

**Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada**



**DIFUSION Y DISPERSION DE CALOR DE LA
DESCARGA HIDROTERMAL DE UNA
CENTRAL TERMoeLECTRICA**

**TESIS
MAESTRIA EN CIENCIAS**

Biol. J. RODOLFO RENDON VILLALOBOS

ENSENADA B.C. MEXICO JULIO DE 1996

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA**

**DIVISIÓN DE OCEANOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE ECOLOGÍA MARINA**

**DIFUSIÓN Y DISPERSIÓN DE CALOR DE LA
DESCARGA HIDROTERMAL DE UNA CENTRAL
TERMOELÉCTRICA**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado
de **MAESTRO EN CIENCIAS** presenta:

BIOL. J. RODOLFO RENDÓN VILLALOBOS

Ensenada, Baja California, México. Julio de 1996.

RESUMEN de la tesis de J. Rodolfo Rendón Villalobos presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** en **ECOLOGÍA MARINA**. Ensenada, Baja California, México. Julio de 1996.

DIFUSIÓN Y DISPERSIÓN DE CALOR DE LA DESCARGA HIDROTERMAL DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA

Este estudio describe los resultados de la simulación numérica del comportamiento hidrodinámico de la descarga al mar del agua de enfriamiento de la Central Termoeléctrica Tuxpan (CTT) bajo dos distintas condiciones ambientales meteorológicas y oceanográficas, a saber: Caso I, viento variable de dirección SW con intensidad promedio igual a 3 m s^{-1} y Caso II, viento variable del NW con intensidad promedio igual a 11.10 m s^{-1} . Las simulaciones numéricas se realizaron mediante un modelo tridimensional de circulación costera y difusión y dispersión de calor.

El análisis estadístico del banco de datos de intensidad y dirección del viento medido del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 1983, indica que el número de valores de mayor ocurrencia se presentó dentro del intervalo de 180° a 315° . Por lo mismo, el efecto del viento proveniente del sector sur genera un patrón de circulación superficial de flujo norte que alejan de la obra de toma el agua caliente descargada. En contraste, el viento que proviene del sector norte genera corrientes superficiales de flujo sur que impulsa el efluente hidrotérmico hacia la obra de toma.

Las comparaciones entre los resultados de las simulaciones numéricas y los datos de campo indican que, para una variedad de condiciones ambientales meteorológicas y oceanográficas representativas del Sitio Tuxpan (ST), el modelo

simula correctamente los patrones de difusión y dispersión superficial de los efluentes medidos los días 19, 20 y 21 de agosto de 1992 (Caso I) y 26 de noviembre de 1992 (Caso II). La precisión promedio con la cual el modelo predice las áreas de impacto de los efluentes descargados en el ST es de $\pm 11\%$.

Para todos los casos analizados, el tamaño real del área de impacto térmico que podría alterar substancialmente el ecosistema marino no fue mayor a 0.1 Km^2 . Los posibles efectos ecológicos que podrían resultar como consecuencia de los gradientes térmicos inducidos por la descarga superficial de agua caliente sólo podrían ser considerados de significancia local.

Los perfiles verticales simulados del campo de temperatura indican que el efluente se comporta como un cuerpo natátil que no rebasa los 3.5 m de profundidad. Esta flotabilidad del efluente es consecuencia de su baja densidad y del pequeño número de Froude ($F_r \ll 1$) característico del efluente en la descarga de la CTT.

DIFFUSION AND DISPERSION HEAT OF HYDROTHERMAL DISCHARGE FROM POWER PLANT

ABSTRACT

This study describe the numerical simulation results of hydrodynamical behavior of the surface discharge cooling water to the sea incoming from the Tuxpan Power Plant under two different meteorological and oceanographic conditions; Case I, southwest variable winds average speeds of 3 m s^{-1} and Case II, northwest variable winds average speeds of 11.10 m s^{-1} . The numerical simulations were made using a three-dimensional model of coastal circulation and heat exchange

The statistical analysis of the wind speed and direction time series measured from January 1, 1981 to December 31, 1983, shows that the larger part of the winds were predominantly from 180° to 315° . Therefore, the southerly winds induce a sea surface circulation towards the north which move the discharged heat water away from the intake. On the contrary, the north winds drives the hydrothermal effluent towards the intake.

Comparisons between the numerical simulation results and field data show that under different meteorological and oceanographic conditions, representative of the Tuxpan Site, the model correctly predicts the hydrothermal effluents surface diffusion and dispersion measured on August 19, 20 and 21, 1992 (Case I) and November 26, 1992 (Case II). The model predicts the extent of the impacted areas with cooling water with a precision of $\pm 11\%$.

For all analyzed cases, the real size of the impacted areas that might have adverse effects on the marine ecosystems was not bigger than 0.1 km^2 . Thus, these possible adverse effects are considered to be of local significance only.

The simulated vertical profiles of temperature show that the cooling water discharged remains mostly o the surface of the receiving water mass and reaches a maximum depth of 3.5 m. This floatability is a consequence of the low density and small Froude number ($F_r \ll 1$), at the discharge, that characterizes the Tuxpan Power Plant effluent.

DEDICATORIAS

Con cariño para mis padres, **Magdalena Villalobos** y **Domingo Rendón**, quienes con su apoyo y esfuerzo hicieron posible mi formación.

A mi esposa, **Amanda**, por su comprensión, cariño y apoyó con lo cual hicieron posible la llegada de este momento.

A mis hijos **Mitzi Aline** y **Jesús Rafael** que han llenado de alegría mi familia y han sido motivo de superación constante.

A mis hermanos **Velda**, **Thelma**, **Ulises**, **Varinia**, **Sandra** y **América**, que esto sirva de ejemplo para que puedan seguir adelante con sus estudios y que nada es difícil en la vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. **Francisco Vicente-Vidal** y al Dr. **Víctor M. Vicente-Vidal**, por el apoyo que me han brindado para que esta tesis pudiera concluirse. Por su dedicación a la revisión de este trabajo.

Al Dr. **Hector A. Echavarría** y a la M. en C. **Elena Solana**, por su confianza y apoyo brindado durante la realización de este trabajo. Gracias también por su labor de revisión y sugerencias hechas a este trabajo.

Al M. en C. **Francisco Suárez**, por su tiempo y dedicación a la revisión de este trabajo.

Al M. en C. **José María Pérez Molero**, por sus valiosas y oportunas sugerencias, por dedicarme su tiempo para trasmitirme parte de sus conocimientos que hicieron posible que se desarrollara gran parte de este trabajo de tesis.

Al Ing. **Lorenzo Zambrano**, Oc. **Antonio Salinas**, M. en C. **Pedro Fco. Rodríguez**, M. en C. **Josué Portilla**, M. en C. **Zulma García**, compañeros del Grupo de Estudios Oceanográficos del IIE, quienes me apoyaron incondicionalmente dedicándome parte de su valioso tiempo.

Al Ing. **Miguel Salaces Arredondo**, por su disponibilidad, apoyo y buena voluntad.

A mis compañeros de generación, **Yolanda, Alejandra, Lupita, Dora, Maricela, Elia, Salomé, Soledad, Lety, Juan Gabriel, Miguel Díaz, Hector y Miguel Martínez**, con quienes compartí gratos momentos y me brindaron su amistad incondicional en todo momento durante mi estancia estudiantil.

Al **Instituto de Investigaciones Eléctricas** por su continuo apoyo para realizar mis estudios de maestría.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y Banco de México** por su apoyo económico brindado a través del programa de becas.

Al **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada** y a todos los integrantes del **Departamento de Ecología** que de alguna manera contribuyeron.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. El medio marino como cuerpo receptor	1
I.2. Antecedentes	4
I.3. Objetivo	6
I.4. Área de estudio	7
II. MATERIAL Y MÉTODO	9
II.1. Datos de campo	9
II.1.1. Temperatura	9
II.1.2. Batimetría	11
II.1.3. Viento	12
II.2. Modelo numérico	15
II.2.1. Descripción del modelo	15
II.2.2. Solución numérica	19
II.2.3. Esquema de solución	27
II.2.4. Condiciones de frontera	27
II.3. Modelación	31
II.3.1. Datos de entrada	31
II.3.2. Descripción de los casos	35
II.4. Verificación del modelo	35
III. RESULTADOS	37
III.1. Datos de campo	37
III.1.1. Temperatura	37
III.1.2. Batimetría	38
III.1.3. Viento	39
III.2. Modelación matemática	45
III.2.1. Caso I.	45
III.2.1.1. Campo de circulación superficial	45

CONTENIDO (continuación)

	<u>Página</u>
III.2.1.2. Campo de circulación subsuperficial	45
III.2.1.3. Distribución vertical	50
III.2.1.4. Campo de temperatura	64
III.2.1.4.1. Distribución horizontal	64
III.2.1.4.1 Distribución vertical	75
III.2.2. Caso II.	84
III.2.2.1. Campo de circulación superficial	84
III.2.2.2. Campo de circulación subsuperficial	84
III.2.2.3. Distribución vertical	85
III.2.2.4. Campo de temperatura	90
III.2.2.4.1. Distribución horizontal	90
III.2.2.4.2. Distribución vertical	94
IV. DISCUSIÓN	97
V. CONCLUSIÓN	105
LITERATURA CITADA	107

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
1	Localización geográfica del área de estudio.	8
2	Campo de temperatura superficial medido a las 12 horas del día 19 de agosto de 1992.	9
3	Campo de temperatura superficial medido a las 24 horas del día 19 de agosto de 1992.	10
4	Campo de temperatura superficial medido a las 24 horas del día 20 de agosto de 1992.	10
5	Campo de temperatura superficial y batimetría medidos el 21 de agosto de 1992.	11
6	Campo de temperatura superficial y batimetría medidos el 26 de noviembre de 1992.	12
7	Serie de tiempo de los datos horarios de intensidad del viento medido en el SC del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 1983.	14
8	Serie de tiempo de los datos horarios de dirección del viento medido en el SC del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 1983.	14
9	Signos de convección y sistema coordinado utilizado en el sistema de ecuaciones del modelo.	17
10	Unidad básica de la malla tridimensional en la cual se presentan los valores de presión y temperatura así como las componentes de velocidad.	20
11	Esquema donde se presentan condiciones de frontera para la geometría típica de los casos estudiados.	28

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
12	Configuración de la malla tridimensional en donde se resuelven las ecuaciones del modelo. En el punto (18,1) se localiza la descarga (+) y en (29,5 y 29,6) la toma respectivamente.(Escala en metros).	33
13	Esquema que presenta el arreglo de los nodos en la vertical para una malla tridimensional.	34
14	Arreglo espacial de las variables dentro de la malla, en donde: ●= u, v, ; $\Delta = T, P_s$; $\blacktriangle = T$; $\square = w$.	34
15	Estadística de la intensidad del viento medido en el Sitio Cazones durante el periodo del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 1983.	40
16	Estadística de la dirección del viento medido en el Sitio Cazones durante el periodo del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 1983.	41
17	Campo de circulación superficial después de 36 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Corrientes en sigma = 1).	46
18	Campo de circulación superficial después de 48 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Corrientes en sigma = 1).	47
19	Campo de circulación superficial después de 72 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Corrientes en sigma = 1).	48
20	Campo de circulación superficial después de 80 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Corrientes en sigma = 1).	49
21	Campo de circulación subsuperficial después de 36 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Profundidad Z = 1).	52

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
22	Campo de circulación subsuperficial después de 48 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Profundidad $Z = 1$).	53
23	Campo de circulación subsuperficial después de 72 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Profundidad $Z = 1$).	54
24	Campo de circulación subsuperficial después de 80 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Profundidad $Z = 1$).	55
25	Distribución vertical del campo de velocidad después de 36 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Tansecto $m = 18$.	56
26	Distribución vertical del campo de velocidad después de 48 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Tansecto $m = 18$.	57
27	Distribución vertical del campo de velocidad después de 72 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Tansecto $m = 18$.	58
28	Distribución vertical del campo de velocidad después de 80 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Tansecto $m = 18$.	59
29	Distribución vertical del campo de velocidad después de 36 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Transecto $n = 5$.	60
30	Distribución vertical del campo de velocidad después de 48 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Transecto $n = 5$.	61
31	Distribución vertical del campo de velocidad después de 72 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Transecto $n = 5$.	62
32	Distribución vertical del campo de velocidad después de 80 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Transecto $n = 5$.	63

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
33	Distribución superficial de temperatura después de 36 horas de simulación. La isolínea externa del efluente corresponde al valor mínimo de temperatura.	67
34	Distribución superficial de temperatura después de 48 horas de simulación. La isolínea externa del efluente corresponde al valor mínimo de temperatura.	67
35	Distribución superficial de temperatura después de 72 horas de simulación. La isolínea externa del efluente corresponde al valor mínimo de temperatura.	68
36	Distribución superficial de temperatura después de 80 horas de simulación. La isolínea externa del efluente corresponde al valor mínimo de temperatura.	68
37	Comparación de las plumas térmicas simuladas (36 horas de simulación) y aquellas medidas a las 12 horas del día 19 de agosto de 1992.	69
38	Comparación de las plumas térmicas simuladas (48 horas de simulación) y aquellas medidas a las 24 horas del día 19 de agosto de 1992.	69
39	Comparación de las plumas térmicas simuladas (72 horas de simulación) y aquellas medidas a las 24 horas del día 20 de agosto de 1992.	70
40	Comparación de las plumas térmicas simuladas (80 horas de simulación) y aquellas medidas a las 8 horas del día 21 de agosto de 1992.	70
41	Comparación entre las áreas de las isotermas simuladas (36 horas de simulación) y aquellas medidas a las 12 horas del día 19 de agosto de 1992.	71

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
42	Comparación entre las áreas de las isothermas simuladas (48 horas de simulación) y aquellas medidas a las 24 horas del día 19 de agosto de 1992.	71
43	Comparación entre las áreas de las isothermas simuladas (72 horas de simulación) y aquellas medidas a las 24 horas del día 20 de agosto de 1992.	72
44	Comparación entre las áreas de las isothermas simuladas (80 horas de simulación) y aquellas medidas a las 8 horas del día 21 de agosto de 1992.	72
45	Comparación entre los valores de temperatura simulados (36 horas de simulación) y aquellos medidos a las 12 horas del día 19 de agosto de 1992.	73
46	Comparación entre los valores de temperatura simulados (48 horas de simulación) y aquellos medidos a las 24 horas del día 19 de agosto de 1992.	73
47	Comparación entre los valores de temperatura simulados (72 horas de simulación) y aquellos medidos a las 24 horas del día 20 de agosto de 1992.	74
48	Comparación entre los valores de temperatura simulados (80 horas de simulación) y aquellos medidos a las 8 horas del día 21 de agosto de 1992.	74
49	Distribución vertical de temperatura después de 36 horas de simulación. Caso I, 19 de agosto de 1992. Transecto $m = 16$.	77
50	Distribución vertical de temperatura después de 48 horas de simulación. Caso I, 19 de agosto de 1992. Transecto $m = 16$.	77

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
51	Distribución vertical de temperatura después de 72 horas de simulación. Caso I, 20 de agosto de 1992. Transecto $m = 16$.	78
52	Distribución vertical de temperatura después de 36 horas de simulación. Caso I, 19 de agosto de 1992. Transecto $m = 18$.	78
53	Distribución vertical de temperatura después de 48 horas de simulación. Caso I, 19 de agosto de 1992. Transecto $m = 18$.	79
54	Distribución vertical de temperatura después de 72 horas de simulación. Caso I, 20 de agosto de 1992. Transecto $m = 18$.	79
55	Distribución vertical de temperatura después de 80 horas de simulación. Caso I, 21 de agosto de 1992. Transecto $m = 18$.	80
56	Distribución vertical de temperatura después de 80 horas de simulación. Caso I, 21 de agosto de 1992. Transecto $m = 21$.	80
57	Distribución vertical de temperatura después de 36 horas de simulación. Caso I, 19 de agosto de 1992. Transecto $n = 2$.	81
58	Distribución vertical de temperatura después de 48 horas de simulación. Caso I, 19 de agosto de 1992. Transecto $n = 2$.	81
59	Distribución vertical de temperatura después de 72 horas de simulación. Caso I, 20 de agosto de 1992. Transecto $n = 2$.	82
60	Distribución vertical de temperatura después de 80 horas de simulación. Caso I, 21 de agosto de 1992. Transecto $n = 2$.	82
61	Distribución vertical de temperatura después de 80 horas de simulación. Caso I, 21 de agosto de 1992. Transecto $n = 3$.	83

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
62	Campo de circulación superficial después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. (Corrientes en $\sigma = 1$).	86
63	Campo de circulación subsuperficial después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. (Profundidad $Z = 1$).	87
64	Distribución vertical del campo de velocidad después de 60 horas de simulación. Caso II, 21 de noviembre de 1992. Transecto $m = 18$.	88
65	Distribución vertical del campo de velocidad después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. Transecto $n = 5$.	89
66	Distribución superficial de temperatura después de 60 horas de simulación. La isolínea externa del efluente corresponde al valor mínimo de temperatura.	92
67	Comparación de las plumas térmicas simuladas (60 horas de simulación) y aquellas medidas el 26 de noviembre de 1992.	92
68	Comparación entre las áreas de las isotermas medidas y simuladas. Caso II, 26 de noviembre de 1992.	93
69	Comparación entre los valores de temperatura simulados y medidos a lo largo del eje de dispersión. Caso II, 26 de noviembre de 1992.	93
70	Distribución vertical de temperatura después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. Transecto $m = 18$.	95
71	Distribución vertical de temperatura después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. Transecto $m = 20$.	95

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
72	Distribución vertical de temperatura después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. Transecto $n = 2$.	96
73	Distribución vertical de temperatura después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. Transecto $n = 3$.	96
74	Distribución de la intensidad de corrientes marinas superficiales medidas, en el Sitio Cazonas, por el método lagrangiano durante el periodo de marzo de 1982 a abril de 1984. Población de datos : 15406.	101
75	Distribución de la dirección de corrientes marinas superficiales medidas, en el Sitio Cazonas, por el método lagrangiano durante el periodo de marzo de 1982 a abril de 1984. Población de datos : 15406.	101

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla</u>		<u>Página</u>
I	Descripción de las condiciones iniciales de las simulaciones.	32
II	Temperaturas del medio acuático receptor y límites de la descarga hidrotermal de la central termoeléctrica.	37
III	Series de tiempo de vientos utilizados para realizar simulaciones.	42
IV	Comparación de las áreas de influencia medidas y simuladas para el Caso I.	65
V	Comparación de los valores de temperatura simulados y medidos a lo largo del eje de dispersión. Caso I, 19, 20 y 21 de agosto de 1992.	66
VI	Comparación de las áreas de influencia medidas y simuladas para el Caso II, 26 de noviembre de 1992.	91
VII	Comparación de los valores de temperatura simulados y medidos a lo largo del eje de dispersión. Caso II, 26 de noviembre de 1992.	91
VIII	Temperaturas letales para algunos organismos (Tomados de Snøeijis y Prentice, 1989; Bamber 1990 y Jobling, 1981).	98

DIFUSIÓN Y DISPERSIÓN DE CALOR DE LA DESCARGA HIDROTÉRMICA DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA

I. INTRODUCCIÓN

I.1. El medio marino como cuerpo receptor

El desarrollo industrial de los países del orbe ha provocado que la costa oceánica se use cada vez más tanto como sitio de descarga de desechos de diversa índole así como para el emplazamiento de innumerables industrias, tales como petroquímicas y centrales de potencia eléctrica. Estas últimas utilizan el agua de mar para el proceso de enfriamiento de sus condensadores (Duedall *et al.*, 1983; Vidal y Vidal, 1985; Chieh y ASCE, 1987; Lo y Esen, 1987; Washburn *et al.*, 1989; List *et al.*, 1990; Suresh *et al.*, 1993), y la descargan al océano mediante canales abiertos o emisores submarinos localizados en la costa.

Generalmente los efluentes hidrotérmicos descargados al mar son casi siempre directa o indirectamente producto de la generación de energía y, normalmente, se introducen como flujos superficiales de baja turbulencia y velocidad, o como flujos subsuperficiales turbulentos (número de Reynolds de 30,000 - 150,000), con una temperatura de 8-12°C por arriba de la temperatura ambiente del cuerpo de agua receptor (Barnett, 1972; Vasseur *et al.*, 1980; GESAMP, 1984; Bamber, 1990; Langford, 1990; Subramanian *et al.*, 1990).

Normalmente cuando un efluente de agua caliente es descargado a un cuerpo de agua costero más frío, sea éste de agua dulce o salada, se crea una pluma sobrenatante cuya baja densidad relativa se vuelve determinante por los posibles efectos que su dispersión pueda generar en el medio costero (Waldrop y Farmer, 1974). En descargas hidrotérmicas superficiales la transferencia de calor de la pluma a la atmósfera es considerablemente menor que la transferencia de calor de la pluma al cuerpo de agua receptor lo que provoca que ésta pueda viajar grandes distancias antes de mezclarse totalmente (Chieh y ASCE, 1987).

Un análisis de las descargas superficiales de agua de enfriamiento, de acuerdo con Edinger *et al.* (1974), puede ser clasificado como: a) análisis del campo cercano, b) análisis del campo lejano y, c) análisis en la zona intermedia. Los procesos del campo cercano están gobernados primeramente por las características de la descarga, mientras que en el campo lejano dependen de los movimientos a grande escala del cuerpo de agua receptor. La zona intermedia es la transición entre el campo cercano y el lejano, donde la advección y difusión dependen de las características de estos dos campos (GESAMP, 1984).

En el campo cercano, que es la zona más próxima al punto de descarga, la turbulencia generada por la acción de mezcla de la descarga con el cuerpo de agua receptor domina la dispersión del agua caliente. La pérdida de calor superficial normalmente es despreciable en esta zona. En el campo lejano, el calor es distribuido por las corrientes oceánicas inducidas por el viento, marea, gradientes de densidad y la rotación de la tierra. El intercambio de calor hacia la atmósfera inducido por el esfuerzo del viento afecta la distribución de calor en el campo lejano (Edinger *et al.*, 1974; Chieh y ASCE, 1987).

Durante las ultimas décadas ha surgido un gran interés por el estudio de los impactos térmicos que pueden producir las descargas hidrotermales provenientes de

centrales de potencia, sobre la fauna marina local. El estudio del impacto térmico está enfocado en dos puntos principales: primero, el que los animales puedan ser arrastrados dentro del sistema de enfriamiento de la central de potencia, puesto que grandes volúmenes de agua de mar son pasados a través del sistema y esto es un factor que puede ser de importancia para los organismos que son libres nadadores; segundo, el incremento en la temperatura del agua en los alrededores del punto de descarga con posibles efectos sobre la fauna local. Sin embargo, una gran parte de la investigación de campo del impacto de estas descargas está dirigido a la observación del efecto total, lo cual requiere de un buen número de años de mediciones y/o monitoreo (Markowski, 1959, 1960; Naylor, 1965; Dunn *et al.*, 1975; Talmage y Coutant, 1980; Barnett, 1972; Jobling, 1981; GESAMP, 1984; Packard *et al.*, 1989; Snoeijs, 1989; Snoeijs y Prentice, 1989; Bamber, 1990; Sergeyeva *et al.*, 1990; Hite, 1993; Breckling y Müller, 1994).

El uso de agua de mar para enfriamiento de centrales de potencia modifica el ambiente acuático en su área de descarga por incremento de la temperatura del agua, y alterando la circulación costera (Snoeijs, 1989; Elwany *et al.*, 1990). Estos cambios en el ambiente físico pueden afectar directamente a las comunidades acuáticas alterando el crecimiento y reproducción de los organismos, o indirectamente a través de cambios en la abundancia de algas que pueden proveer alimento y refugio. Asimismo, la turbulencia producida por las descargas puede también incrementar el suministro de nutrientes y, la combinación del incremento en la temperatura y la turbulencia, puede impedir la formación de cubiertas de hielo en áreas donde esto normalmente ocurriría. Por otra parte, la temperatura afecta las propiedades físicas y químicas del agua de mar, por lo que constituye la propiedad del agua que más influencia tiene sobre la vida y los ecosistemas acuáticos (Wheaton, 1977; Snoeijs y Prentice, 1989).

Sin embargo, el impacto del incremento anómalo de la temperatura sobre las especies marinas depende de la habilidad y capacidad de adaptación de los organismos para desarrollar normalmente sus procesos fisiológicos en un amplio intervalo de condiciones ambientales (Hutchinson y Maness, 1979). Por otro lado, el efecto pudiera ser más serio en zonas tropicales donde la temperatura media del agua de mar se encuentra cerca de los límites superiores de tolerancia de temperatura de muchos organismos marinos (Thorhaug, 1978; Suresh *et al.*, 1993).

Ante esta situación, se hace necesario adquirir un mejor conocimiento y estricto control del uso racional del medio ambiente, basado en un estudio integral, que contemple los aspectos físicos, químicos y biológicos de la región. No debemos olvidar que el hábitat marino es un fluido geofísico y el entender los procesos biológicos que suceden dentro de él, debe estar firmemente basado en una matriz de información oceanográfica física relevante (Walsh, 1975; Wroblewski y Hofmann, 1989). Solamente con un completo entendimiento de los procesos físicos que distribuyen el calor en medio ambiente se pueden evaluar los efectos biológicos (Dunn *et al.*, 1975).

I. 2. Antecedentes

En los últimos años se han venido desarrollando e implementando el uso de modelos de simulación numérica los cuales sirven como herramienta poderosa "sintética" , que ha facilitado y ayudado en el entendimiento y manejo de los ecosistemas (Kremer y Nixon, 1978; Swartzman y Kaluzny, 1987). La manipulación de variables en términos de ecuaciones típicas de diferenciación parcial constituye hoy día una práctica común de cualquier análisis conceptual. De hecho, solamente un número limitado de ecuaciones diferenciales parciales son

necesarias para caracterizar la dinámica de casi todos los aspectos de los hidrosistemas (Leyendekkers, 1976).

Los modelos matemáticos se caracterizan principalmente por su exactitud, precisión, generalidad, complejidad, robustez y flexibilidad (Zeide, 1991), y van desde representaciones simples de procesos particulares (hidrodinámicos, fisiológicos, conductuales, demográficos, etc.) hasta representaciones complejas mediante la representación algebraica de varios procesos de interacción, que intentan representar la conducta de un ecosistema completo (Platt *et al.*, 1981). Por otro lado, no debemos olvidar que el objetivo crucial en el desarrollo de un modelo matemático es probar que el modelo describa adecuadamente el objeto modelado (Luckyanov, 1993).

Por lo general es difícil encontrar modelos matemáticos que combinen todas las características idóneas de exactitud, precisión, generalidad, complejidad, robustez y flexibilidad (Sharpe, 1990). Así de esta manera los modelos se consideran meras aproximaciones a la realidad, y se formulan para predecir las características esenciales de determinados fenómenos o procesos (Zeide, 1991).

El desarrollo de modelos matemáticos ha hecho posible la simulación numérica de los procesos hidrodinámicos del océano y de la dispersión de contaminantes producto de las descargas de desechos al océano (descargas hidrotérmicas, desechos industriales y urbanos, descargas normales y accidentales de radionúclidos, etc.), así como de otros fenómenos químicos y biológicos que ocurren en las masas de agua de los océanos (Silvert, 1981). Sin embargo, el contar con un conocimiento cuantitativo de la capacidad de las aguas costeras para recibir y diluir cualquier material que pueda ser dañino en altas concentraciones nos permite contar con una base científica para poder no sólo llevar a cabo evaluaciones de lugares apropiados para emplazamientos de centrales de potencia, sino también

para poder establecer niveles de descarga de los efluentes hidrotérmicos al medio marino costero, así como para estimar los efectos acumulativos e individuales sobre bahías y estuarios.

Para poder llevar a cabo este tipo de evaluación, es necesario determinar dos propiedades físicas principales del movimiento de las aguas costeras. Estas son: (1) la dirección e intensidad predominante de la circulación costera y, (2) la capacidad difusiva y dispersiva de las corrientes y la turbulencia asociada a éstas (List *et al.*, 1990)

Debido a los grandes retos para el manejo y protección del medio ambiente, las modelaciones de sistemas ecológicos han ganado una creciente atención. En los últimos años se ha determinado que los problemas ambientales requieren enfoques que puedan tratar con aquellos fenómenos dinámicos y complejos que caracterizan las cambiantes condiciones del ambiente humano (Breckling y Müller, 1994).

El desarrollo de modelos que nos permiten modelar ambientes marinos se ha convertido en una herramienta conceptual de la investigación teórica y aplicada (Van der Molen y Pintér, 1993). Las principales fases de los análisis cuantitativos en la modelación se pueden separar en (1) formulación del modelo matemático, (2) calibración y (3) verificación de éstos. La calibración implica encontrar la mejor o más conveniente parametrización del fenómeno a modelar. Por otro lado, la verificación ha sido definida como una comparación de las predicciones del modelo con el mundo real (Mckinion y Baker, 1982; Mayer y Butler, 1993).

I. 3. Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo principal :

- a) Modelar la difusión y dispersión del calor contenido en la descarga hidrotermal de la Central Termoeléctrica Tuxpan (CTT), utilizando el modelo hidrodinámico tridimensional de Paul y Lick (1973 a y b).
- b) Medir el área de influencia de la descarga hidrotermal de la CTT bajo diferentes condiciones ambientales.
- c) Verificar las modelaciones y pronósticos del comportamiento dispersivo de la descarga hidrotermal de la CTT utilizando datos de campo.

I. 4. Área de estudio

El área de estudio conocida como Sitio Tuxpan (ST) se encuentra delimitada por los paralelos $20^{\circ} 58'$ y $21^{\circ} 05'$ de Latitud Norte y los meridianos $97^{\circ} 18'$ y $97^{\circ} 25'$ de Longitud Oeste, en la costa oeste del Golfo de México, sobre la margen izquierda del Río Tuxpan, desde la escollera del río hasta el Rancho Mojarras, abarcando un frente de playa de 10 km (fig. 1). Se caracteriza por ser una llanura costera con una extensa plataforma continental la cual tiene una pendiente casi constante de $1/112$, sin elevaciones abruptas o profundidades extremas, de tal manera que la líneas batimétricas se alinean paralelas a la costa con una separación entre ellas casi constante.

La temperatura superficial del agua de mar oscila entre 27°C y 33°C durante el verano. La temperatura mínima es de 18°C durante el invierno.

La temperatura ambiente oscila alrededor de 33.5°C en los meses de julio, agosto y septiembre y de 7°C en invierno. Presenta lluvias en verano e invierno con una precipitación media anual de 1496.4 mm (Ruiz, 1993).

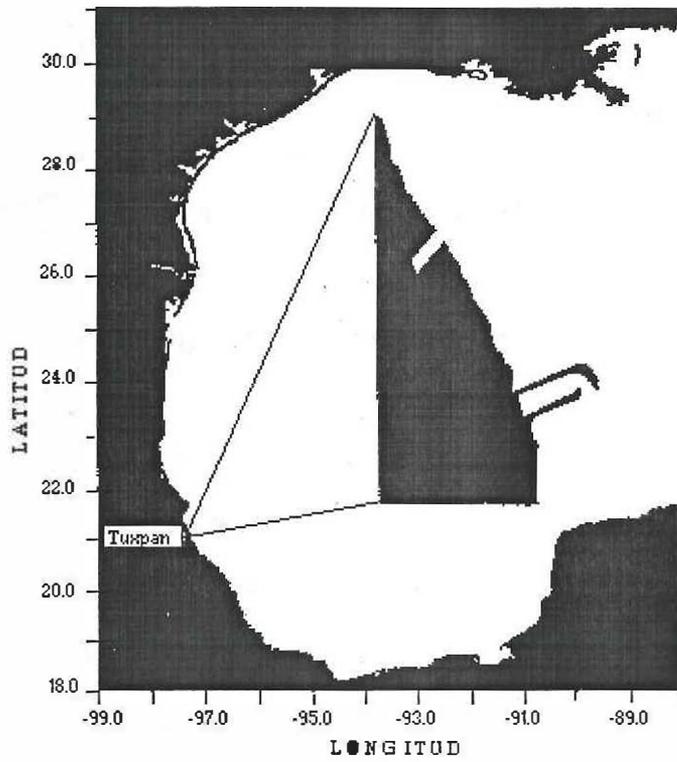


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

II. MATERIAL Y MÉTODO

II. 1. Datos de campo

II. 1. 1. Temperaturas

Se midió la temperatura superficial en el frente marino de la CTT utilizando 8 termógrafos marca *Kalhsico* cuya precisión es de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. La posición geográfica de cada uno de los termógrafos se determinó utilizando teodolitos colocados en la costa sobre puntos geográficos previamente identificados.

El campo de temperatura superficial frente al ST, incluyendo la zona de influencia de la descarga hidrotérmica de la Central, se midió en dos ocasiones, a saber : agosto de 1992 y noviembre de 1992. La información recabada se resumió en cinco mapas del campo de temperatura superficial medido (figuras 2 a 6). Las mediciones las realizó el personal de la Residencia de Estudios Oceanográficos de la CTT de la Comisión Federal de Electricidad.

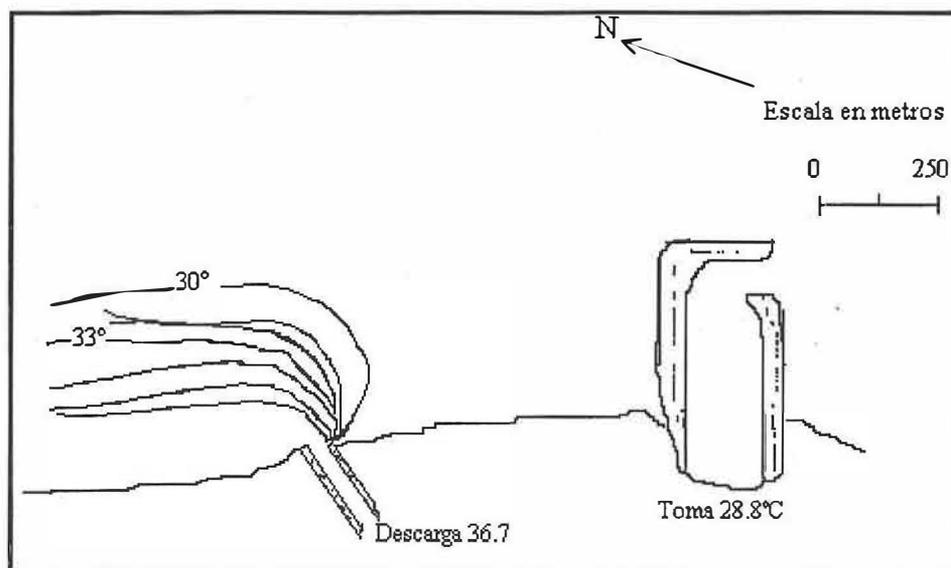


Figura 2. Campo de temperatura superficial medido a las 12 horas del día 19 de agosto de 1992.

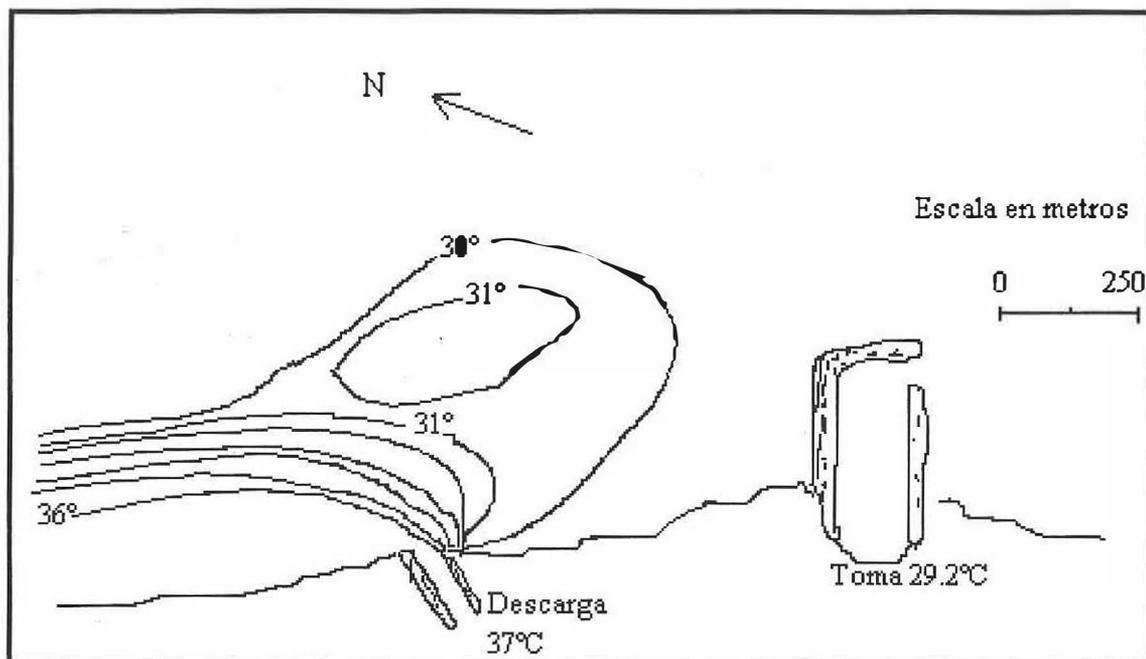


Figura 3. Campo de temperatura superficial medido a las 24 horas del día el 19 de agosto de 1992.

