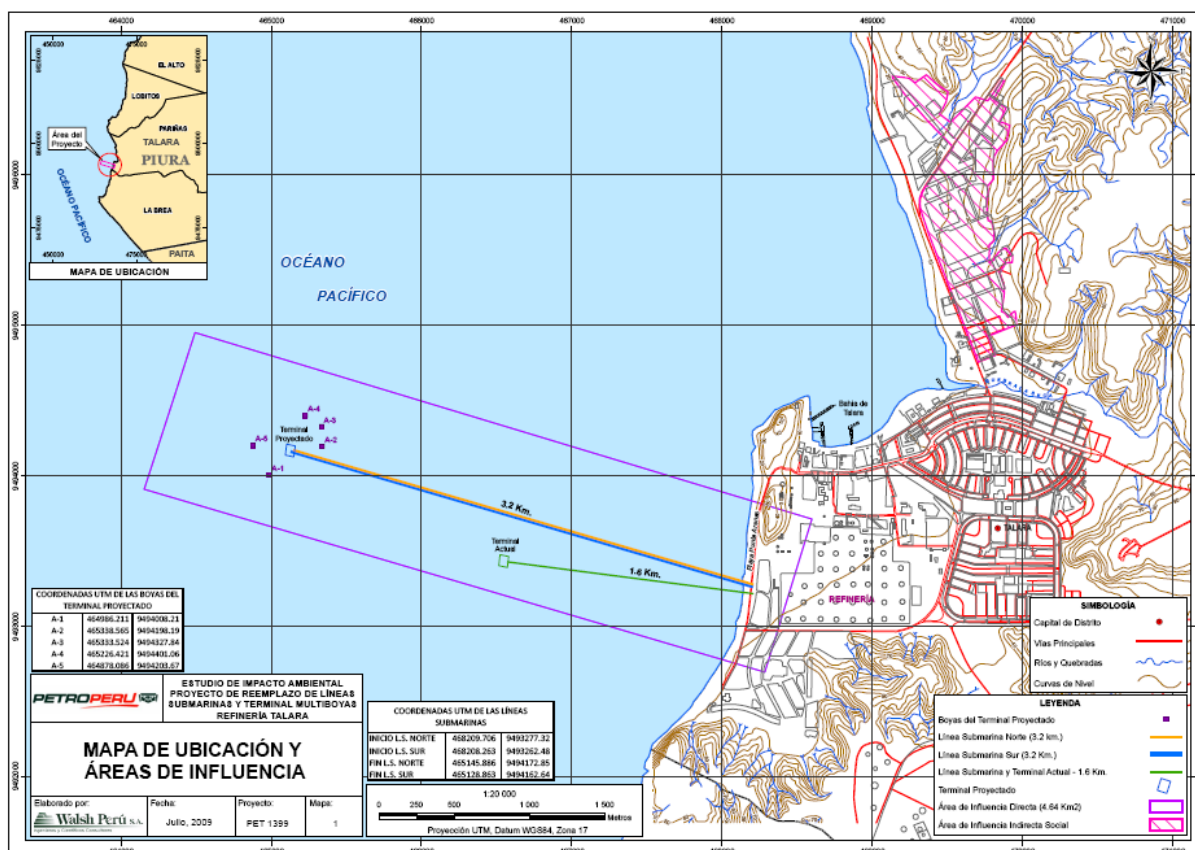
Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM (zona 17)	
Longitud (Oeste)	Latitud (Sur)	Longitud (Este)	Latitud (Sur)
81° 19' 12.14"	04° 34' 23.69"	464 500	9 494 500
81° 17' 02.36"	04° 35' 45.17"	468 500	9 492 000

Figura 01 Área de Estudio. Playa Punta Arenas.



Fuente: HIDRONAV, Carta batimétrica N° 1126, e imagen Google Earth

Figura 02 Mapa de ubicación y área de influencia



Fuente: PETROPERU

2.2 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

Punta Arenas, se caracteriza por tener un clima cálido, seco y desértico, con temperatura del mar media 18.9°C y salinidad media de 34.97UPS. Ver Anexo A.

Dicha información se utilizará para evaluar los cambios extremos producidos en el mar, los cuales se verán influenciados por la descarga de efluentes, los cuales al contacto con el agua de mar, serán desplazados en gran parte en la misma dirección de las corrientes marinas.

3.0 OBJETIVOS

- Modelar la dispersión de derrame de petróleo en la playa Punta Arenas mediante aplicación de modelos numéricos.
- Determinar áreas de impacto por efectos de derrame accidental de crudo y petróleo en el área de estudio.

4.0 DATOS EMPLEADOS PARA LA MODELACIÓN

Luego de haber realizado el análisis de los datos hidro-oceanográficos, presentados en el anexo B, realizaremos un modelo conceptual del patrón de la dinámica marina que se presenta en la playa Punta Arenas, como se muestra a continuación:

- La playa Punta Arenas presenta una orientación de costa en la dirección norte-sur, así mismo las isóbatas de 5 y 10 m presenta una configuración casi paralela al perfil costero. La zona de rompiente de olas se encuentra aproximadamente a 180m de costa, mostrando características de una playa de pendiente suave.

Según la configuración de la playa y la orientación de la línea de costa, se puede decir que la playa Punta Arenas podría estar expuesta a efectos de olas y corrientes, debido a que no presenta alguna protección natural de sus playas (islas, archipiélagos, entre otros), lo que se puede observar en el anexo B.

- La dirección de los vientos predominantes en la zona de estudio es principalmente del Sur y suroeste como segunda predominancia, con una intensidad media de 5 m/s.
- La marea es del tipo semidiurna, que fluye de norte a sur, con una amplitud promedio de 1.21m, por lo que se debe de considerar en los efectos de dispersión, las corrientes de marea son indispensables en la dinámica local.
- En playa Punta Arenas la dirección de las corrientes en superficie durante marea ascendente es suroeste, mientras que en marea descendente es noroeste.

En subsuperficie, en marea ascendente tiene dirección sur, con variaciones de la dirección hacia costa, mientras que en marea descendente tiene dirección norte y noroeste.

En fondo, la marea oscila en dirección sur y suroeste en marea ascendente y en dirección norte y noroeste en marea descendente.

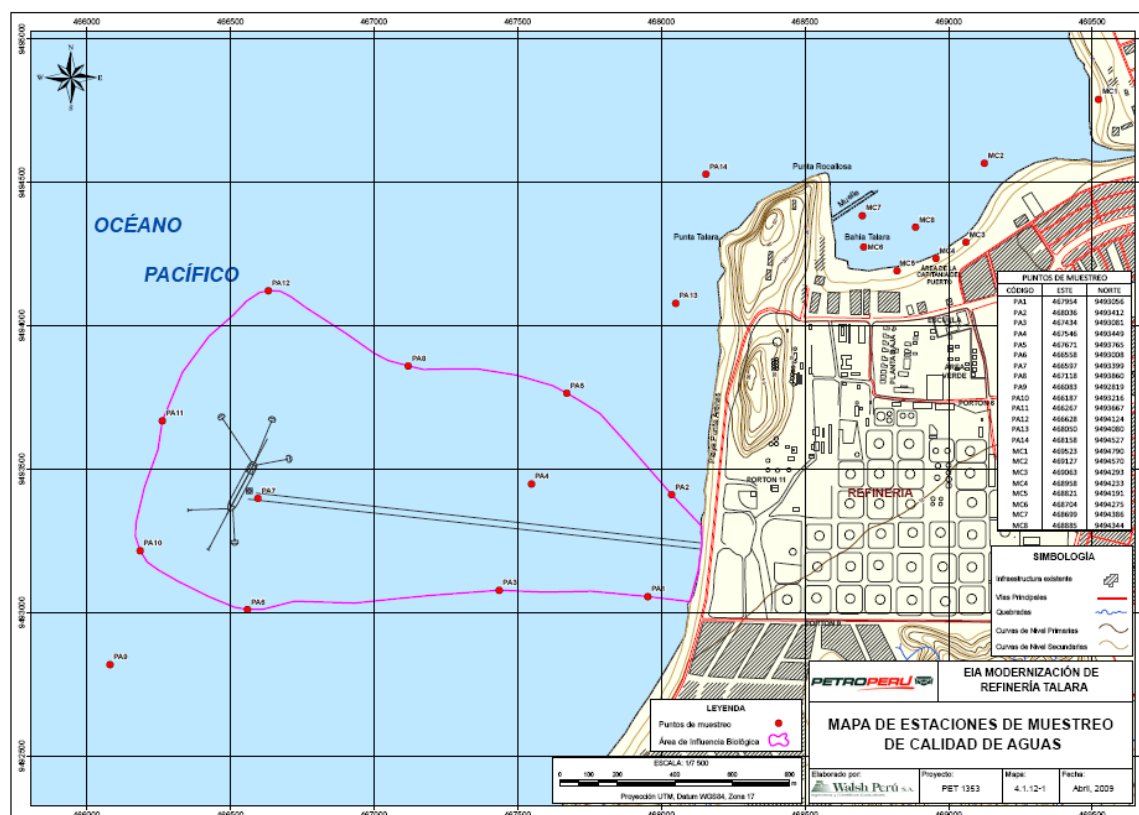
Las velocidades más intensas se observan en superficie y subsuperficie con 24 y 25cm/s respectivamente, mientras que en fondo la intensidad es aproximadamente 10cm/s.

- La Temperatura Superficial del Mar oscila entre 16,5° a 24.0°C en superficie y en fondo, entre 15,0° a 23.0°C.
- La salinidad del mar en superficie como en fondo es de 35.00 UPS, mientras que en mar afuera se observa valores de 35.06UPS en superficie y de 34.20 UPS en fondo.

5.0 RECURSOS BIOLÓGICOS

En la playa Punta Arenas, se observa la presencia de organismos como el Plancton (fitoplancton, zooplancton) y Bentos, los mismos que tienen una área de influencia del recurso biológico tal como se muestra en la figura 03 según los trabajos de campo realizados en abril 2009. La distribución de zooplancton para la playa Punta Arenas se encuentra alejada de las 2 tuberías de efluentes.

Figura 03 Mapa de ubicación del área de influencia biológico



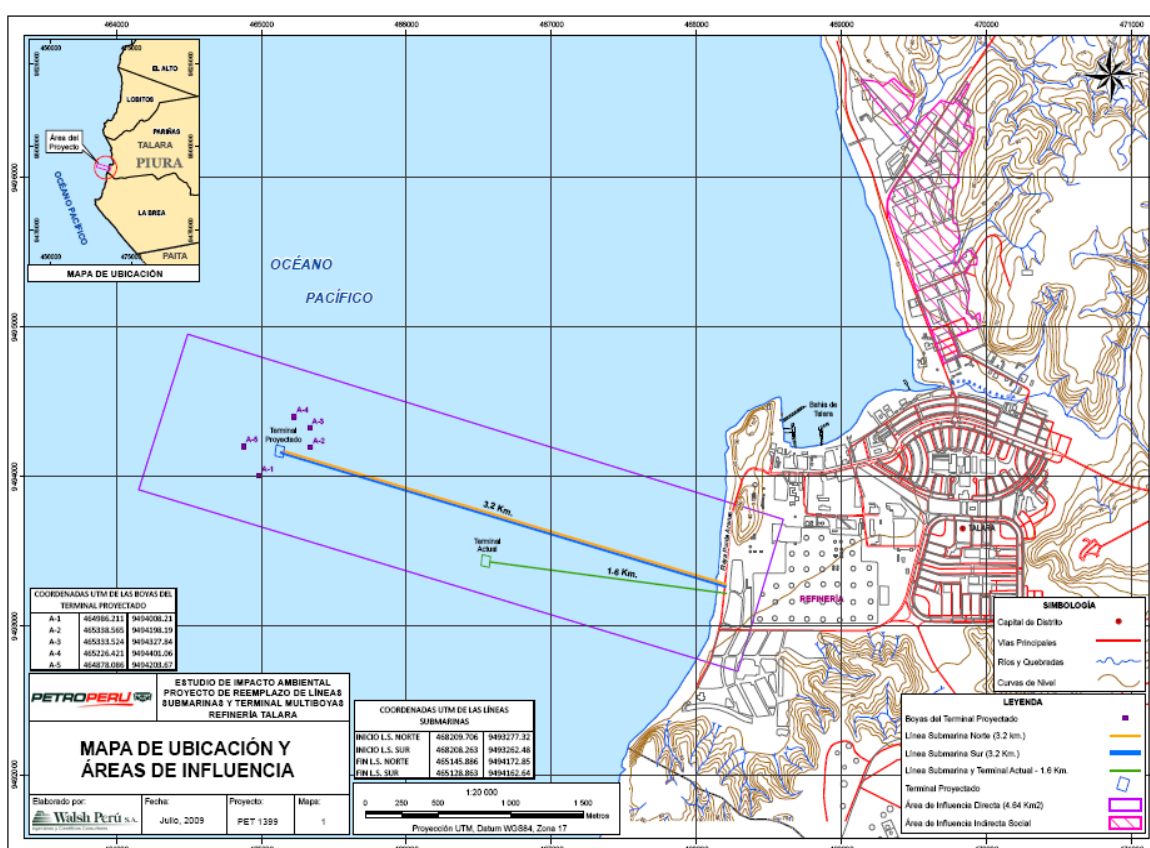
Fuente: PETROPERU

6.0 TRANSPORTE DE PETROLEO

6.1 UBICACIÓN DE LAS TUBERÍAS Y CAUDAL DE DESCARGA

La ubicación y coordenadas de las 2 tuberías submarinas se muestran en la figura 04 y cuadro 02, dichas descargas se ubican a aproximadamente 3,2 km de costa en la playa Punta Áreas. Dichas tuberías se interconectan con las mangueras que se enlazan con los buques para la descarga de petróleo.

Figura 04 Ubicación de las tuberías submarinas



Cuadro 02 Ubicación de terminal de las tuberías submarinas en la playa Punta Arenas en coordenadas UTM y geográficas.

Vertimiento	Coord. Geográfica		Coord. UTM (zona 17)	
	Longitud (Este)	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Latitud (Sur)
Inicio L.S Norte	468 209,71	9°493,277.32	81°17'11.76"	4°35' 03.56"
Final L.S Norte	465 145,89	9°494,172.85	81°18' 51.19"	4°34' 34.36"
Inicio L.S Sur	468 208,263	9°493,262.483	81°17'11.81"	4°35' 04.05"
Final L.S Sur	465 128,863	9°494,162.635	81°18'51.74"	4°34' 34.69"

Los vertimientos a evaluarse son el Petróleo crudo y combustible, las que han sido denominadas P y C respectivamente.

Las dos descargas producto de una ruptura, presentan un flujo de régimen continuo, las mismas que son emitidas en la playa Punta Arenas. Las tuberías a su vez, presentan un alto de 1.0m respecto del fondo. Algunas características del flujo se puede observar en el Cuadro 03.

Cuadro 03 Características del posible flujo derramado por futura de la tubería

Derrame	Régimen	Flujo	Densidad	Altura tubería respecto al fondo
		BB/hr	Kg/m3	(m)
Petróleo crudo (P)	Continuo	10	940	1.0
Combustible industrial (C)	Continuo	10	960	1.0

Fuente: PETROPERU

Considerando algunos puntos de posible fuga de material debido a una ruptura, se evaluarán los puntos más críticos, los cuales son:

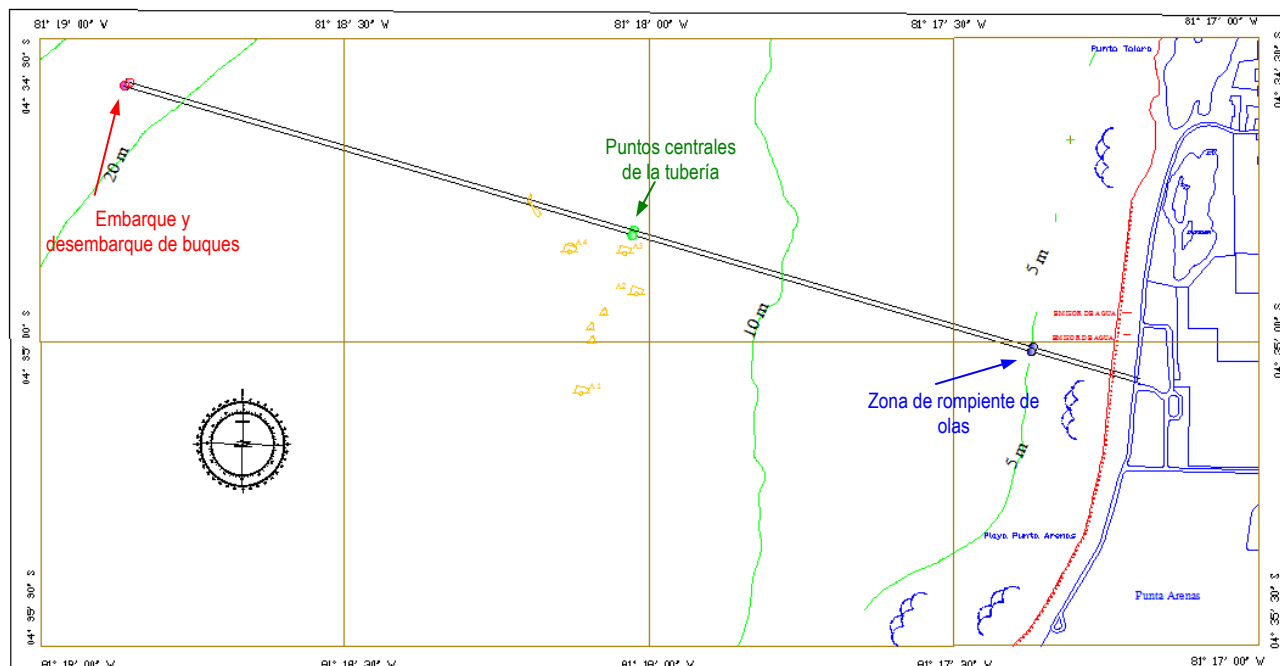
- En el punto de embarque/desembarque de los buques (fin de la tubería)
- En el centro de la tubería
- En la zona de rompiente de olas.

Las ubicaciones de estas rupturas se pueden apreciar en el cuadro 04 y figura 05.

Cuadro 04 Características del posible flujo derramado por futura de la tubería

Derrame por ruptura de tubería	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
	(Este)	(Norte)	(Oeste)	(Sur)
Punto de embarque/desembarque Norte	465,146	9'494,173	81°18' 51.19"	4°34' 34.36"
Punto de embarque/desembarque Sur	465,129	9'494,163	81°18'51.74"	4°34' 34.69"
Centro de la tubería Norte	466,676	9'493,726	81°18' 01.53"	4°34' 48.93"
Centro de la tubería Sur	466,672	9'493,712	81°18' 01.66"	4°34' 49.38"
Zona de rompiente tubería Norte	467,888	9'493,371	81° 17' 22.20"	4° 35' 00.51"
Zona de rompiente tubería Sur	467,881	9'493,359	81° 17' 22.43"	4° 35' 00-90"

Figura 05 Ubicación de los puntos de ruptura de las tuberías



7.0 MODELACION NUMÉRICA

La modelación numérica tiene como objetivo representar las características de la zona de estudios y permite el estudio de las condiciones hipotéticas mediante la definición de escenarios que permitirán un mejor entendimiento del proceso a estudiar.

En esta fase se determinan las condiciones hidrodinámicas de la zona de estudio empleando la modelación numérica, estableciendo patrones de circulación y considerando las principales forzantes de la dinámica marina. De esta manera se consideran las características de los vientos locales y las mareas características de la zona de estudios que ha sido descrito en el anexo A.

Modelo empleado

Se empleó el modelo numérico “Princeton Ocean Model” (POM), el cual es un modelo tridimensional de circulación oceánica basado en la integración numérica de las ecuaciones primitivas que rigen la dinámica de la circulación oceánica. El modelo fue desarrollado por Alan Blumberg y George L. Mellor en la década de los 70 en el programa de ciencias atmosféricas del Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) de los Estados Unidos de Norteamérica.

El código fuente del modelo (programa principal y subrutinas) está escrito en lenguaje de programación FORTRAN 77 y se puede trabajar en varios sistemas operativos como UNIX, LINUX. El modelo es de dominio público y su código fuente se encuentra disponible en la siguiente dirección web:

<http://www.aos.princeton.edu.WWWPUBLIC/htdocs.pom>

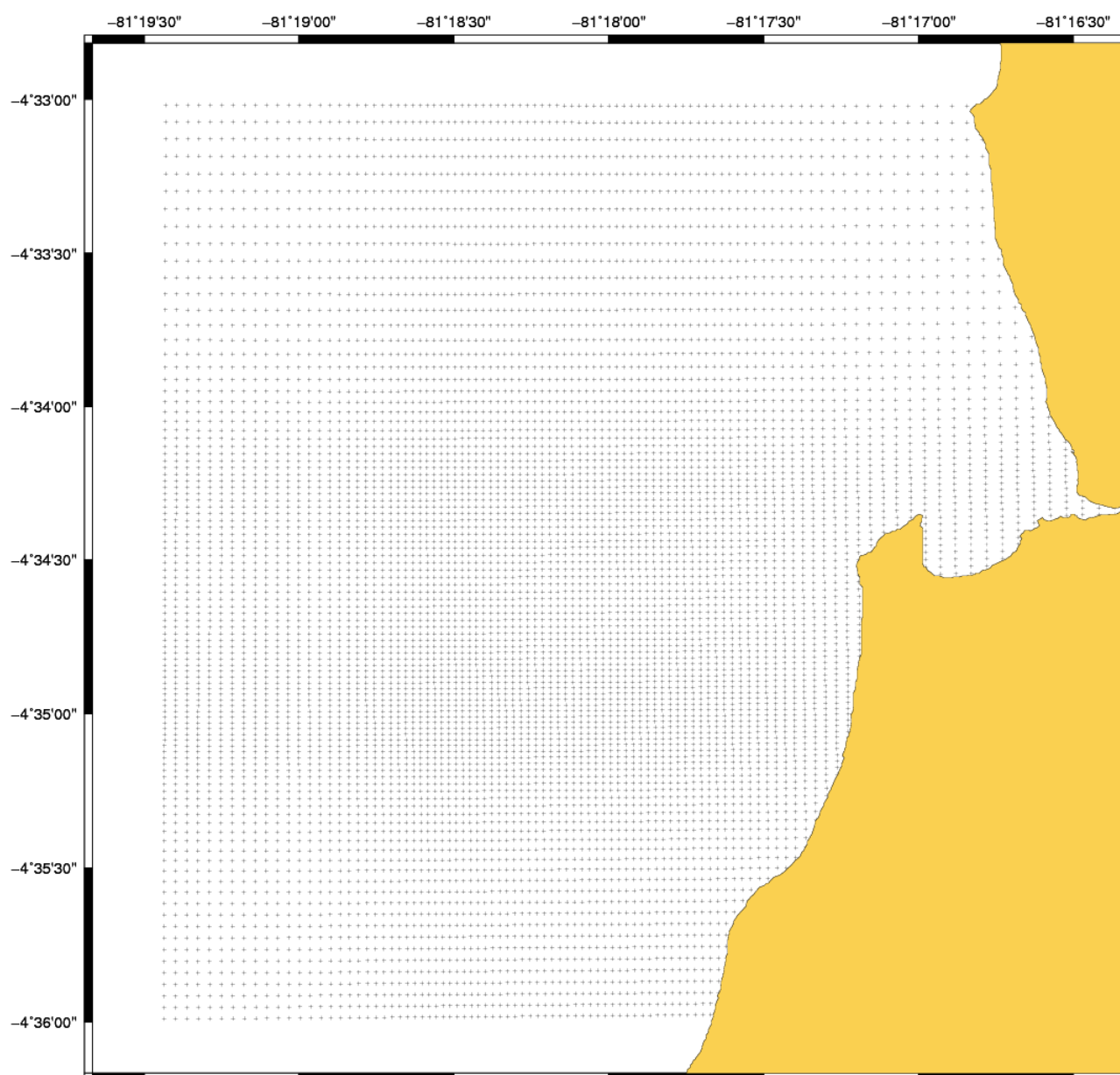
Mayores detalles de las características del modelo, son presentados en el anexo B.

7.1 MODELACIÓN DE CORRIENTES

Para la simulación numérica de corrientes se ha empleado una grilla de resolución variable (figura 06) con 100 x 100 puntos de grilla y 6 niveles verticales (niveles sigma). Se ha considerado mayor resolución de la grilla en las zonas cercanas a los posibles puntos de derrame. Sobre esta grilla, fueron interpolados los datos de batimetría, tal como se observa en la figura 07, donde se han definido dos puntos de control para el monitoreo de la variabilidad de las corrientes en la zona de estudios.

