



SECRETARIA  
DE  
EDUCACION PUBLICA

**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



**APLICACION DE UN MODELO  
HIDRODINAMICO EN ESTANQUES PARA  
MARICULTIVO**

TESIS  
QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER  
EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
PRESENTA

**ANA MARGARITA GONZALEZ ORDUÑO**

La Paz, B.C.S.

Diciembre, 1996.

# APLICACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO EN ESTANQUES PARA MARICULTIVO

## INDICE

GLOSARIO.....	I
RELACION DE CUADROS, GRAFICAS E ILUSTRACIONES.....	IV
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VII
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Objetivo.....	10
1.3 Justificación.....	11
1.4 Area de Estudio.....	12
CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODO.....	15
2.1 Observaciones.....	15
2.2 Levantamiento Topográfico y Batimétrico.....	15
2.3 Mediciones de Corriente.....	15
2.4 Mediciones de Marea.....	16
2.5 Parámetros Meteorológicos.....	17
2.6 Análisis Bacteriológico.....	17
2.7 Análisis Químico.....	17
2.8 Aplicación de un Modelo Hidrodinámico-Numérico.....	18
2.9 Procesamiento de Datos.....	18

CAPITULO III. MODELO HIDRODINÁMICO-NUMÉRICO.. .....	19
3.1 Principios de Conservación de Masa y Momentum.. .....	19
3.2 Fuerzas Actuantes.. .....	19
3.2.1 Fuerza de Coriolis.. .....	19
3.2.2 Fuerza de Gravedad.....	20
3.2.3 Fuerza de Marea.. .....	20
3.3 Ecuaciones de Momentum.. .....	21
3.4 Modelo Barotrópico.. .....	22
3.5 Método Numérico.. .....	22
3.6 Discretización de los Terminos del Modelo.. .....	23
3.6.1 Parámetro de Coriolis.....	23
3.6.2 Terminos para la Integración de la Componente $U$ de la Ecuación de Movimiento .....	23
3.6.3 Terminos para la Integración de la Componente $V$ de la Ecuación de Movimiento .....	24
3.6.4 Discretización de la Ecuación de Continuidad .....	25
3.7 Esquema de integración .....	26
3.8 Estabilidad.. .....	26
3.9 Capacidad de Simulación del Modelo.....	27
CAPITULO IV. SUPERCOMPUTO.....	29
4.1 Introducción.....	29
4.2 Power Challenge XL.....	30

4.3 Comandos para procesos en supercómputo.. .....	30
4.4 Evaluación de procesos de supercómputo.. .....	31
<b>CAPITULO V. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES EN CAMPO.. .....</b>	<b>33</b>
5.1 Introducción.. .....	33
5.2 Estanque de Marea.....	33
5.2.1 Parámetros Físico-Químicos.. .....	35
5.2.1.1 Marea.. .....	35
5.2.1.2 Oleaje.. .....	36
5.2.1.3 Viento.. .....	36
5.2.1.4 Corrientes.. .....	37
5.2.1.5 Temperatura.. .....	37
5.2.1.6 Salinidad.. .....	40
5.2.1.7 Sigma.. .....	40
5.2.1.8 Oxígeno Disuelto.. .....	40
5.2.1.9 pH.....	40
5.2.2 Nutrientes.....	43
5.2.2.1 Amonio.....	43
5.2.2.2 Nitratos.....	43
5.2.2.3 Nitritos.. .....	43
5.2.2.4 Fosfatos.....	43
5.2.3 Análisis Bacteriológico.....	43
5.3 Canales Artificiales (Tridente).....	46

5.3.1 Parámetros Físicos.....	47
5.3.1.1 Marea.....	47
5.3.1.2 Oleaje.....	48
5.3.1.3 Viento.....	48
5.3.1.4 Corrientes.....	48
5.3.1.5 Temperatura.....	49
5.3.1.6 Salinidad.....	51
5.3.1.7 Sigma.....	51
<b>CAPITULO VI. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO-NUMÉRICO</b>	<b>55</b>
6.1 Estanque de Marea.....	55
6.1.1 Circulación inducida por marea.....	55
6.1.2 Circulación inducida por viento.....	56
6.2 Canales Artificiales (Tridente).....	57
6.2.1 Circulación inducida por marea.....	57
6.2.2 Circulación inducida por viento.....	58
<b>CAPITULO VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>59</b>
7.1 Estanque de marea.....	59
7.2 Canales Artificiales (Tridente).....	64
<b>CAPITULO VIII. CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>CAPITULO IX. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>71</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>81</b>

## GLOSARIO

**Bajamar.** Es la mínima altura registrada en un descenso de marea. La bajamar se debe a las fuerzas de mareas periódicas.

**Bajamar Inferior.** Es la bajamar más baja de cualquier día de marea.

**Bajamar Superior.** Es la bajamar más grande de cualquier día de marea.

**Barotrópico.** Cuando las superficies isobáricas de un fluido son paralelas a las superficies de densidad.

**Constante armónica.** Es la amplitud y marca de una constituyente armónica de la marea o corriente de marea de cualquier sitio.

**Constituyente.** Es uno de los elementos armónicos en una expresión matemática para producir la fuerza de marea y en fórmulas correspondientes a la marea o corriente de marea. Cada constituyente representa un cambio periódico o variación en la posición relativa de la Tierra, Luna y Sol. Una sola constituyente usualmente se escribe de la siguiente forma  $y = A \cos(at + \hat{a})$ , donde  $y$  esta en función del tiempo, el coeficiente  $A$  es la amplitud de la constituyente, el ángulo  $(at + \hat{a})$  cambia uniformemente y su valor en cualquier tiempo se le llama fase.

**Dirección del viento.** Es la dirección de donde el viento esta soplando.

**Diurno.** Es un período o ciclo de aproximadamente un día de marea. La marea se dice que es diurna cuando solamente presenta una pleamar y una bajamar durante un día de marea.

**Duración del ascenso y duración del descenso de la marea.** La duración del ascenso es el intervalo de bajamar a pleamar, y la duración del descenso es el intervalo de pleamar a bajamar. La unión de estos dos procesos, para ambos casos, en promedio tiene un período de 12.42 hrs para una marea

semidiurna o un período de 24.84 hrs para una marea diurna. En una marea semidiurna normal, la duración del ascenso y la duración del descenso, para cada uno será de aproximadamente 6.21 hrs, pero en aguas someras hay una tendencia a ser menor la duración del ascenso y un correspondiente incremento en la duración del descenso.

**Euleriana, medición.** Observación de la corriente con un instrumento relativamente fijo a el flujo.

**Fourier, series.** Series que involucran a los senos y cosenos de los múltiplos enteros de un ángulo que varia y es usualmente escrita de las siguiente forma:

$$y=H_0 + A_1 \text{ sen } x + A_2 \text{ sen } 2x + A_3 \text{ sen } 3x + \dots B_1 \text{ cos } x + B_2 \text{ cos } 2x + B_3 \text{ cos } 3x + \dots$$

Tomando un número suficiente de términos de una serie se puede representar cualquier función de x.

**Función armónica.** En su forma más simple, es la cantidad que varia como el coseno del ángulo que incrementa uniformemente con el tiempo.

**Giro anticiclónico.** Es el movimiento de un fluido que gira en sentido de las manecillas del reloj.

**Giro ciclónico.** Es el movimiento de un fluido que gira en sentido opuesto de las manecillas del reloj.

**K<sub>1</sub>.** Constituyente Lunisolar diurna. Esta constituyente con la O<sub>1</sub>, expresan el efecto de la declinación de la Luna, con la P<sub>1</sub> expresa el efecto de la declinación del Sol.

**K<sub>2</sub>.** Constituyente Lunisolar semidiurna. Esta constituyente modula la amplitud y frecuencia de la M<sub>2</sub> y S<sub>2</sub> de la declinación de la Luna y el Sol respectivamente.

**M<sub>2</sub>.** Constituyente lunar principal semidiurna. Esta constituyente representa la rotación de la Tierra con respecto a la Luna.

**N<sub>2</sub>.** Constituyente gran lunar elíptica semidiurna.

**Nivel de Plantilla.** Es el nivel en el cual se hace referencia el plano de construcción.

**NMM.** Nivel medio del mar.

NMP. Número más probable.

O,. Constituyente lunar diurna.

P,. Constituyente solar diurna.

**Período.** Es el intervalo requerido para la conclusión de un evento recurrente, como la revolución de un cuerpo celeste o el tiempo entre dos consecutivas fases de marea o corrientes de marea. Un período puede ser expresado en medición angular.

**Pleamar.** Es la máxima altura registrada en un ascenso de marea. La pleamar es debida a las fuerzas de marea periódicas.

**Pleamar Inferior.** Es la más baja de las pleamares de cualquier día de marea.

**Pleamar Superior.** Es la pleamar más grande registrada en cualquier día de marea.

**S<sub>2</sub>.** Constituyente principal solar semidiurna. Esta constituyente representa la rotación de la Tierra con respecto al Sol.

**Semidiurno.** Es el período o ciclo de aproximadamente la mitad de un día de marea. El tipo predominante de marea en el mundo es la semidiurna, con dos pleamares y dos bajamares en un día de marea.

**Sigma,.** Es una expresión de densidad como una función de temperatura y salinidad en una forma numérica conveniente.

SGL. Silicon Graphic Inc.

**Velocidad (de corriente).** Es la magnitud de la velocidad. El rango en la cual la corriente fluye, generalmente expresada en nudos o centímetros por segundo.

## RELACION DE CUADROS, GRAFICAS E ILUSTRACIONES

Figura 1. Localización del área de estudio.. .....	14
Figura 2. Tiempo total de proceso de ejecución en los niveles de optimización 0, 1, 2 y 3	32
Figura 3. Levantamiento topográfico de estanquería del CIB-NOR.. .....	33
Figura 4. Distribución de puntos de muestreo en el estanque.. .....	34
Figura 5. Relación de amplitudes de marea.. .....	35
Figura 6. Polar de la dirección e intensidad de viento en junio y julio de 1994.. .....	36
Figura 7. Temperatura promedio y análisis espectral de la temperatura.. .....	38
Figura 8. Registro de la velocidad y dirección de la corriente en los puntos 1(a), 2(b), 3(c) y 4(d).. .....	39
Figura 9. Registro y análisis espectral de la salinidad en el estanque.. .....	41
Figura 10. Registro y análisis espectral de la densidad en el estanque . . . . .	42
Figura 11. Ubicación de los puntos de muestreo del sistema de canales en El Mogote.....	46
Figura 12. Oscilación de la marea en el canal del acceso del tridente . . . . .	47
Figura 13. Diagrama de la circulación en el tridente .....	49
Figura 14. Diagrama de la intensidad y dirección de la corriente en el tridente 1(a), 2(b), 3(c) y 4(d).. .....	50
Figura 15. Registro y análisis espectral de la temperatura en el tridente.. .....	52
Figura 16. Registro y análisis espectral de la salinidad en el tridente .....	53
Figura 17. Registro y análisis espectral de la densidad en el tridente.. .....	54
Figura 18. Simulación de la oscilación de la marea en el estanque.. .....	55

Figura 19. Simulación de la oscilación de la marea en el tridente..... 57

Figura 20. Diagrama de la compuerta utilizada en el estanque de marea..... 60

Figura 21. Efecto de viento sobre el estanque..... 61

Tabla 1 de análisis de variancia de heterótrofas totales..... 45

Tabla II de análisis de variancia de vibrios totales..... 45

## RESUMEN

Se aplicó un modelo barotrópico a estanques de maricultivo, que fue optimizado para un sistema SGI Power Challenge enlazado a través de una estación de trabajo IBM RISC6000. El modelo fue modificado básicamente en su estructura I/O y se desarrolló en lenguaje Fortran 90, implementándole el cálculo a partir de datos medidos “in situ”. El modelo se basa en el principio de conservación de masa, utilizando el método matemático de diferencias finitas, cumpliendo con el criterio de Courant Friedrich Lewy. Se obtuvo la simulación de la circulación inducida por marea y por viento en ocho octavos de período de marea para dos áreas de estudio, un estanque de mareas y unos canales artificiales; los esquemas de la circulación representan el patrón hidrodinámico de ambas áreas. Se hicieron estudios físico-químicos y microbiológicos en el estanque de mareas, obteniendo una comparación muy concordante con las mediciones eulerianas y la simulación de la corriente de marea y por efecto de viento. Las áreas de acumulación de materia orgánica fue determinada por la presencia de microorganismos en agua y sedimento, los cuales seguían el patrón de circulación del estanque. El área de canales artificiales presentó semejanza entre las mediciones eulerianas y la simulación de la circulación. Los parámetros físicos mostraron oscilación diurna, las series de salinidad y densidad estuvieron en fase, en tanto que la temperatura estuvo en fase, pero con correlación negativa.

## ABSTRACT

We used the barotropic model to tidal pond and it was optimized by SGI Power Challenge equipment, it was connected althrough a WorkStation. The model was modifed the I/O structure and the whole program was implemented in Fortran 90. This model is based on the principle of conservation of momentum and it uses a finite-difference method. To get numerical stability, the model must satisfy the Courant Friedrich Lewy criterion. We simulated the tidal current and the wind driven current in 8 eighths of tidal period for two study areas: a tidal pond and an artificial set of channels (trident). The circulation schemes show the hydrodynamic pattern in both areas. We did research in physic-chemical variables and in microbiologics at the tidal pond. The organic matter acumulation was determined by presence of microorganisms in water and sediment, that show the circulation pattern in tidal pond. In the trident area the current pattern were similar with eulerian measurement and numerical simulation. The physical variables showed diurnal oscillation, the series of salinity and density were in phase, and temperature was in phase but had negative correlation.

## **CAPITULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

El crecimiento constante de la población humana exige aumentar la producción de los recursos alimenticios, si bien tradicionalmente el ser humano ha extraído su alimento de la tierra, lo cierto es que la tierra ha resultado en algunas instancias insuficiente o no idónea para la agricultura y ganadería, como es el caso de Baja California Sur. Esto ha provocado que la acuacultura ocupe un lugar relevante como alternativa en la producción de alimentos; si bien es cierto que ésta se ha desarrollado de manera desigual en el mundo, incluso en países que cuentan con gran avance tecnológico, ello se debe a aspectos económicos, culturales y geográficos, principalmente.

El principal objetivo de la acuacultura es la producción de alimentos a través del manejo adecuado del recurso y de la calidad del agua que se le suministra, para lograrlo es necesaria la investigación, aplicación y diversificación de nuevas y mejores técnicas, además de mantener las condiciones ecológicas propicias. En este caso en particular, la acuacultura se enfoca a especies marinas potencialmente cultivables.

Con una adecuada planeación y diseño del sistema de producción, estas actividades deben estar encaminadas a contribuir a la conservación y aprovechamiento óptimo de los recursos naturales.

El desarrollar un inadecuado diseño o construcción de estanquerías en áreas con gran potencial de producción como lo son las zonas costeras, provocará alteraciones en estas zonas, como menciona Varela (1988), existen ejemplos desafortunados donde el deterioro del

ecosistema ha sido por un manejo incorrecto del potencial del área o por la sobreestimación del mismo.

Por otro lado, el desarrollo de los maricultivos en México es relativamente reciente, por ello es oportuno abordar aspectos del manejo del sistema, que contribuyan a mejorar la eficiencia de los actuales sistemas de producción, así como sugerir su aplicación en términos que se asegure su adecuado funcionamiento.

Kuronuma (en Kato, 1975), indica que algunos puntos críticos en la acuicultura son el diseño y construcción, que desafortunadamente están más allá de la capacidad de atención de los especialistas en cultivos. Por ello señala que la aplicación conjunta de la ingeniería y biología, así como la instrumentación de técnicas económicamente rentables, pueden proporcionar mejores resultados de producción.

Cun (1982) advierte, por un lado, que cuando la orientación técnica no es debidamente canalizada, y por otro, la resistencia para aceptar el asesoramiento técnico-científico en el manejo del sistema, han dado lugar a problemas de diverso orden como son: inadecuada ubicación y orientación de la estanquería, bordos deficientes y desagüe insuficiente, fallas que han puesto en serias dificultades a la acuicultura como actividad y que la vuelven incosteable.

Las zonas protegidas y de alta productividad primaria son sitios idóneos donde preferentemente se localiza la industria de maricultivos en ciertas partes del mundo; en el caso de México, las zonas propicias para la acuicultura generalmente carecen de servicios de energía eléctrica, lo que las limita para que sean utilizadas con sistemas convencionales, por lo tanto conlleva a un aumento en los costos de la instalaciones de equipos de bombeo, que necesariamente requieren de un suministro de energía mecánica, generalmente motores diesel.

Una alternativa de solución es el aprovechamiento de las mareas para el recambio de agua de los estanques, con lo que se reducen y optimizan los costos de producción, haciendo en consecuencia más competitivo el producto en el mercado y más rentable el proceso.

En sistemas donde se utiliza el recambio de agua por mareas, las características hidrodinámicas son importantes para lograr condiciones favorables a los organismos en cultivo, de lo cual dependen de la calidad de agua y otros factores de manejo del sistema. La hidrodinámica estará en función de variables meteorológicas y de las condiciones del diseño del estanque donde se desarrollan los organismos.

En el diseño de los estanques se deben tomar en cuenta las variaciones físicas que determinan el comportamiento del agua, y que a su vez influyen sobre los organismos en cultivo. La utilización de modelos numéricos es necesaria para la predicción del comportamiento de las variables físicas y para la predicción del efecto de estas variables sobre la estanquería y sobre los organismos. Las ventajas principales de los modelos numéricos son su versatilidad, el poder simular varias alternativas antes de construirlas y la posibilidad de resolver problemas reales evitando costos innecesarios (Jiménez, 1983).

Soberón *et al* (1988), menciona que puede haber diferentes alternativas de manejo de la zona costera, pero cualquier opción debe sustentarse en fuertes bases ecológicas, ya que en la zona costera la diversidad, la distribución, la abundancia y la persistencia de los recursos pesqueros están en gran parte controlados por variables físicas. Las más evidentes son la temperatura, descarga pluvial y fluvial, las condiciones meteorológicas, el área de vegetación litoral, la superficie de laguna costera y estuarios, la variación del nivel del mar, el oleaje, el viento y la dinámica de las corrientes litrales. Entre tales variables físicas, la temperatura es una

de las más relevantes, pues regula la distribución, abundancia y actividad metabólica de los organismos. En peces, invertebrados y algas, la temperatura tiene un efecto importante, puesto que estos organismos no son capaces de regular su temperatura corporal, es decir mantienen la temperatura de su cuerpo igual a la del agua que los rodea (Levinton, 1982).

Los modelos matemáticos muestran ser una excelente herramienta para la investigación de procesos complejos. La versatilidad, facilidad de manejo y disponibilidad de supercomputadoras nos permiten contar con una mayor capacidad de memoria y con mayor velocidad de proceso en CPU; esto es necesario para el cálculo de los procesos que se complican cuando el espacio y tiempo se ven reducidos de forma considerable.

A través de este trabajo se pretende, que en un futuro, la aplicación de modelos hidrodinámicos en áreas pequeñas, como un estanque acuícola, pueda predecir antes de su construcción la distribución de corrientes que tendrá, de acuerdo a las condiciones que se establezcan. Los estudios que se hicieron paralelamente al hidrodinámico nos dan una base para complementar el modelo para obtener una visión más amplia de la complejidad de un sistema en estudio.

## **1.1 Antecedentes**

En nuestro país el desarrollo de la acuicultura marina ha sido muy lento en comparación con los países del Sur de Asia; aún cuando se tiene conocimiento que los orígenes de la acuicultura en México datan de la época precortesiana (Lechuga y González, 1985).

Lee (1993), menciona que no obstante la vasta historia de los estanques acuícolas por mareas en el sureste de Asia, aún continúan con el manejo tradicional, utilizando poca fertilización y escasa utilización de tecnología. En estos estanques se combina la explotación

tradicional con objetivos de conservación de la vida silvestre, donde hay conflictos provocados cuando el mismo estanque es manejado simultáneamente para la acuicultura y la conservación de la vida silvestre; asimismo, la tasa de 'sedimentación se incrementa como resultado del control del intercambio de agua.

En la acuicultura los diferentes tipos de manejo y estrategias de cultivo pueden ser divididas en tres categorías básicas: extensivo, semi-intensivo e intensivo. Aunque los límites entre estas estrategias son difíciles de distinguir, éstas se caracterizan por la diferencia de la densidad de siembra, recambio de agua, porcentaje de alimento y fertilización, manejo del estanque y cosecha; el aumento de costos, de administración y de producción se encuentran en consonancia con la complejidad del sistema (Chfford, 1985 y, Ranabal y Shang, 1976).

En ciertos estados del país se utiliza el sistema de cultivo extensivo en estanques rústicos donde el intercambio de agua depende del flujo y reflujo de la marea; este sistema ha sido poco estudiado y no ha tenido un correcto seguimiento del manejo del recurso, por lo que se han obtenido bajas producciones por hectárea con altas inversiones en relación a otros países que utilizan el mismo sistema. Desde el punto de vista técnico surgen problemas con los parámetros físico-químicos tales como flujo de agua y oxigenación, que resultan difíciles de manejar y afectan directamente al organismo en cultivo. De tal forma se presenta la necesidad de seguir experimentando con este sistema con el fin de eliminar los problemas antes mencionados y lograr así resultados más satisfactorios (Camacho *et al*, 1987).

El aprovechamiento de las mareas para la acuicultura en estanquería se realiza mediante la utilización de estanques mixtos, que son aquellos que combinan las características de los estanques excavados y los que retienen agua por medio de represas (Coll, 1986). Los estanques

rústicos se hacen aprovechando el mismo material de excavación para la formación de bordos, que servirán para contener el agua. Para las estanquerías de este tipo, es necesario conocer el terreno y el substrato sobre el cual se va a construir, ya que de sus características físicas dependerá la realización y buen funcionamiento de las instalaciones.

El notable desarrollo que se ha presentado en el cultivo de especies marinas y dulceacuícolas, motiva a orientar esfuerzos hacia el área del diseño y construcción de instalaciones acuícolas, así como el seguimiento del funcionamiento de los existentes, pretendiendo que reúnan los requisitos indispensables para alcanzar óptimos resultados y en su caso, sugerir medidas que propicien mejores condiciones. Las instalaciones adecuadas para el desarrollo de un diseño acuícola, son planteadas de acuerdo a un criterio de necesidad y de un mayor aprovechamiento de los recursos naturales, humanos y económicos con que se cuentan para ello (Peña y Cabrera, 1987).

Kato (1975), da una descripción de los fundamentos para el diseño (cálculo) y construcción de instalaciones acuícolas a lo largo de la línea de costa. Menciona que las características y naturaleza del suelo afectan la construcción y la estabilidad de los estanques, sobre todo cuando se trata de suelos arenosos o de arcilla fina, lo que provoca grietas y hundimientos de bordos. Asimismo señala que en el sistema de abastecimiento y drenado de agua se puede utilizar la energía por la mareas con uso ocasional de bombeo y menciona que para mantener las mejores condiciones de oxigenación es necesario un buen criterio de diseño del nivel de plantilla. Para ello se requiere la determinación de la profundidad óptima del estanque para asegurar una adecuada circulación.

Tang (1976), retorna estos conceptos, y por su parte presenta un trabajo donde describe algunos principios para una buena planeación, diseño y construcción de estanques, cuyo aporte de agua se da por el empuje de la marea, así como los criterios para la selección del sitio para la instalación de estanques de marea. Por otro lado, Mintardjo (1988), expone los factores a considerar en la selección del sitio para el desarrollo de una granja camaronícola.

López (1980), presenta un trabajo con algunas consideraciones en el diseño de estanques a marea libre, en éste se plantea la dimensión de la compuerta, el nivel de la plantilla y el área de la sección transversal de la compuerta.

Wilson et al (1990), menciona que Palmetto Aquaculture Corp., ha desarrollado un estanque de marea para el cultivo de camarón en Carolina del Sur (E.U.A.), que combina el manejo de aspectos económicos del sistema extensivo con tecnología y producciones del sistema semi-intensivo.

Troyo (1990), advierte que entre los principales gastos de mantenimiento se encuentra el equipo de bombeo, necesario para realizar el recambio de agua en los estanques, siendo una actividad frecuente para el mantenimiento de la calidad de agua dentro de los límites de tolerancia que se necesitan para el desarrollo de los organismos en cultivo. Por lo que una alternativa para la disminución y posible anulación de el costo de adquisición. operación y mantenimiento, es el aprovechamiento de mareas para realizar el recambio necesario de agua, resultando un menor costo de producción.

En este mismo contexto, Liong y Subramaniam (1990), mencionan que la calidad de agua es uno de los factores que afectan a la mayoría de los sistemas acuícolas, ya que de ésta dependen las condiciones óptimas para el desarrollo de los organismos en cultivo. Se ha encontrado que los

estanques costeros que dependen del flujo de marea para el recambio de las capas de agua del fondo, requieren de un incremento del flujo de la marea, lo cual no es posible en forma natural y es necesario abastecer el sistema a través de bombeo.

Agrawal *et al* (1989), realizan una simulación de una granja acuícola alimentada por marea en el cual suponen el flujo de agua sin obstáculos y el diseño de la compuerta principal y la secundarias; además describen cómo el flujo de agua se ve afectado cuando las proporciones del tamaño de la compuerta principal y las compuertas secundarias no son compatibles.

Hernández *et al* (1992), presenta resultados con base a un modelo de simulación desarrollado para el diseño de estanques con recambio por marea libre, en el cual analiza el efecto de las dimensiones básicas, en éste predice condiciones de operación futuras de un estanque, en la zona de Bahía Tortugas, B.C.S.

Por otro lado, los factores que se toman en cuenta para la descripción dinámica de un cuerpo de agua, son principalmente, la batimetría y las distribuciones espacio-temporales de las variables a modelar: nivel del agua, gasto, corrientes, vientos, temperatura y salinidad (Jiménez, 1983).

La predicción de los procesos que ocurren en un sistema océano-atmósfera es factible a partir de modelos matemáticos siguiendo una secuencia adecuada y lógica. Aún cuando estos modelos sean muy complejos e impliquen un gran número de datos, se pueden calcular las interacciones futuras apoyándose en sistemas computacionales rápidos.

Así, se considera que la aplicación de modelos numéricos hidrodinámicos apoyados en sistemas de cómputo y en estudios físicos sistemáticos de estuarios y lagunas costeras han

permitido y permitirán un aumento considerable en la investigación de estos sistemas físicos (Sandoval, 1983).

Los modelos numéricos se pueden utilizar para predecir o simular: las variaciones espacio-temporal variables hidrodinámicas, de temperatura, de salinidad, de concentración de oxígeno y de concentración de contaminantes. La complejidad de un modelo numérico depende de sus objetivos. El tratamiento de modelos de opciones múltiples, requieren de mucho tiempo de computación y más datos experimentales. Por otro lado, en ausencia de información aumenta las suposiciones con lo cual su capacidad de predicción o simulación se ve reducida, aunque su resolución pueda ser más precisa, motivando con esto último la implementación de técnicas numéricas más adecuadas, y de mayor eficiencia (Obeso y Jiménez, 1989 y Obeso et al, 1993 (b)).

Por otro lado las condiciones de cultivo estarán reguladas por la hidrodinámica del embalse, ya sea favoreciendo o afectando los aspectos abióticos y bióticos. Una forma de identificación de la calidad del agua es la evaluación de la biota del estanque. Para fines prácticos de este trabajo se utilizan a las bacterias como representante de la biota, debido a su tiempo de generación (Brock, 1978 y Stanier *et al*, 1976).

La FDA (Food and Drugs Administration), puntualiza como requerimiento en la evaluación de área de cultivo para la acuicultura, la determinación de indicadores bacteriológicos, específicamente coliformes totales y fecales para definir la calidad del agua en el área de cultivo; cabe señalar que si no se demuestra que se cubren ciertos requisitos mínimos, los organismos no son susceptibles a ser exportados (Anónimo, 1987).

## 1.2 OBJETIVO.

Aplicar un modelo numérico que permita conocer el comportamiento hidrodinámico de un cuerpo de agua de tamaño reducido que dependa del ascenso y descenso del nivel del mar.

### **1.2.1 Objetivos particulares.**

**1.2.1.1** Predecir el comportamiento hidrodinámico de un cuerpo de agua confinado artificialmente (estanque), con una comunicación permanente o intermitente con el mar sin aporte de agua dulce.

1.2.1.2 Identificar las interacciones de las variables: la marea, las corrientes, el viento y la temperatura, así como su efecto en las condiciones de cultivo y las modificaciones a sugerir en el diseño de estanquería.

1.2.1.3 Determinar el orden jerárquico del efecto de las variables en el sistema, las cuales deben ser tomadas en cuenta para el cultivo de organismos.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN.

La dinámica de las variables físicas entre las aguas protegidas y la plataforma continental genera cambios en la dirección e intensidad de los factores físicos y los constituyentes químicos, que dependen de las interacciones climatológicas. Estas variables producen alteraciones en el transporte de material y/o sedimento en las zonas aledañas al cuerpo de agua en estudio, así como el efecto del arrastre de viento, el cual dependerá de la persistencia del mismo. Aunado a esto las características físicas influyen sobre las condiciones de desarrollo de los organismos a cultivar. Por ello, resulta necesario implementar modelos hidrodinámicos-numéricos que nos permitan predecir el comportamiento hidrodinámico de un sistema con base a la marea, el viento y la orientación del sistema, intensidad y dirección de los vientos. Para comprender estos fenómenos, es necesario establecer análisis matemáticos y de computación para validar abstracciones o simplificaciones conceptuales del sistema, de manera que pueda efectuarse una predicción del ambiente y su influencia en la hidrodinámica en zonas someras que tienen un efecto en la biota que se desarrolla en ella.

#### 1.4 ÁREA DE ESTUDIO.

La Ensenada de La Paz es una laguna costera que se localiza al sur de la Bahía de La Paz en el Estado de Baja California Sur, en las coordenadas de 24° 06' hasta 24° 10.5' latitud Norte y 110° 18.5' a 110° 26.3' longitud Oeste (fig. 1). La laguna se encuentra separada de la bahía por una barrera arenosa denominada El Mogote de aproximadamente 12 km de largo en dirección este-oeste y 2.67 km en su parte más ancha (INEGI, 1983). El área del cuerpo de agua de la Ensenada es de 50.355 km<sup>2</sup> con respecto al NMM (González-Orduño *et al*, en prensa). La Ensenada de La Paz se comunica por un canal natural con la Bahía de La Paz, mismo que representa la vía de navegación al Puerto de La Paz y en éste se encuentra el Muelle Fiscal, donde el Instituto de Geofísica de la UNAM efectuó muestreos de la variación del nivel durante 20 años, para producir los pronósticos de marea para dicho puerto (Jiménez, 1996).

La Ensenada de La Paz, de acuerdo a su morfología, es una laguna costera que presenta características antiestuarinas, debido a un incremento en la salinidad hacia la cabecera de la misma. Presenta una red de canales rodeada de áreas someras de 10 y 20 cm de profundidad con respecto al NMM, lo que contribuye al aumento de la salinidad, además de la escasa precipitación pluvial y las altas tasas de evaporación y de radiación solar de la zona (Espinoza, 1979; Jiménez, 1983 y; Obeso *et al*, 1993b). En este mismo contexto Cervantes y Santoyo (1986), analizaron el metabolismo de la Ensenada de La Paz, donde las condiciones fueron sensiblemente hipersalinas con valores de hasta 37 y 41 ‰ en la parte denominada El Comitán, ratificando la clasificación del cuerpo de agua como un estuario negativo.

El patrón de corrientes residuales de la laguna, sin considerar el efecto del viento, muestra una circulación ciclónica en las dos terceras partes del sur de la laguna y una circulación anticiclónica en el tercio superior. Esto es a consecuencia de la configuración batimétrica, que le da la orientación al movimiento de las masas de agua (Jiménez, 1983).

La marea tiene un comportamiento predominantemente semidiurno, presenta un período de 12.42 hrs, siendo la constituyente principal de la marea la  $M_2$ .

Las principales constituyentes armónicas semidiurnas de la Ensenada de La Paz

son (SMN-UNAM, 1994):

<b>CONSTITUYENTE</b>	<b>FASE</b>	<b>AMPLITUD</b>
<b>semidiurnas</b>	<b>grados</b>	<b>metros</b>
M <sub>2</sub>	274.29	0.239
S <sub>2</sub>	271.59	0.179
N <sub>2</sub>	274.80	0.050
K <sub>2</sub>	267.85	0.059
<b>dirurnas</b>	<b>grados</b>	<b>metros</b>
K <sub>1</sub>	83.91	0.250
O <sub>1</sub>	81.08	0.171
P <sub>1</sub>	84.69	0.08 1

La onda de marea se propaga a una velocidad aproximada de 12 km/hr, presentando un desfase de 1.0667 hrs entre a la boca de la laguna (Muelle Fiscal) y la cabecera de la misma.

En la Ensenada de La Paz, la planicie costera presenta una pendiente muy suave y está constituida por sedimentos aluviales (Espinoza, 1979 y Cruz et al, 1989).

Los vientos dominantes en la zona son provenientes del Noroeste de noviembre a marzo, y se les llama localmente “collas”, en tanto que de abril a agosto, los vientos circulan con dirección oeste-sureste y son conocidos como “coromueles”. La precipitación media anual es de 180 mm y la evaporación anual es de 300 mm (Jiménez, 1983). La humedad relativa es del orden de 50% durante el día, ocasionando un clima semidesértico.

