

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**



**“CARACTERÍSTICAS DE LA CIRCULACIÓN EN LA ZONA COSTERA**

**ENTRE PLAYITAS Y PUNTA MORRO”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**OCEANÓLOGO**

**PRESENTA:**

**GERARDO ALBERTO SOSA HERNÁNDEZ**

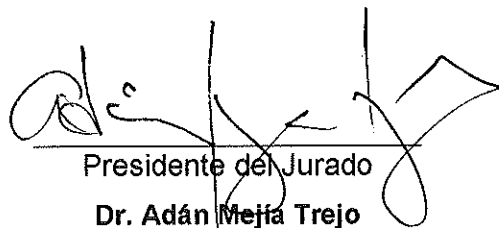
**CARACTERÍSTICAS DE LA CIRCULACIÓN EN LA ZONA COSTERA  
ENTRE PLAYITAS Y PUNTA MORRO**

TESIS

QUE PRESENTA:

**GERARDO ALBERTO SOSA HERNÁNDEZ**

APROBADA POR:



Presidente del Jurado  
**Dr. Adán Mejía Trejo**



Sinodal Propietario

**M.C. Oscar Eduardo Delgado González**



Sinodal Propietario

**Dr. Carlos Rodolfo Torres Navarrete**

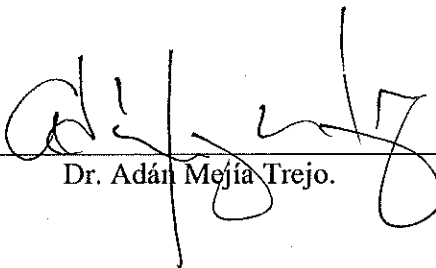


Sinodal Propietario

**M.C. José Rafael Blanco Betancourt**

Resumen de la tesis de Gerardo Alberto Sosa Hernández presentada como requisito parcial para la obtención de la licenciatura de Oceanología, Ensenada, Baja California, México, Abril del 2004. "Características de la Circulación en la zona costera entre Playitas y Punta Morro."

Resumen aprobada por:



Dr. Adán Mejía Trejo.

Resumen:

A partir de mediciones de corrientes y viento en la zona costera entre Punta Morro y la playa "Playitas", se caracterizó la circulación que existe en esta región. Las mediciones de corrientes se hicieron con dos ADCP's instalados en el fondo a 10 m de profundidad. Uno de ellos fue colocado enfrente de la UABC y el otro en "Playitas", separados aproximadamente 800 m y a 400 metros de la costa cada uno de ellos. Las mediciones de viento fueron tomadas de la estación meteorológica de la UABC. El periodo de medición fue de aproximadamente 6 semanas en Sep-Oct del 2002, en este se tuvieron diferentes condiciones de marea y viento lo que nos permitió caracterizar bien las corrientes, su variabilidad espacial y temporal, así como identificar los mecanismos de forzamiento

El viento durante este periodo mostró un régimen de brisas, la brisa marina se inicia a las 09:00 y termina a las 18:00 con una rapidez máxima promedio de 3.3 m/s a las 14:00 Hrs. con una dirección predominante es del W y WNW. La brisa terrestre es menos intensa, 1.3 m/s, y tiene una dirección variable. El transporte neto en Playitas es hacia el NW y en Punta Morro es hacia el SW con una mayor intensidad. Ambos transportes se ven fuertemente orientados por la forma de la línea de costa, sin embargo presentan gran variabilidad en las capas superficiales y de fondo. En Punta Morro, las capas superficiales se ven influenciadas por la corriente proveniente de N, las capas intermedias por la circulación de gran escala de toda la Bahía de Todos Santos y las de fondo por la batimetría. En Playitas las corrientes superficiales se ven influenciadas por el forzamiento directo del viento, las capas intermedias, de la misma forma que en Punta Morro, por la circulación de toda la Bahía de Todos Santos y en el fondo por la presencia de la forma de cuña que tiene la playa conocida 'Playitas'.

"El mundo está en las manos  
de aquellos que tienen el coraje de soñar  
y correr el riesgo de vivir sus sueños".

**PAULO COELHO**

Empieza por hacer lo necesario  
luego lo que es posible y de pronto,  
te encontraras haciendo  
lo IMPOSIBLE

**SAN. FRANCISCO DE ASIS.**

*Dedico esta Tesis.*

*A Dios por llenar mi vida de dicha, felicidad y bendiciones.*

*A mi país por esperar lo mejor de mí.*

*A mi Mamá, eres mi fuente de fortaleza, porque siempre creíste en mí desde el principio y nunca dejaste que me cayera. Con solo escuchar tu voz, me enviabas la fuerza necesaria para salir adelante todos los días. TE AMO MUCHO*

*A mi Papá, por su esfuerzo y gran apoyo que me brindaste y nunca dudar de poder lograrlo; por darme las bases de mi estudio, el coraje y ejemplo de lucha ante la vida, esa es el arma secreta ante momentos difíciles. TE QUIERO*

*A mis hermanos Juan José Sosa y Sergio A. Sosa, porque cada uno a su manera, apporto su granito de arena para que este sueño se hiciera realidad, se que cuento con ellos siempre.  
LOS QUIERO MUCHO*

*A mis abuelos por enseñarme a apreciar las cosas buenas de la vida y sus enseñanzas que siempre llevare conmigo.  
LOS LLEVO CONMIGO*

*Sir Lord Robert Stephenson Smith Baden Powell of Gill well (B.P)  
("Siempre dejar un mundo mejor de lo que lo encontramos")*

## AGRADECIMIENTOS

Ya hace mas 5 anos que comencé esta gran aventura que inicio como un sueño. nunca imagine que podría llegar tan lejos, aprender tantas cosas increíbles y maravillarme que tan grande es el océano y todo lo que alberga en sus aguas.