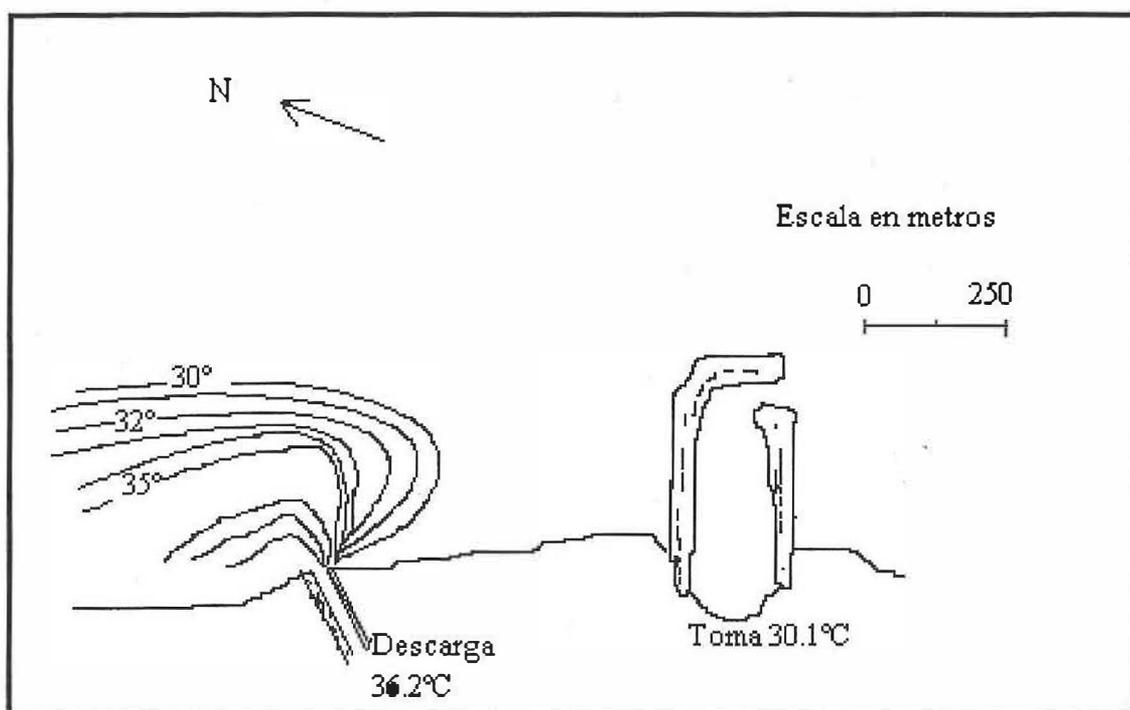


Figura 4. Campo de temperatura superficial medido a las 24 horas del día 20 de agosto de 1992.

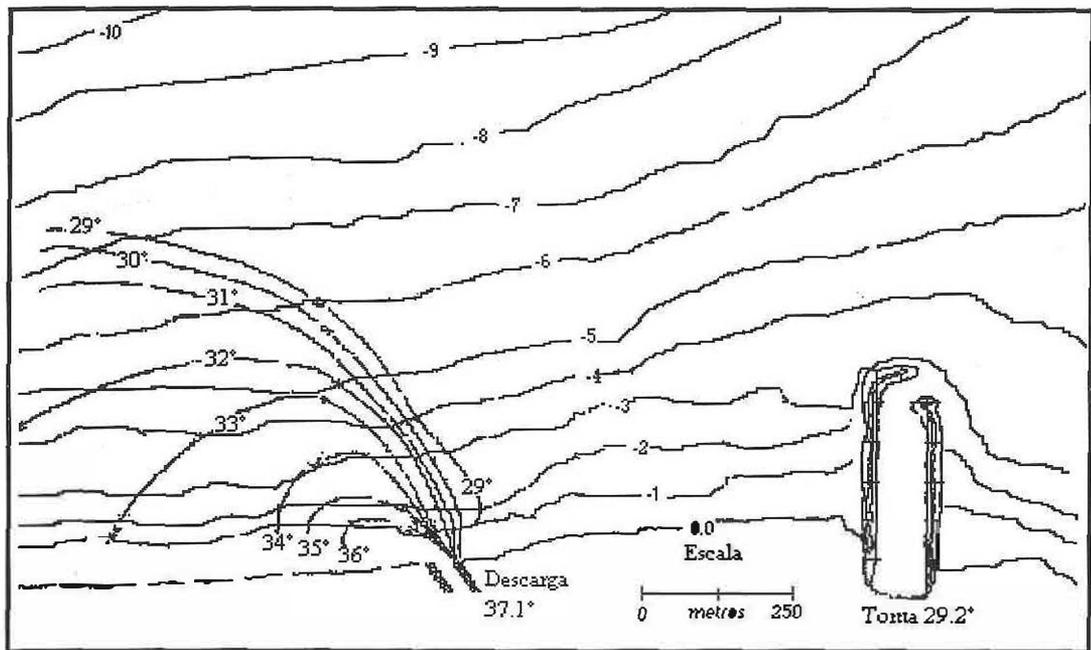


Figura 5. Campo de temperatura superficial y batimetría medidos el 21 de agosto de 1992.

I I. 1. 2. Batimetrías

La batimetría frente al ST se midió en dos ocasiones, a saber: agosto de 1992 y noviembre de 1992 (figuras 5 y 6). Las mediciones se realizaron utilizando un trineo de metal que sostiene en su centro un mástil de altura conocida. El trineo es colocado lo más lejano posible dentro del mar, determinándose la localización del mástil en el plano x, y por el método de intersección angular. Una vez hecho esto, se procedió a realizar una nivelación trigonométrica para determinar la cota de un punto predeterminado en el mástil del trineo, con respecto a la mojonera. Posteriormente, por simple diferencia de la cota determinada menos la altura en el trineo del punto nivelado, se obtiene la cota del punto muestreo.

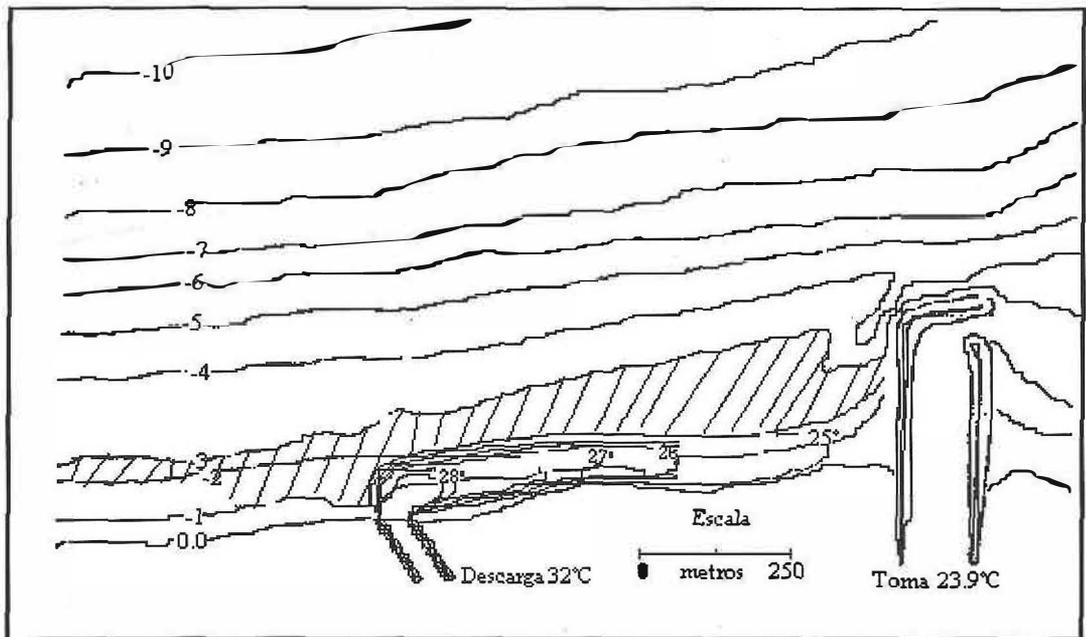


Figura 6. Campo de temperatura superficial y batimetría medidos el 26 de noviembre de 1992.

Los datos de profundidad de los levantamientos batimétricos se corrigieron por la onda de marea de tal manera que toda la base de datos quedó referido al nivel medio del mar.

II. 1. 3. Viento

Los datos de viento (direcciones y magnitudes) característicos del ST han sido previamente reportados por Zambrano *et al.* (1993).

Los registros corresponden al periodo de enero de 1981 a diciembre de 1983. Cabe mencionar que para el año de 1981 existen solamente datos de 6 meses (enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre), para el año 1982 sólo existen datos de 10 meses (enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre) y, para el año 1983 se tiene la serie completa. El viento local del Sitio

Cazones (SC) se recabó a través de una estación meteorológica de principio mecánico *Weather Measure* modelo WS 755, cuya precisión es de $\pm 0.5 \text{ m s}^{-1}$ en intensidad y $\pm 1^\circ$ en dirección. Éste se encuentra ubicado a unos cuantos metros de la playa. La serie de tiempo (figuras 7 y 8) quedó integrada por 15,093 registros horarios de intensidad (m s^{-1}) y dirección (grados). Sobre esta base de datos se calcularon las medidas de tendencia central, momentos estadísticos y distribuciones de probabilidad del régimen anemométrico del ST.

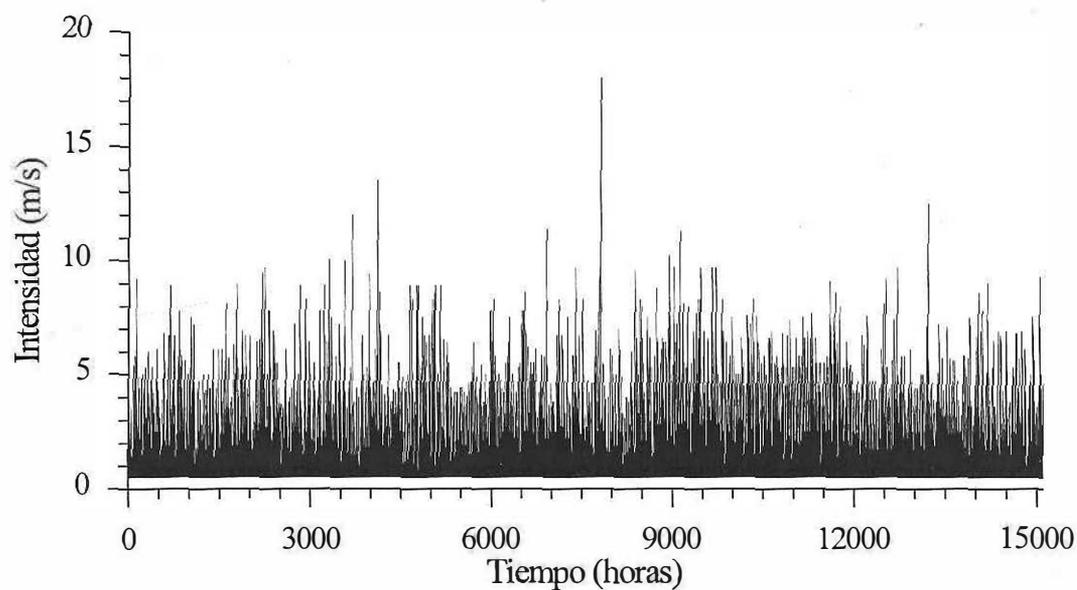


Figura 7. Serie de tiempo de los datos horarios de intensidad del viento medido en el SC del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 1983.

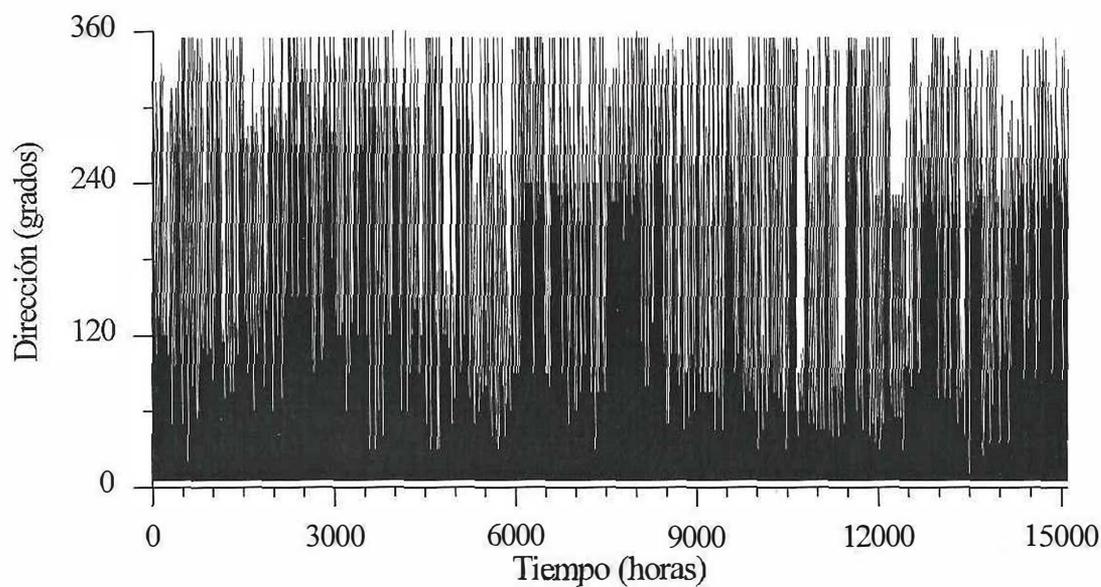


Figura 8. Serie de tiempo de los datos horarios de dirección del viento medido en el SC del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 1983.

II. 2. Modelo numérico

II. 2. 1. Descripción del modelo

El modelo utilizado en este trabajo para la simulación de la circulación costera y la dispersión y difusión de la descarga del agua de enfriamiento de la CTT fue desarrollado por Paul y Lick durante la década de 1970 (Paul y Lick, 1973 a y b).

El modelo resuelve las ecuaciones tridimensionales de conservación de masa, *momentum* y energía para un fluido incomprensible y turbulento en el marco de referencia de una tierra en rotación, incorporando el parámetro de Coriolis. Asimismo, el modelo resuelve la ecuación de estado del agua de mar y calcula la turbulencia vía la especificación de coeficientes horizontales y verticales de viscosidad de remolinos y de difusión térmica (Paul y Lick, 1973 a y b; Dunn, *et al.*, 1975).

En su forma dimensional se tiene el siguiente sistema de ecuaciones:

Conservación de masa

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Conservación de momento longitudinal

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} + \frac{\partial (uw)}{\partial z} - f v = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + A_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Conservación de momento lateral

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial (uv)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial (uw)}{\partial z} + f u =$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + A_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Conservación de momento vertical

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho g \quad (4)$$

Conservación de energía

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} + u \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + v \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + w \frac{\partial \Delta T}{\partial z} =$$

$$B_H \left(\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B_V \frac{\partial \Delta T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

Ecuación de estado del agua de mar

$$\rho = \rho (T) \quad (6)$$

donde:

x, y, z forman un sistema coordenado dextrógiro con x y y en dirección horizontal, y z en dirección vertical, positiva hacia abajo

u, v, w componentes de la velocidad en la dirección x, y, z respectivamente

t tiempo

f parámetro de Coriolis

p presión

ρ densidad del agua de mar

A_H	coeficiente horizontal de viscosidad por remolinos
A_V	coeficiente vertical de viscosidad por remolinos
B_H	coeficiente horizontal de difusividad térmica
B_V	coeficiente vertical de difusividad térmica
g	aceleración gravitacional
T	temperatura

Estas ecuaciones están basadas en la convención del signo y sistema coordenado mostrado en la figura 9, que presenta el caso de un canal de descarga dentro de un cuerpo de agua muy grande.

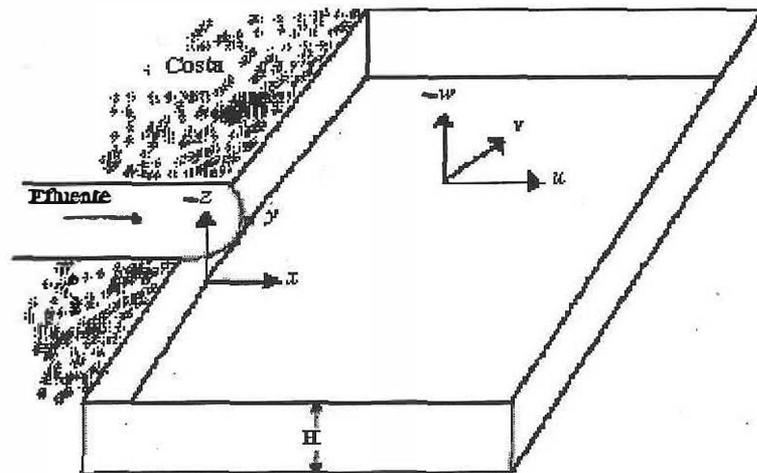


Figura 9. Signos de convención y sistema coordenado utilizado en el sistema de ecuaciones del modelo.

El modelo incluye varias suposiciones que están implícitas en el sistema de ecuaciones, las cuales se listan a continuación:

- 1) La presión varía hidrostáticamente contra la profundidad. Se simplifica la ecuación de *momentun* vertical a su expresión hidrostática mediante la eliminación de los términos de velocidad y viscosidad.
- 2) La superficie del mar se supone plana (*rigid-lid*). Esto elimina las ondas gravitacionales superficiales como el oleaje y la marea, lo que permite pasos de integración numérica más grandes y se reduce considerablemente el tiempo de procesamiento.
- 3) El modelo incorpora la aproximación Boussinesq. En ésta las variaciones de densidad son despreciables y pueden omitirse excepto en el término de la aceleración de la gravedad. Esta aproximación es justificable para la modelación de la descarga del agua de enfriamiento de la central. El rango de variación de la temperatura del efluente es de 10° C, y la variación de la densidad del fluido inducida por éste es menor a 1 %, por lo que el fluido puede considerarse como incompresible pero de densidad variable.
- 4) Todas las fuentes y pérdidas de calor del sistema modelado ocurren en sus fronteras. Esto permite incluir en el modelo el flujo de calor entre el medio acuático y la atmósfera.

5) El modelo incorpora el efecto de la turbulencia en la solución de las ecuaciones de transporte y energía utilizando coeficientes de viscosidad por remolinos y de difusión térmica, respectivamente.

6) La variaciones batimétricas dentro de la malla se suponen graduales.

7) La densidad del fluido se considera sólo función de la temperatura. Esta suposición es válida siempre y cuando la salinidad del sistema modelado se mantenga constante o su variabilidad no modifique la ecuación de estado del fluido. Aunque la ecuación de estado que utiliza el modelo para el cálculo de la densidad es una función de la temperatura únicamente, la densidad inicial incorpora el valor promedio anual de la salinidad del agua de mar característico del medio costero del ST (36 psu).

I I. 2. 2 Solución numérica

El sistema de ecuaciones diferenciales del modelo se resuelve empleando el método de diferencias finitas. Las condiciones iniciales y de frontera se definen en una malla tridimensional que se ajusta a la geometría del sitio a modelar, así como celdas alrededor de cada variable en la malla. La unidad básica de la malla es un cubo con valores de presión y temperatura en el centro y las componentes de velocidad sobre las 6 caras (fig. 10). La ecuación diferencial para una variable en particular se integra alrededor del volumen de su celda de malla correspondiente. Las integrales resultantes se evalúan y/o estiman aproximadamente para obtener las ecuaciones de diferencias. Este procedimiento de discretización tiene dos ventajas: (1) poder representar fácilmente fronteras y mallas irregulares y, (2) las ecuaciones

diferenciales a discretizar se representan en su forma tradicional manteniendo sus propiedades fundamentales. Esto contrasta con el método de discretización de ecuaciones por series de Taylor. Para las derivadas temporales se utiliza un esquema simple de diferencias progresivas positivas en el tiempo.

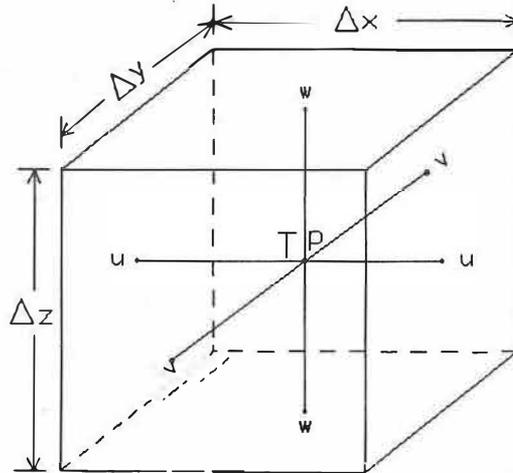


Figura 10. Unidad básica de la malla tridimensional en la cual se presentan los valores de presión y temperatura así como las componentes de velocidad.

Los términos de difusión vertical se evalúan implícitamente debido a las restricciones que conllevan los pequeños pasos de integración que pueden resultar cuando se resuelven las ecuaciones del modelo en cuerpos de agua de poca profundidad.

El paso de integración Δt para la solución de las ecuaciones del modelo se define conforme al número de Courant $= \frac{\Delta x / \Delta t}{u_c}$, donde Δx representa la longitud

de la celda más pequeña de la malla, correspondiente a la descarga, $\Delta t \leq \frac{1}{2} \frac{(\Delta z)^2}{A_v}$,

Δz es la distancia vertical entre nodos, A_v es el término de difusión vertical, y u_c ,

la velocidad del efluente en la descarga. El número de Courant deber ser menor a 1, por lo cual se escogió un paso de integración $\Delta t = 30$ s, el cual cumple con el criterio de estabilidad numérica del modelo.

El suponer plana la superficie del mar (*rigid-lid condition*) es difícil de aplicar en una solución numérica de las ecuaciones de conservación de masa y *momentum* (en el sistema de coordenadas x, y, σ). Para solucionar este problema se introduce en el modelo la distribución del campo de presión superficial (P_s) el cual se traduce fácilmente en elevaciones de superficie libre utilizando la suposición de la aproximación hidrostática. Mientras que en el campo estas elevaciones superficiales son inmensurablemente pequeñas, sus gradientes espaciales son muy importantes para la modelación matemática del fluido. Cuando se calcula la divergencia de las ecuaciones de Navier-Stokes y se integran en la vertical, en todo el campo de circulación, la P_s resulta como una constante de integración que satisface una ecuación bidimensional tipo Poisson. De esta manera, la presión que se calcula en la capa superior de la estructura de la malla se debe a la ligera elevación de la superficie libre por arriba de la misma.

Las ecuaciones de conservación de *momentum* se resuelven utilizando el *Simplified Marker and Cell Method* (*SMAC*) propuesto por Amsden y Harlow (1970). Este procedimiento consiste en separar las velocidades en dos componentes : una componente satisface las ecuaciones de *momentum* con algún campo de presión preestablecido, y la segunda componente es el gradiente de algún campo escalar que sumado a la primera componente satisface la totalidad de las ecuaciones. Los términos verticales de difusión y Coriolis se tratan explícitamente (Vasseur *et al.*, 1980).

La transformación de las ecuaciones del sistema x, y, z a uno x, y, σ , donde $\sigma = z / h$, $y, h = h(x, y)$ es la profundidad local en cada nodo de la malla, se hace

necesario. Tomando en cuenta que $-1 \leq \sigma \leq 0$, en donde $\sigma = -1$ corresponde al fondo mientras que $\sigma = 0$ corresponde a la superficie del mar. Mediante esta transformación y un uniforme espaciamento de la malla en σ , el número de nodos en las áreas someras es el mismo que en las zonas más profundas. Así, de esta manera no existe la pérdida de precisión en la resolución vertical.

Como resultado de suponer el fondo irregular, las ecuaciones se adimensionalizan utilizando las siguientes transformaciones matemáticas:

$$u \rightarrow \frac{u}{u_0}$$

$$v \rightarrow \frac{v}{u_0}$$

$$w \rightarrow \frac{b_0 w}{h_0 u_0}$$

$$x \rightarrow \frac{x}{b_0}$$

$$y \rightarrow \frac{y}{y_0}$$

$$z \rightarrow \frac{z}{h_0}$$

$$\sigma \rightarrow \frac{z}{h(x, y)}$$

$$t \rightarrow \frac{A_H t}{b_0^2}$$

$$P \rightarrow \frac{P R_e}{\rho g h_0 F_r^2}$$

$$R_0 = \frac{f (b_0)^2}{A_H} = \text{parámetro de Coriolis adimensional}$$

$h(x, y)$ = profundidad local en cada nodo de la malla

u_0 = velocidad de referencia

b_0 = longitud de referencia

P = presión adimensional

P_s = presión superficial

dando como resultado el siguiente sistema de ecuaciones:

Conservación de masa

$$\frac{1}{h} \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial (hv)}{\partial y} + \frac{\partial \Omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (7)$$

Conservación de momento longitudinal

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + R_e \left(\frac{1}{h} \frac{\partial (hu^2)}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial (huv)}{\partial y} + \frac{\partial (\Omega u)}{\partial \sigma} \right) + R_o v \\ & = - \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{R_e}{F_r^2} \left[h \int_0^\sigma \frac{\partial \Delta \rho}{\partial x} d\sigma + \frac{\partial h}{\partial x} \left(\int_0^\sigma \Delta \rho \sigma - \sigma \Delta \rho \right) \right] \\ & + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \left(\frac{b_0}{h_0} \right)^2 \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\gamma \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Conservación de momento lateral

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + R_e \left(\frac{1}{h} \frac{\partial (huv)}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial (hv^2)}{\partial y} + \frac{\partial (\Omega v)}{\partial \sigma} \right) + R_o u \\ & = - \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{R_e}{F_r^2} \left[h \int_0^\sigma \frac{\partial \Delta \rho}{\partial y} d\sigma + \frac{\partial h}{\partial y} \left(\int_0^\sigma \Delta \rho d\sigma - \sigma \Delta \rho \right) \right] \\ & + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \left(\frac{b_0}{h_0} \right)^2 \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\gamma \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Conservación de energía

$$\begin{aligned}
 P_r \left[\frac{\partial \Delta T}{\partial t} + R_e \left(\frac{1}{h} \left(\frac{\partial (hu \Delta T)}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial (hv \Delta T)}{\partial y} \right) + \frac{\partial (\Omega \Delta T)}{\partial \sigma} \right) \right] \\
 = \frac{1}{h} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial \Delta T}{\partial y} \right) \right] + \left(\frac{b_0}{h_0} \right)^2 \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\beta \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right)
 \end{aligned} \quad (10)$$

Conservación de momento vertical

$$\frac{1}{h} \frac{\partial P}{\partial \sigma} = \frac{R_e}{F_r^2} (1 + \Delta \rho) \quad (11)$$

Ecuación de estado del agua de mar

$$\Delta \rho = f(\Delta T) \quad (12)$$

Ecuación de presión superficial

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 P_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_s}{\partial y^2} = - \frac{\partial}{\partial x} \int_0^1 A d\sigma - \frac{\partial}{\partial y} \int_0^1 B d\sigma - \frac{\partial}{\partial t} [w(\sigma = 0)] \\
 + \frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \int_0^1 A' d\sigma + \frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial y} \int_0^1 B' d\sigma
 \end{aligned} \quad (13)$$

donde,

$$\sigma = z / h(x, y) \quad (14)$$

$$\Omega = \frac{1}{h} \left[w - \sigma \left(u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] = \frac{d\sigma}{dt} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
A = & R_e \left(\frac{1}{h} \frac{\partial (h u^2)}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial (h u v)}{\partial y} + \frac{\partial (\Omega u)}{\partial \sigma} \right) + R_o v \\
& + \frac{R_e}{F_r^2} \left[h \int_0^\sigma \frac{\partial \Delta \rho}{\partial x} d\sigma + \frac{\partial h}{\partial x} \left(\int_0^\sigma \Delta \rho d\sigma - \sigma \Delta \rho \right) \right] \\
& - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \left(\frac{b_0}{h_0} \right)^2 \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\gamma \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)
\end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
B = & R_e \left[\frac{1}{h} \frac{\partial (h u v)}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial (h v^2)}{\partial y} + \frac{\partial (v \Omega)}{\partial \sigma} \right] - R_o u \\
& + \frac{R_e}{F_r^2} \left[h_0 \int_0^\sigma \frac{\partial \Delta \rho}{\partial y} d\sigma + \frac{\partial h}{\partial y} \left(\int_0^\sigma \Delta \rho d\sigma - \sigma \Delta \rho \right) \right] \\
& - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left(\frac{b_0}{h_0} \right)^2 \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\gamma \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)
\end{aligned} \tag{17}$$

$$A' = -A - \frac{\partial P_s}{\partial x} \tag{18}$$

$$B' = -B - \frac{\partial P_s}{\partial y} \tag{19}$$

$$\Delta T = \text{diferencia de temperatura adimensional} = \frac{(T - T_E)}{T_E}$$

$$\Delta \rho = \text{diferencia de densidad adimensional} = \frac{(\rho - \rho_E)}{\rho_E}$$

T_E = temperatura de equilibrio

ρ_E = densidad calculada en la temperatura de equilibrio

σ = coordenada z transformada

$$R_e = \frac{u_o b_o}{A_H}, \quad (20)$$

es el número de Reynolds que cuantifica la razón que existe entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas de un cuerpo de interés. Cuando el número de Reynolds ≥ 1 , las fuerzas inerciales dominan por lo que la viscosidad del fluido es despreciable (Michelson, 1970; Mann y Lazier, 1991).

$$P_r = \frac{A_H}{B_H}, \quad (21)$$

es el número de Prandtl que es igual a la relación que existe entre el coeficiente horizontal de viscosidad por remolinos (A_H) y la difusividad térmica (B_H). El número de Prandtl es una medida de la transferencia de calor por convección, puesto que, físicamente, el producto $R_e \cdot P_r$ es una medida de la razón entre el calor transferido por convección y el calor transferido por conducción térmica (Hughes y Brighton, 1978).

$$F_r = \frac{u_c}{\sqrt{g h_o}}, \quad (22)$$

es el número densimétrico de Froude, el cual es otro parámetro adimensional usado para caracterizar los efectos de flotabilidad. El número de Froude (F_r) representa la relación que existe entre las fuerzas inerciales y la fuerza de gravedad (g), donde u_c es la velocidad del efluente y h_o la profundidad del canal de descarga. Si el número de Froude es $\gg 1$, las fuerzas inerciales dominan a las fuerzas de gravedad y flotación. Por lo contrario, si el Número es $\ll 1$, la gravedad es de mayor importancia y por lo tanto domina a las fuerzas inerciales asociadas al fluido provocando así que el fluido descargado tienda a flotar (Ippen, 1966; Michelson, 1970; Dunn *et al.*, 1975).

I I. 2. 3. Esquema de solución

El algoritmo que se utiliza para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales hacia adelante en el tiempo es como sigue:

- 1) Se definen las condiciones iniciales y de frontera respectivamente.
- 2) Se calcula el campo de presión superficial.
- 3) Se calcula la temperatura.
- 4) Se calcula la densidad.
- 5) Se calculan las velocidades horizontales por medio del método *SMAC*.
- 6) Se calculan las velocidades verticales integrando la ecuación de continuidad desde el fondo hasta la superficie.
- 7) Se completa el primer paso de integración en el tiempo.

El procedimiento anterior se repite hasta que se cumplan las siguientes opciones:

- I) el criterio de convergencia (las diferencias numéricas entre la solución de las ecuaciones es menor a 10^{-5}) y/o
- II) cuando se cumpla el tiempo de simulación que determine el usuario.

I I. 2. 4. Condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera hacen la solución de cada caso único, ya que la región interior está gobernada solamente por el cumplimiento de las ecuaciones de conservación mediante una correcta selección de éstas, lo cual representa un paso crítico en el diseño del modelado. Para una aplicación particular del modelo estas condiciones dependen en gran parte del sistema que está siendo modelado. La figura

11 muestra las condiciones de frontera para la geometría típica de los casos estudiados.

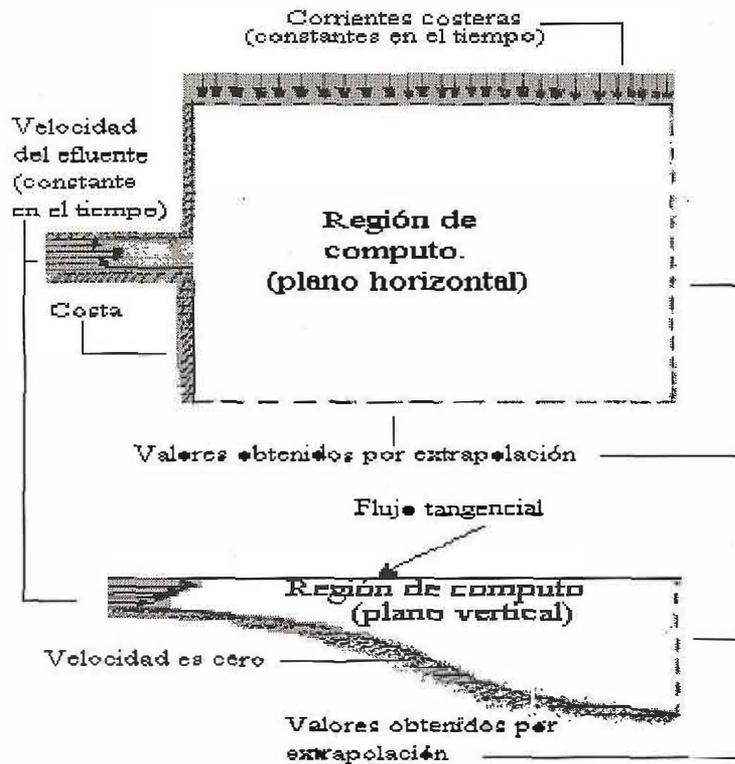


Figura 11. Esquema donde se presentan condiciones de frontera para la geometría típica de los casos estudiados.

Para definir las en el modelo de Paul y Lick se tomó en cuenta lo siguiente:

1) Geomorfología del sitio a modelar. El fondo del cuerpo de agua y a lo largo de la línea de costa se definen condiciones de no deslizamiento (*no-slip condition*) e impermeabilidad donde el flujo de calor es cero. En la superficie del agua se tiene especificada la condición de superficie plana (*rigid-lid*) por lo que la velocidad se iguala a cero para satisfacer esta condición.

2) Esfuerzo del viento. Un esfuerzo es aplicado en la superficie del agua, el cual es una función específica de la condición del viento sobre el agua. El esfuerzo tangencial del viento (τ_w) se calcula usando la ecuación de Wilson (1960):

$$\tau_w = \rho_a W^2 C_D \quad (23)$$

donde ρ_a es la densidad del aire, W es la velocidad del viento referida a 10 m de altura y C_D es el coeficiente de razonamiento. El valor de C_D varía dependiendo del intervalo de intensidad del viento que se utilice (In-Sik, *et al.*, 1992):

$$C_D = 1.6 \times 10^{-3} \text{ para vientos } < 2.0 \text{ m s}^{-1}$$

$$C_D = 1.1 \times 10^{-3} \text{ para vientos } \geq 2.0 \text{ m s}^{-1} < 6.0 \text{ m s}^{-1}$$

$$C_D = 1.2 \times 10^{-3} \text{ para vientos } \geq 6.0 \text{ m s}^{-1} < 8.0 \text{ m s}^{-1}$$

$$C_D = 1.3 \times 10^{-3} \text{ para vientos } \geq 8.0 \text{ m s}^{-1} < 10.0 \text{ m s}^{-1}$$

$$C_D = 1.41 \times 10^{-3} \text{ para vientos } \geq 10.0 \text{ m s}^{-1}$$

3) Transferencia de calor superficial. El coeficiente de transferencia de calor superficial k se calcula mediante la siguiente ecuación (Edinger *et al.*, 1974):

$$k = 4.5 + 0.05 T_m + \mathfrak{S} f(W) + 0.47 f(W) \quad (24)$$

$$\text{en donde } T_m = \frac{T_s + T_r}{2}, \quad (25)$$

T_s es la temperatura superficial del agua de mar, T_r la temperatura de rocío y \mathfrak{S} es la pendiente entre dos puntos sobre la curva de presión de vapor saturado definida como:

$$\mathfrak{S} = 0.35 + 0.015 T_m + 0.0012 (T_m)^2, \quad (26)$$

y $f(W)$ es la función evaporativa de la velocidad del viento definida como:

$$f(W) = 9.2 + 0.46 W^2 \quad (27)$$

4) Mar abierto. Las temperaturas y velocidades en las fronteras de mar abierto varían linealmente. Esta condición se representa como :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Frontera de mar abierto a} \\ \text{lo largo del eje } x \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} = 0 \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Frontera de mar abierto a} \\ \text{lo largo del eje } y \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} = 0 \end{array}$$

5) Obra de toma y descarga. Quedan especificados los perfiles de velocidad y temperatura del agua de enfriamiento tanto en la obra de toma como en el canal de descarga.

6) Presión superficial. La condición de frontera para la presión superficial se define especificando los gradientes horizontales de la presión superficial e integrando en la vertical las ecuaciones de *momentum*.