El modelo comienza a ejecutarse con un inicio de modelación del tipo “cold Start”, donde todas las variables que influyen en la circulación son consideradas nulas en el tiempo cero de simulación, es decir, se parte de un estado de reposo. A partir del inicio de las simulaciones, existe un tiempo de “calentamiento” del modelo, en el cual los resultados del modelo no son tomados en consideración. En este sentido el tiempo de calentamiento que tomo el modelo para este caso fue de 2 días aproximadamente

Figura 06 Grilla de cálculo para la modelación de corrientes y dispersión



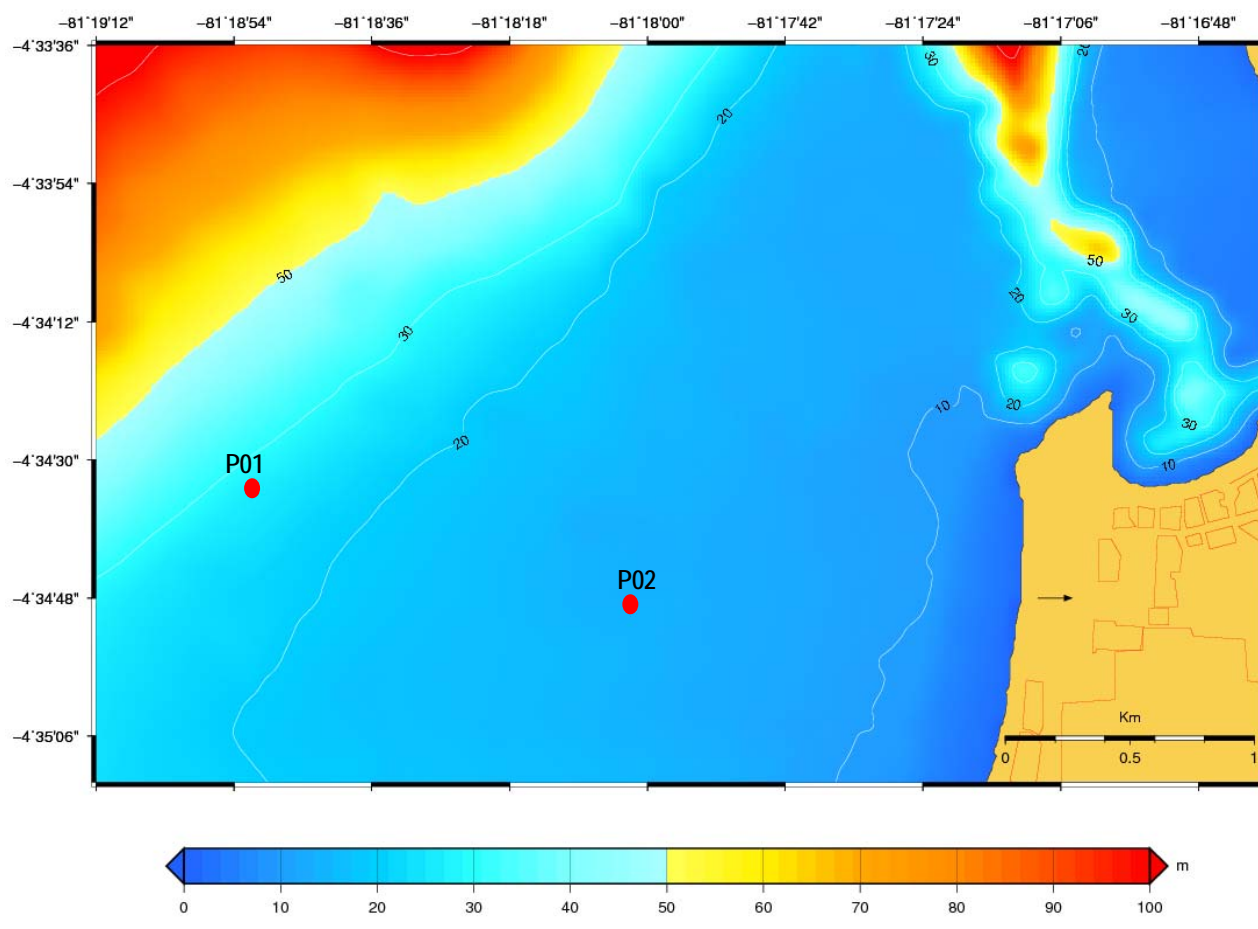
Las condiciones de simulación fueron las siguientes:

Cuadro 05 Parámetros de simulación

Parámetro	Valor
Paso de tiempo	100 segundos
Δx máximo	100 metros
Δx mínimo	40 metros
Δy máximo	106 metros
Δy mínimo	34 metros
Puntos de grilla en X	100
Puntos de grilla en Y	100
Niveles verticales	6
Tiempo total de simulación	1 día
Inicio de simulación	Cold Start

Para la determinar la variación temporal de corrientes, se han definido 2 puntos de control, los cuales están distribuidos en el área marítima de la zona de estudio, cuya ubicación se, muestra en la figura 07 y cuadro 06

Figura 07 Batimetría interpolada a la grilla de cálculo y ubicación de puntos de control



Cuadro 06 Coordenadas de los puntos de control para modelación de corrientes

Punto	Longitud (Oeste)	Latitud (Sur)
P01	81°18'54"	4°34'30"
P02	81°18'00"	4°34'48"

Condiciones de frontera

Habiendo caracterizado las condiciones oceanográficas y meteorológicas de la zona (Anexo A y B), se describen las condiciones de borde empleadas en la modelación de corrientes.

Se definieron tres fronteras abiertas en los límites Norte, Oeste y Sur de la grilla de cálculo que corresponden a zonas de mar y una frontera cerrada que corresponde a la línea de costa en el límite Este de la grilla de cálculo.

De esta manera las condiciones de frontera se especifican a continuación:

- Frontera norte:

En esta frontera, se fuerza el modelo caracterizando una onda de marea que es representada de la siguiente manera:

$$\eta = h_0 + \sum_{r=1}^k h_r \cos(w_r t - \alpha_r)$$

Donde:

h_r : amplitud de la componente armónica de marea

w_r : Frecuencia de la componente armónica de marea

α_r : Fase de cada componente armónica de marea

h_0 : nivel del mar, se consideró un valor del nivel del mar de 0.66 metros

- Frontera Sur:

El modelo es forzado por una condición de viento con dirección sureste (paralelo al perfil costero) y con una velocidad promedio de 12 nudos y una dirección de viento resultante de 157 °, tal como fue mostrado en el anexo B.

Adicionalmente, se consideró que todo el dominio de simulación se presenta esta condición de viento.

- Frontera Oeste:

En esta frontera se considera un gradiente de velocidad nula en la dirección normal a la

costa ($\frac{\partial U}{\partial x} = 0$).

- Frontera Este:

Debido a que en esta frontera se encuentra la línea de costa, se empleó la condición de no deslizamiento, de esta manera las componentes de la velocidad son cero en esta frontera.

Consideraciones generales para la modelación de corrientes

Se determinará los patrones de circulación en la zona de estudios, considerando las principales forzantes de la dinámica marina, las características de los vientos locales y las mareas características de la zona de estudios que han sido descritos en el anexo B.

Analizando las condiciones de los agentes generadores de corrientes (viento y marea), se observa lo siguiente:

- El viento no presenta una variabilidad significativa con respecto a las estaciones de verano e invierno, ya que para ambas estaciones se presentaron direcciones predominantes del sur y sureste, como se observa en las figuras B.3 y B.4 del anexo B. Del mismo modo las variaciones en la intensidad del viento no muestra variaciones significantes.
- Respecto a la marea, la amplitud está en función de las componentes armónicas de la marea, los cuales no varían durante la época de verano e invierno, desde el año 1942, abarcando la variación estacional e interanual de la marea.

7.2 MODELO DE DISPERSIÓN

Una vez determinado el patrón de circulación en la zona de estudio, se procedió a modelar la condición hipotética de un probable derrame de petróleo en el área de estudio, donde se van a considerar tres puntos sobre la tubería los cuales se describen a continuación:

- Punto 01: En el punto de desembarque de los buques (fin de la tubería), se ha considerado que el punto de ruptura se ubica en la superficie del mar.
- Punto 02: En la parte central de la extensión de la tubería, con una profundidad aproximada de 15 metros.
- Punto 03: Cerca a la zona de rompientes, donde se presenta una profundidad de 5 metros.

Las ubicaciones de estos puntos, fueron mostrados en el Cuadro 4 y figura 5.

Coeficientes de difusión

En la modelación que se ha llevado a cabo, se han considerado coeficientes de difusión horizontal y vertical, para lo cual existen varias formas de aproximar cada uno de ellos, los cuales se explican a continuación:

• Coeficientes de difusión horizontal

La introducción del concepto de difusividad turbulenta está basada en la hipótesis de que la mezcla a pequeña escala debida a las fluctuaciones turbulentas de la velocidad es análoga, aunque mucho más intensa, a la difusión vertical.

De acuerdo a la formulación propuesta por Okubo (1971), donde se relaciona el coeficiente de difusión vertical con la longitud de escala de la malla utilizada. De esta manera, el coeficiente de difusión horizontal se puede escribir como:

$$K_h = 0.01 l^{1.15} \quad 10^3 < l < 10^8 \text{ cm}$$

Donde l es la longitud de escala de la malla.

- Coeficientes de difusión vertical

Una vez que el petróleo se introduce en la columna de agua, este se encuentra en movimiento dado por su propia flotabilidad que tenderá a llevar a las partículas de petróleo hacia la superficie y un movimiento aleatorio debido a la turbulencia en la vertical.

Para el cálculo del coeficiente de difusión vertical, se empleó la siguiente relación:

$$K_z = 4 \times 10^{-3} \bar{u} \cdot h$$

Donde h, representa la altura de la columna de agua.

Datos empleados

Para la modelación del derrame de petróleo, se han empleado la siguiente información:

Cuadro 07 Datos empleados para la modelación de derrame

Descripción	Valor
Caudal	10 Barriles/hora
Caudal máximo	15150 Barriles/hora
Densidad	940 kg/m ³
Volumen derramado	10 Barriles

Fuente: Petro Peru

Como se puede observar en el cuadro 06, el caudal medio es 10 barriles por hora, presentando un volumen total derramado de 10 barriles, por lo que el tiempo total que dura el proceso de derrame de petróleo es aproximadamente 1 hora, condición que será empleada para la modelación de la dispersión de petróleo.

Consideraciones adicionales:

- De acuerdo a las características del modelo, se ha considerado al petróleo como una sustancia pasiva cuando entra en contacto con el agua de mar.
- Se ha realizado una aproximación lineal de la variación en función del tiempo del volumen de petróleo derramado, teniendo en consideración que al inicio de la simulación el volumen derramado de 10 barriles, de tal manera que la variación del volumen derramado ha formulado de la siguiente manera:

$$V = -V_0(1-t)$$

Donde:

Vo: Volumen inicial derramado
t : Tiempo de modelación

8.0 RESULTADOS

8.1 MODELACION DE CORRIENTES

Los resultados de la modelación numérica de corrientes en marea ascendente y descendente, se muestran en las figuras 08 al 11.

Figura 08 Modelación de corrientes superficiales. Marea descendente

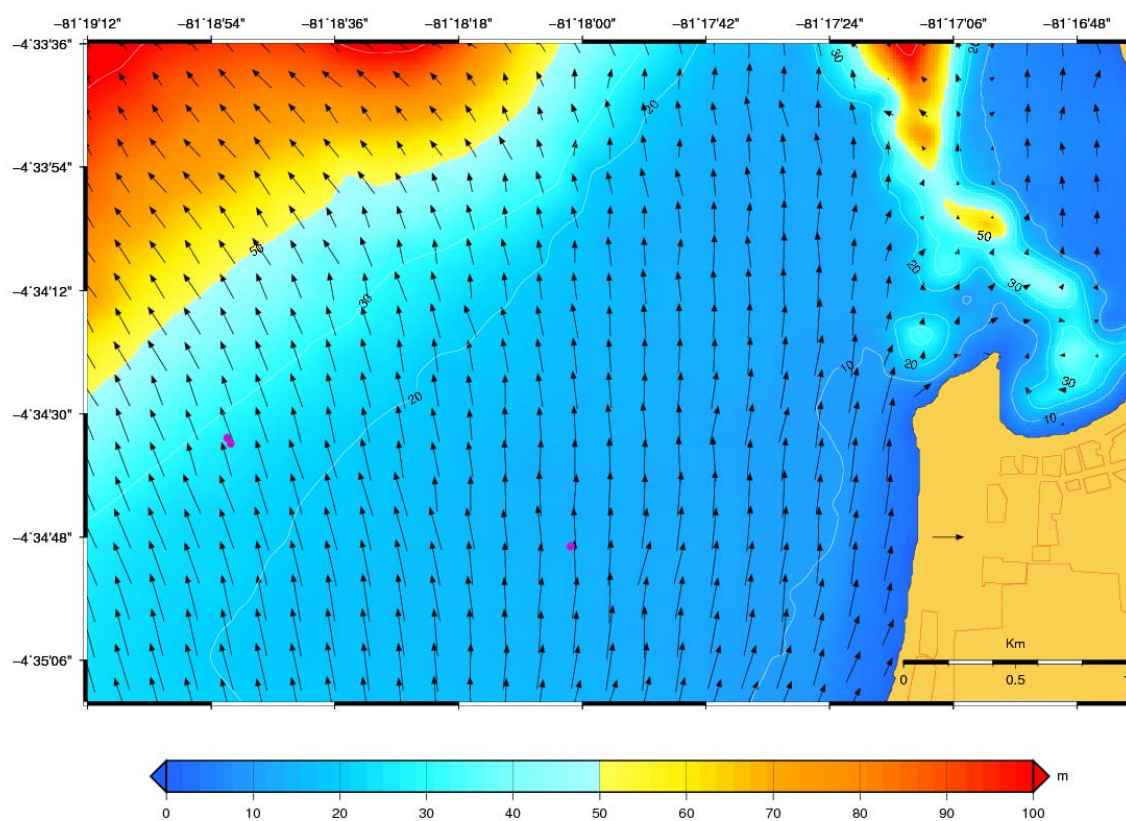


Figura 09 Modelación de corrientes 5 metros. Marea descendente

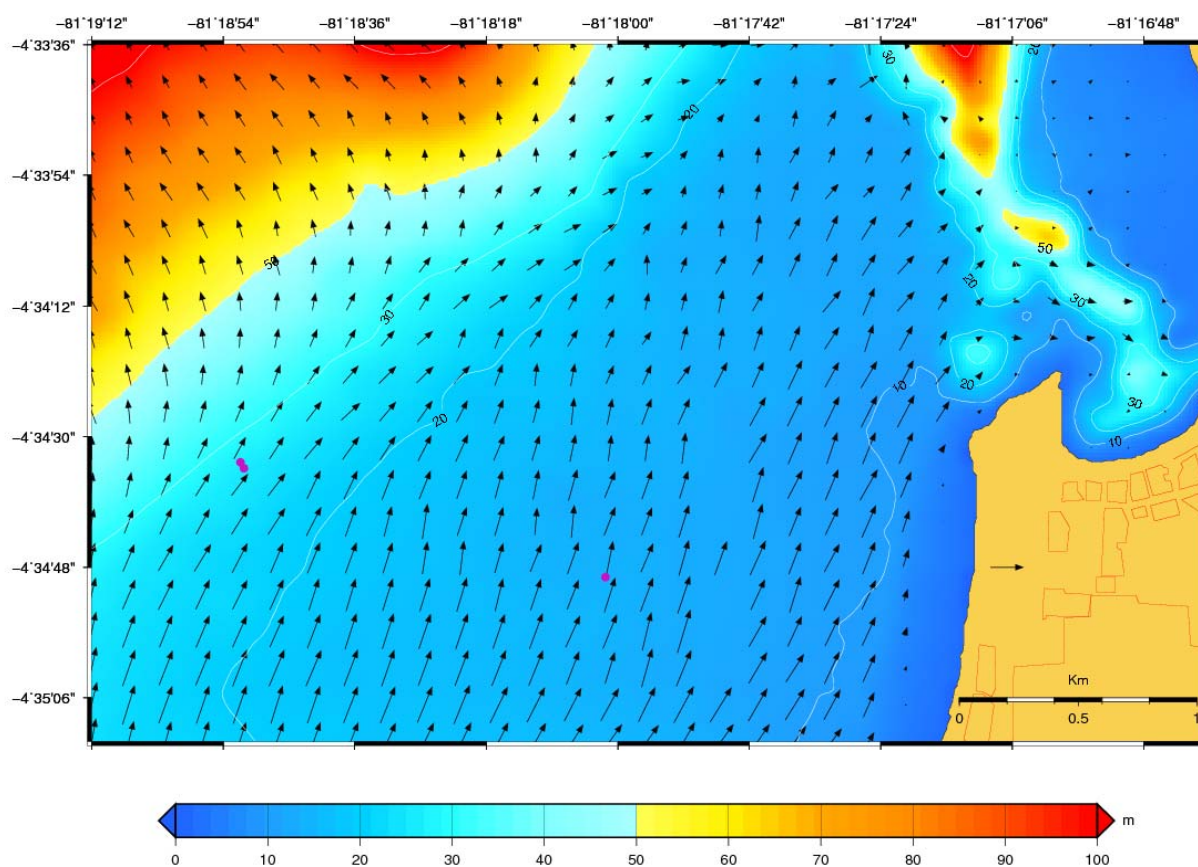


Figura 10 Modelación de corrientes superficiales. Marea ascendente

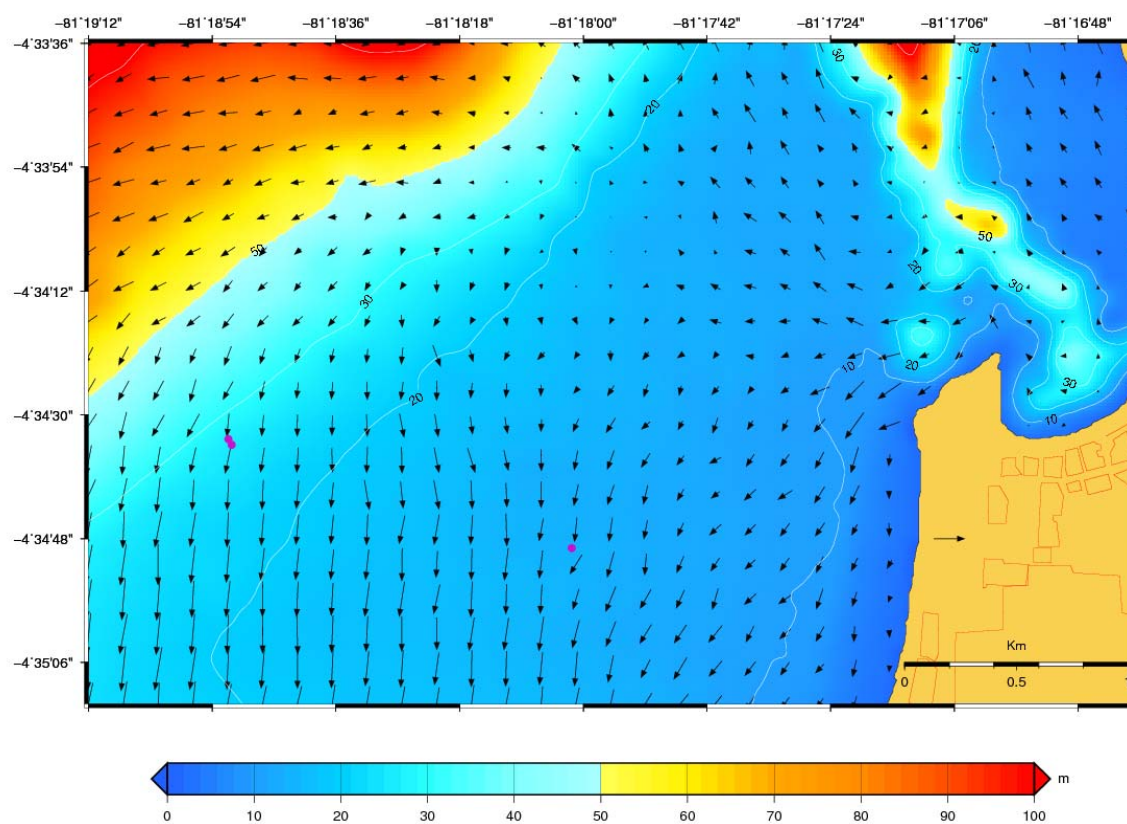


Figura 11 Modelación de corrientes a 5 metros. Marea ascendente

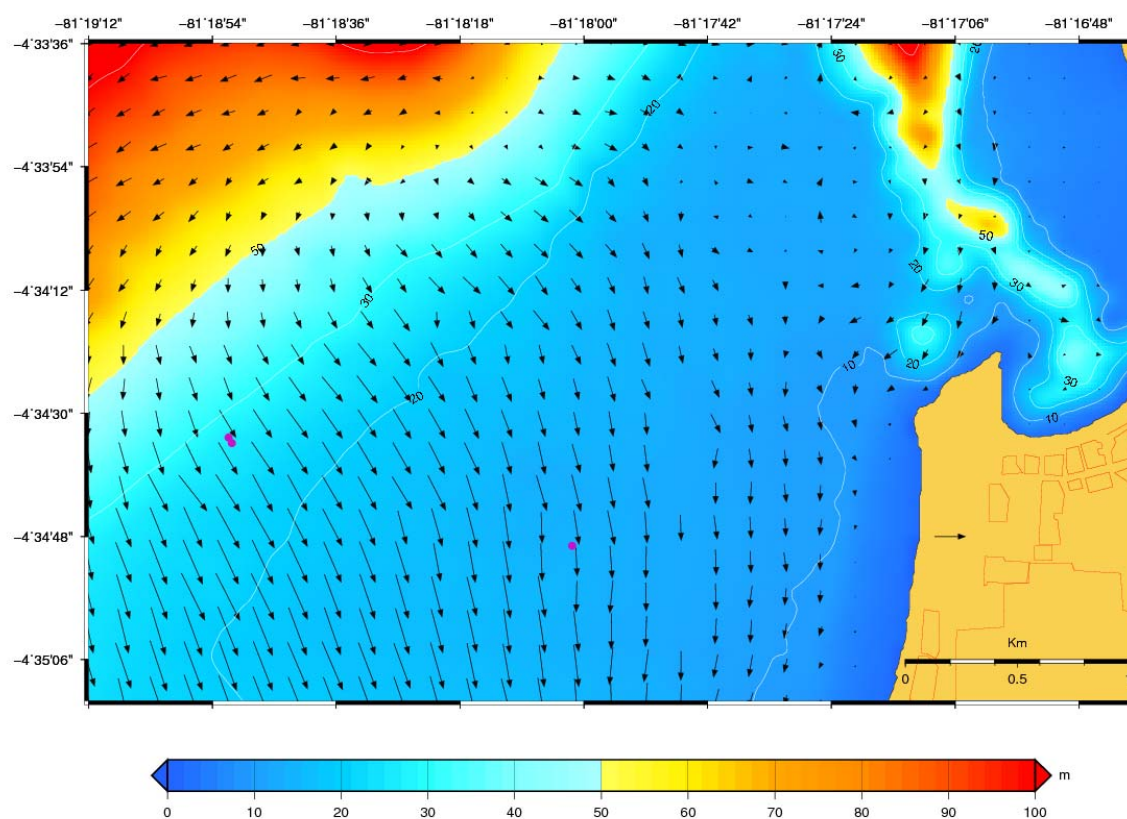
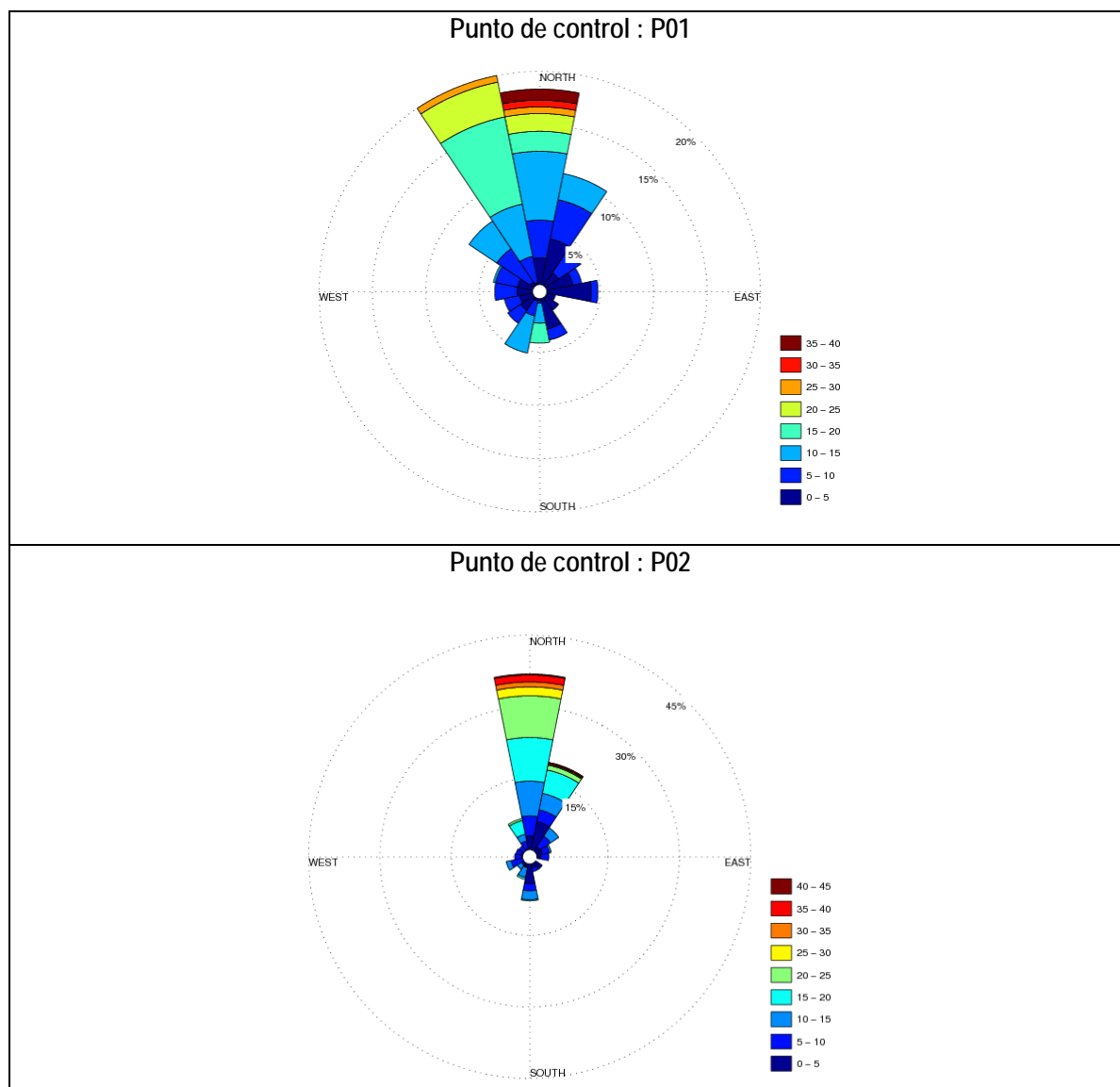


Figura 12 Rosa de dirección de velocidad en los puntos de control.



Cuadro 08 Cuadro estadístico de la variación de velocidad en los puntos de control

Punto	Promedio (cm/s)	Máximo (cm/s)	Mínimo (cm/s)
P01	14,17	41,39	0,72
P02	17,20	50,71	0,10

Los resultados que se muestran en las figuras 09 al 12 muestran lo siguiente:

- Se presenta una marcada variación direccional en las corrientes marinas, principalmente durante los cambios de etapa de marea, ya que como se observa en los resultados de la modelación de corrientes, en marea descendente la dirección predominante es hacia el norte y noroeste, mostrando un patrón ordenado de circulación, mientras que durante los periodos de marea ascendente, el patrón de corrientes cambia, presentándose una dirección de corrientes principalmente hacia el sur y sureste.
- Esta condición descrita anteriormente, se aprecia tanto en los resultados de la modelación de corrientes en superficie como en las subsuperficiales, por lo que se podría definir al movimiento de corrientes como una condición barotrópica. En ambos casos las corrientes se desplazan de manera paralela al perfil de costa frente a la playa de Punta Arenas.
- Con respecto a la magnitud de corrientes, se aprecia que se presentan velocidades significativas que varían en promedio entre los 5 cm/s hasta los 20 cm/s y se observa claramente que las condiciones de circulación frente a la playa de Punta Arenas presenta mejores condiciones para la probable descarga industrial.
- Los resultados de los puntos de control, nos confirman la marcada variabilidad de corrientes que se presentan en la zona de estudios, sin embargo, se puede observar una dirección de corrientes predominante hacia el norte, condición que estaría influenciada por la dirección del viento en la zona de estudios que se desplazan con dirección sur. Los cambios en dirección que se presentan en la figura 12, son asociados al cambio en las etapas de marea. Para ambos puntos de control, se observa una magnitud de velocidad promedio de 14 cm/s para el punto P01, mientras que para el punto P02 el valor promedio de la magnitud de velocidad es de 17 cm/s (ver cuadro 08).