El estudio se llevó a cabo en dos cuerpos de agua: en el estanque de marea del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIB-NOR) que se encontraba en funcionamiento durante 1994-1995, localizado en El Comitán, B.C.S. (cabecera de la Ensenada de La Paz) y en el sistema de canales artificiales (tridente) de la Barrera arenosa El Mogote.

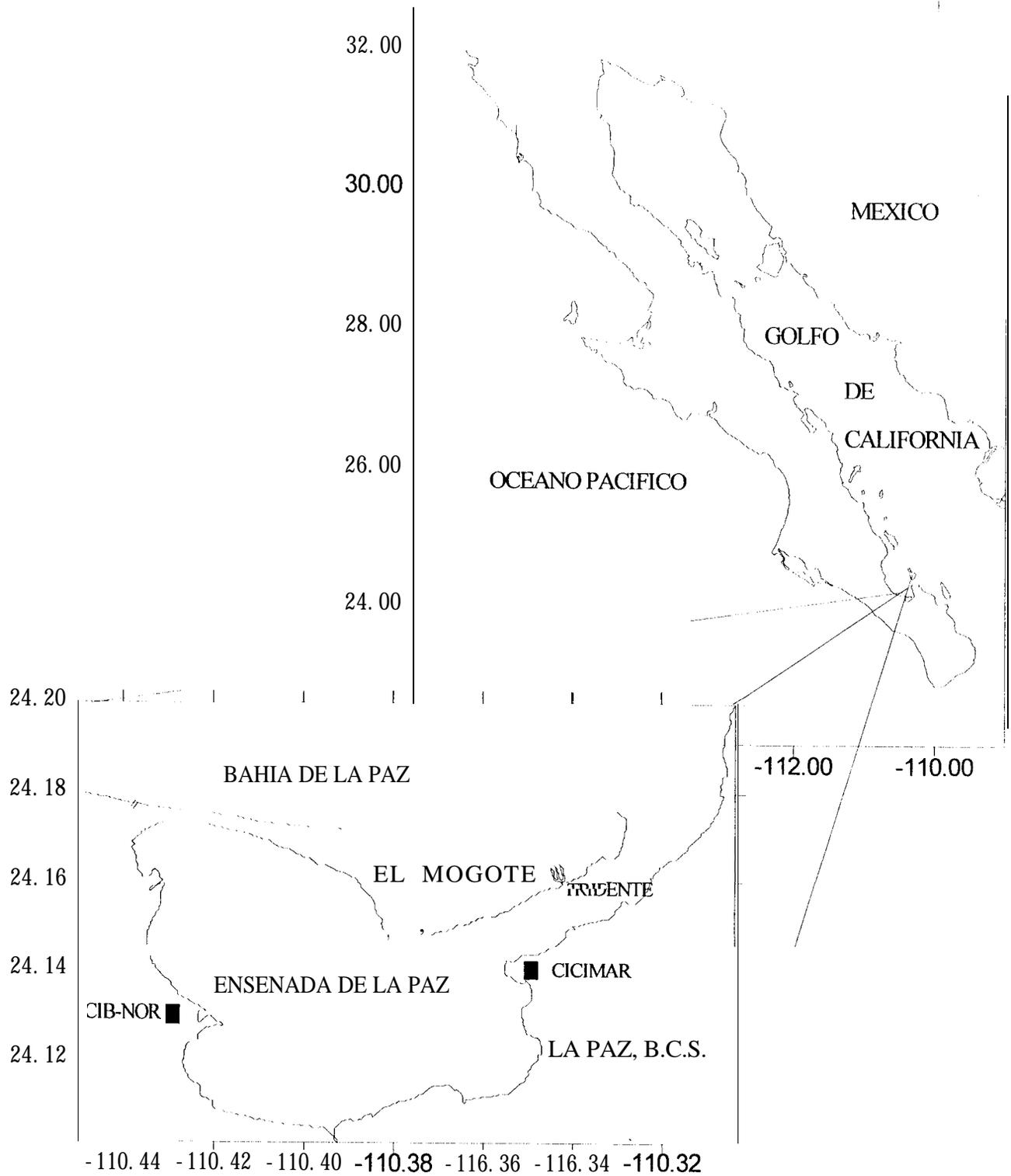


Fig. 1. Localización del área de estudio

## CAPITULO II MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Observaciones

Dado que no existen un gran número de modelos numéricos aplicados a la acuicultura y entre los existentes, los aplicados al área de hidrodinámica y manejo de estructuras acuícolas son mucho menos, la falta de información nos condujo a la aplicación de modelos numéricos elaborados para zonas costeras de gran tamaño en comparación a un estanque acuícola, de tal forma que el trabajo se basó en estudios hidrodinámicos aplicados a la Ensenada y Bahía de La Paz (Morales y Cabrera, 1983; Jiménez, 1983; Obeso *et al*, 1989; Obeso y Jiménez, 1992; Jiménez, 1996).

### 2.2 Levantamiento Topográfico y Batimétrico

Se realizó un levantamiento topográfico y batimétrico en cada uno de los estanques para fijar los puntos de muestreo y desarrollar la malla de discretización de el área de estudio. Se utilizó un nivel de precisión y un teodolito electrónico con precisión de 5 seg., corroborando la ubicación con un posicionador por satélite (GPS).

### 2.3 Medición de las Corrientes

Se llevaron a cabo mediciones Eulerianas en puntos de muestreo previamente definidos con base a la morfología de ambas áreas de estudio: se instalaron correntómetros digitales InterOcean S4 en dos ocasiones en ambas zonas de estudio. Estos instrumentos tienen una resolución de muestreo de medio segundo, registrando tiempo, magnitud y dirección de la corriente, además poseen sensores de conductividad, temperatura y presión; internamente el S4 calcula salinidad y densidad. El sensor de velocidad tiene un rango de 0-350 cm/s, con una resolución de 0.2 cm/s y una precisión de 2% de la lectura  $\pm 1$  cm/s. La dirección de la corriente tiene un rango de 360°, resolución de 0.5" y precisión de

$\pm 0.25''$ ; el sensor de presión tiene un rango de 0-70 m, con una resolución 4 mm. y una precisión de  $\pm 0.15\%$  de la escala completa, respectivamente; para el sensor de conductividad el rango es de 0-70 mohs/cm, una resolución de 0.1 mohs/cm y precisión de 0.2 mohs/cm y en el caso del sensor de temperatura el rango es de -5 a 45°C, con una resolución de 0.5°C y una precisión de  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ . Las variables que son calculadas por el propio instrumento tienen las siguientes especificaciones: salinidad con un rango de 2 a 42 psu, resolución de 0.01 psu y precisión de  $\pm 0.02$  psu y la densidad tiene un rango de 995 a 1075 kg./m<sup>3</sup>, con resolución de 0.01 kg/m<sup>3</sup> y precisión de 0.025 kg/m<sup>3</sup>.

Los instrumentos fueron programados por medio de una PC y una vez programados son autónomos, funcionando con baterías y con una capacidad de grabado continuo en memoria de 64 KB.

Cada aparato fue dispuesto en el fondo de cada punto seleccionado, utilizando un anclaje hecho con una base de plomo con un vástago que sostiene al instrumento.

#### **2.4 Mediciones de Marea**

Los registros de la variación del nivel del mar fueron obtenidos de dos maneras para cada área de estudio: 1) se tomó el registro del pronóstico de marea del muelle fiscal y se graficó con una hoja de cálculo; 2) las mediciones de marea y oleaje “in situ” fueron realizadas con un ológrafo-mareógrafo digital InterOcean; estos ológrafos direccionales tienen las mismas especificaciones que los S4 y también se utilizó un WTGS4 (sensor de presión). La programación de estos aparatos fue por medio de una PC, al igual que los S4, tienen un rango de 0-10 m, resolución de 4 mm y precisión  $\pm 0.15\%$  de la escala.

Se colocaron los instrumentos en la boca y en una zona intermedia de cada uno de los sistemas, como muestran las figuras 3 y 7.

## 2.5 Parámetros meteorológicos

La información meteorológica se obtuvo a partir de datos de registros de las estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional de Agua (CNA) y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Se tomaron datos de temperatura ambiental, humedad relativa e intensidad y dirección del viento, en intervalos de una hora y haciendo un promedio diario de los registros.

## 2.6 Análisis Bacteriológico

El análisis microbiológico se llevó a cabo únicamente en el estanque de mareas, durante un período de 5 semanas en los meses de junio y julio de 1994. Las muestras se tomaron semanalmente en cada uno de los puntos establecidos en el estanque. El análisis consistió en la cuenta del número más probable (NMP) de coliformes totales y fecales, cuenta viable de bacterias heterótrofas y vibrio (APHA, 1989), las muestras se tomaron en agua superficial y en sedimento.

## 2.7 Análisis Químico

El análisis químico, se hizo en el estanque de mareas; este análisis se llevó a cabo en agua superficial haciéndose las siguientes determinaciones de nutrientes por medio de un fotómetro SQ118-MERCK, que incluye: amonio (NH<sub>4</sub>), nitratos (NO<sub>3</sub>), nitritos (NO<sub>2</sub>) y fosfatos (PO<sub>4</sub>). La concentración de oxígeno se hizo con la técnica de Winckler (APHA *Op cit*). La temperatura se registró por medio de un termómetro de mercurio con rango de -35°C a 50°C; la salinidad se obtuvo con un refractómetro ATAGO S/MILL con un rango de 0 a 100 ‰; el pH se determinó por medio de un HACH ONE LABORATORY pH METER, el cual cuenta con el electrodo de pH con un rango de -1.99 a 19.99 unidades pH con una resolución de 0.01, y un sensor de temperatura con un rango de -5 a 105°C y una resolución de 0.1 °C.

## 2.8 Aplicación de un Modelo Hidrodinámico-Numérico

Se aplicó un modelo numérico programado en lenguaje FORTRAN 90 adecuado para su ejecución en una máquina de supercómputo con alta velocidad en el proceso de los cálculos. El método utilizado por el programa es la integración a partir de diferencias finitas. Una aportación al modelo desarrollado por Gaviño (1987) es la simulación de las componentes  $u, v$  de la corriente y  $z$  que es la variación de la superficie libre, a partir de datos registrados “in situ”, para lo cual fue necesario implementar un programa de interpolación para obtener a partir de la serie de datos de marea, otra serie con un intervalo de tiempo requerido por el modelo para cumplir con los criterios de la estabilidad del mismo. Este programa de interpolación fue desarrollado con base a la subrutina SPLINE de Forsythe *et al* (1977) y programado en lenguaje C, este programa fue desarrollado por Aguirre (1996). Ambos programas se ejecutaron en una supercomputadora Power Challenge XL, de la Universidad de Guadalajara, a través de la Red IPN, usando la Estación de trabajo IBM RISC6000 del CICIMAR, como unidad de enlace.

## 2.9 Procesamiento de Datos

Para el análisis de datos se utilizaron filtros pasa baja, que elimina la energía de altas frecuencias ( $\sigma_0 < \sigma_f$  hacia  $\sigma_0$ ) (Godin, 1972), y la transformada rápida de Fourier para el análisis espectral de las series de datos de: corriente, marea, temperatura y salinidad, obtenidos de los instrumentos digitales S4 y WGTS4. Se utilizó análisis de regresión, correlación, de varianza e interpolación.

Las componentes de la corriente de marea fueron graficadas por medio de un programa de graficación de vectores en lenguaje Power Basic, el cual da como resultado un formato HPGL (Hewlett Packard Graphics Language) ; este programa fue implementado por Monreal(1996).

## **CAPITULO III**

### **MODELO HIDRODINAMICO-NUMERICO**

#### **3.1 Principio de Conservación de Masa y Momentum**

Para la representación de los fluidos es necesario la aplicación de las leyes de conservación a las variables de estado de un fluido. La ley de conservación de masa establece que para una unidad de masa de un fluido que pasa a través de las fronteras del elemento en un cierto tiempo  $\Delta t$  la diferencia entre lo que entra por una cara del elemento y lo que sale por la cara opuesta, es igual a la cantidad que se incrementa en el nivel de la superficie libre en el mismo  $\Delta t$ .

El principio de conservación de masa es comúnmente explicado con la ecuación de continuidad para un fluido en estado de reposo o movimiento. Para el caso de un fluido incompresible idealizado, la densidad de la partícula es constante en el tiempo (Ippen, 1966).

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

Ecuación de Continuidad

#### **3.2 Fuerzas Actuantes**

##### **3.2.1 Fuerza de Coriolis**

Es una fuerza aparente que tiene su origen en la rotación de la Tierra, provocando un desvío con respecto a un sistema de referencia fijo a un punto de la superficie terrestre en los objetos móviles, (incluyendo aire y agua). Esta es mayor al aumentar la latitud, la componente horizontal se desvía 90° hacia la derecha (de la dirección del movimiento) en el hemisferio norte, en tanto que para el hemisferio sur la desviación es hacia la izquierda. Esta fuerza debe ser incluida en las ecuaciones hidrodinámicas debido a su importancia en el movimiento de las masas de agua

referidas a un sistema de coordenadas en tierra (Baum,1996).El parámetro de Coriolis se define como:

$$f=2\omega\text{sen}\phi, \quad (2)$$

esta fuerza se introduce a la ecuación de movimiento, aunque para cuerpos de agua pequeños (1 km), el valor de este término es prácticamente despreciable.

### 3.2.2 Fuerza de gravedad

Es la fuerza de atracción por unidad de masa hacia el centro de la Tierra, como resultado del campo gravitacional y la fuerza centrífuga, producto de la rotación de la Tierra. Esta última, ocasiona variaciones en el valor de la gravedad de acuerdo a la latitud. Sin embargo estos cambios producidos por la fuerza centrífuga son despreciables de tal forma que la gravedad es tomada como un valor constante:

$$g=9.81 \text{ m/seg}^2 \quad (3)$$

### 3.2.3 Fuerza de marea

La variación del nivel del mar se debe a la fuerza de atracción del sistema Sol-Tierra-Luna, teniendo un mayor efecto esta última sobre la Tierra, debido a la cercanía de sus centros de masa. Newton definió esta fuerza de atracción como la Ley de Gravitación Universal (von Arx, 1977).

$$F_M = \frac{3}{2} \frac{M_S}{M_T} \left[ \frac{r}{R_{TS}} \right]^3 g \text{sen}(2\theta_{TS}) + \frac{3}{2} \frac{M_L}{M_T} \left[ \frac{r}{R_{TL}} \right]^3 g \text{sen}(2\theta_{TL}) \quad (4)$$

donde:  $M_T, M_L$  y  $M_S$  son la masa de la Tierra, Luna y Sol respectivamente;  $R_{TS}$  y  $R_{TL}$  representan la distancia entre la Tierra-Sol y Tierra-Luna;  $r$  es el radio de la Tierra y  $\theta_{TL}, \theta_{TS}$  son los ángulos entre las líneas que unen el centro de la masa de la Tierra con el centro de masa de la Luna y Sol respectivamente.

### 3.3 Ecuaciones de Momentum

Tomando las consideraciones de las fuerzas anteriores y el principio de continuidad, las ecuaciones de momentum para cada vector fueron simplificadas y adaptadas para su solución numérica, en dirección x

$$\partial_t U + U \partial_x U + V \partial_y U + \frac{AH}{h(\Delta(hU))} + Z \Delta U - fU + g \partial_x Z + \left(\frac{R}{h}\right) U (U^2 + V^2)^{1/2} = 0 \quad (5)$$

en dirección y

$$\partial_t V + U \partial_x V + V \partial_y V + \frac{AH}{h(\Delta(hU))} + Z \Delta V + fV + g \partial_x Z + \left(\frac{R}{h}\right) V (U^2 + V^2)^{1/2} = 0 \quad (6)$$

donde: (x,y) coordenadas cartesianas,

U(x,y,t) componentes de la velocidad de la corriente integradas verticalmente en dirección

V(x,y,t) x,y respectivamente,

Z(x,y,t) variación del nivel del mar,

t tiempo,

f parámetro de Coriolis

$\Omega$  velocidad angular de la Tierra

g aceleración gravitacional de la Tierra

AH coeficiente horizontal de viscosidad

R coeficiente de fricción con el fondo

A operador de Laplace y

h profundidad

### 3.4 Modelo Barotrópico

Con base a los antecedentes que se tienen de estudios de modelos numéricos en la Ensenada y Bahía de La Paz (Morales, 1983; Jiménez, 1983; Obeso, 1989; Obeso y Jiménez 1992; Jiménez, 1996), se considera que la columna de agua está mezclada en su totalidad, por lo tanto, suponemos que la columna de agua tiene un movimiento sincrónico. Por lo anterior, las componentes de la corriente  $(u,v)$ , se integran verticalmente desde una profundidad media  $(-D)$ , hasta la superficie variable  $(\zeta)$ , donde:  $H = D + \zeta$ ;

$$U = \left[ \frac{1}{H} \right] \int_{-D}^{\zeta} u dz \quad (7)$$

El nivel del mar varía armónicamente en la frontera abierta:

$$Z(x, y, t) = A_i(x, y) \text{sen} \left[ \Omega_i t - a_i(x, y) \right], \quad (8)$$

donde:  $A_i(x,y)$  es la amplitud,  $\Omega_i$  es la velocidad angular de la constituyente y  $a_i(x,y)$  es la fase.

### 3.5 Método Numérico

El modelo utiliza el método de diferencias finitas. Este método se basa en la división de la cuenca en estudio en una matriz que representa la batimetría. El cálculo se lleva a cabo numéricamente con valores iniciales de velocidad o elevación de la superficie libre hasta que las oscilaciones de la marea lleguen a un equilibrio (Kjerfve, 1988).

Las aproximaciones de cada uno de los términos de la ecuación diferencial se reducen a un sistema algebraico mediante el método de diferencias finitas, donde  $\Delta x = \Delta y = \Delta L$ , debido a que la malla es uniforme. Las áreas de integración son dos, a) estanque de forma rectangular con un  $\Delta x = 0.6$  m y b) sistema de canales dragados en forma de tridente con un  $\Delta x = 5.0$  m; ambas zonas tienen intercambio de agua permanente con el cuerpo de agua adyacente. En las dos áreas se llevó a cabo un levantamiento topográfico, con el cual se construyó la malla numérica para cada zona.

Para el caso del estanque la malla de datos es de 100 x 42 puntos, en tanto que para el sistema de canales fue de 90 x 41 puntos

### 3.6 Discretización de los términos del modelo

#### 3.6.1 Parámetro de Coriolis

El parámetro de Coriolis depende de la latitud ( $\phi$ ) y de la velocidad angular de la rotación de la Tierra ( $\omega$ ), su expresión esta dada en la ecuación (2). En su forma discretizada es:

$$F^l_{i,j} = \left[ \frac{\pi}{6 * 3600} \text{sen}(\phi_0) \right] \Delta t$$

el parámetro es considerado constante en todos los puntos de la malla.

#### 3.6.2 Términos para la integración de la componente U de la ecuación de movimiento

Cálculo del término de forzamiento por el viento:

en la dirección x:

$$UW = w^2 (3.2 * 10^{-6}) \cos(\theta) \Delta t$$

Cálculo del promedio de las componentes V de la velocidad (UV), que rodean al punto de integración:

$$UV = u_{i,j} + v_{i,j} \cdot 2.5 (v^l_{i+1,j} + v^l_{i+1,j-1})$$

Cálculo de la altura de la columna de agua (HW), considerando la profundidad del elemento y la variación de la superficie libre:

$$HW^l_{i,j} = \left[ (H^l_{i,j} + \eta^l_{i,j}) + (H^l_{i+1,j} + \eta^l_{i+1,j}) \right] 0.5$$

Término advectivo (WC):

$$WC = \left[ u^l_{i,j} (u^l_{i+1,j} - u^l_{i-1,j}) + UV (u^l_{i,j+1} - u^l_{i,j-1}) \right] \Delta t$$

Término de gravedad (WG):

$$WG = \left[ -g \frac{\Delta T}{\Delta L} HW (\eta'_{i+1,j} - \eta'_{i,j}) + FT * UV \right]$$

Término de fricción turbulenta (WA):

$$WA = AHTL * (u'_{i+1,j} + u'_{i-1,j} + u'_{i,j+1} + u'_{i,j-1}) - 4 * (u'_{i,j})$$

Cálculo de la componente U a partir de los términos anteriores:

$$u'_{i,j} = \frac{(u'_{i,j} + WG + WC + WA + UW)}{\left(1 + R * AT * \sqrt{(u'_{i,j})^2 + (UV)^2}\right) * (HW)^2}$$

### 3.6.3 Términos para la integración de la componente V

Cálculo del forzamiento por viento en la dirección y:

$$VW = w^2 (3.2 * 10^{-6}) \cos(\theta) \Delta t$$

Cálculo del promedio de las componentes U de la velocidad (UV), que rodean al punto de integración.

$$UV = 0.25 (u'_{i,j} + u'_{i-1,j} + u'_{i-1,j+1} + u'_{i,j+1})$$

Cálculo de la altura de la columna de agua, considerando la profundidad del elemento y la variación de la superficie libre (HW):

$$HW'_{i,j} = \left[ (H'_{i,j} + \eta'_{i,j}) + (H'_{i,j+1} + \eta'_{i,j+1}) \right] (0.5)$$

Término advectivo (WC):

$$WC = \left[ UV * (v'_{i+1,j} - v'_{i-1,j}) + v'_{i,j} * (v'_{i,j+1} - v'_{i,j-1}) \right] \frac{\Delta T}{2 \Delta L * HW}$$

Término de gravedad (WG):

$$WG = \left[ -g \frac{\Delta T}{\Delta L} \right] HW (\eta'_{i,j+1} - \eta'_{i,j}) + FT * UV$$

Término de fricción turbulenta (WA):

$$WA = AHTL * (v'_{i+1,j} + v'_{i-1,j} + v'_{i,j+1} + v'_{i,j-1}) - 4 * (v'_{i,j})$$

Cálculo de la componente V a partir de los términos anteriores

$$v'^{i+1}_{i,j} = \frac{(v'_{i,j} + WG + WC + WA + UW)}{\left[ 1 + R * \Delta T * \sqrt{(v'_{i,j})^2 + (UV)^2} \right] * (HW)}$$

### 3.6.4 Discretización de la ecuación de continuidad

La discretización de la ecuación de la continuidad se describe como:

$$\eta'^{i+1}_{i,j} = \eta'_{i,j} - \frac{\Delta T}{\Delta L} \left[ (u'_{i,j} - u'_{i-1,j}) + (v'_{i,j} - v'_{i,j-1}) \right]$$

en el que se establece que la velocidad de cálculo  $\frac{\Delta x}{\Delta t}$  debe ser mayor que la máxima velocidad de propagación de una onda en aguas bajas:  $c = \sqrt{2gh_{\max}}$

### 3.9 Capacidad de Simulación del Modelo

El modelo tiene la capacidad de simular la variación del nivel del mar y las componentes  $u$  y  $v$  de la corriente de marea. Así como también las corrientes impulsadas por el viento; los datos de entrada son la intensidad y dirección del viento, para lo cual es necesario agregar el ángulo de referencia (AREF) de la malla del sistema con respecto al norte geográfico, aunque se recomienda orientar la malla de acuerdo a las coordenadas geográficas (N - S).

La marea puede ser simulada a partir de datos teóricos, como lo son el período (seg), amplitud (m) y fase (grados) de las principales constituyentes de la marea del área de estudio ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ), las cuales se tomaron del Servicio Mareográfico Nacional-UNAM (1994).

Para este caso, la solución numérica del intervalo de tiempo se determina con base al período de la componente  $O_1$  de la marea. La otra opción es a partir de datos de marea “in situ” de la marea y se introducen con un intervalo de tiempo dispuesto de tal manera que cumpla el criterio de Courant Friedrichs Lewy.

Los demás parámetros de entrada al modelo son las dimensiones de la matriz de datos, la batimetría, el incremento en espacio, el paso del tiempo, la profundidad máxima, el coeficiente de fricción, la intensidad y dirección del viento, y el ángulo de referencia de la malla.

El modelo tiene 4 salidas de datos en archivo, tres de ellas se utilizan para la escritura de puntos clave o puntos de control de  $z$ ,  $u$  y  $v$ , por separado, en un intervalo de tiempo definido previamente, y éstos se utilizan para observar el desarrollo de la propagación de la onda en los diferentes puntos seleccionados en la matriz y para comparar estos datos con los datos de corriente

medidos “in situ”. El cuarto archivo de salida de datos se utiliza para la escritura de la matriz de cada componente  $z$ ,  $u$  y  $v$ , para cada octavo de período ejecutado por el modelo.

# CAPITULO IV

## SUPERCOMPUTO

### 4.1 Introducción.

La computación ha llegado a ser el microscopio y el telescopio de la ciencia, ya que podemos obtener un resultado tan preciso y detallado como su complejidad lo permita, como es la predicción de las condiciones medioambientales, así como la hidrodinámica de un cuerpo costero de acuerdo a sus condiciones batimétricas, hidrológicas y viento.

La historia de la computación científica moderna inicia en 1940, durante la Segunda Guerra Mundial. La demanda de la guerra motivó los primeros desarrollos en la tecnología del cómputo, la cual se utilizó casi exclusivamente para cálculos numéricos, incluyendo la producción de tablas matemáticas, la solución de ecuaciones de movimiento de proyectiles, modelación de la fisión nuclear, etc.

La palabra “Supercomputadora” se introdujo a finales de los años 60’s cuando radicalmente aparecieron nuevas y poderosas computadoras. El rendimiento de las máquinas depende en gran medida de las características del problema a resolver y además del manejo del software que tiene un efecto significativo en el proceso. El resultado de la alta velocidad de supercomputadoras son por dos factores:

- elementos lógicos muy rápidos
- arquitectura en paralelo

Una arquitectura en paralelo permite que muchas partes de un cálculo sean hechas simultáneamente (Fosdick *et al*, 1996).

La estrategia básica de paralelizar es la partición de un arreglo de puntos dentro de pequeñas piezas, **manejando un** subgrupo para cada número de enlaces independientes. El número de enlaces creados en cualquier ejecución será determinada por el compilador en conjunción con el tiempo de ejecución del sistema. En cada proceso de enlace, la porción del arreglo utiliza el ciclo principal del DO de la rutina, como mecanismo de partición.

Los enlaces deben cooperar en la obtención de valores globales correspondientes a los valores locales que se han calculado. Un segundo ciclo se paraleliza para calcular los arreglos de puntajes escalados. En este punto, la región paralelizada termina su ejecución, así como la porción final del código ejecutado secuencialmente (Morse, 1994).

#### **4.2 Power Challenge XL.**

Para desarrollar procesos que requieren de una alta capacidad y velocidad en el cálculo de operaciones para procesos que aumentan en su complejidad, como es el caso de la aplicación de un modelo hidrodinámico-numérico donde el incremento en espacio y en tiempo se ven reducidos para satisfacer un criterio de estabilidad. Para solucionar el problema se utilizó una máquina Power Challenge XL SGI, de la Universidad de Guadalajara, la cual posee 8 procesadores superescalables Mips RS800 en paralelo, cada procesador contiene 4 Mb de cache de datos, con rendimiento de 300 Mflops cada uno y capacidad pico de 2.4 Gflops, con capacidad masiva de 5 12 MB expandible a 16 GB (UDG, 1996), esto redujo notablemente el tiempo de ejecución del proceso de cálculos del modelo de 2 1 días a 3 5 minutos, permitiendo hacer una mayor cantidad de pruebas y ajustes.

#### **4.3 Comandos utilizados durante el proceso de supercomputo.**

Para llevar acabo la compilación del programa fuente se utilizaron comandos para aumentar la velocidad del proceso del modelo, los comandos son los siguientes:

### ***-pfa (Parallel Fortran Automatic), -mp (Multiproceso).***

Respuesta automática de paralelización únicamente en Power Fortran 90, el cual puede mantener los archivos de trabajo.

### ***-O2 (Optimization level).***

Ejecuta una optimización extensiva. Las optimizaciones de este nivel son generalmente conservativas en el sentido que: 1) son siempre virtualmente beneficiosos, 2) mejoran la compilación del tiempo requerido para realizar los procesos y 3) evita cambios por efecto de errores, como el de punto flotante.

### ***-O3 (Optimization level).***

Lleva a cabo una optimización agresiva, la cual se distingue de los otros niveles por su grado de optimización, generalmente buscando una alta calidad generada por el código si este requiere de extenso tiempo de compilación. Este nivel puede incluir optimización beneficiosa, pero ocasionalmente puede dañar el rendimiento.

### ***-mips4.***

Es una instrucción de la arquitectura disponible en la tarjeta de la máquina. Este nivel es para máquinas MIPS RS8000 (ocho procesadores) y R1 0000 (diez procesadores).

### ***-o.***

Especifica el nombre del archivo ejecutable del archivo fuente.

## **4.4 Evaluación del proceso de supercomputo.**

Los programas Fortran 90 que utilizan múltiples CPUs al mismo tiempo cuando corren en un sistema multiprocesador Silicon Graphics, el Power Fortran analiza el programa, identifica los ciclos principales que pueden ejecutar en paralelo y se ajustan automáticamente para utilizar todo el CPU

disponible en el sistema en el mismo período de tiempo. Lo cual lo hace más rápido en paralelo que en forma serial.

La evaluación de los procesos fue realizada con dos comandos: *pixie* y *setenv NUM\_THREADS -setenv MP\_NUM\_THREADS*, los cuales nos permiten conocer el tiempo que realiza dependiendo de la cantidad de procesadores que utilice para llevar a cabo la ejecución del modelo. //

Para mayor confiabilidad se eligió **Pixie** que es una herramienta de compilación que puede ser utilizada para medir el código de frecuencia de ejecución del programa para el análisis del rendimiento de la máquina.

**Pixie** lee un programa ejecutable, dividiéndolo en bloques básicos y escribe un programa equivalente conteniendo un código adicional que cuente la ejecución de cada bloque básico.

Se realizó una comparación de la velocidad del proceso con los comandos de optimización donde se encontró que la mejor opción fue la utilización de comando de optimización -O2, el cual realizó un tiempo de **0.328** segundos en tiempo total (fig. 2).

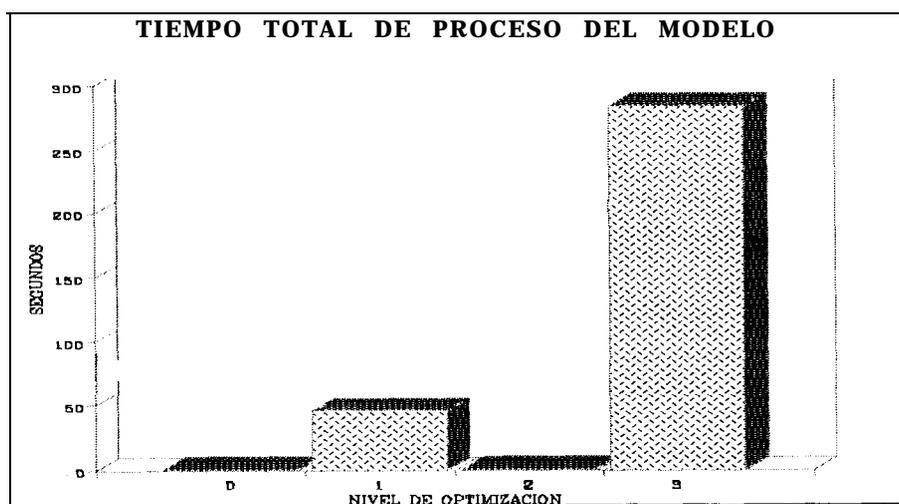


Fig. 2. Tiempo total de proceso de ejecución en los niveles de optimización 0, 1, 2 y 3.

## CAPITULO V

### RESULTADOS DE LAS MEDICIONES EN CAMPO

#### 5.1 Introducción

Las mediciones realizadas en ambas áreas de estudio (estanque y tridente) se basaron en el comportamiento hidrodinámico de la Ensenada de La Paz y los estudios que ha este respecto se han hecho, en el área.

#### 5.2 Estanque de Marea

El estanque que se utilizó para el estudio se encuentra en las instalaciones del CIB-NOR, el cual se localiza en El Comitán, en la cabecera de la Ensenada de la Paz (fig. 3); esta zona se caracteriza por ser somera, por tener fondo arenoso y es también notorio el asolvamiento de la misma

Se hizo un levantamiento topográfico para conocer la ubicación del nivel de la plantilla de acuerdo al NMM y la orientación del estanque.

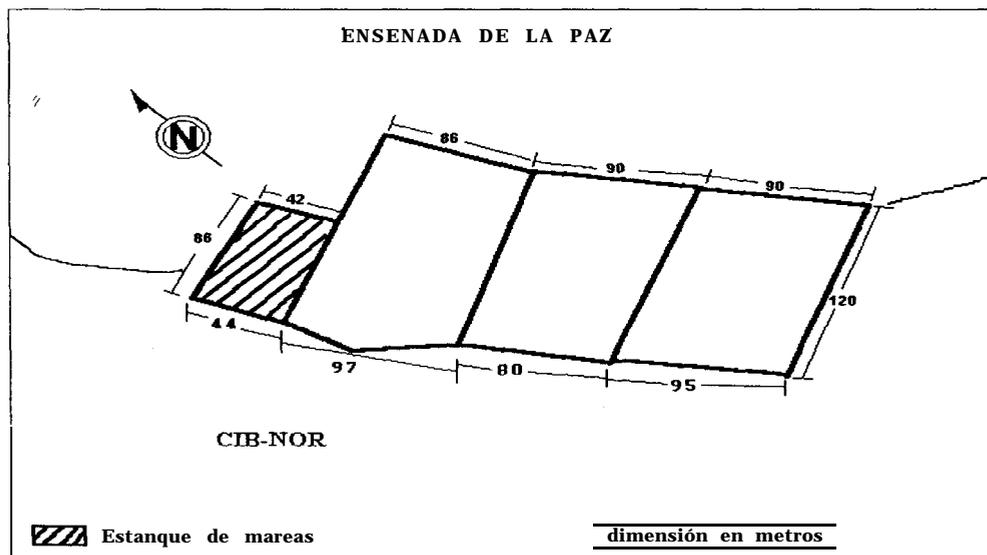


Fig. 3. Levantamiento topográfico de estanquería del CIB-NOR

El estanque es de tipo semirústico, con dimensiones de 86 m de largo por 42 m de ancho, con una profundidad promedio de 1 m. El nivel de la plantilla se ubica a -1.10 m del NMM con un talud 1:2. La estructura de entrada y salida de agua del estanque es a través de 4 tubos plásticos de 10 m de longitud y 8" de diámetro.