Todo este camino no lo hubiera podido recorrer yo solo, agradezco a toda la gente que compartió algo y que estuvo conmigo en cualquier momento.

A mi director de Tesis, Dr. Adán Mejía Trejo por darme la oportunidad de trabajar y aprender tantas cosas, así como la amistad que me brindo y por tener la paciencia ante mis dudas y por escuchar atentamente los problemas que surgieron a lo largo de esta Tesis. Para el mi reconocimiento permanente y mi gratitud

A mi asesor M.C. Oscar Delgado, con quien tuve la fortuna de construir este trabajo; que con su empeño, entusiasmo, dedicación y sus oportunos consejos, me enseñó la disciplina de conocer y del saber, la solidaridad del trabajo y el esfuerzo permanente para el logro de mis propósitos, como claves fundamentales para el ejercicio profesional.

A mi sinodales Dr. Carlos Torres y M.C Rafael Blanco Betancourt por su apoyo en el campo y obtención de datos, por sus valiosos comentarios y correcciones a esta tesis.

A los profesores M.C Sergio Larios, Oc. Eduardo Gil y Oc. Julio C. Figueroa quienes siempre estuvieron dispuestos a escucharme y prestarnos su colaboración. Y a la ya ahora M.C Nancy Pérez que me ayudo a entender muchas cosas que no sabia.

En especial a uno de mis grandes Amigos y casi hermano Rogelio Cano Cetina, que estuvo y compartimos tantas cosas durante esta carrera, y que no son carreritas. Por tantos momentos, platicas, campamentos, cafeses, se que siempre tengo su apoyo. **Gracias por confiar.**

A Nadia Elisa Suárez Bosche, siempre me apoyaste y me animaste en todo momento, por enseñarme que existen increíbles personas como tu, por tener siempre ese brillo y esa magia tan especial que es de gran motivación para mí, pero sobre todo por que **Te Quiero Mucho.**

A Cecilia Peralta Ferriz, porque ahora en mi mano cuento con una amiga más, por compartir conmigo buenos instantes, por tus aportaciones y comentarios a esta tesis, por hacer más agradable el convivió de todos los días.

A mi *Alma Mater* UABC (FCM) por los conocimientos adquiridos, el valor de su gente, y al IIO, por proporcionarme un espacio para desarrollarme como profesionista.

A Paola Rodríguez aunque estés lejos me apoyaste moralmente

A todos mis compañeros que durante la carrera me brindaron su apoyo y amistad: Beto Antuna, Fernanda Samaniego, Ariel Quezada, Gaby Alarcon, Rodrigo Estrella, Paulina Balbontin, Viviana Maccxise, Bertha Ramos y Alejandro Sánchez, a mis amigos de Panamá Omar Spiegel y Alejandra Blazer, mis compañeros de generación Hots Spots y la iguanas marinas, Aleph Jiménez, Pablo Duarte, Vanesa Rosales, Nemer Narchi, Enrique Quintero, Amilcar, Lucina Iñiguez, Ikerne Aguirre, Diego Campa, Camilo Rendón, Santiago, Evaristo Rojas, Veró, Julio Aldana, Eduardo Sierra, Adrián Torales, Xani, El Chupas, a los del Kunfu.

No puedo olvidar a mi maestra de ingles Tirzza Tanahara por sus clases tan valiosas para entender otro idioma y lograr titularme.

Y perdonando a mi pobre memoria, a todas las personas que tuve el gusto de conocerlas y compartir con ellas una parte de mi vida. A los Scouts de Ensenada.

A la raza de Guanatos, que tuve contacto con ellos y no me dejaron: Poncho Gómez, Karina León, Eduardo Sánchez, Carolina Montes y Gloria Castillo, en la amistad no importa la distancia espacial.

A mis maestros que involucraron en mi formación profesional, mi reconocimiento y mi gratitud hacia ellos: Manuel Moreno, Graciela Guerra, Rafael Hernández, Toño Martínez, Francisco Suárez, Yolanda Schramm, Francisco Becerril, Armando Pinal.

Al personal de la Heroica Facultad de Ciencias Marinas, que por hacer el tramite mas ágil y rápido: Mary Hedz, Neli, Rosario Sánchez, Angélica, Lorena Cabadas, siempre están para ayudarte.

A mis tíos, tías y primos que siempre preguntan por mí, aunque no sepan que es un Oceanólogo, ya hay uno en la familia.