8.2 DERRAME DE PETROLEO

Habiendo representado la circulación en la zona de estudios, se procede a modelar las condiciones de un hipotético derrame accidental de petróleo en los tres puntos de derrame definidos en las secciones anteriores.

Adicionalmente en función a los resultados de la modelación de corrientes obtenidas en la sección anterior, los cuales han mostrado una marcada variabilidad de la en la dirección de las corrientes en las etapas de marea ascendente y descendente, se han definido los siguientes casos a evaluar:

- Caso 01: Derrame durante etapa de marea descendente
Donde se observaron que para esta etapa de marea, se presenta una dirección predominante hacia el norte de las corrientes.
- Caso 02: Derrame durante etapa de marea ascendente
Donde se observaron que para esta etapa de marea, se presenta una inversión en la dirección predominante de las corrientes con respecto al caso anterior

Caso 01: Corrientes en etapa de marea descendente
Punto de derrame de petróleo: Embarque y desembarque

Figura 13 Modelación de derrame de petróleo a los 20 minutos de modelación. Marea Descendente. Zona Embarque desembarque

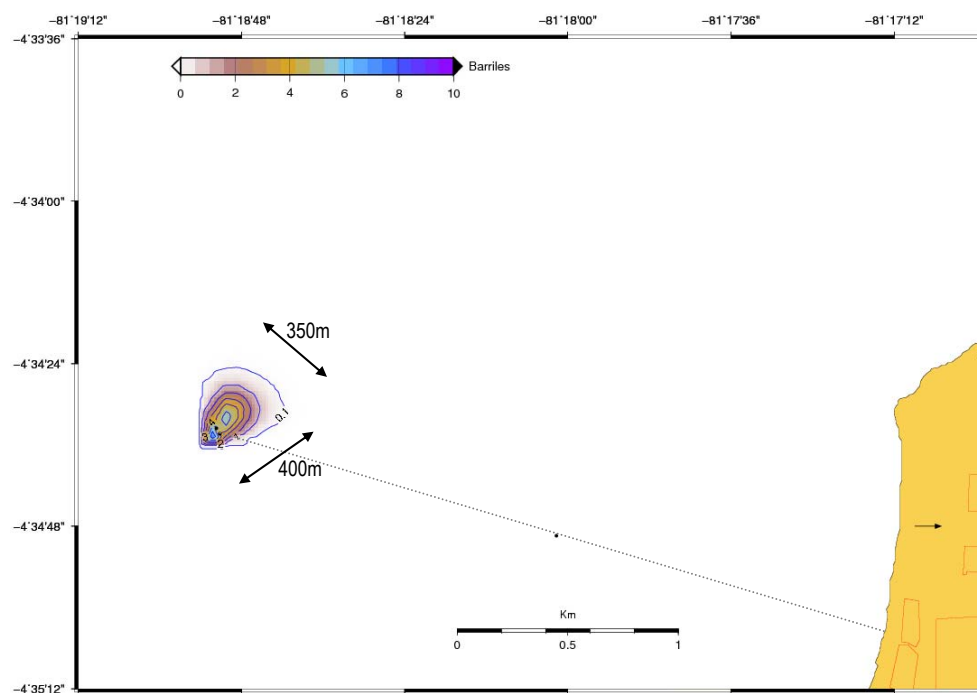


Figura 14 Modelación de derrame de petróleo a los 40 minutos de modelación. Marea Descendente. Zona Embarque desembarque

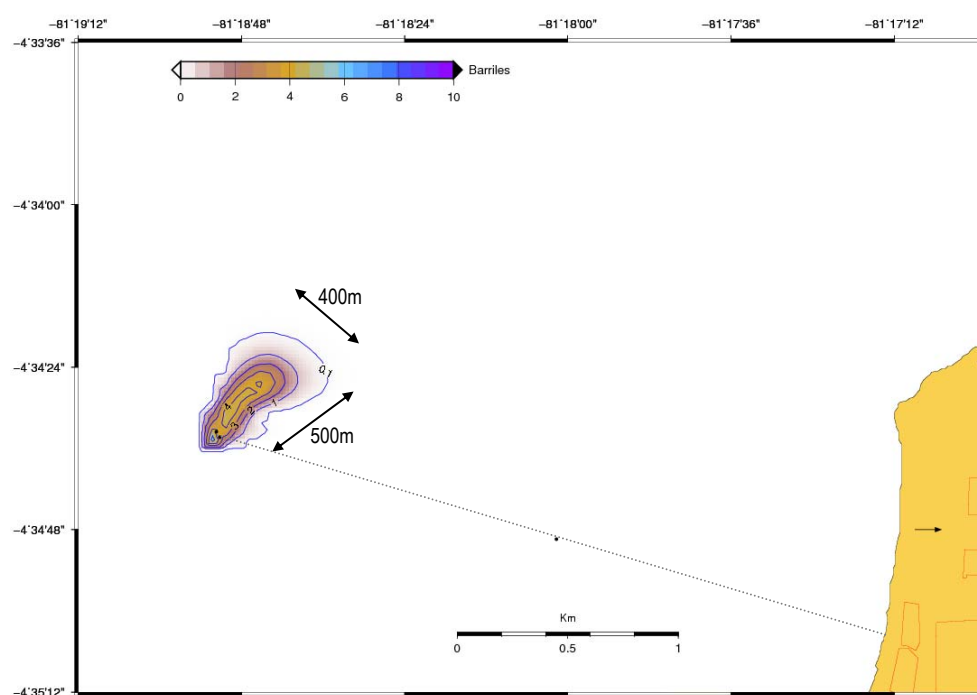


Figura 15 Modelación de derrame de petroleo a los 1 hora de modelación. Marea Descendente. Zona Embarque desembarque

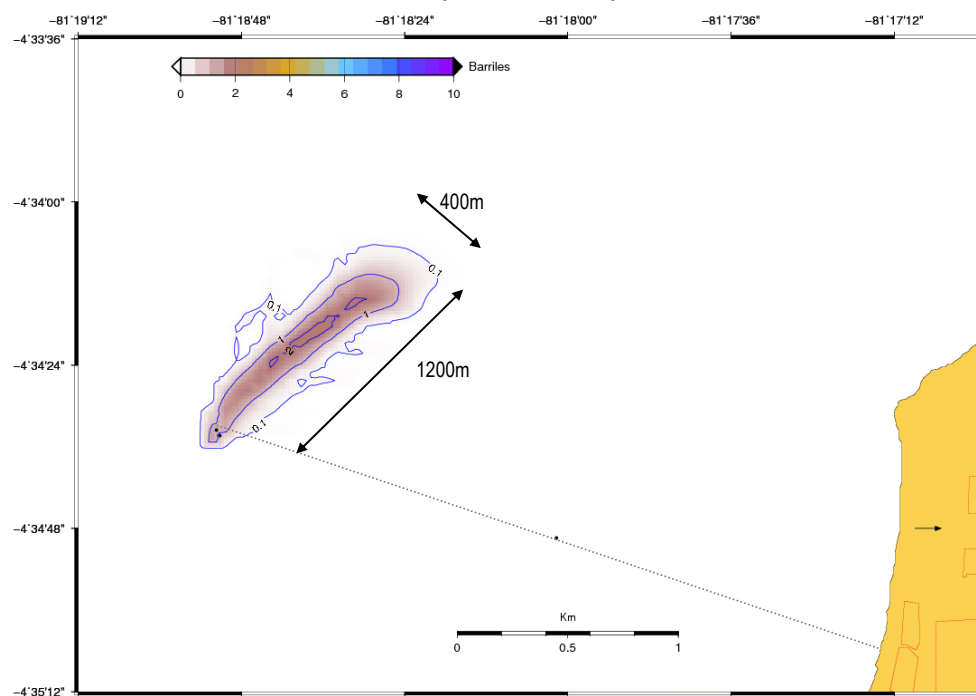
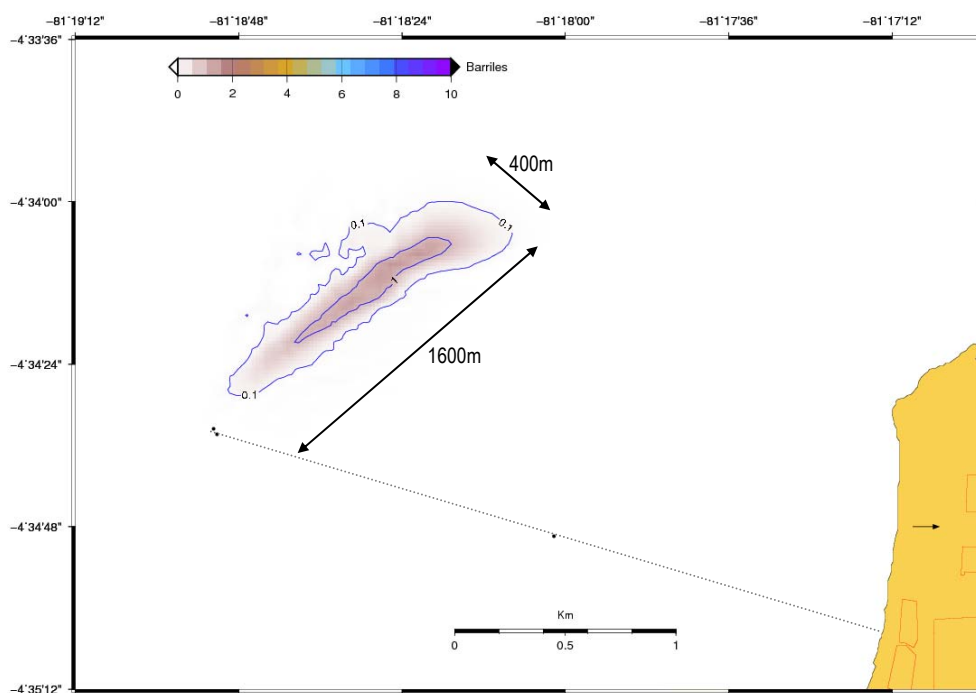


Figura 16 Modelación de derrame de petroleo a 1.5 hora de modelación. Marea Descendente. Zona Embarque desembarque.



Caso 01: Corrientes en etapa de marea descendente
Punto de derrame de petróleo: Centro de la tubería

Figura 17 Modelación de derrame de petróleo a 20 minutos de modelación. Marea Descendente. Centro de la tubería.

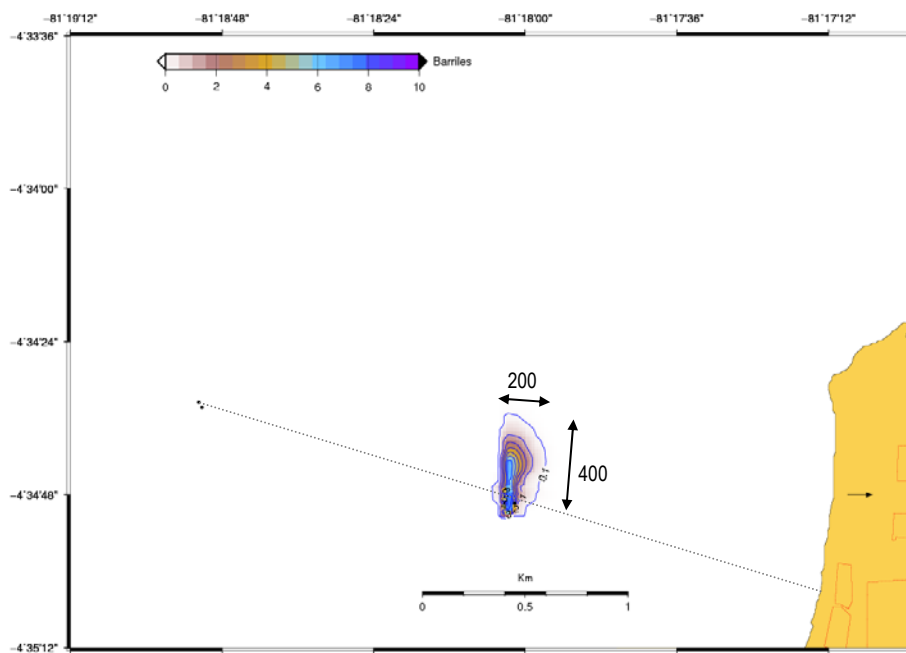


Figura 18 Modelación de derrame de petróleo a 40 minutos de modelación. Marea Descendente. Centro de la tubería

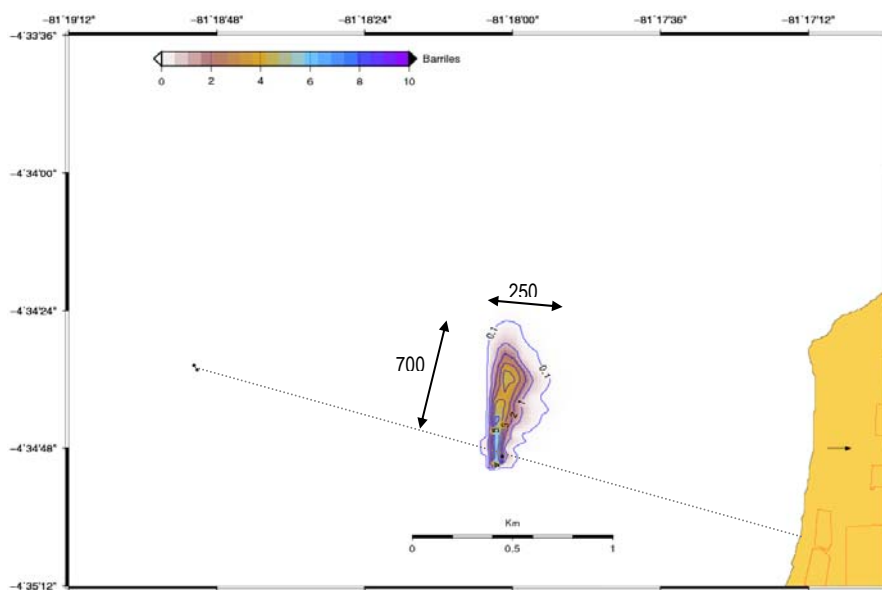


Figura 19 Modelación de derrame de petróleo a 1 hora de modelación. Marea Descendente. Centro de la tubería.

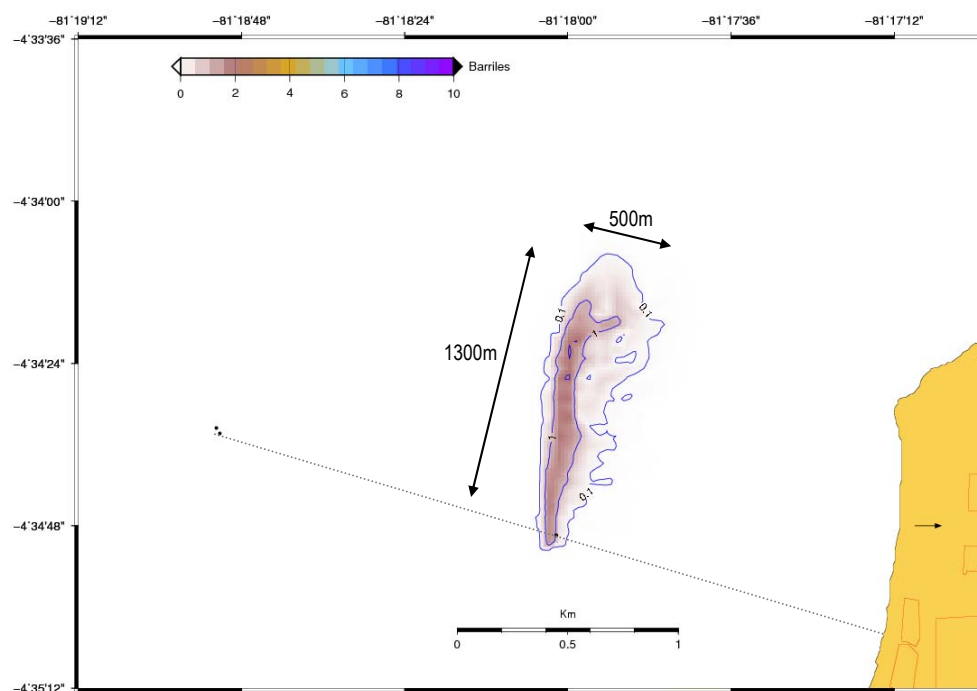
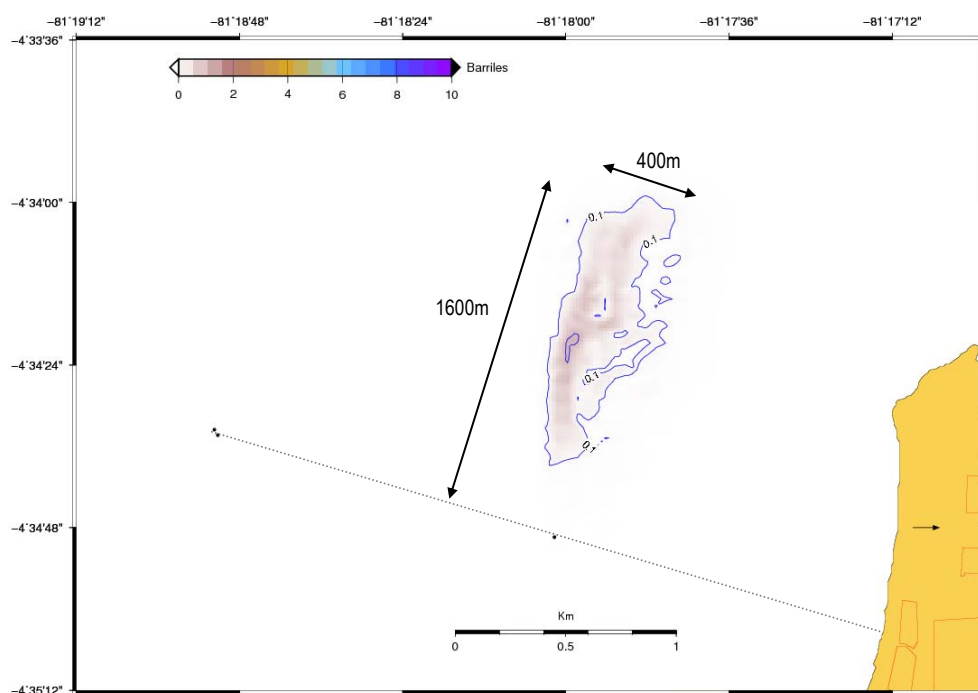


Figura 20 Modelación de derrame de petróleo a 1.5 horas de modelación. Marea Descendente. Centro de la tubería



Caso 01: Corrientes en etapa de marea descendente
Punto de derrame de petróleo: Cercano a la zona de rompiente de ola

Figura 21 Modelación de derrame de petróleo a 20 minutos de modelación. Marea Descendente. Zona de rompiente de olas

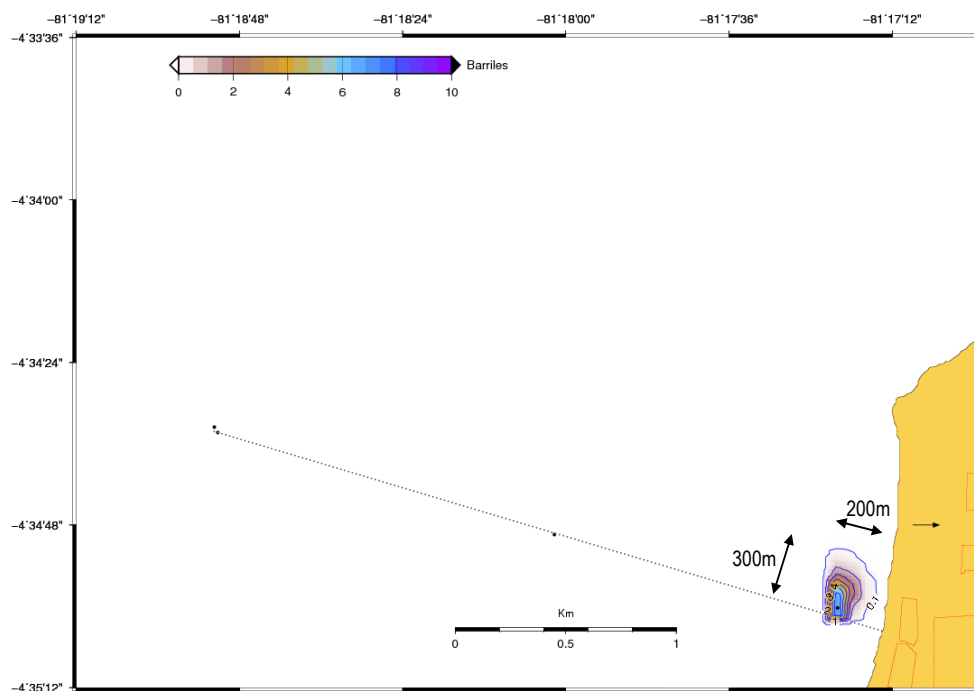


Figura 22 Modelación de derrame de petróleo a 40 minutos de modelación. Marea Descendente. Zona de rompiente de olas

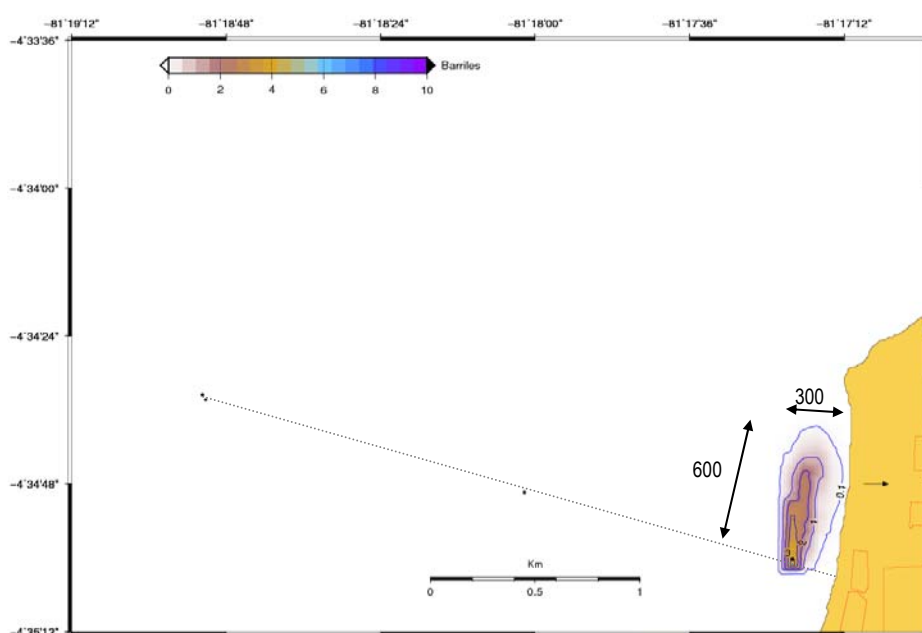


Figura 23 Modelación de derrame de petróleo a 1 hora de modelación. Marea Descendente. Zona de rompiente de olas

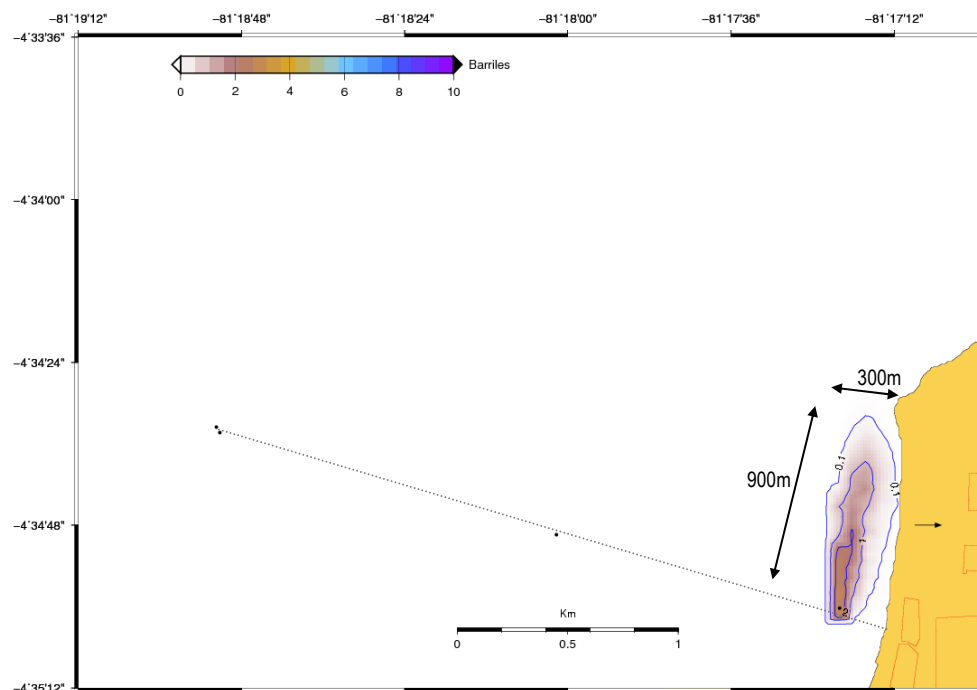
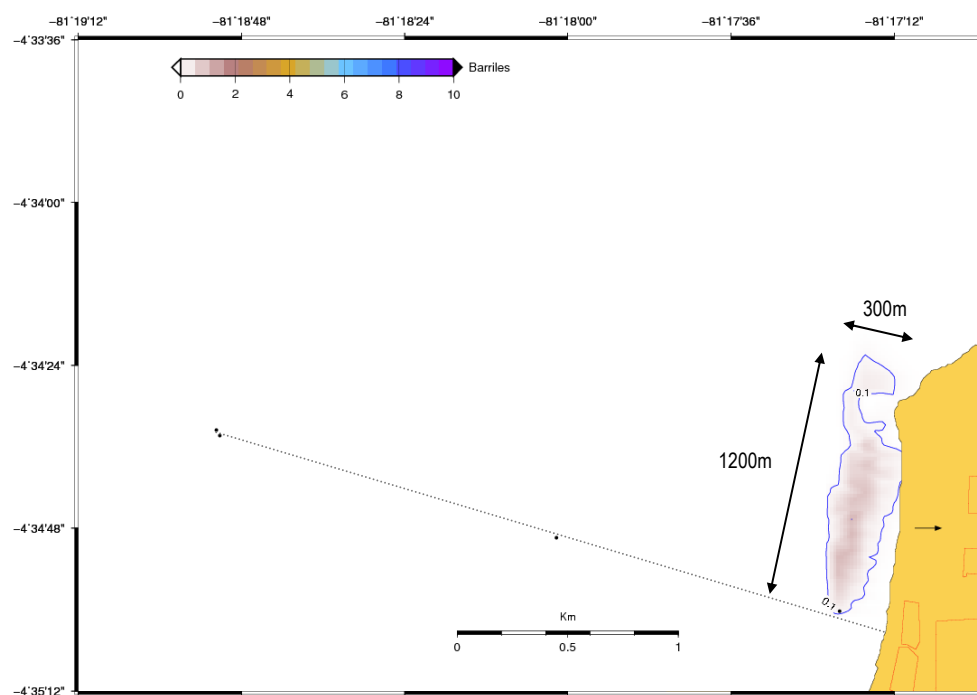