II. 3. Modelaciones

II. 3. 1. Datos de entrada

Para realizar las simulaciones tanto de la circulación costera del Sitio Tuxpan como de la descarga del agua de enfriamiento de la Central Termoeléctrica Tuxpan, se utilizó una malla de configuración irregular como la que se muestra en la figura 12. Las dimensiones de la malla a lo largo de la línea de costa y mar adentro fueron de 6400 m y 4500 m respectivamente, y está conformada por 42 elementos en dirección X , 28 elementos en dirección Y , y 7 elementos en dirección σ .

Como resultado de utilizar una malla tridimensional y mediante la transformación σ , el número de nodos se vuelve fijo, es decir, se define el mismo número de nodos verticales al través de la malla (fig. 13). Con esta transformación se incrementa la resolución de los cálculos hidrodinámicos en la zona inmediata a la descarga y a la obra de toma.

El arreglo espacial de las variables dentro de la malla queda de la siguiente manera (fig. 14):

- a) En los nodos de la malla. Se calculan los componentes horizontales de velocidad (u, v).
- b) En las caras horizontales de la malla. Se calculan los componentes verticales de velocidad (w), la temperatura (T) y la presión (p).

Las condiciones iniciales para realizar las simulaciones se presentan en la tabla I.

Tabla I. Descripción de las condiciones iniciales de las simulaciones.

Condiciones iniciales		Caso I	Caso II
Temp. Superficial del mar	T_s	28.2 °C	23.7 °C
Intensidad del viento	u_*	2.0 m s ⁻¹	5.0 m s ⁻¹
Dirección del viento	d_*	225 °	180 °
Esfuerzo tangencial del viento	τ_w^*	1.005 x 10 ⁻⁵	4.888 x 10 ⁻⁵
Tiempo de referencia	DT	30 s	30 s
Longitud de referencia	b_0	4500m	4500m
Presión superficial de referencia	p_0	1 atm.	1 atm.
Densidad del agua de mar	ρ_0	1032 kg m ⁻³	1032 kg m ⁻³
Coefficiente horizontal de viscosidad por remolinos	A_H	35000 cm ² s ⁻¹	45000 cm ² s ⁻¹
Coefficiente vertical de viscosidad por remolinos	A_{v0}	100 cm ² s ⁻¹	700 cm ² s ⁻¹
Coefficiente vertical de viscosidad por remolinos	A_{v1}	0.05 cm ² s ⁻¹	0.05 cm ² s ⁻¹
Coefficiente horizontal de difusividad térmica	B_H	5000 cm ² s ⁻¹	5000 cm ² s ⁻¹
Coefficiente vertical de difusividad térmica	B_{v0}	50 cm ² s ⁻¹	50 cm ² s ⁻¹
Coefficiente vertical de difusividad térmica	B_{v1}	0.05 cm ² s ⁻¹	0.05 cm ² s ⁻¹
Coefficiente de transferencia de calor superficial	k	38.15 W m ⁻² °C ⁻¹	38.15 W m ⁻² °C ⁻¹
Velocidad horizontal de referencia	u_0	20 cm ² s ⁻¹	20 cm ² s ⁻¹
Velocidad en la descarga	u_c	50 cm s ⁻¹	50 cm s ⁻¹
Velocidad en la toma	u_T	13.5 cm s ⁻¹	13.5 cm s ⁻¹
Gasto de descarga	Q	30 m ³ s ⁻¹	30 m ³ s ⁻¹
Profundidad de referencia	h	16 m	16 m
Parámetro de Coriolis	f_0	5 x 10 ⁻⁵	5 x 10 ⁻⁵
Ángulo de descarga	θ_D	130 °	130 °
Ancho del canal de descarga	a_D	40 m	40 m
Ancho de la obra de toma	a_T	100 m	100 m
Profundidad en la descarga	h_0	1.50 m	1.50 m
Profundidad en la toma	h_T	2.50 m	2.50 m
No. de Reynolds	Re	0.257 X 10 ⁴	0.2 X 10 ⁴
No. de Froude	Fr	0.158 X 10 ⁻¹	0.202 X 10 ⁻¹
No. de Prandtl	Pr	7	9

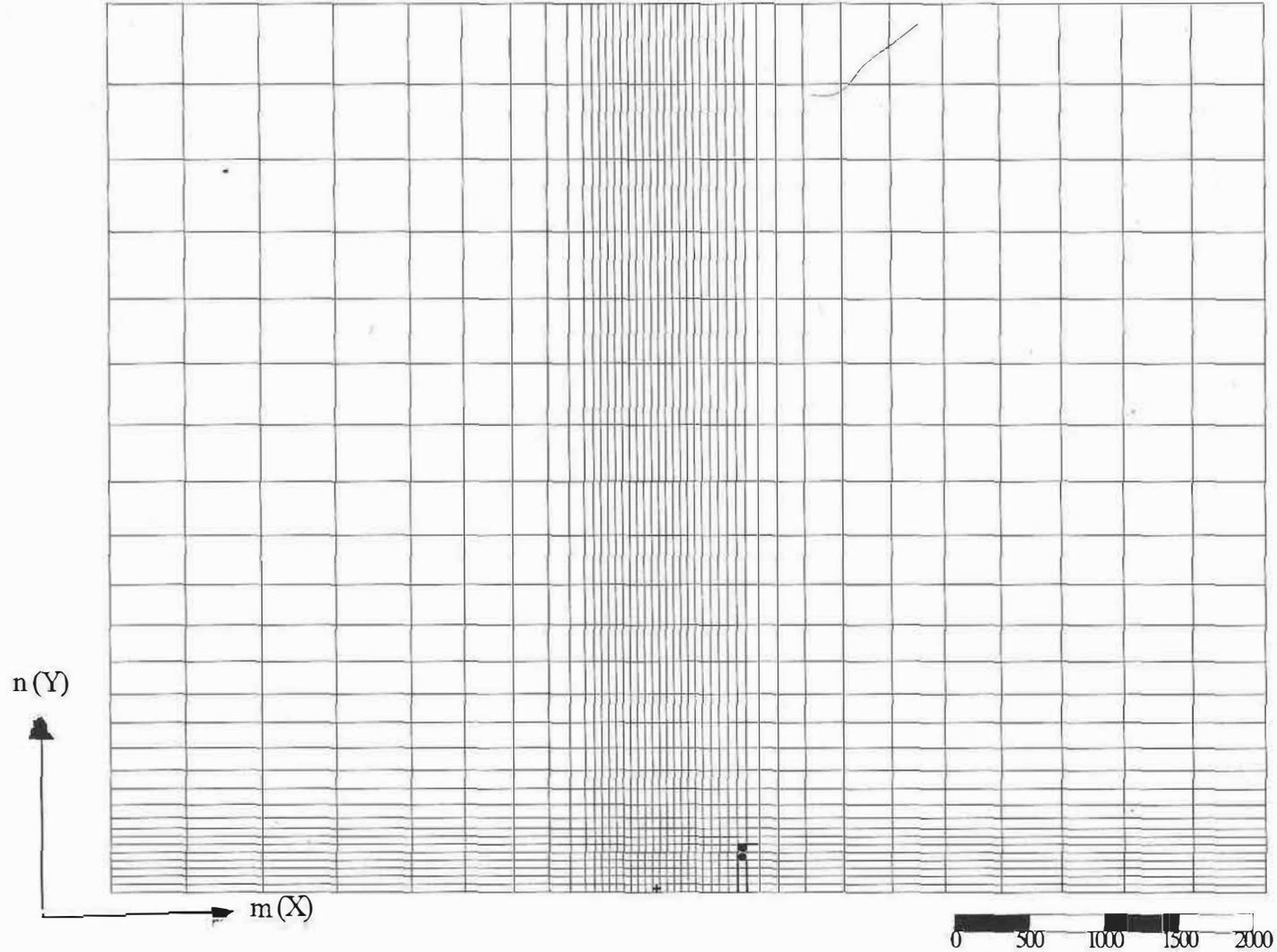


Figura 12. Configuración de la malla tridimensional en donde se resuelven las ecuaciones del modelo. En el punto (18,1) se localiza la descarga (+) y en (29,5 y 29,6) la toma, respectivamente. (Escala en metros).

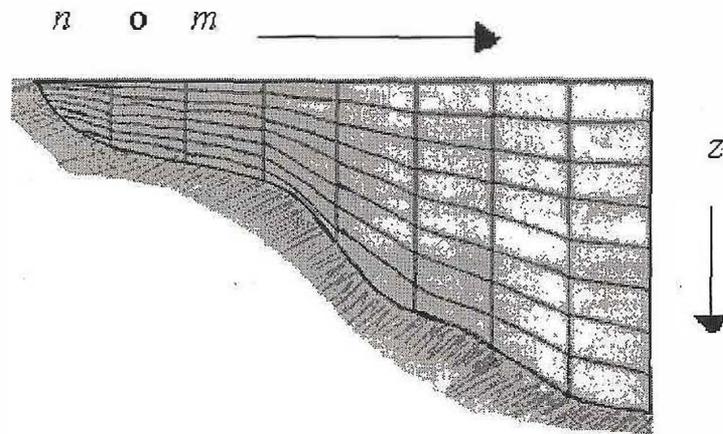


Figura 13. Esquema que presenta el arreglo de los nodos en la vertical para una malla tridimensional.

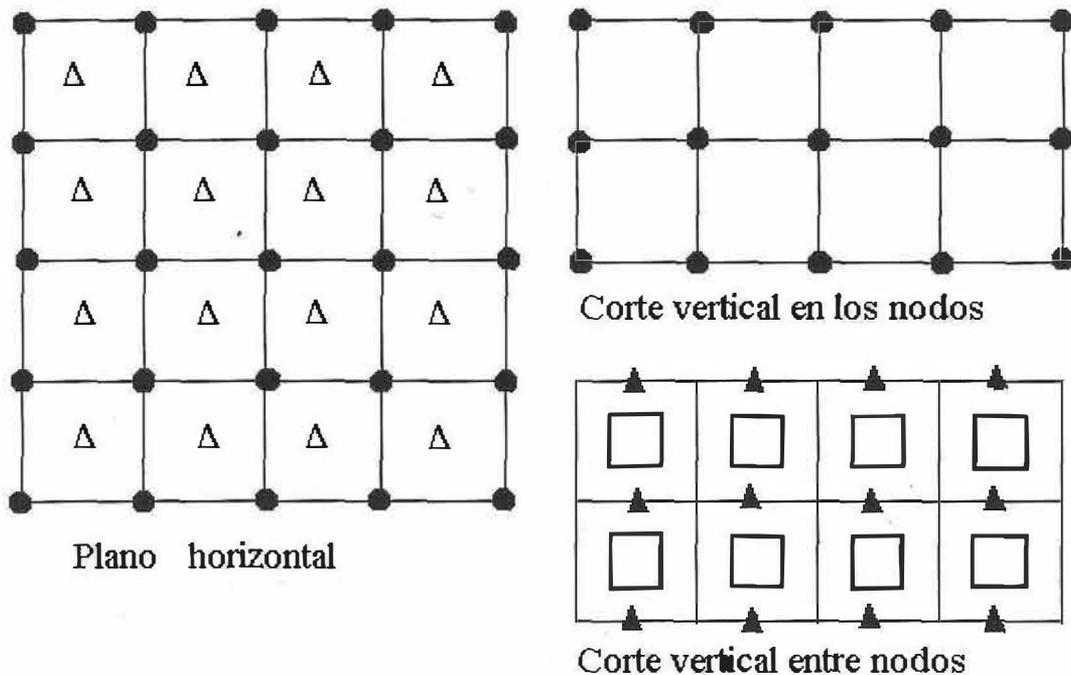


Figura 14. Arreglo espacial de las variables dentro de la malla, en donde : $\bullet = u, v$; $\Delta = T$, $\square = w$; $\blacktriangle = T$.

I I. 3. 2 . Descripción de los casos

Dos modelaciones de la descarga del agua de enfriamiento de la CTT, correspondientes a las fechas en que se tomaron mediciones del campo de temperatura superficial, conforman el presente trabajo. Las dos modelaciones corresponden a casos estacionales representativos de la meteorología y oceanografía del ST, a saber :

Caso I: presenta condiciones de viento variable de dirección SW con intensidad promedio de 3 m s^{-1} para un periodo de cuatro días del 18 al 21 de agosto de 1992.

Caso II: presenta condiciones de viento variable de dirección NW con intensidad promedio de 11.1 m s^{-1} para un periodo de cuatro días del 24 al 27 de noviembre de 1992.

I I. 4. Verificación del modelo

Debido al significativo costo que implicaría coleccionar datos cada vez que se realicen simulaciones, se hace importante eficientizar las técnicas para examinar y evaluar la influencia entre los datos muestreados y simulados.

La verificación, definida como una comparación de las predicciones del modelo con el mundo real, permite determinar si el modelo es conveniente para los propósitos de pronóstico buscados. Así, de esta manera, la verificación de un modelo se vuelve un paso obligado en la tarea de simulación.

Mediante el despliegue de gráficas con datos simulados y observados contra una variable independiente en común, se lleva a cabo la verificación del modelo

(Dent y Blackie, 1979). Para el presente trabajo se comparó la distribución espacial de las mediciones superficiales de temperatura con la de los campos térmicos modelados, mediante montajes entre los pares de plumas térmicas medidas y modeladas. Los montajes se realizaron introduciendo puntos de control en cada par de gráficas con los cuales se obtiene un sistema coordenado plano. Estos puntos permiten establecer un sistema de coordenadas espaciales (tridimensional) que sirve de base para la georeferencia de las gráficas, para así, finalmente, obtener una imagen escalada con la sobreposición de las dos imágenes originales.

Una vez realizados los montajes se calcularon las áreas de impacto de las plumas medidas y modeladas y se compararon los valores de temperatura medidos y simulados a lo largo del eje de dispersión del efluente. El trazo de la orientación y longitud del eje de dispersión del efluente se ajustó a las características geométricas de las plumas térmicas. La precisión del modelo se cuantificó determinando el grado de correlación entre las áreas calculadas y las áreas medidas (Johnson y Leone, 1977; Khazanie, 1990).

III. Resultados

III. 1. Datos de campo

III. 1. 1. Temperatura

La distribución del campo térmico superficial se describe en las figuras 2 a 6. En éstas se observa la orientación y área de influencia de la descarga hidrotermal de la Central Termoeléctrica Tuxpan para cada uno de los casos estudiados. Los valores máximos de temperatura medidos del agua de descarga así como la temperatura del cuerpo de agua receptor bajo diferentes condiciones meteorológicas y oceanográficas se resumen en la tabla II.

Tabla II. Temperaturas del medio acuático receptor y límites de la descarga hidrotermal de la central termoeléctrica

	CASO I	CASO II
FECHA	agosto 1992	noviembre 1992
temperatura del medio receptor (°C)	29.2	22.7
Valor máximo de temperatura (°C)	37.1	31.0

Nótese que la temperatura más alta del agua de descarga (Caso I) corresponde a la estación de verano cuando la temperatura superficial del agua de mar es mayor. Para el Caso II, corresponde al otoño cuando la temperatura superficial disminuye.

En las figuras correspondientes la distribución de las isotermas sigue una secuencia ascendente, v. gr. $\Delta T = + 1$ de la periferia al centro. En éstas se puede apreciar como la dispersión del efluente está determinado por el patrón de

circulación costera predominante. En el Caso I, el campo de temperatura superficial se presenta casi perpendicular a la línea de costa, esta distribución superficial obedece a una circulación costera de flujo NE. Para el Caso II la pluma térmica se encuentra en dirección a la frontera sur de la malla debido al régimen anemométrico del NW.

El área de influencia de la pluma y la extensión máxima de los isotermas limítrofes medidas, sobre el eje de dispersión de los efluentes correspondientes a los dos casos, se presenta de la siguiente manera:

Caso I : presenta las siguientes áreas de influencia: $\sim 0.231 \text{ Km}^2$ a las 12 horas del día 19 de agosto de 1992, $\sim 0.38 \text{ Km}^2$ para las 24 horas del 19 de agosto de 1992, $\sim 0.203 \text{ Km}^2$ para el día 20 de agosto de 1992 y $\sim 0.435 \text{ Km}^2$ para el día 21 de agosto.

Caso II : el área de influencia fue de $\sim 0.093 \text{ Km}^2$ y la extensión de su isoterma limítrofe fue de 700 m.

Para el Caso II se tiene un área de influencia muy pequeña debido principalmente al oleaje prevaleciente en la zona de rompiente que obliga que la masa de agua con mayor temperatura se mantenga confinada entre la zona de descarga y la obra de toma (figura 6).

III. 1. 2. Batimetría

En las figuras 5 y 6 se muestran la isóbatas medidas para los dos casos. Se puede observar como éstas se encuentran alineadas paralelas a la línea de costa debido principalmente a que la plataforma continental frente al Sitio Tuxpan tiene una pendiente llana (1/112).

Las profundidades máximas y mínimas que se muestran corresponden a las isóbatas de 1 y 10 m respectivamente. En el canal de descarga las profundidades medidas fueron de 1.54 m para los dos casos. En la obra de toma la profundidad es de 2.5 m.

III. 1. 3. Viento

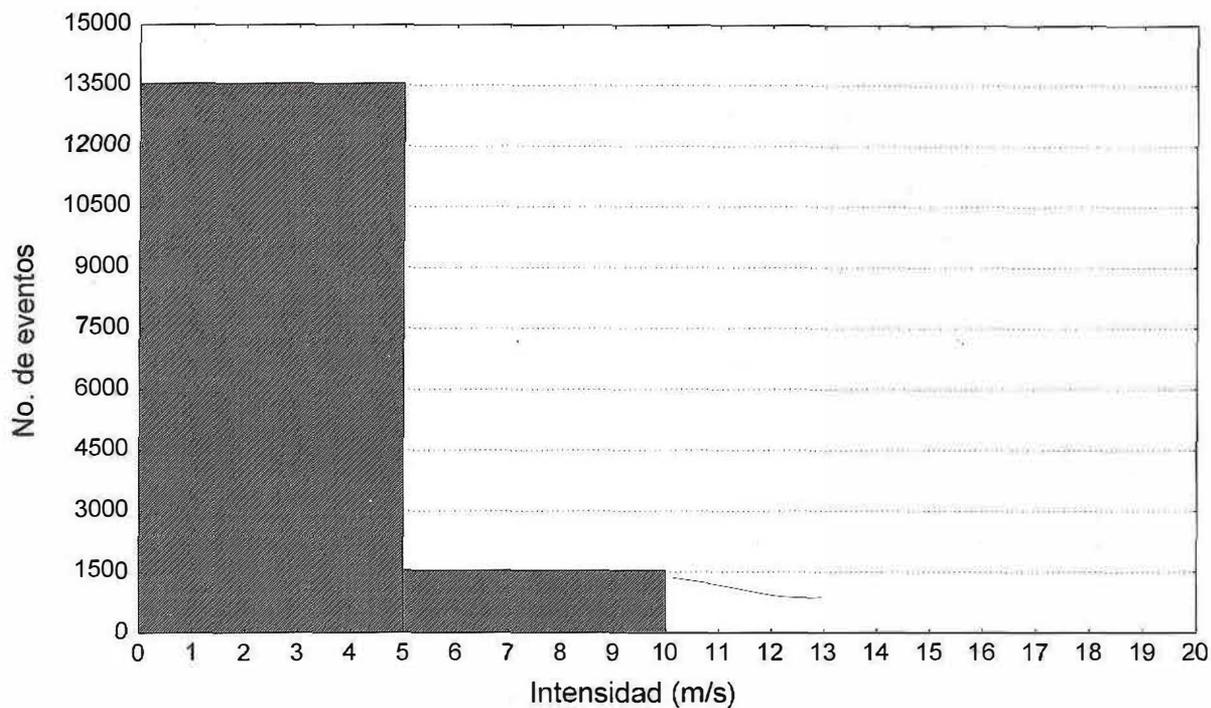
La estadística de los vientos se presenta en las figuras 15 y 16. La distribución de las intensidades se ajusta a una distribución lognormal. La distribución de las direcciones muestra una marcada tendencia bimodal.

Los valores mínimo y máximo de intensidad fueron de 0.1 m s^{-1} y 18.0 m s^{-1} , respectivamente. El número de valores de mayor ocurrencia se presentó de 0.1 a 5.0 m s^{-1} y representa aproximadamente el 95 % de la población total de datos. La dirección mostró un intervalo de variación de 5.0 a 360 grados. El número de valores de mayor ocurrencia se presentó dentro del intervalo de 180° a 315° y representa aproximadamente el 52 % de la población total de datos.

De los datos de viento disponibles se establecieron dos situaciones típicas:

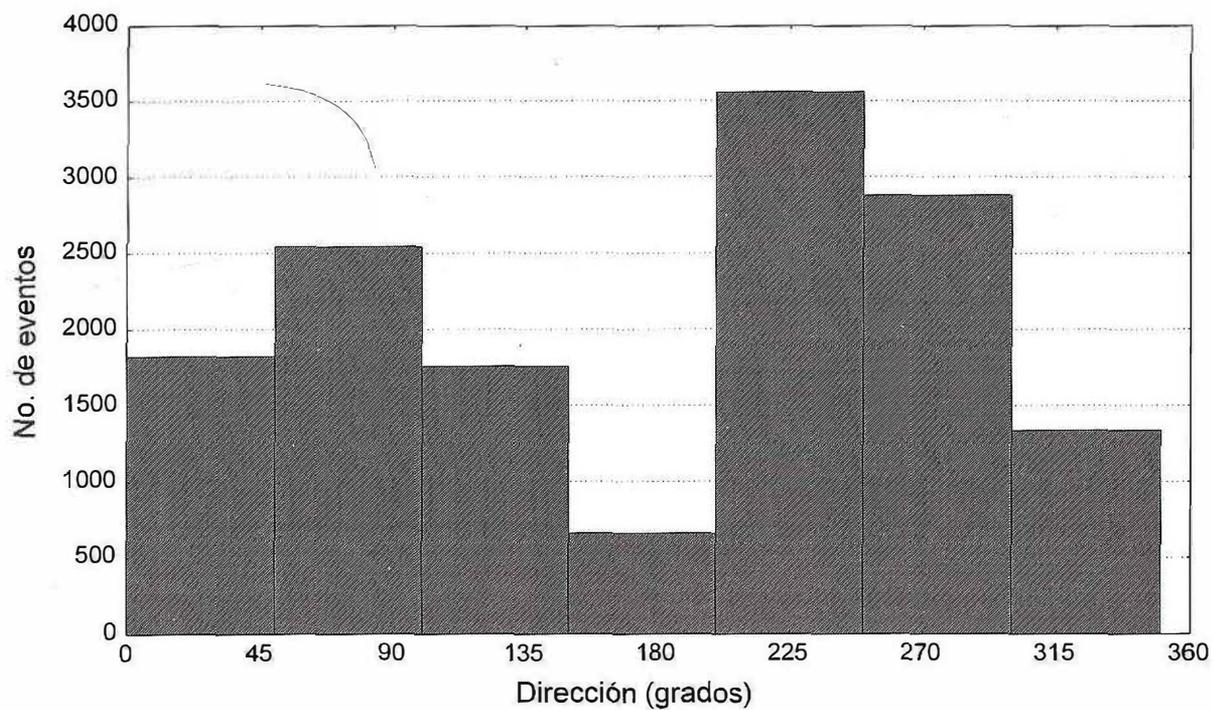
- a) **Situación de invierno**, la cual está caracterizada por vientos dominantes del sector Norte (337°).
- b) **Situación de verano**, caracterizada por vientos predominantes del sector Sur (225°).

En la tabla III se presentan las series de tiempo del viento utilizados para realizar las simulaciones de los dos casos. Cada simulación realizada incorpora el resultado acumulado del esfuerzo tangencial del viento sobre la superficie del mar, mismo que pone en movimiento a las masas de agua superficial y subsuperficial y dispersa el efluente hidrotérmico de la CTT.



Máximo:	18.0 m/s	Media:	3.06 m/s
Mínimo:	0.1 m/s	Mediana:	2.80 m/s
Rango :	18.0 m/s	Moda:	2.50 m/s
		Varianza:	2.4231 m/s
		Desv. Estándar:	1.55 m/s

Figura 15. Estadística de la intensidad del viento medido en el Sitio Cazones durante el periodo del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 1983.



Máximo:	360 grados	Media:	188.3 grados
Mínimo:	0.05 grados	Mediana:	220 grados
Rango:	360 grados	Moda:	240 grados
		Varianza:	10119.9 grados
		Desv. Estándar:	100.6 grados

Figura 16. Estadística de la dirección del viento medido en el Sitio Cazones durante el periodo del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 1983.

Tabla III. Series de tiempo de vientos utilizados para realizar simulaciones.

CASO I				CASO II			
Fecha	Hora	Dirección (grados)	Intensidad (m s^{-1})	Fecha	Hora	Dirección (grados)	Intensidad (m s^{-1})
18/ago/92	1:00	225	2.0	24/nov/92	1:00	180	5.0
	2:00	225	2.1		2:00	180	5.7
	3:00	225	2.2		3:00	180	5.0
	4:00	225	2.8		4:00	202.5	4.4
	5:00	270	1.9		5:00	202.5	4.4
	6:00	247.5	2.6		6:00	202.5	3.5
	7:00	225	2.3		7:00	202.5	3.8
	8:00	217.5	0.5		8:00	202.5	3.3
	9:00	225	1.6		9:00	180	2.8
	10:00	360	2.1		10:00	157.5	4.8
	11:00	22.5	2.1		11:00	135	3.8
	12:00	360	3.8		12:00	135	2.6
	13:00	360	4.9		13:00	22.5	4.8
	14:00	337.5	5.5		14:00	360	7.1
	15:00	360	6.0		15:00	360	9.6
	16:00	360	5.6		16:00	337.5	10.3
	17:00	337.5	5.7		17:00	337.5	10.1
	18:00	337.5	5.6		18:00	337.5	8.0
	19:00	337.5	4.2		19:00	315	6.2
	20:00	315	3.3		20:00	315	5.7
	21:00	292.5	1.6		21:00	292.5	4.4
	22:00	225	1.8		22:00	180	2.4
	23:00	255	1.8		23:00	202.5	2.3
	24:00	225	0.9		24:00	315	1.9
19/ago/92	1:00	225	1.7	25/nov/92	1:00	315	1.3
	2:00	225	2.1		2:00	337.5	4.9
	3:00	225	1.5		3:00	337.5	7.8
	4:00	225	1.9		4:00	337.5	7.1
	5:00	225	2.4		5:00	337.5	7.4
	6:00	225	3.4		6:00	337.5	6.3
	7:00	225	3.3		7:00	337.5	5.1
	8:00	225	2.5		8:00	315	6.5
	9:00	202.5	2.5		9:00	337.5	8.8
	10:00	135	4.2		10:00	337.5	9.1
	11:00	135	3.3		11:00	337.5	10.8
	12:00	135	3.7		12:00	337.5	11.9
	13:00	157.5	4.0		13:00	337.5	9.4
	14:00	135	4.0		14:00	337.5	12.2

Tabla III (continuación)

15:00	135	3.5	15:00	337.5	15.3		
16:00	157.5	3.6	16:00	337.5	16.2		
17:00	157.5	3.1	17:00	337.5	17.1		
18:00	157.5	2.5	18:00	337.5	15.9		
19:00	157.5	1.4	19:00	337.5	14.8		
20:00	202.5	1.6	20:00	315	12.1		
21:00	225	1.8	21:00	315	11.5		
22:00	225	2.2	22:00	315	12.4		
23:00	225	2.8	23:00	315	10.7		
24:00	225	2.8	24:00	315	11.0		
20/ago/92	1:00	225	3.0	26/nov/92	1:00	315	9.7
	2:00	225	3.1		2:00	315	10.0
	3:00	225	2.6		3:00	315	9.2
	4:00	247.5	2.2		4:00	315	9.1
	5:00	225	2.7		5:00	315	8.8
	6:00	225	3.3		6:00	315	12.2
	7:00	225	3.1		7:00	337.5	13.0
	8:00	225	3.0		8:00	337.5	12.9
	9:00	225	3.1		9:00	337.5	11.9
	10:00	135	2.9		10:00	337.5	11.7
	11:00	112.5	2.8		11:00	337.5	13.2
	12:00	112.5	2.3		12:00	337.5	13.9
	13:00	90	2.6		13:00	337.5	15.2
	14:00	45	2.5		14:00	337.5	16.9
	15:00	45	2.5		15:00	337.5	15.8
	16:00	22.5	1.8		16:00	337.5	15.3
	17:00	360	2.9		17:00	337.5	15.0
	18:00	360	4.8		18:00	337.5	13.5
	19:00	360	5.1		19:00	315	13.9
	20:00	315	3.6		20:00	315	14.1
	21:00	315	2.2		21:00	315	16.2
	22:00	292.5	1.8		22:00	315	17.5
	23:00	292.5	1.2		23:00	315	17.3
	24:00	225	1.9		24:00	315	18.3
21/ago/92	1:00	225	1.8	27/nov/92	1:00	315	20.0
	2:00	315	1.6		2:00	315	19.8
	3:00	315	2.2		3:00	315	19.1
	4:00	45	3.2		4:00	315	19.6
	5:00	45	1.9		5:00	315	19.5
	6:00	45	3.2		6:00	315	20.1
	7:00	315	5.9		7:00	315	20.1

Tabla III (continuación)

8:00	315	6.4	8:00	315	18.6
9:00	337.5	5.6	9:00	315	17.7
10:00	337.5	6.9	10:00	315	18.4
11:00	337.5	6.3	11:00	315	18.6
12:00	337.5	7.9	12:00	315	18.1
13:00	360	7.2	13:00	315	14.6
14:00	360	7.6	14:00	337.5	15.4
15:00	337.5	7.7	15:00	337.5	15.5
16:00	360	6.5	16:00	315	14.0
17:00	337.5	4.9	17:00	315	11.4
18:00	315	3.6	18:00	337.5	12.5
19:00	315	1.9	19:00	337.5	12.5
20:00	292.5	1.1	20:00	337.5	10.5
21:00	270	1.2	21:00	315	10.3
22:00	247.5	1.3	22:00	315	10.4
23:00	225	2.4	23:00	315	9.4
24:00	225	2.2	24:00	315	9.1
	$\bar{d}_* = 23836$	$\bar{u}_* = 3.18$		$\bar{d}_* = 30187$	$\bar{u}_* = 11.11$

III. 2. Modelación matemática

III. 2. 1. Caso I

III. 2. 1. 1. Campo de circulación superficial

En las figuras 17, 18, 19 y 20 se presenta la evolución del campo de circulación superficial costero generado después de 36, 48, 72 y 80 horas de simulación, respectivamente. El tiempo real de simulación fue de 96 horas con vientos variables del suroeste con intensidades promedio de 3 m s^{-1} .

El campo de circulación superficial tiende a seguir la dirección del viento incidente. A las 36 horas de simulación (fig. 17), se han alcanzado velocidades de $\sim 13 \text{ cm s}^{-1}$ en la región inmediata a la descarga disminuyendo hasta $\sim 2.5 \text{ cm s}^{-1}$ en el campo lejano. Conforme avanza el tiempo de simulación, la intensidad del campo dinámico a las 48 horas de simulación (fig. 18), presenta valores de velocidad de $\sim 3 \text{ cm s}^{-1}$ y de $\sim 1 \text{ cm s}^{-1}$ en la zona inmediata a la descarga y en el campo lejano, respectivamente. Cuando se han cumplido 72 horas de simulación (fig. 19), la velocidad en la región inmediata a la descarga es de $\sim 2 \text{ cm s}^{-1}$ disminuyendo hasta $\sim 1 \text{ cm s}^{-1}$ en el campo lejano. Conforme la velocidad del viento aumenta y cambia de dirección (SW-NW), la corriente responde rápidamente, especialmente a las 80 horas de simulación (fig. 20), cuando se han alcanzado velocidades superiores a los 20 cm s^{-1} en la región inmediata a la descarga.

III. 2. 1. 2. Campo de circulación subsuperficial

En las figuras 21, 22, 23 y 24 se presenta el campo de circulación prevaleciente a 1 m de profundidad, generado después de 96 horas de simulación. Se puede observar como la dirección de la corriente es muy similar a aquella obtenida en la

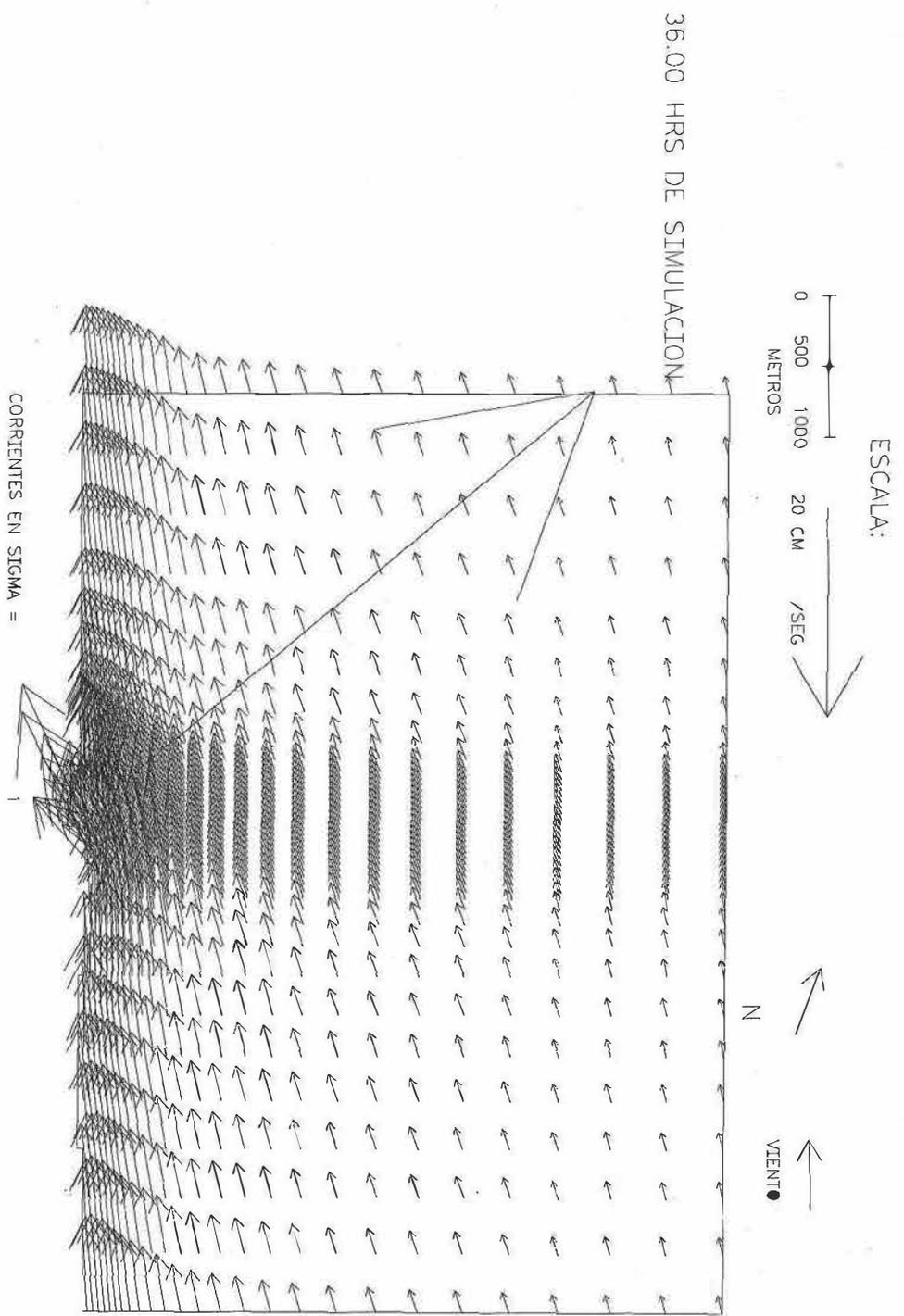


Figura 17. Campo de circulación superficial después de 36 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Corrientes en sigma = 1).