De acuerdo a la forma del estanque y tipo de compuerta, sin tomar en cuenta el efecto de viento, la entrada de agua al mismo es en forma de abanico, por lo tanto se determinó que los puntos fueran colocados en una mitad del estanque (a lo largo), suponiendo una distribución simétrica de las partículas (Fig. 4).

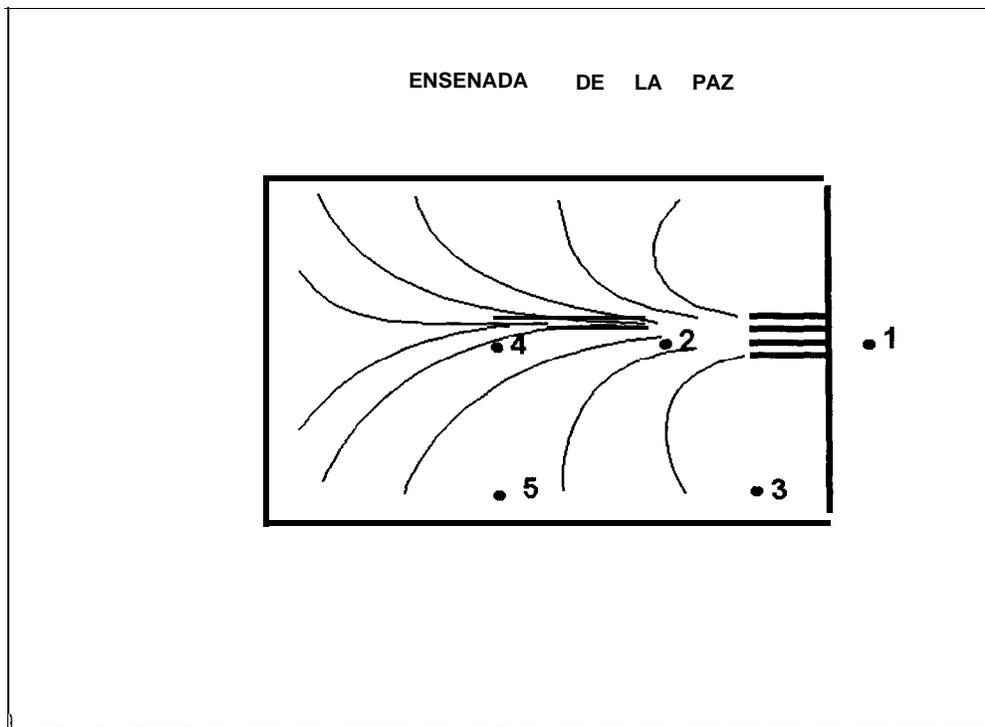


Fig. 4 Distribución de puntos de muestreo en el estanque.

Durante el período de estudio en el estanque se encontraban camarones así como peces en jaulas, a esto sumamos la entrada sin control de organismos silvestres (peces y crustáceos).

## 5.2.1 Parámetros Físicos-Químicos

### 5.2.1.1 Marea

La marea tiene comportamiento semidiurno, esto es, tiene un período de 12.42 hrs, siendo la componente principal la  $M_2$ . La onda de marea se propaga a una velocidad de 8.5 m/seg del muelle fiscal hacia la cabecera de la Ensenada, al llegar a este punto tiene un retraso de 1 hr con 4 min con una amplitud promedio de 0.5 m; se observa que durante la pleamar la onda de marea se amortigua, mientras que en bajamar la onda tiene un comportamiento similar a la del muelle fiscal, del cual se hizo referencia. Dentro del estanque la marea esta restringida por la dimensión y altura de la compuerta, teniendo un retraso y amortiguamiento adicional de 20 minutos y 0.3 m respectivamente; el estanque tiene un prisma de marea de  $722.4 \text{ m}^3$ . De acuerdo al volumen total y al prisma de marea, el tiempo de residencia del agua en el estanque es de 6 ciclos de marea, lo que corresponde aproximadamente a 3.1 días, suponiendo que toda el agua que sale es reemplazada por agua de La Ensenada de La Paz.

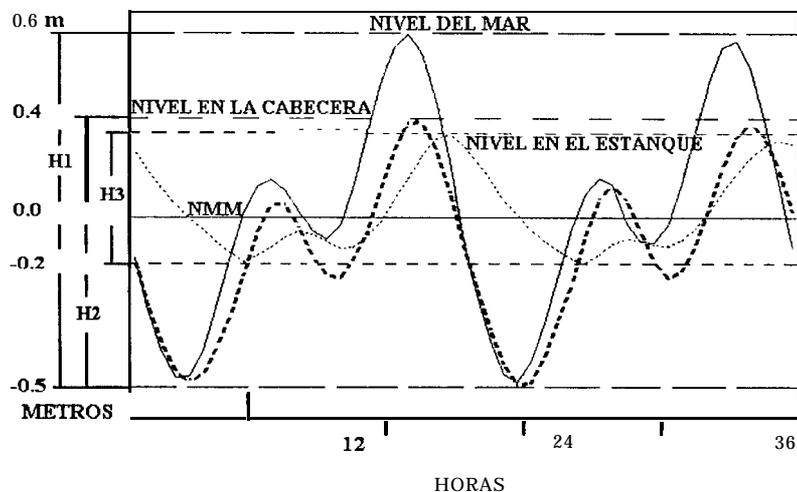


Fig. 5 Relaciones de amplitudes de marea

De acuerdo a la figura 5 donde H1 es amplitud de marea en el muelle fiscal, H2 es amplitud de la marea en la cabecera, H3 es amplitud de marea en el estanque; se determino el amortiguamiento con base a las formulas siguientes:

$$\Omega = \frac{(A * H3)}{2} \qquad a = \frac{H3}{H1}$$

Donde: A es área del estanque,  $a$  es el amortiguamiento de la onda y  $\Omega$  es el prisma de marea.

### 5.2.1.2 Oleaje

El oleaje presente dentro del estanque durante el período de muestreo fue menor a los 5 cm de amplitud.

### 5.2.1.3 Viento

El viento en los meses de muestreo fue predominantemente del sur con una velocidad promedio de 3.55 m/seg en junio y 3.32 m/seg en julio. En la Fig. 6 se muestran los diagramas polares de la dirección e intensidad del viento para cada mes de muestreo.

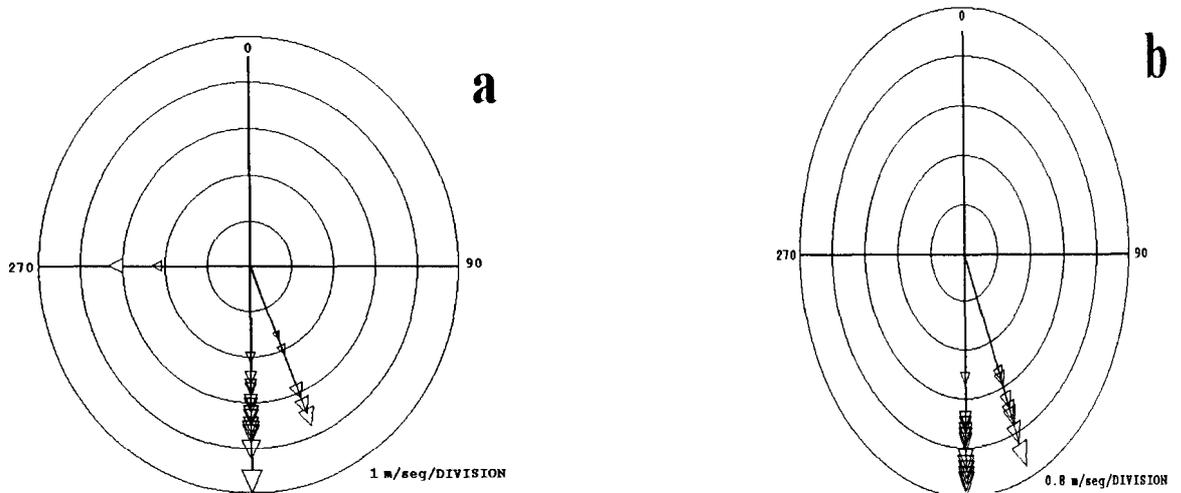


Fig. 6. Polar de la dirección e intensidad del viento en junio y julio de 1994

(las flechas indican de donde proviene el viento).

#### **5.2.1.4 Corrientes**

Los registros de la velocidad de la corriente fueron obtenidos apartir de los correntómetros S4 InterOcean, ubicados en cada punto de muestreo (fig. 4). En el punto 1 localizado a 5 m de la compuerta del estanque, la velocidad promedio fue de 11cm/seg, la dirección de la corriente se vió fuertemente influenciada por el viento que provenía del sur. El punto 2 ubicado a 3 m de la compuerta dentro del estanque, la velocidad promedio estuvo en 4.79 cm/seg con dirección promedio al sur-sureste (SSE); en el punto 3 la velocidad y dirección promedio registrada fue de 5.22 cm/seg al noroeste (NW); en el punto 4 se registró el promedio más bajo de velocidad, 1.81cm/seg y la dirección se distribuía en forma de abanico de 0 a 180°, respecto al norte, cabe mencionar que este punto se encontraba a 3 m de las jaulas de cultivo, ver fig 8. En el quinto punto no se obtuvieron registros, debido a problemas con el instrumento de medición.

#### **5.2.1.5 Temperatura**

Se obtuvieron registros continuos de la temperatura durante el período de muestreo; dentro del estanque la mínima registrada fue de 18.6°C y la máxima de 33.2°C, con una temperatura promedio de 27.3°C con 2.53 de desviación estándar; mientras que fuera del estanque el promedio de la temperatura fue de 26.9°C con una desviación estándar de 3.21 y con una máxima y mínima de 33.5°C y 17.8°C respectivamente. A la serie de datos se les aplicó un análisis espectral, obteniendo frecuencias catorcenales, diurnas y semidiurnas. Para la temperatura ambiental los registros fueron proporcionados por la SARH, los cuales tuvieron una máxima de 40.4°C y una mínima de 14.8°C, la temperatura promedio durante el muestreo fue de 28.4°C con una desviación estándar de 6.24, las frecuencias fueron: mensual, diurna y semidiurna (fig. 7).

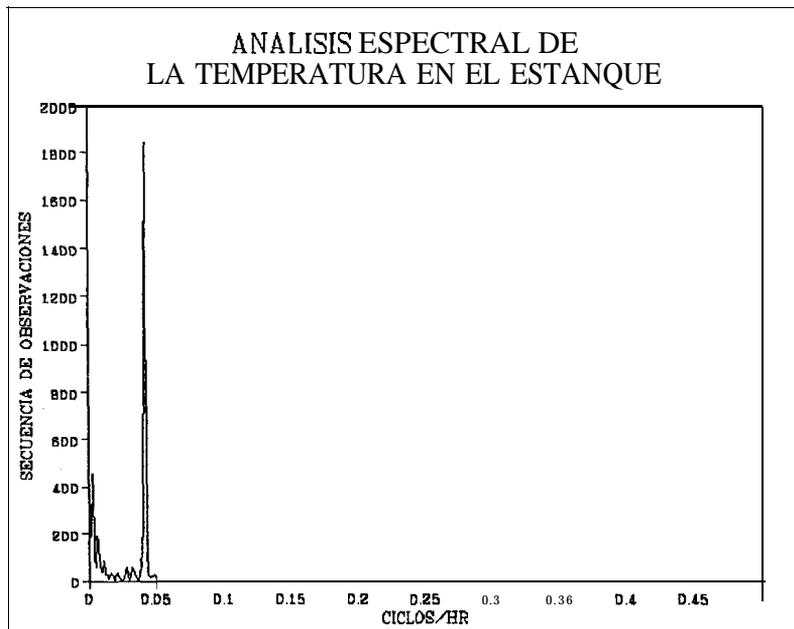
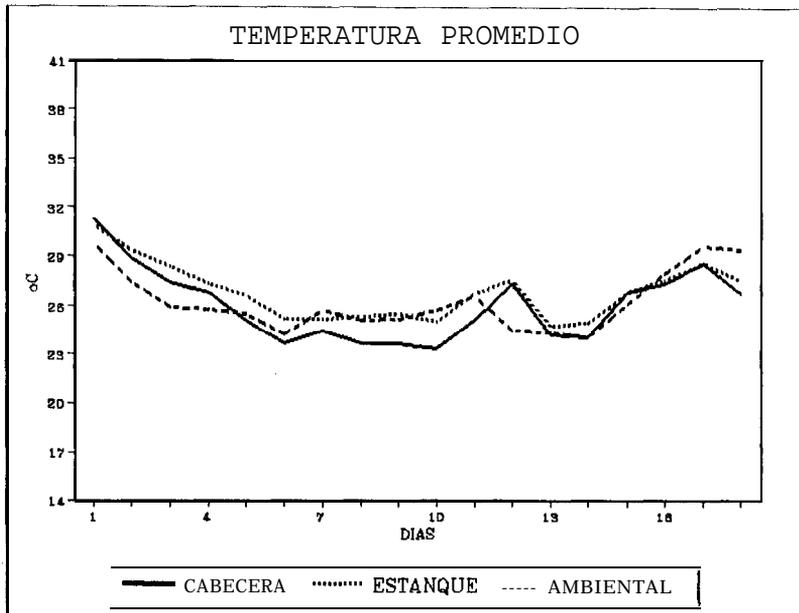


Fig. 7. Temperatura promedio y análisis espectral de la temperatura.

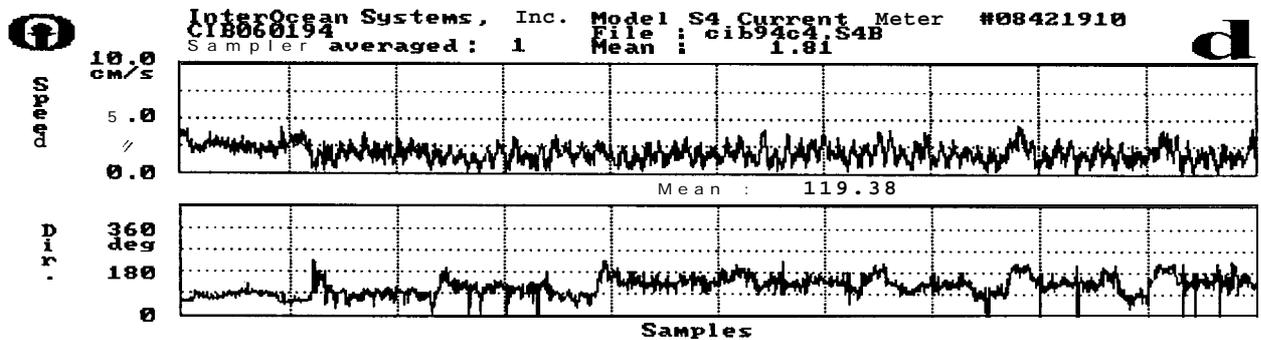
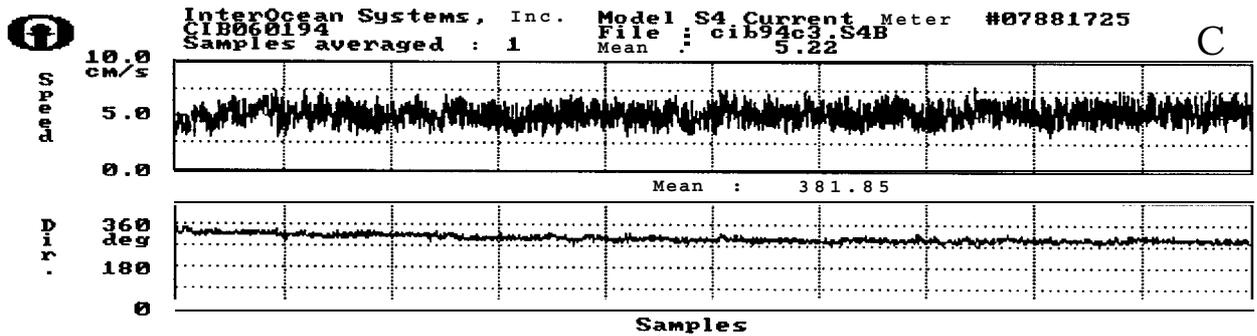
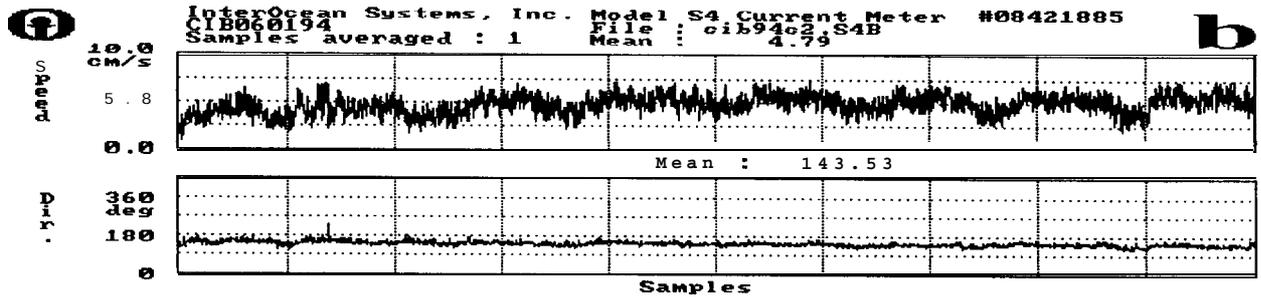
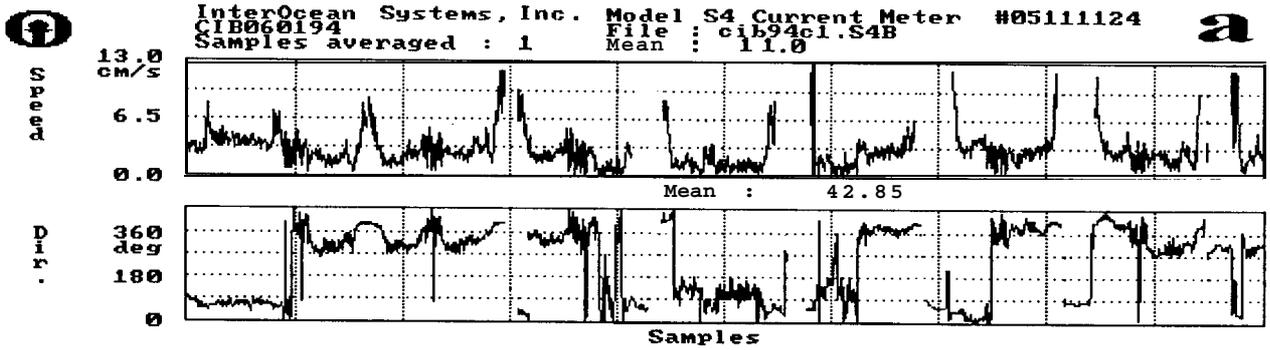


Fig. 8. Registro de velocidad y dirección de la corriente en los puntos 1 (a), 2(b), 3(c) y 4(d).

### 5.2.1.6 Salinidad

Se observó que la salinidad tiene un comportamiento semidiurno influenciado por efecto de marea. En el punto 1 el valor promedio fue de **38.3** ‰, con una máxima de **38.9** ‰ y mínima de **37.6** ‰, su desviación estándar fue de **0.31**, en el análisis espectral se obtuvo frecuencias semanales, diurnas, semidiurnas, tridurnas y tetradurnas; mientras que dentro del estanque los valores fueron mayores, la salinidad promedio fue de 40.2 ‰, en tanto que el valor máximo se registró en 41.5 ‰ y el mínimo en 39.3 ‰, con desviación estándar de 0.55, presentando frecuencias de 3 días, diurnas, semidiurnas, tridurnas y tetradurnas (fig. 9).

### X2.1.7 Sigma t

Se obtuvieron valores de la densidad menores fuera del estanque que dentro del mismo. En el punto 1 la sigma t, promedio fue 25.4, la máxima de 27.9 y la mínima de 23.6, con una desviación estándar de 1.1, con oscilaciones semanales, de 2 días, diurnas, semidiurnas y tridurnas; dentro del estanque el promedio de la sigma t fue de 26 con una máxima de 27.1 y mínima de 25.1, presentó una desviación estándar de 0.65, las frecuencias fueron: de 3 días, diurnas, semidiurnas y tridurnas (fig 10).

### 5.2.1.8 Oxígeno disuelto

Se observa que la concentración oxígeno disuelto aumenta de bajamar a pleamar; en el punto 1 el valor promedio en bajamar fue de 4.5 mg/l y de 6.1 mg/l siendo el 67 y 92 % de saturación respectivamente. Para el caso dentro del estanque el valor promedio en bajamar fue de 3.9 mg/l mientras que en pleamar fue de 6.2 mg/l, teniendo 60 y 96 % de saturación para cada uno.

### 5.2.1.9 pH.

Los datos de pH registrados, mostraron que para el punto 1 para bajamar y pleamar tenían un intervalo de 8.06 a 8.27, mientras que dentro del estanque los datos fluctuaron de 8.25 a 8.38.

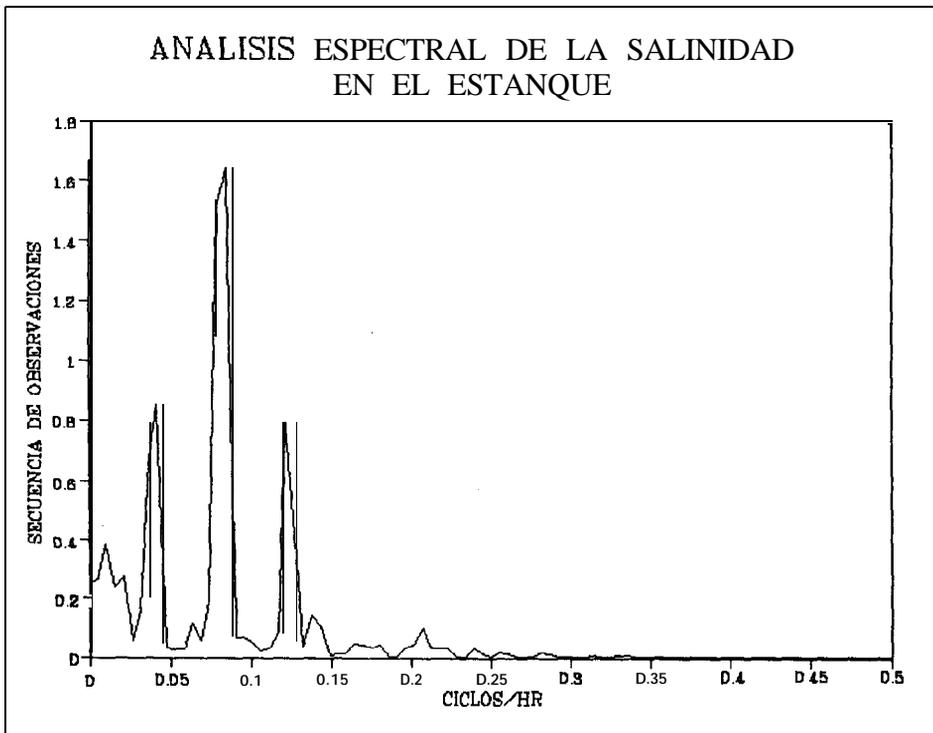
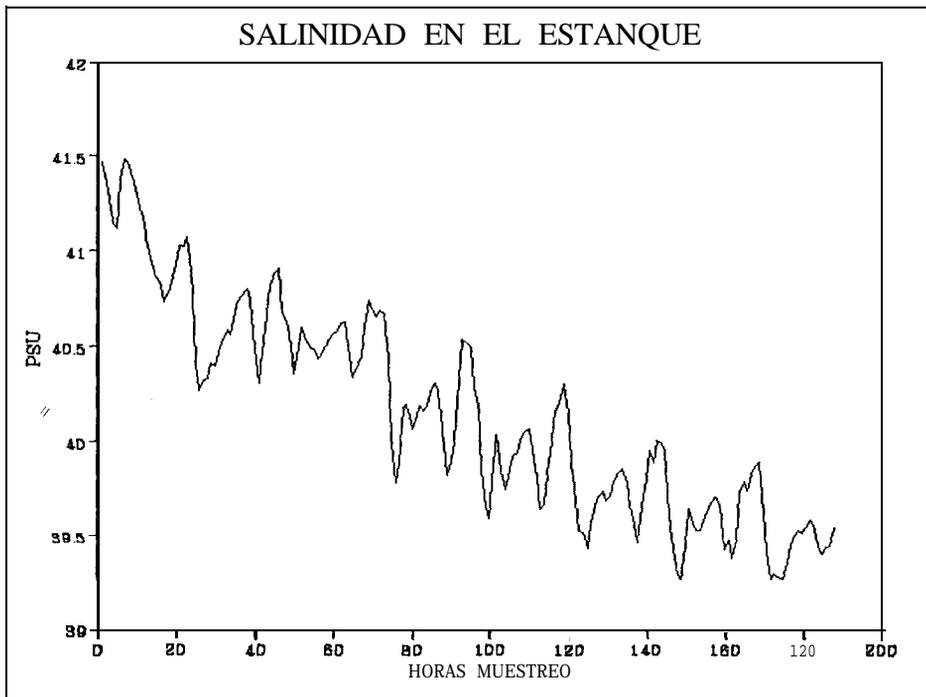
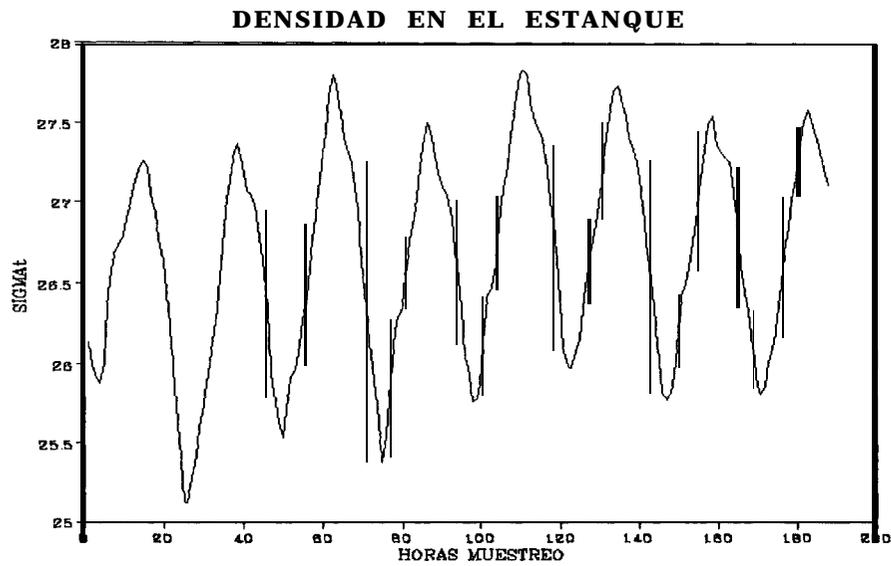


Fig. 9. Registro y análisis espectral de la salinidad en el estanque.



### ANALISIS ESPECTRAL DE LA DENSIDAD EN EL ESTANQUE

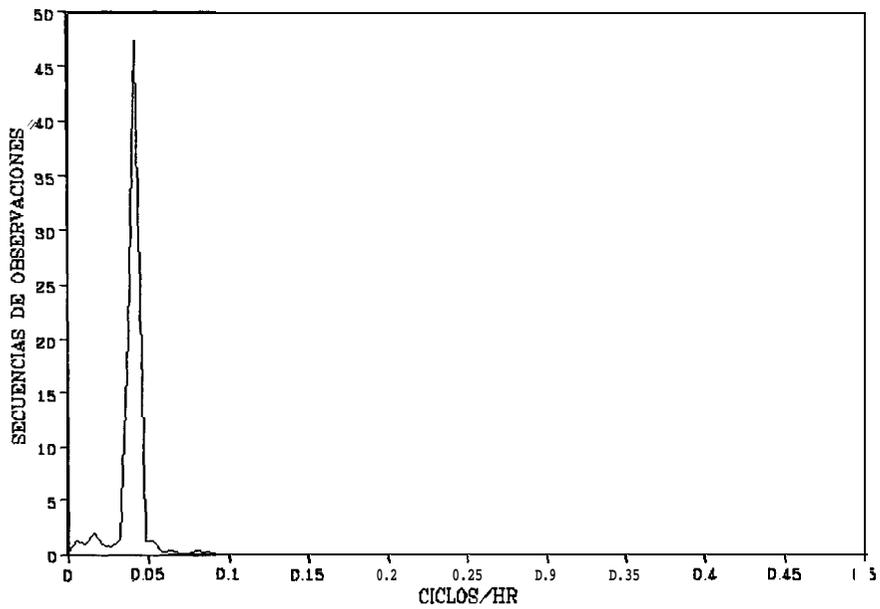


Fig. 10. Registro y análisis espectral de la densidad en el estanque.

## **5.2.2 Nutrientes**

### **5.2.2.1 Amonio**

Los valores obtenidos fueron pequeños con un promedio de **0.052 mg/l** en bajamar y de 0.012 mg/l en pleamar fuera del estanque, para el caso de los valores del estanque fueron de 0.096 mg/l en bajamar y 0.016 mg/l en pleamar.

### **5.2.2.2 Nitratos**

En los datos de nitratos se observó que durante el período de muestreo en el punto externo del estanque, la concentración promedio disminuía de 5 mg/l en bajamar a 1.2 mg/l en pleamar, mientras que dentro del embalse ocurría lo contrario, peor en concentraciones menores, 0.8 mg/l en bajamar y 1.72 mg/l en pleamar.

### **5.2.2.3 Nitritos**

Los nitritos tuvieron un comportamiento similar a los nitratos, aunque con valores pequeños. En el punto 1 el promedio en bajamar fue de 0.036 mg/l y 0.024 mg/l en pleamar. Dentro del estanque el promedio fue 0.01 mg/l en bajamar, mientras que el promedio en pleamar era de 0.014 mg/l.

### **5.2.2.4 Fosfatos**

Los fosfatos se comportaron de forma semejante que el amonio, ya que las mayores concentraciones fueron durante la bajamar. Para el punto fuera del estanque los valores promedio fueron 0,086 mg/l en bajamar y 0.022 mg/l en pleamar; dentro del estanque el promedio durante la bajamar fue de 0.042 mg/l, mientras que el valor promedio fue de 0.022 mg/l.

## **5.2.3 Análisis Bacteriológico**

El análisis del NMP para coliformes totales y fecales, solo se realizó en dos ocasiones, ya que en la prueba confirmativa para coliformes fecales los resultados fueron negativos, descartando así la

presencia de este grupo de bacterias en agua y sedimento; contando con antecedentes de estudios bacteriológicos realizados en la Ensenada de La Paz, González-Acosta *et al* (1995), encuentran que el área de El Comitán es una de las zonas con baja densidad de estos microorganismos, así como Trejo y Mayoral (1984). En el caso de las bacterias heterótrofas y vibrios, se encontró que no tienen un patrón de distribución definido, pero en general se presenta mayor concentración en sedimento, para bacterias heterótrofas las concentraciones más altas se observan en el punto 3, que se ubica en la esquina este del estanque, mientras que la mayor concentración de vibrios se localizó en el punto 4 (ver fig. 4).

Se observó que en bajamar los puntos 1 y 2 presentaron las más altas correlaciones para heterótrofas con los parámetros: temperatura, pH, salinidad, amonio, nitritos y fosfatos, en tanto que para vibrio solo se obtuvieron en el punto 1, con los mismos parámetros. En pleamar las correlaciones más altas se localizaron en los puntos 3 (pH, oxígeno, amonio, nitratos y fosfatos) y 2 (pH, salinidad y nitritos), para heterótrofas y vibrio respectivamente. Se encontró que no existe correlación entre la presencia de bacterias heterótrofas y vibrio con los parámetros físico-químico por muestreo. En la relación bacteriana heterótrofas-vibrio se observó que en bajamar los puntos 1, 2, 3 y 4 presentaban una correlación mayor a 0.6, en tanto que en pleamar para los puntos 1, 2, 3 y 5 esta relación presentó una correlación menor 0.1.

Se utilizó el análisis de **varianza** de tres vías sin replica, usando como fuentes de variación: marea-tiempo, marea-estación y estación-tiempo; para bacterias heterótrofas en agua superficial, se observó que para las tres fuentes de variación el resultado fue altamente significativo al 95 % de confianza, mientras que en sedimento solo fue altamente significativo en la **fuentes** marea-tiempo, con el mismo porcentaje de confianza. Para el caso de vibrio no hubo significancia alguna en agua superficial y sedimento.