Por último quiero dar las gracias a todos aquellos que me han devuelto una sonrisa, y todos aquellos que han puesto de su parte para que el trajín diario sea más llevadero

**Es necesario plantar la  
semilla antes de cosechar  
tus frutos. Aquí esta uno  
de ellos. Por todo este tiempo gracias.**

## ÍNDICE

	Pág.
<b>1.- INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Corrientes Costeras	1
1.2. Justificación	2
<b>2.- ANTECEDENTES</b>	<b>4</b>
2.1. Vientos	8
2.2. Marea	9
2.3. Corrientes Residuales	10
<b>3.- OBJETIVO</b>	<b>11</b>
<b>4.- ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>12</b>
<b>5.- METODOLOGÍA</b>	<b>13</b>
5.1 Características Importantes sobre los ADCP	13
5.2 Limitaciones	15
5.3 Datos disponibles	16
5.3.1 Corrientes	16
5.3.2 Viento	16
5.4 Tratamiento de Datos	18
5.5 Correlación Vectorial	20
5.6 Elipses de Variación	21
<b>6.- RESULTADOS</b>	<b>22</b>
6.1 Vientos	22
6.2 Estadística de Viento	25
6.3 Corrientes	28
6.3.1 Análisis para días específicos	30

6.4 Viento y corrientes	35
6.5 Correlaciones entre viento y corrientes	39
6.6 Marea y corrientes	46
6.7 Elipses de Variación de la corriente	52
6.8 Transporte neto	54
<b>7.- DISCUSIONES</b>	<b>56</b>
<b>8.- CONCLUSIONES</b>	<b>58</b>
<b>9.- RECOMENDACIONES</b>	<b>59</b>
<b>10.- LITERATURA CITADA</b>	<b>60</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla I. Principales componentes armónicas en la Bahía de Todos Santos.....	9
Tabla II Componentes armónicas de la marea.....	10
Tabla III Características del Periodo de Medición de los Aparatos.....	17
Tabla IV Estadística de los datos de viento y corrientes promedio de todas las capas para Playitas y Punta Morro.....	26
Tabla V Velocidades máximas y Promedios de la corriente total y la debida a la marea para cada capa en Punta Morro.....	27
Tabla VI Velocidades máximas y Promedios para cada capa en Punta Morro.....	27
Tabla VII Valores de correlaciones entre viento y corrientes para Playitas.....	40
Tabla VIII Valores de correlaciones entre viento y corrientes para Punta Morro...	42
Tabla IX Valores de correlaciones entre capas de corriente de Playitas y Punta Morro.....	44
Tabla X Elipse de variación para Playitas.....	53
Tabla XI Elipse de variación para Punta Morro.....	53

## LISTA DE FIGURAS

		Pág.
<b>Figura 1</b>	Área de estudio, ubicada en la parte norte de la Bahía de Todos Santos.....	3
<b>Figura 2</b>	Descripción de la circulación en la BTS por Argote-Espinoza <i>et al.</i> (1975), basado en datos de temperatura, salinidad y densidad, para viento del NW.	6
<b>Figura 3</b>	Modelo numérico hidrodinámico desarrollado por Argote-Espinoza <i>et al.</i> (1991).....	8
<b>Figura 4</b>	Bahía de Todos Santos.....	12
<b>Figura 5</b>	Diagramas esquemáticos que muestran como trabaja el perfilador de corrientes acústico Doppler.....	14
<b>Figura 6</b>	ADCP anclado en el fondo.....	15
<b>Figura 7</b>	Fotografía de la Estación Meteorológica del IIO.....	17
<b>Figura 8</b>	Elementos de la elipse de variabilidad de la corriente.....	21
<b>Figura 9</b>	Representación del viento en la forma de astillas, durante los meses de septiembre – octubre 2002.....	23
<b>Figura 10</b>	Día típico de la magnitud del viento durante septiembre – octubre de 2002.	23
<b>Figura 11</b>	Magnitud promedio del viento, durante el año del 2002.....	24
<b>Figura 12</b>	Histograma de frecuencias de la dirección del viento, durante los meses de septiembre – octubre del 2002.....	24
<b>Figura 13</b>	Porcentaje de frecuencia de la velocidad del viento en tiempo.....	25
<b>Figura 14</b>	Diagrama de astillas dirección y magnitud de los vectores de viento y corrientes en Playitas.....	28
<b>Figura 15</b>	Diagrama de astillas dirección y magnitud de los vectores de viento y corrientes en Punta Morro.....	29
<b>Figura 16</b>	Componentes $u, v$ y $(u, v)$ , para Playitas para el día 29 de septiembre 2002..	30
<b>Figura 17</b>	Perfil de velocidad para Punta Morro para el día 29 de septiembre 2002....	31
<b>Figura 18</b>	Componentes $u, v$ y $(u, v)$ , para Playitas, para el día 30 de septiembre 2002..	32
<b>Figura 19</b>	Componentes $u, v$ y $(u, v)$ , para Punta Morro, para el día 30 de septiembre 2002.....	33