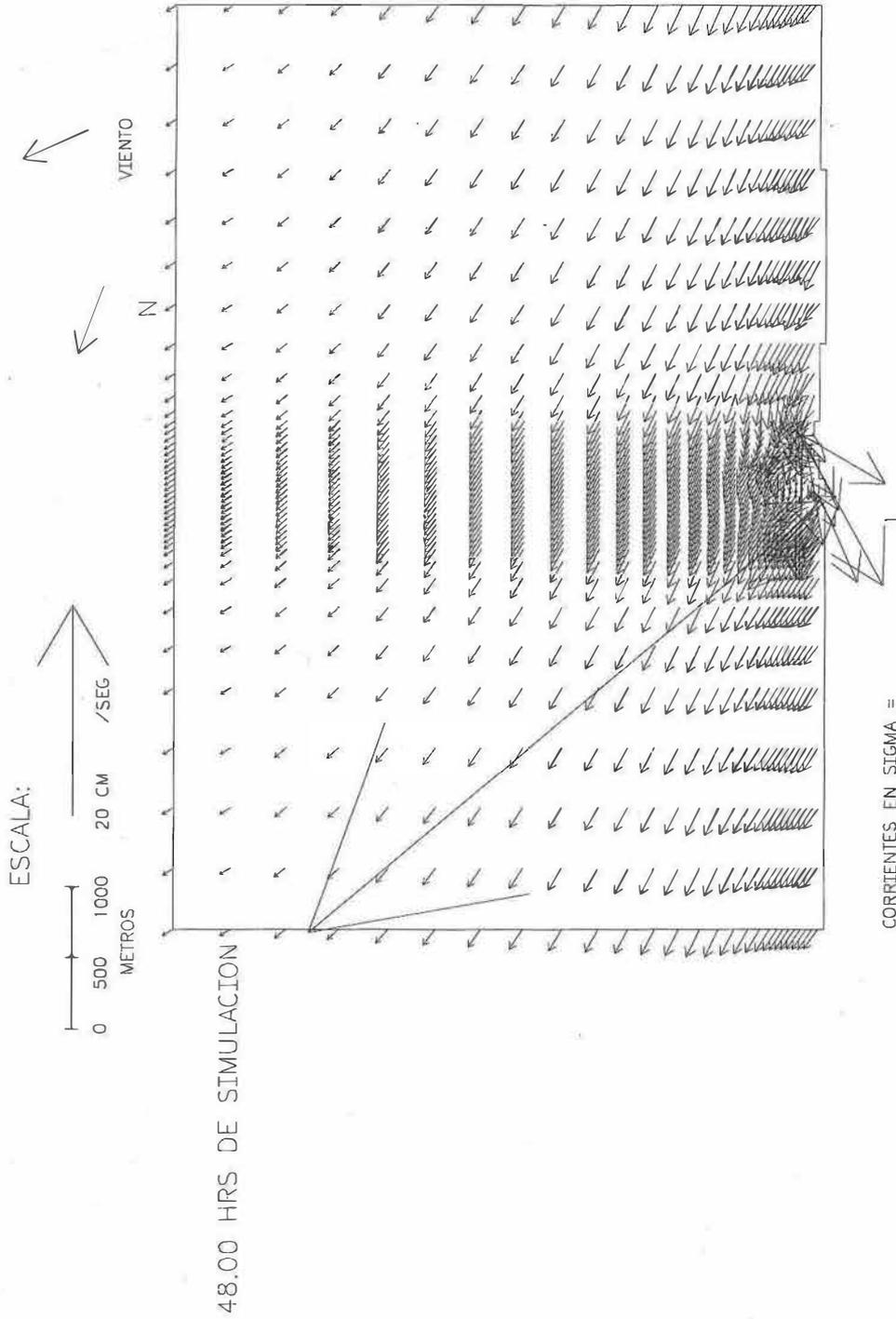


Figura 18. Campo de circulación superficial después de 48 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Corrientes en sigma = 1).

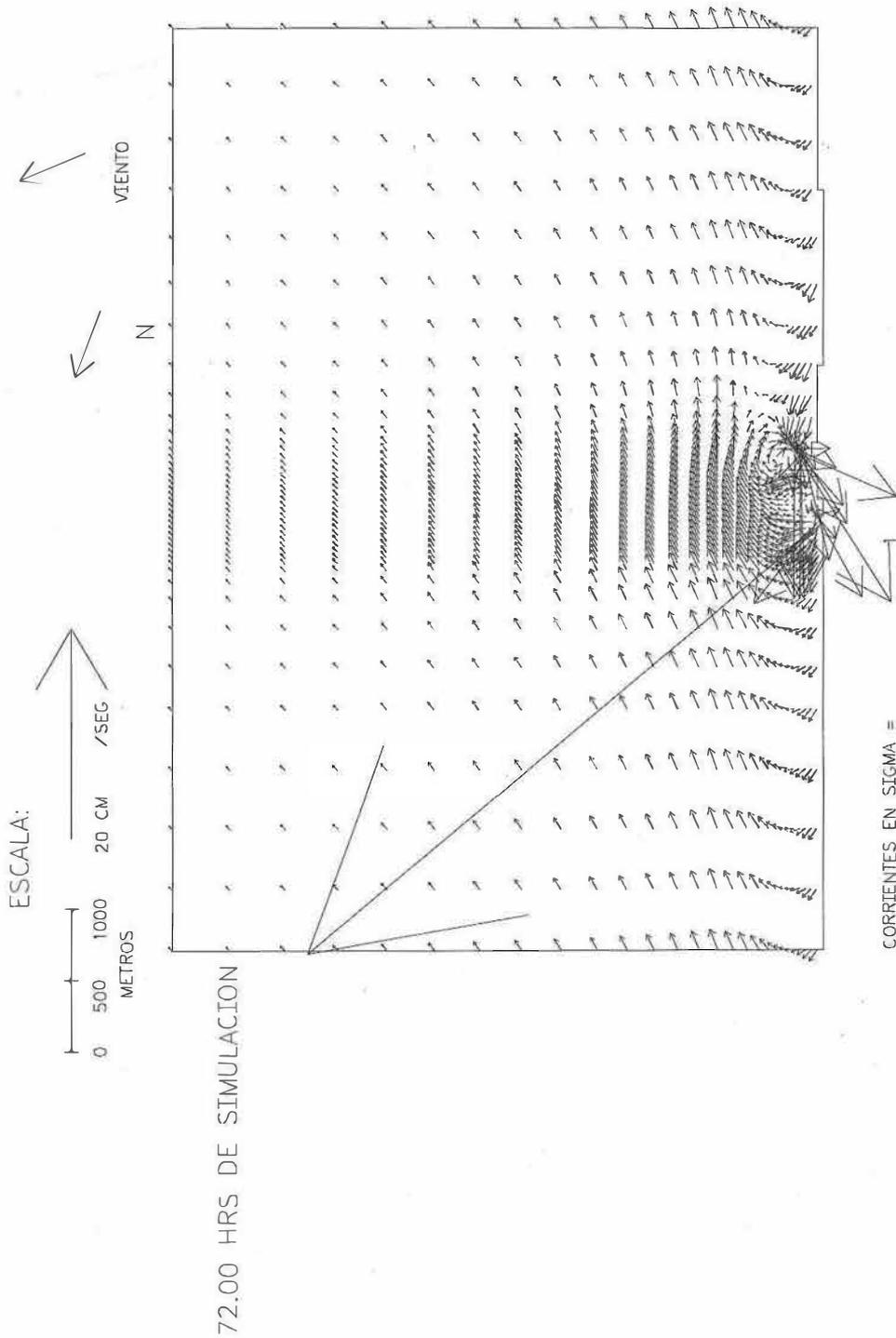


Figura 19. Campo de circulación superficial después de 72 horas de simulación. Caso \bar{i} , agosto de 1992. (Corrientes en $\sigma = 1$).

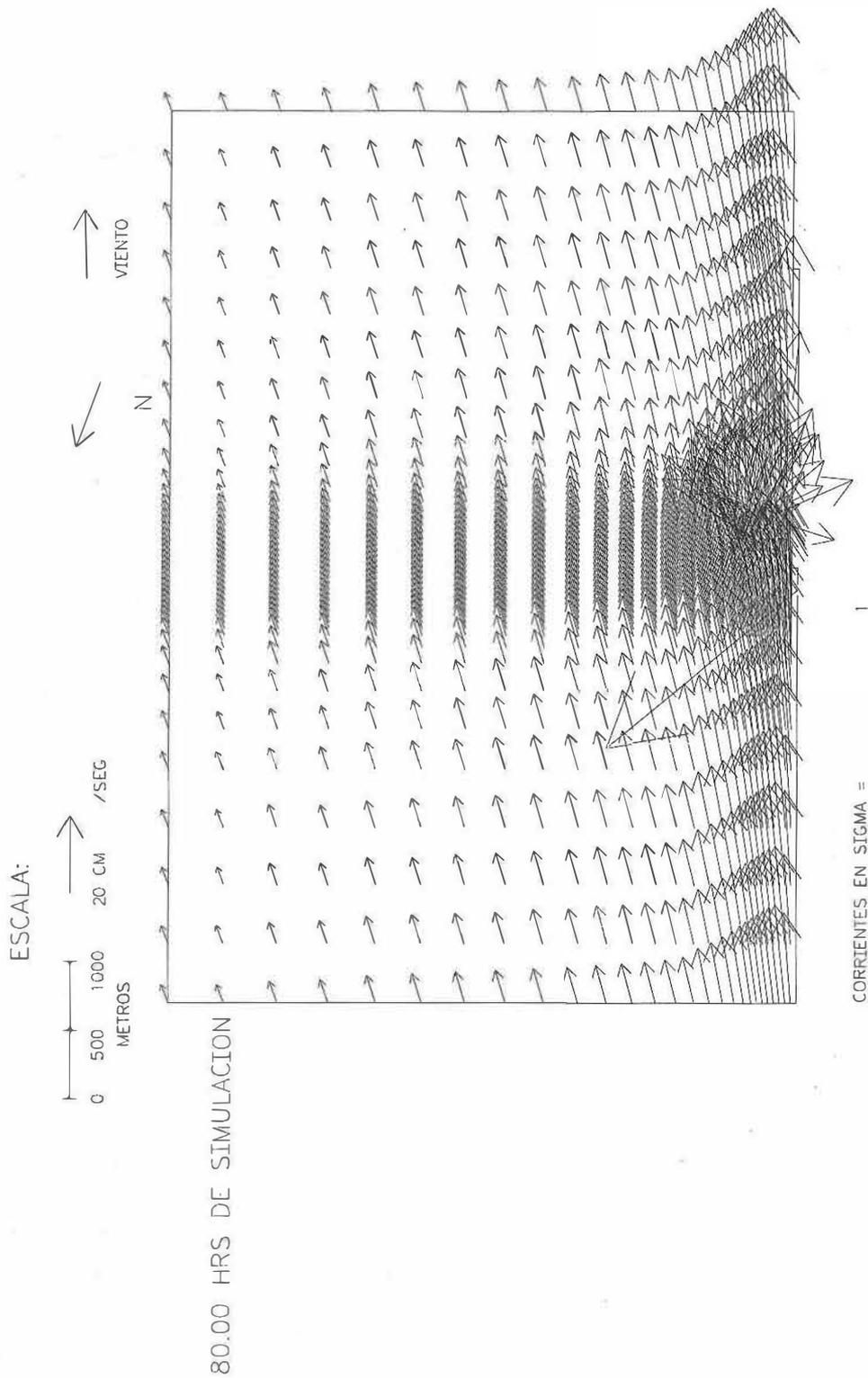


Figura 20. Campo de circulación superficial después de 80 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Corrientes en sigma = 1).

capa superficial (figuras 17, 18, 19 y 20). Las velocidades subsuperficiales son de menor magnitud debido a la fricción ejercida por las capas de fluidos superiores.

Las velocidades en la obra de toma son de $\sim 20 \text{ cm s}^{-1}$ y en la zona aledaña a la descarga fluctúan entre $\sim 1 \text{ cm s}^{-1}$ a $\sim 5 \text{ cm s}^{-1}$. En la zona de descarga se presenta un flujo en el sentido opuesto a la descarga, lo cual concuerda con el campo de circulación superficial (figuras 17, 18, 19 y 20). Esta circulación es consecuencia del cumplimiento de la ley de conservación de masa provocado por un flujo saliente superficial que es reemplazado por un contraflujo subsuperficial. Fuera de la influencia de la descarga, la velocidad de la corriente es de $\sim 2 \text{ cm s}^{-1}$.

I I I . 2 . 1 . 3 . Distribución vertical

El campo de velocidad en la zona de descarga ($m=18$) se describe en la figuras 25, 26, 27 y 28. La orientación de esta sección transversal es perpendicular a la línea de costa. La velocidad de la descarga es de $\sim 50 \text{ cm s}^{-1}$ y está asociado a una profundidad de 1.5 m. en el canal de descarga. Se puede observar un flujo hacia la descarga, producto del cumplimiento de la ley de conservación de masa.

La distribución vertical del campo de velocidad en la obra de toma ($n=5$), se presenta en las figuras 29, 30, 31 y 32. La velocidad del flujo entrante es de $\sim 13 \text{ cm s}^{-1}$ y constante desde la superficie al fondo, a 2.5 m, como consecuencia de la succión derivada del bombeo de la central para abastecerse de agua para enfriamiento de sus condensadores.

Debido a que la plataforma continental frente al ST tiene una pendiente llana, no hay incremento en la velocidad puesto que no existen disminuciones bruscas de la profundidad. En las proximidades del fondo, donde, en concordancia con la física de

la dinámica de los fluidos, el perfil vertical de la distribución de velocidad disminuye gradualmente hasta llegar a cero en la capa límite.

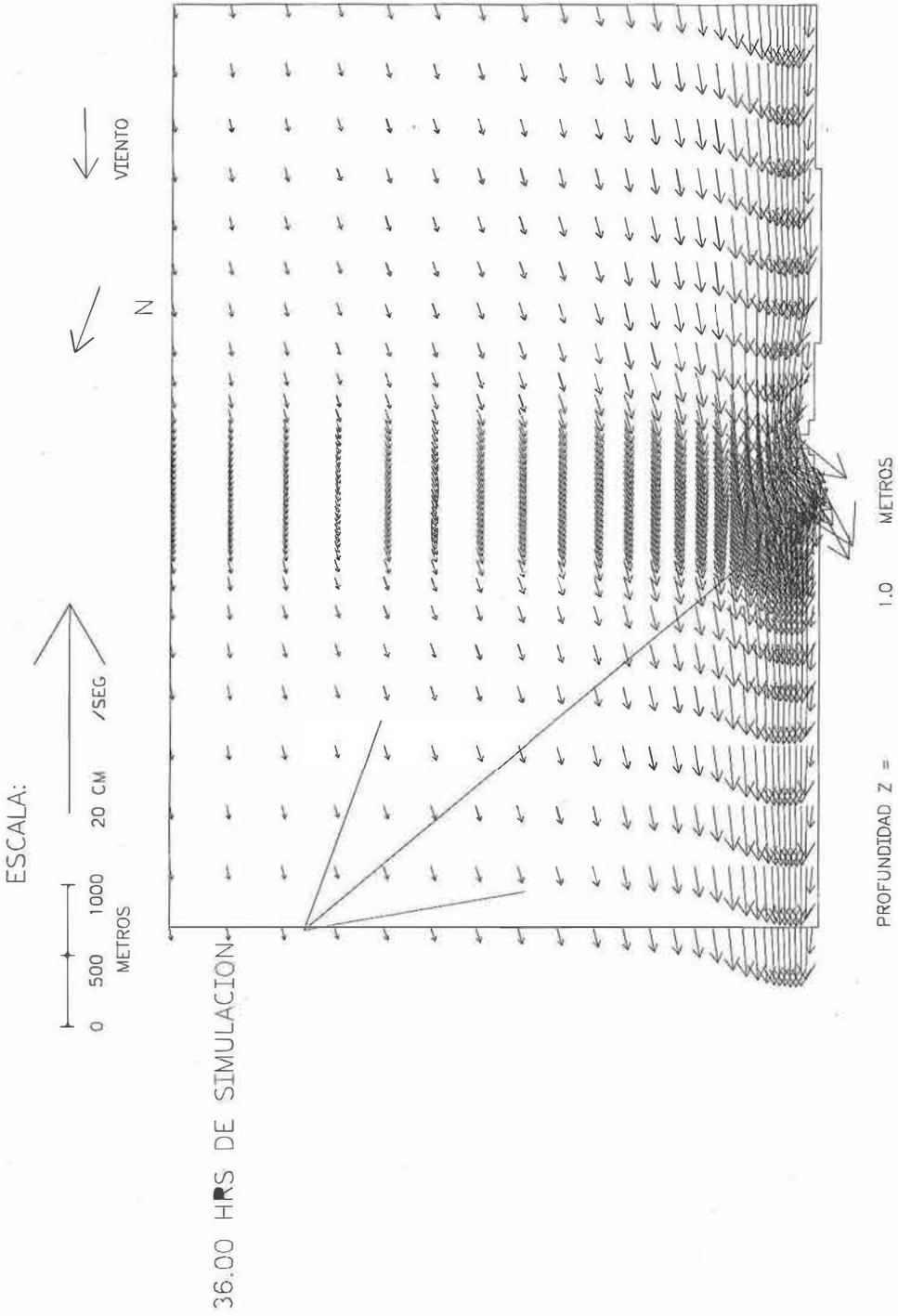


Figura 21. Campo de circulación subsuperficial después de 36 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Profundidad Z = 1).

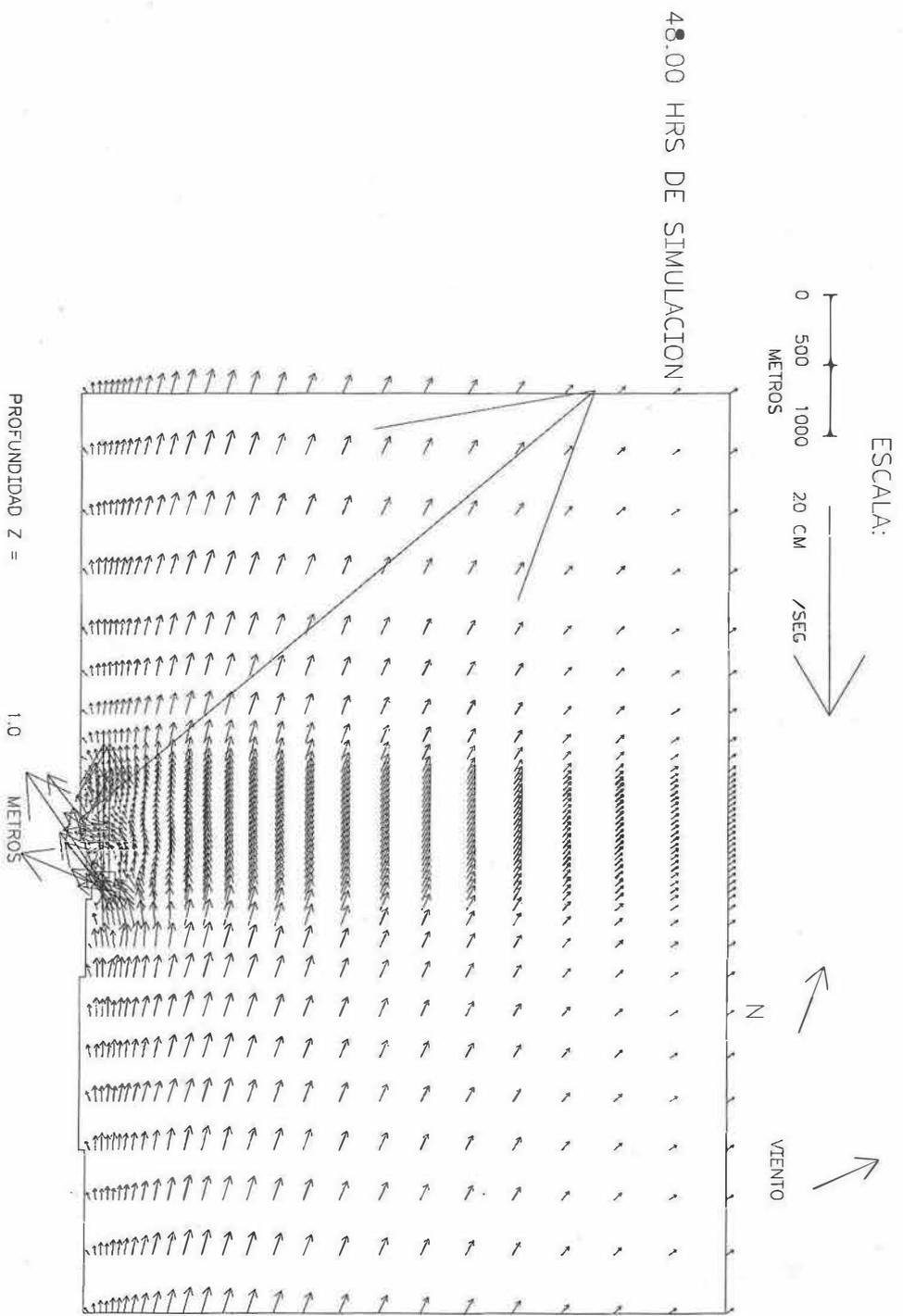


Figura 22. Campo de circulación subsuperficial después de 48 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Profundidad Z = 1).

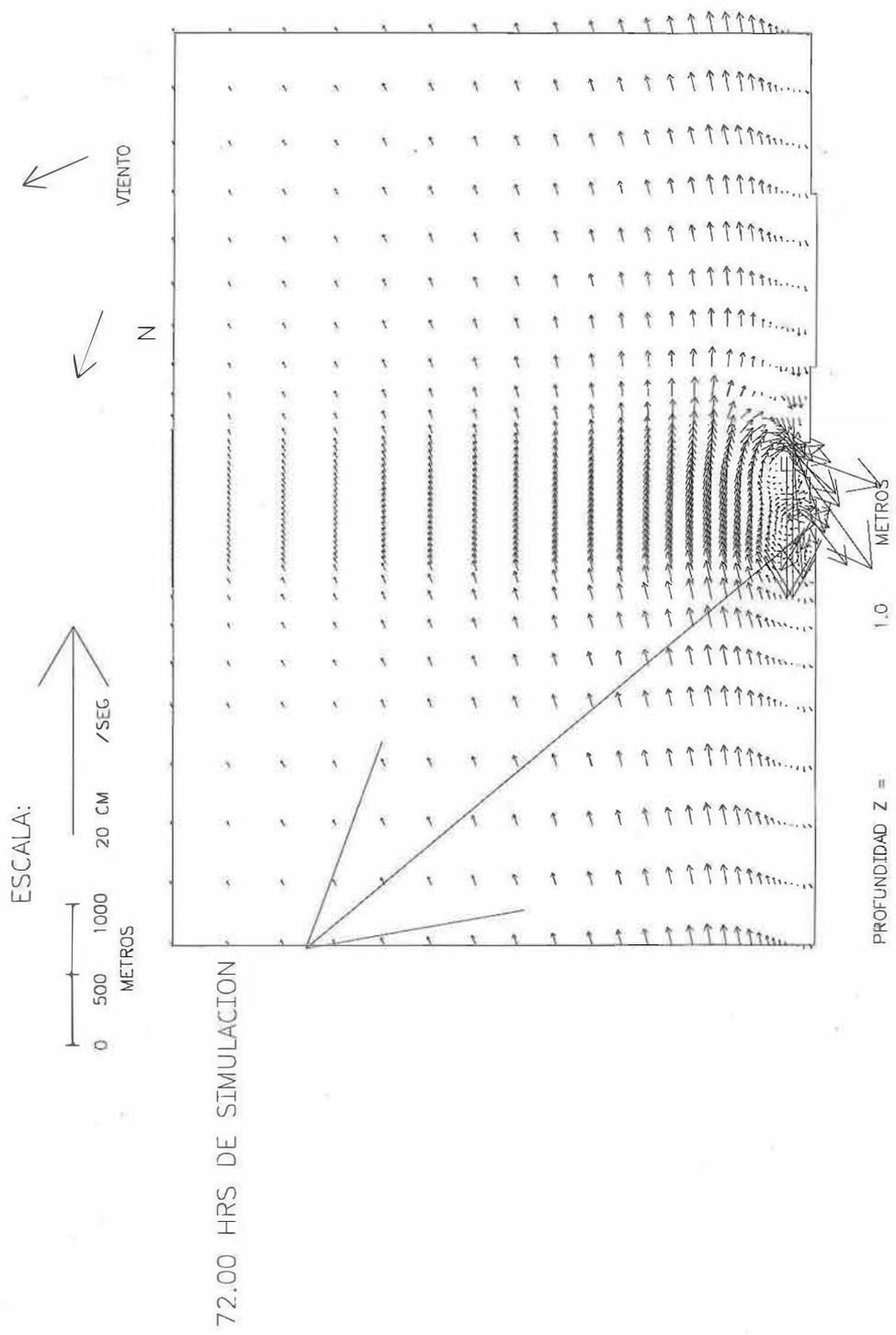


Figura 23. Campo de circulación subsuperficial después de 72 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Profundidad Z = 1).

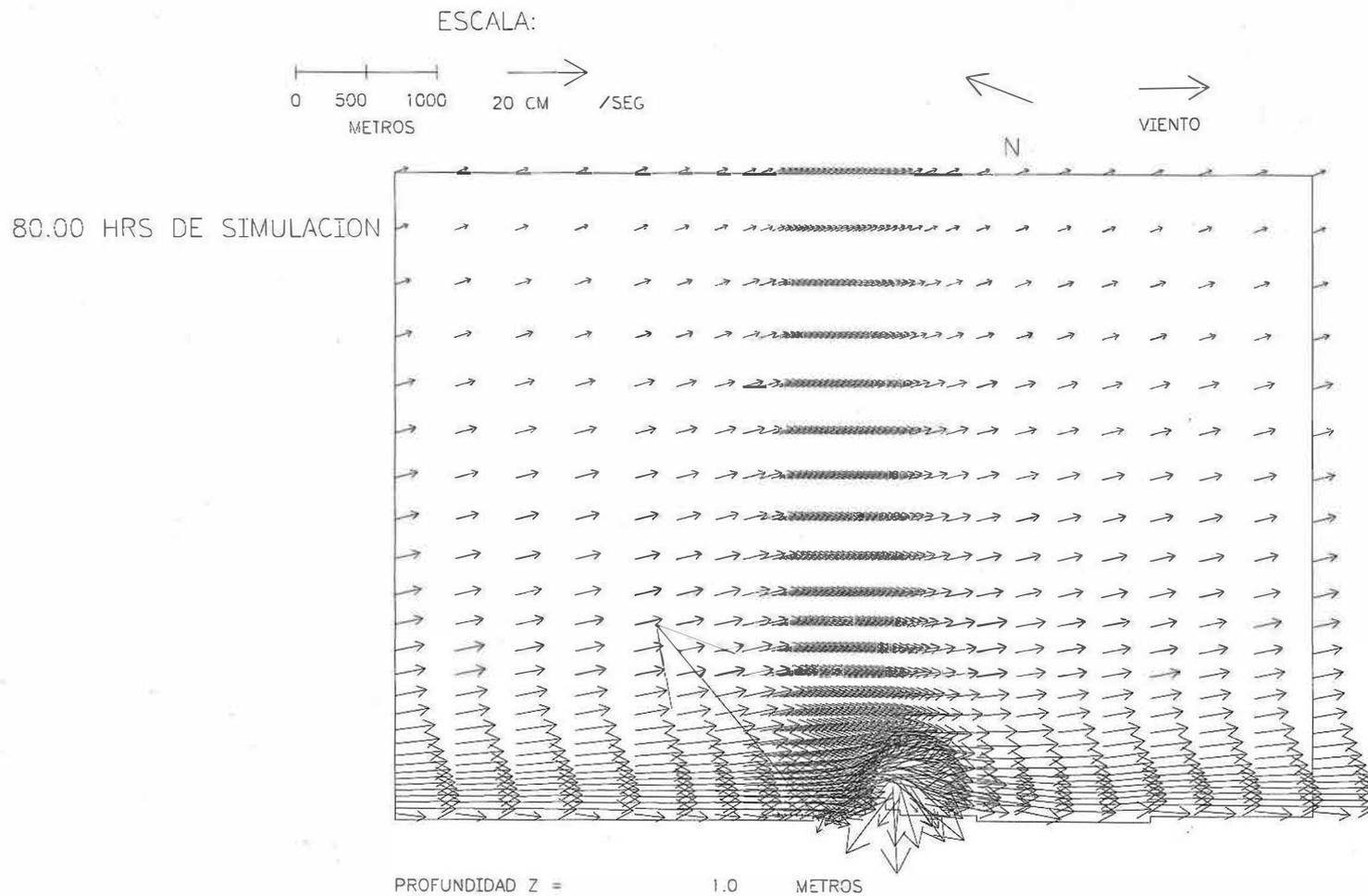


Figura 24. Campo de circulación subsuperficial después de 80 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. (Profundidad $Z = 1$).

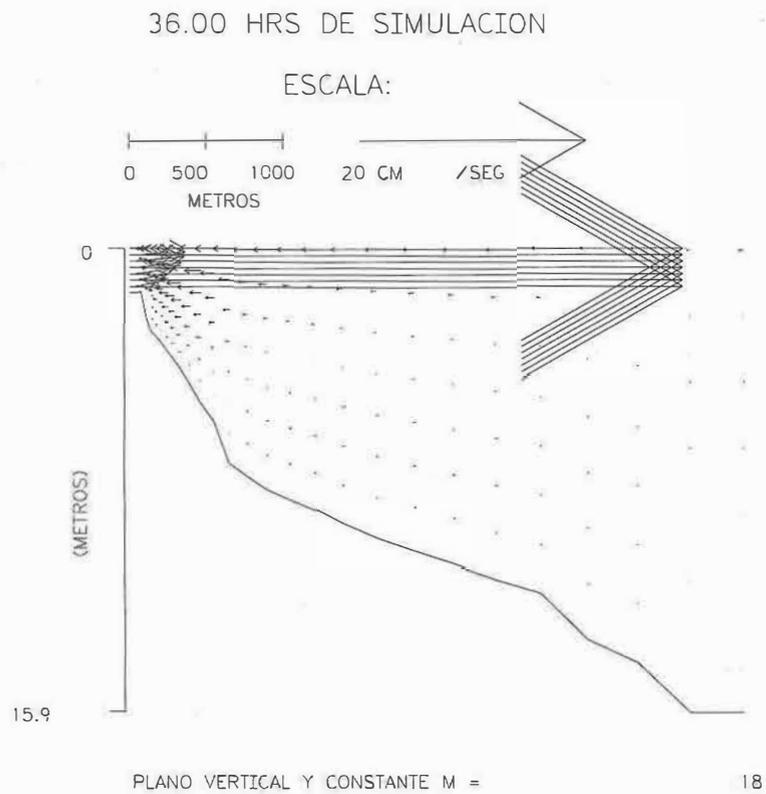


Figura 25. Distribución vertical del campo de velocidad después de 36 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Transecto $m = 18$.

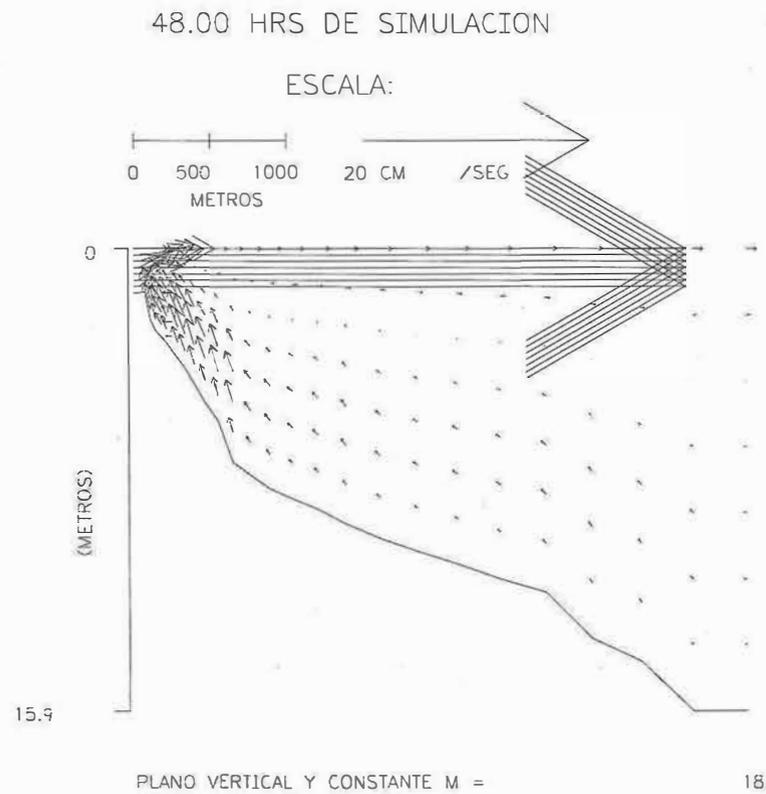


Figura 26. Distribución vertical del campo de velocidad después de 48 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Transecto $m = 18$.

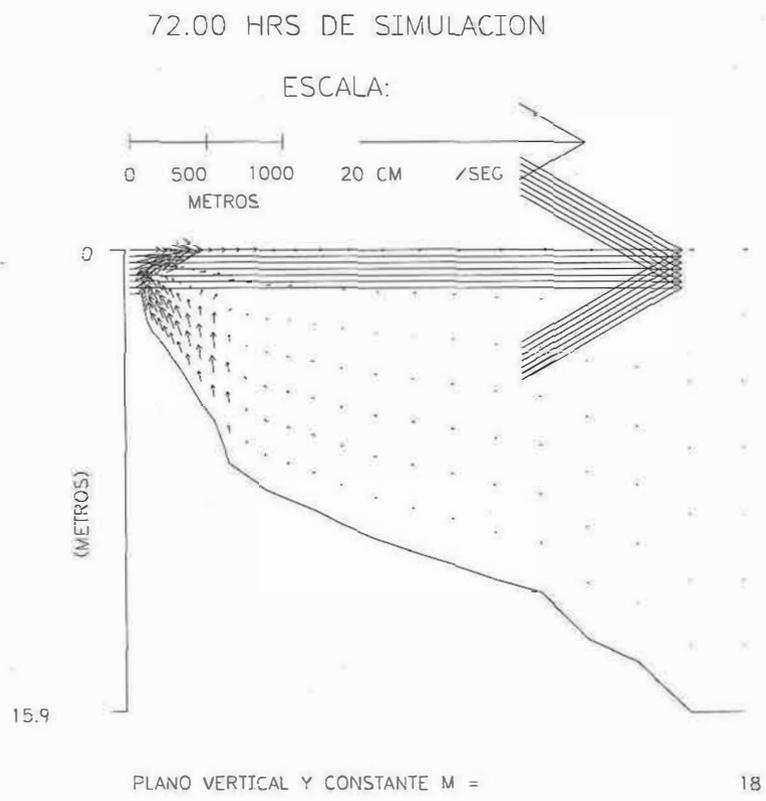


Figura 27. Distribución vertical del campo de velocidad después de 72 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Transecto $m = 18$.

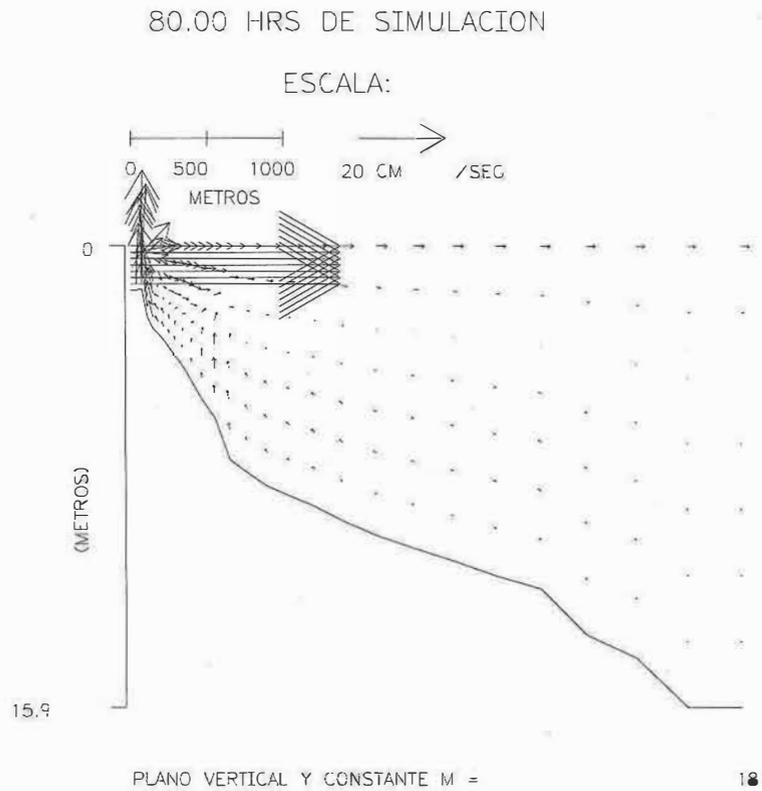


Figura 28. Distribución vertical del campo de velocidad después de 80 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Transecto $m = 18$.

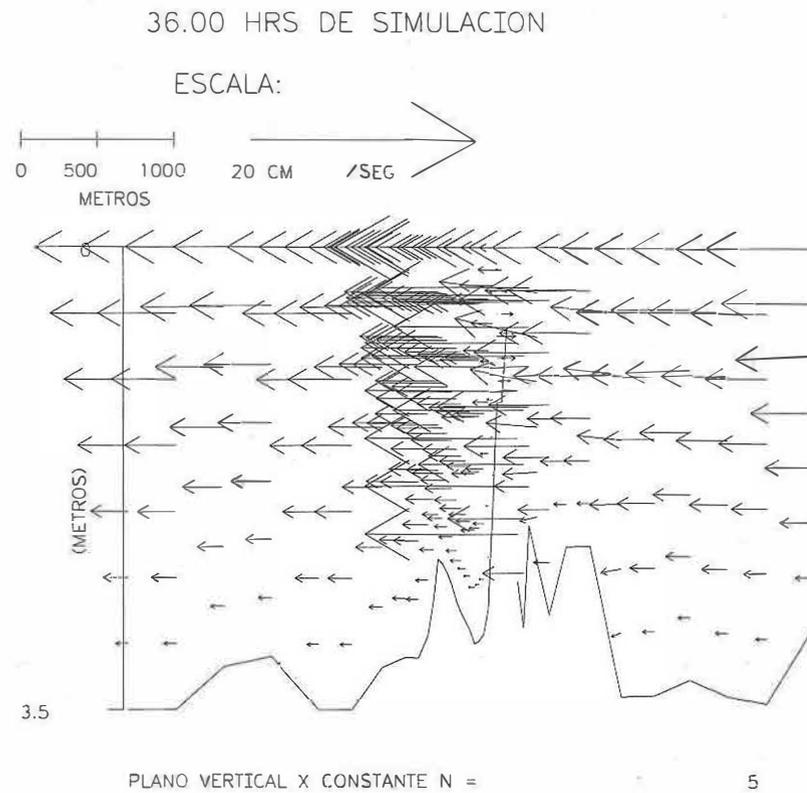


Figura 29. Distribución vertical del campo de velocidad después de 36 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Transecto $n = 5$.