**TABLA I DE ANALISIS DE VARIANCA**

**DE HETEROTROFAS TOTALES**

**FUENTE DE VARIACION F CALCULADA F 0.05**

**AGUA SUPERFICIAL**

MAREA - ESTACION	76.43 **	5.91
MAREA - TIEMPO	103.83 **	8.74
ESTACION - TIEMPO	26.014 **	2.69

**SEDIMENTO**

MAREA - ESTACION	1.702	5.91
MAREA - TIEMPO	23.87 **	8.74
ESTACION - TIEMPO	0.16	2.69

**TABLA II DE ANALISIS DE VARIANZA DE VIBRIOS TOTALES**

**FUENTE DE VARIACION F CALCULADA F 0.05**

**AGUA SUPERFICIAL**

MAREA - ESTACION	0.2944	5.91
MAREA - TIEMPO	0.5318	8.74
ESTACION - TIEMPO	1.4459	2.69

**SEDIMENTO**

MAREA - ESTACION	0.6886	5.91
MAREA - TIEMPO	0.6077	8.74
ESTACION - TIEMPO	1.6520	2.69

### 5.3 Canales Artificiales (Tridente)

La segunda área de estudio fue un sistema de canales artificiales, su morfología semeja un tridente, se ubica en la barrera arenosa El Mogote. La construcción de los canales en principio tenía un fin turístico, pero se utilizaron por SEPESCA y la Sociedad Cooperativa Acuacultores de la Península para un encierro de camarones durante 1988, utilizando una densidad de 8 org/m<sup>2</sup>.

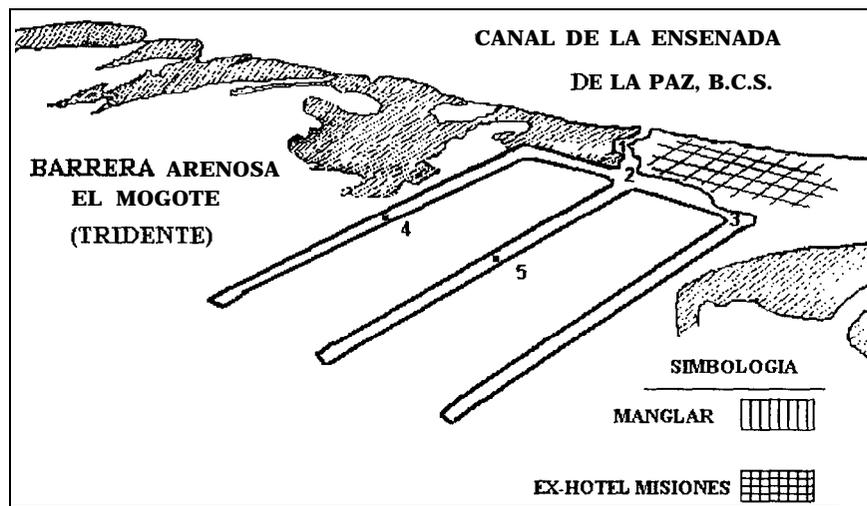


Fig.11. Ubicación de los puntos de muestreo del sistema de canales en El Mogote.

En la figura 11, muestra la ubicación de los puntos de muestreo, donde se colocó un corrientómetro por punto. Se hicieron dos períodos de muestreo de 7 días cada uno (julio 27 a agosto 4 y 12 a 19 de septiembre de 1994). En el punto 1 se utilizó otro corrientómetro que registró datos de intensidad y dirección de la corriente, así como variación del nivel del mar; en el punto 2 se colocó además del corrientómetro un ológrago-mareaógrafo; en el punto 5 no se obtuvieron datos durante el segundo muestreo.

### 5.3.1 Parámetros Físicos

#### 5.3.1.1 Marea

En el primer muestreo la marea presentó una oscilación semidiurna mixta en un período de mareas muertas, en tanto que en el segundo muestreo la oscilación fue diurna durante un período de mareas vivas. La onda de marea presenta un ligero retraso de 10 min en el punto 4, aunque con un pequeño aumento en amplitud (5 cm), esto con respecto al pronóstico del Muelle Fiscal. En el punto 1 y 3 la onda de marea no muestra retraso en relación a los datos del pronóstico del Muelle Fiscal, mientras que el punto 3 presenta aumento en amplitud con igual magnitud que el punto 4.

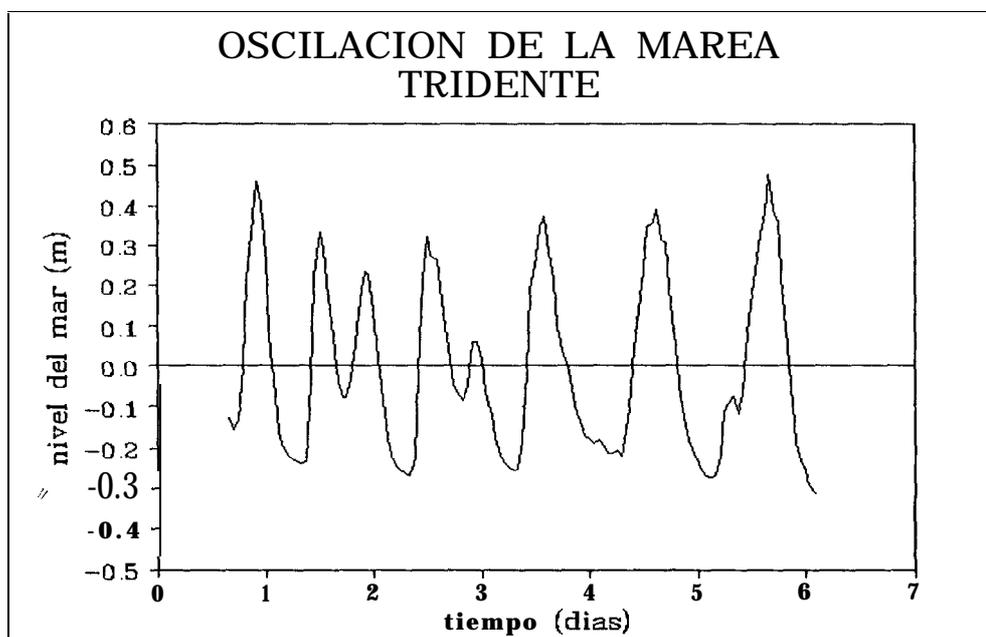


Fig. 12. Oscilación de la marea en el canal de acceso del tridente.

### **5.3.1.2 Oleaje**

El oleaje generado dentro de los canales por efecto de viento fue pequeño; en el primer muestreo la amplitud promedio registrada fue de 1 cm, en tanto que en el segundo muestreo el promedio fue de 2 cm.

### **5.3.1.3 Viento**

El viento durante el período de muestreo fue predominante del sur, con una magnitud máxima de 5 m/seg y una magnitud promedio de 3.43 m/seg, como se puede ver en las graficas de la polar en la figura 6.

### **5.3.1.4 Corrientes**

Los datos de la intensidad y dirección de la corriente fueron registros continuos cada uno de los puntos de muestreo (fig. 11). En el análisis espectral la intensidad y dirección de la corriente mostraron un patron de frecuencia diurno, semidiurno y tridiurno. El punto 1 se ubica en la boca del sistema de canales; durante el primer muestreo presentó una velocidad promedio de 5.79 cm/seg. Las máximas velocidades se registraron en el reflujó alcanzando 40 cm/seg mientras que durante el flujo las velocidades máximas fueron de 20 cm/seg (fig. 14). En el segundo muestreo el promedio de la velocidad fue 9.59 cm/seg con 42 cm/seg como velocidad máxima alcanzada.

En el punto 2 la velocidad en el primer muestreo tuvo en promedio 3.51 cm/seg, con intensidad máxima de 6 cm/seg, la dirección promedio fue de 200°. La velocidad promedio registrada en el segundo muestreo fue 4.09 cm/seg con una dirección de 336.64°, presentando 7 cm/seg como velocidad máxima.

En el 3er. punto se registró la velocidad y dirección promedio de 7.34 cm/seg y 99° respectivamente, con 14 cm/seg de velocidad máxima, mientras que en el segundo muestreo la velocidad y dirección promedio fueron de 10.52 cm/seg y 162.13°.

El punto 4 estuvo más alejado de la boca del sistema, por lo tanto se registraron las velocidades más bajas de la corriente con un promedio de 1.27 cm/seg con dirección de 261.56°, con velocidades máximas de 5 cm/seg; en tanto que en el segundo muestreo la velocidad promedio fue de 2.56 cm/seg con 168.78° de dirección, registrando 7 cm/seg como velocidad máxima.

En el quinto y último punto, la velocidad y dirección promedio de la corriente fue 4.17 cm/seg y 169°.

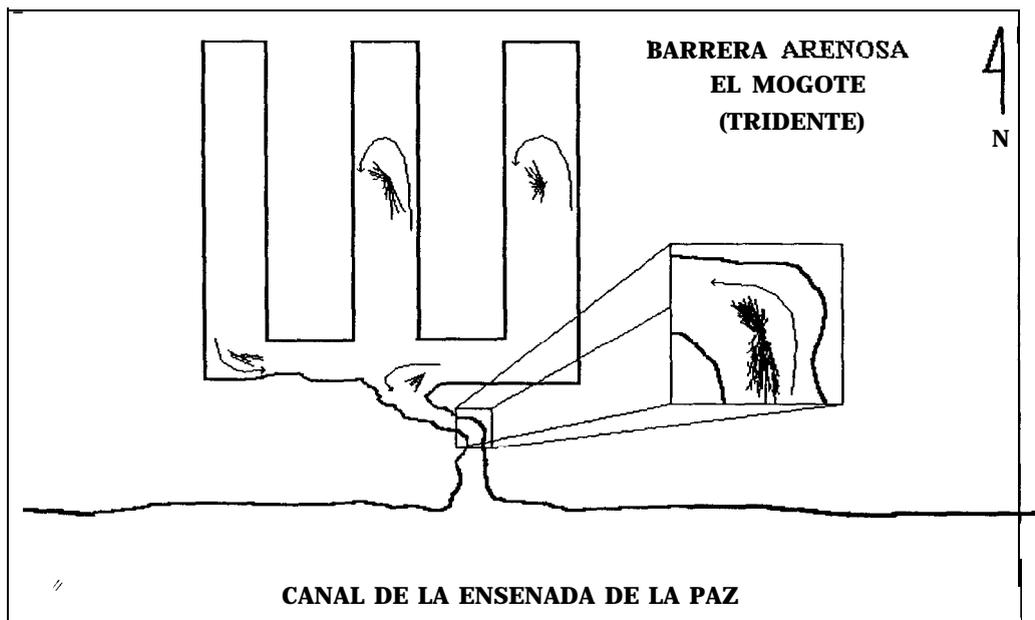


Fig. 13. Diagrama de la circulación en el tridente.

### 5.3.1.5 Temperatura

Se observó que las variaciones de la temperatura en el sistema fueron diurnas (fig. 15). Durante ambos muestreos la desviación estándar de la serie de datos fue de 1.785.

En el punto 2 se obtuvo un valor promedio de la temperatura de 28.12° C, con un máximo de 30°C y 26°C como valor mínimo. Durante el segundo muestreo la temperatura promedio fue 30.26°C, la temperatura máxima y mínima registrada fue 30.8 y 29.6°C respectivamente.

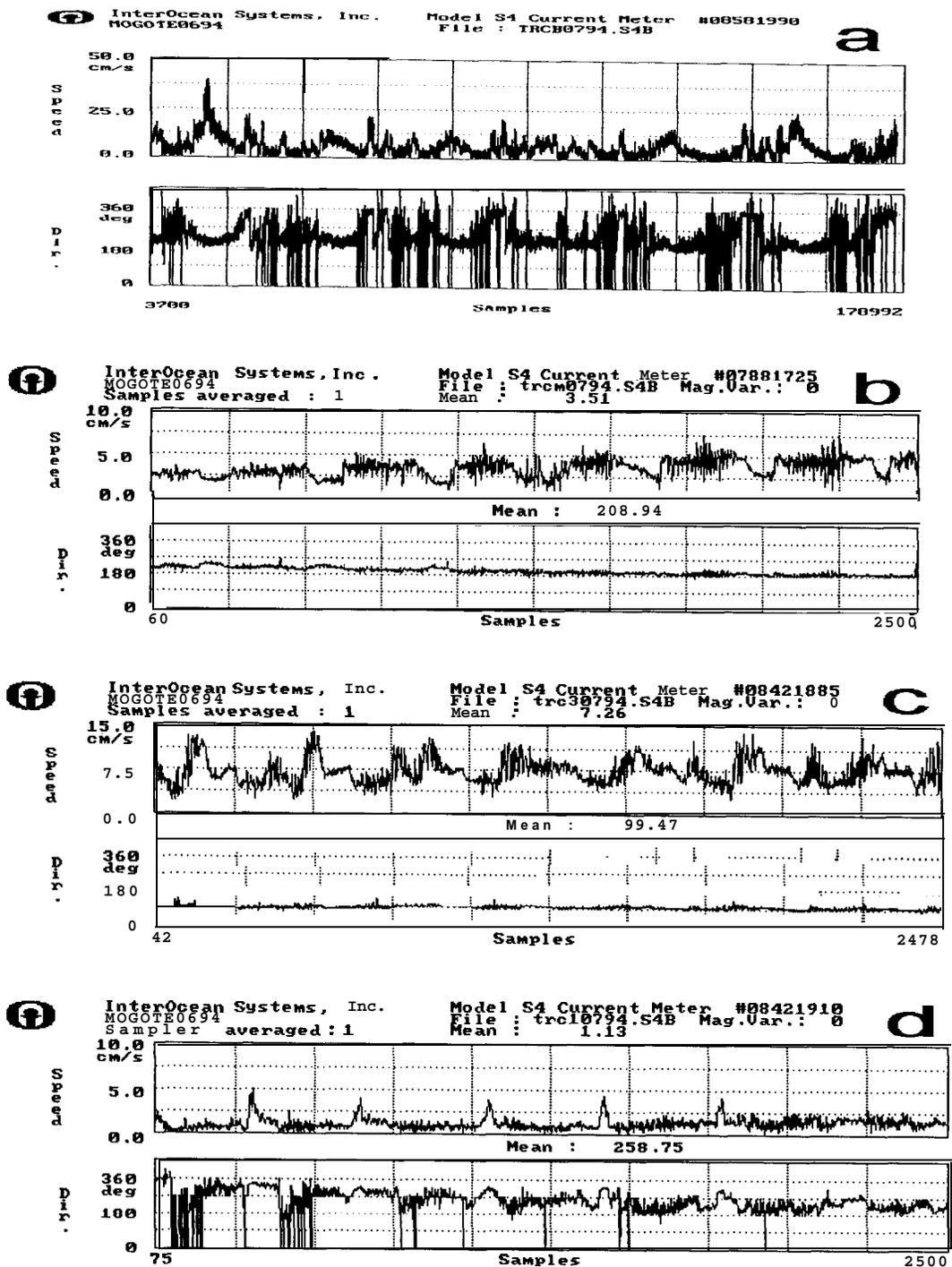


Fig. 14. Diagrama de la intensidad y dirección de la corriente en el tridente I(a), 2(b), 3(c), 4(d)

El punto 3 presentó una temperatura promedio de 28.37°C con un máximo de 33°C y un mínimo de 25.4°C; en el segundo muestreo se registró como temperatura promedio de 30.5 1 °C con un máximo de 33.6°C y 28.4°C como mínimo. El punto 4 la temperatura promedio fue 28.37°C, como máximo 32°C y como valor mínimo 24.5°C; en el segundo muestreo la temperatura promedio fue 30.08°C con una temperatura máxima 33°C y mínima 27.6°C.

En el punto 5 el promedio de la temperatura fue 28.54°C, teniendo como máximo 32.8°C y 24°C como mínimo.

#### 5.3.1.6 **Salinidad**

La salinidad en el sistema presentó frecuencias diurnas (fig. 16). Durante los dos muestreos la salinidad mostro como valor promedio de 37.81 PSU, mientras que el valor máximo y mínimo fueron 39 y 35.5 PSU, con una desviación estándar de 0.524.

#### 5.3.1.7 **Sigma,**

La densidad en el análisis espectral presento oscilaciones diurnas con frecuencias de 25.97 hrs en todo el sistema (fig. 17); tuvo en promedio un sigma t de 24.34, un máximo de 26.3 y **23** como mínimo

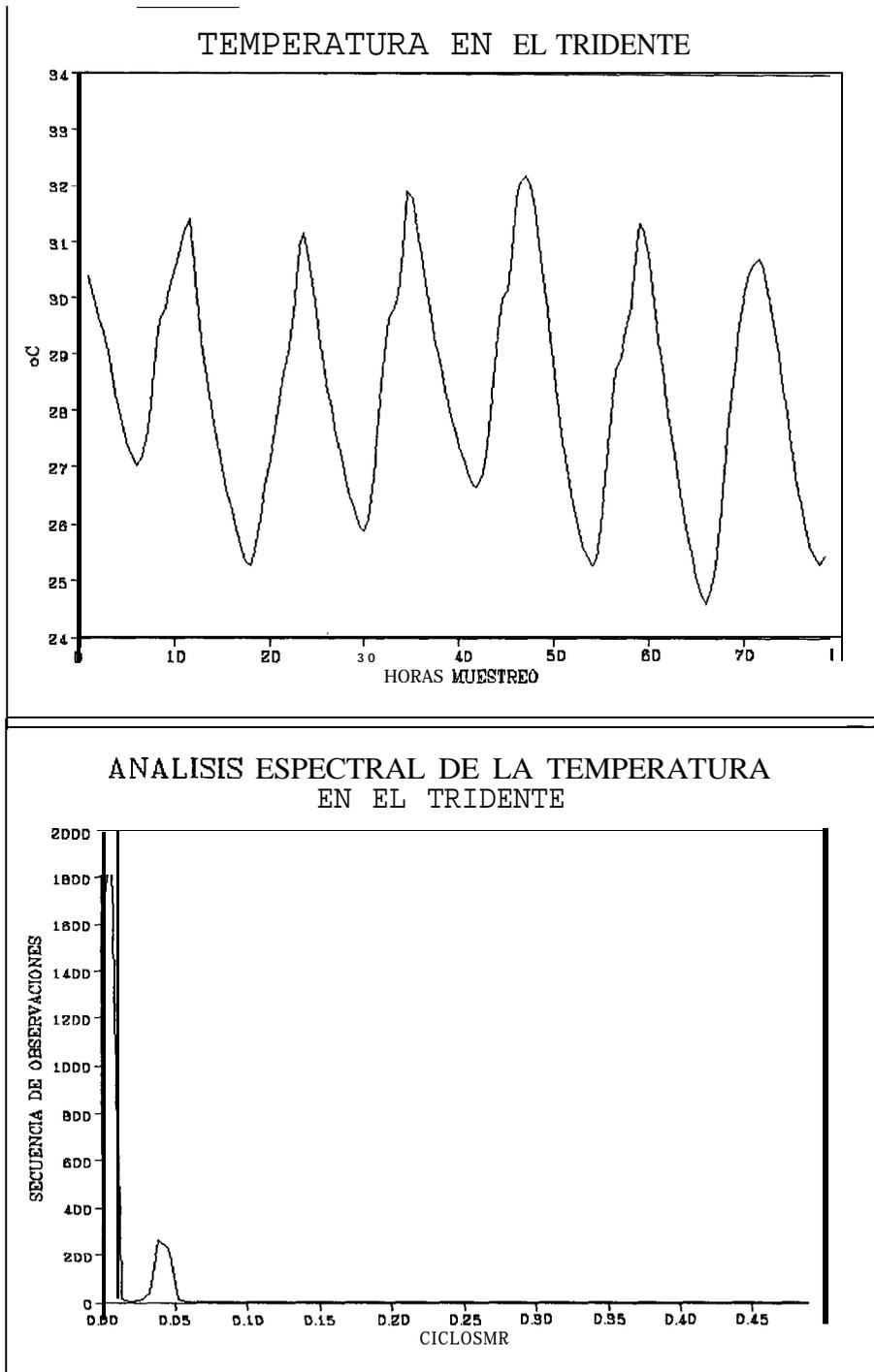


Fig. 15. Registro y análisis espectral de la temperatura en el tridente.

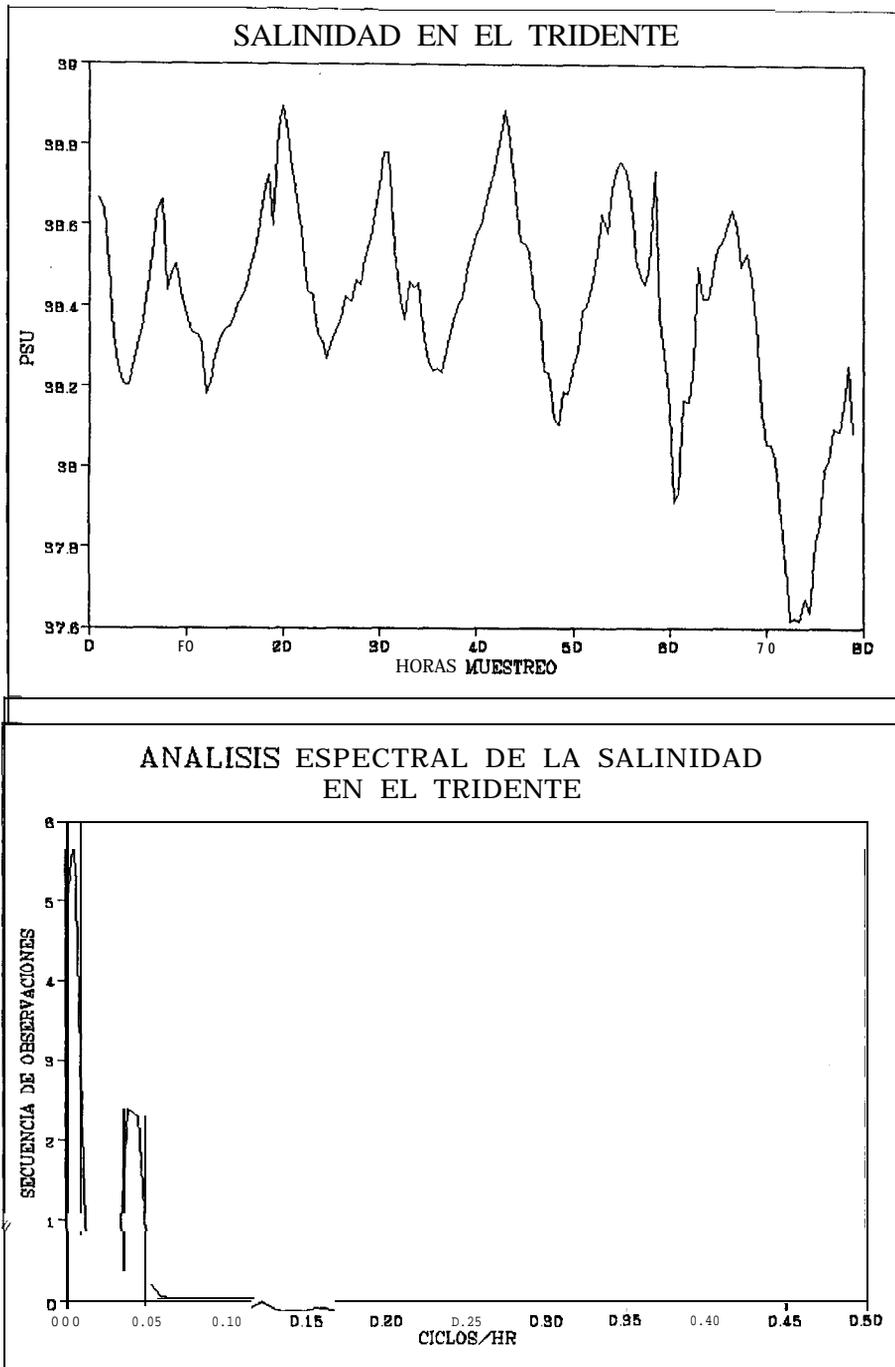


Fig. 16. Registro y análisis espectral de salinidad en el tridente.

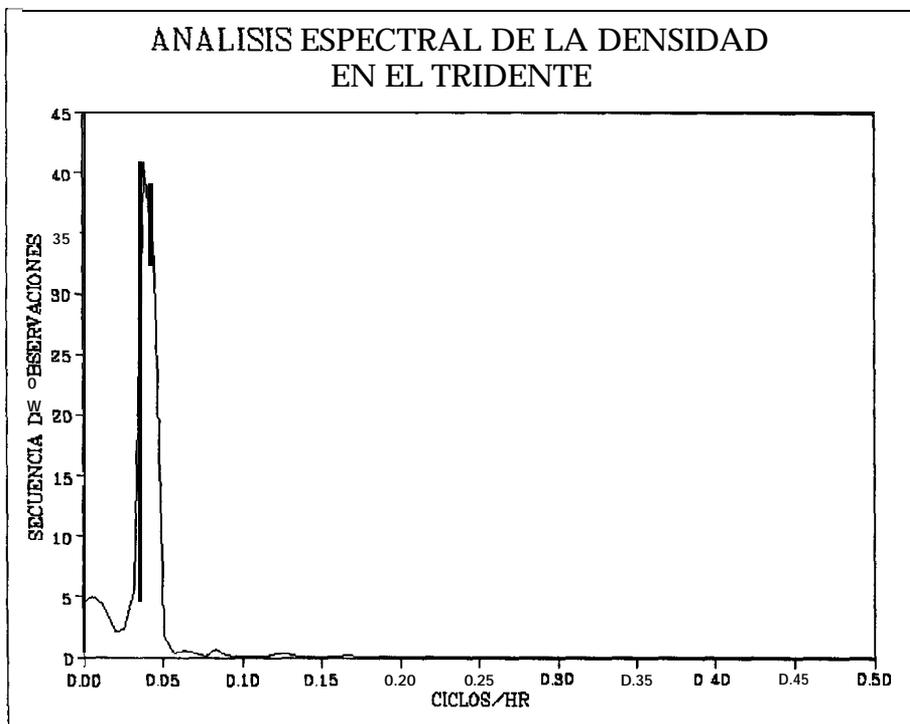
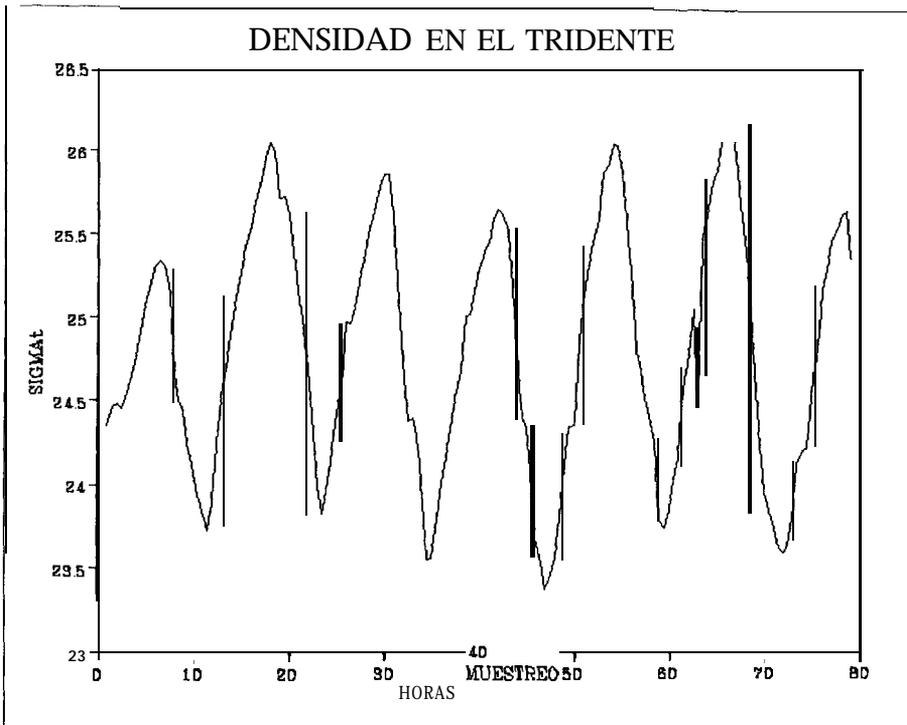


Fig. 17. Registro y análisis de la densidad en el tridente.

## CAPITULO VI RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINAMICO-NUMERICO.

### 6.1 Estanque de mareas.

Se utilizaron los registros de datos del ológrafo para introducirlos al modelo y generar la simulación a partir de datos reales, en la figura 18 se puede apreciar que al inicio de la serie existe inestabilidad, pero conforme avanza el proceso del modelo, la onda se estabiliza, obteniendo una serie muy suave.

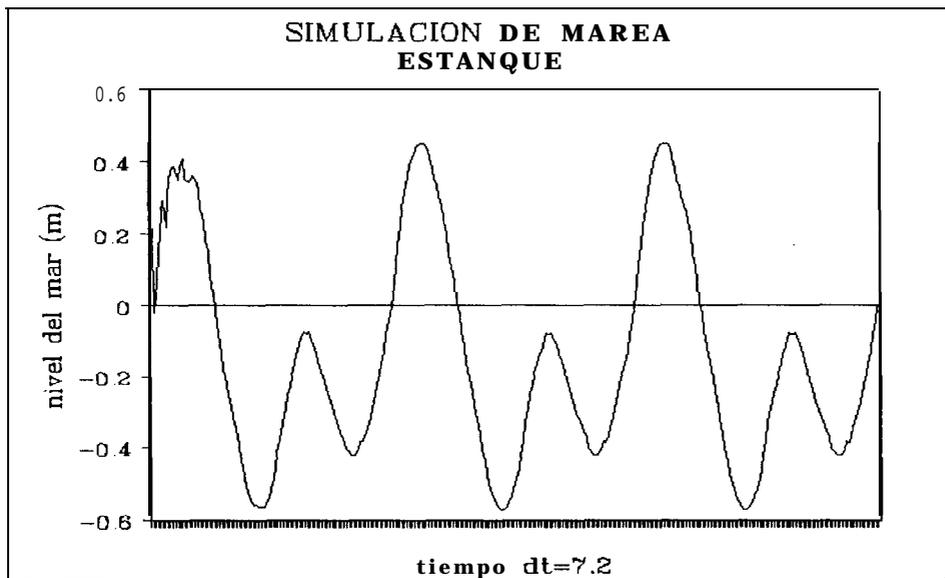


Fig. 18. Simulación de la oscilación de la marea en el estanque.

#### 6.1.1 Circulación inducida por mareas.

Los resultados del modelo aplicado al estanque de mareas, presentó una circulación en forma de abanico. En los primeros dos octavos de salida se observa que después de un flujo de chorro por el canal de acceso, al introducirse al estanque la onda de marea genera un giro ciclónico y otro anticiclónico, a la izquierda y derecha del canal de acceso, respectivamente. En el tercer octavo inicia el proceso de reflujó, la onda de marea genera giros similares, pero de menor dimensión e intensidad;

para el cuarto octavo la velocidad se intensifica, siendo mayor en el canal de acceso. En el quinto octavo se presenta la segunda pleamar del período, donde las velocidades mayores son en el canal y para el resto del área del estanque son despreciables. Para los tres octavos restantes (6,7 y 8) se presenta el segundo proceso de refluo y el más intenso del sistema.

Las velocidades máximas se presentan durante el refluo, específicamente en el canal de acceso, esto provocado por el estrechamiento del mismo canal; las velocidades alcanzan 20cm/seg y a medida que la onda se propaga hacia la cabecera del estanque las velocidades son despreciables.

#### **6.1.2 Circulación inducida por viento.**

La circulación en el estanque por efecto de viento, dependerá de la dirección, intensidad y persistencia del viento. En este caso en específico la intensidad y la dirección del viento fue el promedio de los meses durante el cual se llevaron a cabo los muestreos; 3.2 m/seg con dirección 180.3°.

En los dos primeros octavos, en la esquina inferior derecha del estanque, se presentan giros, provocados por viento proveniente del sur, este patrón solo se presenta durante la pleamar, ya que en los octavos donde se muestra el proceso de refluo, la circulación converge hacia el canal de acceso y presentando giros frente al mismo.

Las velocidades más altas son solo en el canal de acceso. El patrón de circulación muestra que durante la pleamar se forman dos giros anticiclónicos y uno ciclónico hacia la derecha del canal de acceso, mientras que en el lado contrario se forman dos giros ciclónicos de mayor amplitud que en la derecha del estanque.

El patrón de circulación durante la bajamar, muestra dos giros uno ciclónico y otro anticiclónico, que convergen en el canal de acceso. Continuando con el proceso de refluo se generan

tres giros ciclónicos y 3 anticiclónicos pequeños en el centro del estanque y dos giros mas, ciclónico y anticiclónico, en la cabecera del estanque de mayor dimesnsión, pero de baja intensidad.

Durante el proceso de simulación, la esquina inferior izquierda siempre fue una zona muerta.

## 6.2 Canales Artificiales (Tridente).

La simulación de la marea fue hecha a partir de datos de registro “in situ”, la figura 19 muestra la oscilación con cierta inestabilidad al inicio de la simulación, pero después alcanza la estabilización.