<b>Figura 20</b>	Dirección y magnitud de velocidad promedio de la corriente en la columna de agua, para cada localidad Playitas y Punta Morro.....	<b>35</b>
<b>Figura 21</b>	Representación de la interacción del viento y las corrientes en Playitas.....	<b>37</b>
<b>Figura 22</b>	Representación de la interacción del viento y las corrientes en Punta Morro....	<b>38</b>
<b>Figura 23</b>	Amplitud de Correlación entre el viento y las corrientes a diferentes profundidades en toda la serie de tiempo, Playitas.....	<b>41</b>
<b>Figura 24</b>	Amplitud de Correlación entre el viento y las corrientes a diferentes profundidades en toda la serie de tiempo, Punta Morro.....	<b>43</b>
<b>Figura 25</b>	Grafica de amplitud de correlación de Punta Morro y Playitas, entre las diferentes capas de corriente.....	<b>45</b>
<b>Figura 26</b>	Descripción de las corrientes en Playitas para los días 26 sep – 01 oct 2002	<b>48</b>
<b>Figura 27</b>	Descripción de las corrientes en sus componentes u y v en Playitas para los días 26 sep - 01 oct 2002.....	<b>49</b>
<b>Figura 28</b>	Descripción de las corrientes en Punta Morro para los días 26 sep - 01 oct 2002.....	<b>50</b>
<b>Figura 29</b>	Descripción de las corrientes en sus componentes u y v en Punta Morro para los días del 26 sep - 01 oct 2002.....	<b>51</b>
<b>Figura 30</b>	Elipses componentes de corrientes lo mas representativo a diferentes Profundidades.....	<b>52</b>
<b>Figura 31</b>	Transporte a 3 diferentes profundidades en Playitas (verde – sub-superficial; rojo – intermedia; azul – fondo).....	<b>55</b>
<b>Figura 32</b>	Transporte a 3 diferentes profundidades en Punta Morro (verde – sub-superficial; rojo – intermedia; azul – fondo).....	<b>55</b>

## **1.- INTRODUCCIÓN.**

En esta parte del documento se explican la importancia de realizar estudios de circulación, para lo cual se hace una breve descripción de las corrientes costeras, así como una justificación de la importancia de este trabajo. También se habla un poco de las características de la Bahía de Todos Santos y los estudios que se han hecho que son relevantes en este trabajo.

### **1.1. Corrientes Costeras**

Las investigaciones de las corrientes costeras frente a las costas de Baja California se iniciaron hace más de 50 años, se han acumulado una cantidad de datos que permiten determinar a grandes rasgos sus características tales como dirección, magnitud y variabilidad. La gran mayoría de las observaciones se han realizado mucho más alejadas de la costa durante cruceros oceanográficos.

Las investigaciones de la extensa superficie que cubren las aguas afectadas por la circulación oceánica no comprenden la zona adyacente a la costa debido a las complicaciones que se presentan por el efecto de la forma de la línea de costa, batimetría y fricción con el fondo.

Las áreas contiguas a la costa representan una alta importancia económica de diferentes sectores de la población (turismo, comercial, vivienda, pesquero, construcción, etc.), ya que ahí se desempeñan muchas actividades y se desarrollan especies de importancia comercial. Además de las influencias que tiene el hombre sobre la costa, éste produce serias alteraciones en el medio marino, debido a diferentes causas como son las descargas de aguas de desecho urbanas, industriales y agrícolas; así de igual forma las construcciones y alteraciones de la topografía que se realizan en el medio marino. Por lo tanto las áreas que están pegadas a la costa son de un alto potencial productivo, con una ordenación complicada.

Las corrientes costeras han sido estudiadas en diversos lugares, atendiendo a necesidades de carácter local y los resultados obtenidos no pueden generalizarse para regiones costeras extensas. Cada lugar en particular tendrá sus propias características en

cuanto a la batimetría, configuración costera, tipo de sedimentos y aporte de aguas continentales, vientos locales y factores de mayor escala.

Entre las fuerzas generadoras de corrientes costeras, el esfuerzo del viento es una de las más importantes ya que la energía se transmite tangencialmente al mar, produciendo un movimiento horizontal de las aguas. Este tipo de estudios ha sido motivado en parte, porque las corrientes influyen en el proceso de dispersión de los contaminantes que son vertidos en el agua de mar, los cuales afectan a la zona costera. (Hernández-Walls, 1986)