Figura 24 Modelación de derrame de petróleo a 1.5 horas de modelación. Marea Descendente. Zona de rompiente de olas



Caso 02: Corrientes en etapa de marea ascendente
Punto de derrame de petróleo: Embarque y desembarque

Figura 25 Modelación de derrame de petróleo a 20 minutos de modelación. Marea Ascendente. Zona de embarque y desembarque

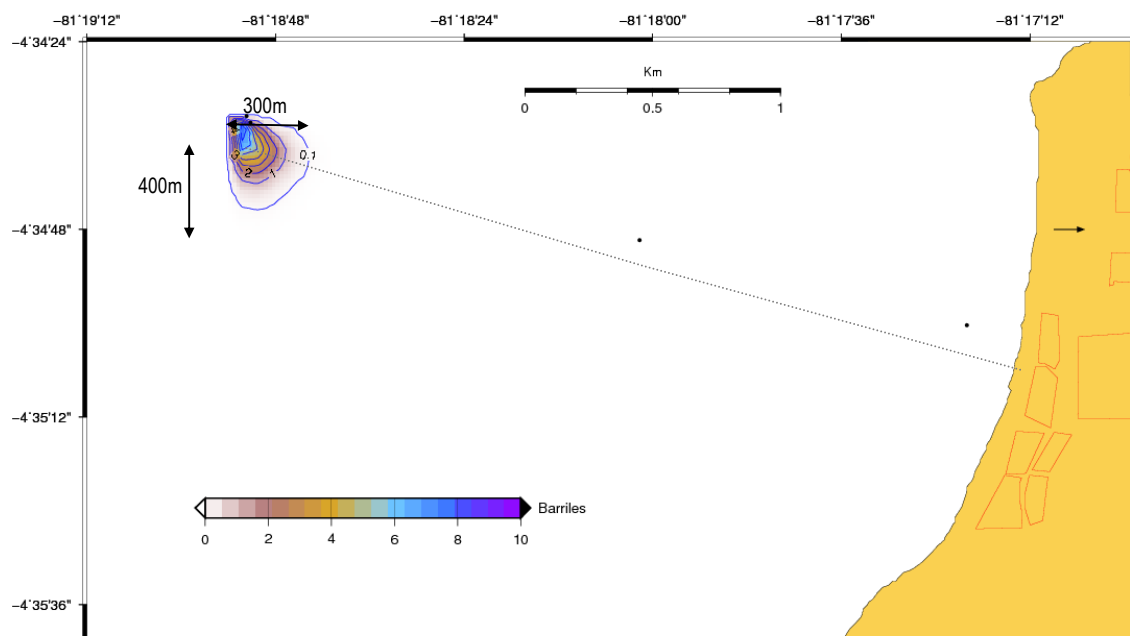


Figura 26 Modelación de derrame de petróleo a 40 minutos de modelación. Marea Ascendente. Zona de embarque y desembarque

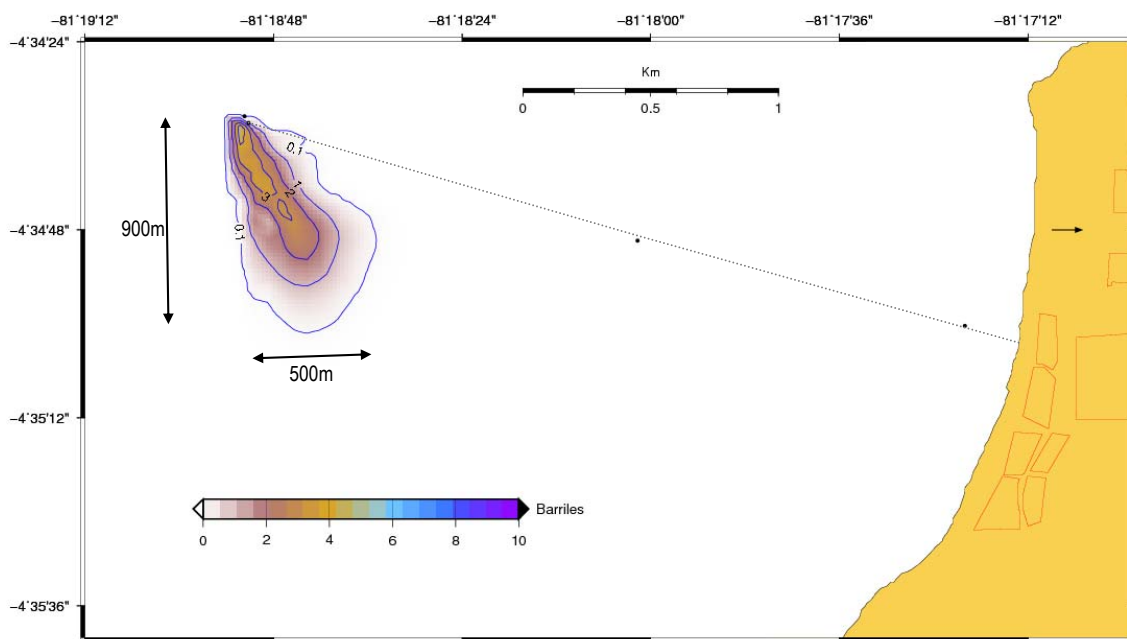


Figura 27 Modelación de derrame de petróleo a 1 hora de modelación. Marea Ascendente. Zona de embarque y desembarque

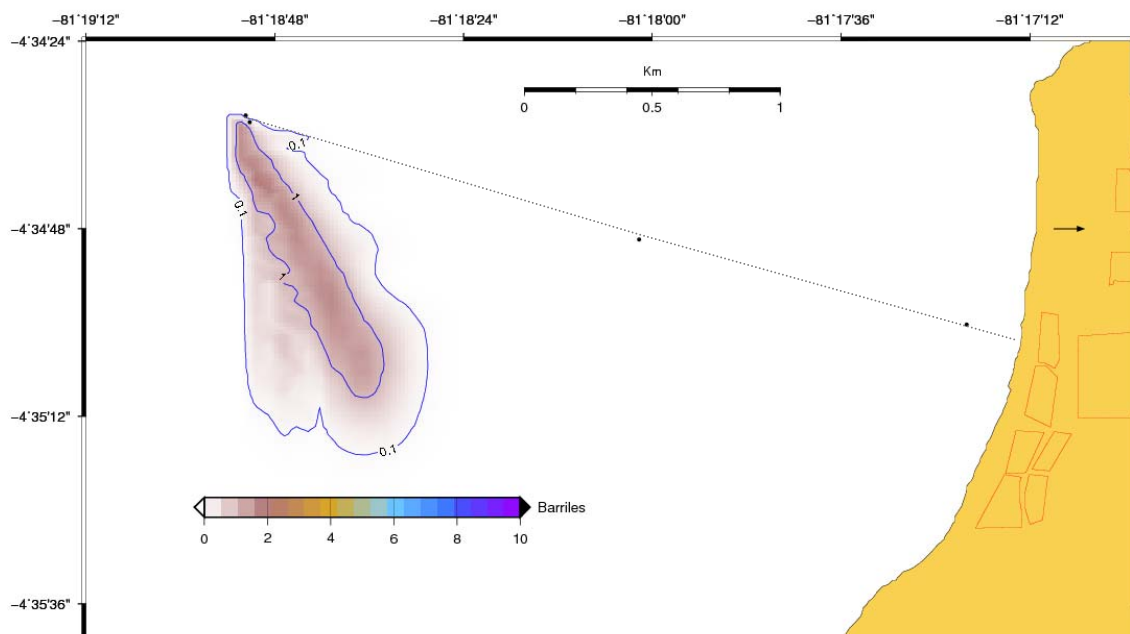
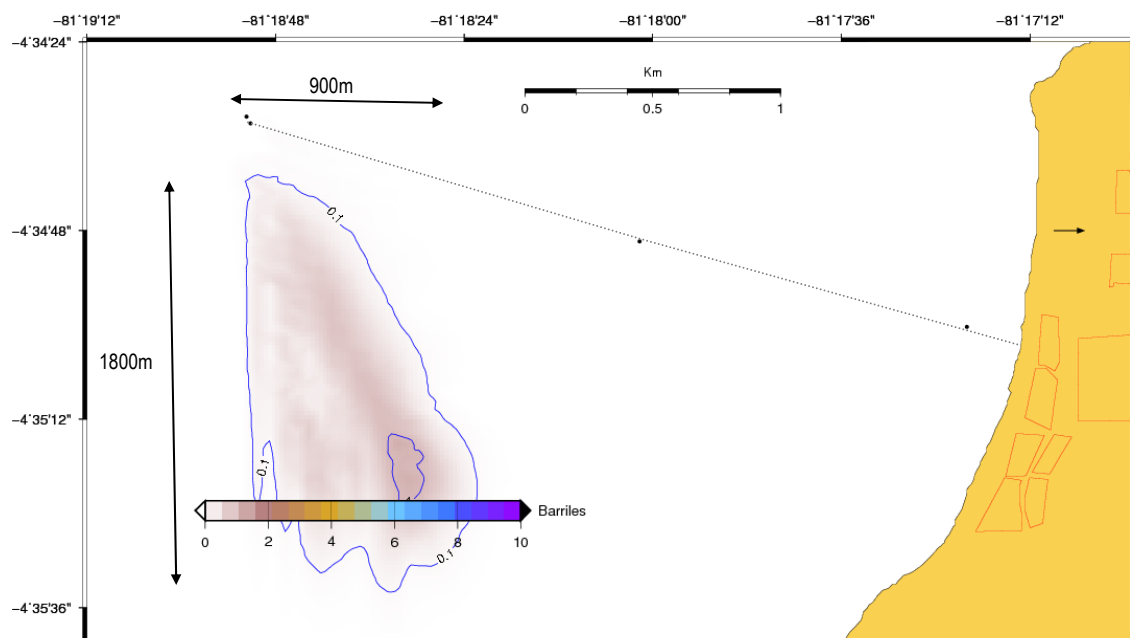


Figura 28 Modelación de derrame de petróleo a 1.5 hora de modelación. Marea Ascendente. Zona de embarque y desembarque



Caso 02: Corrientes en etapa de marea ascendente
Punto de derrame de petróleo: Centro de la tubería

Figura 29 Modelación de derrame de petróleo a 20 minutos de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería

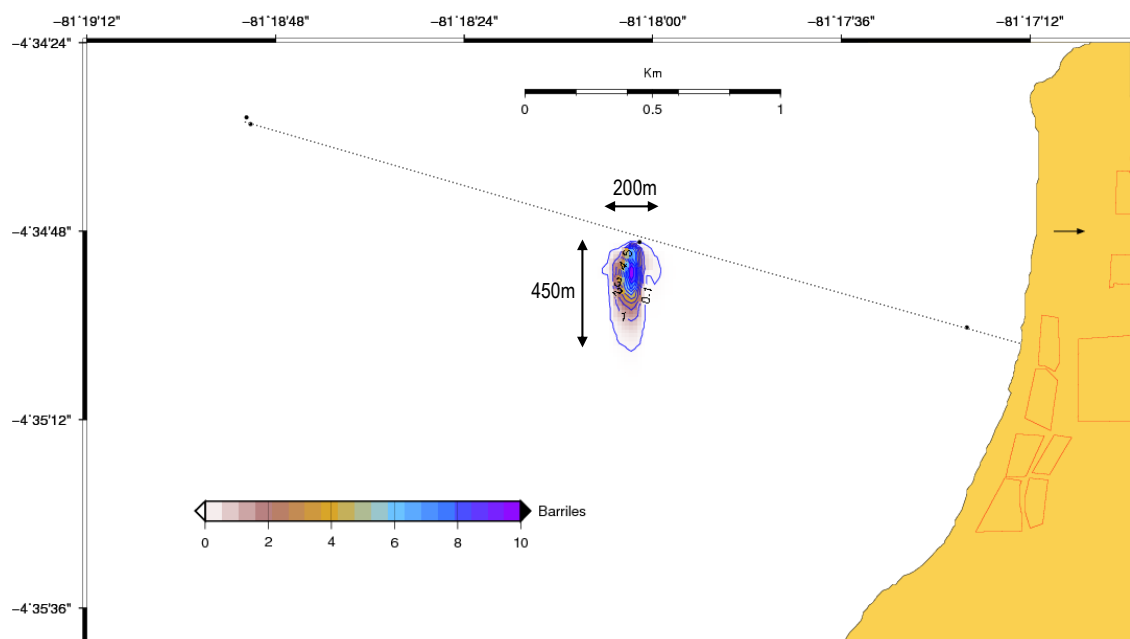


Figura 30 Modelación de derrame de petróleo a 40 minutos de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería

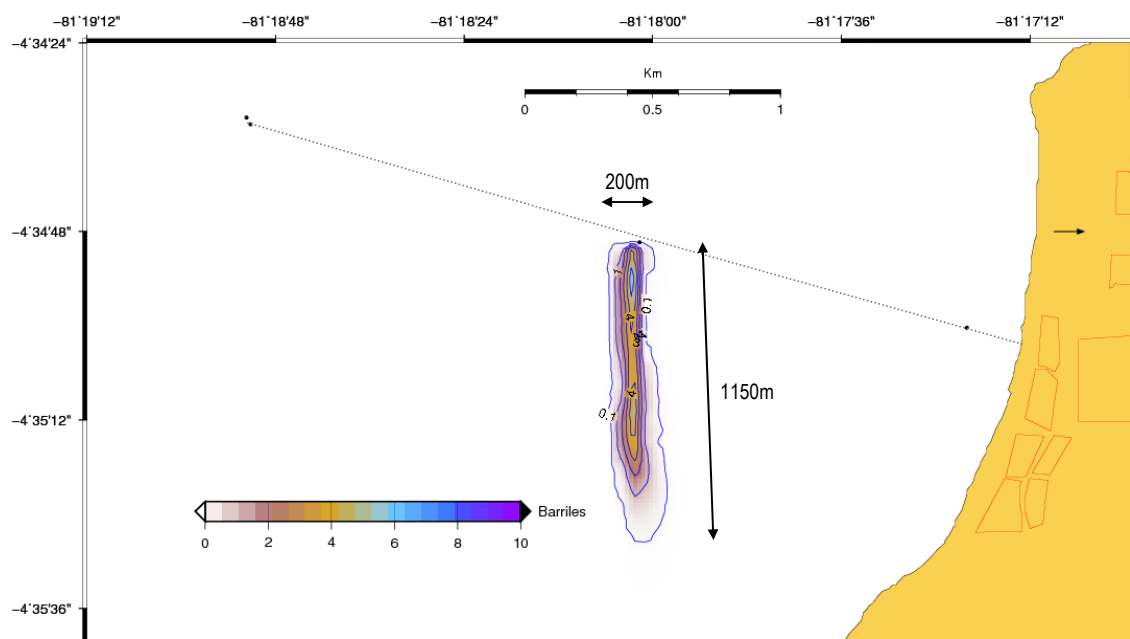


Figura 31 Modelación de derrame de petróleo a 1 hora de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería

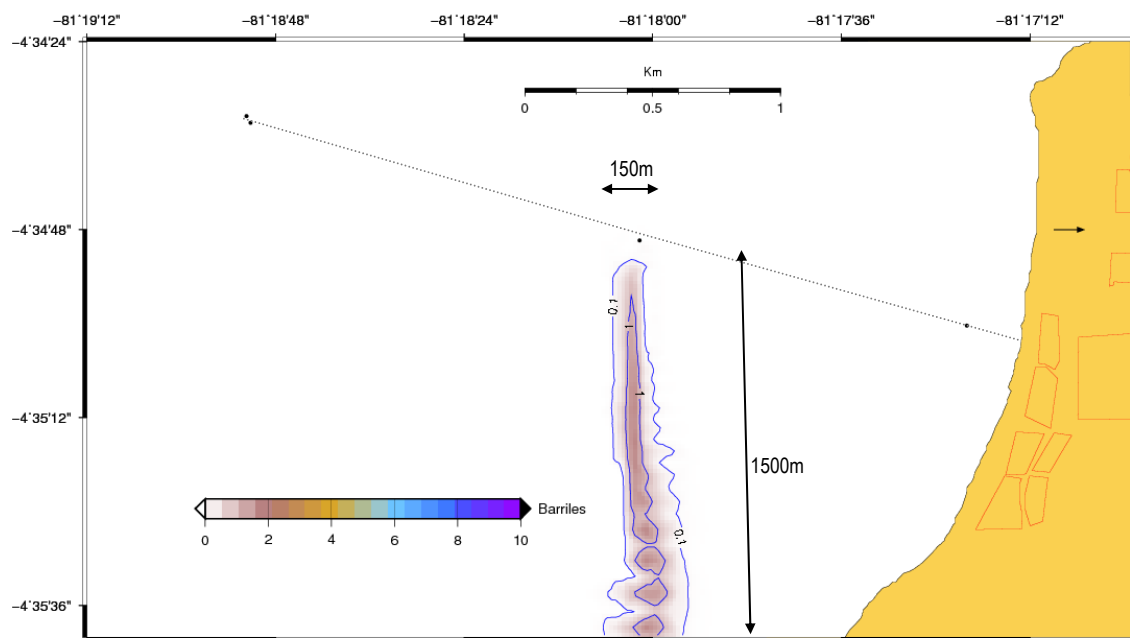
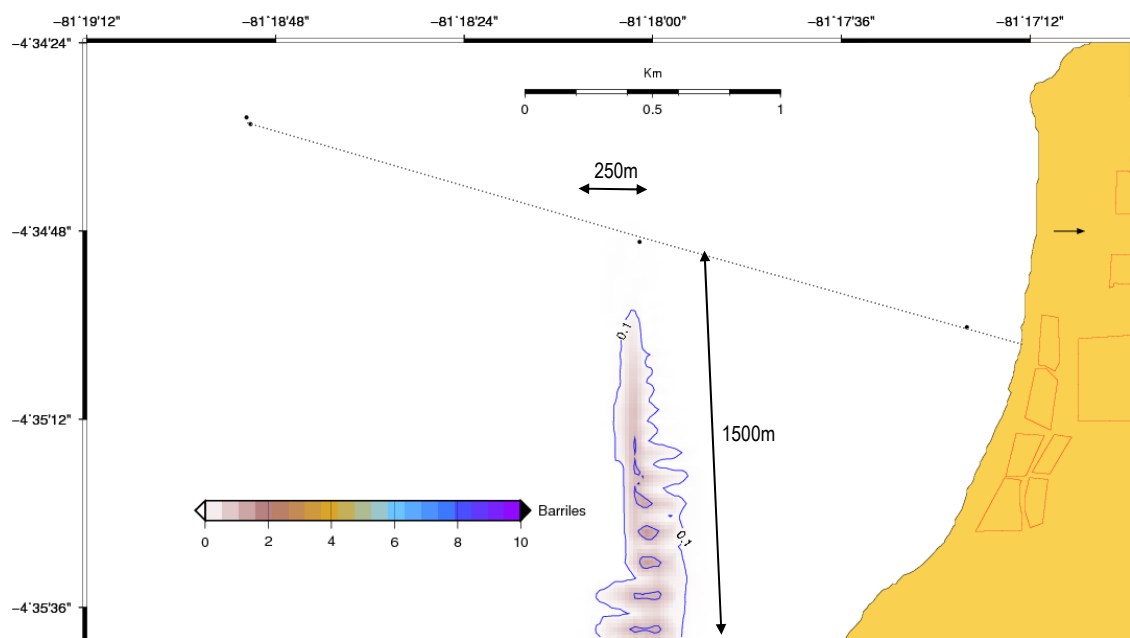


Figura 32 Modelación de derrame de petróleo a 1.5 hora de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería



Caso 02: Corrientes en etapa de marea ascendente
Punto de derrame de petróleo: Cercano a la zona de rompiente de olas

Figura 33 Modelación de derrame de petróleo a 20 minutos de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería

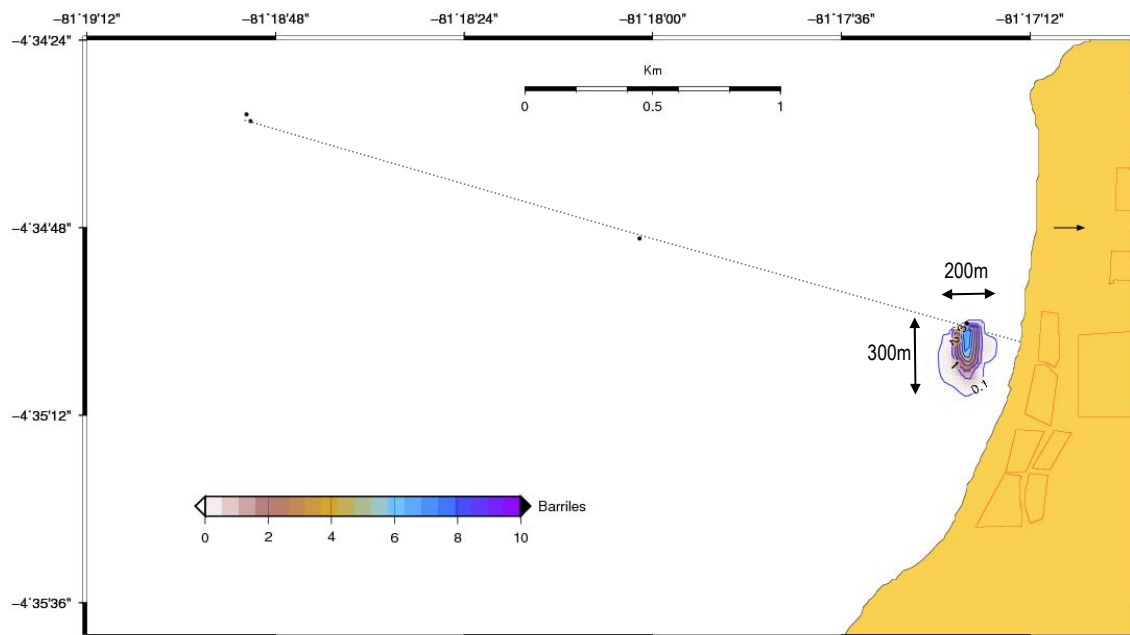


Figura 34 Modelación de derrame de petróleo a 40 minutos de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería

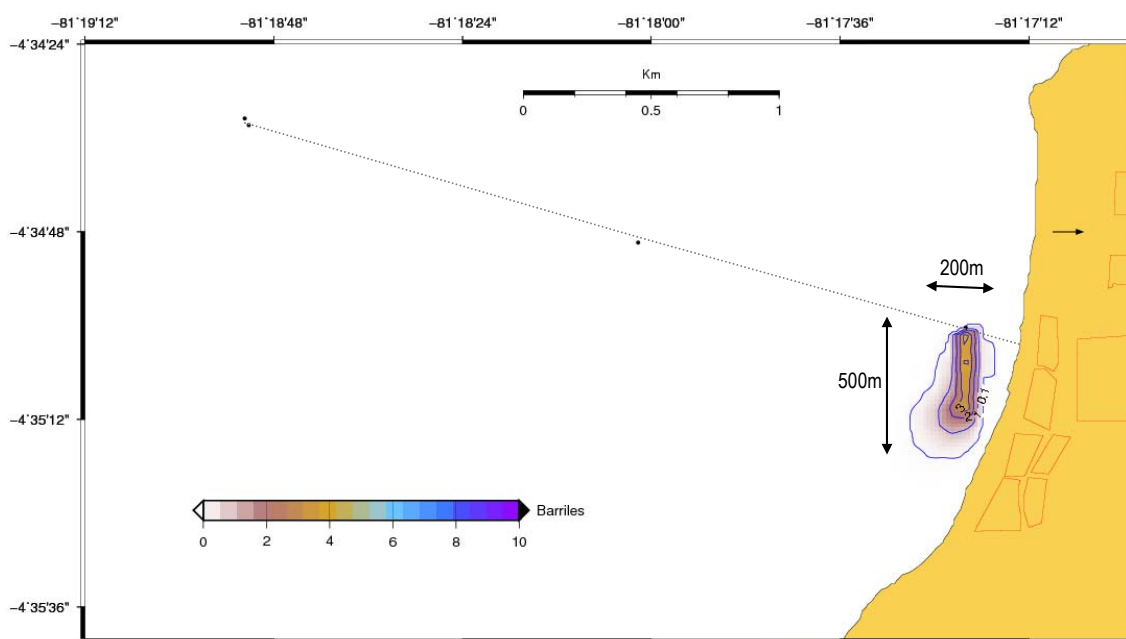


Figura 35 Modelación de derrame de petróleo a 1 hora de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería.