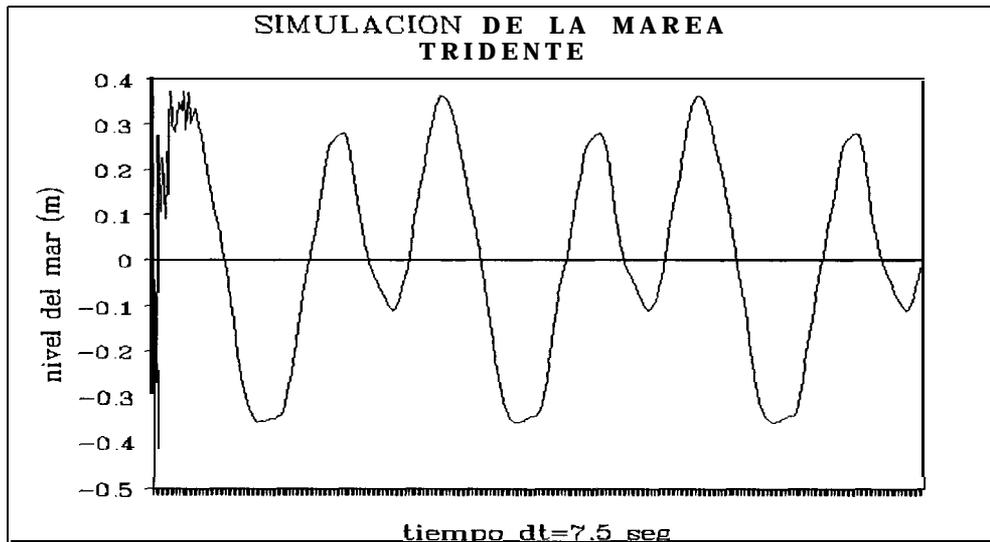


Fig. 19. Simulación de la oscilación de la marea en el tridente.

### 6.2.1 Circulación inducida por marea.

La circulación resultante en el primer octavo de la simulación en el tridente, muestra que el flujo una vez que sale del canal de acceso hace una dispersión en forma de abanico; para el segundo octavo, el proceso de pleamar se ve mas desarrollado generando tres giros, dos ciclónicos y uno anticiclónico, a la izquierda y derecha respectivamente; en el tercer octavo nuevamente se presentan tres giros, pero ahora uno ciclónico y dos anticiclónicos de izquierda a derecha en la base del tridente. En el cuarto octavo inicia el primer proceso de reflujó, se observan dos giros frente al canal de acceso, uno ciclónico y otro anticiclónico, de izquierda a derecha. Durante el quinto octavo se inicia el

segundo proceso de flujo, donde nuevamente se generan tres giros, dos ciclónicos a la izquierda de la base del tridente y uno anticiclónico a la derecha; para el sexto octavo cuando la intensidad de la corriente no es grande, en la base del tridente se forman cuatro giros ciclónicos a la izquierda del canal de acceso y dos giros anticiclónicos a la derecha del mismo. En los octavos séptimo y octavo se muestra el proceso de refluo más intenso, observándose como el flujo converge hacia el canal de acceso para salir del sistema.

### **6.2.2 Circulación inducida por viento.**

La simulación de la circulación inducida por viento en el tridente muestra que en el primer octavo al entrar la onda empujada por la fuerza de marea y el arrastre del viento hacen que la intensidad de la velocidad de la corriente se incremente, ocasionando una dispersión en forma de abanico y formando un giro anticiclónico en la esquina inferior derecha de la base del tridente. En el segundo octavo, la dinámica de la base es mayor, pero la intensidad de la velocidad se ve reducida, durante este octavo se generan cinco giros, cuatro ciclónicos y uno anticiclónico, de izquierda a derecha. En el tercer octavo, se generan, un giro ciclónico y otro anticiclónico, para dar inicio al proceso de refluo que se muestra en el cuarto octavo, donde también muestra el mismo tipo de giros. Para el quinto octavo el proceso de ascenso de la marea se presenta con dos giros ciclónicos y uno anticiclónico en la base del tridente; para el sexto octavo la intensidad de la velocidad de ascenso de la corriente se incrementa; en el séptimo octavo se generan un giro anticiclónico y uno ciclónico a la izquierda del canal de acceso y dos giros anticiclónicos a la derecha del mismo. Durante el octavo octavo de período el refluo muestra mayor intensidad en el canal de acceso.

Las figuras de los octavos de la circulación inducida por marea y viento para cada una de las áreas, se muestra en los anexos.

## CAPITULO VII

### DISCUSION DE RESULTADOS.

El retraso de la onda de marea en cuerpos de agua con grandes áreas someras, como lo es el caso de la Ensenada de La Paz, llega a ser en ocasiones crítico en mareas muertas. Cuando ocurre el evento de mareas muertas, existe mayor fricción en el fondo y disipación de la energía de la onda y menor tirante, por lo cual la velocidad de la onda es menor, por lo que frena y amortigua a la misma.

#### 7.1 Estanque de mareas

Como se sabe, el movimiento de un fluido es generado principalmente por diferencia de niveles y presión, en este sentido se puede observar que debido a que el estanque se encuentra ubicado en un nivel inferior al NBMI, esto genera una diferencia de niveles considerable durante la pleamar máxima y bajamar mínima, teniendo como limitantes la dimensión de la compuerta y la altura de la misma con respecto al fondo del estanque, provocando que el flujo se vea reducido por la compuerta, que en este caso está compuesta por cuatro tubos de 8" de diámetro cada uno, por lo tanto cuando dentro del estanque llega a la pleamar máxima, fuera de éste se ha iniciado el proceso de la bajamar; durante el ascenso y descenso del nivel del mar, llega un momento en el cual los niveles de agua dentro y fuera del estanque se estabilizan y al no existir presión, no existe intercambio, a menos que haya presencia de viento, que genere una diferencia de niveles y como consecuencia corriente. Al continuar bajando la marea, la salida de agua del estanque se ve nuevamente limitada por condiciones de la compuerta citadas anteriormente, provocando un bajo porcentaje de recambio de agua, que solo se efectúa en una capa de 30 a 40 cm.

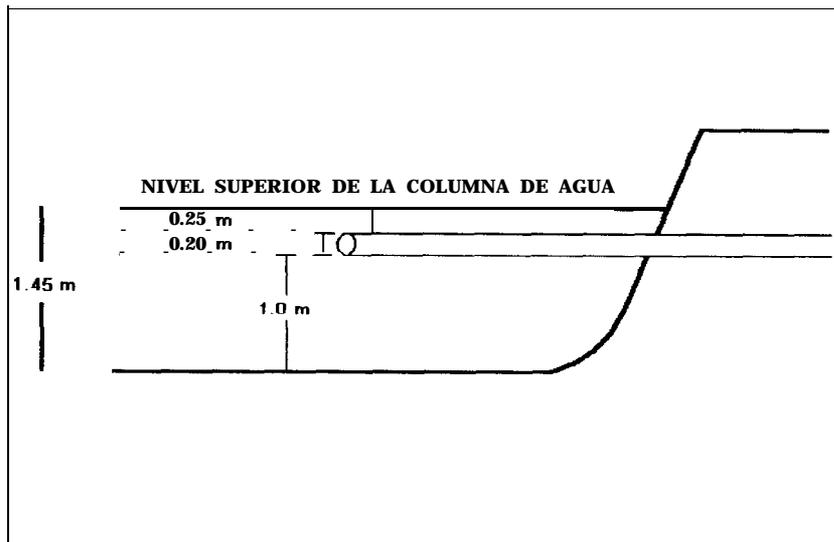


Fig. 20. Diagrama de la compuerta utilizada en el estanque de marea.

En la Ensenada de La Paz a medida que entra el período de mareas vivas, la onda de marea se propaga más rápidamente con un menor amortiguamiento que durante mareas muertas, esto se debe a que el llenado de las áreas someras es rápido, aún cuando el efecto de fricción es directamente proporcional a la velocidad, este se genera solo en las capas contiguas al fondo, reduciéndose el efecto en toda la columna de agua, debido a que a mayor columna de agua menor efecto de fricción en las capas superficiales. Durante el período de mareas muertas las condiciones serán críticas debidas al retraso, amortiguamiento de la onda de marea y fricción con el fondo.

La circulación dentro del estanque esta influenciada fuertemente por marea y por efecto de viento; al tener vientos del sur, como ocurrió durante el muestreo, la circulación generada en el estanque produjo un giro en sentido contrario a las manecillas del reloj (fig. 21).

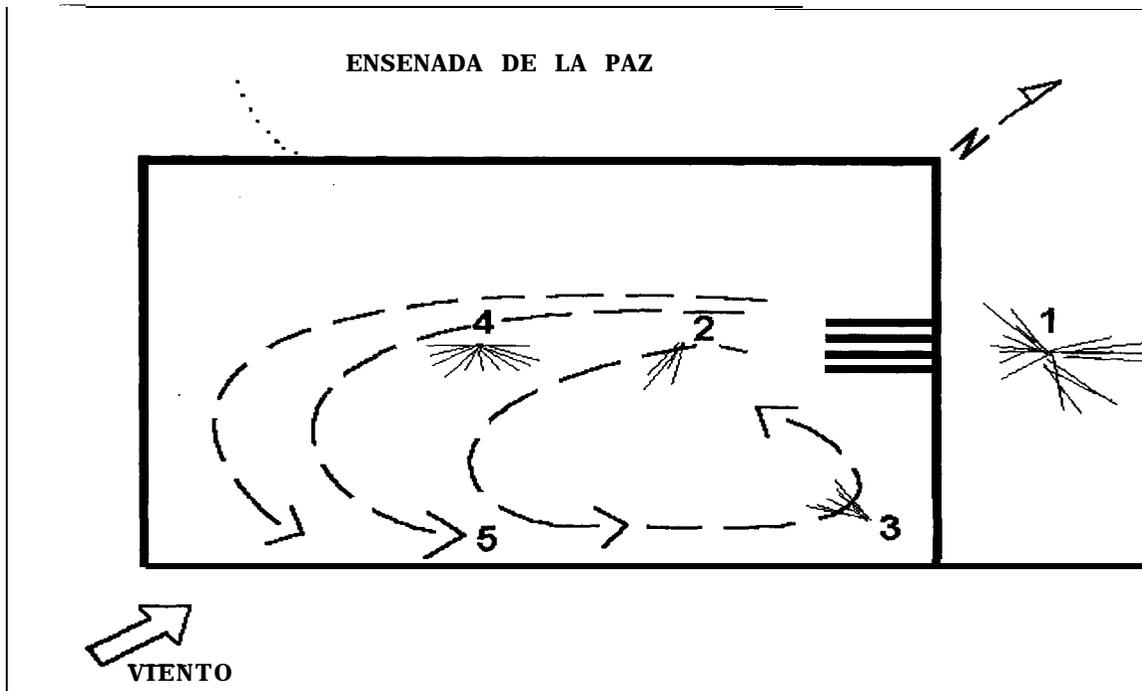


Fig. 2 1. Efecto de viento sobre el estanque.

En el estanque, la acción del viento contribuye a crear un movimiento de las capas superficiales de agua, que provoca que estén aireadas; en las capas contiguas al fondo, aun cuando la columna de agua es en promedio de un metro, se observan condiciones reductoras, debido a que la materia orgánica se incrementa y es acumulada disminuyendo severamente la concentración de oxígeno, presentándose las condiciones propicias para el desarrollo de bacterias anaeróbicas y aeróbicas facultativas, habiendo producción de ácido sulfídrico.

Los parámetros físico-químicos nos ayudan a confirmar lo anteriormente expuesto, la temperatura tiende a ser más constante dentro del estanque que fuera de él, esto es, su variación diaria y quincenal es menor; por otra parte durante mareas muertas se propicia un mayor y rápido calentamiento de la misma.

La salinidad presenta una oscilación semidiurna, ocasionada por la entrada y salida de agua del estanque lo que implica la influencia de la marea; tiene pequeñas variaciones de 2.5 ‰.

Los valores promedio de salinidad fuera y dentro del estanque son altos debido a: 1) el tiempo de residencia del agua en la Ensenada que es de 2.2 días aproximadamente, 2) el sector de El Comitán es una zona somera, 3) la elevada tasa de evaporación que caracteriza a esta área y 4) el tiempo de residencia del agua en el estanque de 3.1 días.

La densidad muestra un patrón diurno y su ascenso y descenso esta en función de la temperatura. Las concentraciones de oxígeno disuelto durante la pleamar son cercanos a la saturación, lo cual esta determinado por efecto de marea y viento, estos al provocar el movimiento de la masa de agua inducen a la mezcla, al menos en la capa superficial. Predominando el efecto de la marea, ya que el viento podría estar presente en bajamar y pleamar, pero las mayores concentraciones se encuentran en pleamar; los valores en bajamar son menores, esto evidentemente causado por el consumo del oxígeno, por la descomposición de la materia orgánica y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), otro factor que reduce la disponibilidad de oxígeno disuelto es la dimensión de la columna de agua, ya que en bajamar es menor que en pleamar. Al comparar los valores de oxígeno fuera y dentro del estanque durante la bajamar, se observa que las condiciones son menos favorables dentro del estanque, por la carga biológica, el bajo porcentaje de recambio de agua y a las condiciones reductoras de las capas contiguas al fondo, esto contribuye a la disminución de la concentración del oxígeno disuelto, esto fue corroborado haciendo una medición puntual de la concentración de oxígeno disuelto en el fondo, que dio como resultado nula presencia de oxígeno. La presencia de ácido sulfídrico y de poca o nula concentración de oxígeno es señal de eutroficación

Los fosfatos presentan la menor concentración en pleamar, teniendo valores similares dentro y fuera del estanque, principalmente por dilución; los valores mayores son en bajamar, observándose registros mayores fuera del estanque; al tener estas concentraciones en bajamar nos significaría la poca o nula presencia de productores primarios. Los nitritos y nitratos fuera del estanque la concentración disminuye de bajamar a pleamar, mientras que dentro del estanque ocurre lo contrario lo nos conduce que la disminución es básicamente debida a consumo bacteriano.

Se observó que el promedio del amonio en bajamar presenta mayor concentración que en pleamar, durante esta última los valores fuera y dentro del estanque fueron similares. En bajamar dentro del estanque se presentó la mayor concentración de amonio, esto debido a la producción de materia orgánica, disminución de la concentración del oxígeno disuelto, la transformación de los productos nitrogenados a amonio por acción bacteriana así como el hecho de ser un cuerpo de agua pequeño.

En los resultados obtenidos en la simulación de la hidrodinámica dentro del estanque, podemos observar que la circulación inducida por marea, es en forma de abanico (anexo i-viii), lo que demuestra que fue un acierto la ubicación de los puntos de muestreo (fig. 4), por otro lado, también estos esquemas de simulación nos indican que la área frente a la compuerta es una zona dinámica, pero donde existe mayor posibilidad de depositación de material en suspensión, lo cual es confirmado el número de microorganismos presentes en las muestras de sedimento, además de forma gráfica visualizamos que otras zonas de acumulación se localizan en las esquinas del estanque, donde no existe movimiento.

Los resultados de campo mostraron, aunque parcialmente, las áreas de acumulación de material **particulado**, las cuales fueron ubicadas por medio del conteo de población bacteriana presente en **agua y sedimento**, pero principalmente con este último, demostrando ser un buen indicador de partículas en suspensión **y/o** acumulación, lo cual se corrobora con la aplicación de este modelo hidrodinámico, con

el cual podemos tener una idea clara de lo que sucede dentro del estanque de acuerdo a sus características físicas.

Los resultados de la simulación concordantes con los resultados medidos en campo, son las velocidades máximas que se presentan durante el reflujó. Es importante tener en cuenta que los resultados del modelo fueron a partir de datos reales registrados en el sitio de muestreo.

## 7.2 Canales artificiales (tridente)

El área del tridente es un sistema con intercambio de agua permanente con el canal de acceso a la Ensenada de La Paz; debido a la cercanía de este sistema con el Muelle Fiscal (punto de referencia) la oscilación de la marea fue similar al del pronóstico del muelle, aunque al adentrarse la onda de marea hacia los canales se amortiguara por la diferencia de profundidad, provocando fricción con el fondo, a lo que también podemos agregar que la columna de agua se reduce y la onda viaja más lentamente.

Por otro lado, debido a que está zona esta protegida por una construcción aledaña y a los propios bordos de los canales, el oleaje es despreciable, pero aun con esto, se observa el arrastre del viento en la superficie del agua de los canales, debemos recordar que durante el período de muestreo el viento fue predominantemente del sur.

Con respecto a las corrientes, el canal de acceso presentó las velocidades más intensas, alcanzando 40 cm/seg, durante el reflujó y 20 cm/seg en el flujó. Tomando en cuenta la velocidad del flujó debemos recordar que conforme la onda se adentra al sistema, la intensidad disminuye por las irregularidades de la batimetría de los canales y a la poca profundidad, esto se aprecia en los esquemas de los octavos que resultaron de la simulación, en ellos se observa la circulación inducida por marea y viento (anexos *xvii-xxxi*). En el caso de ausencia de viento, es notorio que al final de cada canal las velocidades de la corriente son despreciables, incluso en el octavo 6 de la simulación inducida por

marea, se observa que durante el proceso intermedio de la pleamar máxima a la bajamar mínima, se presentan zonas muertas en la cabecera de los canales.

Por otro lado, podemos notar que los resultados de la medición indican que en la base del tridente existe más dinámica que en el resto del sistema, aunque las velocidades máximas se presenten en el canal de acceso, mientras que en la medición euleriana, el patrón solo muestra una pequeña parte de lo que sucede en ella.

En el caso de los resultados de la simulación de la corriente inducida por viento, la dinámica de la base del tridente se ve incrementada. Las cabeceras de los canales presentan un giro ciclónico, esto ocasionado por el efecto de viento introducido al estanque, lo mismo podemos apreciar en la medición euleriana, como el viento tiene gran influencia sobre la superficie del sistema (fig. 13) generando giros similares, que se simularon de acuerdo a las condiciones que se presentaron durante el muestreo, recordando que el viento provenía del sur y que el tridente está orientado de sur a norte lo que ayuda al empuje del agua, siendo favorable durante el ascenso de la marea.

La temperatura mantuvo un promedio de 28.4°C, con una oscilación diurna. Para el punto número 1 (fig.11) no hubo registro de temperatura. En el caso de la salinidad tuvo un promedio de 37.8 PSU, mostrando homogeneidad en el sistema y en la zona adyacente a él. La salinidad y densidad presentaron el mismo patrón diurno. La salinidad y la temperatura mostraron correlación positiva, mientras que ambas presentaron correlación negativa con la temperatura, lo cual era de esperarse, pues al aumentar la temperatura disminuye la densidad y al aumentar la salinidad aumenta la densidad.

## CAPITULO VIII

### CONCLUSIONES

La **utilización** de modelos numéricos es una alternativa que debe ser utilizada para entender y/o predecir el comportamiento hidrodinámico de un sistema, para evitar caer en errores de **planeación** de construcciones marinas o el desarrollo de maricultivos que dependan de la circulación de la marea, ya que ésta jugará un papel muy importante en el recambio de agua del sistema.

Para desarrollar modelos que requieren de cálculos muy finos, es necesario el uso de herramientas computacionales, que de acuerdo a la complejidad del problema nos den la oportunidad de integrar, evaluar y transferir los resultados al conocimiento de procesos costeros, estuarios y en el caso de este trabajo, estanques de marea.

El modelo barotrópico utilizado en este trabajo fue diseñado por Gaviño (1987), el cual se basa en el método de diferencias finitas. El modelo se optimizó para una SGI Power Challenge, básicamente se modificó la estructura I/O de datos y se implementó una solución alternativa a la simulación a partir de datos teóricos, es decir, se introducen datos reales al modelo, interpolados con SPLINE los valores para cada paso de tiempo, además del cambio al lenguaje FORTRAN 90.

El modelo hidrodinámico-numérico nos permite simular la variación del nivel del mar a partir de datos teóricos o reales del sitio seleccionado, para lo cual es necesario contar con una máquina de supercomputo, si el área en cuestión presenta pasos de tiempo y espacio muy pequeños, lo que contribuye a una mayor cantidad de cálculos de operaciones para encontrar la solución numérica, debido a este incremento en complejidad, la aplicación del modelo solo será posible, si y solo si, el

paso de tiempo y espacio son reducidos hasta satisfacer el criterio de estabilidad de Courant Friedrich Lewy, el cual es necesario para desarrollar el método matemático del modelo.

El uso del supercómputo nos permite modelar progresivamente con mayor resolución espacial, si el área de estudio es de aguas someras y es discretizada con pequeños  $\Delta x$ . Esta evolución requiere de herramientas computacionales para pre-procesar y post-procesar los resultados obtenidos. Los pre y post- procesos deben además ser parte integral de la estructura del modelo y de los campos de datos.

De acuerdo a los resultados obtenidos de este trabajo podemos concluir que el uso de microorganismos como indicadores de material **particulado**, resultó ser una forma rápida, sencilla de hacer la evaluación de materia en suspensión y materia acumulada, y nos permitió comparar junto con las mediciones eulerianas en el estanque, los resultados obtenidos del modelo aplicado a este estanque. Ya que los esquemas muestran claramente las zonas donde la circulación es apreciable y donde hay ausencia de movimiento, con lo cual podemos hacer inferencias de lo que **ocurriría** cuando al cuerpo de agua se le incrementara la carga poblacional y cómo podría ser afectada la calidad del agua. Si bien este no es un modelo tridimensional donde podemos incluir variables como la densidad, salinidad, temperatura u oxígeno, con solo modelar la hidrodinámica del área nos permite visualizar las áreas donde se debe poner mayor atención que serían áreas potenciales de acumulación de materia orgánica, la cual deterioraría el medio donde se desarrollarán de los organismos a cultivar.

De manera cualitativa, podemos decir que el tridente es una zona más saludable que el estanque, aun cuando se llevan a cabo procesos de depositación de materia orgánica de organismos residentes en el área y el aporte del manglar circundante, es justo aclarar que éste no tiene restringida la entrada de agua por el canal de acceso, como ocurre en el estanque, por tal motivo es conveniente

que al iniciár el planteamiento de diseño se tomen en cuenta las características físicas del área donde se confinarán los organismos.

Con este tipo de modelos podemos sugerir la manera más efectiva de utilizar el área de estudio, ya que con el modelo podemos diagnosticar y predecir los posibles procesos a ocurrir; naturalmente la capacidad de predecir dependerá de las limitaciones del modelo y de los datos a utilizar.

La información generada por el modelo será de ayuda a los ingenieros de diseño de granjas acuícolas donde el recambio de agua sea por el ascenso y descenso de la marea., así como también a los que toman las decisión del manejo de una granja acuícola ya establecida.

## CAPITULO IX

### RECOMENDACIONES

La aplicación de programas complejos generalmente requieren de herramientas computacionales altamente eficientes, muchas de las cuales están disponibles en máquinas de alto rendimiento como lo es UDGMAX. Para el modelo utilizado en este trabajo, los comandos de compilación darán mejor rendimiento haciendo una selección previa de esto, ya que se puede caer en errores como limitar la velocidad de proceso en lugar de mejorarla. Aquí encontramos que una mejor opción de compilación es:

*f90 -pfa - mp -O2 -O outfile inputfile*

lo que nos permite un máximo de rendimiento.

Por otro lado, es necesario seguir investigando las diferentes opciones que nos da el uso del supercomputo, que en nuestro caso, a partir de pasos de tiempo y espacio pequeños, nos permitió realizar cálculos muy finos para encontrar la solución numérica de un modelo de simulación de marea y componentes de la corriente.

Se recomienda el uso del supercómputo, pues disminuye las limitaciones de espacio de las computadoras convencionales y disminuye el tiempo de ejecución, lo cual hace factible desarrollar modelos muy finos con técnicas convencionales y obtener resultados a corto plazo, lo que permite un mayor número de pruebas para afinar la calibración.

Es importante desarrollar modelos numéricos aplicados a estanquerías de maricultivos, ya que permite predecir el comportamiento de las mismas antes de ser construidas.

## BIBLIOGRAFIA.

- Anónimo, 1987. Curso sobre Control Sanitario de Moluscos Bivalvos SSA - FDA, Manual de Operaciones 1, Sección C. 25pp.
- Aguirre Tepole José de Jesús, 1996 Comunicación personal.
- Agrawal N. k., S.C. **Roy** y A. N. Bose, 1989. Sluice Design for Filling of Tide-Fed Aquacultural Farm. *Aquacultural Engineering*. 8:267-281.
- Baum Steven K., 1996. Glossary of Oceanography, Climatology and The Related Geosciences with References. Texas Center for Climate Studies. Texas AM University.
- Camacho Guzmán Oscar, B. Barrera Vázquez y J.I. Pérez Sobrevilla, 1987. Acuicultura en el Mundo. *Acuavisión* 2(6):8,9
- Cervantes Duarte R., S. Aguiñaga García y R. Guerrero Godínez, 1991. Variación Estacional de la Temperatura, Salinidad y Nutrientes en La Ensenada de La Paz, B.C.S. (1986-1988). *Rev. Inv. Cient.* 2(2):56-64
- Cervantes Duarte R. y R. Guerrero Godínez, 1988. Variación Espacio-Temporal de Nutrientes de La Ensenada de La Paz, B.C.S., México. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnología UNAM*. 15(2):129-142.
- Cervantes Duarte R. y H. **Santoyo**, 1986. Nota a cerca del Metabolismo de una Laguna Hiperhalina de Baja California Sur. *Inv. Mar. CICIMAR*. Vol. 3 No. 1 p 133-139.
- Clifford **Henry C. HI**, 1985. Semi-Intensive Shrimp Farming. *Hatchery Technology*. IV p 15-28.
- Coll Morales J.**, 1986. *Acuicultura Marina Animal*. Ed. Mundi-Prensa, 2da. ed., España, 670 pp
- Collins R. A. y M. N. Delmendo**, 1976. Comparative Economics of Aquaculture in Cage, Raceway and Enclosures. *FAO Technical Conference on Aquaculture Kyoto, Japan*. p 472-477.
- Colt John**, 1986. Pond Culture Practices. p 191-203. En: Lannan J. E., R. O. Smitherman y G. Tchobanoglous (Eds.) *Principles and Practices of Pond Aquaculture*.

- Cruz-Orozco R., **P. Rojo** García, L. Godínez Orta y E. Nava Sánchez, 1989. Topografía, hidrología y Sedimentos de las Márgenes de la Laguna de La Paz, B.C.S. Rev. Inv. Científica UABCS. Vol1 Núm. 3 p 3-15.
- Cun** M., 1982. Guía Práctica para la Cría de Camarones Comerciales (*Penaeus*) en Ecuador, I.N.P., Boletín Científico y Técnico Vol 5 (1):27 pp
- Davis** Jr. Richard A., 1972. *Principles of Oceanography*. Addison-Wesley Publishing Company
- De la Lanza G., 1987. Química de la Fase Sedimentaria en las Lagunas Costeras. p 135-153.  
En: Gómez-Aguirre S. y V. Arenas (Eds.) Contribuciones en Hidrobiología UNAM.
- Draper N. y H. Smith, 1981. *Applied Regression Analysis*. Second Edition. Wiley Interscience. p 193-213.
- Dyer Keith R., 1973. *Estuaries: A Physical Introduction*, Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons eds. 140 pp.
- Espinoza** Avalos J., 1979. Resultados preliminares sobre distribución superficial de parámetros físico-químicos en la Ensenada de La Paz, Baja California Sur, durante primavera de 1976. Calcofi Reports, Vol XX, p 150-163.
- Forsythe George E., **Michael A. Malcom** y **Cleve B. Moler**, 1977. *Computer Methods for Mathematical computations*, Prentice-Hall, Inc. p 63-83
- Fosdick Lloyd D., E. R. Jessup, C. J.C. Schauble y **Gitta** Domik, 1996. *An Introduction to High-Performance Scientific Computing*, The MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England, 760 pp.
- Gao S. y M. Collins, 1994. Tidal Inlet Equilibrium in Relation to Cross-Sectional Area and Sediment Transport Patterns. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 38:157-172.
- García de la Banda I., S. Ilardia y M. J. Porras, 1986. Contaminación Bacteriana en la Bahía de Santander. *Biol. Inst. Esp. de Oceanografía*. 3(3):41-53.
- Godin Gabriel, 1972. *The Analysis of Tides*. William Clowes and Sons Limited. p 91-183
- Gómez José, Homero Cabrera y Salvador **Ferrera**, 1984. Estudio Hidrográfico de la Ensenada de La Paz, B.C.S. . Memorias: Primera Reunión sobre Ciencia y Sociedad Presente y Futuro

de La Ensenada de La Paz. Universidad Autónoma de Baja California Sur-Gobierno del Estado de Baja California Sur, p 7-13.

**González-Acosta B., R. Guerrero-Caballero, S. Rodríguez-Astudillo y R. Ramírez-Sevilla,** 1995. Distribution of Fecal Coliform in the Ensenada and La Paz Bay, B.C.S., Mexico. First International Meeting on Microbial Ecology, May 8-12, Mexico City.

**González Orduño A. M., A. R. Jiménez Illescas y M. Obeso Nieblas.** El Tiempo de Residencia en la Ensenada de La Paz, B.C.S (en prensa).

**Hason A. J., 1982.** Open Sea Mariculture Perspectives. Problems and Prospects. Ed. II. Oceanic Foundation, 788 pp.

**Hernandez Llamas A., G. Padilla Arredondo y F. J. Magallon Barajas, 1992.** Elementos para el Diseño de un Estanque de Maricultivos con Recambio por Marea Libre: Efecto de las Dimensiones de la Compuerta-Vertedero. Inv. Mar. CICIMAR. Vol 7 No. 1

**Huguenin J. E. y J. Colt, 1989.** Design and Operating Guide for Aquaculture Seawater Systems. Elsevier, 356 pp.

**INEGI, 1983.** Fotografías aéreas de La Ensenada de La Paz en la escala 1:50 000

**Ippen Arthur T., 1966.** Estuary and Coastline Hydrodynamics. McGraw-Hill Book Company, Inc., 744 pp

**Jiménez Illescas A. R., 1983.** Aplicación de un Modelo Hidrodinámico Numérico a La Ensenada de La Paz, B.C.S. Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, B.C., México. 109 pp.

**Jiménez Illescas A. R., R. E. Ocampo Torrea y M. Obeso Nieblas, 1988.** “Estudio de la Posibilidad de la Construcción de un Canal en la parte más angosta de la Barra del Mogote”. Depto de Oceanología CICIMAR - IPN, 30 pp.

**Jiménez Illescas A. R., M. Obeso Nieblas y A. Amador Buenrostro, 1993.** Análisis de Corrientes en la Boca de Puerto Escondido, B.C.S. Inv. Mar CICIMAR. Vol 8 No. 2 p 53-59.

**Jiménez Illescas Angel R., 1996.** Análisis de Procesos Barotrópicos y Baroclínicos de la Bahía de La Paz, B.C.S. Tesis Doctoral-UNAM.

- Kato J., 1975.** Guide to Design and Construction of Coastal Aquaculture Pond. Japan International Cooperation Agency. 76 pp.
- Kjefve Björn, 1988.** Hydrodynamics of Estuaries, Volume 1, Estuarine Physics. CRC Press, Inc., 166 pp.
- Kumaran Santhosh, Robert N. Miller y Michael J. Quinn, 1995.** Architecture-Adaptable Finite Element Modelling: A Case Study using an Ocean Circulations Simulations en Proceeding of the Supercomputing'95 Conference, San Diego, E.U.A., ACM-IEEE.  
[http://www.supercomp.org/sc95/proceedings/559\\_Skum/SC95.html](http://www.supercomp.org/sc95/proceedings/559_Skum/SC95.html)
- Lechuga Besné Rocío y González Lechuga Rubén, 1985.** La Acuicultura en México, Acuavisión 1(2):4-9
- Lechuga Devéze C. H., J. Bustillos Guzman, M. T. Barreiro Güémez y D. López Cortés, 1990.** Oscilaciones Semi-Diurnas, Diarias y Estacionales de Variables Físicas en La Ensenada de La Paz, B.C.S. Inv. Mar. CICIMAR. Vol 5 No. 1 p 1-9.
- Lee S. Y., 1993.** The Management of Traditional Tidal Ponds for Aquaculture and Wildlife Conservation in Southeast Asia: Problems and Prospects. Biol. Conserv. 63(2): 113-118.
- Levinton Jeffrey S., 1982.** Marine Ecology. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliff, New Jersey.
- Liong P. C. y K. Subramaniam, 1990.** Water Management in Coastal Prawn Ponds. Risalah Perikanan Bilangan. Ministry of Agriculture, Kuala Lumpur Malaysia. No.42, 14 pp.
- López Blackmore G., 1980.** Implicaciones Técnicas en el Diseño de Estanques a Marea Libre. Memorias II Simposio Latinoamericano de Acuicultura Tomo IV p 2972 - 2988.
- Marjanovic N. y G. T. Orlob, 1986.** Modelling the Hydromechanical and Water Quality Responses of Aquaculture Ponds. p 207-230. En: Lannan J. E., R.O. Smitherman y G. Tchobanoglous (Eds.) Principles and Practices of Pond Aquaculture.
- Milne P. H., 1976.** Selection of Sites and Design of Cage, Fishpens and Net Enclosures for Aquaculture. FAO Technical Conference on Aquaculture. Kyoto Japan p 416-423.
- Mintardjo K., 1988.** Site Selection for Shrimp Farming Development. Report of the Training Course on Shrimp Culture, Jepara, Indonesia

- Monreal Gómez Ma. Adela, 1996. Comunicación personal.
- Morales G. E. y H. R. Cabrera Muro, 1982. Aplicación de un Modelo Numérico Unidimensional a La Ensenada de La Paz, B.C.S. Ciencias Marinas V.8(2):69-89.
- Morse H. Stepben, 1994. Practical Parallel Computing, AP Professional, 401 pp.
- Neal** R. A. y C. R. **Mock**, 1976. A Model Closed System for Aquaculture Incorporating the Recycling of Wastes. FAO Technical Conference on Aquaculture. Kyoto, Japan, p 521-523.
- Neumann G. y W. J. Pierson, Jr., 1966. **Principles** of Physical Oceanography. Prentice-Hall, Inc, p 298-325.
- Nihoul **Jacques** C. J., 1980. Marine Turbulence. Elsevier Scientific Publishing Company, 378 pp.
- Obeso Nieblas M. y A. R. Jiménez Illescas, 1989. Propagación de la Constituyente M2 de la Marea en La **Bahía** de La Paz, B.C.S., México, Mediante un Modelo Bidimensional Hidrodinámico Numérico. Inv. Mar. CICIMAR, Vol 4(2):241-256.
- Obeso Nieblas M., A.R. Jiménez Illescas y Sergio Troyo Diéguez, 1993 (a). Modelación Hidrodinámica de la Marea en la Ensenada de La Paz, B.C.S., Inv. Mar., CICIMAR Vol 8(1):1-11
- Obeso Nieblas M., A.R. Jiménez Illescas y Sergio Troyo Diéguez, 1993 (b). Modelación de la Marea en la Bahía de La Paz, B.C.S., Inv. Mar., CICIMAR Vol 8( 1): 13-22
- Pedersen **Fl. Bo**, 1994. The Oceanographic and Biological Tidal Cycle Sucession in Shallow Sea Fronts in The North Sea and The English Channel. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 38:249-269.
- Peña A. Eduardo y Miguel Angel Cabrera, 1987. La Estanquería y su Diseño, Acuavisión 2(6):12-14
- Rabanal H.R. y Y.C. Shang, 1976. The Economics of Various Management Techniques for Pond Culture of Finfish. FAO Technical Conference on Aquaculture, p 224-235.
- Ramming **H. G. y Z.** Kowalik, 1980. Numerical Modelling of Marine Hydrodynamics, Applications to Dynamic Physical Processes. Elsevier Scientific Publishing Co., 150 pp.