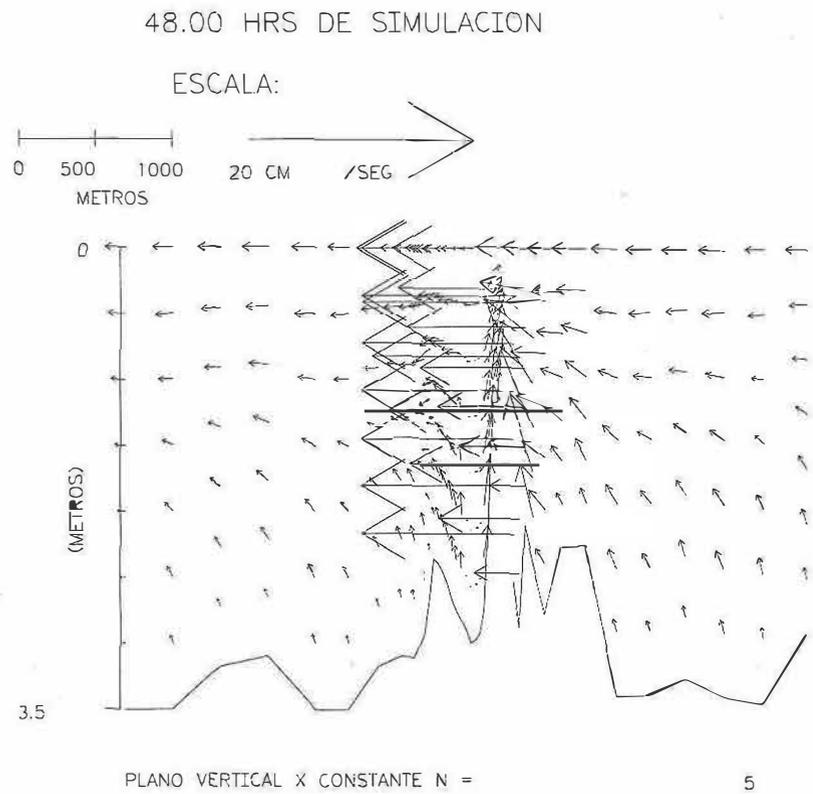


Figura 30. Distribución vertical del campo de velocidad después de 48 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Transecto $n = 5$.

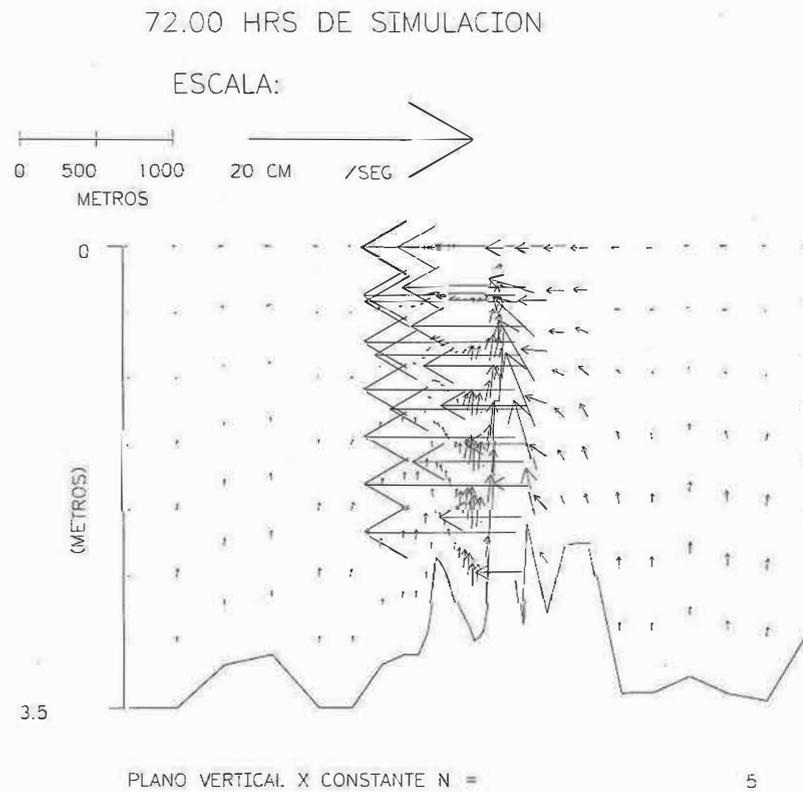


Figura 31. Distribución vertical del campo de velocidad después de 72 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Transecto $n = 5$.

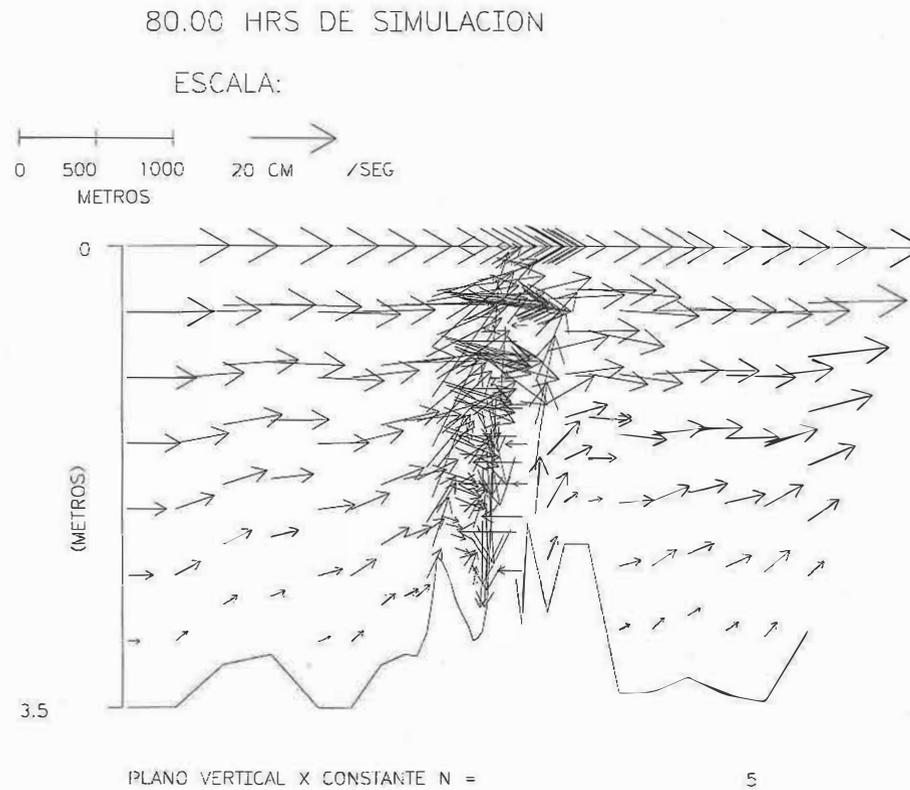


Figura 32. Distribución vertical del campo de velocidad después de 80 horas de simulación. Caso I, agosto de 1992. Transecto $n = 5$.

III. 2. 1. 4. Campo de temperatura

III. 2. 1. 4. 1. Distribución horizontal

La distribución del campo de temperatura superficial se describe en las figuras 33, 34, 35 y 36. La temperatura superficial del medio acuático receptor es de 29.2° C y la isoterma de 30° C, delimita la influencia del efluente hidrotérmico. El gradiente entre las isotermas internas que conforman el efluente es de 1° C.

La dispersión superficial del efluente está determinado por el campo dinámico. Conforme avanza el tiempo de simulación a 36, 48 y 72 horas (figuras 33, 34 y 35), el efluente hidrotérmico se orienta perpendicular al punto de descarga y a la línea de costa, obedeciendo a un patrón de circulación costero inducido por vientos provenientes del SE. Sin embargo, puede observarse que la isoterma limítrofe (30°C) se propaga hacia la zona aledaña a la escollera de la obra de toma.

A las 80 horas de simulación (fig. 36) el efluente comienza a orientarse hacia la frontera sur de la malla, producto del cambio en la dirección del viento de SW-NW, lo cual concuerda con el campo de circulación superficial (fig. 20).

En las figuras 37, 38, 39 y 40, se presenta la comparación entre las coberturas de las áreas de influencia del campo térmico simulado y medido del 19 al 21 de agosto de 1992. El área que cubre la isoterma limítrofe simulada, 30°C, a las 36 horas de simulación, es de $\sim 0.24 \text{ Km}^2$, la cual representa una sobreestimación de $\sim 4\%$ con respecto a la superficie medida, $\sim 0.231 \text{ Km}^2$, del efluente térmico para la misma isoterma. La comparación entre las coberturas de las áreas de influencia del campo térmico de las 48 horas de simulación y aquel medido el 19 de agosto a las 24 horas (fig. 38), muestra que, el área que cubre la isoterma limítrofe simulada es de $\sim 0.34 \text{ Km}^2$. Para las 72 horas de simulación, la comparación entre las coberturas de las áreas de influencia, se muestra en la figura 39. El área de la isoterma limítrofe

simulada, es de $\sim 0.21 \text{ Km}^2$. Para las cuatro comparaciones se observa como a medida que aumenta la temperatura, $>30^\circ\text{C}$, la diferencia entre las áreas medidas y simuladas disminuye, como puede apreciarse en las figuras 41, 42, 43 y 44 y en la tabla IV. En la comparación de las isotermas, el modelo subestima la posición de éstas encontrándose la mínima diferencia de $\sim 17 \text{ m}$ en la isoterma de 36°C a la 36 horas de simulación. Para las 48 y 72 horas de simulación, las isotermas de 33°C y 32°C simulada y medida coincidieron en el mismo punto espacial, respectivamente.

El coeficiente de correlación entre las áreas medidas y simuladas queda de la siguiente manera: a) para la comparación a las 36 horas de simulación es de 0.98, b) a las 48 horas de simulación es de 0.99, c) a las 72 horas de simulación es de 0.97 y d) a las 80 horas de simulación es de 0.93. En la tabla V y en las figuras 45, 46, 47 y 48 se presenta los valores de la temperatura y su ubicación a lo largo del eje de dispersión.

Tabla IV. Comparación de las áreas de influencia medidas y simuladas para el Caso I.

ISOTERMA ($^\circ\text{C}$)	ÁREA DE INFLUENCIA MEDIDA (Km^2)				ÁREA DE INFLUENCIA SIMULADA (Km^2)			
	19/08/92 (12 hrs)	19/08/92 (24 hrs)	20/08/92 (24 hrs)	21/08/92 (8 hrs)	36 horas	48 horas	72 horas	80 horas
30° C	0.231	0.380	0.203	0.435	0.240	0.340	0.210	0.346
31° C	0.133	0.190	0.180	0.412	0.151	0.177	0.150	0.237
32° C	0.110	0.140	0.120	0.320	0.091	0.125	0.104	0.178
33° C	0.100	0.094	0.091	0.198	0.080	0.083	0.071	0.133
34° C	0.066	0.074	0.068	0.091	0.042	0.053	0.051	0.100
35° C	0.037	0.049	0.023	0.035	0.020	0.038	0.040	0.082
36° C	0.021	0.036	0.018	0.015	0.011	0.016	0.021	0.055

Tabla V. Comparación de los valores de temperatura simulados y medidos a lo largo del eje de dispersión. Caso I, 19, 20 y 21 de agosto de 1992.

ISOTERMA		DISTANCIA (m)			
		19/08/92 (12 hrs)	19/08/92 (24 hrs)	20/08/92 (24 hrs)	21/08/1992 (8 hrs)
30°C	simulada	600	833	350	460
	medida	660	783	333	190
31°C	simulada	470	566	316	383
	medida	560	533	316	170
32°C	simulada	400	400	284	333
	medida	550	433	284	140
33°C	simulada	335	316	250	300
	medida	430	333	300	118
34°C	simulada	283	233	233	266
	medida	350	233	266	100
35°C	simulada	200	150	183	216
	medida	220	100	250	95
36°C	simulada	150	116	166	170
	medida	133	83	183	90

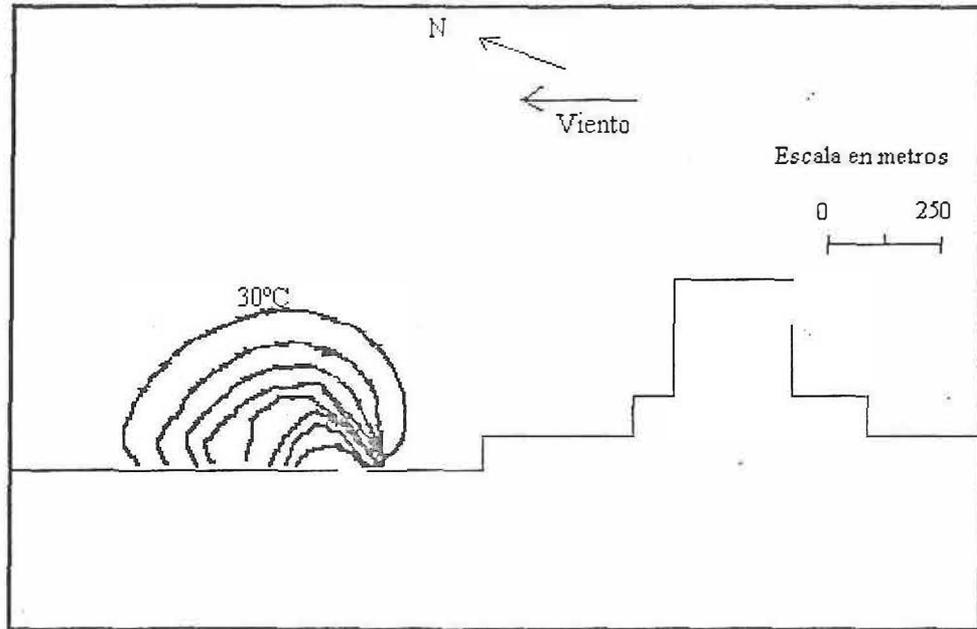


Figura 33. Distribución superficial de temperatura después de 36 horas de simulación. La isolínea externa del efluente corresponde al valor mínimo de temperatura.

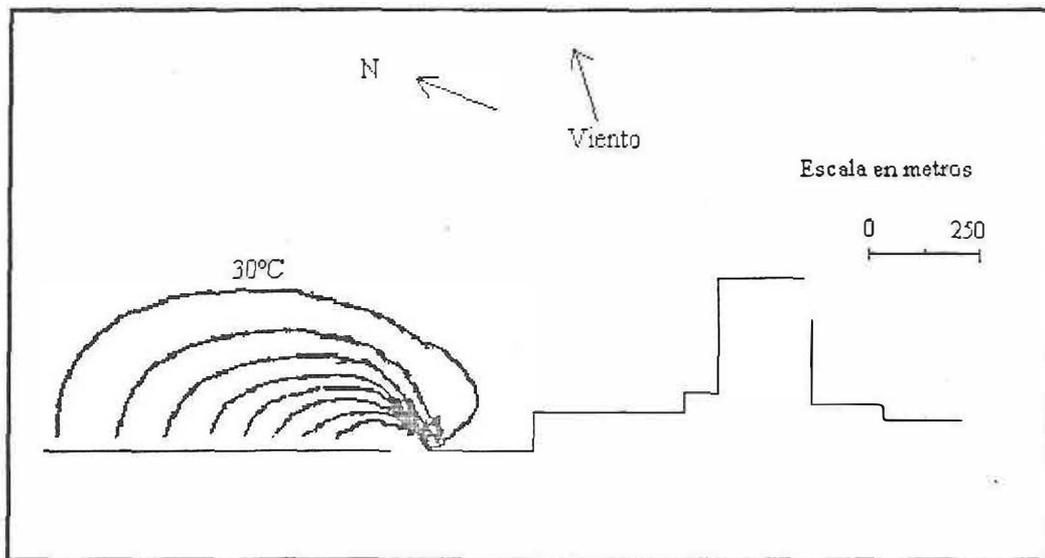


Figura 34. Distribución superficial de temperatura después de 48 horas de simulación. La isolínea externa del efluente corresponde al valor mínimo de temperatura.

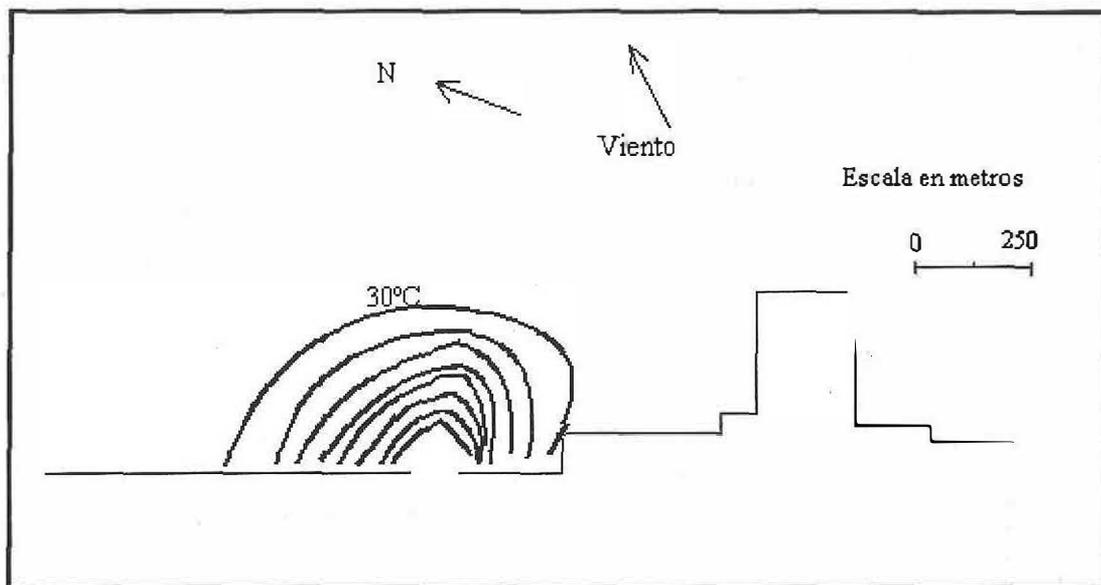


Figura 35. Distribución superficial de temperatura después de 72 horas de simulación. La isolínea externa del efluente corresponde al valor mínimo de temperatura.

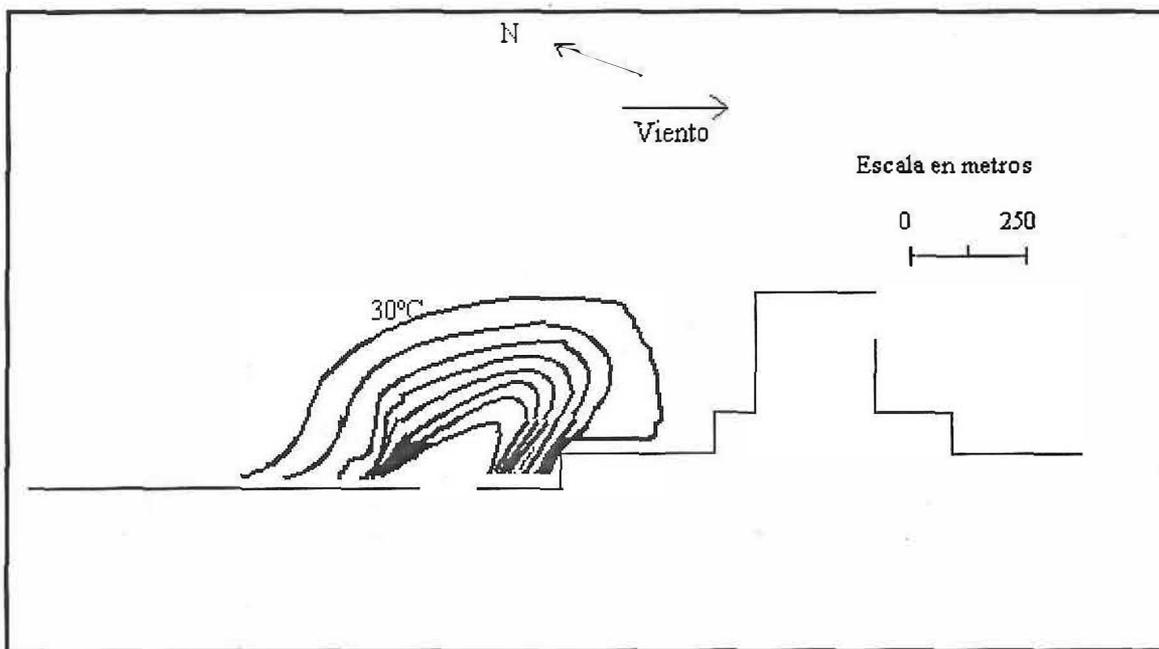


Figura 36. Distribución superficial de temperatura después de 80 horas de simulación. La isolínea externa del efluente corresponde al valor mínimo de temperatura.

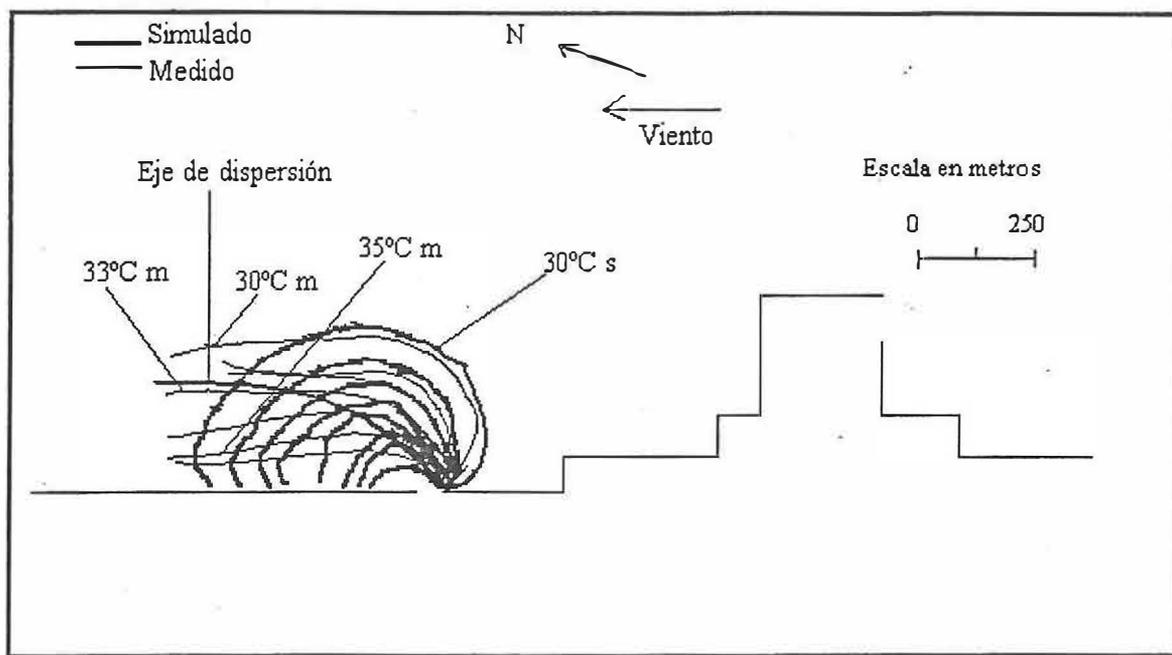


Figura 37. Comparación de las plumas térmicas simuladas (36 horas de simulación) y aquellas medidas a las 12 horas del día 19 de agosto de 1992.

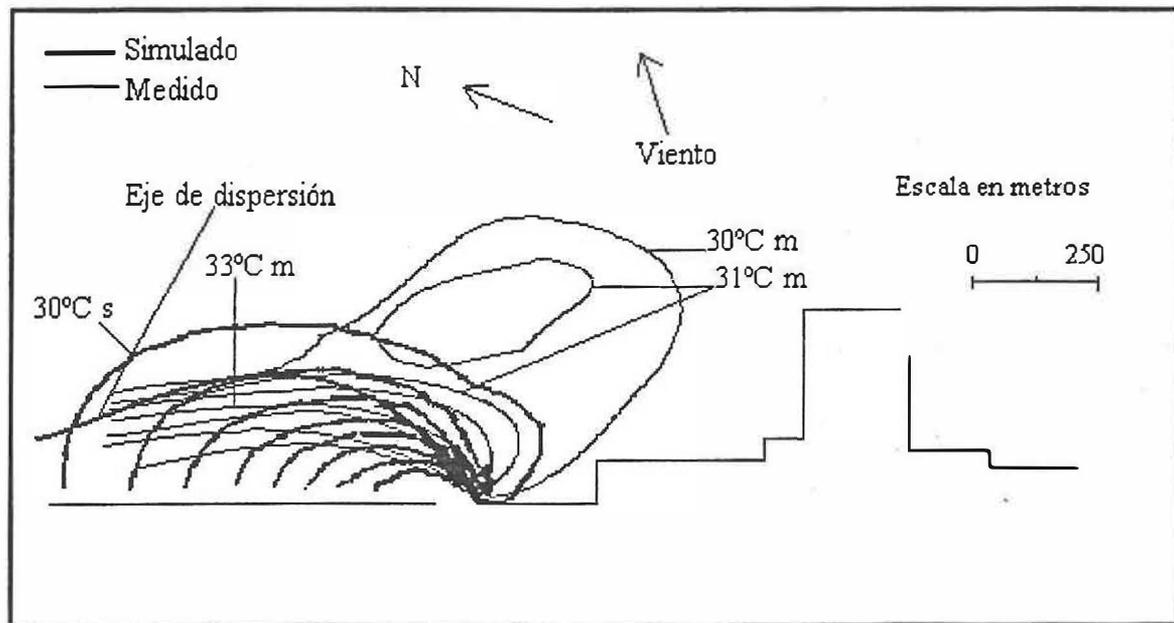


Figura 38. Comparación de las plumas térmicas simuladas (48 horas de simulación) y aquellas medidas a las 24 horas del día 19 de agosto de 1992.

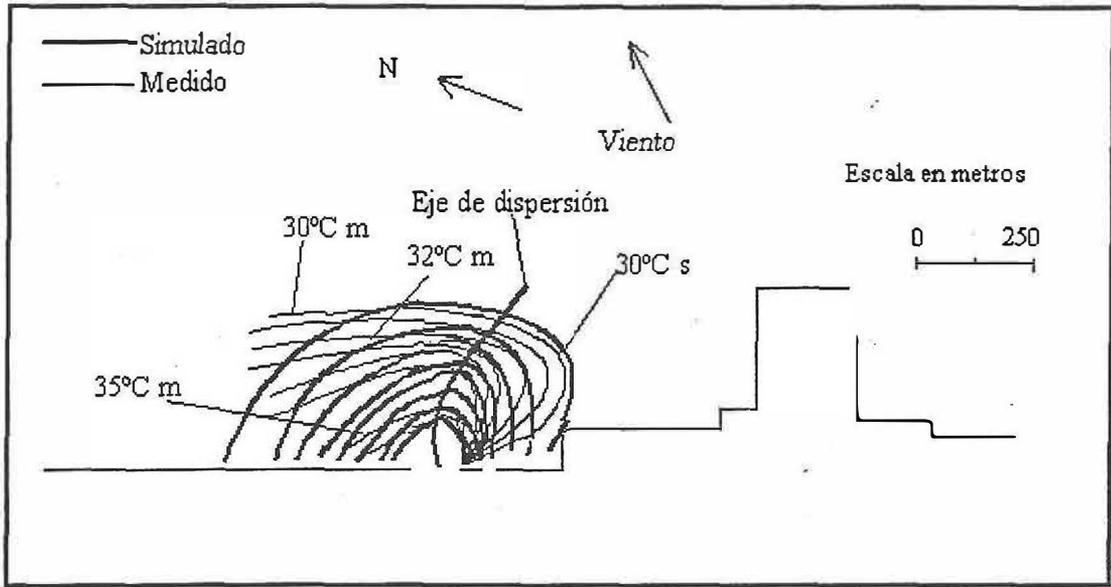


Figura 39. Comparación de las plumas térmicas simuladas (72 horas de simulación) y aquellas medidas a las 24 horas del día 20 de agosto de 1992.

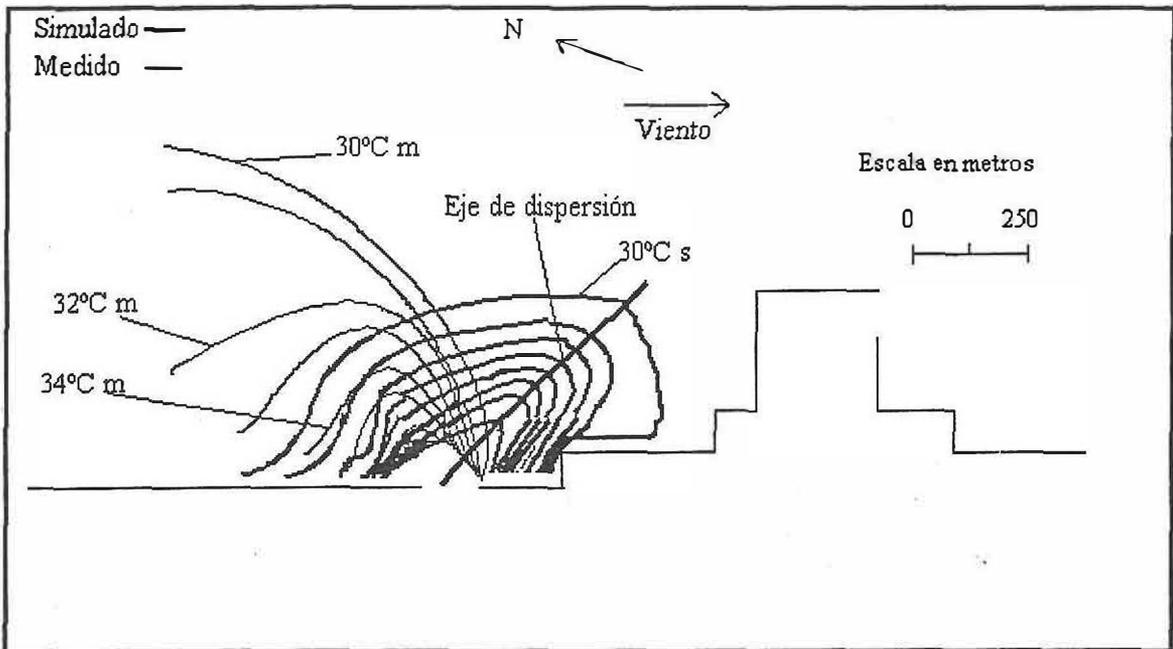


Figura 40. Comparación de las plumas térmicas simuladas (80 horas de simulación) y aquellas medidas a las 8 horas del día 21 de agosto de 1992.

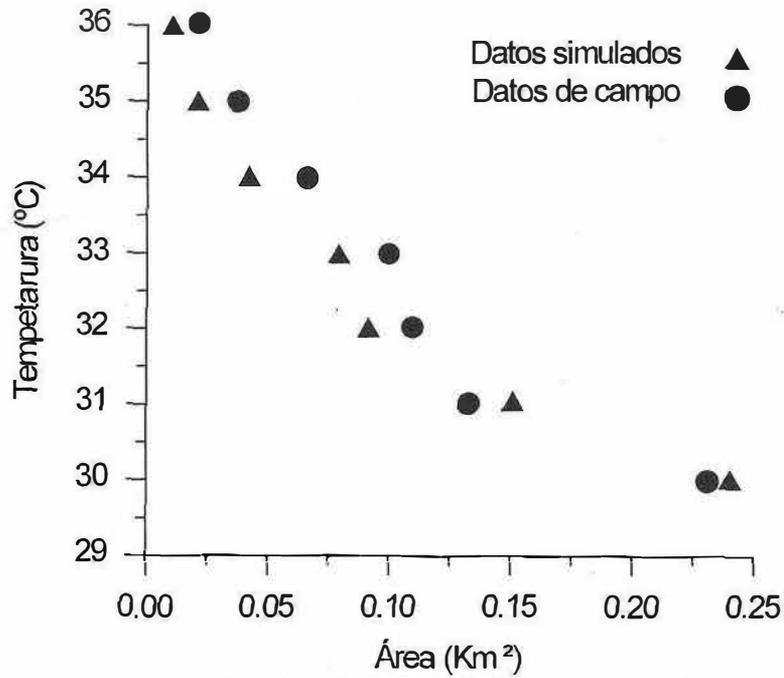


Figura 41. Comparación entre las áreas de las isotermas simuladas (36 horas de simulación) y aquellas medidas a las 12 horas del día 19 de agosto de 1992.

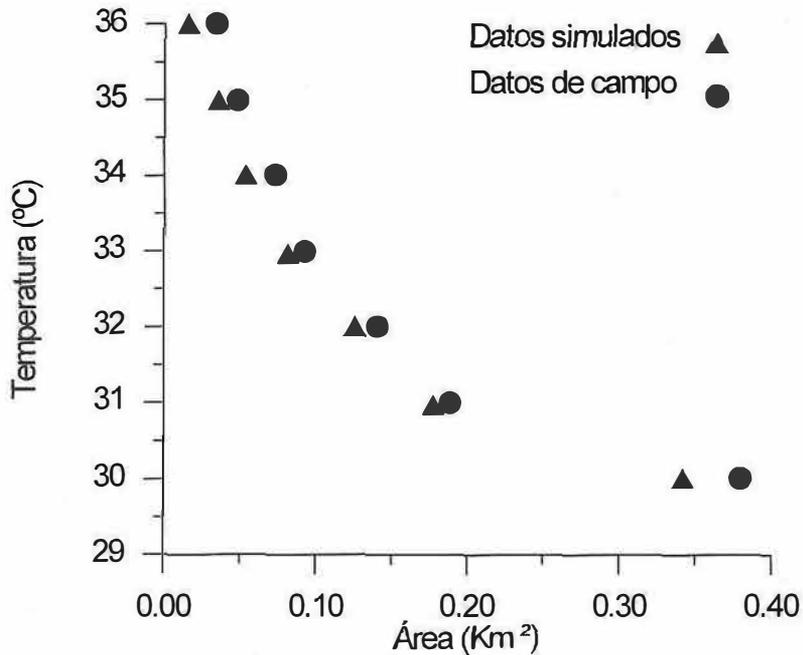


Figura 42. Comparación entre las áreas de las isotermas simuladas (48 horas de simulación) y aquellas medidas a las 24 horas del día 19 de agosto de 1992.

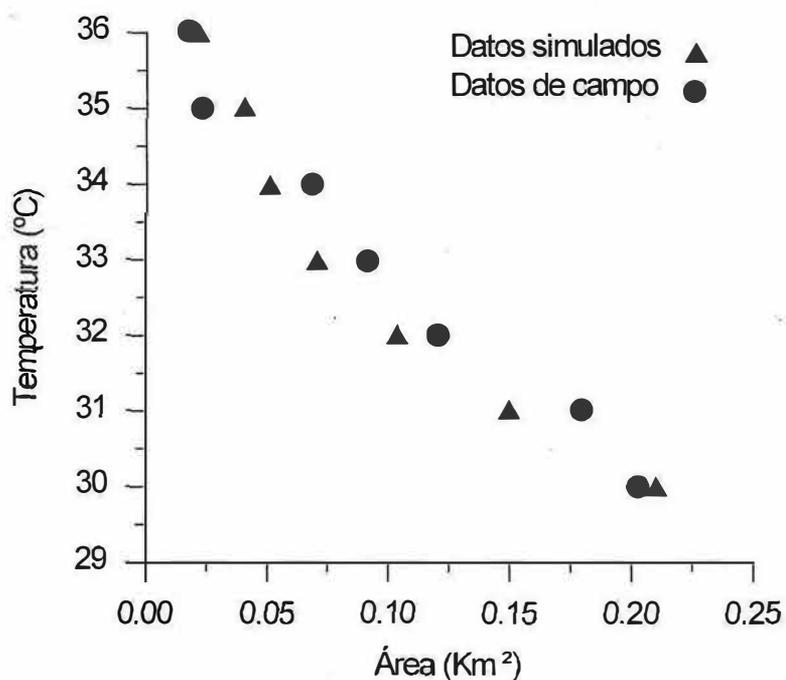


Figura 43. Comparación entre las áreas de las isotermas simuladas (72 horas de simulación) y aquellas medidas a las 24 horas del día 20 de agosto de 1992.