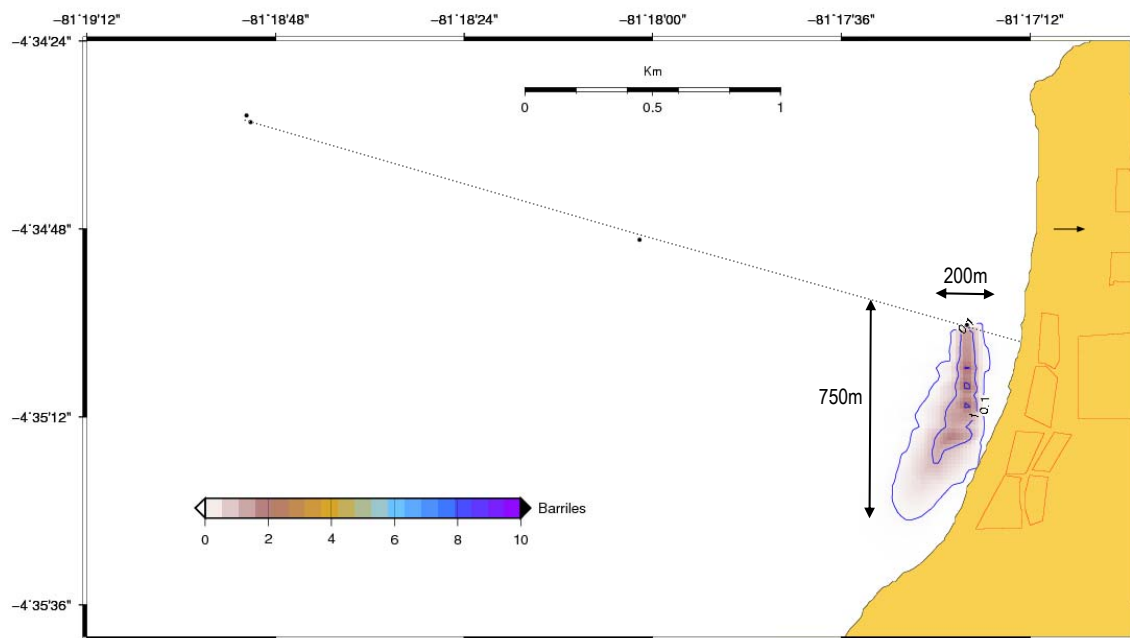
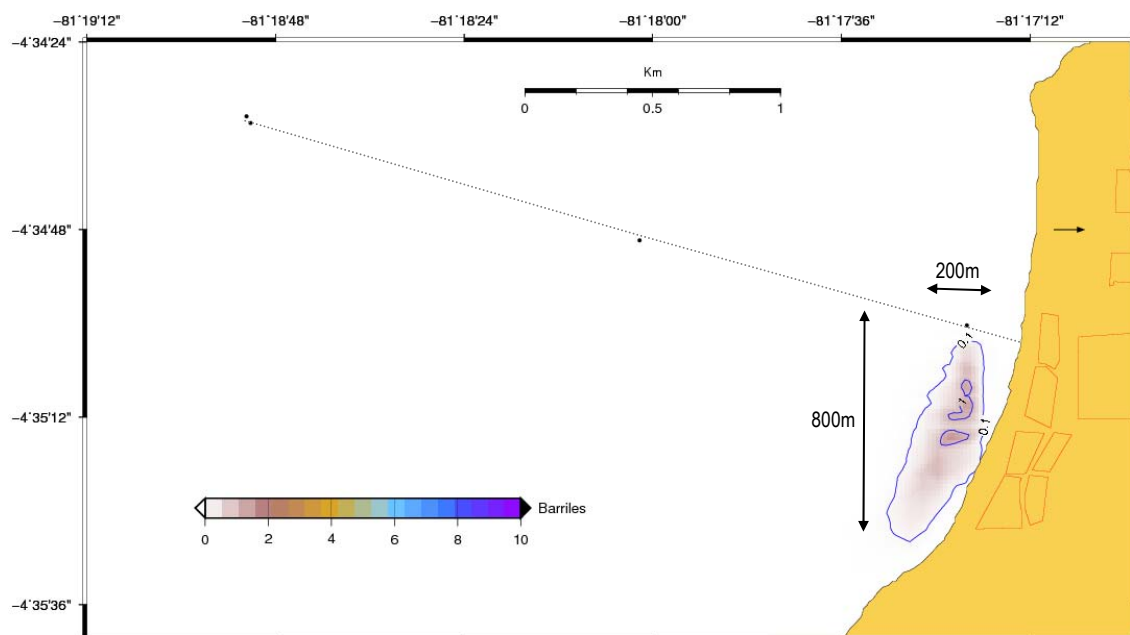


Figura 36 Modelación de derrame de petróleo a 1.5 hora de modelación. Marea Ascendente. Centro de la tubería



Cuadro 09 Resumen de resultados de la modelación de dispersión

Caso	Punto de derrame	Dirección de desarrollo de la pluma de dispersión	Longitud máxima	Ancho máximo
Caso 01	P01	Fuerte tendencia de desarrollo hacia el noreste	1 kilómetro	400 metros
	P02	Dirección predominante de desarrollo hacia el norte.	1.5 kilómetros	300 metros
	P03	Predominantemente hacia el norte.	900 metros	300 metros
Caso 02	P01	Fuerte tendencia de desarrollo hacia el sureste	1.5 kilómetros	600 metros
	P02	Predominantemente hacia el sur	1.6 kilómetros	250 metros
	P03	Tendencia de desarrollo hacia el sur y suroeste.	800 metros	350 metros

ANALISIS Y DISCUSIONES

Los resultados mostrados en las figuras 13 -36, muestran claramente los efectos de la advección y difusión en los procesos de dispersión del derrame de petróleo, apreciándose claramente que la pluma de dispersión se ve influenciada por los cambios en la dirección de la velocidad de corriente, variando entre las direcciones norte y sur dependiendo de la etapa de marea cuando se produzca el derrame. Por otro lado, el grado de dilución depende fuertemente de la magnitud de la velocidad de corriente, ya que velocidades mas intensas, permitirán un mayor grado de dilución del derrame de petróleo.

Se debe de tener en consideración que el petróleo, por ser menos denso que el agua de mar, posee una flotabilidad positiva, lo que indica que la mayor parte del desarrollo de esta pluma de dispersión se realizará en la parte superficial del mar.

De los casos analizados se obtienen lo siguiente:

Caso 01: Derrame durante marea de descendente

- Se presenta una fuerte tendencia de desarrollo de la pluma de dispersión hacia el norte en los tres puntos de probable derrame, alcanzando longitudes de desarrollo de aproximadamente 1 kilómetro de extensión, tal como se pueden observar en los resultados presentados en el cuadro 09.
- Después de una hora de haberse producido el derrame, cuando ya dejó de derramarse el petróleo desde la tubería, comienza el transporte de la masa de petróleo que aun permanece sin diluirse con el agua de mar y que presenta concentraciones de petróleo inferiores a 1 barril.
- Para los puntos de derrame P01 (al final de tubería) y P02 (en la parte central de la tubería), no se aprecian que la mancha producida por el derrame alcance las zonas que comprendan la bahía de Talara y La playa Punta Arenas.
- Para el punto de derrame cercano a la zona de rompientes (P03), se deben de tener con consideración las características del tren de oleaje que incide sobre la zona de estudios, ya que en esta zona son considerables los efectos de la turbulencia producidas por los efectos de la rompiente de olas, sin embargo los resultados obtenidos por el modelo, indican que la principal zona que sería afectada es la playa Punta Arenas, ya que se ha observado que la mancha se desplaza de manera paralela y muy cercano al perfil de playa.

Caso 02: Derrame durante marea ascendente

- Para este caso, se observa un comportamiento inverso al presentado en el caso anterior, ya que principalmente el desarrollo de la mancha de petróleo es hacia el sur y sureste, con concentraciones que van disminuyendo conforme los procesos advectivos y difusivos se hacen más considerables.
- De manera similar que el caso anterior, después de una hora de producido el derrame, en general para los tres puntos evaluados se presentan concentraciones de petróleo inferior a 1 barril.
- Para los puntos de derrame P01 (al final de tubería) y P02 (en la parte central de la tubería), no se aprecian que la mancha producida por el derrame alcance las zonas que comprendan la bahía de Talara y ni la zona de playa de la Playa Punta Arenas.
- En el caso que el derrame se presente en el punto P03, la zona mas afectada seria la zona de playa de Punta Arenas, ya que la mancha se desplaza muy cercano al perfil costero y de manera paralela a éste.

9.0 CONCLUSIONES

Las conclusiones del trabajo son las siguientes:

9.1 CORRIENTES MARINAS

- Existe una marcada variabilidad en la dirección de las corrientes marinas que dependen principalmente de la etapa de marea, ya que en marea descendente la dirección predominante de las corrientes es hacia el norte, mientras que en la etapa de marea ascendente, la dirección de corrientes se invierte, existiendo un flujo de corrientes que se desplaza hacia el sur. La magnitud de la velocidad de corrientes varia entre los 5 – 15 cm/s.
- De esta manera, la influencia de la marea en la zona de estudios es importante, sin embargo los resultados de los puntos de control, indican que existe una corriente predominante hacia el norte, por lo que la inversión en la dirección de las corrientes se presentaría cuando exista una debilitación del viento. Por lo tanto, tanto la marea como el viento juegan un papel importante en los procesos de generación de corrientes.
- Los resultados del modelo y de las mediciones mediante flotadores lagrangianos indican que tanto las corrientes superficiales como las subsuperficiales presentan la misma dirección durante todo el periodo de simulación y durante los cambios de las etapas de marea.

9.2 DISPERSIÓN

- La mancha de petróleo, se transporta principalmente en las direcciones norte y sur, dependiendo de la etapa de marea, alcanzando longitudes de desarrollo máximas de aproximadamente 1 kilómetro.

- No se aprecia que los derrames producidos en el final de la tubería ni en la parte central de esta lleguen a alcanzar la zona costera de la playa Punta Arenas ni de la Bahía de Talara, sin embargo su impacto será directo sobre el área donde se va desarrollando, afectando a los recursos biológicos que se encuentren dentro de esta zona.
- La zona costera de playa Punta Arenas, será la más afectada por los efectos del derrame, cuando este se produzca cercano a la zona de rompientes, la cual se encuentra aproximadamente a 200 metros de esta playa.

10.0 RECOMENDACIONES

Corrientes

Instalación de correntómetros para el monitoreo de la variaciones temporales de las corrientes frente a la Playa de punta Arenas.

Derrame de petróleo

Elaboración de un plan de contingencia para la prevención y mitigación de los efectos producidos en el hipotético caso de derrame de petróleo en la zona de estudios.

11.0 BIBLIOGRAFIA

- 1 Alan F. Blumberg and George Mellor, *A Description of a Three Dimensional Coastal Ocean Circulation Model*, Geophysical Fluid Program, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544.
- 2 Alvaro Montenegro Neto, *Estudo da Circulacao por Ventos e Marés na Baía de Todos os Santos e Plataforma Continental Adjacente. Simulacoes com o Modelo Oceanico da Universidade de Princeton(POM)*, Sao Paulo 1999.
- 3 Alvaro Montenegro, Carlos Fonseca e Edmo J. D. Campos, *Implementacao do Modelo Oceánico da Universidade de Princeton para o Estudo da circulacao e dispersao de materias na Baía de Todos Os Santos – Bahia*.
- 4 Armando Frias, Gonzalo Moreno, *Ingeniería de Costas*, Ed. Limusa, 1988.
- 5 Arturo López García, *Guía de Programación en FORTRAN 95*, 2000, 236p
- 6 Benoit Cushman – Roisin, *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*, Ed. Prentice Hall, 1998, 320p.
- 7 Bernard Barnier, *Forcing The Ocean*, Centre National de la Recherche Scientifique, Laboratoire des Ecoulements Geophysiques et Industriels, Grenoble, France. 1998
- 8 Dale B. Hadvogel y Aike Beckmann, *Numerical Ocean Circulation Modeling*, Ed. Imperial College Press, 1999, 318p.

- 9 David C. Chapman, *Numerical Treatment of Cross-Shelf Open Boundaries in a Barotropic Coastal Ocean Model*, Journal Of Physical Oceanography, 1985.
- 10 Dinateresa Figueredo Gomes dos Santos Silva, *Estudo Numérico da Dinâmica da Constituinte M2 da Maré na Plataforma Amazônica*, Sao Paulo 1994.
- 11 Edmo Campos, *O Modelo Oceanico da Universidade de Princeton, Minicurso proferido no Instituto do Mar Almirante Paulo Moreira – IEAPM*, Sao Paulo 1997.
- 12 Elbio D. Palma-Ricardo P. Matano, *On the implementation of passive open boundary conditions for a general circulation model: The barotropic mode*, Journal Of Geophysical Research, Vol 103, NO. C1, Pages 1319-1341, January 15, 1998.
- 13 Felipe M. Pimenta – Edmo José Díaz Campos – Jerry Miller & Alberto Piola, *A Numerical Study Of The Plata River Plume Along The Southeastern South American Continental Shelf*, Brazilian Journal of Oceanography, 53(3/4):129-146, 2005
- 14 Franklin Pacheco Tena, *Oscilación en Regiones Costeras*, Lima 1989, 111pp. Tesis para optar el título de ingeniero mecánico de fluidos.
- 15 George Mellor, *Users Guide for A Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean model*, Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University, July 1998.
- 16 George Mellor-Sirpa Hakkinen, Tal Ezer and Richard Patchen, *A Generalization of a Sigma Coordinate Ocean Model and an Intercomparison of Model Vertical Grids*.
- 17 Instituto del Mar del Perú (IMARPE) , *Atlas Sedimentológico de la Plataforma Continental Peruana*. Mayo 1995
- 18 Irving H. Shames, *La Mecánica De Los Fluidos*, Ed. McGraw-Hill, 1970, 590p.
- 19 Ivan Dias Soares, *Simplified Models of the Coastal circulation*, IAI/SACC Short Course, Rio Grande 2004.
- 20 Ivan Dias Soares, *Un modelo Numérico De Dispersao Oceanía: Aplicacoes Ao Canal De Sao Sebastiao E Adjacencias*, Sao Paulo 1994.
- 21 Jesús A. Vidal Cortés, *El lenguaje de programación AWK*, Madrid . Febrero 2002.
- 22 Joseph Pedlosky, *Geophysical Fluids Dynamics 2nd Edition*, Ed. Springer, 1987, 710p.
- 23 M.B. Abbott y D. R Basco, *Computational fluid Dynamics*, Ed. Longman Scientific & Technical, 1989, 425p.
- 24 Merle C. Potter David C. Wiggert, *Mecánica de fluidos 3^{era} edición*, Ed. Thomson Editores, 2001, 770p.
- 25 Messinger y A. Arakawa, *Numerical Methods Used in Atmospheric Models*, GARP Publications Series, No. 17, 1976, 64pp
- 26 P. Montero V., *Estudio de la Hidrodinámica de la Ría de Vigo Mediante Un Modelo De Volúmenes Finitos*, España, Tesis Doctoral, 1999, 156p.
- 27 Peter C. Chu, Jian Lan, 2003, *Extremely Strong Thermohaline Sources Sinks Generated By Diagnostics Initialization*, Geophysical Research Letters, Vol 30.
- 28 Renato Menezes Castela, *Circulacao e dispersao de materias pasivos na Bacia de Santos. Simulacoes numéricas com o modelo da Universidade de Princeton*. Sao Paulo 2001.
- 29 Rick Salmon, *Geophysical Fluid Dynamics*, Ed. Oxford University Press, 1998, 378p.

- 30 Soichiro Nakamura, *Análisis numérico y visualización gráfica con MATLAB*, Ed. Prentice Hall Hispanoamericana S.A, 1997, 476p.
- 31 Tal Ezer and George Mellor, 1997, *Simulations of the Atlantic Ocean a Free Surface Sigma Coordinate Ocean Model*. Journal of Geophysical Research, Vol. 102, N° 07, pages 15,647-15,657
- 32 The Oceanography Course Team, *Ocean Circulation*, Ed. Open University, 2001, 286p.
- 33 V. Yzocupe C, *2-D Hydrodynamic Modeling in Paracas Bay, Perú*. MSc. Thesis H.H 402, IHE-Delft, 2001, 74p.
- 34 V. Yzocupe. *Modelo Numérico de Flujo Bidimensional de la Bahía de Paracas*. Revista de Investigación de Física, ISSN1605-7744 Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Volumen 5, pag. 1-9, 2002.
- 35 Z. Kowalik – T. S. Murty, *Numerical Modelling of Ocean Dynamics*, Ed. World Scientific, 1993, 481p.
- 36 Instituto del Mar del Perú (IMARPE). “Contaminación Marina en las bahías de Paita y Talara en setiembre 1996”.
- 37 Instituto del Mar del Perú (IMARPE). “Evaluación de la calidad del medio costero en la bahía de Talara y aguas adyacentes Abril 1997”.
- 38 Instituto del Mar del Perú (IMARPE). “Evaluación de la calidad del medio marino en la bahía de Talara”, Setiembre 1995.

Páginas web consultadas en el presente trabajo

- Modelo POM : <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/>
- GMT(Generic Mapping Tools) <http://www.gmt.soest.hawaii.edu/>
- Gnuplot <http://www.comnets.rwthachen.de/doc/gnu/gnuplot37/gnuplot>
- C-shell www.cesca.es/es/supercomputacio/usrecursos/e_treball/cshell.html
- Modelo TOPEX6.0 : <http://www.oce.orst.edu/po/research/tide/global.html>
- Google Earth: <http://www.googleearth.com>

12.0 ANEXOS

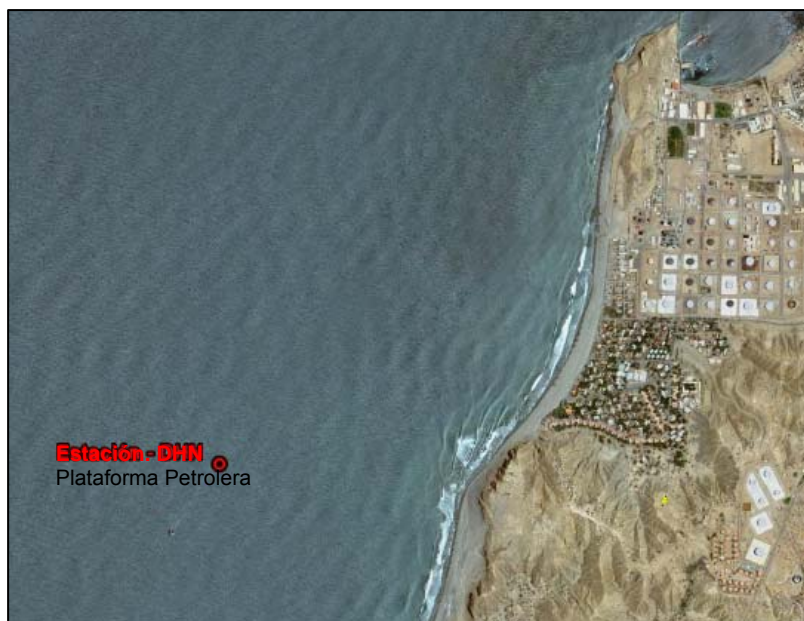
ANEXO A

A.1 CARACTERÍSTICAS CLIMATICAS

A.1.1 INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA

Los datos climáticos históricos mensuales de Talara registrados de noviembre 2000 a abril 2008, de la Dirección de Hidrografía y Navegación, ubicada en la plataforma de la Refinería de Petroperu (Lat.: 04°35'38"Sur, Long: 81°18'18"Oeste), la que se muestra en la figura A.1.

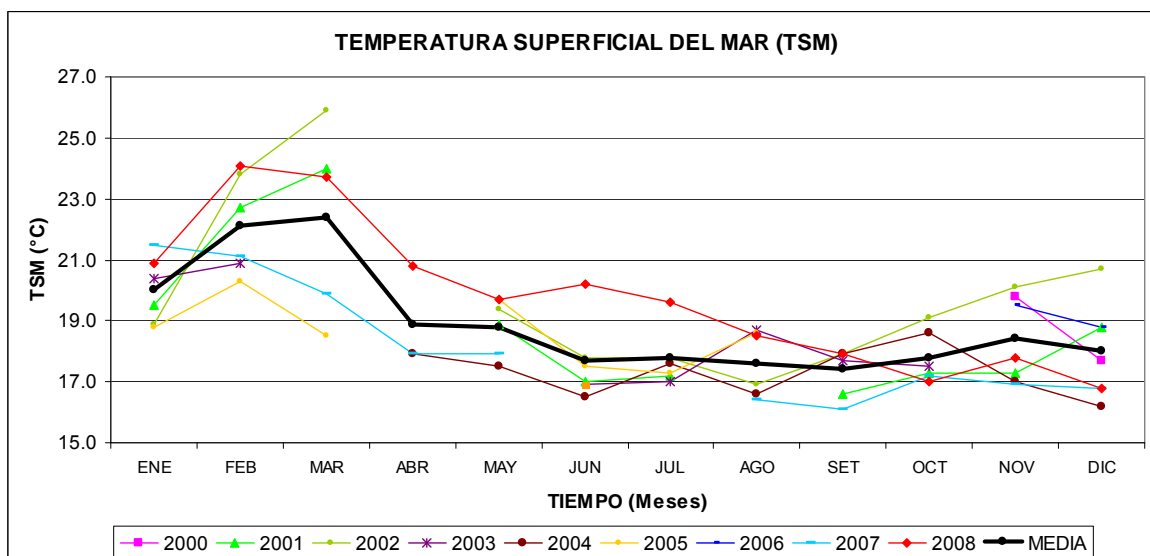
Figura A.1 Ubicación de la estación automática.



Fuente de imagen: Google Earth

La variación mensual de la TSM se observa en la serie de tiempo de la estación automática de Talara, operada por HIDRONAV, para un periodo de tiempo de noviembre 2000 a diciembre 2008. La ubicación gráfica de dicha estación se muestra en la Figura A.2. Se observa en la serie de tiempo que la máxima TSM fue de 25.9°C en marzo 2002 (verano) y la mínima fue de 16.1°C en setiembre 2007 (invierno). Los promedios estacionales muestran que la máxima TSM se registran en verano y las mínimas en invierno. Cuadro A.1.

Figura A.2 Temperatura Superficial del Mar. Estación Talara. Latitud: 04°35'38"Sur, Longitud: 81°18'18"Oeste.
Fuente: HIDRONAV

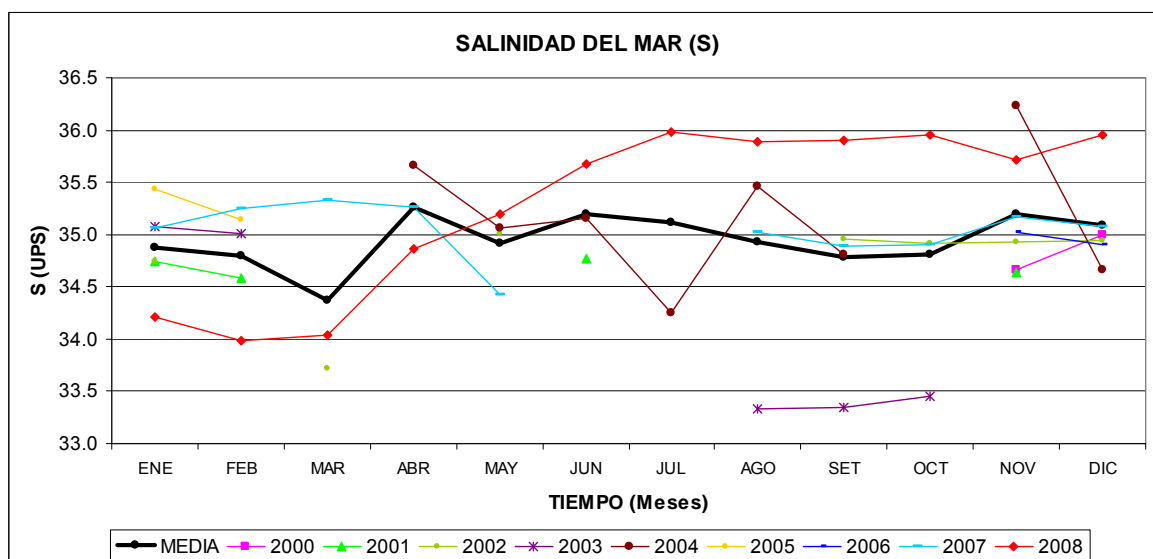


Cuadro A.1 Promedios de la Temperatura Superficial del Mar (°C)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2000											19.8	17.7
2001	19.5	22.7	24.0	---	18.9	17.0	17.2	---	16.6	17.3	17.3	18.8
2002	18.9	23.8	25.9	---	19.4	17.8	17.8	16.9	17.9	19.1	20.1	20.7
2003	20.4	20.9	---	---	---	16.9	17.0	18.7	17.7	17.5	---	---
2004	---	---	---	17.9	17.5	16.5	17.6	16.6	17.9	18.6	17.0	16.2
2005	18.8	20.3	18.5	---	19.7	17.5	17.3	18.6	---	---	---	---
2006	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	19.5	18.8
2007	21.5	21.1	19.9	17.9	17.9	---	---	16.4	16.1	17.2	16.9	16.8
2008	20.9	24.1	23.7	20.8	19.7	20.2	19.6	18.5	17.9	17.0	17.8	16.8
MEDIA	20.0	22.1	22.4	18.9	18.8	17.7	17.8	17.6	17.4	17.8	18.4	18.0
MEDIA ESTACIONAL	21.5			18.5			17.6			18.0		

La salinidad del mar fue extraída de la estación HIDRONAV, cuya ubicación se observa en la figura A.1. La salinidad máxima es 35.99 UPS (Julio 2008), y la mínima es 33.34 UPS (agosto 2003). Los promedios estacionales muestran que la máxima salinidad se presenta en otoño y la mínima en invierno. Figura A.3 y Cuadro A.2.

Figura A.3 Salinidad del Mar. Estación Talara. Latitud: 04°35'38"Sur, Longitud:81°18'18"Oeste.



Fuente: HIDRONAV

Cuadro A.2 Promedios de la Salinidad Superficial del Mar (UPS)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2000											34.67	34.99
2001	34.74	34.58	—	—	—	34.77	—	—	—	—	34.63	—
2002	34.74	—	33.72		35.01				34.96	34.92	34.93	34.94
2003	35.07	35.02	—	—	—	—	—	33.34	33.35	33.46	—	—
2004	—	—	—	35.66	35.06	35.16	34.25	35.46	34.81	—	36.24	34.67
2005	35.44	35.14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2006	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	35.03	34.90
2007	35.07	35.25	35.34	35.26	34.42	—	—	35.02	34.89	34.90	35.17	35.08
2008	34.21	33.98	34.04	34.86	35.19	35.67	35.99	35.89	35.90	35.95	35.72	35.96
MEDIA	34.21	34.79	34.37	35.26	34.92	35.20	35.12	34.93	34.78	34.81	35.20	35.09
MEDIA ESTACIONAL	34.79			35.13			34.94			35.03		

ANEXO B

B.1 DATOS HIDRO-OCEANOGRÁFICOS

La realización de las simulaciones requiere de información tomada in situ y la recopilación de información histórica, la cual es requerida por el modelo numérico como condiciones iniciales y métodos de validación.