- Ruiz F., M. Martin, M. Alatorre, S. Czitrom, 1994.** Un Dispositivo de Bombeo de Agua Marina Activado por Oleaje. Ingeniería Hidráulica en México. Vol IX Núm. 2 p 45-51.
- Sabot, Gary W., 1995.** High Performance Computing - Problem solving with parallel and vector architectures, Addison-Wesley Publishing Company, 246 pp.
- Sandoval Mayorquín F. J., 1983.** Análisis Estadístico de la Corriente de Marea y la Influencia del Viento sobre La Ensenada de La Paz, B.C.S. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Escuela Superior de Ciencias Marinas. Ensenada, B.C., México.
- Scott C. F., 1994.** A Numerical Study of The Interaction of Tidal Oscillations and Non-linearities in an Estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 39:477-496.
- Soberon Chávez G., A. Yáñez Arancibia y J. W. Day, Jr., 1988.** Fundamentos para un Modelo Ecológico Preliminar de la Laguna de Términos. Cap 20:381-414. En: Yáñez Arancibia A. y J. W. Day, Jr. (Eds.) Ecología de los Ecosistemas Costeros en el Sur del Golfo de México: La Región de Laguna de Términos. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM. Coast. Ecol. Inst. LSU. Editorial Universitaria, México, D.F.
- Sokal Robert R. y F. J. Rohlf, 1981.** Biometry. Second Edition. W.H. Freeman and Company, 859 pp.
- SMN-UNAM (Servicio Mareográfico Nacional-UNAM), 1994.** Tablas de Predicción de Mareas (puertos del Pacífico), Instituto de Geofísica UNAM, p 113-127.
- Stanier Roger Y., Edward A. Adelenberg y John L. Ingraham, 1976.** Microbial World. Prentice-Hall, Inc. 871 pp
- Steel Robert G. D. y J.H. Torrie, 1980.** Principles and Procedures of Statistics a Biometrical Approach. Second Edition. International Student Edition, 633 pp.
- Stumm W. y J. J. Morgan, 1970.** Aquatic Chemistry and Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Water. Wiley-Interscience. 583 pp
- Szumiec M. A., 1976.** Hydrometeorology in Pond Fish Culture. FAO Technical Conference on Aquaculture. Kyoto, Japan p 117- 120.

**Tang Y. A.**, 1976 (a). Physical Problems in Fish Farm Construction. FAO Technical Conference on Aquaculture, p 99- 104.

Tang Y. A., 1976 (b). Planning, Design and Construction of a Coastal Fish Farm. FAO Technical Conference on Aquaculture, Kyoto Japan, 27 pp.

Trejo Diéguez S. y Elvia Mayoral Vázquez, 1984. Estudio de la Calidad Físico-Química y Bacteriológica del Agua y Almeja Catarina *Argopecten circularis* en La Ensenada de La Paz, B.C.S. Memorias: Primera Reunión sobre Ciencia y Sociedad Presente y Futuro de La Ensenada de La Paz. Universidad Autónoma de Baja California Sur-Gobierno del Estado de Baja California Sur. p 31-43.

Troyo Diéguez S., 1990. Aprovechamiento de las Mareas para la Renovación de Agua en Estanques de Maricultivo en las Costas de Baja California Sur. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional, México. 45 pp.

UDG, 1996. Información disponible en: <http://www.mexplaza.udg.mx/Cencar/super/power.html>

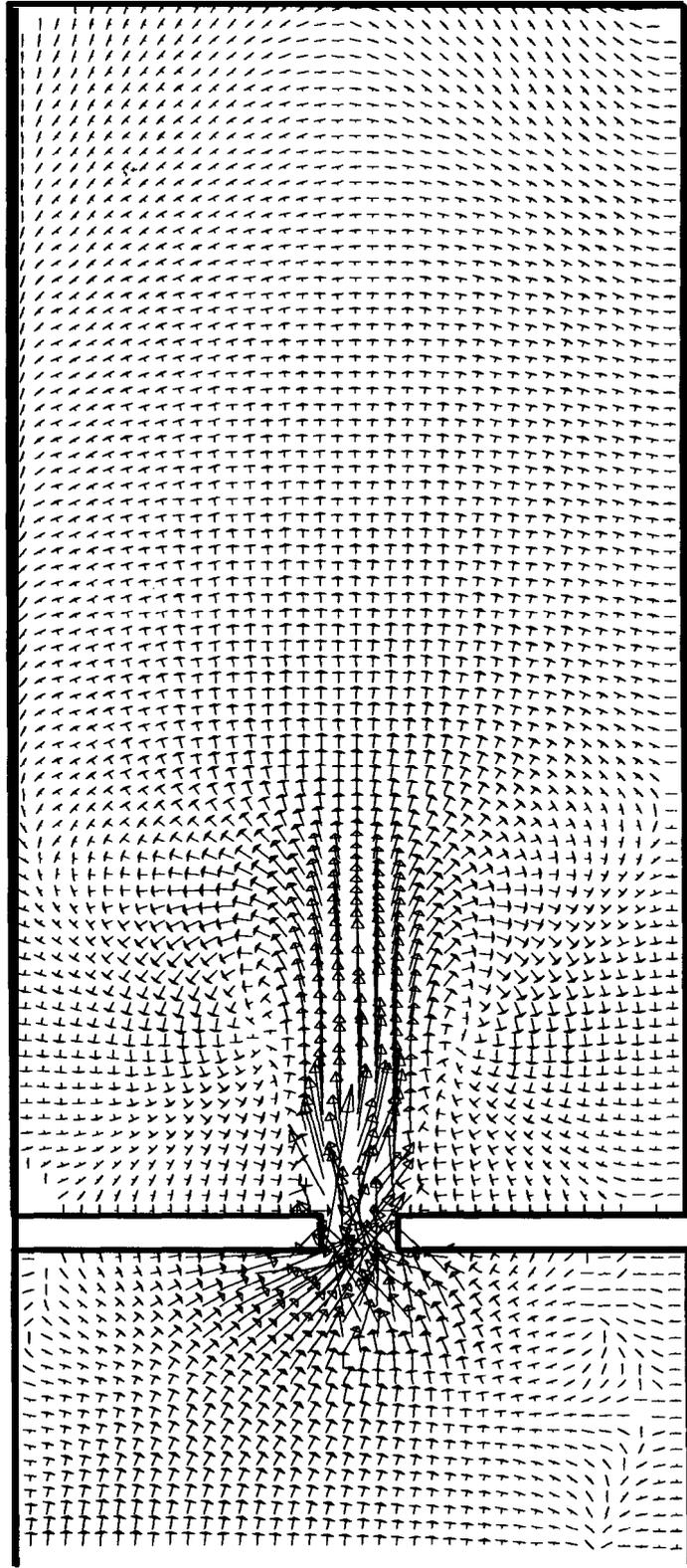
Varela **Espinoza L.**, 1988. Proyecto para Granja Camaronera en el Estero La Atanasia, Municipio de Bacum, Sonora. Biosistemas: Servicios Profesionales en Acuicultura, 39 pp.

von Arx William, 1977. An Introduction to Physical Oceanography. Addison-Wesley Publishing Company, 422 pp.

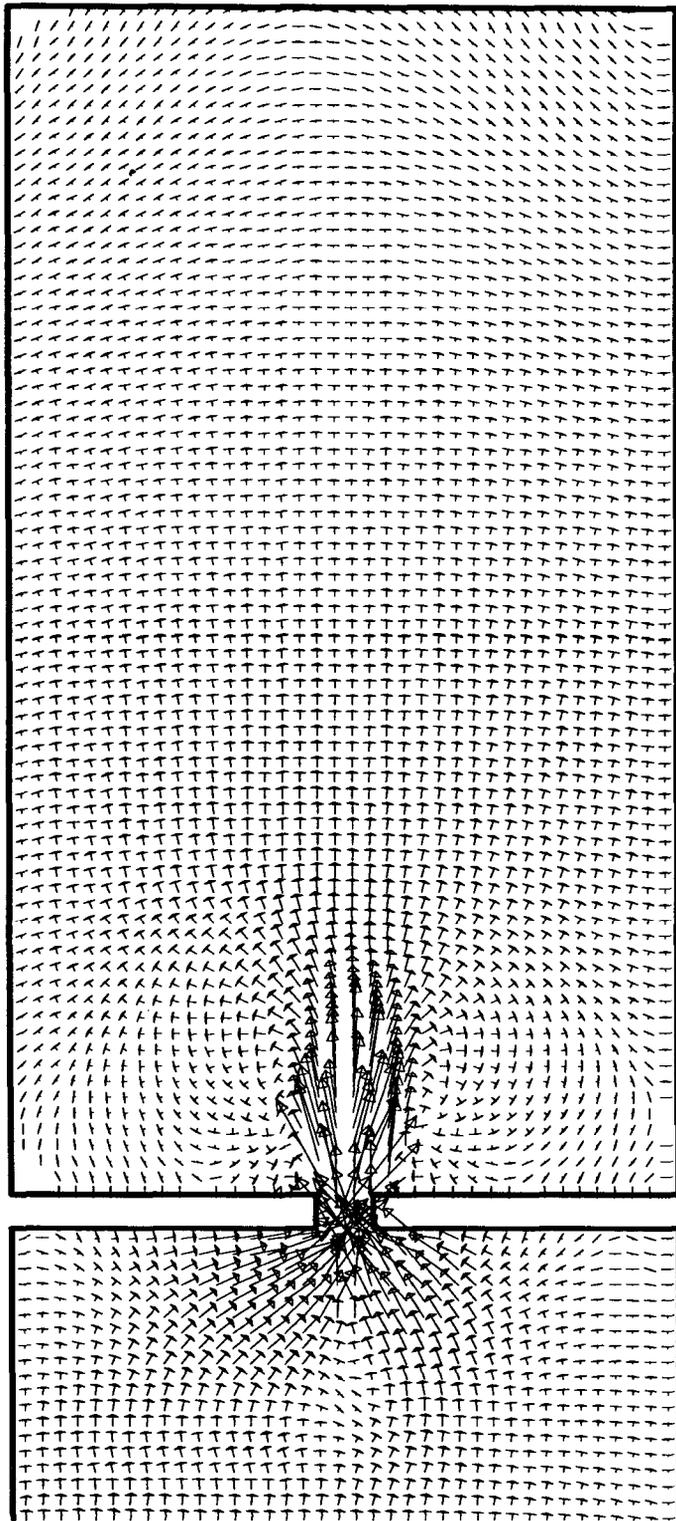
Weast **Robert C.** y Melvin J. **Astle**, 1981. Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, Inc.

Wilson C. A., D. G. Dunkelberger, N. C. **Alon** y M. C. Rubino, 1990. Tidal Pond Culture in South Carolina. A Sustainable Alternative for Shrimp Mariculture. Aquaculture Magazine July/August p 54-61.

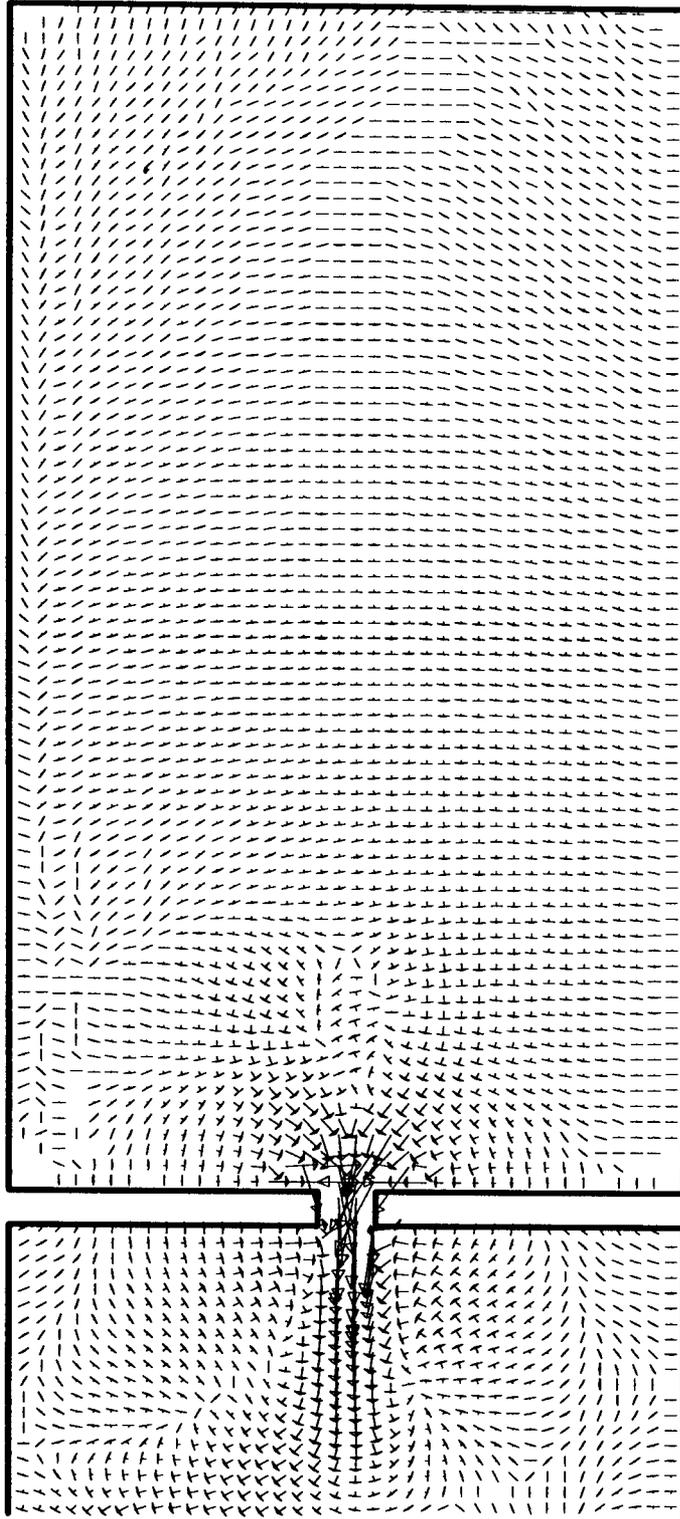
# **ANEXOS**



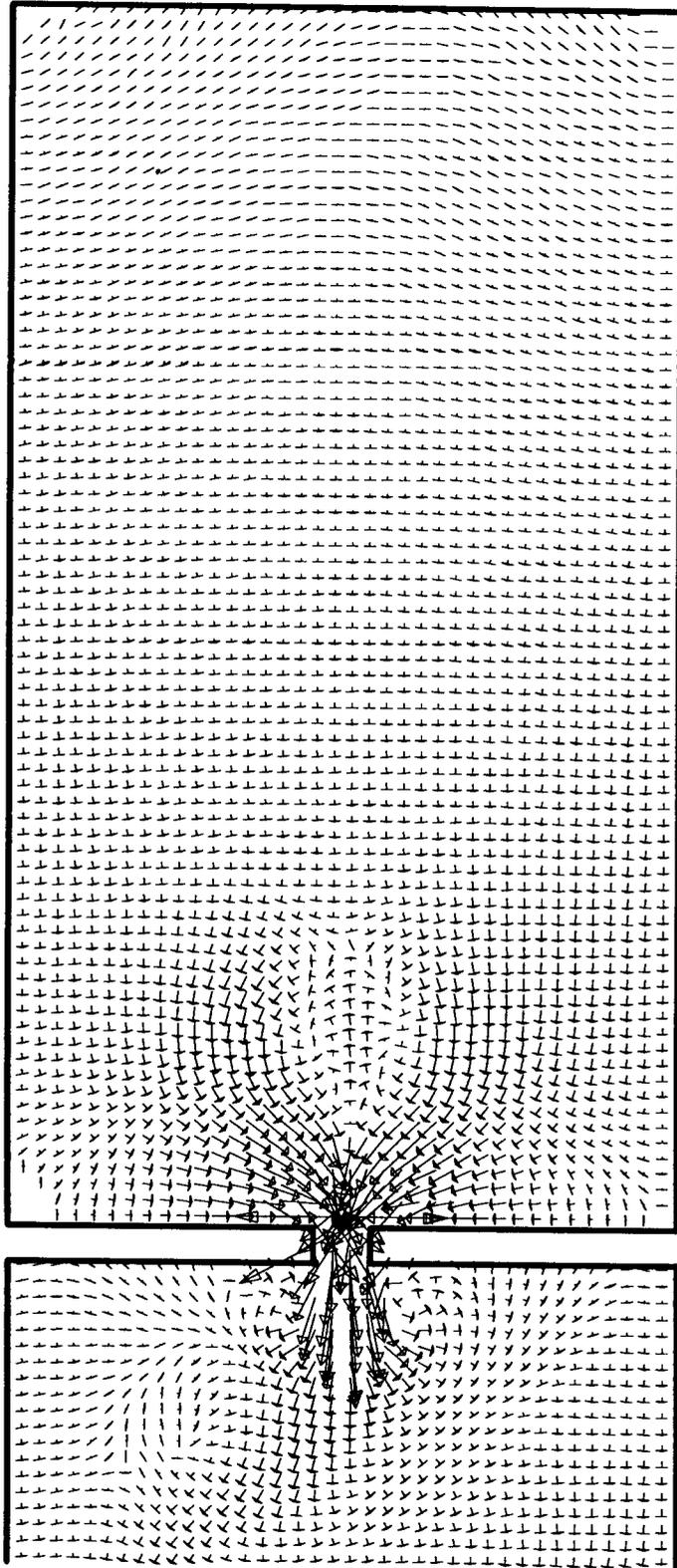
Octavo 1. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el estanque.



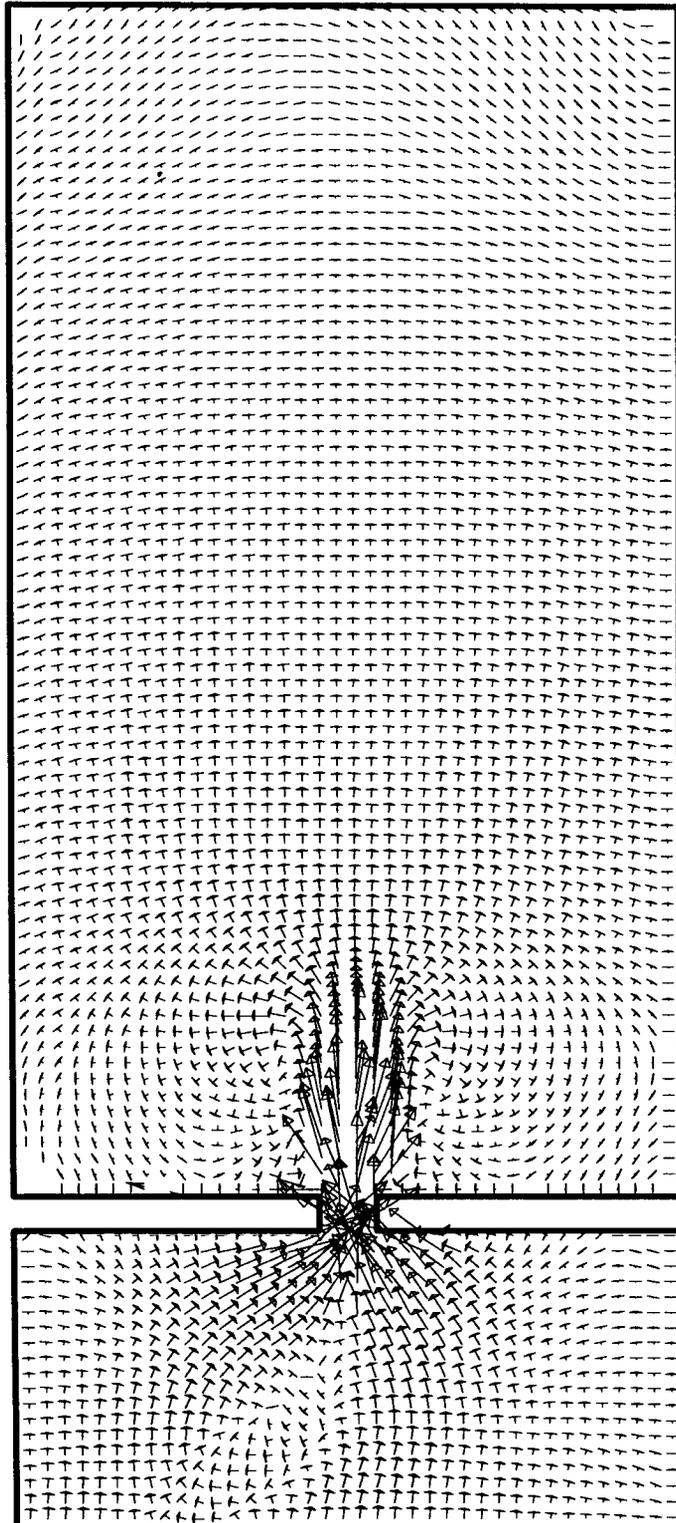
Octavo 2. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el estanque.



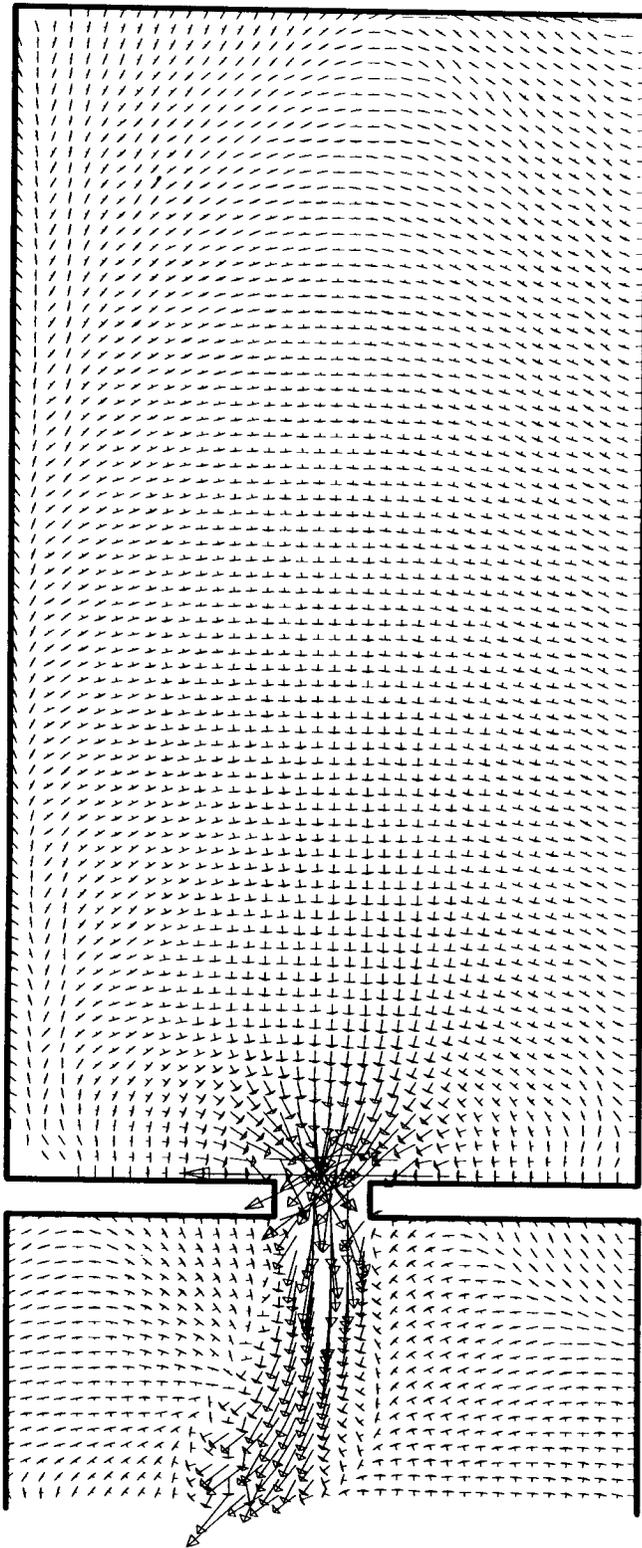
Octavo 3. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el estanque.



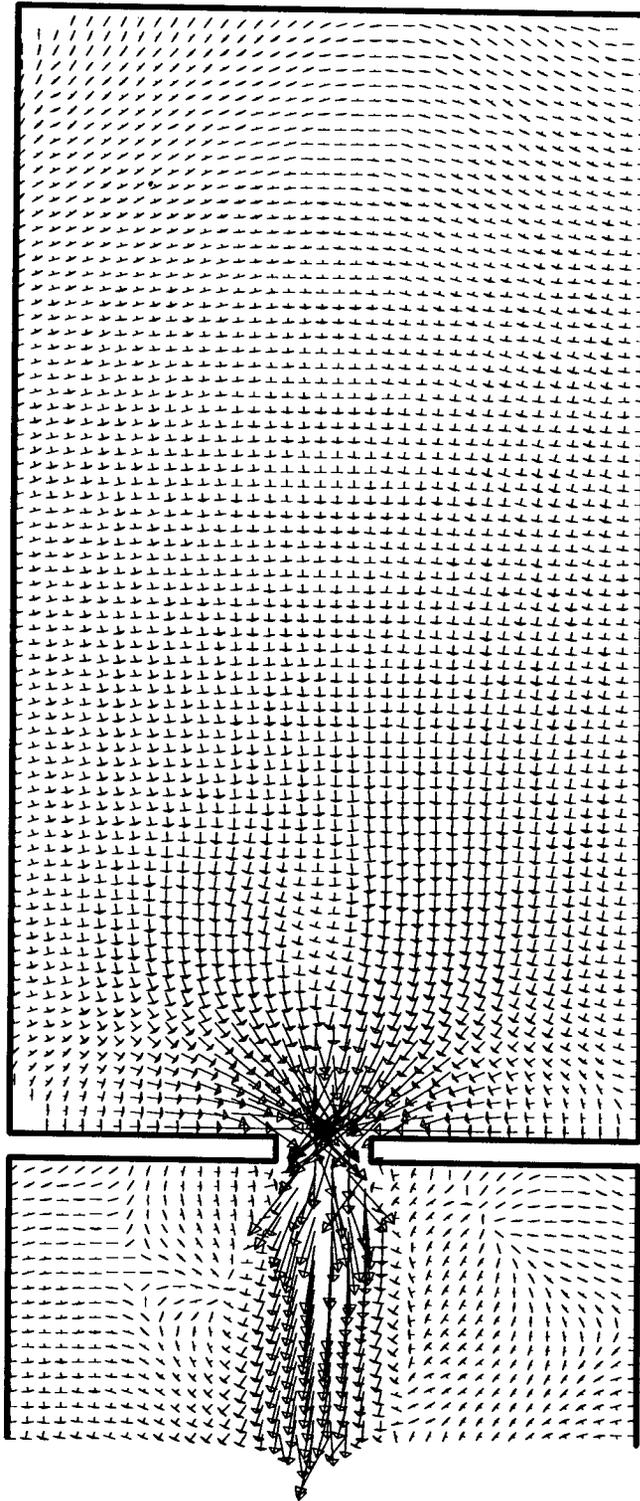
Octavo 4. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el estanque.



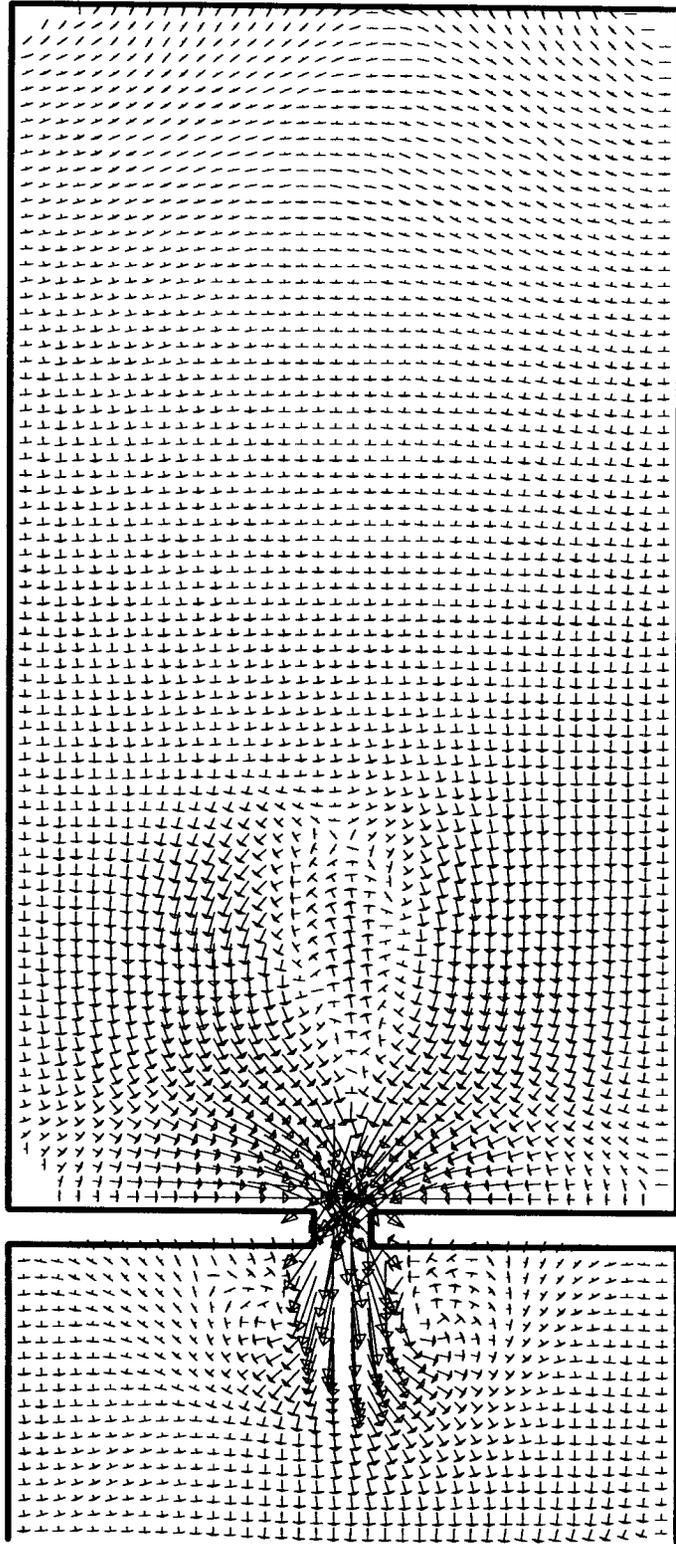
Octavo 5. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el estanque.