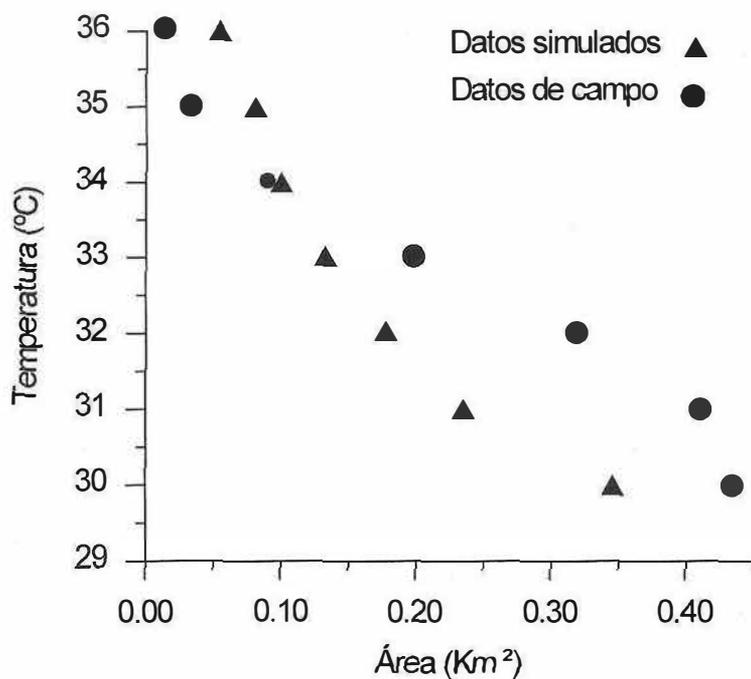


Figura 44. Comparación entre las áreas de las isotermas simuladas (80 horas de simulación) y aquellas medidas a las 8 horas del día 21 de agosto de 1992.

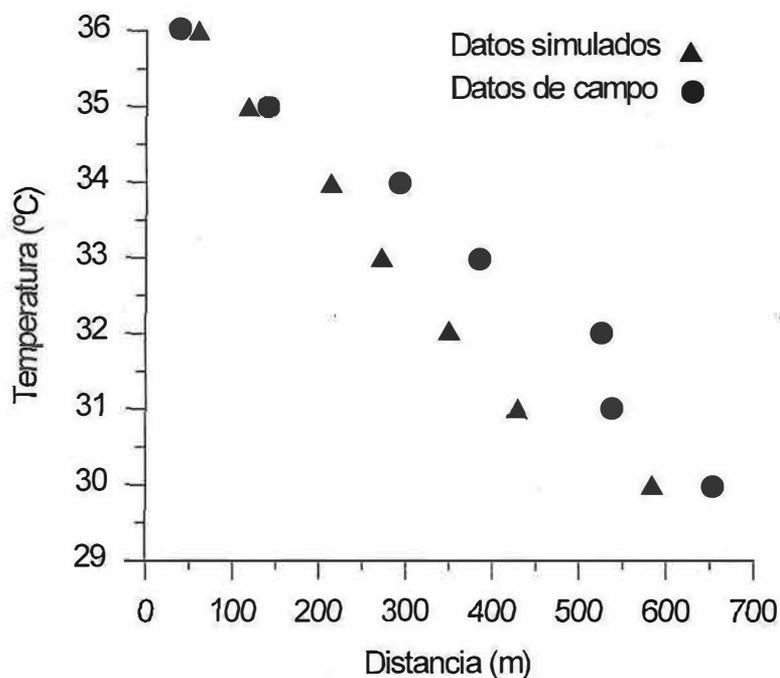


Figura 45. Comparación entre los valores de temperatura simulados (36 horas de simulación) y aquellos medidos a las 12 horas del día 19 de agosto de 1992.

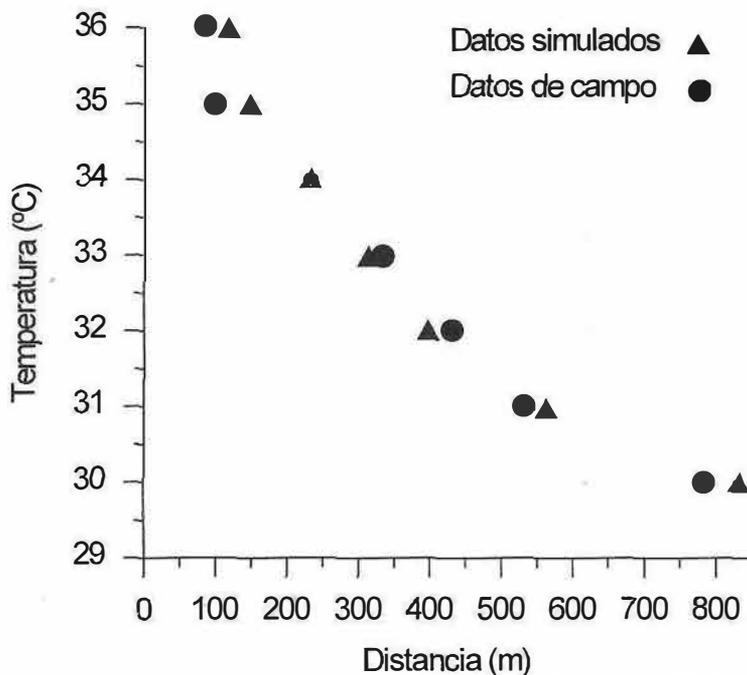


Figura 46. Comparación entre los valores de temperatura simulados (48 horas de simulación) y aquellos medidos a las 24 horas del día 19 de agosto de 1992.

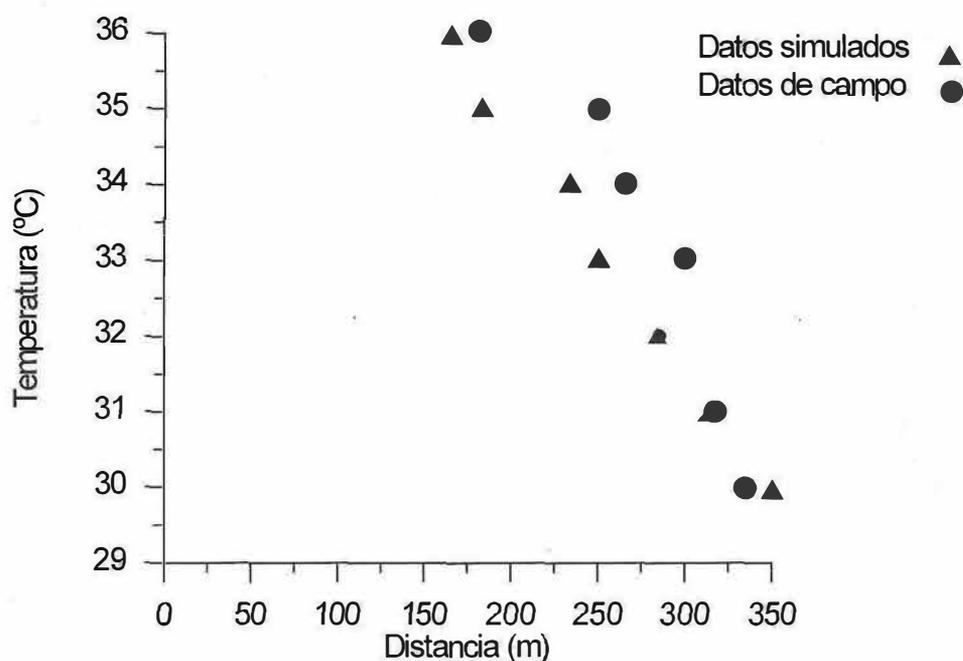


Figura 47. Comparación entre los valores de temperatura simulados (72 horas de simulación) y aquellos medidos a las 24 horas del día 20 de agosto de 1992.

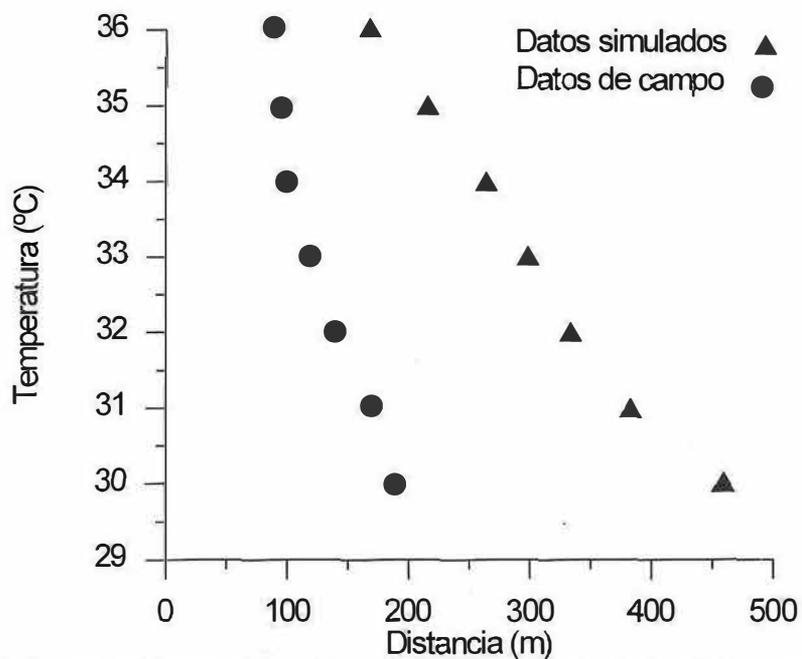


Figura 48. Comparación entre los valores de temperatura simulados (80 horas de simulación) y aquellos medidos a las 8 horas del día 21 de agosto de 1992.

III. 2. 1. 4. 2. Distribución vertical

Las figuras 49 a 56, presentan la distribución vertical del efluente hidrotérmico en el medio acuático receptor. Estos perfiles verticales de temperatura, son el resultado de 36, 48, 72 y 80 horas de simulación y comprende a transectos perpendiculares al eje m de la malla.

El transecto $m=16$ (figuras 49, 50 y 51) ubicado a ~ 100 m de la descarga sobre la línea de costa, muestra para 36 horas de simulación, parcelas de agua caliente que cubren un área de influencia de ~ 90 m. El efluente térmico tiende a flotar y diluirse con el medio acuático receptor. La isoterma limítrofe, de 30° C, se encuentra hasta ~ 130 m de la costa en las primeras 36 horas de simulación. Para las 48 horas y 72 horas, ha alcanzado los 200 m costa afuera. Estas secciones transversales permiten observar como la isoterma de 30° C llega al fondo, a 3.5 m.

En las figuras 52, 53, 54 y 55 se muestra el transecto $m=18$, inmediato a la zona de descarga. Se observa la temperatura máxima de descarga, 37° C, cercana a la línea de costa, ~ 30 m, disipándose rápidamente. El área de influencia para este transecto es de ~ 30 m. Cuando se han completado 36 y 48 horas de simulación, la isoterma limítrofe, 30° C, se encuentra a ~ 125 m de la línea de costa. Sin embargo, a las 72 y 80 horas de simulación, se ubica ~ 240 m de la línea de costa, producto de la reorientación del efluente hidrotérmico, como puede observarse en las figuras 54 y 55 y 56.

En las figuras 57 a 61, se presenta la distribución vertical del efluente hidrotérmico en el medio acuático receptor a lo largo de transectos perpendiculares al eje n de la malla. La distribución de temperaturas es también el resultado de 96 horas de simulación.

El transecto $n=2$ (figuras 57, 58, 59 y 60), se encuentra ubicado a 40 m del canal de descarga. El efluente hidrotérmico prácticamente se mantiene próximo a la superficie, ya que tiende a flotar y diluirse rápidamente con el medio acuático. La temperatura máxima observada a las 36, 48 y 80 horas de simulación es 34°C y para las 72 horas de simulación se observa la de 35°C . En la figura 61 se muestra el transecto $n = 3$, ubicado a 80 m del canal de descarga. Este transecto corresponde a las 80 horas de simulación y su evolución es similar a las descritas con anterioridad.

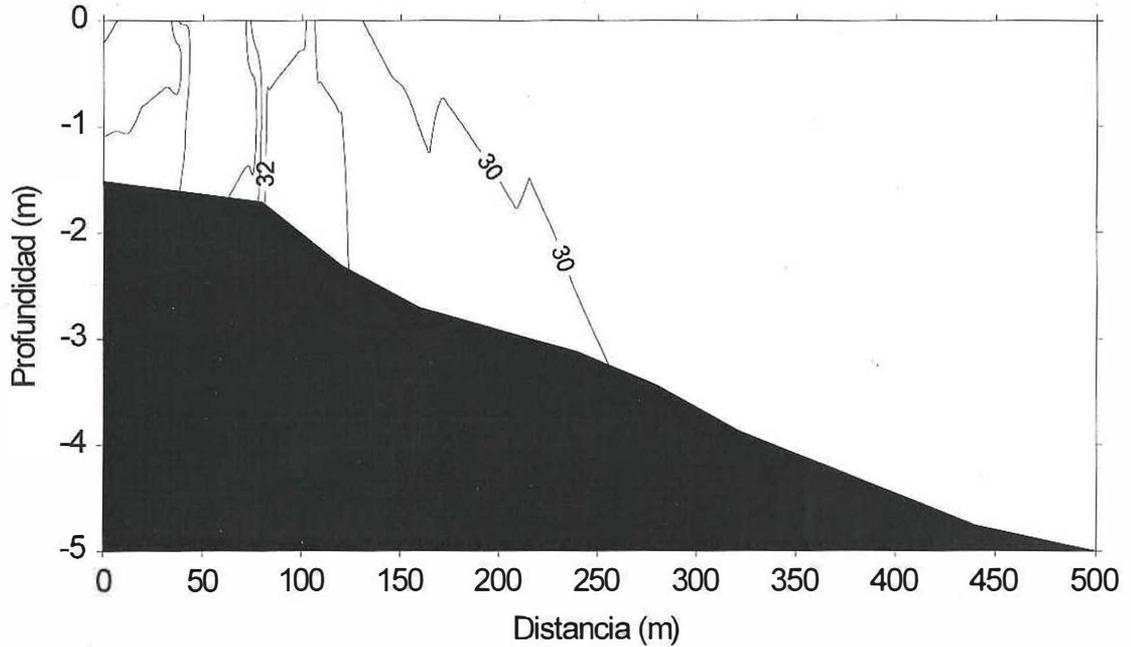


Figura 49. Distribución vertical de temperatura después de 36 horas de simulación. Caso I, 19 de agosto de 1992. Transecto $m=16$.

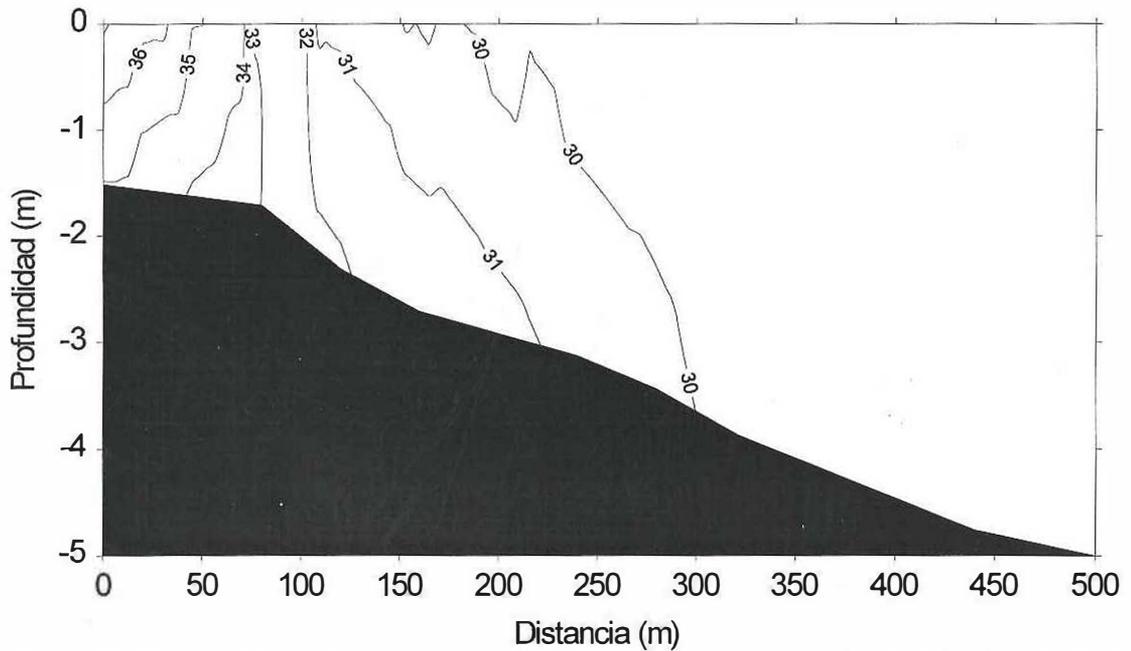


Figura 50. Distribución vertical de temperatura después de 48 horas de simulación. Caso I, 19 de agosto de 1992. Transecto $m=16$.

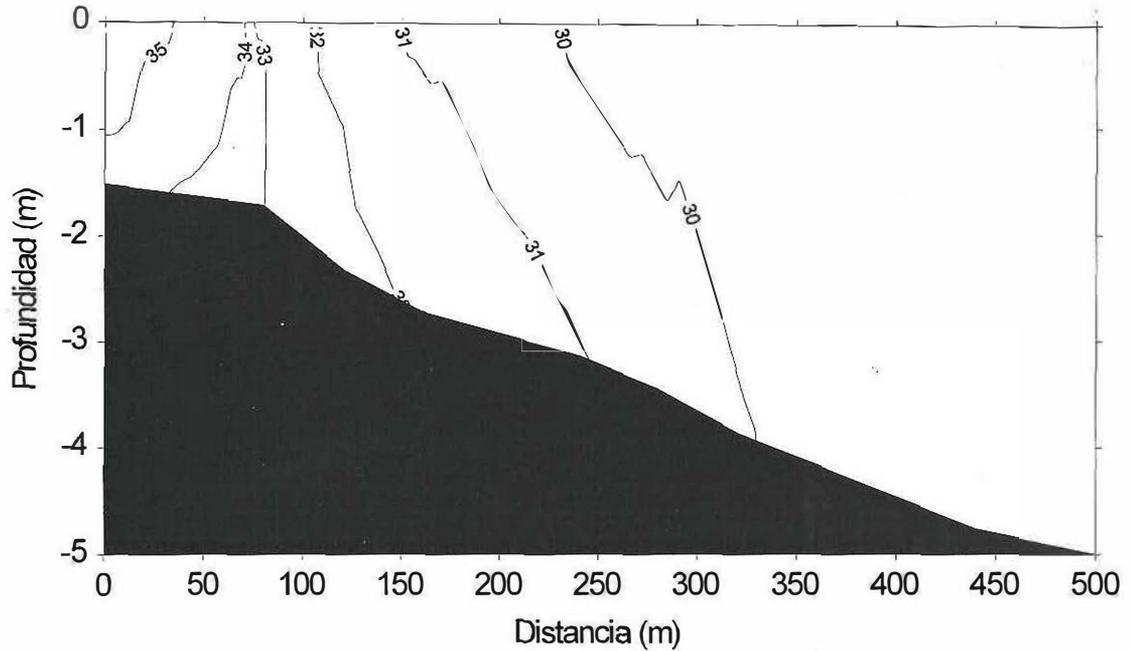


Figura 51. Distribución vertical de temperatura después de 72 horas de simulación. Caso I, 20 de agosto de 1992. Transecto $m = 16$.

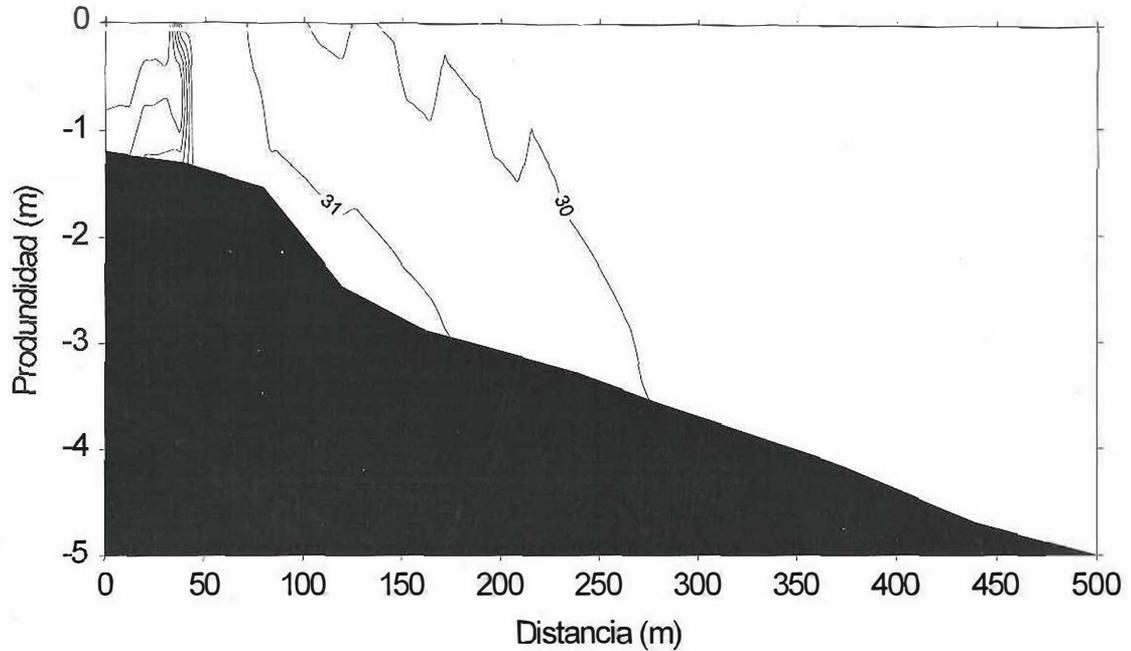


Figura 52. Distribución vertical de temperatura después de 36 horas de simulación. Caso I, 19 de agosto de 1992. Transecto $m = 18$.

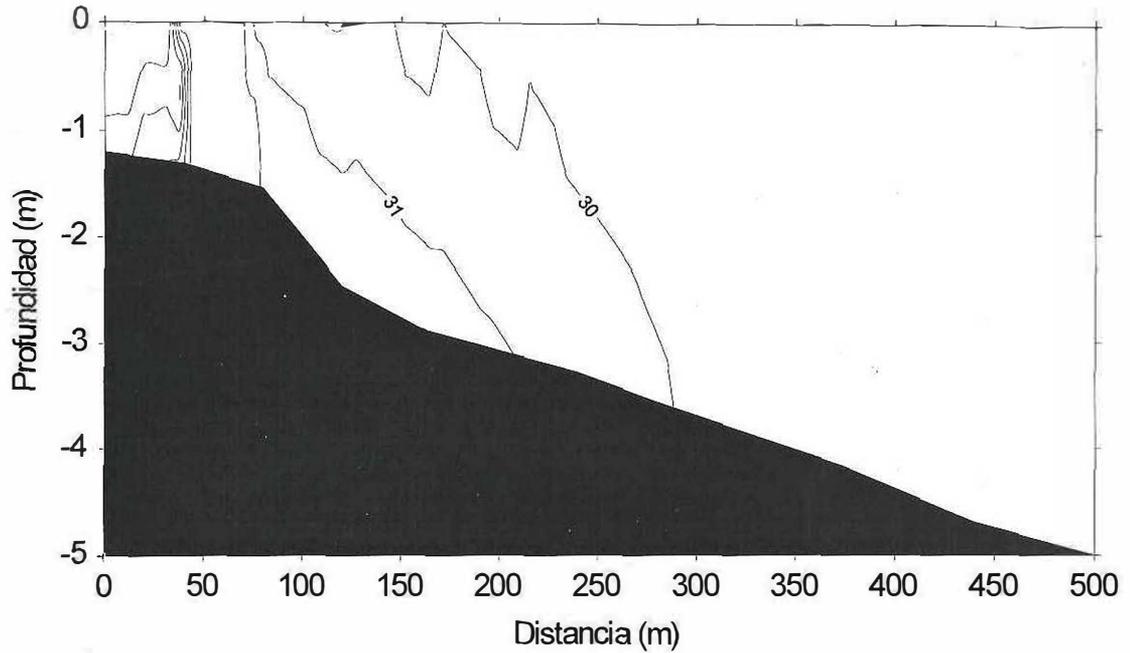


Figura 53. Distribución vertical de temperatura después de 48 horas de simulación. Caso I, 19 de agosto de 1992. Transecto $m = 18$.

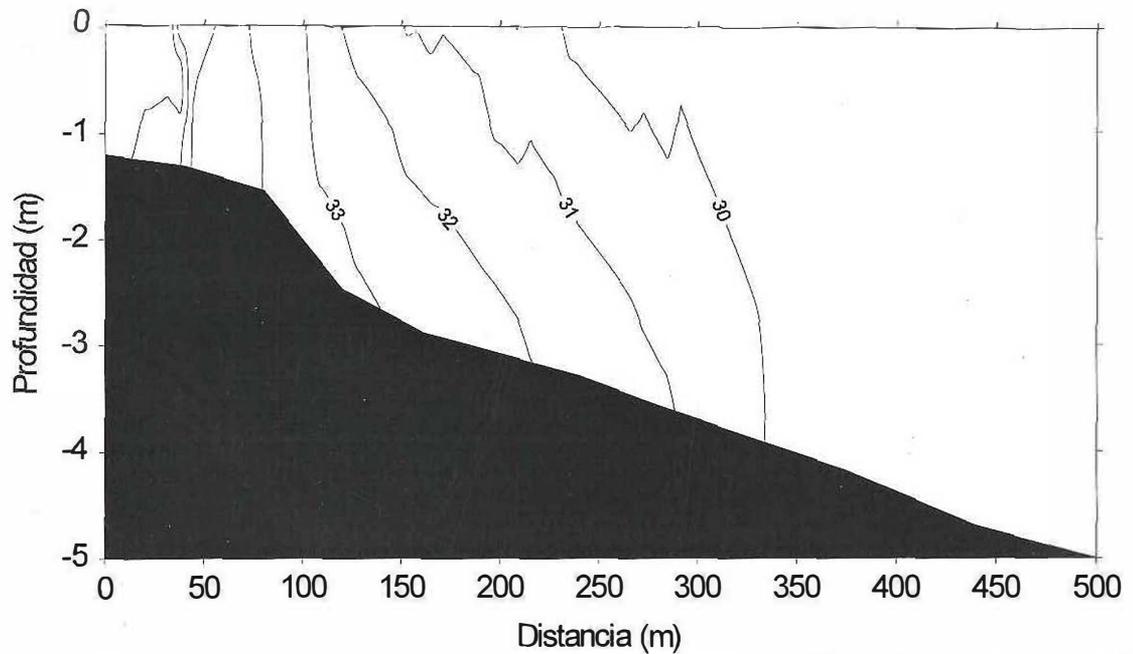


Figura 54. Distribución vertical de temperatura después de 72 horas de simulación. Caso I, 20 de agosto de 1992. Transecto $m = 18$.

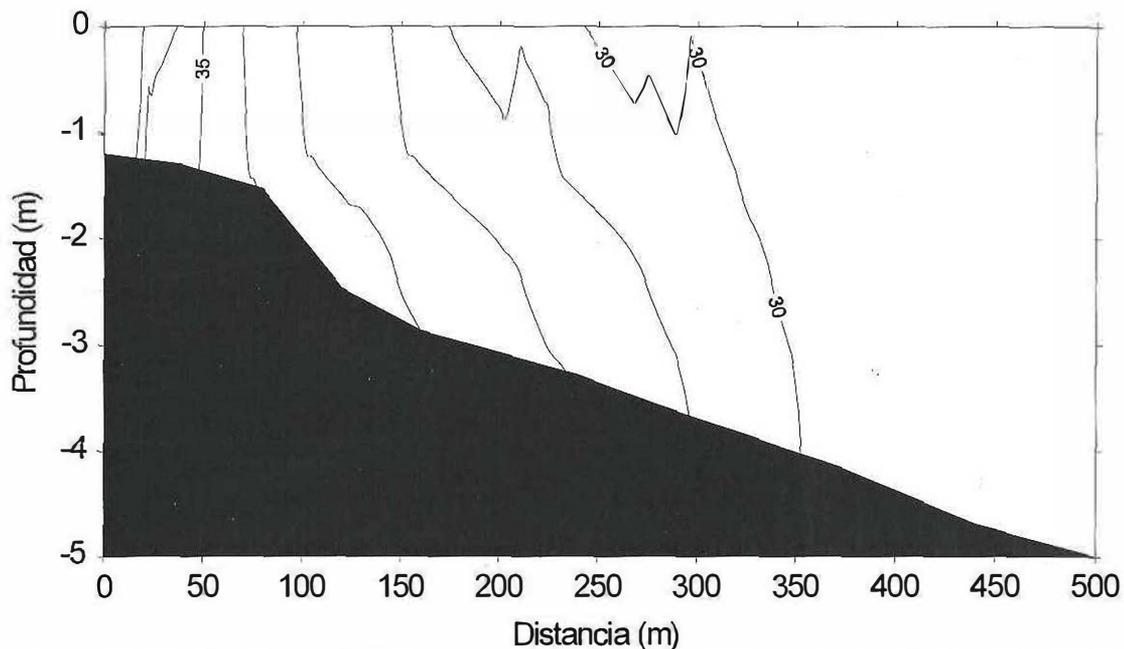


Figura 55. Distribución vertical de temperatura después de 80 horas de simulación. Caso I, 21 de agosto de 1992. Transecto $m = 18$.

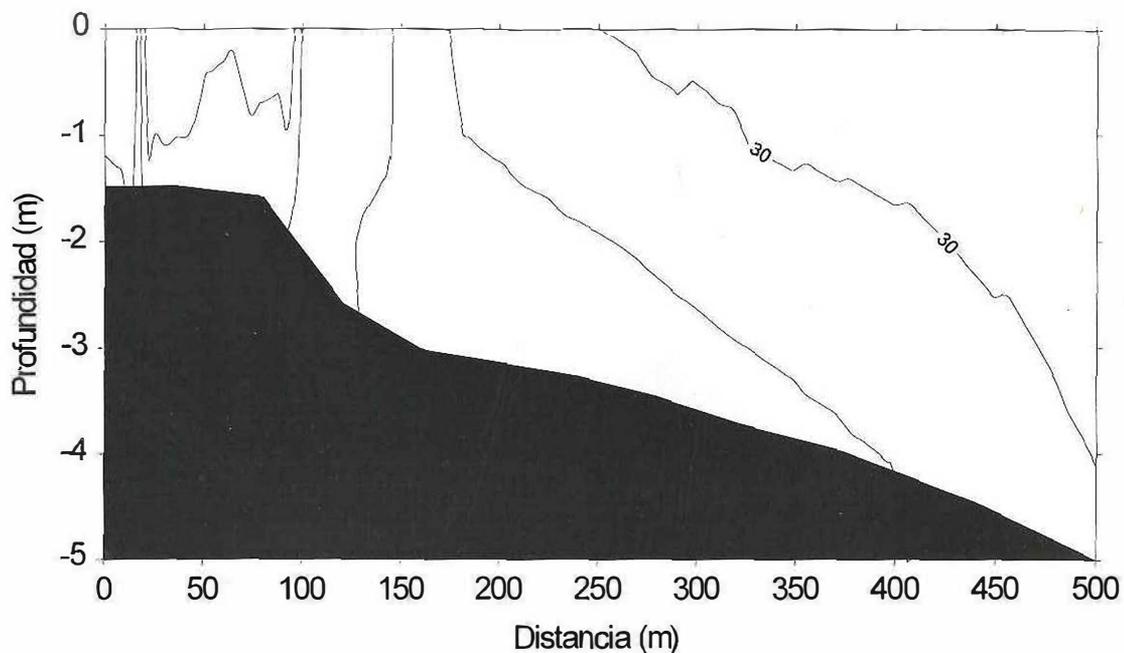
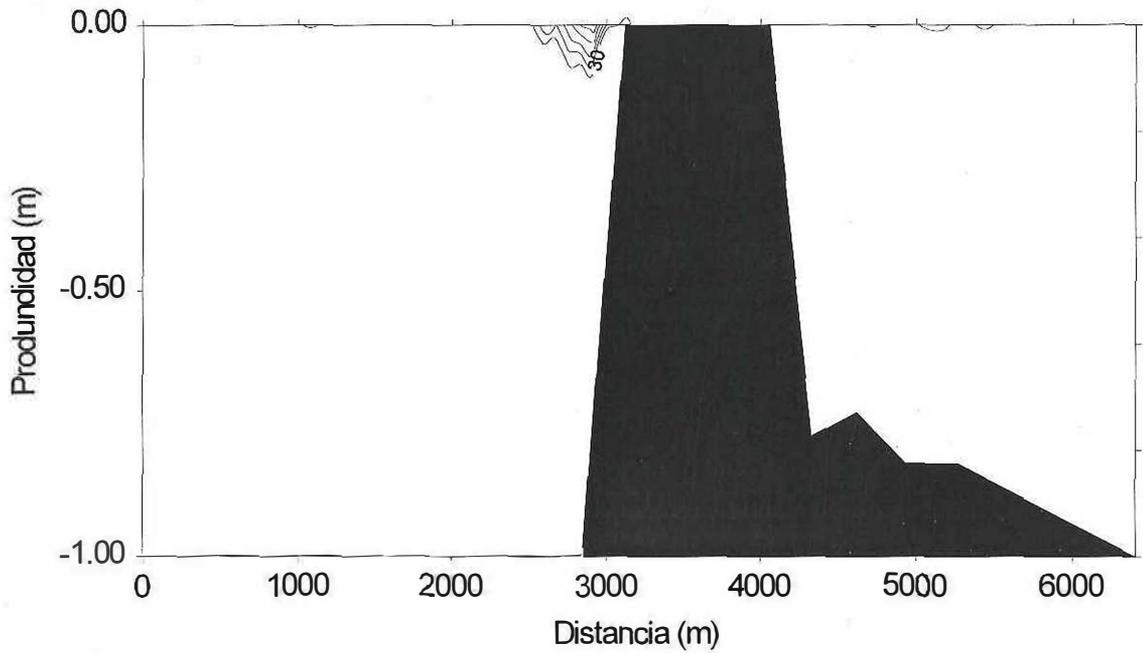
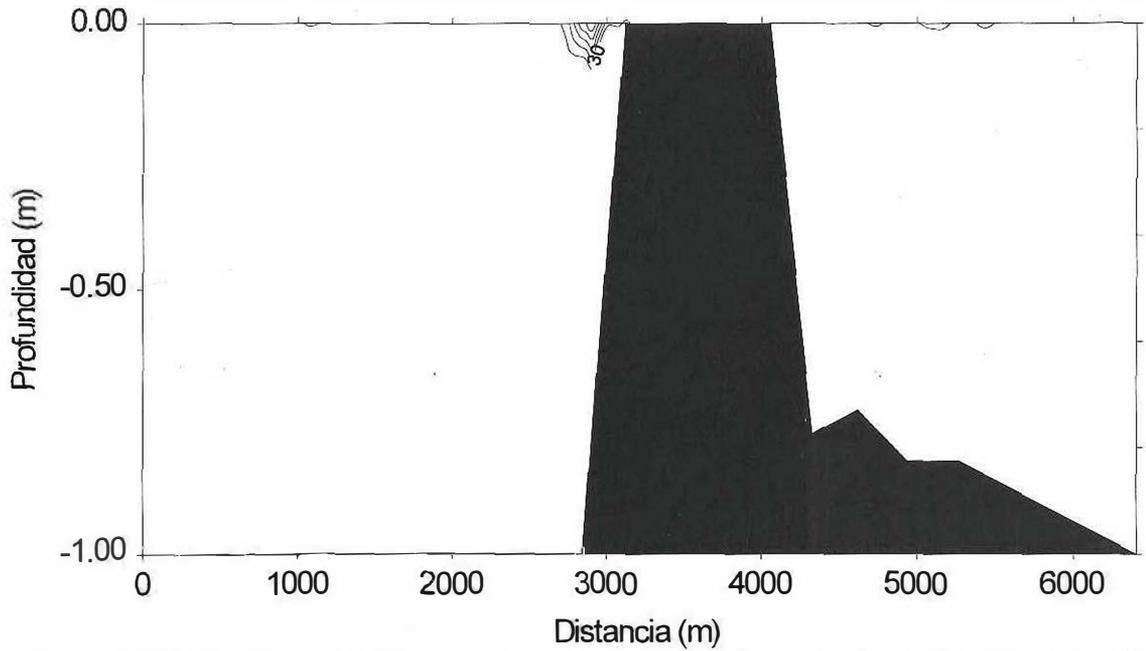


Figura 56. Distribución vertical de temperatura después de 80 horas de simulación. Caso I, 21 de agosto de 1992. Transecto $m = 21$.