Los datos que se emplearon para la modelación numérica se detallan a continuación:

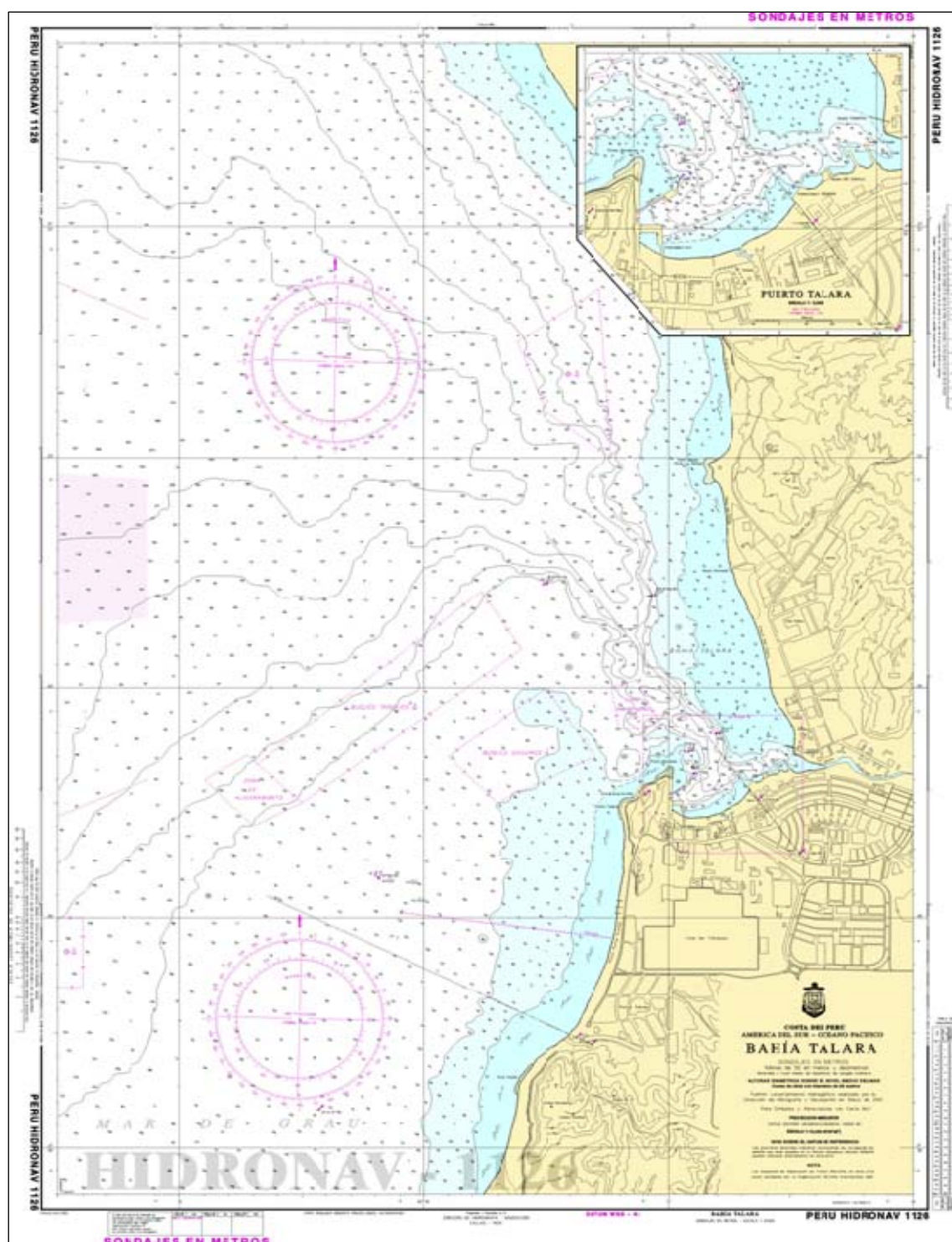
B.1.1 BATIMETRÍA Y PERFIL COSTERO

La información batimétrica de la Bahía de Talara fue extraída de la carta HIDRONAV N° 1126 de la Dirección de Hidrografía y Navegación en setiembre 2002 (figura B.1), se puede observar que en la playa Punta Arenas, la isóbata de 5 y 10 metros recorre de forma casi paralela a la línea de costa, aproximada a 300 y 850m de la costa respectivamente, y la zona de rompiente de olas se encuentra aproximadamente a 180m de costa, lo que nos indicaría que en esta zona se presenta una pendiente suave, tal como se observa en la figura 9.

En general la línea de costa en la playa Punta Arenas presenta una orientación de norte-sur, con una extensión aproximada de 1 km, como se muestra en la figura B.1.

Según la configuración de la playa y la orientación de la línea de costa, se puede decir que la playa Punta Arenas podría estar expuesta a efectos de olas y corrientes, debido a que no presenta alguna protección natural de sus playas (islas, archipiélagos, entre otros), lo que se puede observar en el anexo B.

Figura B.1 Carta batimétrica N° 1126. Bahía de Talara. Setiembre 2002.



Fuente: HIDRONAV.

B.1.2 VIENTO

La Velocidad y dirección del viento en superficie corresponde a la información de la estación automática de Talara ubicada en la Plataforma petrolera de Talara (Latitud: 04°35'38"S, Longitud: 81°18'18"W), de HIDRONAV para un periodo de noviembre 2000 a diciembre 2008 (figura A.1). En las figuras B.2, B.3 y B.4 se muestra la velocidad y dirección del viento predominante y estacional de verano e invierno para ser evaluados independientemente. Esta información fue ingresada como una de las principales forzantes al modelo de circulación oceánica POM.

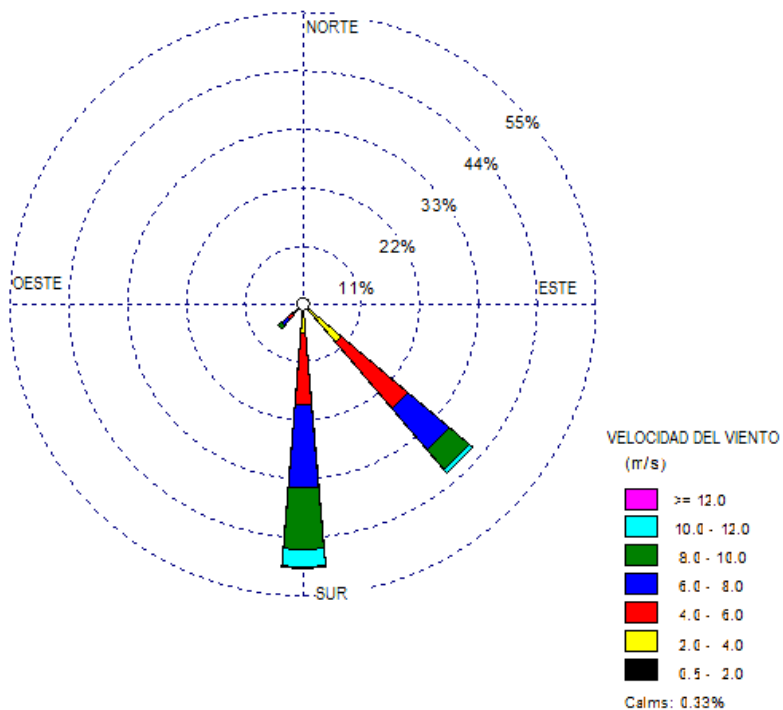
Tomando toda la serie de tiempo (figura B.2), la dirección del viento predominante es de dirección Sur con aproximadamente 50% de ocurrencia, mientras que la dirección Sureste presenta un porcentaje de ocurrencia de 42% y la dirección Suroeste presenta 6% de ocurrencia. La intensidad del viento se encuentra en el rango de 4.0 a 6.0 m/s, lo que nos indicaría una intensidad media de 5m/s.

La figura B.3, correspondiente al viento predominante de verano, nos muestra la dirección de viento predominante de dirección Sur con aproximadamente 43% de ocurrencia, mientras que la dirección Sureste presenta un porcentaje de ocurrencia de 36% y la dirección Suroeste con 14% de ocurrencia. La intensidad del viento muestra una intensidad media de 5 m/s.

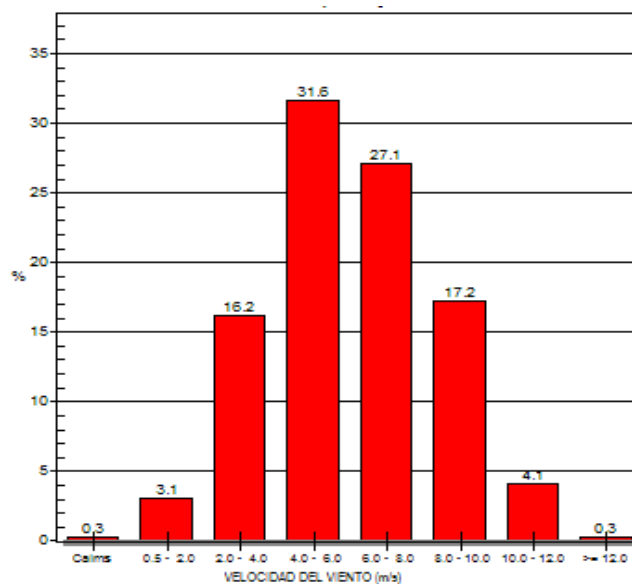
En la figura B.4, correspondiente al viento predominante de invierno, nos muestra dirección Sur con aproximadamente 55% de ocurrencia, mientras que la dirección Sureste presenta 43% de ocurrencia. La intensidad del viento medio es de 5 m/s.

De las figuras B.2, B.3 y B.4, analizadas anteriormente, se observa en general que la dirección predominante para toda la serie de tiempo es de dirección Sur principalmente y Sureste como segunda predominancia. La dirección Suroeste se presenta solo en épocas de verano, y la intensidad del viento es de 5 m/s para todo el año.

Figura B.2 Viento Predominante. Periodo: Noviembre 2000 – Diciembre 2008. (a) Rosa de Dirección de Vientos. (b) Histograma de la Velocidad del Viento.



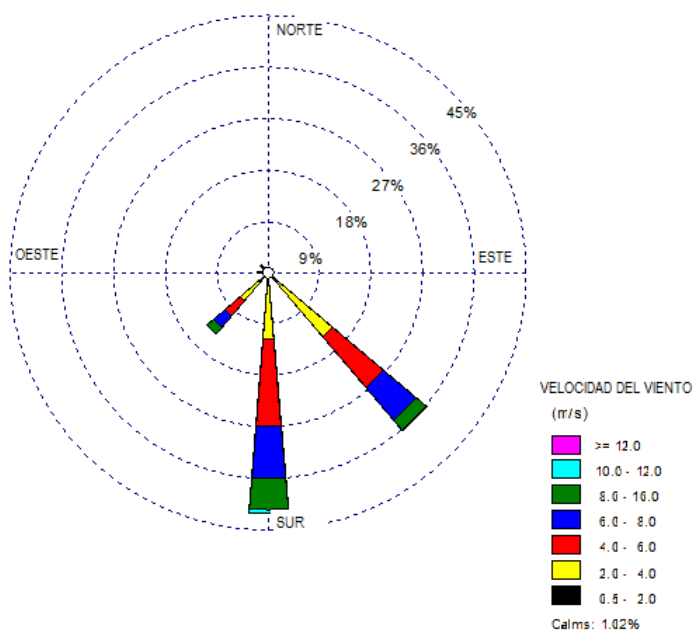
(a)



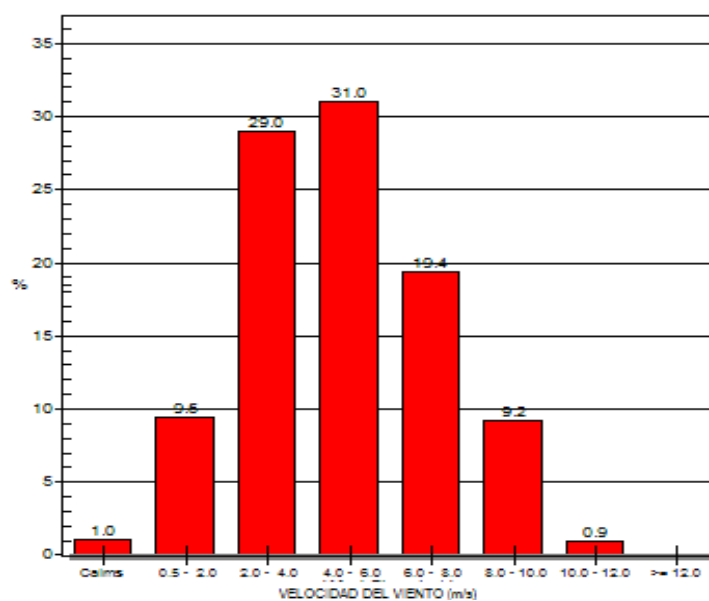
(b)

Fuente de imagen: HIDRONAV

Figura B.3 Viento Predominante en Verano. Periodo: Noviembre 2000 – Diciembre 2008. (a) Rosa de Dirección de Vientos. (b) Histograma de la Velocidad del Viento.



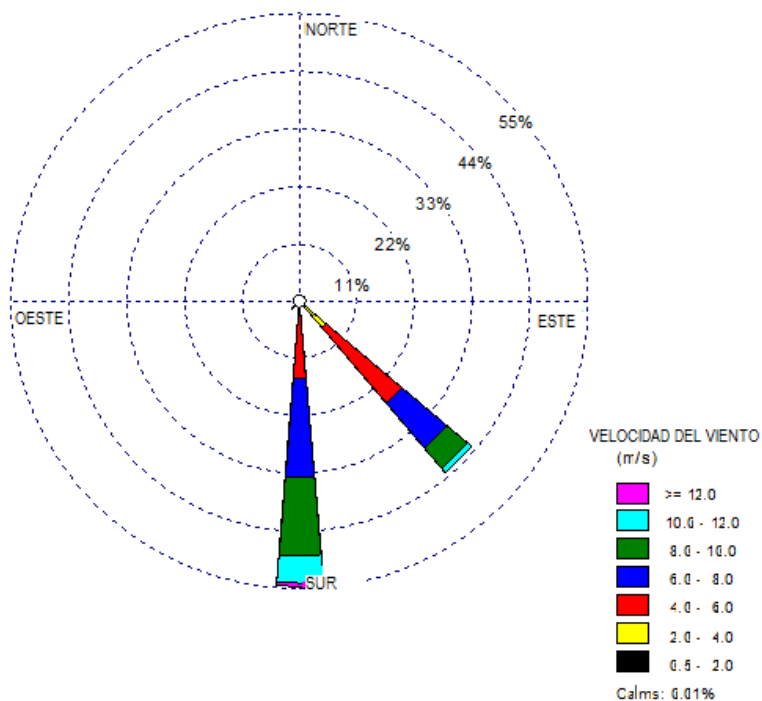
(a)



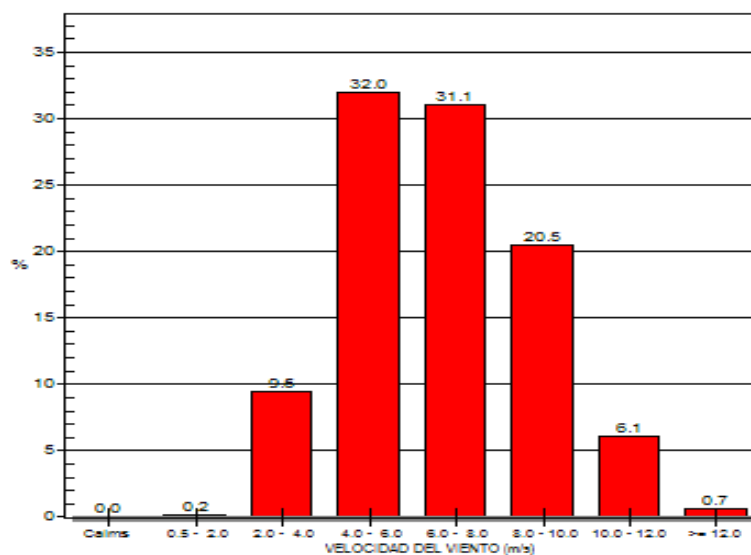
(b)

Fuente de imagen: HIDRONAV

Figura B.4 Viento Predominante en Invierno. Periodo: Noviembre 2000 – Diciembre 2008. (a) Rosa de Dirección de Vientos. (b) Histograma de la Velocidad del Viento.



(a)



(b)

Fuente de imagen: HIDRONAV

B.1.3 MAREAS

La información de la onda de mareas en la provincia de Talara presenta una amplitud promedio de 1.21 m que fluye de norte a sur, según la Tabla de Mareas 2008, publicada por La Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina.

Adicionalmente se cuenta con información de los 10 principales armónicos de marea para la estación de Talara (Tabla B.1), ubicada en el muelle de Petroperú, la cual fue proporcionada por La Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina.

Tabla B.1 Principales 10 Armónicos de Marea en Talara

Cuadro 3-14

N°	Nombre	Amplitud (cm)	Fase (°)
1	M ₂	58.833	319.23
2	S ₂	18.5187	148.89
3	N ₂	13.4013	119.04
4	S _a	13.0895	265.00
5	K ₁	10.4582	135.18
6	S _{sa}	5.2261	93.41
7	K ₂	3.8427	305.90
8	P ₁	3.3024	148.36
9	O ₁	2.9935	314.95
10	Nu ₂	2.2644	315.01

Fuente: HIDRONAV

El Factor de Forma (F), está directamente relacionada a las amplitudes de marea H_{K1}, H_{O1}, H_{M2} y H_{S2} en las componente K₁, O₁, M₂ y S₂ respectivamente.

$$F = \frac{H_{K1} + H_{O1}}{H_{M2} + H_{S2}}$$

Con el Factor de Forma, podemos determinar el tipo de marea que predomina en la estación de acuerdo a lo siguiente:

- F= 0 a 0.25 → Semidiurna
- F= 0.25 - 1.50 → Mixta predominantemente semidiurna.
- F= 1.50 - 3.00 → Mixta, predominantemente diurna.
- F= Mayor que 3 → Diurna

La información mostrada en la tabla B.1 es ingresada a la formulación de Factor de Forma, a fin de determinar las principales constituyentes diurnas y semidiurnas para la estación de Talara, para lo cual tenemos:

$$F = \frac{10.4582 + 2.9935}{58.833 + 18.5187} = 0.17$$

Se puede afirmar que la marea en la estación de Talara es semidiurna, según el calculo del Factor de forma.

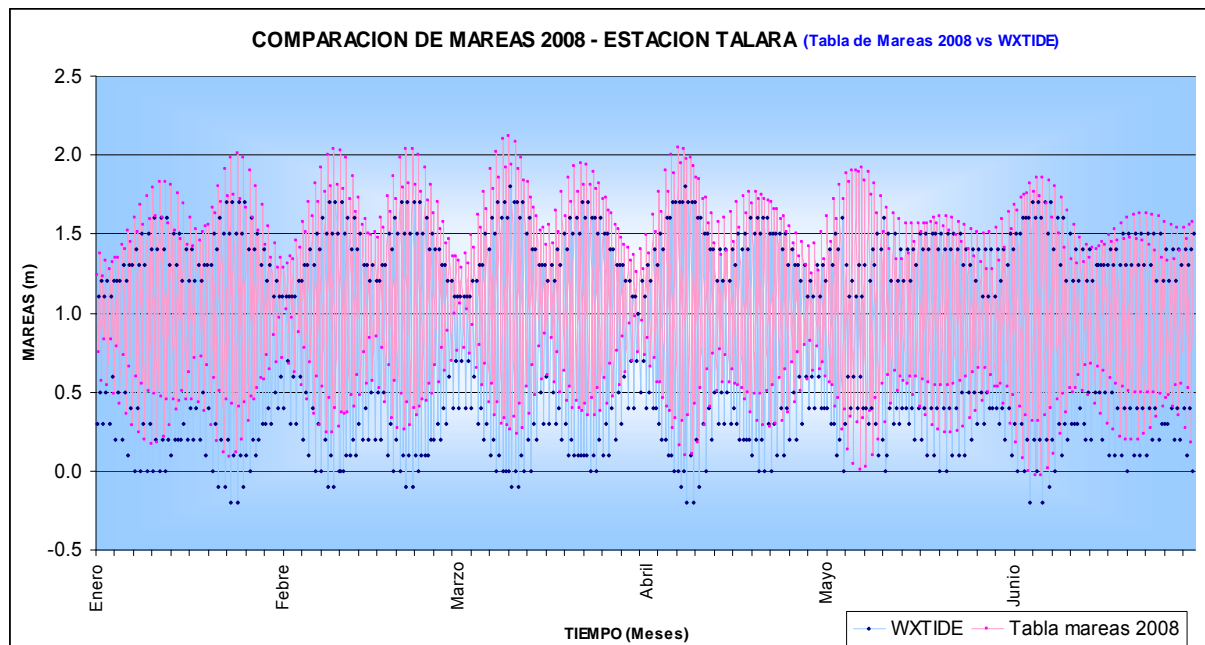
La información diaria de NMM para todo el año 2008 fue extraída de la tabla de mareas publicada mensualmente en la página web de HIDRONAV, para lo cual se calculó que la amplitud promedio es 0,97 m.

Adicionalmente se dispone de información de NMM, predecidas por el programa WXTIDE (desde 1970 a 2037), la cual proporciona información de Nivel del Mar de las principales ciudades del mundo, (más de 9,500 estaciones repartidas por todo el mundo).

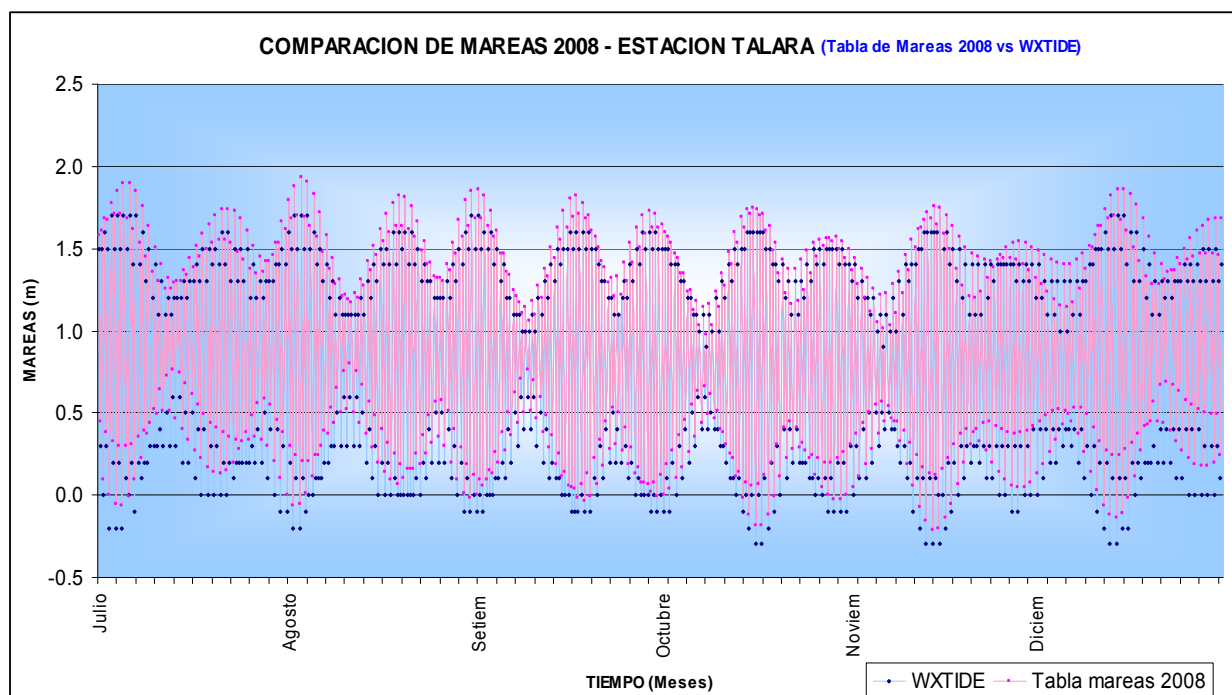
Para el cálculo del nivel medio del mar se utilizó el método de comparación de datos pronosticados por el software WXTIDE, en la cual se observa variaciones mínimas de 30cm respecto a la Tabla de Mareas 2008. Figura B.5(a y b). La figura B.5a corresponde a la comparación del NMM de enero a junio y la figura B.5b de julio a diciembre 2008.

En la figura B.6(a - b), se muestra la serie de datos de NMM desde el 01 al 08 de febrero de 2008, observándose una buena correlación de la información del WXTIDE con la tabla de mareas 2008, la que mantiene un mismo comportamiento y tendencia de marea semidiurna, en este tipo de marea se producen dos pleamares y dos bajamares cada día con una desigualdad relativamente pequeña entre sus alturas.

Figura B.5 Comparación del NMM de la Tabla de Mareas 2008 y el programa WXTIDE. (a) Comparación de NMM Enero - Junio 2008 (b) Comparación de NMM Julio - Diciembre 2008.