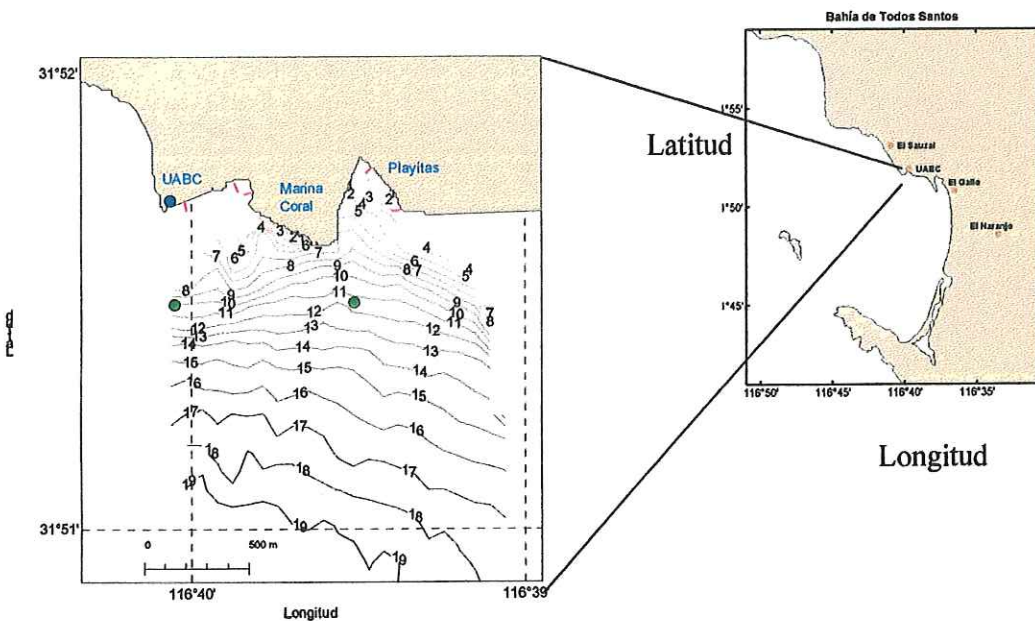
Cuando las corrientes están asociadas a características topográficas como un canal, estuario, laguna costera, presentan un flujo en una dirección durante la mitad del ciclo y la otra mitad del ciclo fluye en dirección contraria la corriente de marea. Pero en mar abierto, hay fuerzas que influyen en el cambio de dirección constantemente, como la fuerza de Coriolis, las partículas tienden a seguir una trayectoria circular.

La predicción de la estructura vertical de las corrientes, es un requisito para muchos proyectos de ingeniería costera, debido a que permite conocer aspectos como la fricción sobre el fondo y la turbulencia que ésta produce, determinando también el transporte de sedimentos y la dispersión de contaminantes, así como su intensidad que afecta sobre las estructuras instaladas en el suelo marino y la calidad del agua en la región. (Torales-Rodríguez, 2002)

## **1.2 Justificación.**

La circulación costera es un factor importante en la distribución de las propiedades físico-químicas del agua de mar; respecto a este punto surge la primera aplicación importante en las consideraciones sobre el diseño y localización de desembocaduras de drenajes industriales y urbanos proyectados con base a estudios oceanográficos que den a conocer los procesos de difusión, que van a estar sometidas las aguas contaminadas y evitar que sean concentradas por los agentes naturales en regiones costeras en contacto directo con el hombre o puedan causar daño a las condiciones ecológicas del medio marino. (Álvarez-Sánchez, 1971)

En esta zona costera se caracteriza por que se encuentran las instalaciones educativas de la UABC, hoteles, una marina, zonas residenciales y una de las playas más visitadas de la ciudad conocida como “Playitas” (PL). Además que en esta zona se encuentran varias tomas de agua de mar (2 de la UABC y una de CICESE), varias descargas de aguas tratadas (UABC, Hotel “Marina Coral”), descargas pluviales, así como descargas de aguas residuales sin tratar que se vierten al mar. (Fig. 1)



**Figura 1.** Área de estudio, ubicada en la parte norte de la Bahía de Todos Santos. Las líneas rojas muestran las descargas de agua, los puntos verdes la localización de los ADCP y el punto azul la localización de la estación Meteorológica.

Resulta evidente que es necesario conocer la dinámica de estas zonas, ya que con ello tendremos una herramienta que nos ayude a establecer y predecir el comportamiento de las poblaciones marinas de estas zonas. Así como un mejor establecimiento de los centros urbanos, que no produzcan alteraciones en el medio ambiente, y no sean nocivas tanto para organismos marinos como para el hombre mismo.

Este trabajo muestra la tendencia (trayectoria) de la circulación en esta zona costera, en base a mediciones de corrientes *in situ* y la relación de estas mediciones con el viento, la marea, la batimetría y la forma de la línea de costa.

## 2.- ANTECEDENTES.

Es de importancia en cualquier zona costera el estudio de las corrientes costeras, éstas son estudiadas en diversos lugares atendiendo a necesidades de carácter local y los resultados no pueden generalizarse para regiones costeras más extensas, además que son de gran importancia para el hombre sobre aplicaciones en ingeniería costera, pesquerías, acuicultura, infraestructura costera, tomas de agua, etc.

Desde hace tiempo varios autores han hecho diversos estudios acerca de las corrientes en Bahía de Todos Santos (BTS), tratando de describir su comportamiento, haciendo cada vez mejor su descripción de éstas, tomando en cuenta diferentes factores como viento, temperatura, salinidad, forma de línea de costa; usando diferente métodos y aparatos para medir las corrientes, tales como boyas, corrientímetros, Perfiladores de Corriente Acústico Doppler (ADCP) y radares de alta frecuencia.

Las primeras observaciones directas de las corrientes en la BTS, fueron hechas en 1944 por el Ingeniero Sergio Carvallo frente a la punta Ensenada, donde hoy existe el rompeolas del Puerto.

En 1964, la Escuela Superior de Ciencias Marinas realizó mediciones de corrientes producidas por marea en el puerto de Ensenada, Baja California. Las corrientes registradas se atribuyeron a la marea y presentaron intensidades de 2.67 cm/s (Álvarez-Sánchez, 1971).

El Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO), en febrero de 1967 efectuó estudios de corrientes en la zona litoral al sur del puerto de Ensenada, determinando una velocidad promedio de 37 cm/s en dirección sureste. Tomando datos de salinidad y temperatura elaboraron un modelo por medio de las ecuaciones de movimiento, aplicando condiciones muy severas, en el que solamente consideraron el efecto del

gradiente de presión y la fuerza de Coriolis, y en donde la profundidad no fue mayor a 10 metros. (Álvarez-Sánchez, 1971)

Cárdenas (1970) hizo un estudio de la circulación en la bahía basado en datos de temperatura y configuración de la costa, sólo dio un panorama descriptivo de la circulación cercana de la costa, sin contar con datos de velocidades determinadas directamente. Álvarez-Sánchez (1971) realizó un estudio en la parte norte de la BTS, observando que el agua entra por esta parte hacia la bahía, y propone que las corrientes superficiales se presentan en la dirección del viento, el cual es hacia el interior de la bahía.

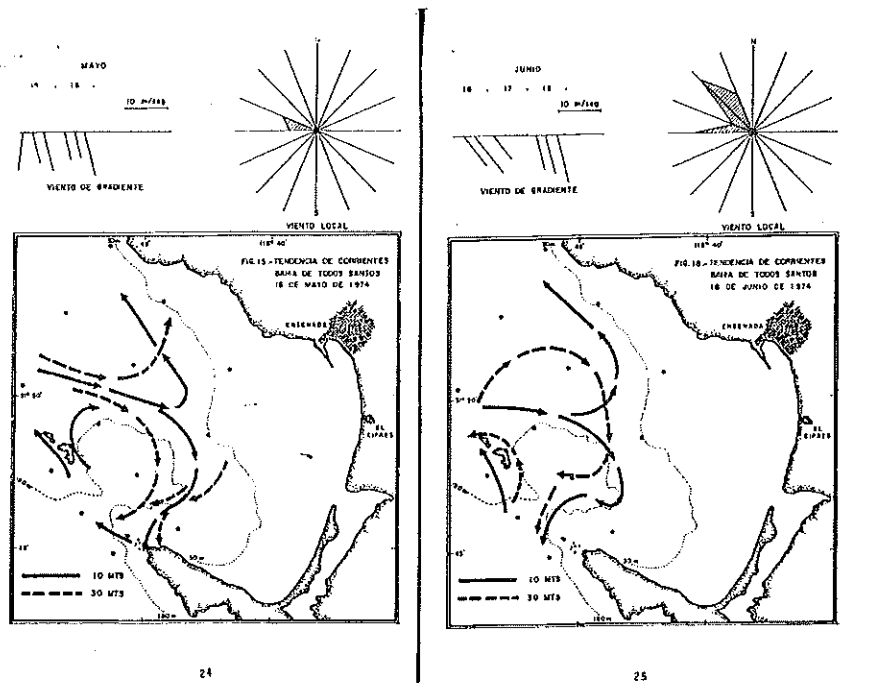
Hasta ahora existen pocos trabajos de corrientes en la parte norte de la BTS, la gran mayoría se han desarrollado en la parte sur. En la zona de estudio entre Punta Morro (PM) y Playitas se conoce poco de la dinámica y características de la circulación que existe en esta parte de la BTS. Ahumada-Sempoal (1993) encontró que al norte de la BTS el comportamiento de la corriente a lo largo de la costa varía con las condiciones de las olas imperantes, observándose en PM una divergencia de las corrientes litorales, donde se dividen en dos, una al norte y otra al sur cuando el tren de olas llega de  $242^\circ$  y convergencia de las corrientes litorales para olas con dirección de  $230^\circ$  y  $280^\circ$  del Noroeste.

Camarena-Acevedo (1994) propuso una regeneración artificial de la playa "Playitas", utilizando para el estudio de las corrientes: boyas tipo cruceta de deriva, en donde las lanzó en la parte norte de la playa, y estas tuvieron una trayectoria hacia el este de la pequeña bahía. Marván Gargollo (1996) hizo un estudio de una posible toma de agua de mar ubicada enfrente de la Facultad de Ciencias Marinas UABC, donde menciona las corrientes que en el lado este de Punta Morro, la dirección de la corriente y velocidad es muy variable. Cabe mencionar que ambos autores en el estudio de las corrientes, sólo fueron superficiales y no mencionan velocidades.

EL CICESE y la UABC han llevado a cabo diferentes estudios en la BTS, de los cuales se ha enfocado a observar las corrientes en la zona, en 1994 hizo una serie de observaciones de corrientes y temperaturas durante la época de mayo-octubre, mediante la utilización de ADCP's. (García *et al.* 1994).