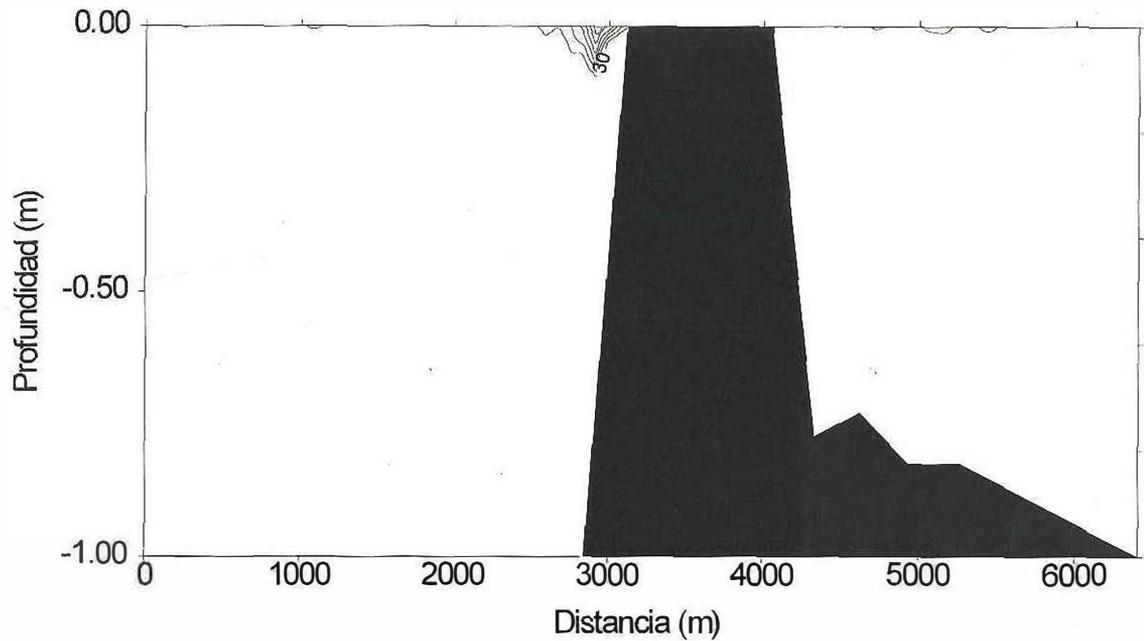


Figura 59. Distribución vertical de temperatura después de 72 horas de simulación. Caso I, 20 de agosto de 1992. Transecto $n=2$.

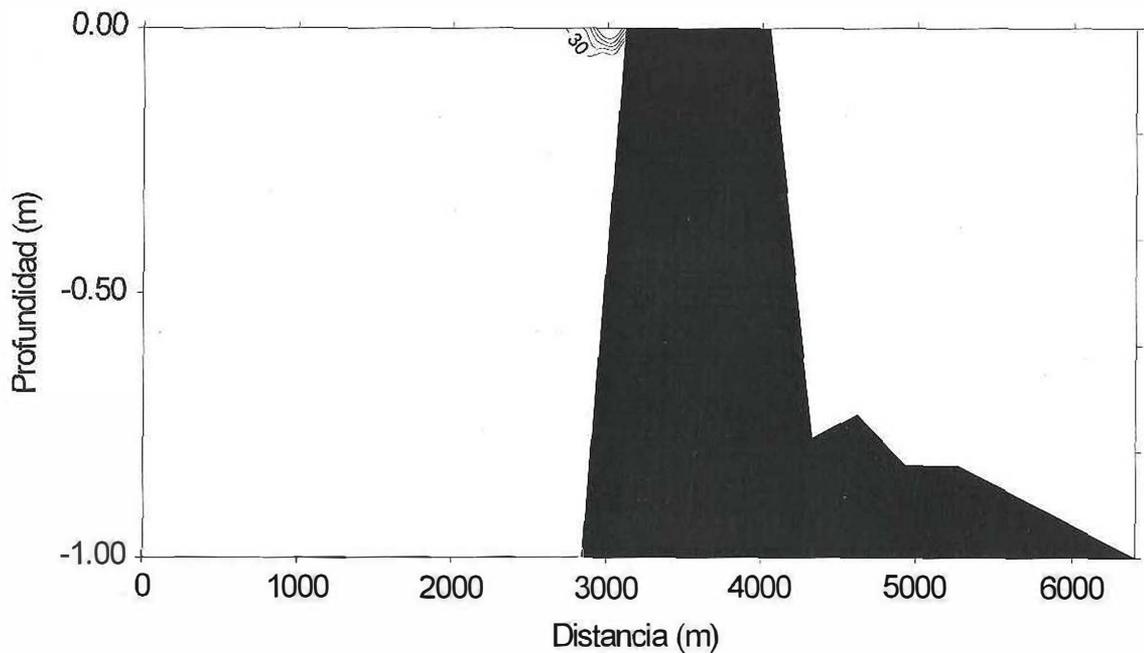


Figura 60. Distribución vertical de temperatura después de 80 horas de simulación. Caso I, 21 de agosto de 1992. Transecto $n=2$.

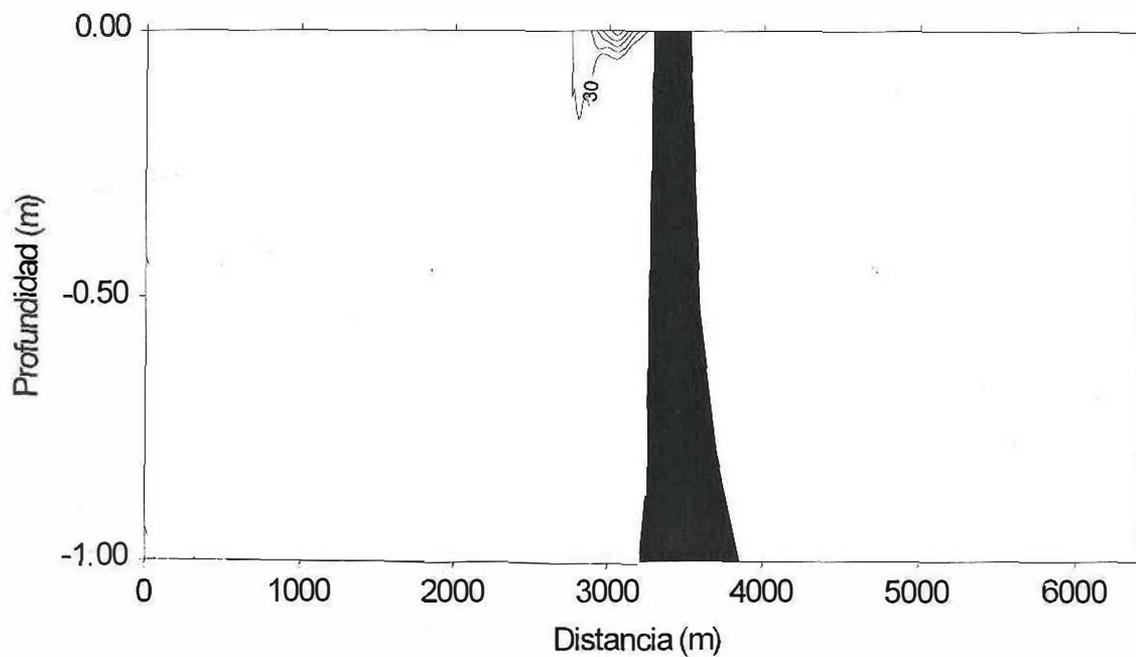


Figura 61. Distribución vertical de temperatura después de 80 horas de simulación. Caso I, 21 de agosto de 1992. Transecto $n=3$.

III. 2. 2. Caso II

III. 2. 2. 1. Campo de circulación superficial

En la figura 62, se presenta el campo dinámico de circulación superficial derivado durante un periodo de vientos variables del NW con intensidad promedio de 11 m s^{-1} . El tiempo real de simulación fue de 96 horas.

El campo de circulación superficial a las 60 horas de simulación, tiende a seguir la dirección del viento incidente, orientándose hacia la frontera sur de la malla. En las proximidades de la descarga la velocidad simulada es de $\sim 30 \text{ cm s}^{-1}$ y en el campo lejano disminuye hasta $\sim 8 \text{ cm s}^{-1}$. A 2300 m al sur de la descarga se puede observar que la velocidad máxima es de $\sim 40 \text{ cm s}^{-1}$, producto de la escasa profundidad de 0.5 m que existe en esta zona.

En la obra de toma la velocidad que se presenta es de $\sim 23 \text{ cm s}^{-1}$ y fuera de la influencia de la descarga es de $\sim 20 \text{ cm s}^{-1}$.

III. 2. 2. 2. Campo de circulación subsuperficial

A 1 m de profundidad obtenemos el campo de circulación que se muestra en la figura 63, después de 60 horas de simulación. La dirección de la corriente subsuperficial es muy similar a aquella obtenida en la capa superficial (Fig. 62). Predominantemente se orienta hacia la frontera sur de la malla pero su intensidad es menor debido a la fricción ejercida por las capas de fluidos superiores. En la región inmediata a la descarga se presentan velocidades de $\sim 10 \text{ cm s}^{-1}$ y en la obra de toma $\sim 23 \text{ cm s}^{-1}$.

En la zona frente a la descarga se presenta un flujo en el sentido opuesto a la descarga, lo cual concuerda con el campo de circulación superficial (fig. 62). Esta

circulación es consecuencia de la ley de conservación de masa provocado por el flujo saliente superficial que es reemplazado por un contraflujo subsuperficial.

III. 2. 2. 3. Distribución vertical

El perfil vertical de la distribución de la intensidad de la corriente se describe en la figura 64. Se presenta el campo de velocidad en la zona de descarga ($m=18$). La orientación de esta sección transversal es perpendicular a la línea de costa. La velocidad en la descarga es de $\sim 50 \text{ cm s}^{-1}$ y va decreciendo gradualmente hasta llegar a cero en la capa límite.

Para la obra de toma se presenta la distribución vertical de velocidad en el transecto $n = 5$ (Fig. 65). El transecto se orienta de izquierda a derecha del diagrama vectorial, con velocidades superficiales y subsuperficiales de $\sim 23 \text{ cm s}^{-1}$ en la obra de toma como consecuencia de la succión derivada del bombeo de la central. En la proximidad del fondo la distribución de velocidad disminuye gradualmente hasta llegar a cero en la capa límite.

Debido al patrón de circulación costero de flujo SE, el flujo incide contra la frontera física de las escolleras provocando un evidente apilamiento de agua en esta zona.

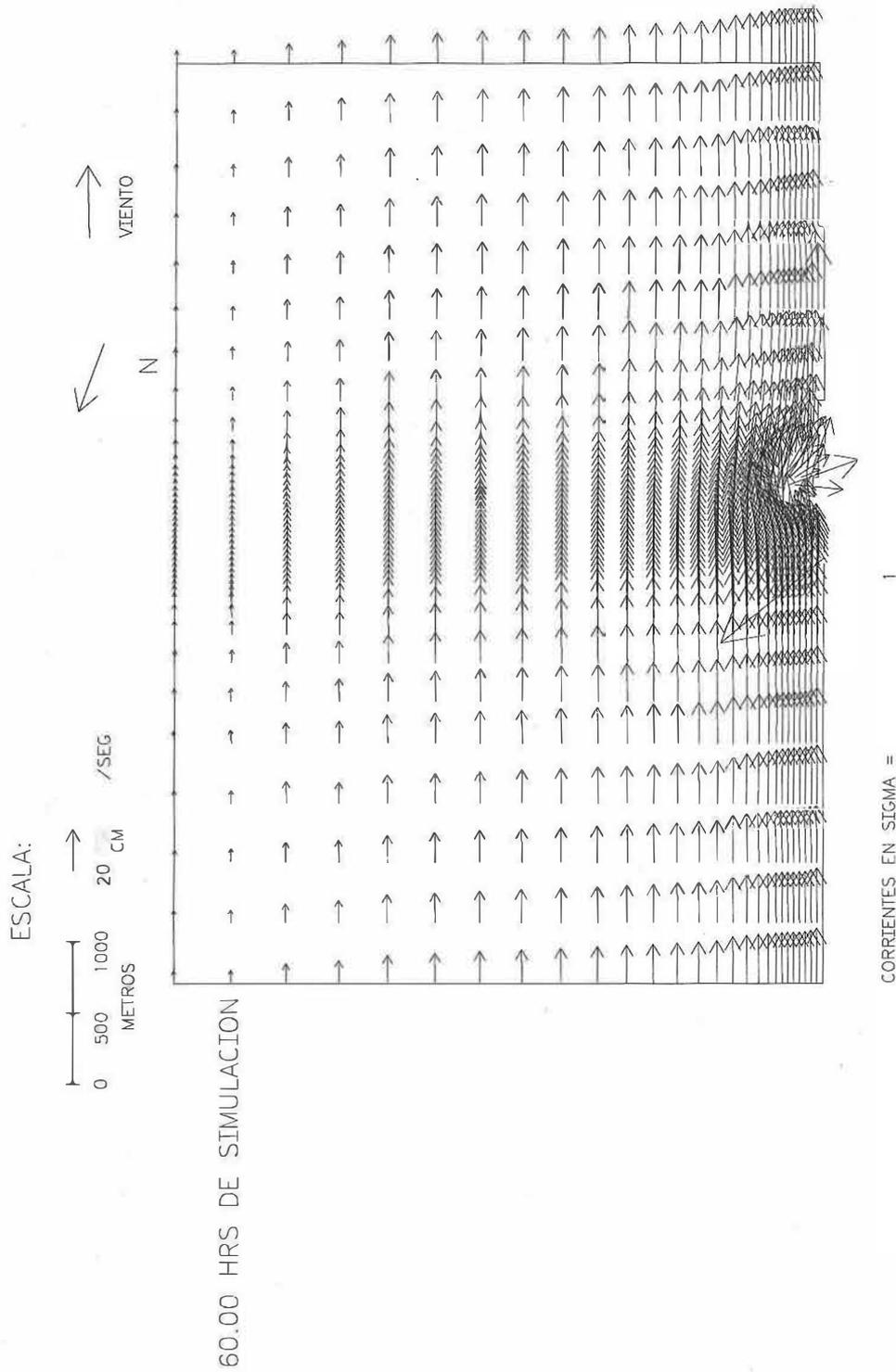


Figura 62. Campo de circulación superficial después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. (Corrientes en sigma = 1).

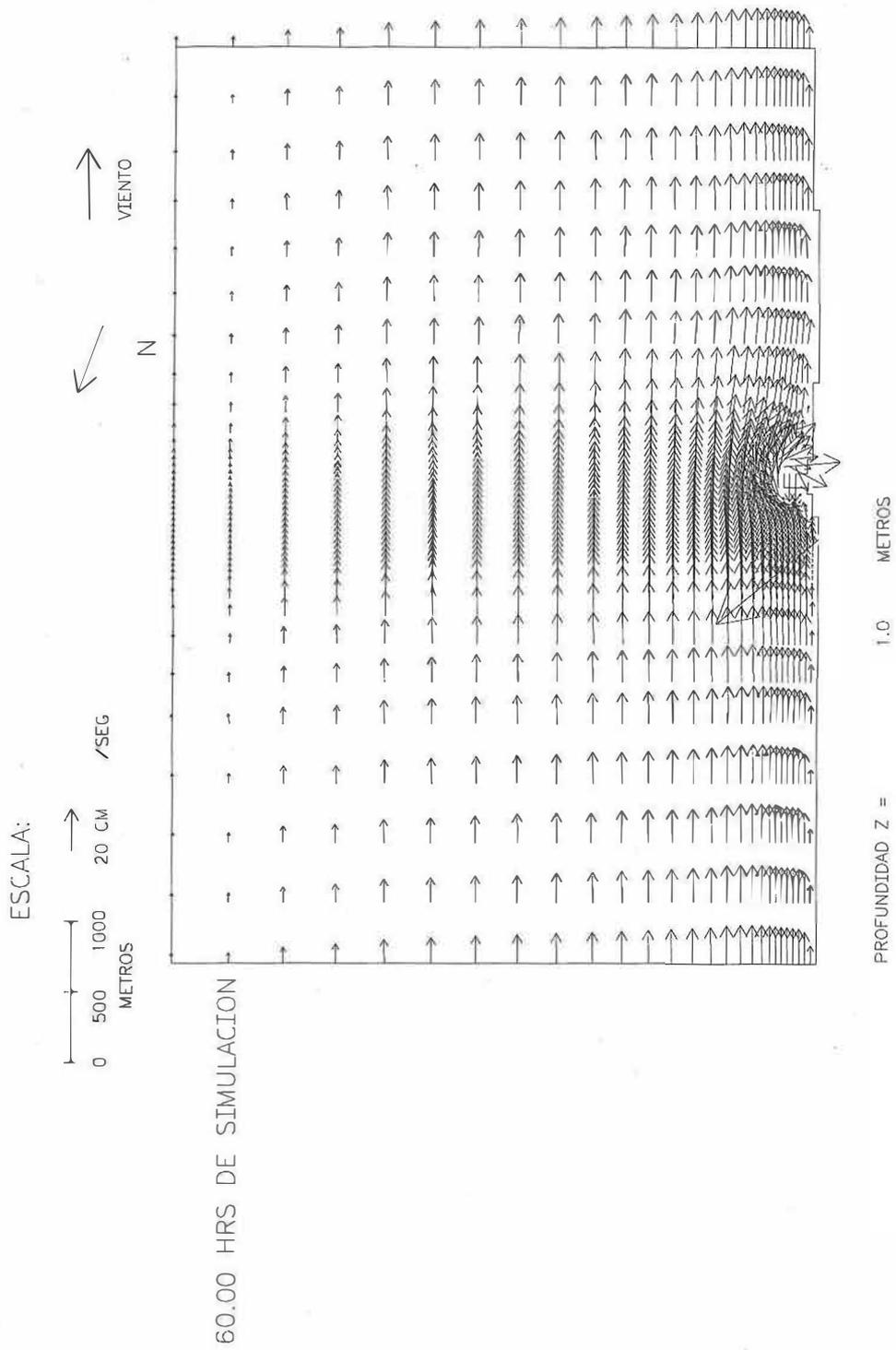


Figura 63. Campo de circulación subsuperficial después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. (Profundidad Z = 1).

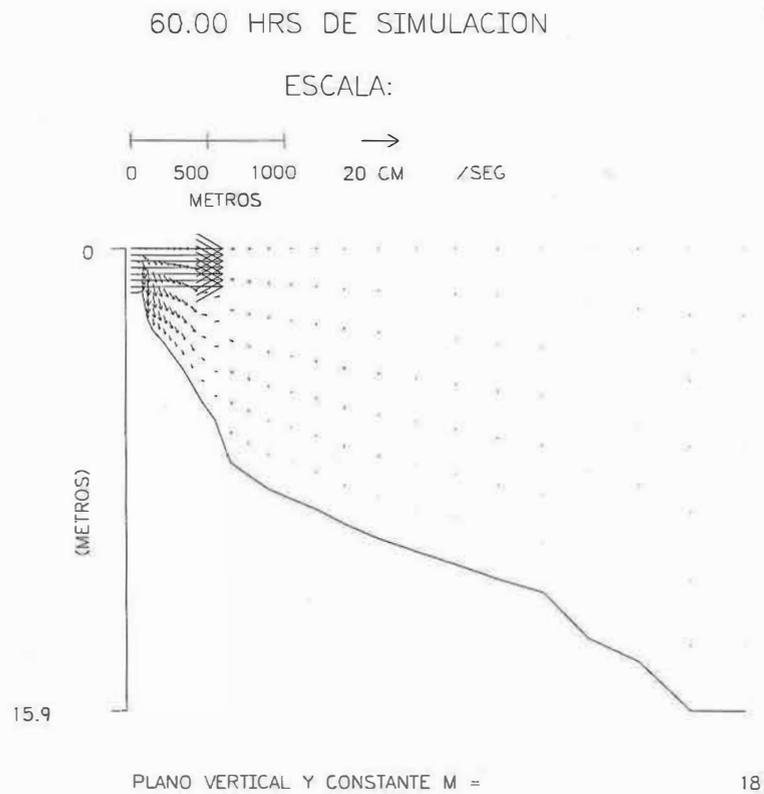


Figura 64. Distribución vertical del campo de velocidad después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. Transecto $m = 18$.

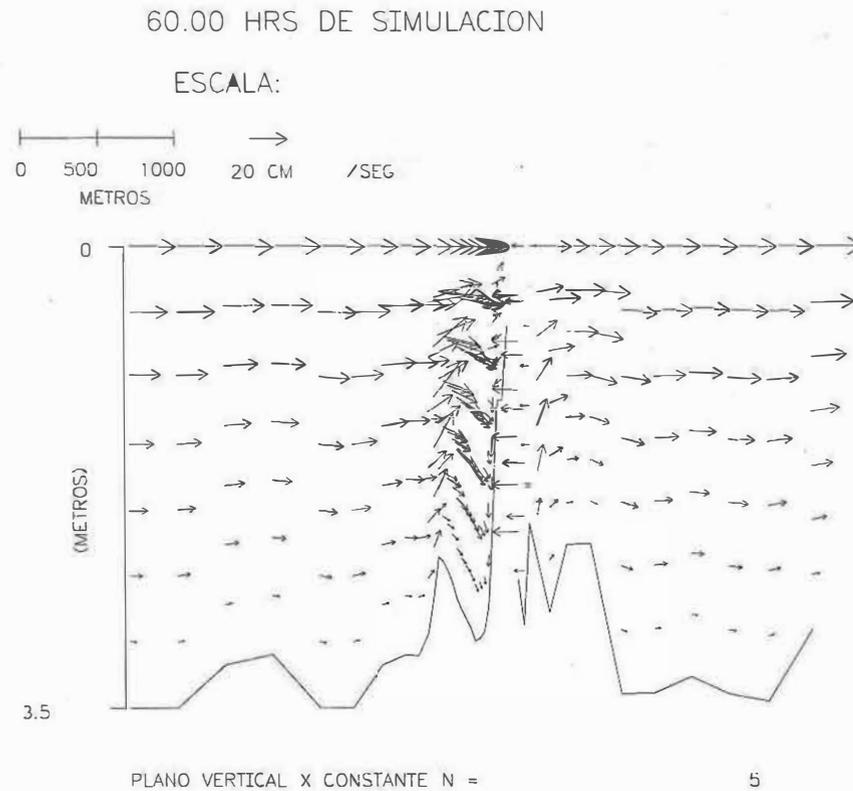


Figura 65. Distribución vertical del campo de velocidad después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. Transecto $n = 5$.

III. 2. 2. 4. Campo de temperatura

III. 2. 2. 4. 1. Distribución horizontal

La distribución del campo térmico superficial generado después de 60 horas de simulación, se describe en la figura 66. La distribución de las isothermas que conforman el efluente descargado sigue una secuencia ascendente, v. gr. $\Delta t = 1^\circ \text{C}$, de la periferia al centro. La temperatura del medio acuático receptor es de 23.9°C y la isoterma de 25°C delimita la influencia del efluente hidrotérmico.

La dispersión superficial del efluente está determinado por el campo de circulación, lo que provoca que la descarga de la central tienda hacia la frontera sur de la malla, cubriendo un área de $\sim 0.14 \text{ Km}^2$. La extensión de la isoterma limítrofe fue de $\sim 750 \text{ m}$ obedeciendo a un patrón de circulación costera inducido por el viento proveniente del NW.

La comparación entre las coberturas de las áreas de influencia del campo térmico simulado y el medido el 26 de noviembre de 1992, se presenta en la figura 67. El área que cubre la isoterma limítrofe simulada, 25°C , es de $\sim 0.14 \text{ Km}^2$. Para este caso estudiado el modelo sobrestima el área total de influencia hasta por arriba del 100 % con respecto a la superficie medida para la misma isoterma, $\sim 0.093 \text{ Km}^2$. La explicación a esta situación es debido principalmente al oleaje prevaeciente en la zona de rompiente, el cual presenta una altura media de 2.23 m y obliga que la masa de agua con mayor temperatura se mantenga confinada entre la zona de descarga y la obra de toma. Una observación importante también es la pérdida de 6 de 8 termógrafos colocados para la toma de mediciones. Sin embargo, se aprecia cómo a medida que aumenta la temperatura, $> 25^\circ \text{C}$, la diferencia entre las áreas medidas y simuladas disminuye, como puede observarse en la figura 68 y en los datos que se presentan en la tabla VI, presentándose la diferencia mínima de 0.01 Km^2 en la

isoterma de 29°C. Evidentemente, en la comparación de las isotermas, el modelo sobrestima la posición de éstas ya que el modelo no incorpora el efecto del oleaje. La mínima diferencia encontrada fue de 755 m en la isoterma de 28°C (tabla VII y figura 69). El coeficiente de correlación entre las áreas medidas y simuladas es de 0.88.

Tabla VI. Comparación de las áreas de influencia medidas y simuladas para el Caso II, 26 de noviembre de 1992.

ISOTERMA	AREA DE INFLUENCIA SIMULADA	AREA DE INFLUENCIA MEDIDA
25°C	0.140 Km ²	0.093 Km ²
26°C	0.040 Km ²	0.060 Km ²
27°C	0.020 Km ²	0.050 Km ²
28°C	0.018 Km ²	0.026 Km ²
29°C	0.013 Km ²	0.012 Km ²

Tabla VII. Comparación de los valores de temperatura simulados y medidos a lo largo del eje de dispersión. Caso II, 26 de noviembre de 1992.

ISOTERMA		DISTANCIA (m)
25°C	simulada	750
	medida	700
26°C	simulada	600
	medida	550
27°C	simulada	350
	medida	450
28°C	simulada	283
	medida	145
29°C	simulada	116
	medida	135

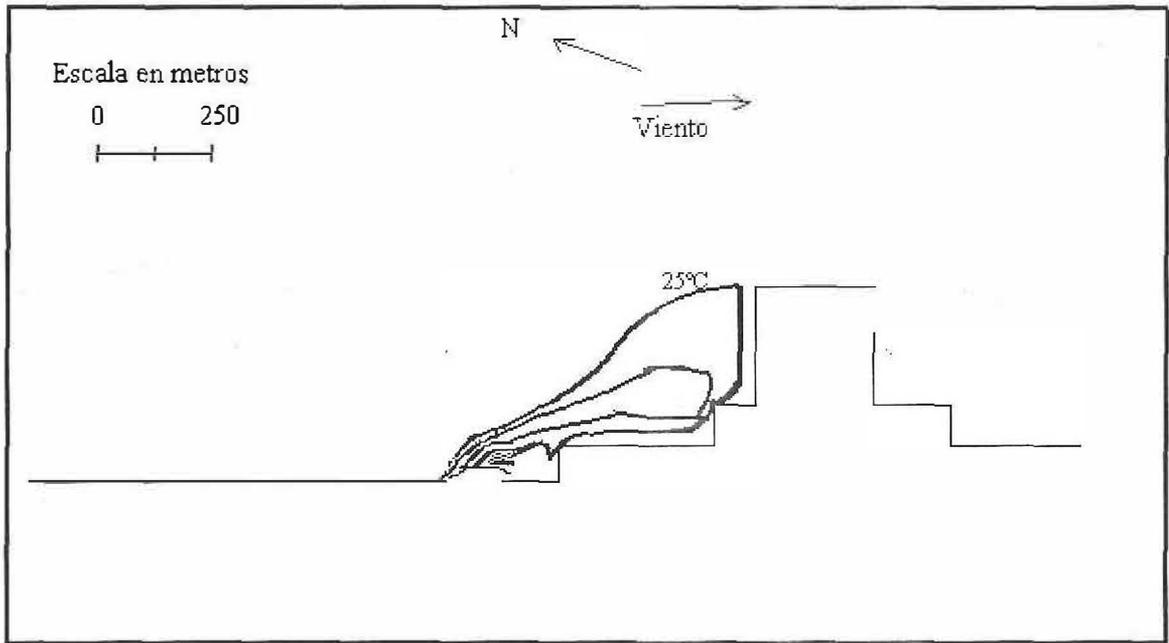


Figura 66. Distribución superficial de temperatura después de 60 horas de simulación. La isolínea externa corresponde al valor mínimo de temperatura.

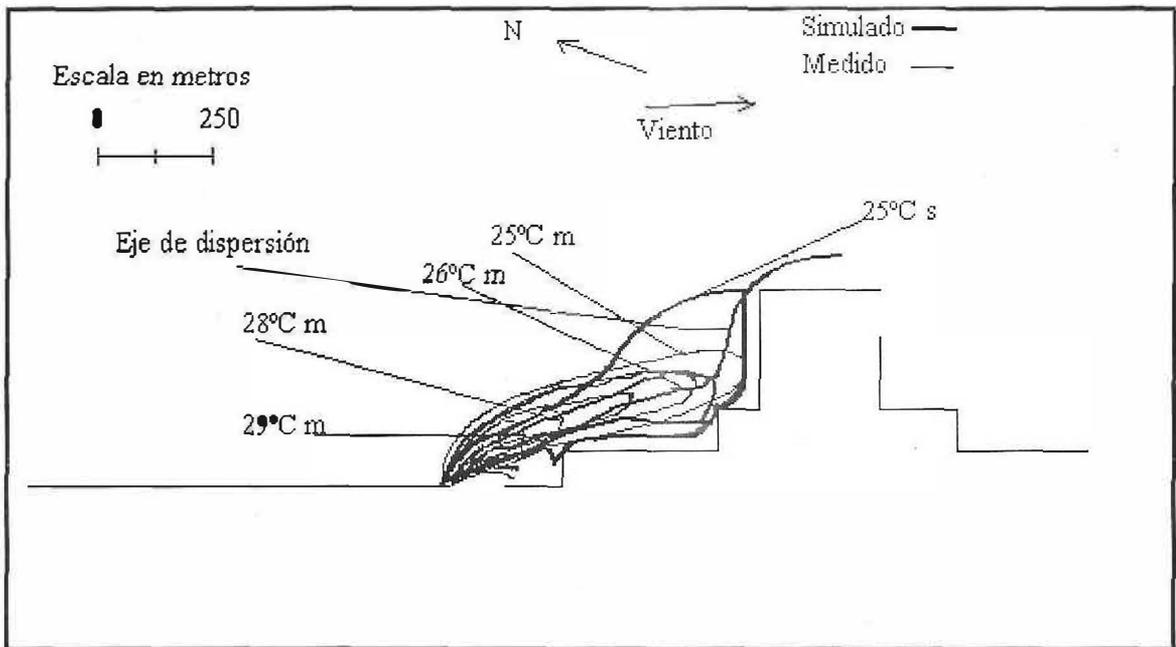


Figura 67. Comparación de las plumas térmicas simuladas (60 horas de simulación) y aquellas medidas el 26 de noviembre de 1992.

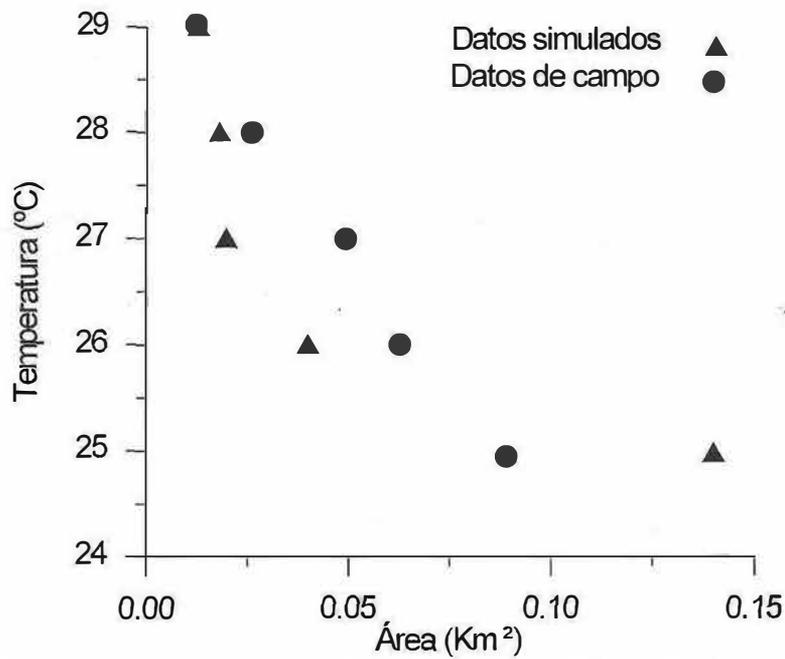


Figura 68. Comparación entre las áreas de las isotermas medidas y simuladas. Caso II, 26 de noviembre de 1992.

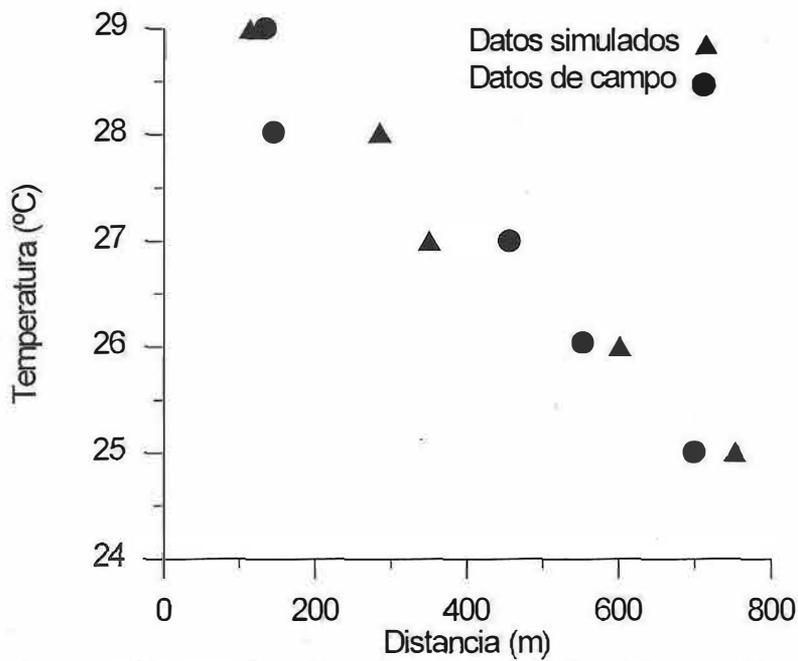


Figura 69. Comparación entre los valores de temperatura simulados y medidos a lo largo del eje de dispersión. Caso II, 26 de noviembre de 1992.

III. 2. 2. 4. 2. Distribución vertical

La distribución vertical de temperatura se presenta en las figuras 70 y 71, correspondiente a los transectos $m=18$ y $m=20$. Estos perfiles verticales de temperatura son el resultado de 60 horas de simulación y corresponde a transectos perpendiculares al eje m de la malla. Los cortes transversales que se muestran corresponden a la zona costera comprendida entre la obra de descarga y la obra de toma.

El transecto $m=18$ (fig. 70) se ubica en la región inmediata a la zona de descarga. En esta zona la máxima temperatura es de 32°C y se distribuye homogéneamente dentro del primer metro de profundidad. Por debajo del primer metro hasta llegar al fondo en la zona de descarga, 1.5 m, la temperatura vertical promedio es de 28°C , encontrándose a menos de 50 m de la costa.

En la figura 71 se muestra el transecto $m=20$, ubicado a 80 m al sur de la descarga sobre la línea de costa. Obsérvese cómo el efluente térmico de la central se propaga rápidamente hacia el sur de la malla, paralela a la costa, obedeciendo a una intensa corriente litoral de flujo SE. La isoterma límite (25°C), se encuentra a menos de 50 m de la costa.

En las figuras 72 y 73 se presenta la distribución vertical del efluente hidrotérmico en medio acuático receptor a lo largo de transectos perpendiculares al eje n de la malla.

El transecto $n = 2$ y $n = 3$ (Figuras 72 y 73) se ubican a 40 m y 80 m del canal de descarga, respectivamente. En éstas se muestra como el efluente hidrotérmico prácticamente se mantiene próximo a la superficie, ya que tiende a flotar y diluirse rápidamente con el medio acuático dentro de los primeros 0.5 m de profundidad.

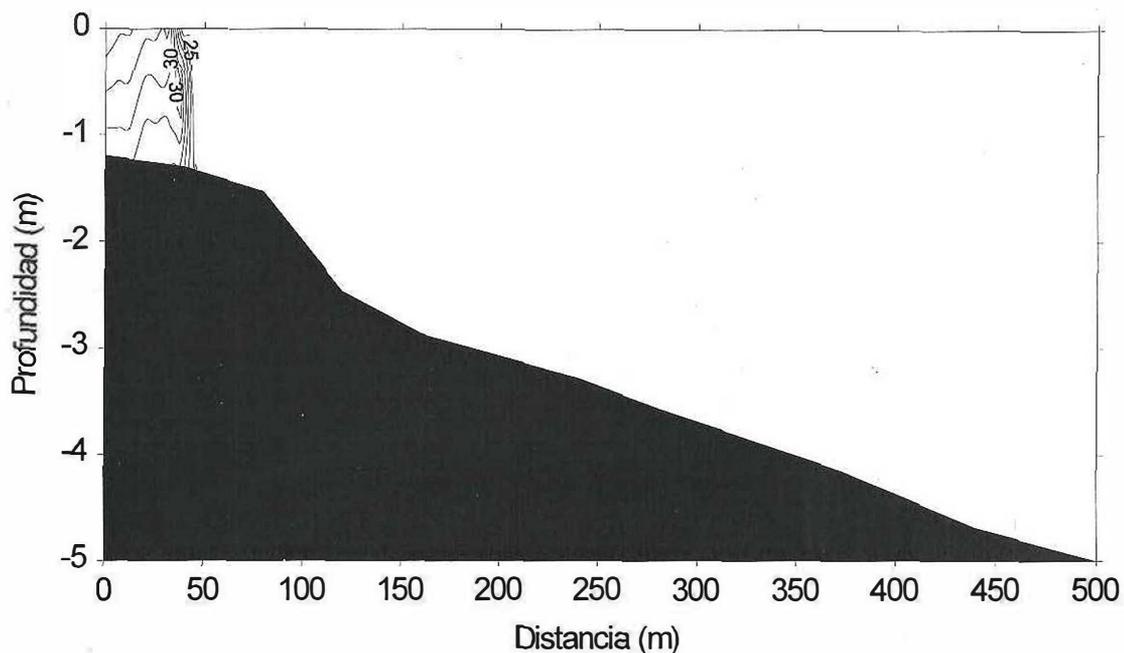


Figura 70. Distribución vertical de temperatura después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. Transecto $m=18$.