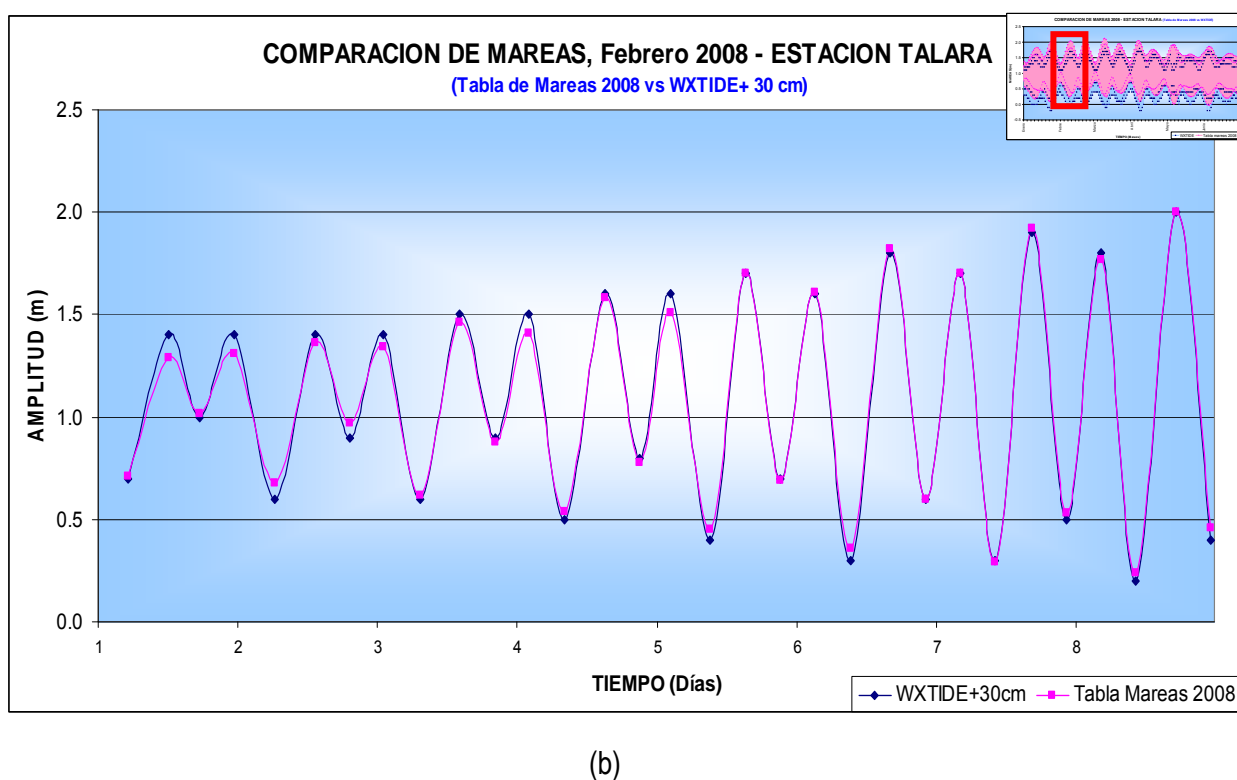
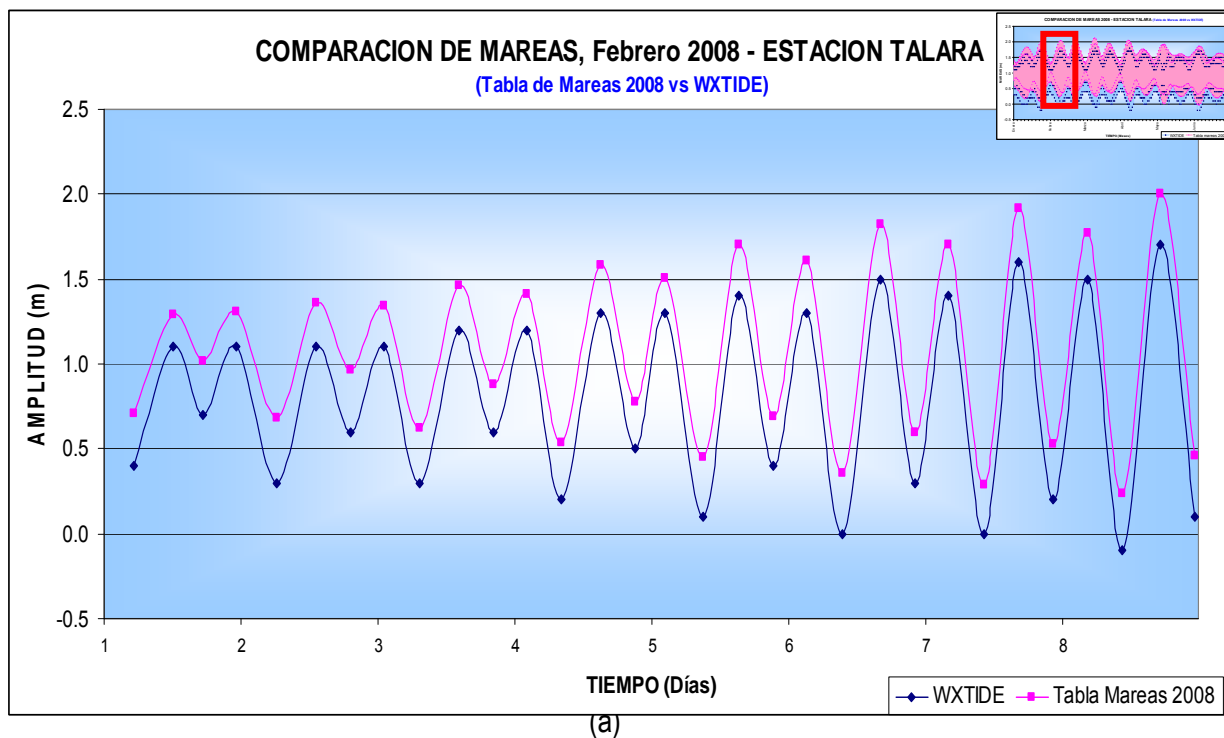


(a)



(b)

Figura B.6 Comparación del NMM de la Tabla de Mareas 2008 y el programa WXTIDE. 1 al 8 febrero 2008. (a) Comparación de NMM (b) Comparación de NMM con un incremento de 30 cm al WXTIDE



B.4 CORRIENTES

Los datos de corrientes superficial, subsuperficial y de fondo en la zona acuática de la playa Punta Arenas, fueron recopilados de la empresa Petróleos del Perú- Refinería Talara en abril y junio 2009. Se observa que las corrientes tienen dirección predominante suroeste en marea ascendente, mientras que en marea descendente es del noroeste, tal como se observa en la tabla B.2 y figuras B.7, B.8, B.9 y B.10.

Tabla B.2 Corrientes superficiales, subsuperficiales y fondo en marea ascendente y descendente. Abril y Junio 2009.

Marea Ascendente

Fecha	Superficial		Sub - Superficial		Fondo	
	VV (cm/s)	DD (°)	VV (cm/s)	DD (°)	VV (cm/s)	DD (°)
Abril 2009	17.5	168	8.6	170	6.1	175
	10	324	77.3	52	6.6	273
	6.7	283	7.2	216	10.1	206
	12.6	176	9.2	176	10.8	188
	23.9	173	10.3	141	12.9	195
	11.1	142	—	—	9.4	137
Junio 2009	50.9	17	44.2	21	—	—
	48.4	29	44.3	40	—	—

Marea Descendente

Fecha	Superficial		Sub - Superficial		Fondo	
	VV (cm/s)	DD (°)	VV (cm/s)	DD (°)	VV (cm/s)	DD (°)
Abril 2009	28.1	166	12.8	13	8.4	310
	17.1	341	21.8	165	24.1	168
	14.9	322	13.9	19	2.9	354
	—	—	10.3	359	10.8	350
Junio 2009	42.6	3	27.2	356	—	—
	33.3	355	34.1	4	—	—

Figura B.7 Comportamiento de las corrientes en Playa Punta Arenas, marea ascendente. Abril 2009

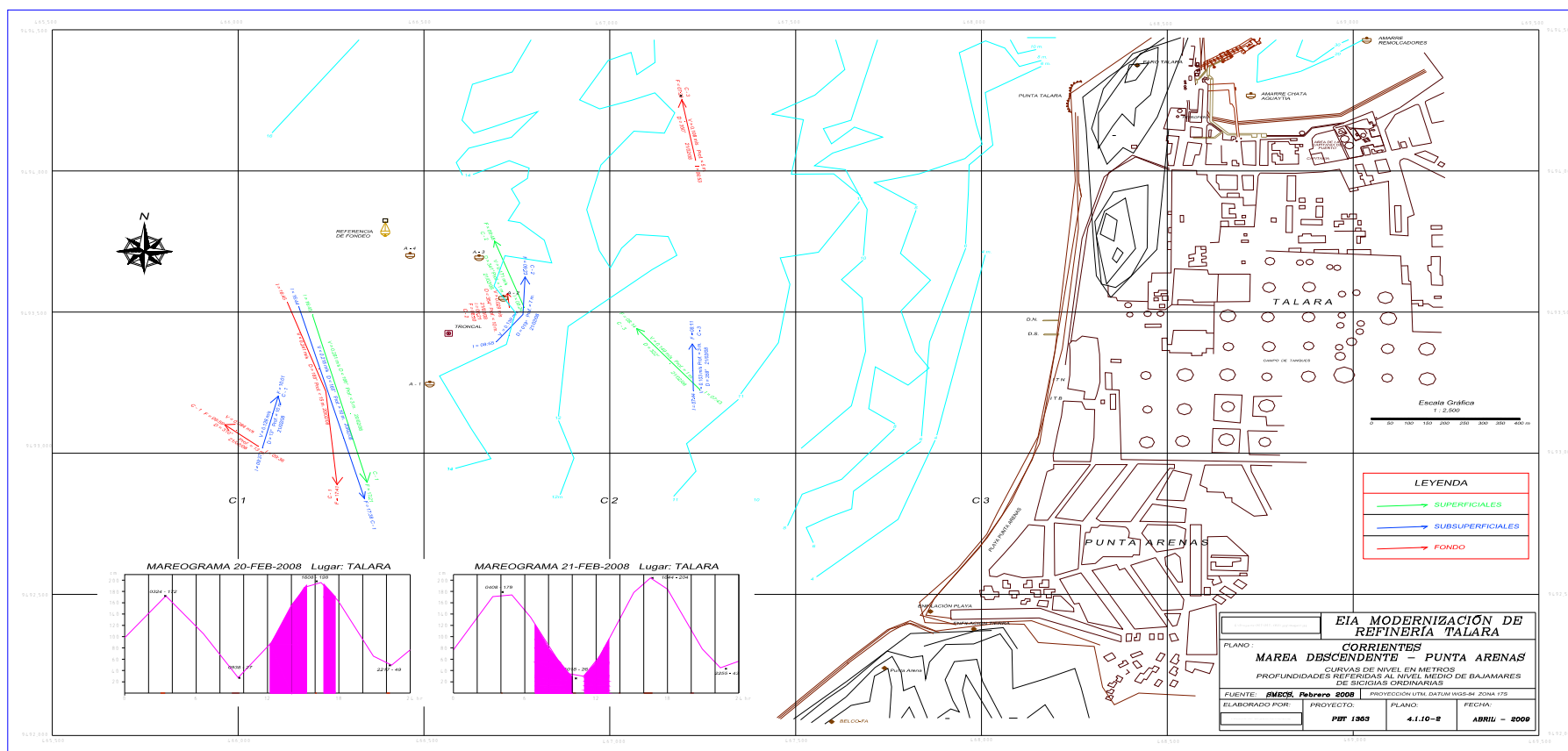
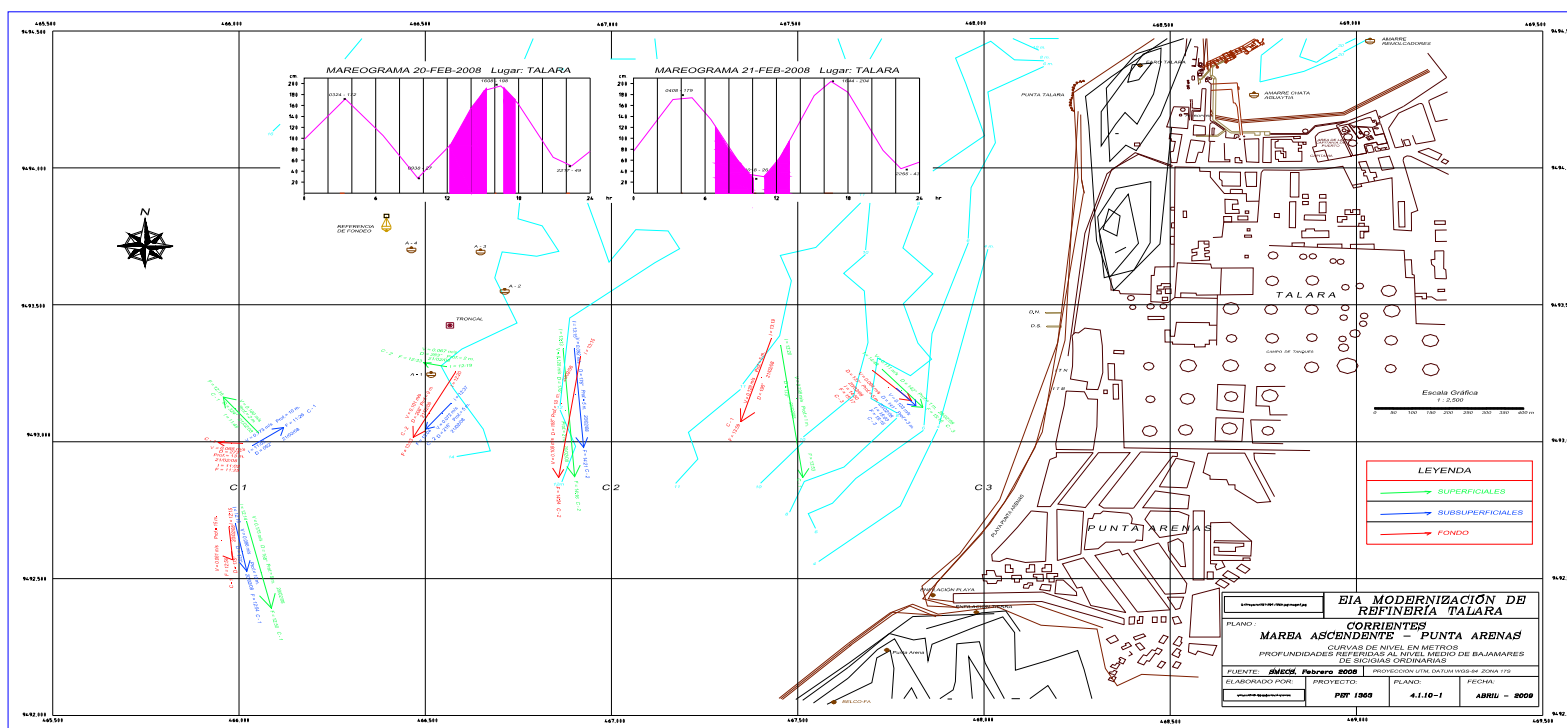


Figura B.8 Comportamiento de las corrientes en Playa Punta Arenas, marea descendente. Abril 2009

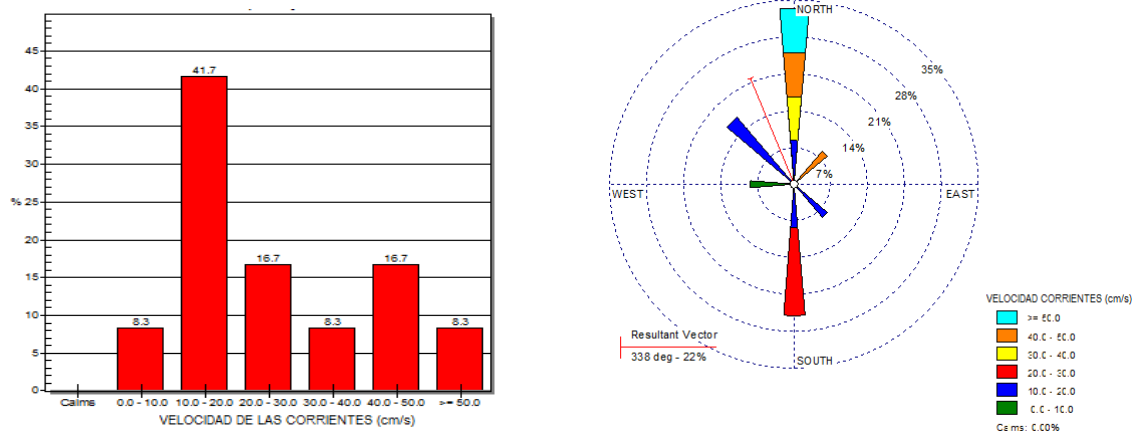


Figura

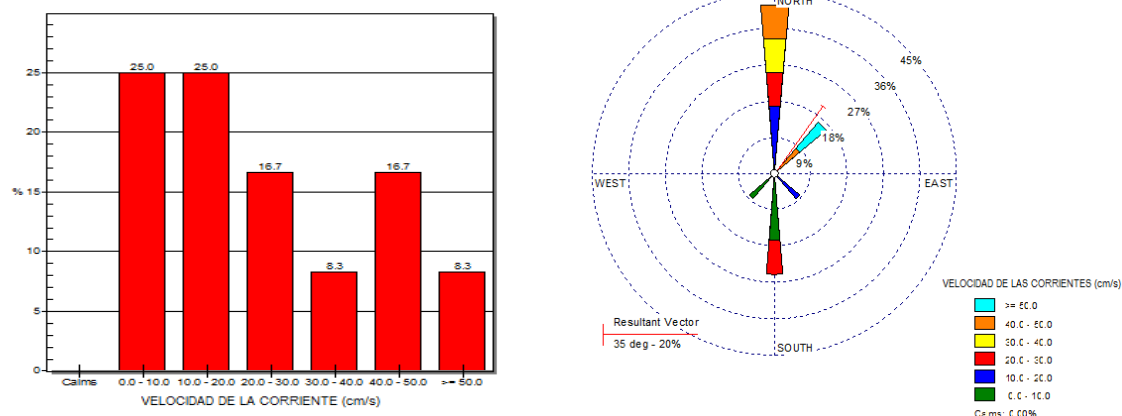
Figura B.9 Comportamiento de las corrientes en Playa Punta Arenas, marea ascendente y descendente. Junio 2009.

Figura B.10 Histogramas de velocidades y rosas de direccion de las corrientes en superficie, sub-superficie y fondo. Metodo Lagrangiano. Abril y Junio 2009.

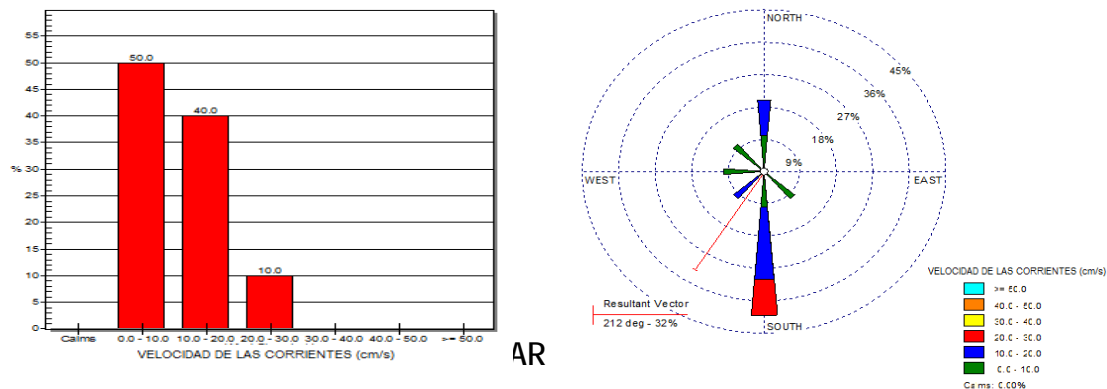
Superficie



Sub Superficie



Fondo



B.5

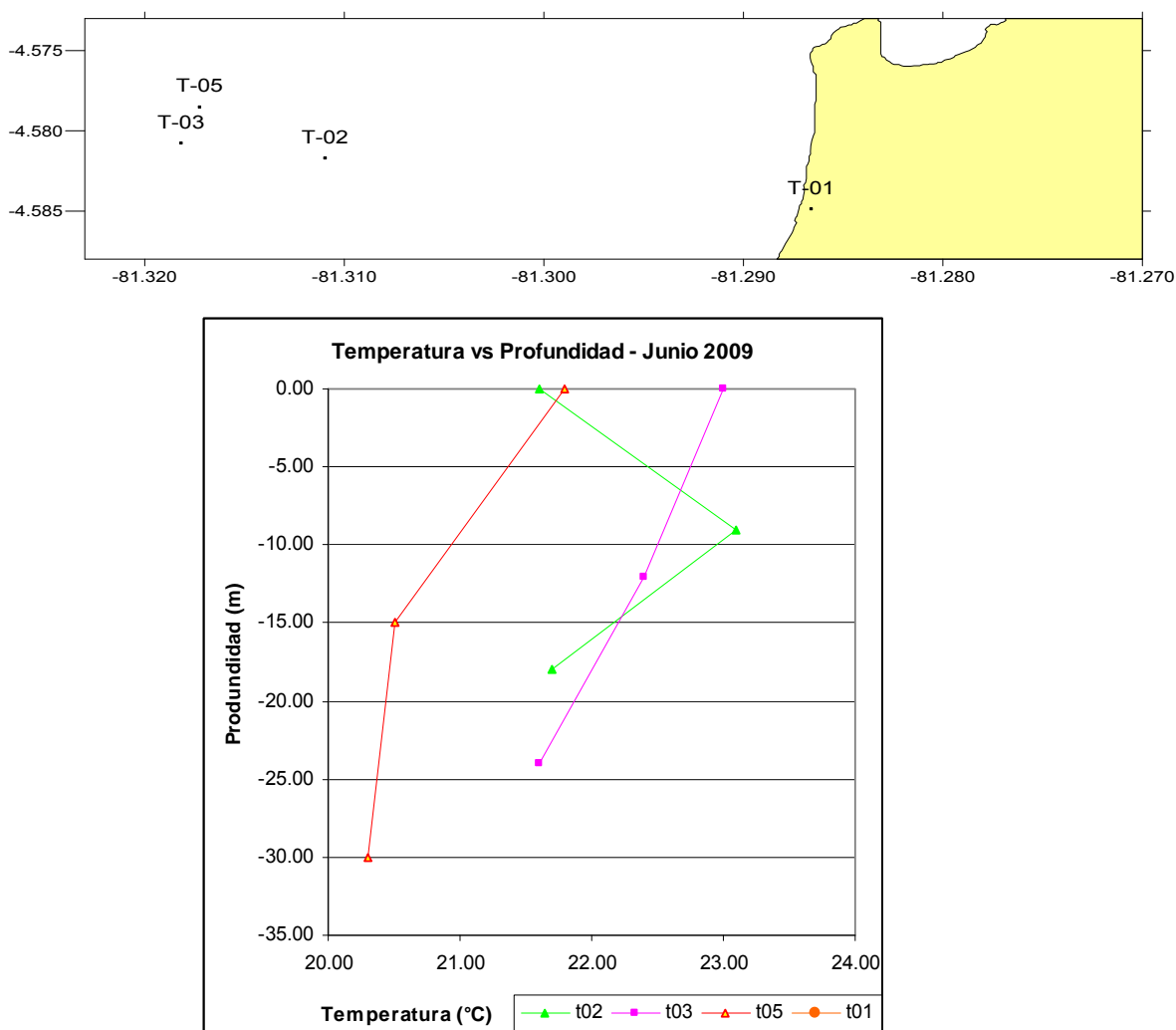
AR

B.5.1 TEMPERATURA DEL MAR

Los datos de la temperatura superficial del Mar fueron extraídos de trabajos de campo realizados en 2009, 2008, 2001, 1995, 1996 y 1997:

En la figura B.11 se observase muestra la ubicación de 4 estaciones y la estructura térmica vertical de junio 2009, en la que se observa que 1 de las estaciones se encuentra ubicada en costa con temperatura de 17°C y las 3 restantes muestran su distribución vertical térmica, con temperaturas entre 21.5 y 23.0°C en superficie y en aproximadamente 25m de profundidad, oscilan entre 20.0° y 22.0°C.

Figura B.11 Ubicación de las estaciones y estructura termina vertical Junio 2009



En el 2008 la temperatura oscila entre 21.0°C en la zona costera de Punta Arenas y oscila entre 23.0° y 24.0°C en zonas más alejadas de costa. Tanto es superficie como en fondo.

Figura B.12 Temperatura del Mar. En superficie, sub-superficie y fondo. 2008.

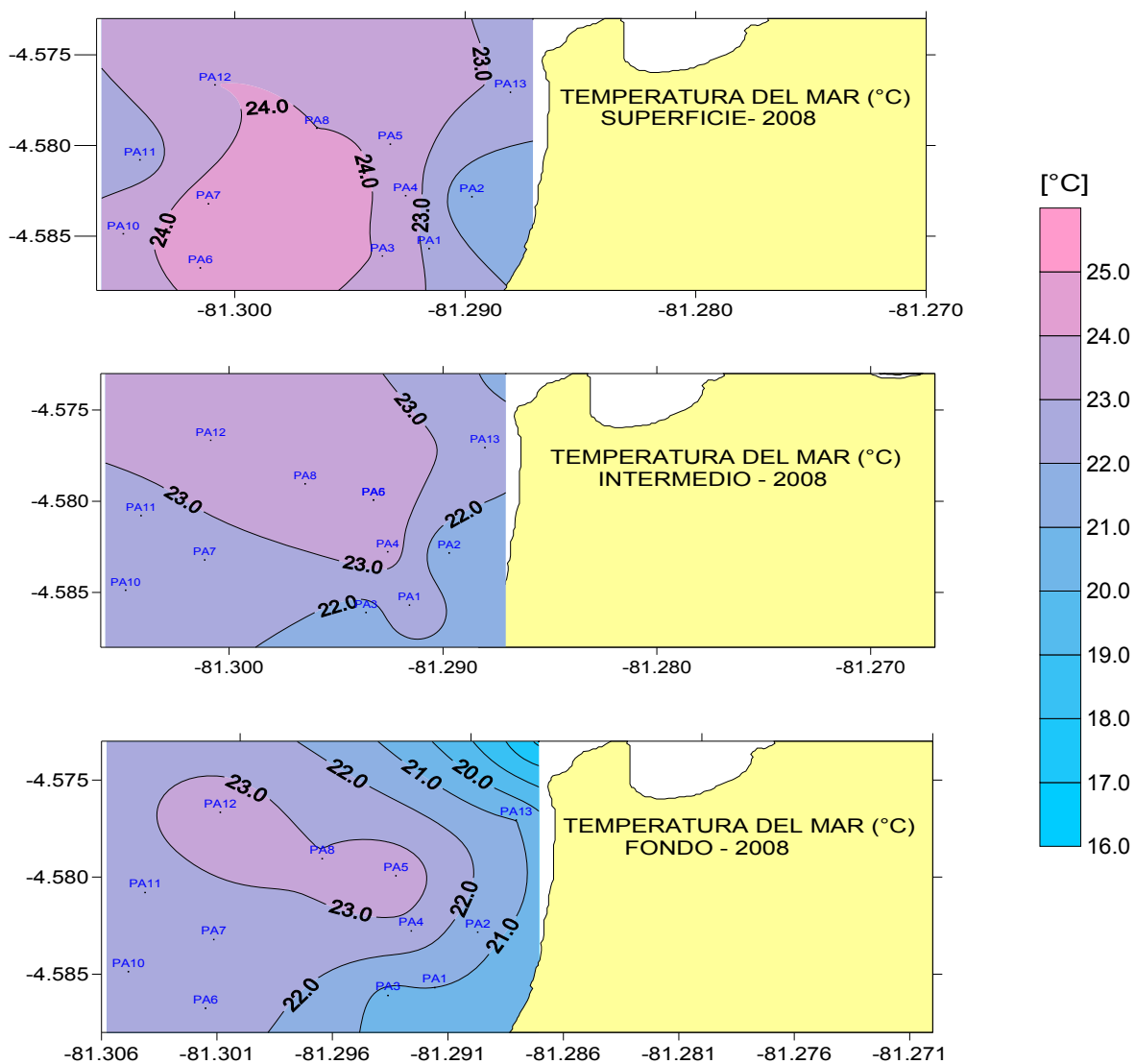
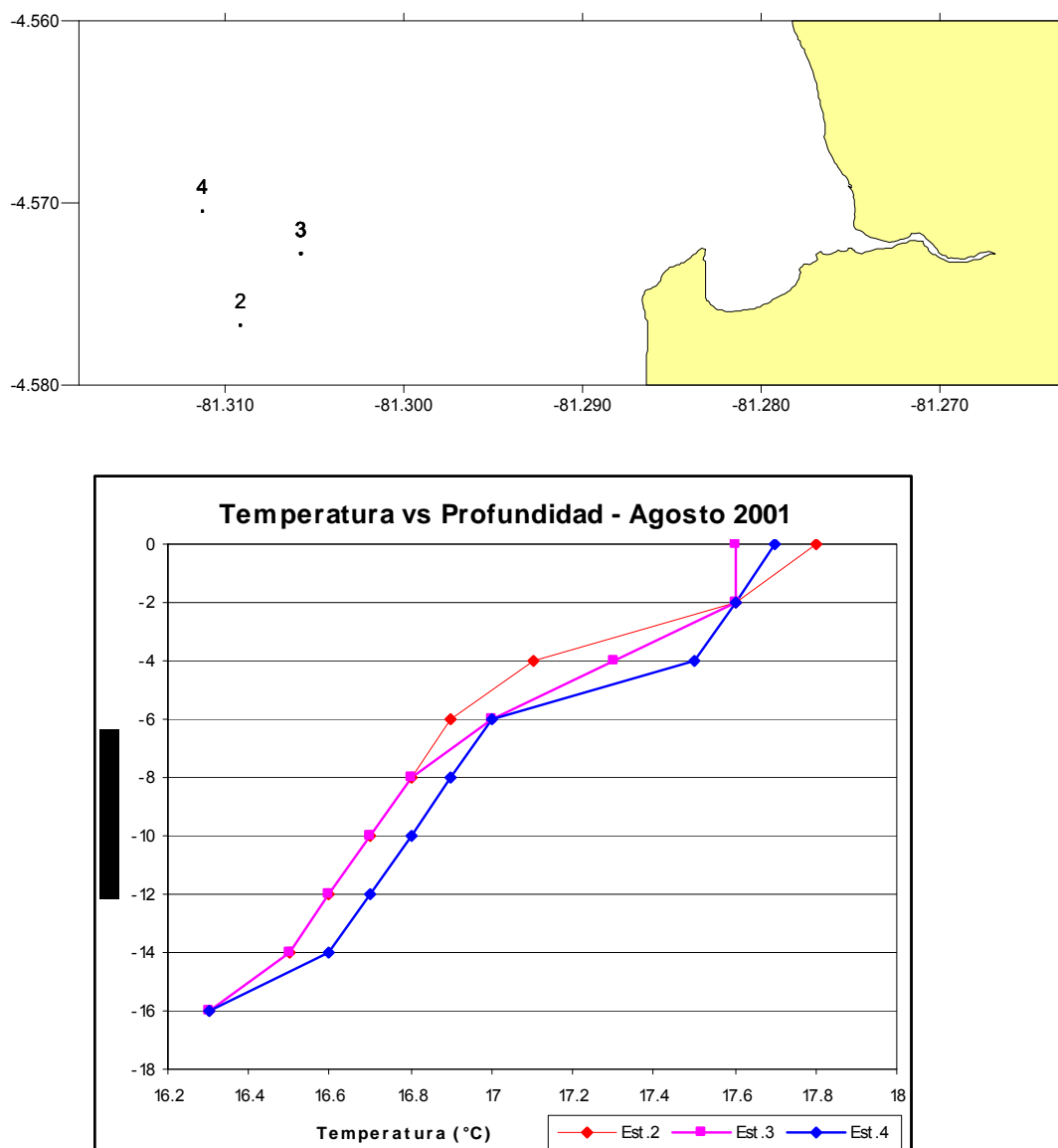