Argote-Espinoza *et al.* (1975), durante octubre de 1973 a septiembre de 1974 realizó una serie de cruceros mensuales, obteniendo datos de distribución de temperatura, salinidad y densidad a 10 m (aguas superficiales) y 30 m (aguas profundas) en la BTS, tomando observaciones de viento y junto con la topografía, realizó una descripción de la circulación de las corrientes. En donde encontró la presencia de algunos giros; uno de ellos se encuentra en la parte norte, éste sigue la forma de la topografía del lugar y la forma de su giro está afectado por la dirección del viento. Menciona que la configuración de la topografía del fondo es determinante en la dirección del flujo y estas tienden a seguir el contorno de las isobatas, y que el viento influye en el sentido de la corriente en la parte norte de la bahía (ver Fig. 2)

Donde se ve que la circulación obedece a la dirección del viento registrado en el interior de la bahía. Se observa que las aguas fluyen hacia el interior de la bahía a partir del norte de las islas y forman dos giros, uno hacia el norte y otro que sigue el contorno del canal. El patrón de circulación es similar al observado durante el muestreo de enero,



**Figura 2.** Descripción de la circulación en la BTS por Argote-Espinoza *et al* (1975), basado en datos de temperatura, salinidad y densidad. Condiciones de viento del W y NW.

en el que el viento tenía una fuerte componente del oeste. Las trayectorias de circulación son diferentes en los dos niveles, en el nivel de los 10 metros el agua fluye siguiendo un patrón similar al de mayo hacia el norte; en el nivel de los 30 metros no se observa el giro hacia el norte.

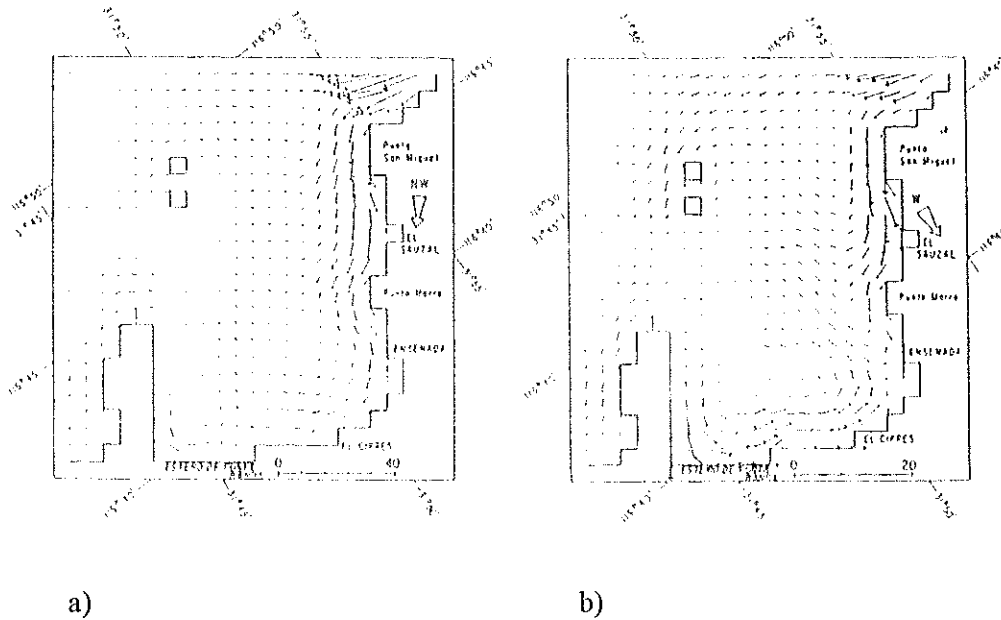
Además encontró una fuerte relación entre los vientos locales y la circulación de las aguas de la bahía, lo cual permitió agrupar los patrones de circulación en tres grupos, correlacionando con diferentes condiciones de viento local.

- a) Cuando los vientos locales tienen una fuerte componente del norte, como se observó en los meses de octubre y noviembre, las aguas fluyen hacia el interior de la bahía por la parte norte siguiendo el perfil de la costa y gira hacia el exterior a la altura de las islas.
- b) Si los vientos presentan una componente fuerte en dirección oeste o suroeste como ocurre en el mes de enero, mayo, julio y agosto; las aguas tienden a fluir de la zona de las islas hacia el interior formándose dos giros: uno hacia el norte el cual fluye hacia el exterior por la zona adyacente a Punta San Miguel, y otro en el sur, que fluye afuera de la costa por la zona de Punta Banda.
- c) Cuando los vientos locales son de poca intensidad y su dirección es variable como en los muestreos hechos en diciembre, marzo, abril y septiembre, la circulación presenta una estructura complicada y es difícil establecer un patrón definido.

La parte norte de la bahía presenta una mayor influencia de las aguas de la zona exterior, ya que en la mayoría de los casos hay un flujo hacia el interior y forma un giro en la parte norte, para diferentes condiciones de viento. (Argote-Espinoza *et al.*, 1975)

Posteriormente Argote-Espinoza *et al.* (1991), desarrollaron un modelo numérico hidrodinámico barotrópico para predecir la circulación del viento inducido en la BTS, bajo distintas condiciones representativas de viento en diferentes estaciones (verano, invierno y vientos irregulares de Santana); maneja una resolución espacial de 1Km x 1Km, utiliza diferentes coeficientes de arrastre (fricción con el fondo, viento) e incluye el efecto de la rotación de la tierra. Las corrientes son predichas a lo largo de la

costa, donde encuentra la trayectoria del agua para diferentes direcciones del viento. En la figura 3, se aprecia que en condiciones de viento proviene del noroeste y oeste, la corriente entra a la bahía por la parte norte, las corrientes son más intensas cerca de la costa. Existen pequeñas diferencias en la corriente con estas dos condiciones de viento.