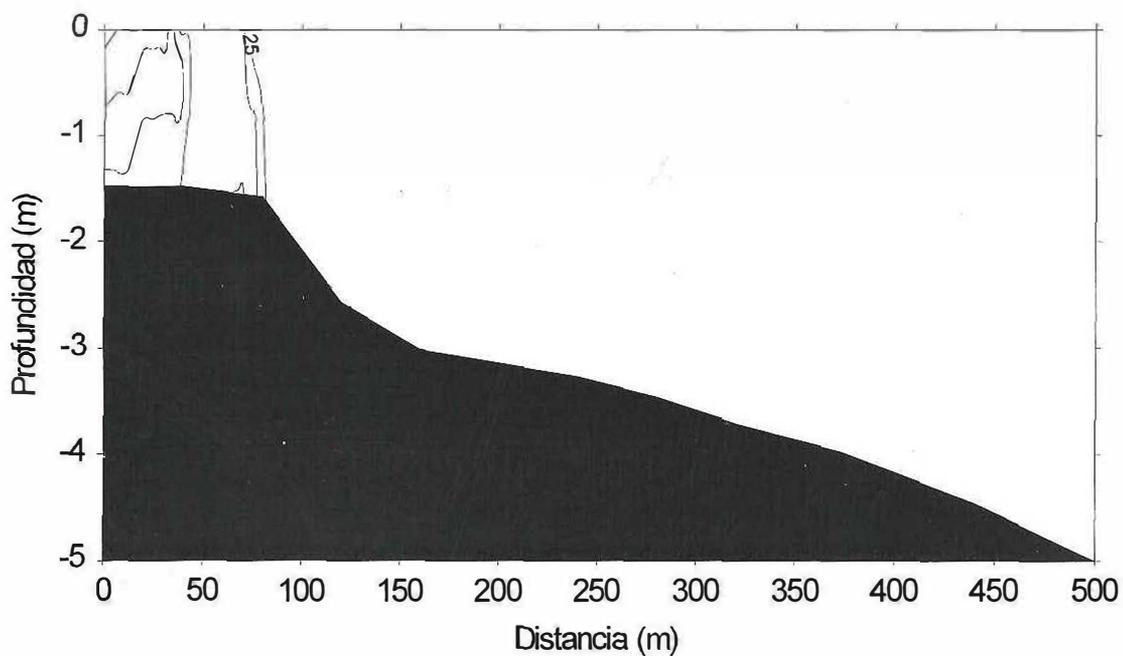


Figura 71. Distribución vertical de temperatura después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. Transecto $m=20$.

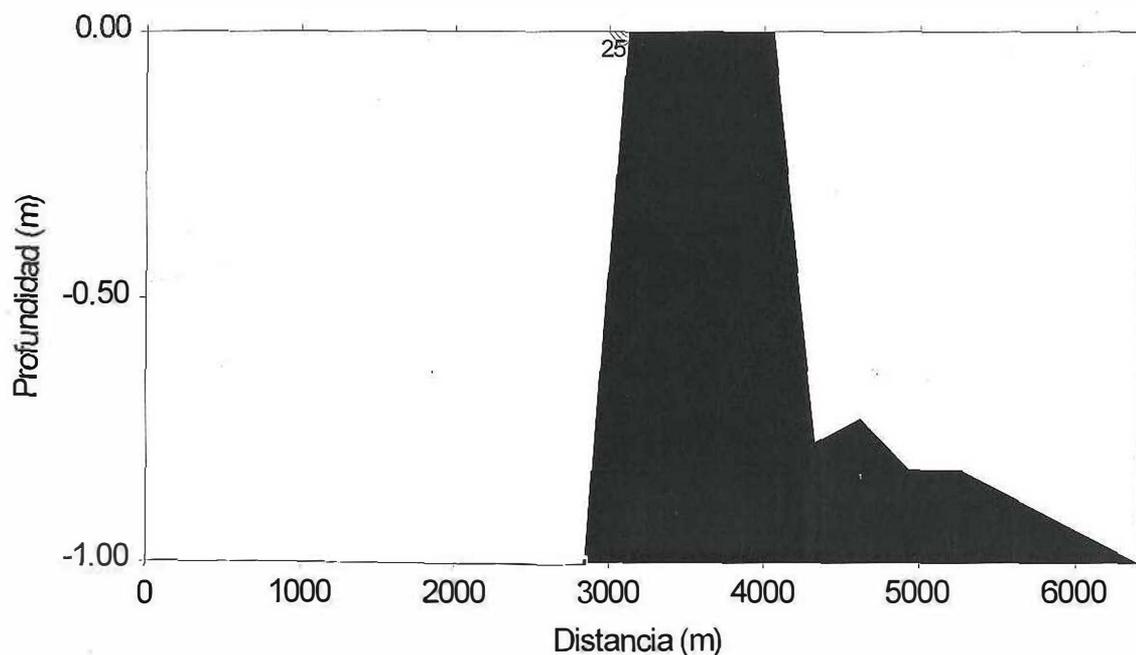


Figura 72. Distribución vertical de temperatura después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. Transecto $n = 2$.

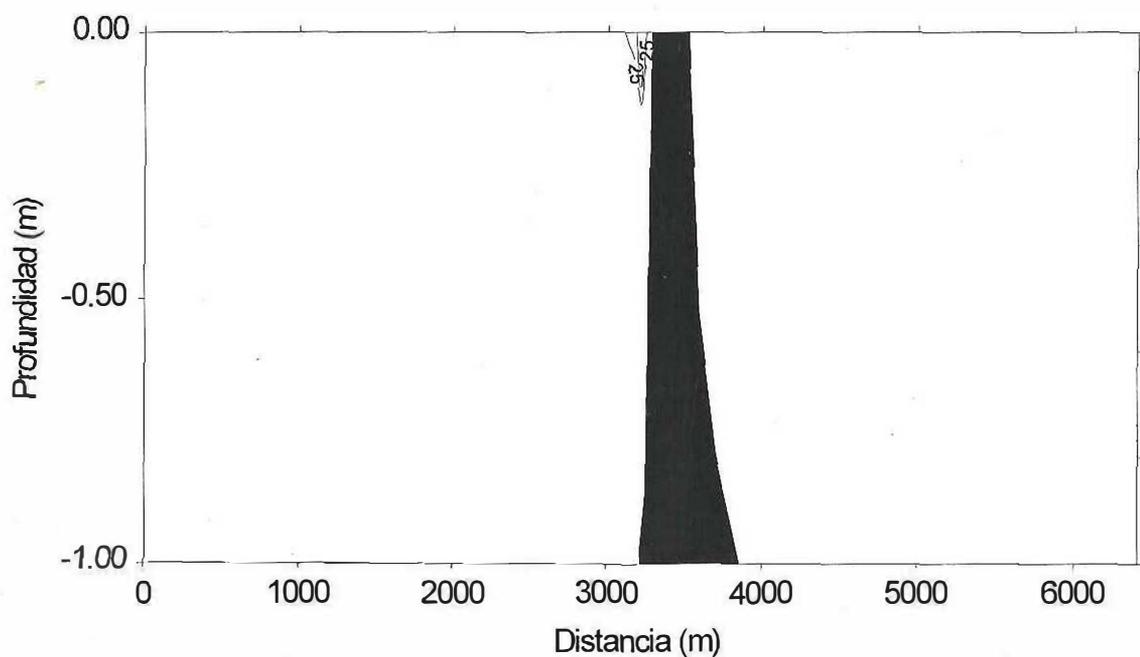


Figura 73. Distribución vertical de temperatura después de 60 horas de simulación. Caso II, 26 de noviembre de 1992. Transecto $n = 3$.

IV. DISCUSIÓN

El incremento en la demanda de electricidad en la creciente industria moderna, ha originado que cada vez sean emplazadas más centrales de potencia en las regiones costeras, dando como resultado que las descargas del agua de enfriamiento de estas centrales afecten negativamente al entorno natural.

Los principales cambios que se presentan son: aumento en la temperatura y turbulencia en el canal de descarga (Markowski, 1959; Naylor, 1965 y Barnett, 1972).

El proceso físico de transporte y transferencia dentro del medio marino, de un contaminante, está determinado por el movimiento en el océano, que va desde la circulación oceánica hasta el movimiento molecular. Para un contaminante pasivo, como sería el caso de la temperatura, el campo de velocidad de la masa de agua no es alterado por la dispersión de éstos. Si se conoce el campo dinámico con suficiente detalle, puede entonces poder predecirse el patrón de dispersión de un contaminante pasivo.

Hynes (1960), ha catalogado a la contaminación termal como de tipo natural por lo que puede esperarse que esta contaminación presente como respuesta que la fauna circundante a un punto de descarga de agua caliente, sea reemplazado por una fauna marina de aguas más cálidas. La distribución de esta fauna marina se manifiesta en forma accidental o deliberadamente introducidas de áreas lejanas ya que raramente se distribuirían por medios naturales (Naylor, 1965).

Se pueden citar dos casos confirmados en los trabajos de Naylor (1965) y Clark (1986), en donde reportan que el cangrejo del mediterráneo *Brachynotus sexdentatus* y el cangrejo del Atlántico NW, *Neopanope sayi*, ambas especies tropicales, fueron encontrados en sur de Gales, en la Gran Bretaña.

Partiendo de el hecho que al área influenciada por la descarga hidrotermal es más caliente que el área circundante, se tiene como resultado que el hábitat local se encuentre a una temperatura por arriba de la ambiental, en un rango de 8-12°C.

Todas las especies marinas presentan rangos de temperatura preferidos, abarcando el régimen de temperatura normal de acuerdo a su distribución geográfica, por lo que en cualquier punto a lo largo de la costa, la fauna local puede incluir especies cuya distribución zoogeográfica esté cercana a los límites más fríos de su distribución, así como otras cuya distribución esté cercana a los límites más cálidos (Jobling, 1981 y Bamber, 1990).

Cuando los organismos expuestos a los gradientes térmicos inducidos por la descarga de agua de enfriamiento se encuentran muy cercanos a su punto letal superior, esto les provoca grandes riesgos para los que viven en aguas tropicales y subtropicales, teniendo en ocasiones inevitables restricciones fisiológicas en la biota marina que pudieran interferir con sus funciones enzimáticas y algunas metabólicas (Bamber, 1990).

En la tabla VIII se presentan algunas temperaturas consideradas como letales para algunos organismos.

Tabla VIII. Temperaturas letales para algunos organismos. (Tomados de Snoeijis y Prentice, 1989; Bamber, 1990 y Jobling , 1981).

Grupo	Organismo	Temperatura letal
Crustáceos	Eufásidos	25.1°C
	Anastracos	30.0°C
	Eucopéodos	30.3°C
	Decápodos	32.9°C
	Amphípodos	34.4°C
Algas	Diatomeas	25.0°C
	Algas verdes	35°C
	Algas azulverdes	40.0°C

Tabla VIII. (continuación)

Peces	Cyprínidos	40.6°C
	Ictalúridos	36.5°C
	Salmónidos	26.5°C

Con los datos anteriores queda claro que los límites letales es un problema potencial en temperaturas por arriba de los 40°C, lo que puede presentar cambios espaciales y temporales de la fauna que habita en las áreas inmediatas al punto de descarga (Bamber, 1990; Langford, 1990; Schroeter *et al.*, 1993).

Los resultados de las simulaciones indican que el campo de circulación depende básicamente de la dirección del viento, lo que hace imperativo identificar el sistema de vientos dominantes de la región, para así poder tener la reproducción de la dispersión y difusión del calor proveniente de la central y poder estimar el área total de influencia circunscrita por las isothermas limítrofes de los efluentes medidos.

De hecho, podemos observar en las figuras 17, 18, 19 , 20 y 62 correspondientes al campo de circulación superficial, como el modelo responde cuando existen incrementos y cambios en la dirección de los vientos. Para el caso I, cuando los vientos inicialmente prevalecieron del SE, el agua caliente se encuentra muy cercana a la costa (figuras 33 y 34) mientras que al presentarse incrementos y cambios en la dirección NW, el agua caliente tiende a alcanzar distancias mayores teniendo como consecuencia que el efluente se extienda hasta casi rebasar la obra de toma (fig. 66) comportándose como un cuerpo natátil como lo muestran los perfiles verticales simulados. Para ambos casos, el campo de velocidad superficial está dentro del rango de intensidades y direcciones medidas en el Sitio Cazonos utilizando el método lagrangiano, como puede observarse en las figuras 74 y 75 que

corresponden a mediciones de corrientes marinas superficiales registradas de mayo de 1982 a abril de 1984.

Así de esta manera tenemos que al comparar los resultados del modelo con las mediciones de campo, específicamente entre la coberturas de las áreas de influencia del campo térmico, el modelo reproduce satisfactoriamente los patrones de dispersión y difusión superficial del efluente térmico para una variedad de condiciones ambientales meteorológicas y oceanográficas, como puede apreciarse en las figuras 37, 38, 39, 40 y 67. Para el caso I el modelo sobrestima el área total de influencia circundante por las isotermas limítrofes de los efluentes medidos, con $\sim 4\%$. Para el caso II el modelo sobrestima el área total de influencia por arriba del 100%, siendo este caso el que mayor diferencia presentó entre las simulaciones y mediciones de campo siendo la explicación a esto la presencia del oleaje incidente con altura media de 2.23 m, lo cual obliga que la masa de agua con mayor temperatura se mantenga confinada entre la obra de descarga y la obra de toma. Sin embargo, el comportamiento de las plumas simuladas y medidas siguen en cierta manera el patrón de circulación.

Los cambios relacionados con la estructura y propiedades de la pluma debido a un aumento en la velocidad, se parametrizan por los cambios en el número de Froude (Washburn *et al.*, 1992). Si tomamos en cuenta que la dilución del agua caliente descargada es relativamente poca debido al pequeño número de Froude, esto facilita la estratificación de la columna de agua incrementando la flotabilidad del efluente y minimizando su dispersión vertical. El número de Froude de la descarga de la central indica que las fuerzas de flotación dominan sobre las inerciales. Es importante hacer notar que esta situación no es favorable para el ecosistema local, puesto que lo que se busca es una rápida dilución del agua caliente con agua más fría en el menor espacio y tiempo posible, para evitar posibles efectos sobre las

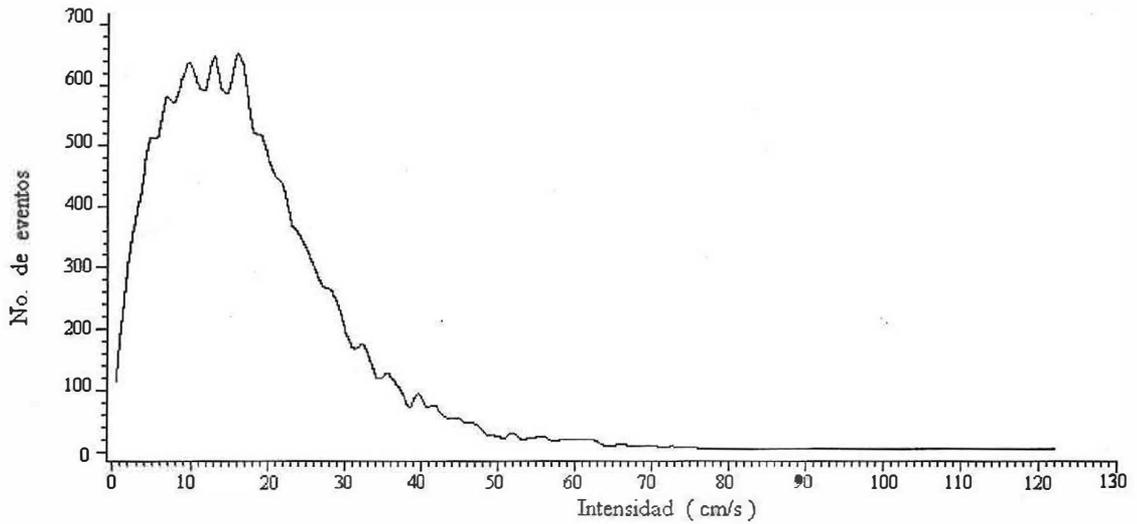


Figura 74. Distribución de la intensidad de corrientes marinas superficiales medidas, en el Sitio Cazones, por el método lagrangiano durante el periodo de marzo de 1982 a abril de 1984. Población de datos : 15406.

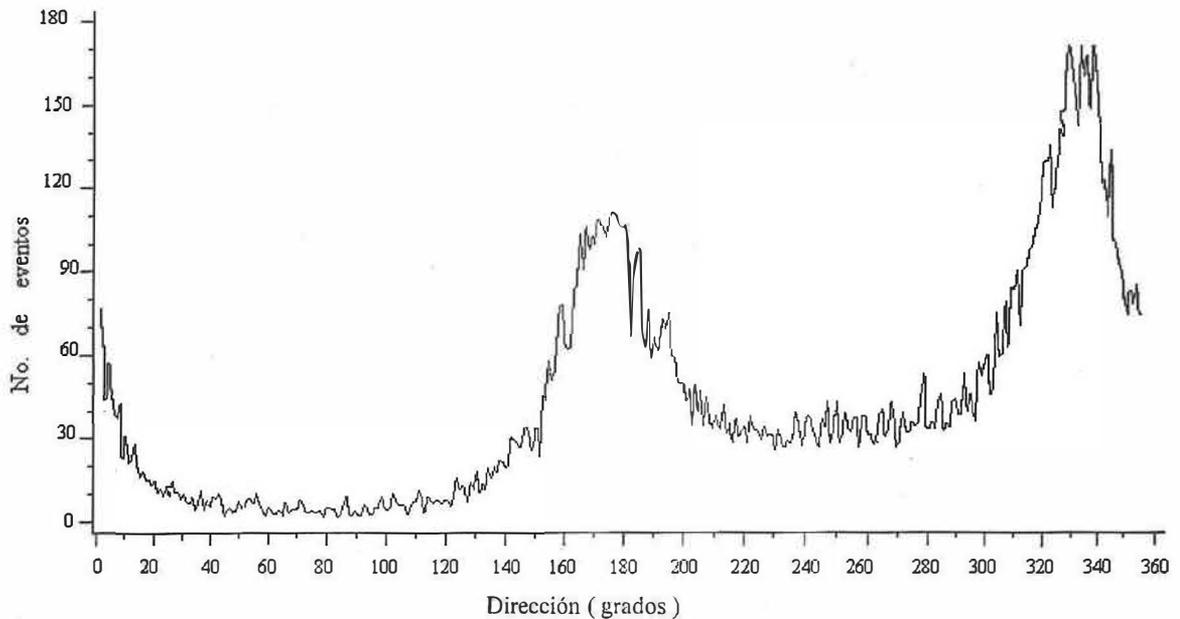


Figura 75. Distribución de la dirección de corrientes marinas superficiales medidas, en el Sitio Cazones, por el método lagrangiano durante el periodo de marzo de 1982 a abril de 1984. Población de datos : 15406.

comunidades circundantes al área de descarga como sería la disminución de la solubilidad del oxígeno (O_2), así como los cambios que se presentan en las propiedades físicas y químicas del agua de mar (Subramanian, 1990; Miller y Brighthouse, 1984). Una de las alternativas factibles para mitigar el área de impacto térmico sería incrementar el valor del número de Froude del efluente mediante la modificación de la configuración de la boca del canal de descarga o cambiar el tipo de descarga superficial a una submarina.

Desde el punto de vista ingenieril, el comportamiento dinámico y posición de la pluma térmica, es de vital importancia para el correcto funcionamiento de la central, ya que si el efluente térmico de la central fuese transportado por las corrientes superficiales y subsuperficiales hacia la obra de toma, origina un fenómeno de recirculación ya que el agua sería succionada antes de que ésta cediera la mayor cantidad de su calor a la atmósfera o a las masas de agua adyacente de menor temperatura. El problema de recirculación de agua de enfriamiento quedaría resuelto si se diseñase una obra de toma submarina que succionara agua por debajo de la termoclina estacional de verano.

Los criterios regulatorios internacionales sobre las descargas de agua de enfriamiento en zonas costeras establecen que una zona de impacto térmico es aquella en la que se incrementa hasta $3^{\circ}C$ la temperatura del medio acuático receptor (Gesamp, 1984). Para el caso específico de la CTT, la Comisión Nacional del Agua fijó las condiciones particulares de descarga, determinando que a una distancia radial no mayor de 2 Km. del punto de descarga la temperatura superficial del agua de enfriamiento no deberá exceder los $35^{\circ}C$ (norma oficial sin publicar por ser de acceso restringido). Evidentemente, en ninguno de los casos analizados se violó esta norma oficial.

Un parámetro crucial de los modelos tridimensionales es el flujo de *momentum* vertical a través de pequeños remolinos, sin embargo, para poder caracterizar la difusión vertical de *momentum* es incorporado el coeficiente vertical de viscosidad por remolinos así como también los coeficientes horizontales de viscosidad por remolinos que caracterizan la fricción lateral (Simons, 1974; Csanady, 1975; Yanagi *et al.*, 1982; Al-Rabeh y Gunay, 1992). Los coeficientes de viscosidad por remolinos juegan un papel importante en la precisión de las simulaciones, aunque la selección de estos no es una tarea fácil ya que los coeficientes de difusión dependen en gran medida de la estratificación así como del viento (Simons, 1974). Los valores seleccionados para las simulaciones, describen adecuadamente las propiedades dispersivas del medio acuático receptor como lo presentan los resultados de la verificación de los casos en los que se puede observar como el comportamiento de los datos de campo son muy similares a los datos producto de las simulaciones de la descarga del agua de enfriamiento, a excepción del caso II en donde la pluma térmica alcanza áreas más grande en comparación con los datos de campo.

Evidentemente, los movimientos del agua determinan que los organismos sésiles (*Gammarus sp.*) se encuentren más expuestos a los gradientes térmicos inducidos por la descarga de agua de enfriamiento. Caso contrario sería para los peces (*Arius melanopus*; *Seriola dumerilli*; *Latjanus campechanus*) ya que no dependen de la corriente marina por lo que pueden evadir al área impactada por la descarga hidrotermal.

Finalmente, debido a la buena precisión y veracidad con la que nuestro modelo puede reproducir el tamaño, forma y orientación de la dispersión de los efluentes medidos en el ST bajo una gran diversidad de condiciones meteorológicas y oceanográficas, resulta importante y obligado señalar que el modelo puede ser utilizado como una herramienta que permite evaluar la magnitud del impacto

ambiental, consecuencia de la generación eléctrica, así como sugerir alternativas ingenieriles sobre la configuración y diseño de las obras de toma y descarga en aras de obtener un máximo aprovechamiento de los recursos naturales con el mínimo deterioro ambiental.

V. CONCLUSIÓN

El análisis estadístico del banco de datos de intensidad y dirección del viento, medido del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 1983, indica que el régimen anemométrico predominante es bimodal y el número de valores de mayor ocurrencia se presentó dentro del intervalo de 180° a 315° y representa aproximadamente el 52 % de la población total de datos.

Las simulaciones numéricas del comportamiento hidrodinámico de la descarga superficial de la CTT, modelan la interacción del efluente con el campo dinámico de circulación costera determinado fundamentalmente por los vientos característicos de la región.

La distribución térmica del efluente sigue un patrón de circulación costero y su dispersión es similar a la del campo dinámico.

Debido a su baja densidad, la dispersión del efluente ocurre dentro de la capa superficial (0 a 2 m de profundidad).

La excesiva flotación del efluente, se manifiesta por el pequeño número de Froude. El efluente pierde rápidamente su cantidad de movimiento, quedando a muy poca distancia del punto de descarga a merced de la circulación costera, alcanzando una profundidad máxima de 3.5 m a una distancia de ~ 200 m.

El área máxima de impacto térmico del efluente fue de $\sim 0.45 \text{ Km}^2$ (Caso I) y el área real de impacto térmico delimitada por la isoterma de 29°C no fue mayor a 0.1 Km^2 , por lo que sólo se afecta a los organismos que habitan en esta área tan pequeña.

La precisión promedio con la cual el modelo predice las áreas de impacto de los efluentes descargados en el ST es de $\pm 11 \%$.

Con todo lo anterior, es claro que los resultados de este estudio serían más confiables si se toma en cuenta la siguiente sugerencia:

- Contar con una base de datos de campo de las descargas superficiales ocurrentes en el ST bastante confiable para utilizarse en la verificación del modelo de Paul y Lick.

Finalmente, el área de impacto térmico que se forma por las descargas de agua de enfriamiento de la CTT se podría minimizar considerablemente si se toman en cuenta las siguientes sugerencias:

- 1) Cambiar el tipo de descarga superficial por una submarina.
- 2) Implementar una obra de toma submarina por debajo de la termoclina estacional de verano, lo que seguramente garantizaría a la CTT un suministro de agua considerablemente más fría, de $\sim 22^{\circ}\text{C}$.

Aunque las simulaciones numéricas descritas en las páginas anteriores demuestran que el modelo utilizado reproduce favorablemente la dispersión y difusión del calor contenido en la descarga del agua de enfriamiento proveniente de la CTT para los dos casos estudiados, no debemos esperar que éstas puedan suplantar las observaciones de campo. Por el contrario, los datos de campo y los datos producto de simulaciones numéricas deben de ser siempre complementarios.

LITERATURA CITADA

- Al-Rabeh, A y N. Gunay. 1992. On the application of a hydrodynamic model for a limited sea area. *Coastal Engineering*. 17, 173-194. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.
- Bamber, R. N. 1990. Power station thermal effluents and marine crustaceans. *J. Therm. Biol.* 15, 91-96. Bamber press plc.
- Barnett, P. R. O. 1972. Effects of warm water effluents from stations on marine life. *Proc. R. Soc. Lond. B.* 180, 497-509.
- Breckilng, B. y F. Müller. 1994. Currents trends in ecological modeling and the 8th ISEM conference on the state-of-the-art. *Ecological Modelling*. 75/76. 667-675. Elsevier Science B. V.
- Chieh, S. H y ASCE. 1987. Two-dimensional numerical model of thermal discharges in Coastal Regions. *Journal of Hydraulic Engineering*. 113 (8): 1032-1040.
- Clark, P. F. 1986. North-East Atlantic Crabs. An Atlas of distribution. En: *Power station thermal effluents and marine crustaceans* (R. N. Bamber, ed.). Pergamon Press plc. Great Britain.
- Csanady, G. T. 1975. Lateral momentum flux in boundary currents. *Journal of Phys. Oceanography*. 5, 705-717 pp.
- Dent, J. B. y M. J. Blackie. 1979. *Systems simulation in agriculture*. Apllied Science Publishers Ltd., London.
- Duedall, Y. W., B. H. Ketchum, P. K. Park y D. R. Kester. 1983. Global inputs, characteristics, and fates of ocean-dumped industrial and sewage wastes: An overview, p. 3.45. En : *Wastes in the Oceans* (Duedall, Y. W., B. H. Ketchum, P. K. Park y D. R. Kesters, eds.). Vol. 1. *Industrial and sewage wastes in the ocean*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 431 pp.

- Dunn, W. E. A. J. Policastro y R. A. Paddock. 1975. Surface thermal plumes: Evaluation of mathematical models for the near and complete field. U. S. Department of commerce. National Technical Information Service. INL/WR-75-3. part 1. 397 pp. Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.
- Edinger, J. E., D. K. Brady y J. C. Geyer. 1974. Heat exchange and transport in the environment. Johns Hopkins University press. Baltimore. Md.
- Elwany, H. S., J. Reitzel y M. R. Erdman. 1990. Modification of coastal currents by power plant intake and thermal discharge systems. Coastal Engineering. 14, 359-383. Elsevier Publishers. B. V., Amsterdam.
- GESAMP, 1984. Thermal discharges in the marine environment. UNEP Regional seas report and studies. No. 45
- Hite, G. E. 1993. Analog model of diffusion in Bays and estuaries. Marine Environmental Research. 33, 75-82. Elsevier Science Publishers Ltd. England.
- Hughes, W. F., y J. A. Brighton. 1978. Dinámica de fluidos. McGraw-Hill. México. 259 pp.
- Hutchinson, U. H. y J. D. Maness. 1979. The role of behavior in temperature acclimation and tolerance in ectotherm. Am. Zool. 19, 367-384.
- Hynes, H. B. N. 1960. The biology of polluted waters. Liverpool Univ. Press. Liverpool. 202 pp.
- In-Sik, K., K. Kyu-Myong y K. Maeng-Kim. 1992. Estimation of bulk exchange coefficients in the western and eastern tropical pacific using ATLAS buoy observations. Tropical Oceans Global atmosphere (TOGA notes). 9:1-3.
- Ippen, A. T. 1966. Estuary and coastline hydrodynamics. McGraw-Hill Book Company, Inc. 145 pp.
- Jobling, M. 1981. Temperature tolerance and the final preferendum-rapid methods for the assessment of optimum growth temperatures. J. Fish Biol. 19, 439-455.
- Johnson, N. L., y F. C. Leone. 1977. Statistics and experimental design in engineering and the physical sciences. John Wiley & Sons. New York. 601 pp.

- Khazanie, R. 1990. Elementary statistics in a world of applications. Harper Collins Publishers. New York. 716 pp.
- Kremer, J. N. y S. W. Nixon. 1978. A coastal marine ecosystem, simulation and analysis. Ecological studies 24. Springer-Verlang. New York. 217 pp.
- Langford, T. E. 1990. Ecological effects of thermal discharges. Elsevier Applied Science, London. 455 pp.
- Leyendekkers, J. V. 1973. Thermodynamics of seawater. Part 1. Vol. 3. De. Donald W. Hood. Marcel Decker Inc. New York. 496 pp.
- List, J. E., G. Gartrell y C. D. Winant. 1990. Diffusion and dispersion in Coastal Waters. Journal of Hydraulic Engineering. 116 (10):1158-1179.
- Lo, J. y Y. Esen. 1987. Physical model study of thermal and chemical pollution in the Shuaiba offshore area of Kuwait. Environment International. 13, 253-259. Pergamon Journals Ltd.
- Luckyanov, N. K. 1993. On adequacy of ecological models. Ecological Modelling. 68, 51-65. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.
- Mann, K. H. y J. R. Lazier. 1991. Dynamics of marine ecosystems. Blackwell Scientific Publications, Inc. England. 466 pp.
- Markowski, S. 1959. The cooling water of power stations: a new factor in the environment of marine and freshwater invertebrates. J. Anim. Ecol. 28, 243-258.
- Markowski, S. 1960. Observations on the response of some benthonic organisms to power station cooling water. J. Anim. Ecol. 33, 349-357.
- Mayer, D. G. y D. G. Butler. 1993. Statistical validation. Ecological modelling. 68, 21-32. Elsevier Science Publishers. B. V. Amsterdam.
- McKinion, J. M. y D. N. Baker. 1982. Modeling experimentation, verification and validation: closing the feedback loop. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 25, 647-653.
- Michelson, I. 1970. The science of fluids. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 297 pp.

- Miller, D. S. y B. A. Brighthouse. 1984. Thermal Discharges; a guide to power and process plant cooling water discharges into rivers, lakes and seas. British Hydromechanics Research Association. 221 pp.
- Naylor, E. 1965. Effects of heated effluents upon marine and estuarine organisms. *Adv. Mar. Biol.* 3, 63-103.
- Packard, J. M., R. K. Frohlich, J. E. Reynolds III y J. R. Wilcox. 1989. Manatee response to interruption of a thermal effluent. *J. Wild. Manage.* 53 (3):692-700.
- Paul, J. F. y W. J. Lick. 1973 a. A numerical model for a three-dimensional variable density jet. Report No. FTAS/TR73-92, School of Engineering. Case Western Reserve University, Cleveland Ohio.
- Paul, J. F. y W. J. Lick. 1973 b. A numerical model for three-dimensional variable density jet. *Proc. 16 th Conf. Great Lakes res., IAGLR.* 818-830.
- Platt, T., K. H. Mann y R. E. Ulanowics. 1981. Mathematical models in biological oceanography. The UNESCO press. 157 pp.
- Ruíz, S. M. A. 1993. Desarrollo de experiencias de trabajo en el manejo de una estación climatológica en Tuxpan, Ver. Reporte Técnico. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Veracruzana. 72 pp.
- Sergeyeva, O. A., R. A. Kalinichenko, L. G. Lenchina y Y. V. Medyanick. 1990. Effect of cooling system of a fossil fuel power station on plankton. Institute of Hydrobiology, Ukrainian Academy of Sciences. *UDC* 574.63 (28):36-40.
- Schroeter, C., J. D. Dixon, J. Kastendiek y R. O. Smith. 1993. Detecting the ecological effects of environmental impacts: a case of kelp forest invertebrates. *Ecological applications.* 3 (2) :331-350.
- Sharpe, P. J. 1990. Forest modeling approaches: compromises between generality and precision. En: *Quality as a characteristic of ecological models*, p. 161-174 (Zeide, B. ed.). Ecological modelling. Elsevier Publishers B. V., Amsterdam.
- Silvert, W. L. 1981. Principles of ecosystem modelling, p. 651-676. En: *Analysis of marine ecosystems* (A. R. Longhurst, ed.) Academic Press Inc. London. Ltd. 741 pp.

- Simons, T. J. 1974. Verification of numerical models of Lake Ontario. II. Stratified circulations and temperature changes. *J. Phys. Oceanography*. 5, 98-110.
- Snoeijs, P. J. 1989. Effects of increasing water temperatures and flow rates on epilithic fauna in a cooling-water discharges basin. *Journal of Applied Ecology*. 26, 939-956.
- Snoeijs, P. J. y C. Prentice. 1989. Effects of cooling water discharge on the structure and dynamics of epilithic algal communities in the Northern Baltic. *Hydrobiologia*. 184, 99-123. Kluwer Academic Publishers.
- Subramanian, B., S. K. Prabu y A. Mahaderan. 1990. Influence of thermal power station effluents on hydrobiology of seawater. *Water, air and soil pollution*. 53, 131-137. Kluwer Academic Publishers.
- Suresh, K., M. S. Ahamed, G. Durairaj y K. V. K. Nair. 1993. Impact of power plant heated effluent on the abundance of sedentary organisms off Kalpakkam, east coast of India. *Hydrobiologia*. 268, 109-114. Kluwer Academic Publishers.
- Swartzman, G. L. y S. P. Kaluzny. 1987. *Ecological simulation primer*. Mcmillan Publishing Company, New York. 370 pp.
- Talmage, S. y C. Coutant. 1980. Thermal effects. *Water Pollut. Control Fedn*. 52, 1575-1616.
- Thourhaug, A. 1978. The effect of heated effluent from power plants on sea grass (*Thalassia*) communities quantitatively comparing estuaries in the subtropics to the tropics. *Mar. Pollut. Bull.* 9, 181-187.
- Van der Molen, D. T. y J. Pintér. 1993. Environmental model calibration under different specifications: an application to the model SED. *Ecological Modelling*. 68, 1-19. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.
- Vasseur, B., L. Funkquist y J. Paul. 1980. Verification of a numerical model for thermal plumes. SMHI Rapport. *Hydrologi och oceanografi. Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institutet*. Norrköping.

- Vidal F. V., y V. M. V. Vidal. 1985. Estudios Oceanográficos para el diseño y emplazamiento de centrales de potencia costanera. Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas. 9 (6):215-228.
- Waldrop, W. R. y R. C. Farmer. 1974. Three-dimensional computation of buoyant plumes. *J. Geophys. Research.* 79 (9):1269-1276.
- Walsh, J. J. 1975. A biological interface for numerical models and the real world, p. 5-9. En: Numerical models of ocean circulation. (National Academy of Sciences, eds.).
- Washburn, L., B. H. Jones, A. Bratkovich, T. D. Dickey y M. Chen. 1989. Mixing dispersion, and resuspension in vicinity of ocean wastewater plume. *Journal of Hydraulic Engineering.* 118 (1):38-58.
- Wheaton, R. W. 1977. Aquacultural engineering. John Wiley & Sons, Inc. New York. 709 pp.
- Wilson, B. W. 1960. Note on surface wind stress over water at low and high wind speeds. *J. Geophys. Research.* 65(10):3337-3382.
- Wroblewski, J. S. y E. Hofmann. 1989. US interdisciplinary modeling studies of coastal-offshore exchange process: Past and future. *Prog. Oceanog.* 23, 65-99. Pergamon press plc. Great Britain.
- Yanagi, T., K. Murashita y H. Higuchi. 1982. Horizontal turbulent diffusivity in the sea. *Deep-sea Research.* 29, 217-226. Pergamon press Ltd. Great Britain.
- Zambrano, L., Vidal. V.M., y Vidal, F.V. 1993. Estudios meteorológicos y corrientométricos aplicados al emplazamiento de centrales de potencia en las costas del Golfo de México. V Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar. 27 septiembre - 1 octubre, 1993. La Paz, B.C.S. México.
- Zeide, B. 1991. Quality as a characteristic of ecological models. *Ecological modelling*, 55, 161-174. Elsevier Science Publishers. B. V., Amsterdam.