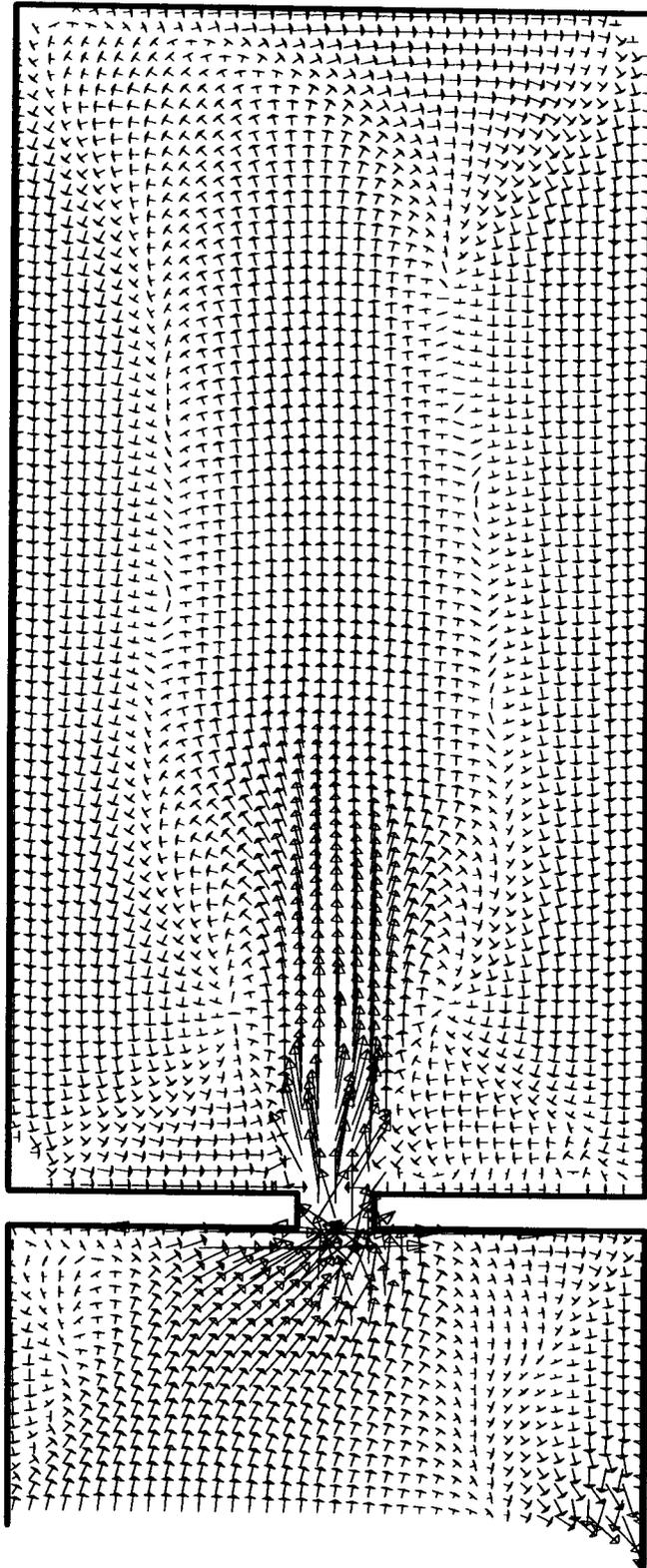
Octavo 6. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el estanque.



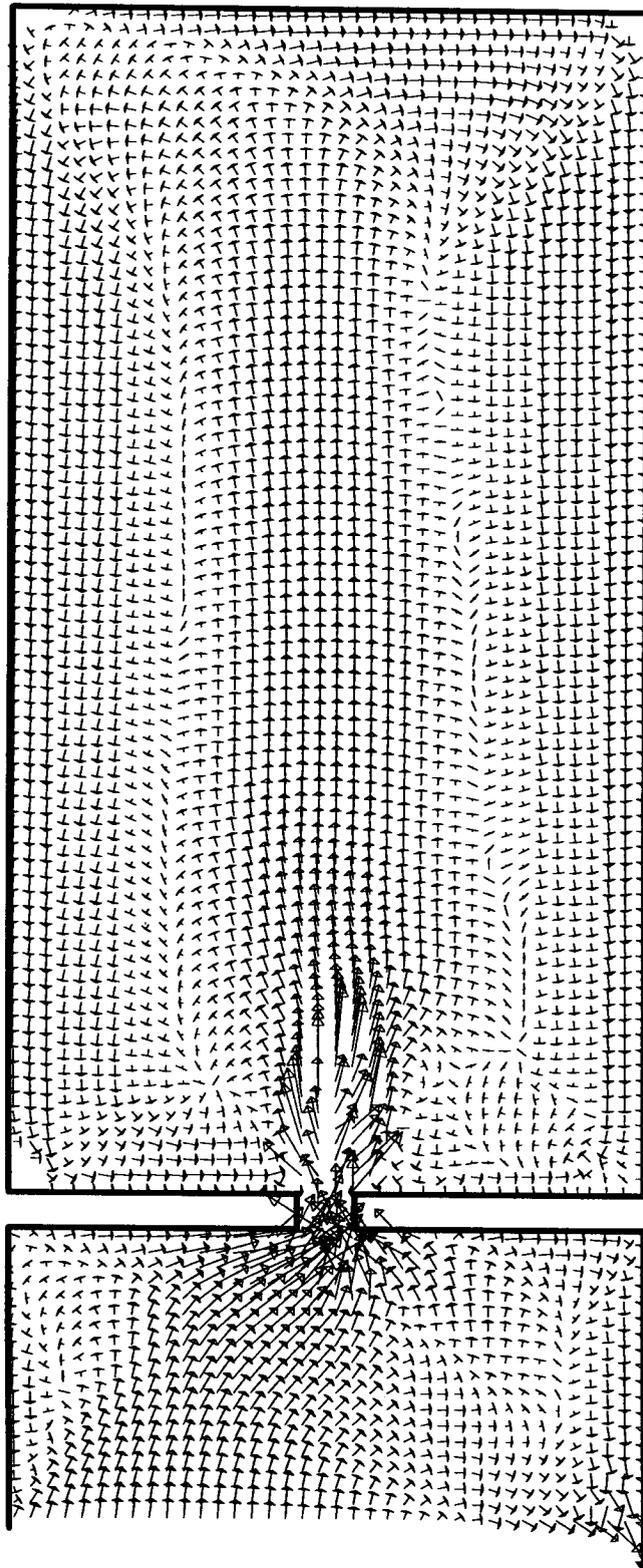
Octavo 7. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el estanque.



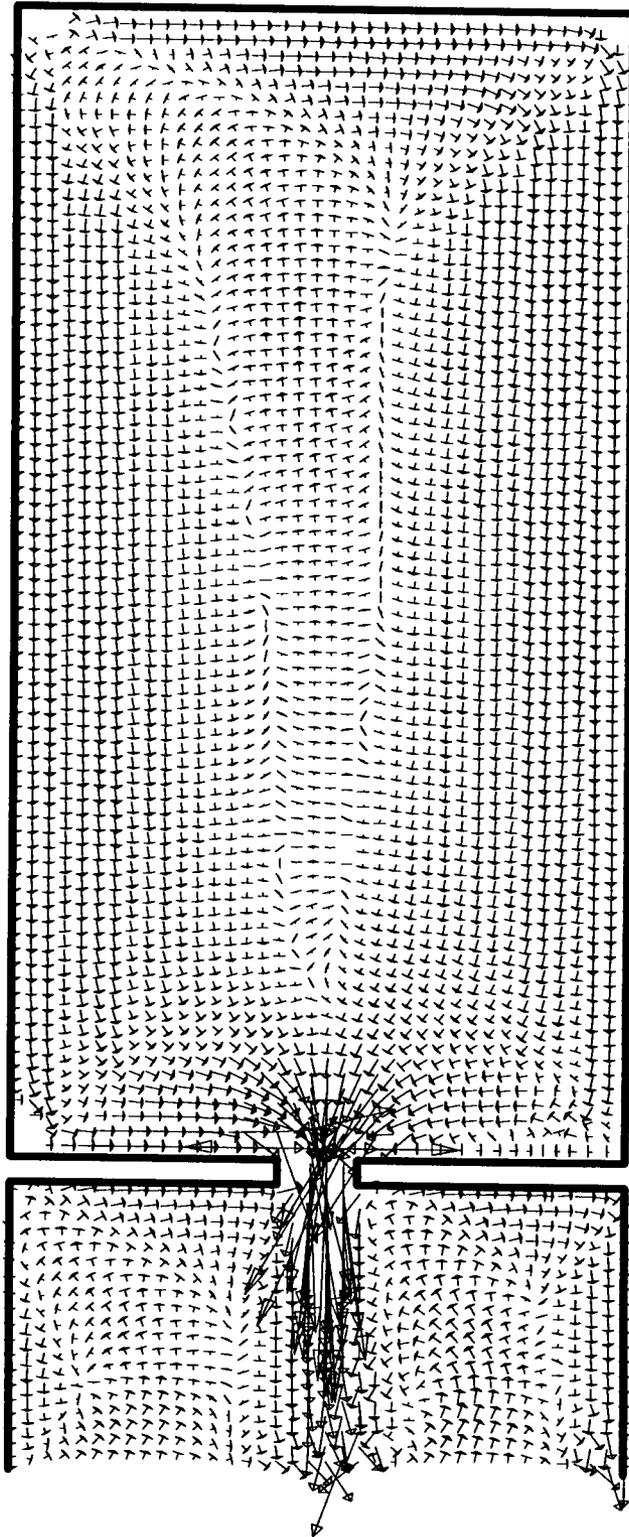
Octavo 8. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el estanque.



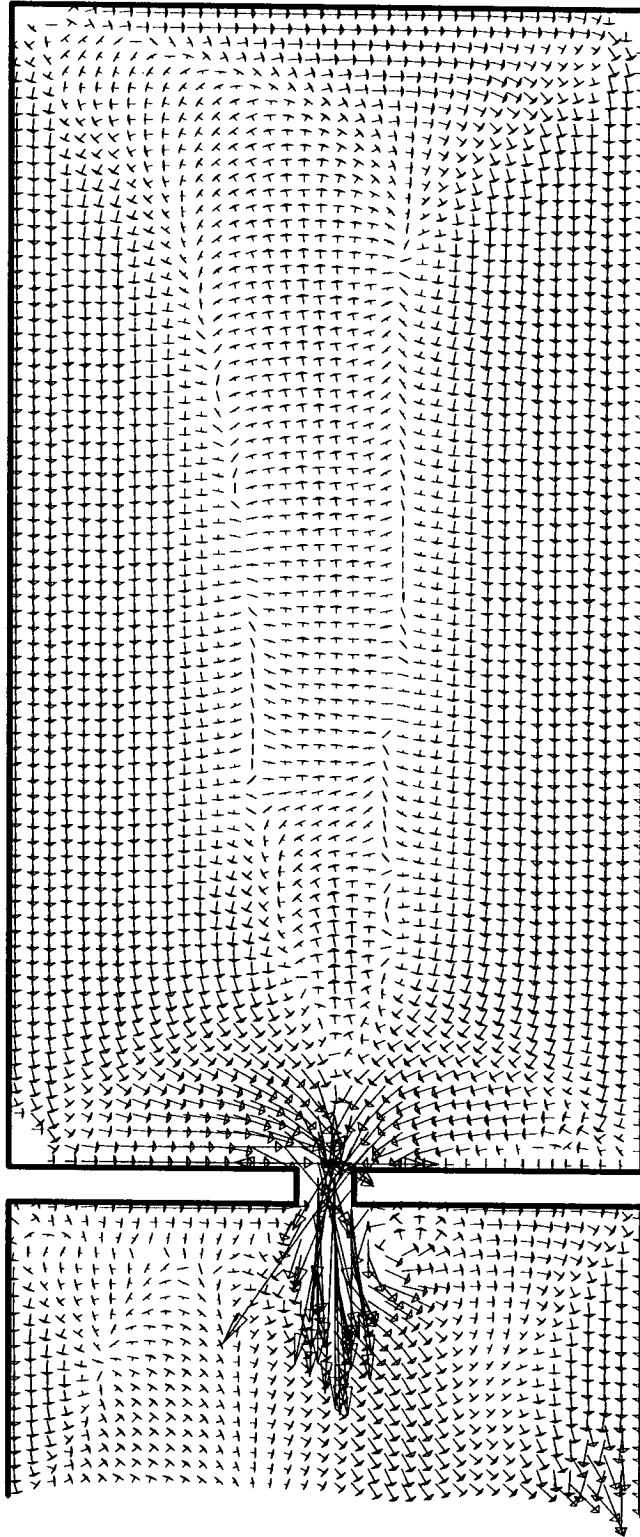
Octavo 1. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el estanque.



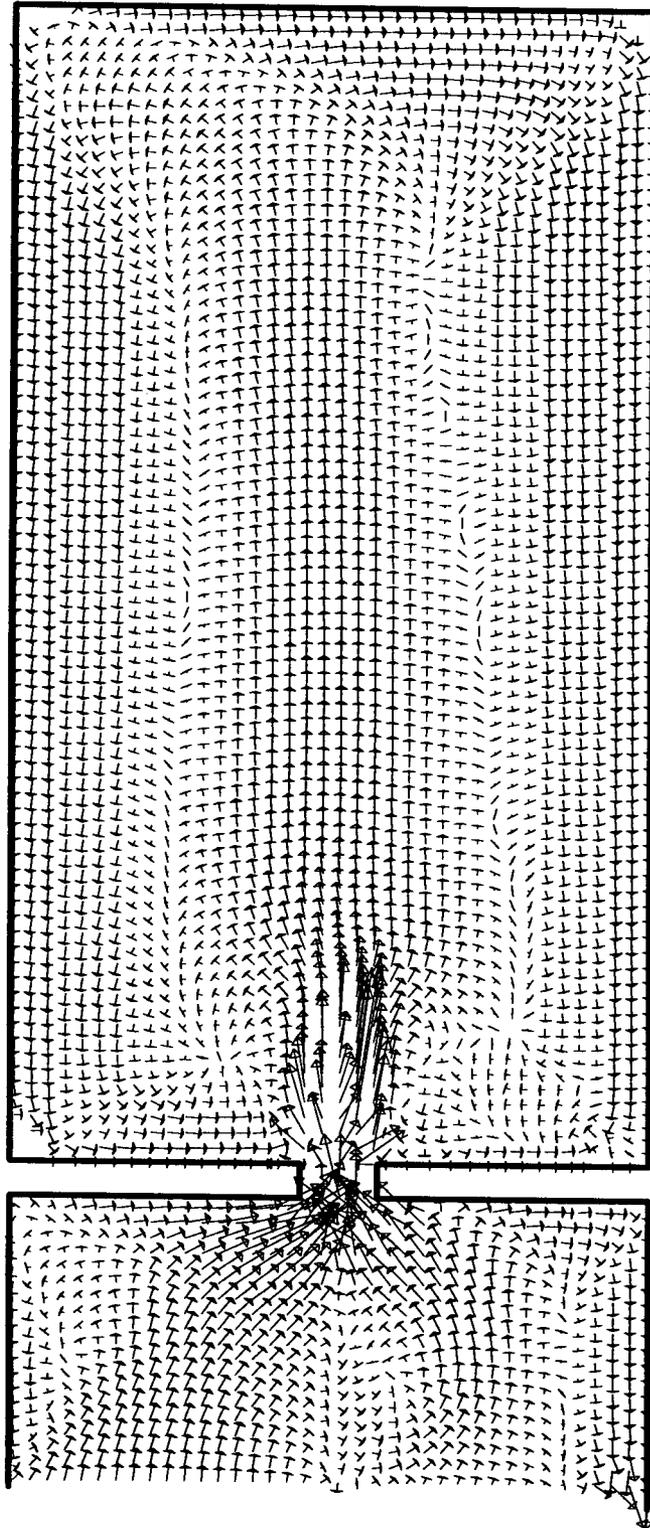
Octavo 2. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el estanque.



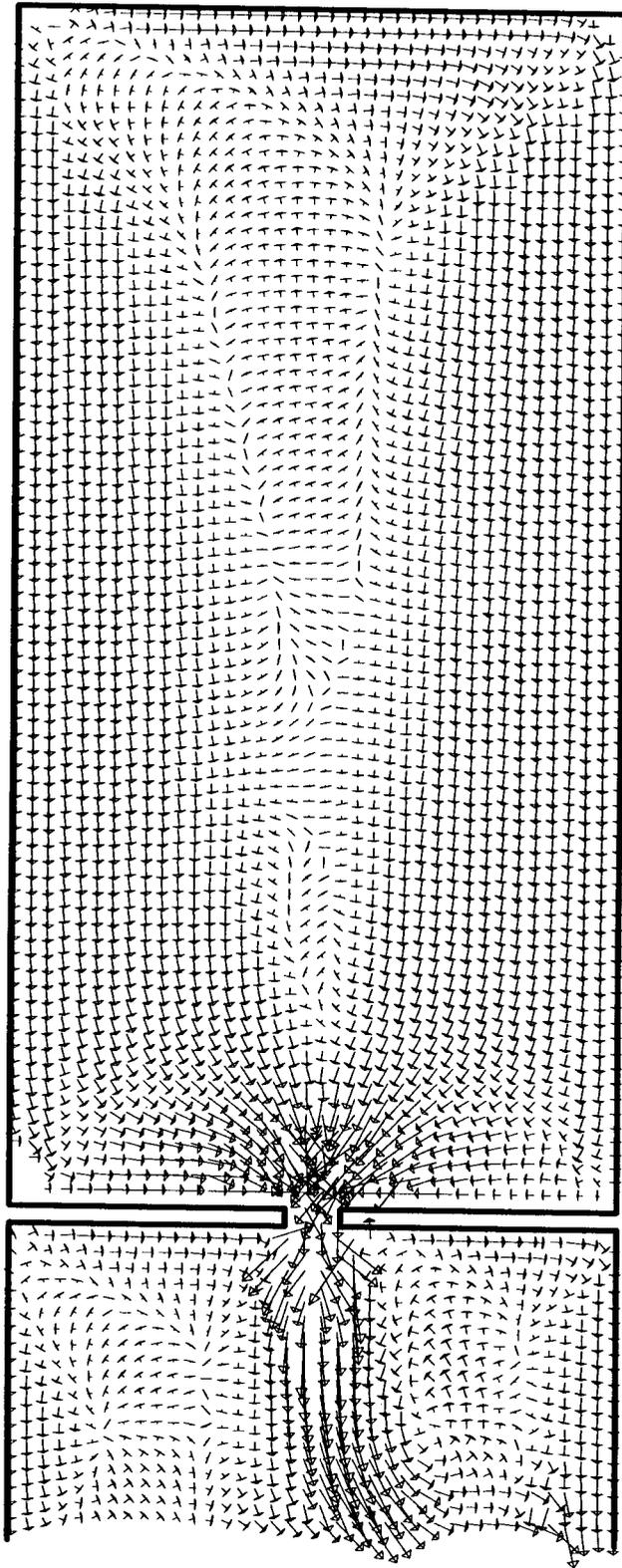
Octavo 3. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el estanque.



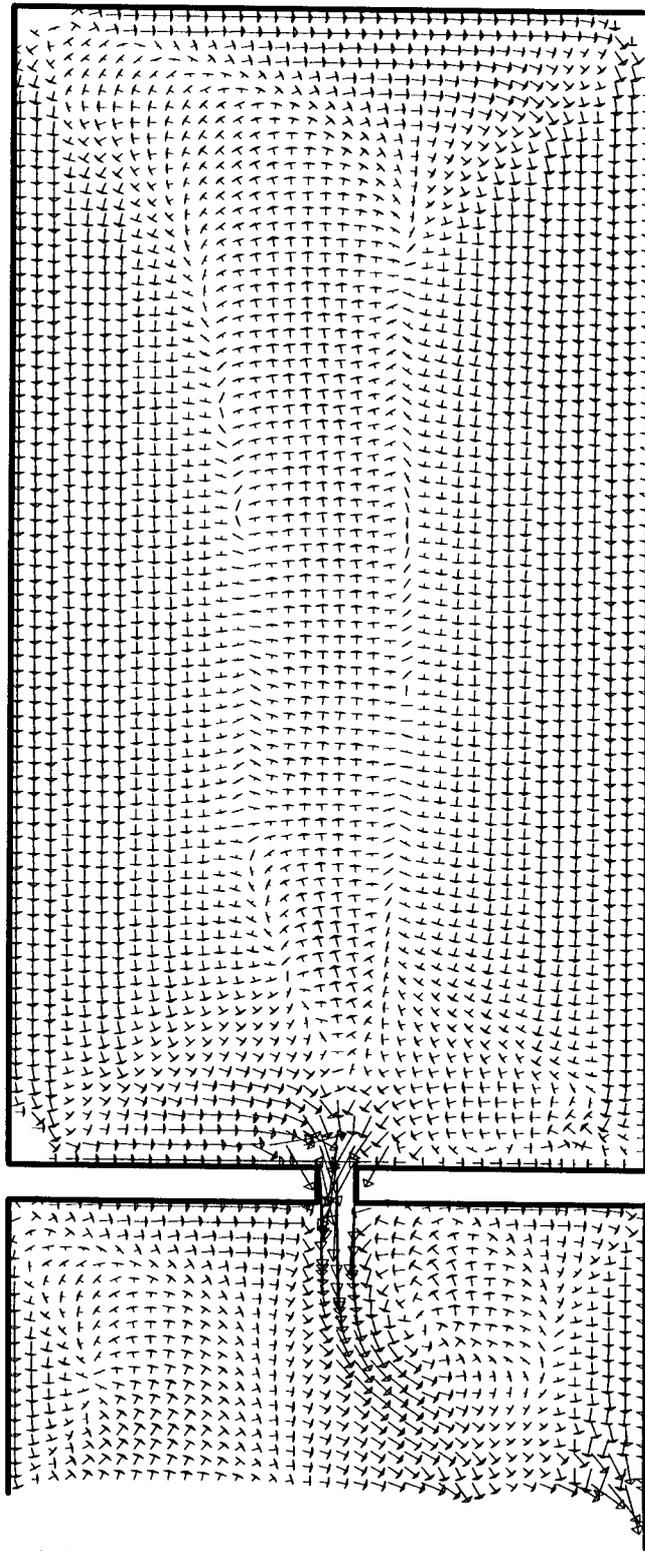
Octavo 4. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el estanque.



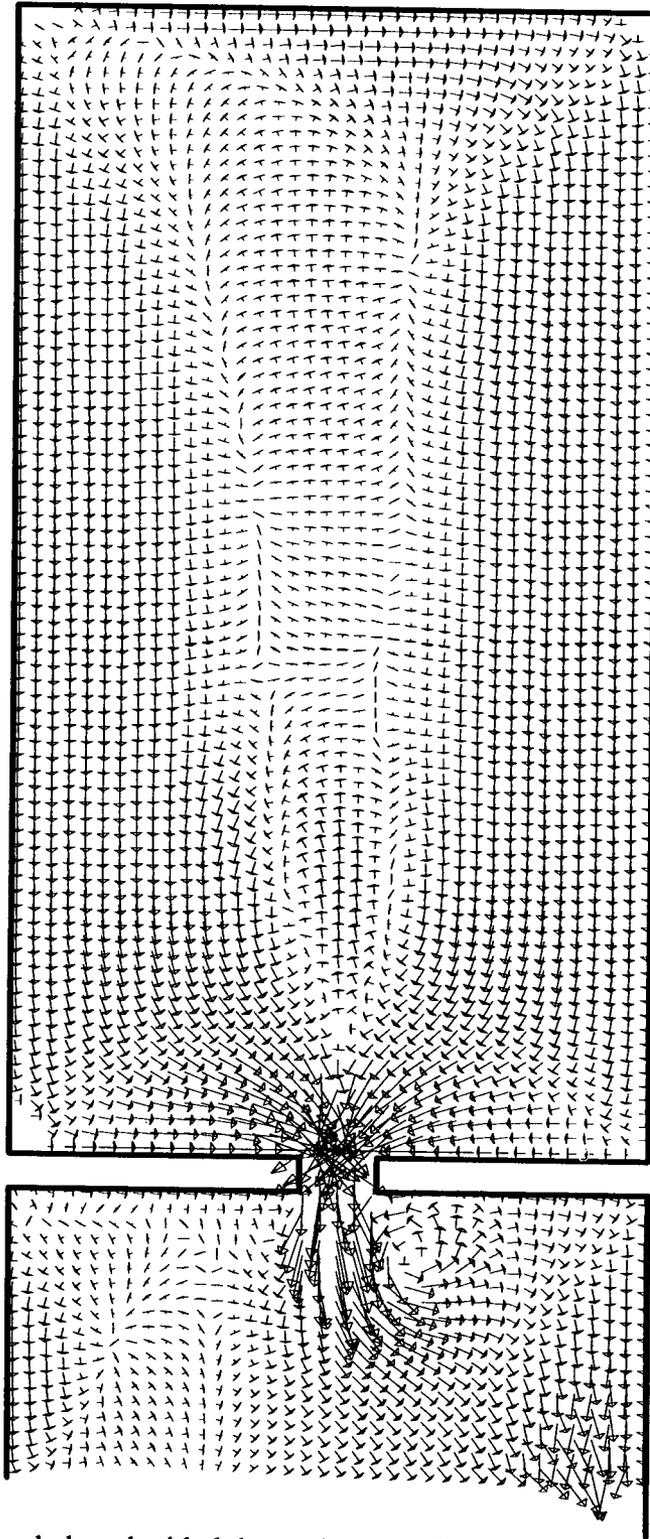
Octavo 5. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el estanque.



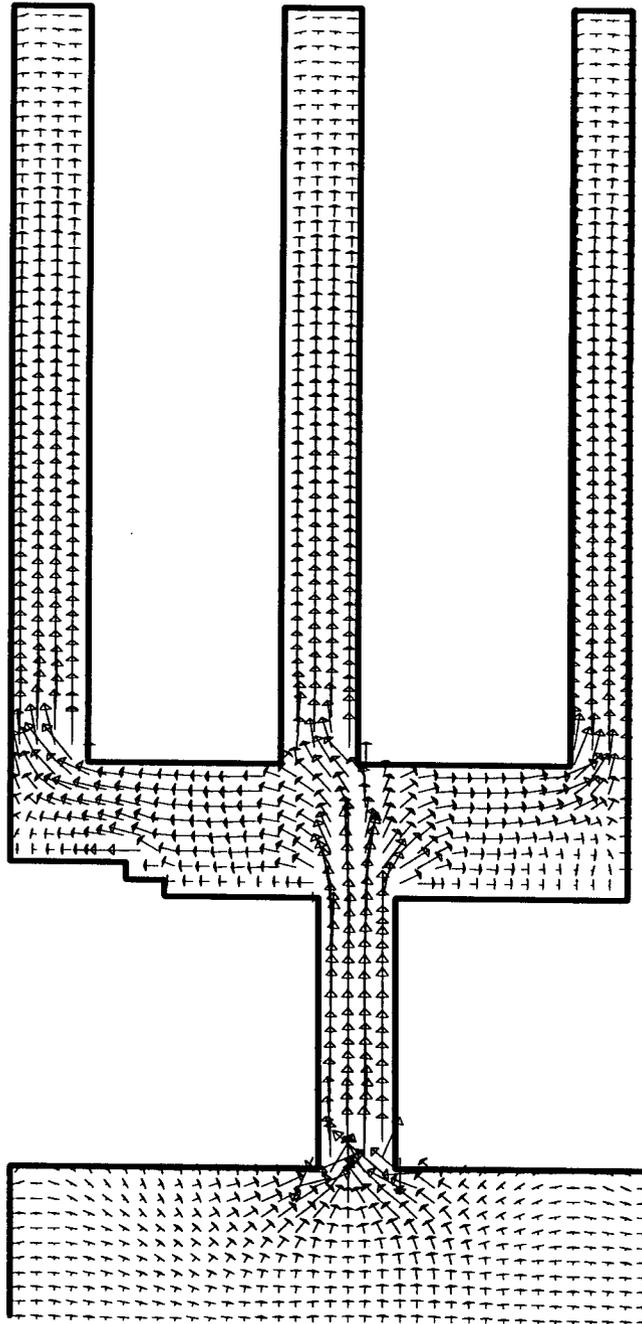
Octavo 6. Distribución de velocidad de corrientes inducidas por viento en el estanque.



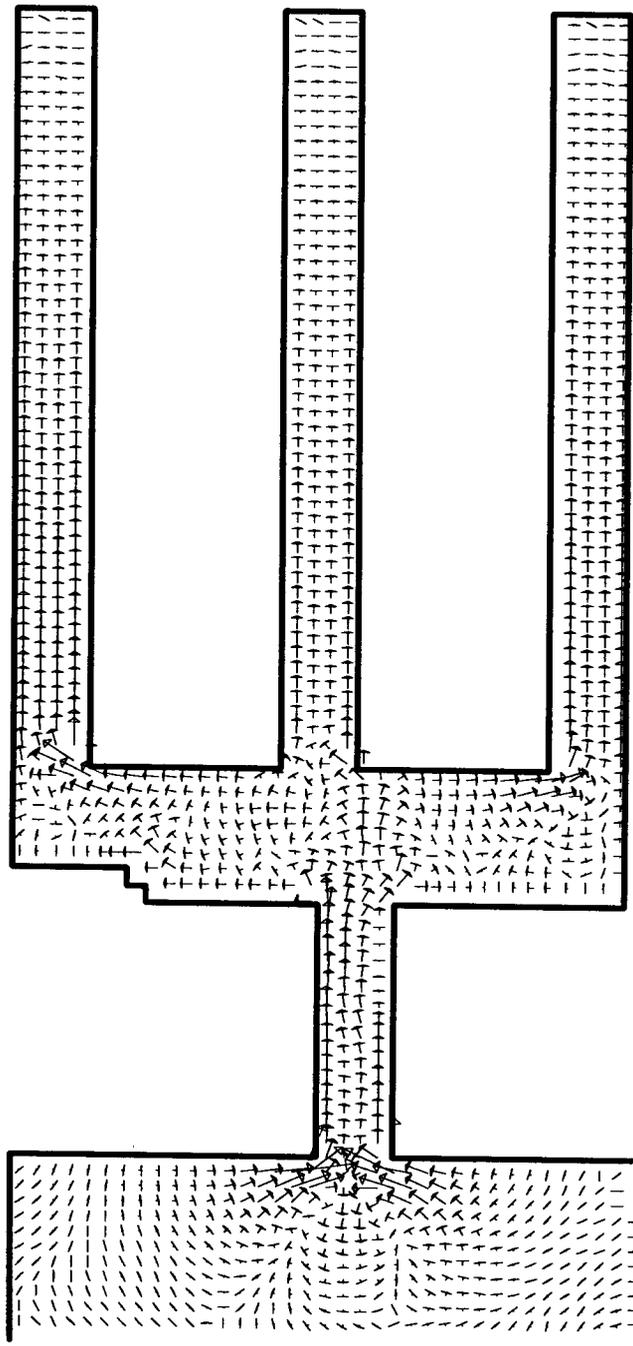
Octavo 7. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el estanque.



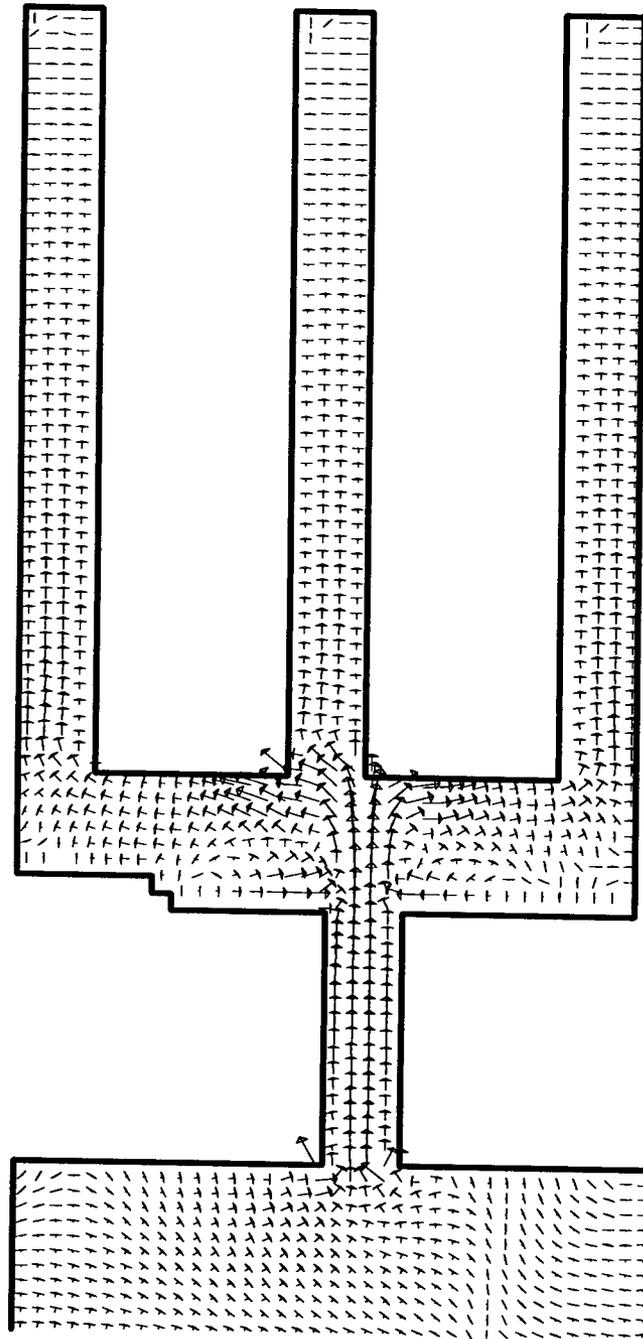
Octavo 8. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el estanque.