Figura B.13 Estructura Térmica vertical. Agosto 2001

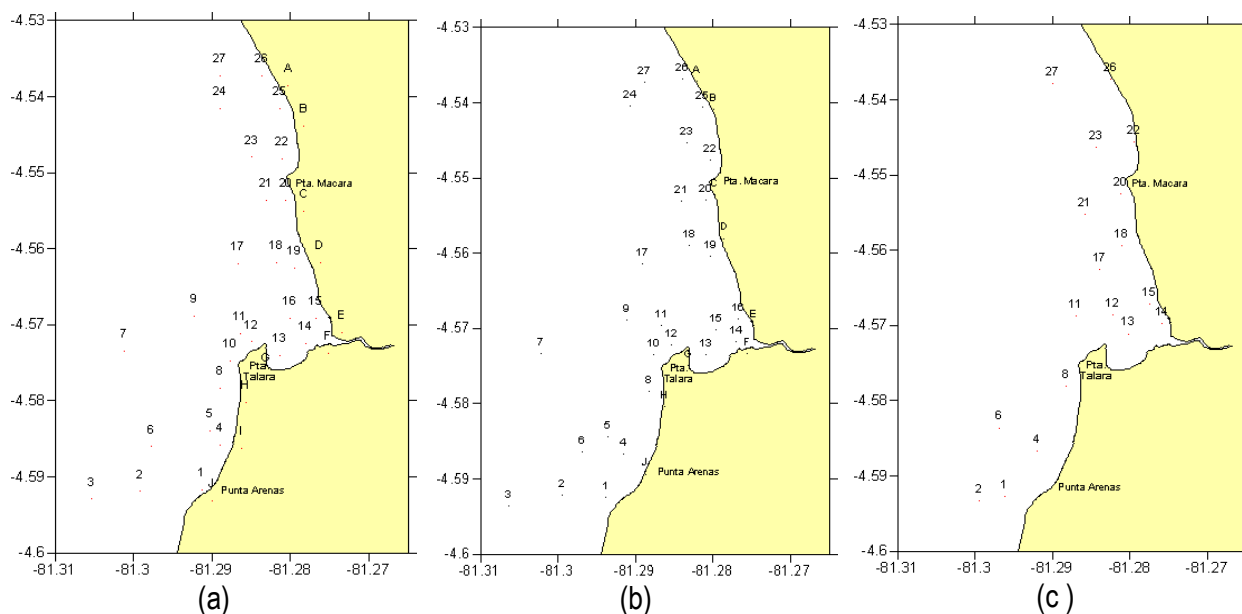


De estudios técnicos realizados por el IMARPE, se muestran información de temperatura y salinidad, según:

- “Evaluación de la calidad del medio marino en la bahía de Tarma”, Setiembre 1995, Instituto del Mar del Perú (IMARPE).
- “Contaminación Marina en las bahías de Paita y Tarma en setiembre 1996”, Instituto del Mar del Perú (IMARPE).
- “Evaluación de la calidad del medio costero en la bahía de Tarma y aguas adyacentes Abril 1997”, Instituto del Mar del Perú (IMARPE).

Figura B.14 Ubicación de las estaciones de muestreo. Setiembre 1995, (b) Setiembre 1996 y (c) Abril

1997



En la figura B.12, se observa las estaciones de muestreo tomadas en cada uno de los informes indicados anteriormente.

En la figuras B.13 y B.14 se observa la variación espacial de la temperatura en superficie y en fondo, la cual va incrementando al aproximarse a costa, donde los valores mas altos se presentan entre Malpaso y la ensenada de Talara, disminuyendo ligeramente hacia el sur. Este incremento de temperaturas en zonas cercanas a costa, podría deberse a la gran actividad portuaria que se desarrolla en el área y a descargas que tengan una gradiente térmico superior, así como también podría deberse al intercambio térmico entre el océano y el continente, lo cual podría generar corrientes verticales.

Dentro del Puerto de Talara y en Malpaso se observan valores que oscilan entre 17.0 y 21.0°C, mientras que en la zona sur del puerto en playa Punta Arenas es de 16.5 a 19.5°C.

Figura B.15 Temperatura Superficial del Mar (°C). Bahía Talara y Playa Punta Arenas. Setiembre 1995, (b) Setiembre 1996 y (c) Abril 1997

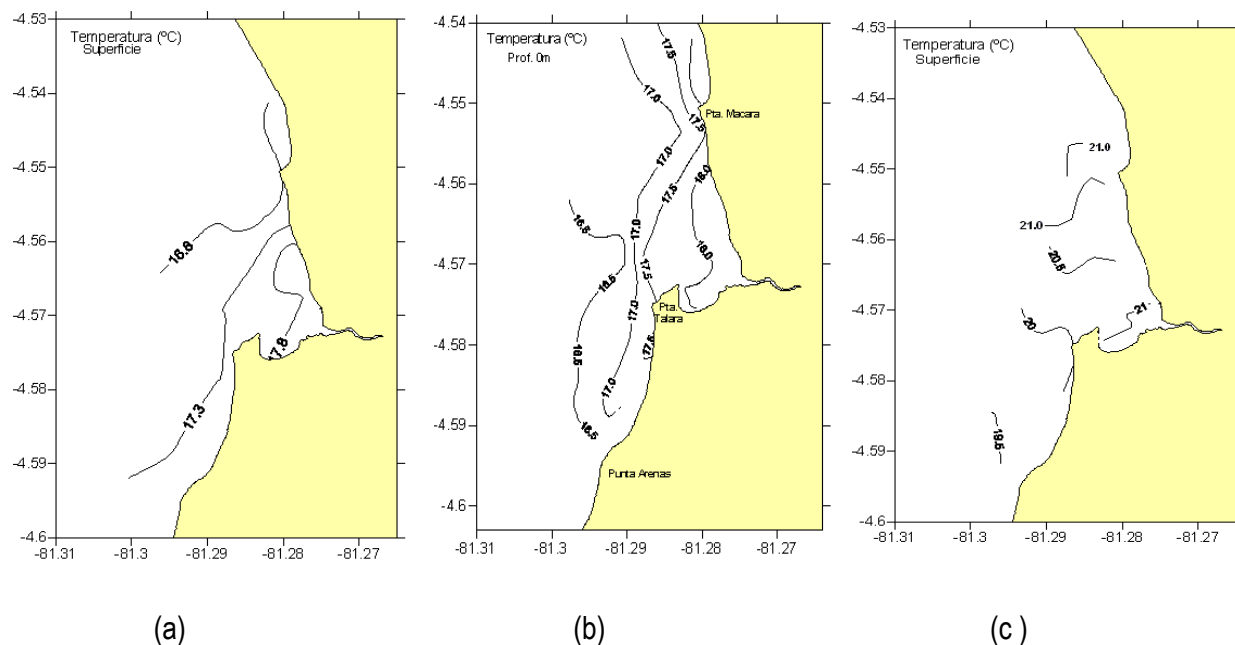
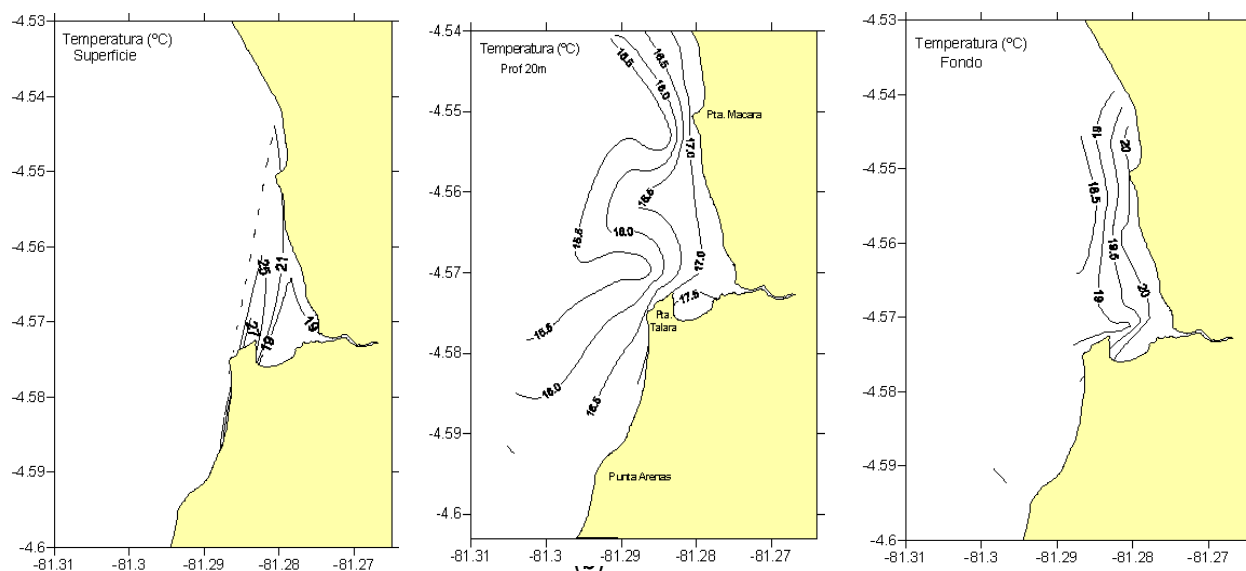


Figura B.16 Temperatura de Fondo (°C). Bahía Talara y Playa Punta Arenas. Setiembre 1995, (b) Setiembre 1996 y (c) Abril 1997



B.5.2 SALINIDAD DEL MAR

Los datos de Salinidad del mar para la zona acuática de la bahía de Talara y Punta Arenas, fue extraída de los informes técnicos del IMARPE de los años 1995, 1996 y 1997 mencionados anteriormente. De los datos de estos informes se pudo graficar lo siguiente:

En la figuras B.17 y B.18, se observa salinidad media de 35.00UPS en el área acuática de la playa Punta Arenas, para los años 1995, 1996 y 1997.

En la figura B.19, para el año 2008, se observan una salinidad media de 34.00UPS en la zona alejada de costa, mientras que en la zona costera, se observa salinidades de 33.80 UPS, 34.30 y 33.80 UPS en superficie, sub-superficie y fondo respectivamente.

Figura B.17 Salinidad Superficial del Mar (UPS). Bahía Talara y Playa Punta Arenas. Año 1995, (b) Año 1996 y (c) Año 1997

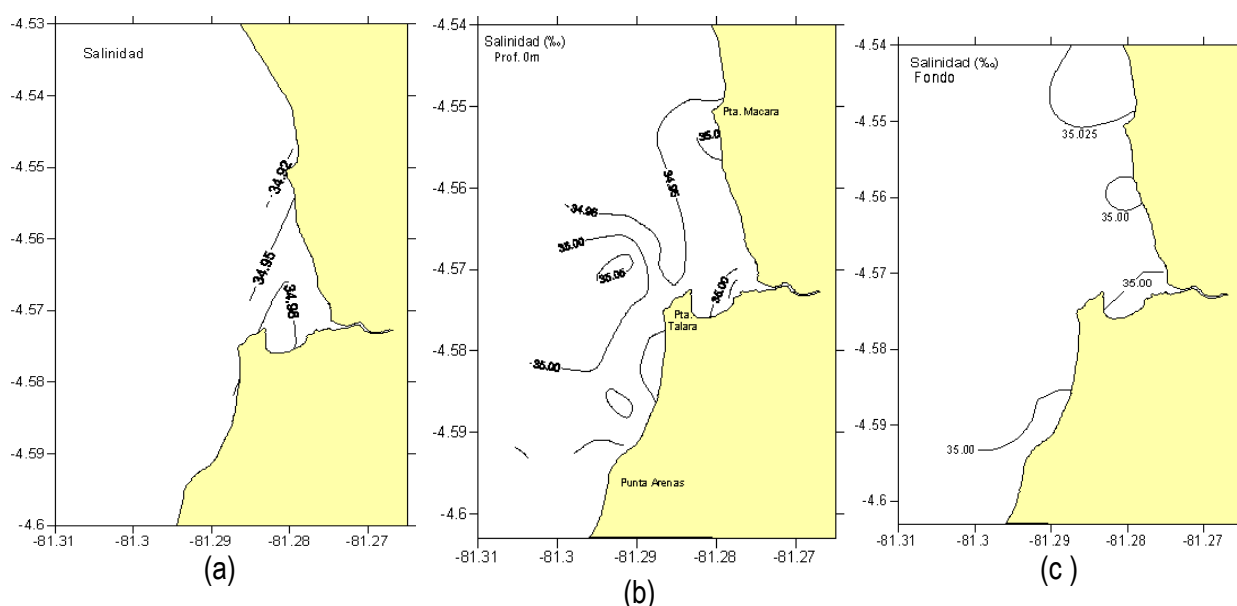
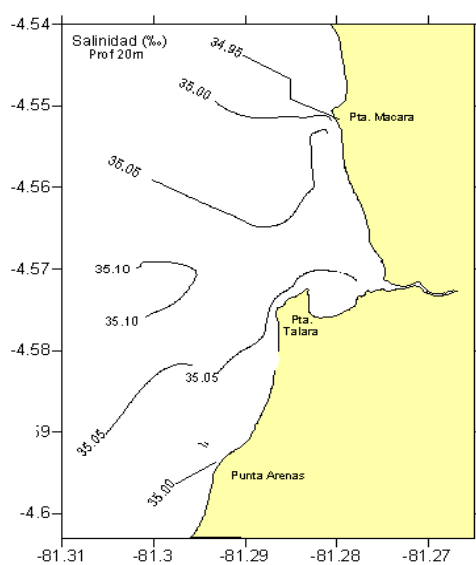
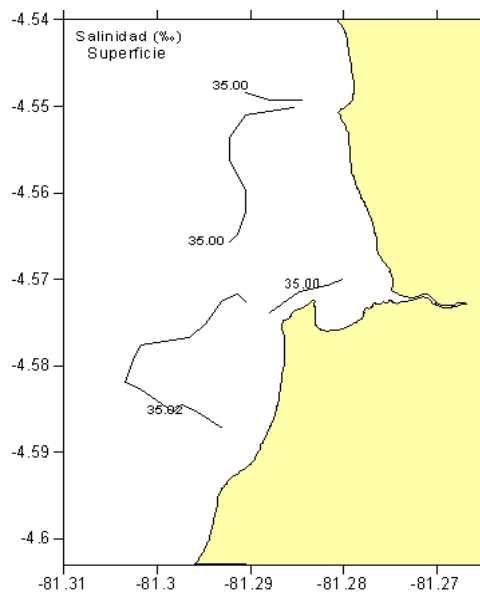


Figura B.18 Salinidad de Fondo (UPS). Bahía Talara y Playa Punta Arenas. (a)1996, (b) 1997

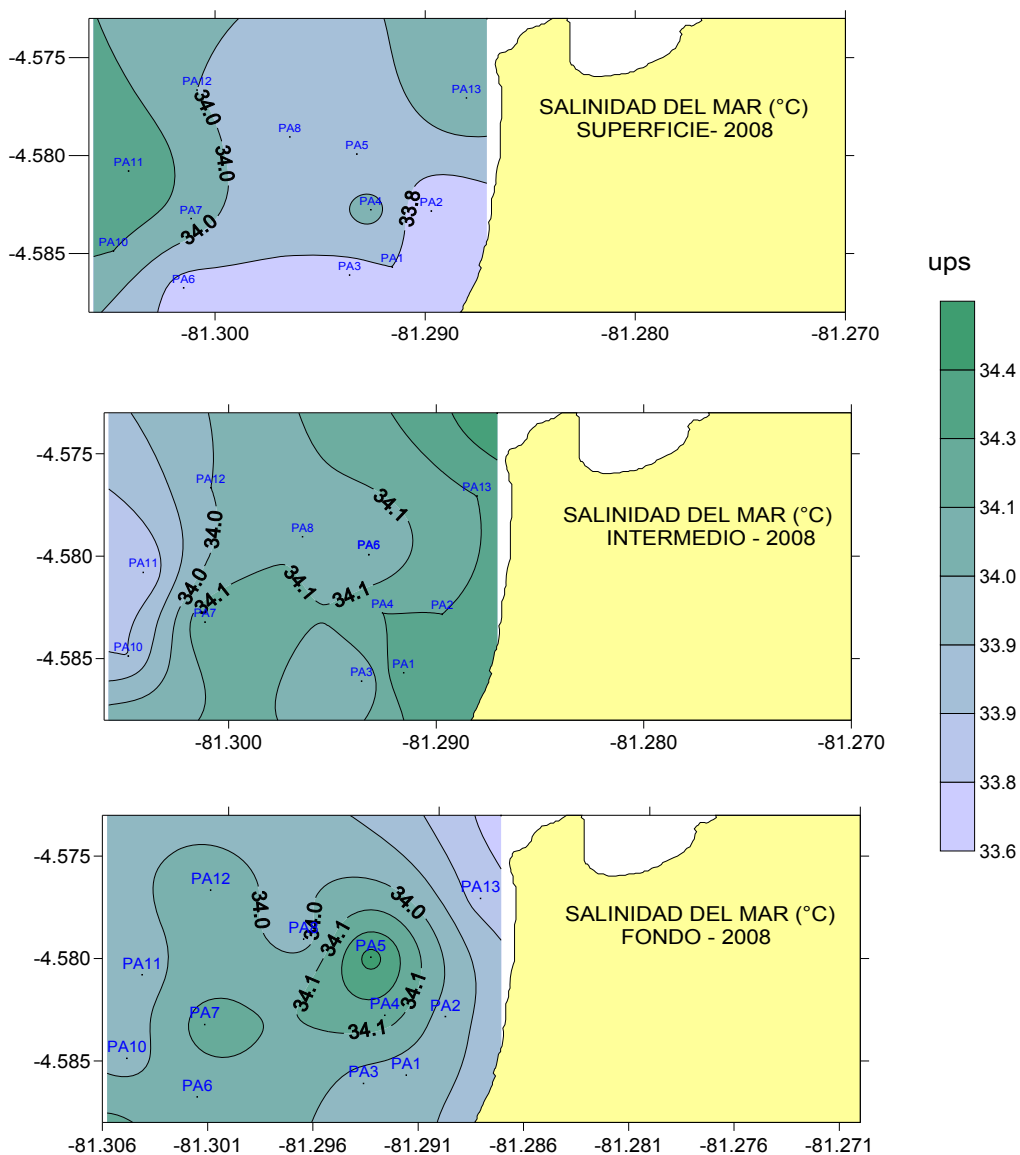


(a)



(b)

Figura B.19 Salinidad del Mar. En superficie, subsuperficie y fondo en playa Punta Arenas. 2008.



ANEXO C

C.1 MODELOS EMPLEADOS

Los modelos empleados fueron el Modelo de Circulación y dispersión de contaminantes, los cuales se detallan a continuación:

C.1.1 MODELO DE CIRCULACIÓN

Se empleo el modelo numérico de la Universidad de Princeton, "Princeton Ocean Model", más conocido por la comunidad científica internacional como POM. El POM es un modelo tridimensional de circulación oceánica basado en la integración numérica de las ecuaciones primitivas que rigen la dinámica de la circulación oceánica. El modelo fue desarrollado por Alan Blumberg y George L. Mellor en la década de los 70 en el programa de ciencias atmosféricas del Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) de los Estados Unidos de Norteamérica.

El código fuente del modelo (programa principal y subrutinas) está escrito en lenguaje de programación FORTRAN 77 y se puede trabajar en varios sistemas operativos como UNIX, LINUX e inclusive en WINDOWS.

El modelo es de dominio público y su código fuente se encuentra disponible en la siguiente dirección web:

<http://www.aos.princeton.edu.WWWPUBLIC/htdocs.pom>

Hoy en día el modelo es usado por cerca de medio millar de investigadores en más de 35 países del mundo.

En su versión completa, el POM es un modelo tridimensional que integra las ecuaciones primitivas mediante métodos de diferencias finitas de forma explícita en el plano horizontal e implícita en la vertical, definiéndose así dos modos de cálculo. El primero es el modo externo (barotrópico¹ y es bidimensional) y el segundo es el modo interno (baroclínico² y es tridimensional).

Se pueden resumir las principales características del modelo de la siguiente manera:

- (a) Utiliza un sistema de coordenadas sigma en la vertical y las coordenadas "x" e "y" permanecen inalteradas, y la coordenada z es convertida a coordenada σ , que es escalonada de acuerdo con la profundidad de la columna de agua. Específicamente tenemos:

$$\sigma = \frac{z - \eta}{D} \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

$$D(x, y, t) = H(x, y) + \eta(x, y, t),$$

¹ En el modo barotrópico, la distribución de densidad no es influenciada por la forma de las superficies isobáricas.

² En la condición baroclínica, las variaciones laterales de la densidad afectan la forma de las superficies isobáricas.

D : profundidad local (m)
 H : profundidad media local (m)
 η : elevación de la superficie(m)
 $\sigma = 0$ cuando $z = \eta$
 $\sigma = -1$ cuando $z = -H$

- (b) Modelo utiliza un esquema de diferencias finitas con una grilla "Arakawa tipo C".
- (c) El algoritmo del modelo posee un paso de tiempo dividido¹, lo cual permite subdividir al modelo en un modo externo el cual tiene un paso de tiempo menor que el modo interno; ambos pasos de tiempo están basados en la condición de estabilidad CFL (Courant-Friedrich-Levy)
- (d) La integración horizontal con respecto al tiempo es explícita y en cuanto a la vertical es implícita, esto elimina la restricción temporal para la coordenada vertical y permite el uso de una resolución más fina de las capas de Ekman de superficie y de fondo.
- (e) Contiene un submodelo turbulento de cierre de segundo orden que calcula los coeficientes de mezcla vertical, modelando así de manera más real las capas de Ekman.
- (f) El uso de las coordenadas sigma facilita la inclusión de la batimetría real, ya que tanto la elevación de la superficie en cuanto a topografía de fondo pasan a ser superficies coordenadas. Los problemas asociados a las dificultades computacionales en regiones de grandes gradientes de topografía, como el talud continental, son considerablemente reducidos.

Gracias a estas características, el POM es frecuentemente utilizado para estudios de circulación en regiones rasas y con fuertes gradientes batimétricos, como es el caso de zonas costeras.

¹ Esta técnica de separación de tiempos de cálculo en modelamiento numérico del océano y atmósfera es conocida como "time splitting", la cual es empleada por numerosos modelos numéricos que se basan en el método de diferencias finitas para la solución de las ecuaciones gobernantes.

C.1.2 MODELO DE DISPERSIÓN

El fenómeno de la dispersión es gobernado por la ecuación de conservación de concentración, la que se puede expresar de la siguiente manera:

$$\underbrace{\frac{\partial c}{\partial t}}_I + \underbrace{u \frac{\partial c}{\partial x}}_{II} + \underbrace{v \frac{\partial c}{\partial y}}_{III} + \underbrace{w \frac{\partial c}{\partial z}}_{IV} = \underbrace{Q(x_0, y_0, t)}_V + \underbrace{\frac{2.3}{T90} c}_{VI} + \varepsilon h \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + \varepsilon_v \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$$

Donde:

- I: Representa la variación temporal de la concentración
- II: Términos de advección
- III: Fuente emisora de contaminante
- IV: Término de decaimiento
- V: Difusión horizontal
- VI: Difusión vertical

El modelo de dispersión será anidado con el modelo de circulación POM, por lo que es necesario transformar la ecuación de dispersión a coordenadas sigma. Empleando la ley de conversión tenemos que cualquier variable "G" puede ser convertida a coordenadas sigma mediante las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial x} &= \frac{\partial G}{\partial \sigma} - \frac{\partial G}{\partial \sigma} \left(\frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial G}{\partial y} &= \frac{\partial G}{\partial \sigma} - \frac{\partial G}{\partial \sigma} \left(\frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial G}{\partial z} &= \frac{1}{D} \frac{\partial G}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial G}{\partial t} &= \frac{\partial G}{\partial t} - \frac{\partial G}{\partial \sigma} \left(\frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) \end{aligned}$$

Luego la ecuación de dispersión quedara expresada de la siguiente manera:

$$\frac{\partial(c)}{\partial t} + \frac{\partial(cu)}{\partial x} + \frac{\partial(cv)}{\partial y} + \frac{1}{D} \frac{\partial(cw)}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\varepsilon h}{D^2} \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) + \frac{2.3}{T90} c + Q(x_0, y_0, t) + K_h \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + \frac{K_v}{h^2} \frac{\partial^2 c}{\partial \sigma^2}$$

Tal como se observa de la ecuación existe una dependencia del modelo de dispersión con el modelo de circulación, ya que la dispersión de contaminantes está fuertemente relacionada a la intensidad de las corrientes marinas en la zona de interés.