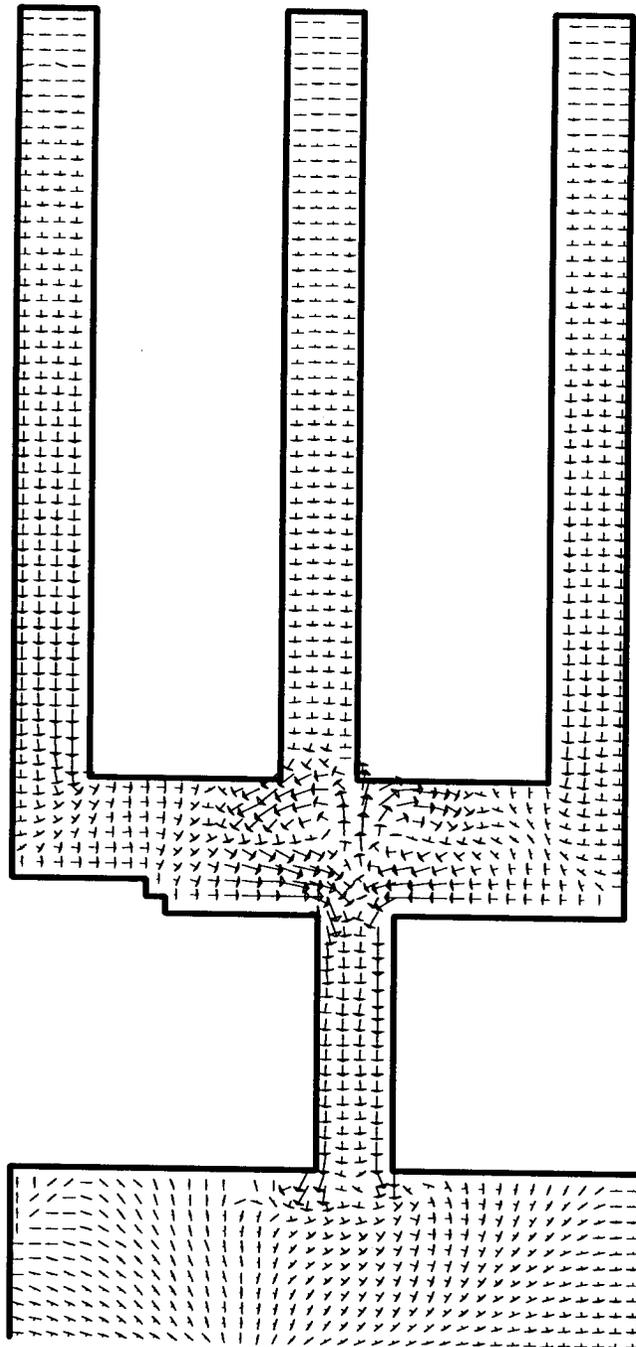
Octavo 1. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el tridente.



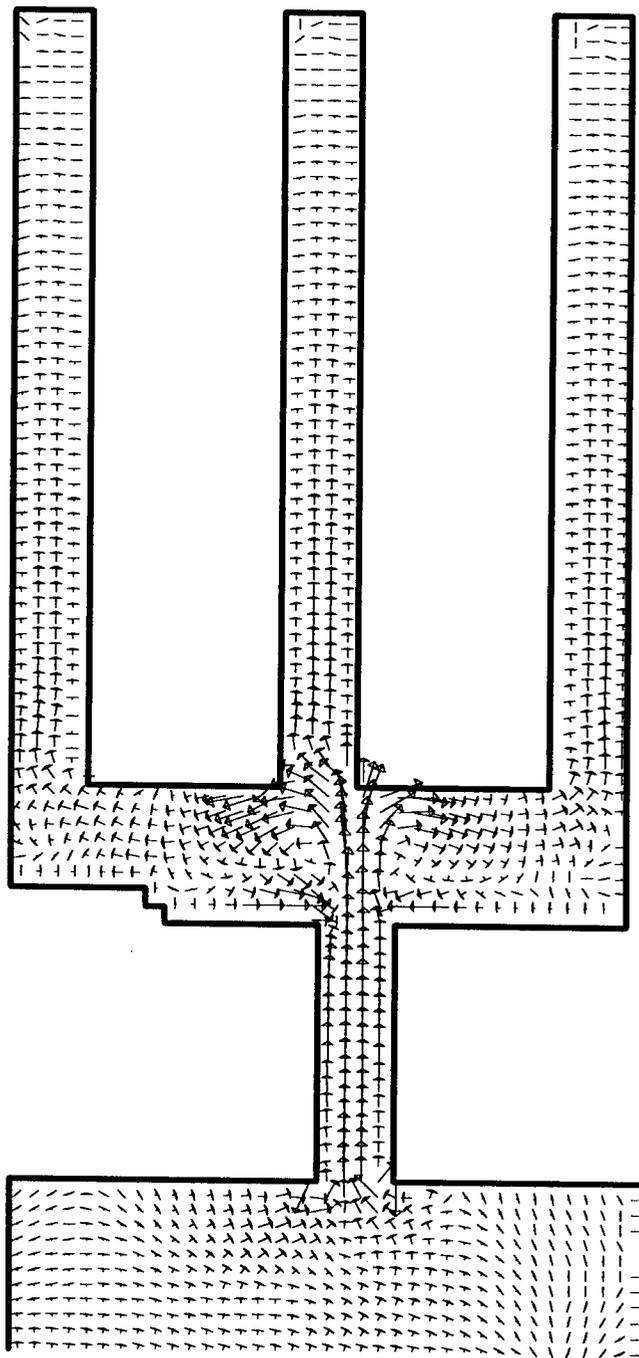
Octavo 2. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el tridente.



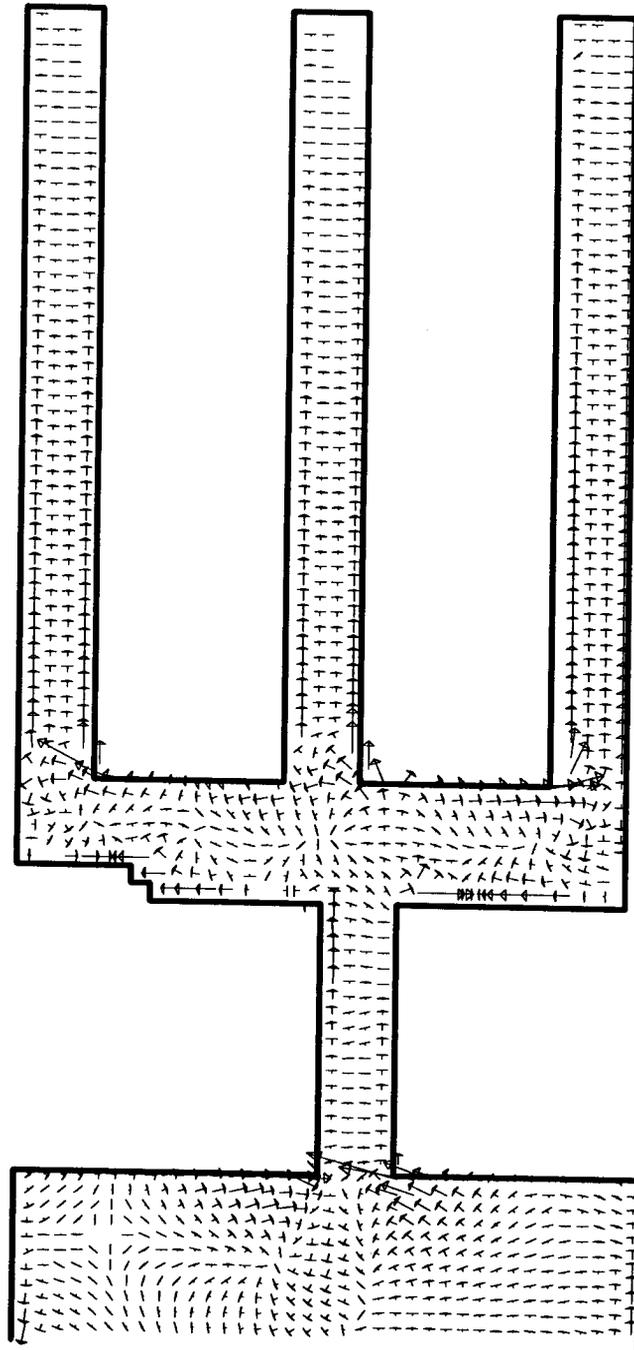
Octavo 3. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el tridente.



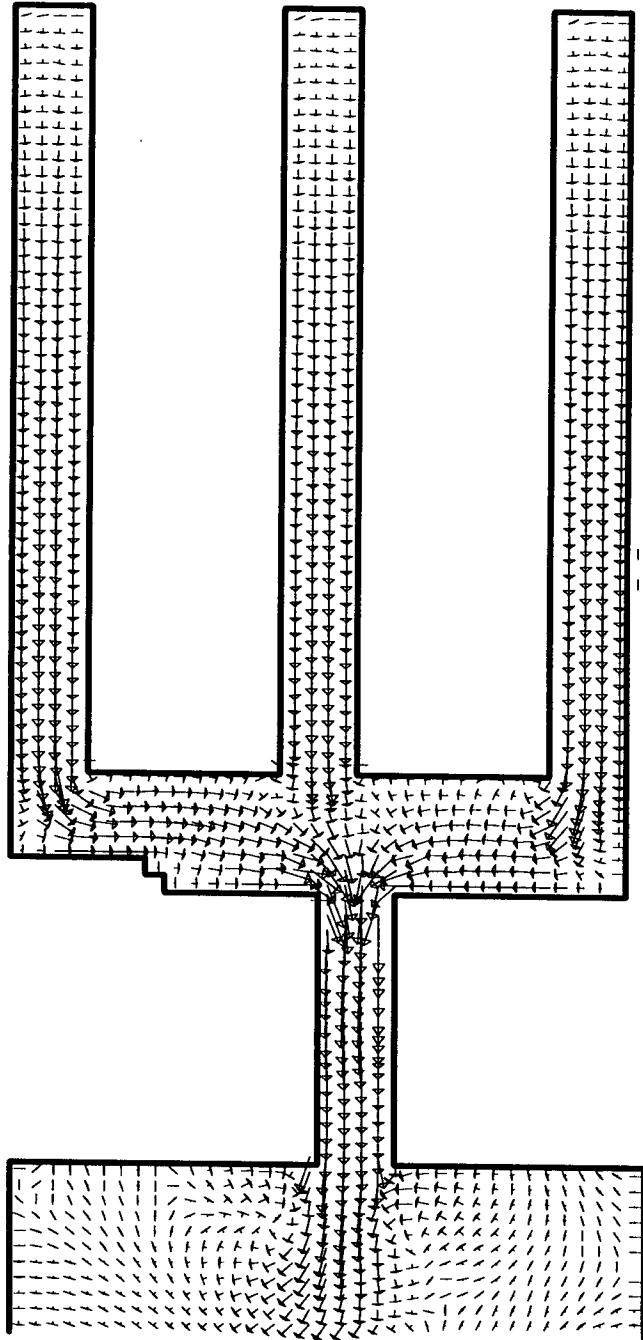
Octavo 4. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el tridente.



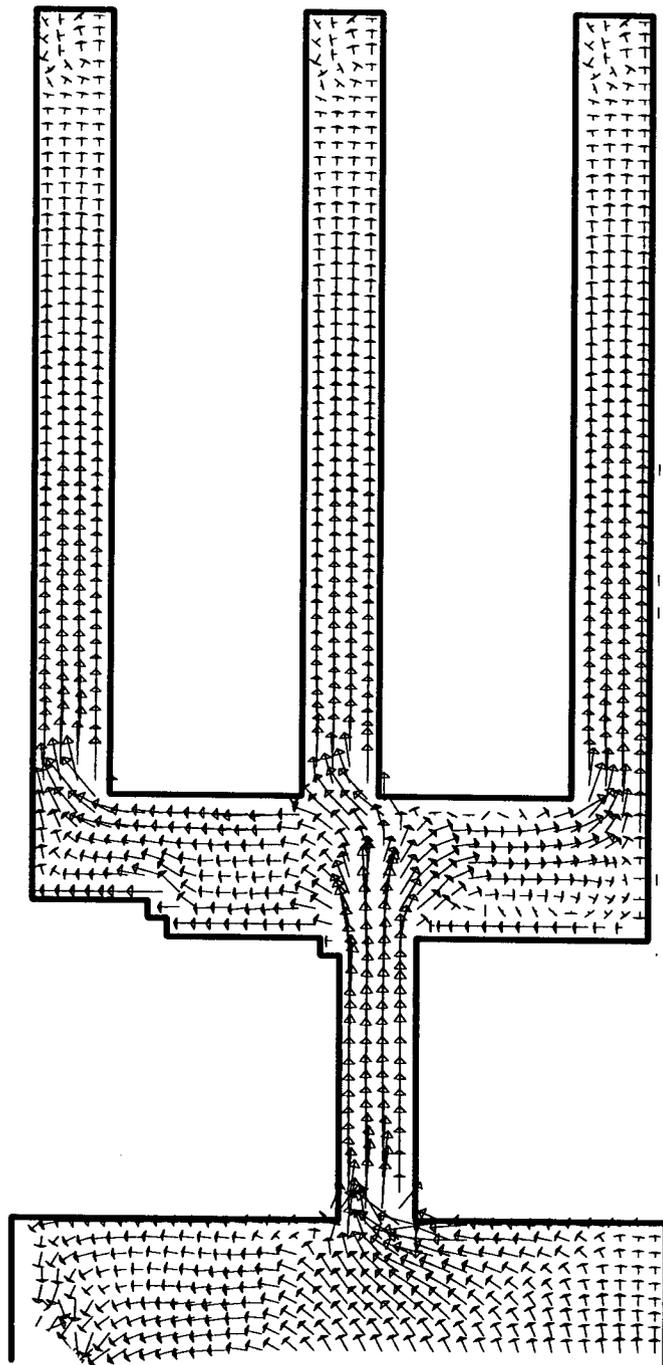
Octavo 5. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el tridente.



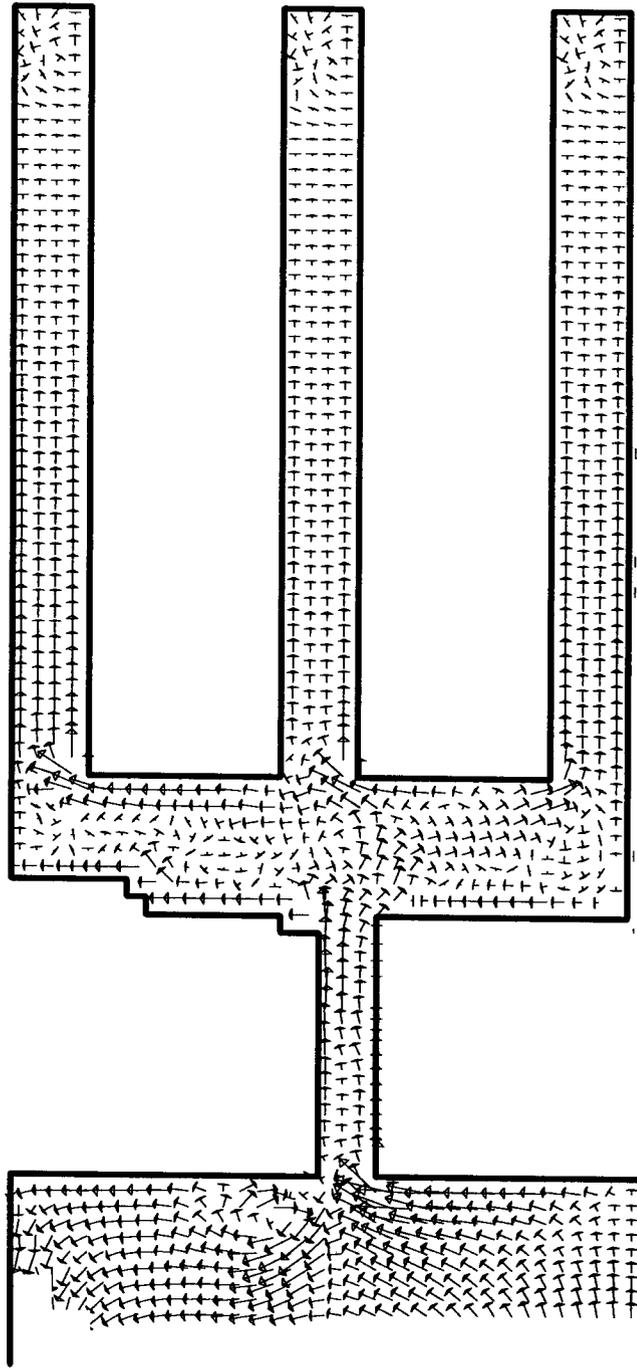
Octavo 6. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el tridente.



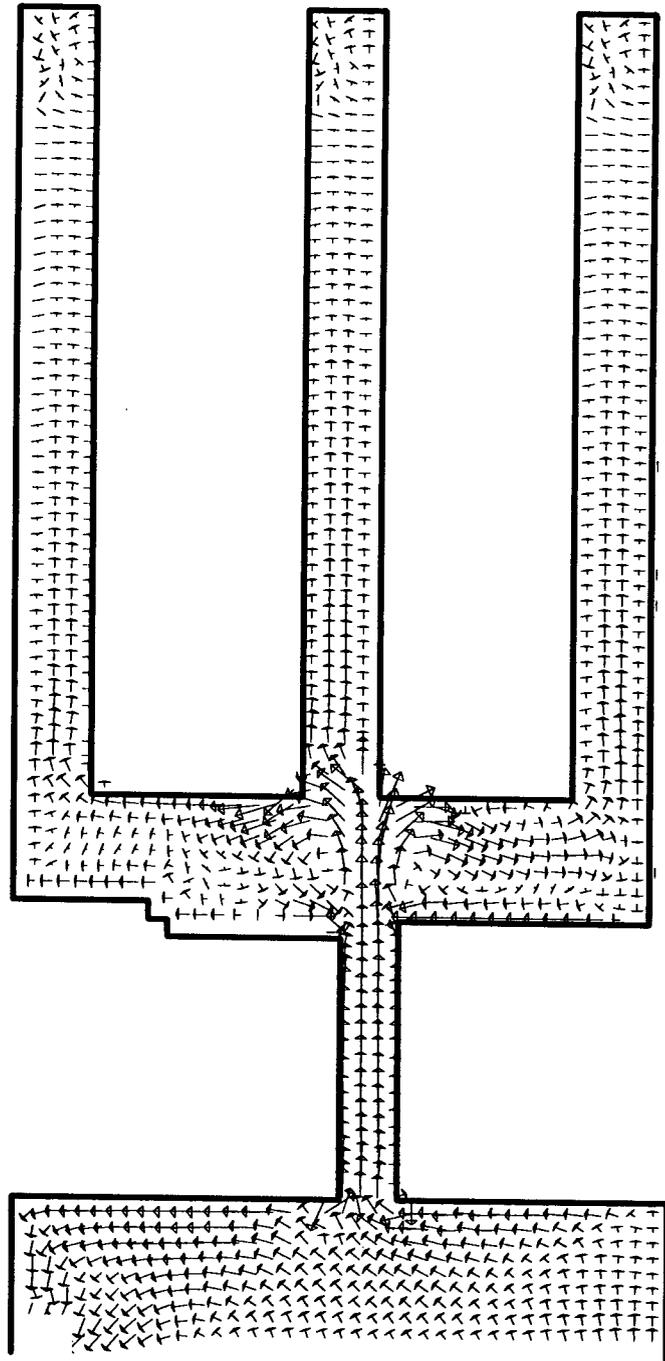
Octavo 7. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por marea en el tridente.



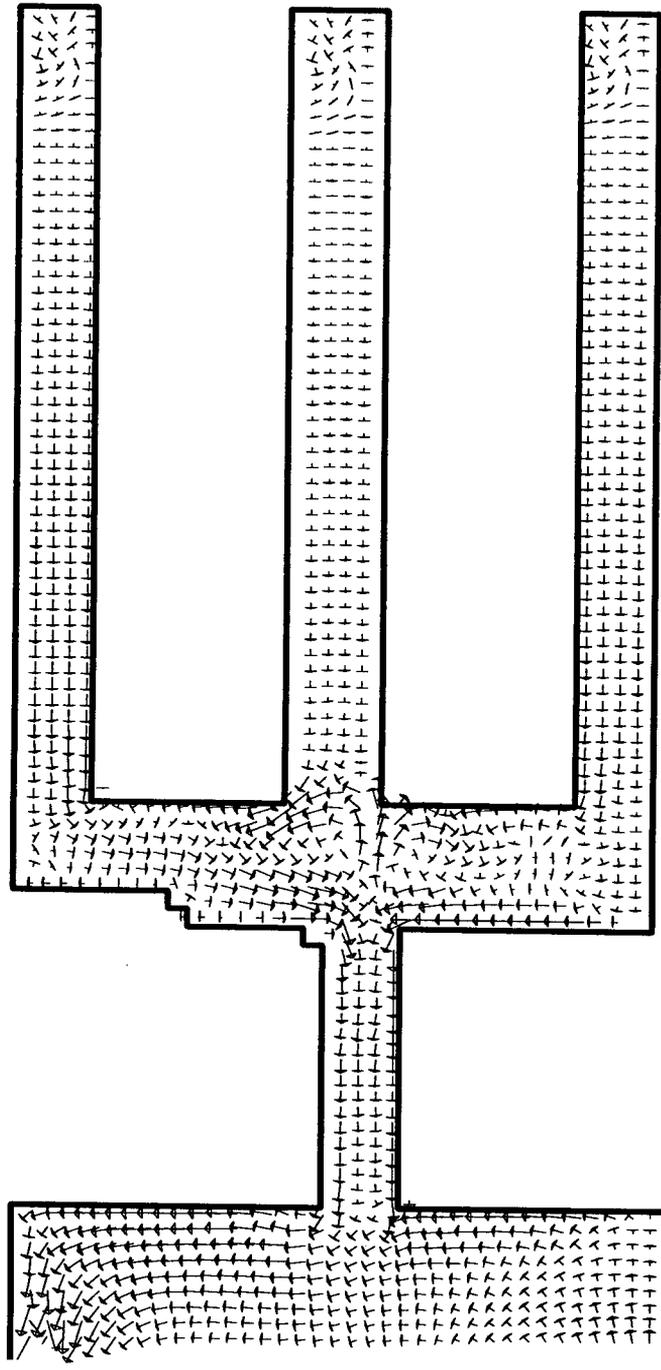
Octavo 1. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el tridente.



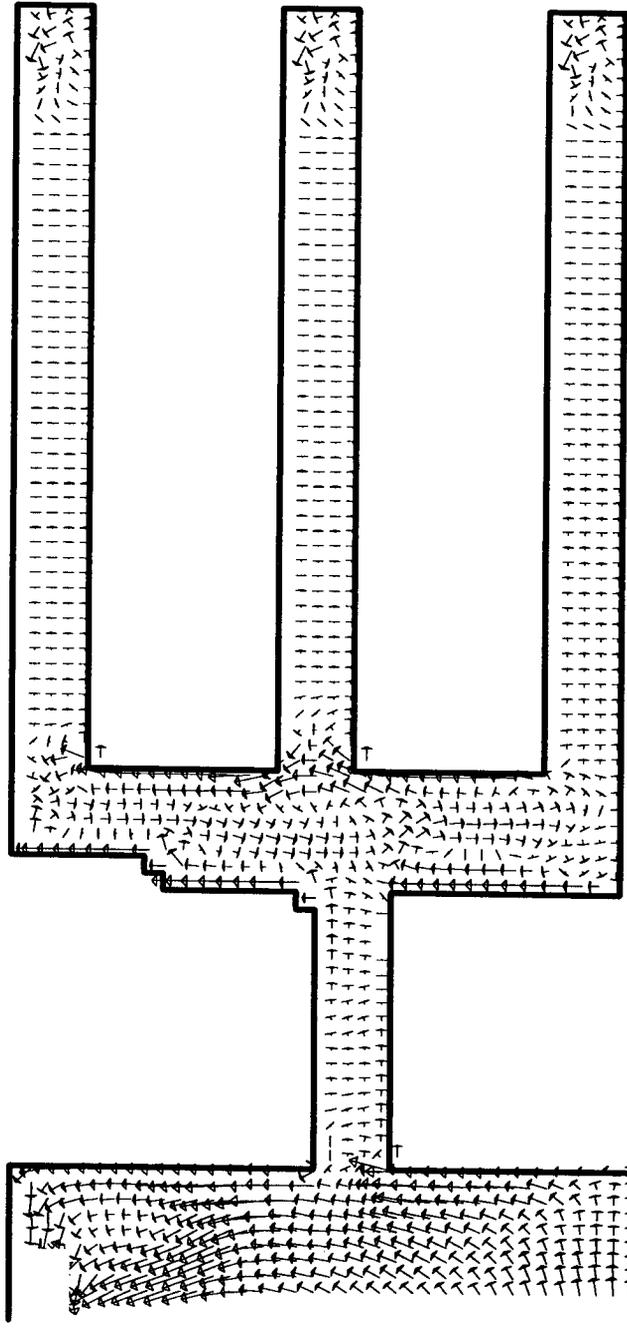
Octavo 2. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el tridente.



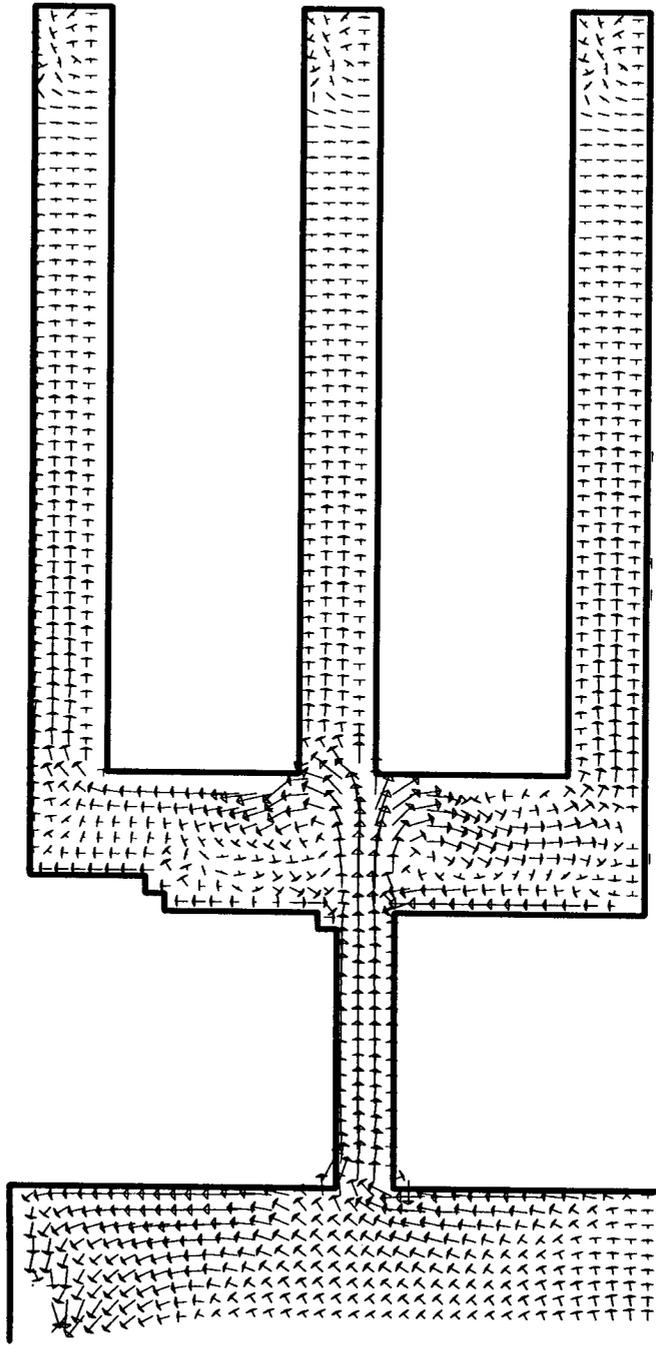
Octavo 3. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el tridente.



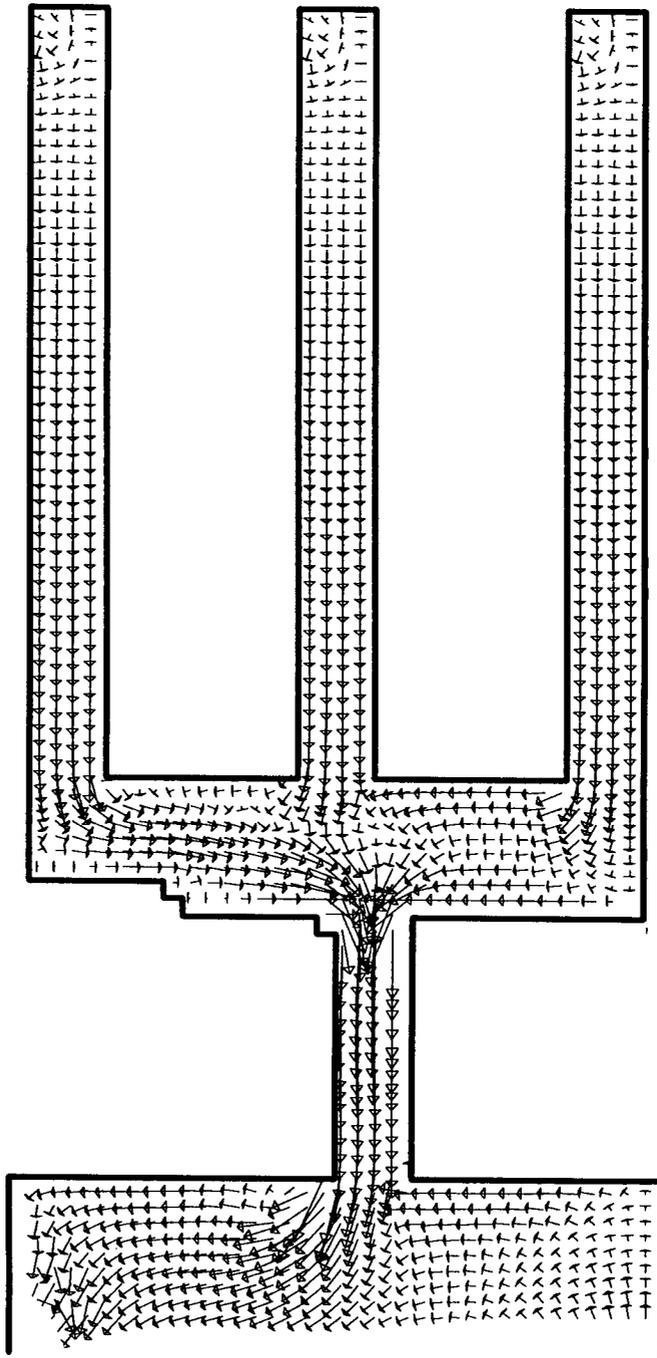
Octavo 4. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el tridente.



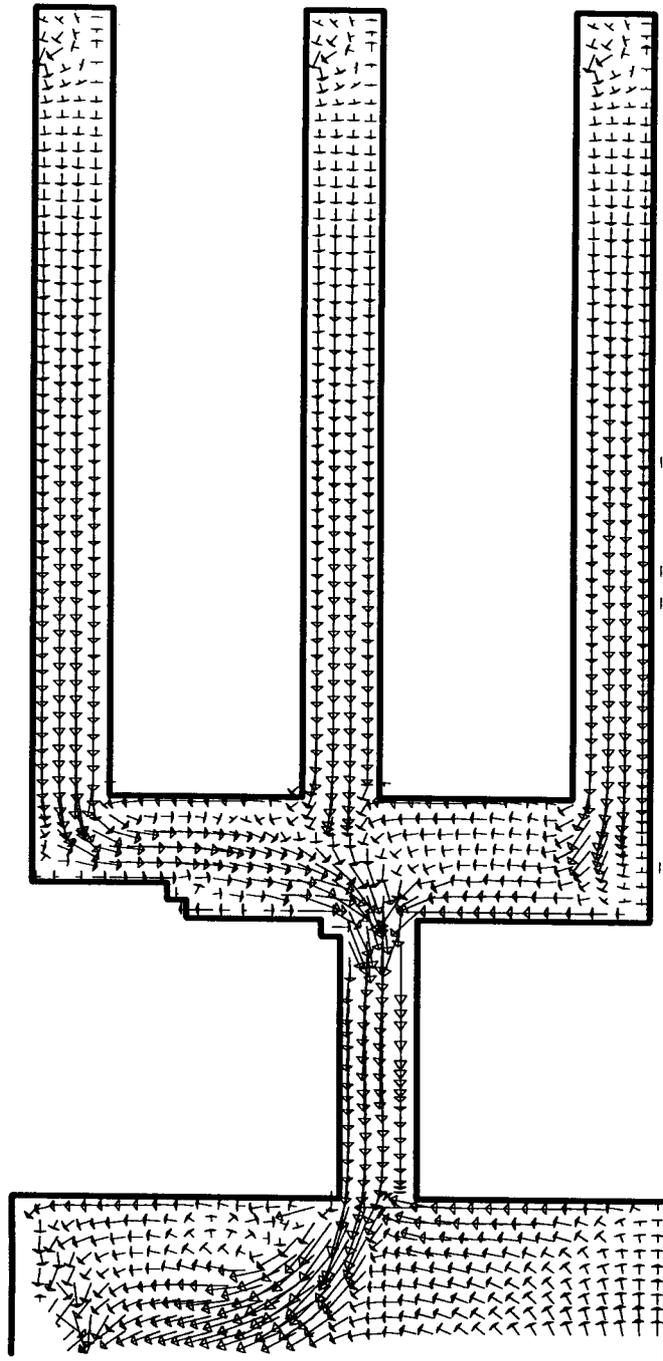
Octavo 5. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el tridente.



Octavo 6. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el tridente.



Octavo 7. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el tridente.



Octavo 8. Distribución de la velocidad de corrientes inducidas por viento en el tridente.