**Figura 3.** Modelo numérico hidrodinámico desarrollado por Argote-Espinoza *et al.* (1991), a) Condiciones de viento del NW y las flechas indican la dirección y magnitud de las corrientes, b) Condiciones de viento del W, flechas indican dirección y magnitud de la corriente.

## 2.1 Vientos

Álvarez-Sánchez (1977), estudiando datos de viento proporcionados por la base aérea El Ciprés, encontró que en general los vientos dominantes en la BTS tienen una dirección del noroeste (NW), con una rapidez promedio de 4 m/s y con menor frecuencia del Oeste (W) y Oeste Noroeste (WNW), reporta que en otoño e invierno se presenta la mayor variación de la dirección del viento.

Reyes y Parés (1983) analizaron los datos de viento superficial de tres puntos de la BTS, y encontraron que durante la primavera y el otoño el sistema de brisa marina y terrestre se encuentran medianamente desarrollados, debido a que está relacionado a una

época de transición; en invierno, debido a un periodo de escasas lluvias se presenta una circulación de brisa marina y terrestre anómalamente bien desarrollada, mientras que en el verano la brisa fue débilmente desarrollado por efecto Santana. Notan una orientación de la línea de costa respecto a la dirección del viento.

## 2.2 Marea

El tipo de marea que se encuentra en la bahía es mixta, con dominio semidiurno, es decir presenta dos pleamares y dos bajamares diarias; y tiene a la  $M_2$  como su componente armónica más importante (Tabla I) con un periodo de aproximadamente 12 h. y ésta participa con una elevación de 48 cm en el nivel del mar. (Fuente de datos: informes de la red mareográfica de la UNAM y CICESE).

**Tabla I.** Principales componentes armónicas en la Bahía de Todos Santos.

Componente armónica	Periodo (Hrs)	Altura (m)	Fase (°)
$M_2$	12.42	0.487	136.99
$S_2$	12.00	0.207	132.80
$N_2$	12.65	0.116	116.53
$K_2$	11.96	0.060	120.79
$K_1$	23.93	0.322	205.92
$O_1$	25.81	0.207	190.80
$P_1$	24.06	0.1017	202.98

En la Tabla II se explica el origen de cada una de las componentes armónicas de la marea.

**Tabla II.** Componentes armónicas de la marea.

Componente Armónica	Constituyente	Descripción
$M_2$	Efecto de la rotación de la Luna con respecto a la Tierra	Esta constituyente representa el efecto sobre las mareas de la Luna debido al día lunar, el cual es la diferencia entre el día sideral de la Tierra y el mes lunar.
$S_2$	Constituyente solar semidiurna	Debido a que el efecto de las mareas producido por el Sol es el mismo cada "medio día", la constituyente $S_2$ tiene una frecuencia igual al doble de $S_1$ .
$N_2$	Constituyente Elíptico lunar grande.	Debido a la rotación del eje de la órbita elíptica de la Luna, se busca la velocidad angular de un satélite
$K_2$	Constituyente lunisolar semidiurno.	Esta constituyente modula la amplitud y la frecuencia de $M_2$ y $S_2$ , en los efectos por la declinación de la luna y el sol respectivamente
$K_1$	Constituyente diurno lunisolar	Esta constituyente considera el efecto de la declinación de la Luna junto a $O_1$ y el efecto de la declinación del Sol con $P_1$
$S_1$	Constituyente solar diurna	Esta constituyente es la responsable de las mareas diarias solares y se presenta cada 24 h; se obtiene de la diferencia entre la sideral y el año tropical.

### 2.3 Corrientes Residuales.

El analizar las corrientes de marea permite inferir algunas características de la variación espacial de la circulación en la zona costera. Sin embargo, en cuerpos costeros como bahías y lagunas, las corrientes de marea actúan conjuntamente con el viento, con corrientes de densidad, y éstas son afectadas por la fuerza de Coriolis e interacciones no lineales de marea, así como la geometría costera y batimetría.

Es difícil medir directamente los flujos residuales ya que son uno o dos órdenes de magnitud menor a los flujos de marea, es decir, menores al nivel de ruido, además de los errores asociados a los corrientímetros tradicionales que generan tales registros. En los últimos años gracias al avance tecnológico, ha sido posible utilizar modelos

numéricos para estudiar estos fenómenos obteniendo buenos resultados. (Robinson, 1983; Gutiérrez-Gutiérrez, 1999)

Durante el flujo y reflujos, las corrientes de marea interactúan con la batimetría del fondo y producen flujos con velocidades menores que las corrientes de marea (Robinson, 1983); estos flujos son conocidos como corrientes residuales. (García-Silva, 1996)

El flujo residual puede ser producido por el esfuerzo del viento en la superficie del mar, o por la deriva lateral del gradiente de densidad no uniforme en la salinidad o en la distribución de temperaturas. Sin embargo pueden ser sólo generadas por el mismo flujo de marea. (Robinson, 1993)

### **3.- OBJETIVO**

El presente trabajo tiene como objetivo principal caracterizar la circulación en la zona costera entre Punta Morro y Playitas. Lo anterior considera analizar las magnitudes, direcciones y variación vertical de las corrientes, el efecto en la circulación de la línea de costa y batimetría y su variabilidad a diferentes condiciones de viento y marea.

Los objetivos particulares incluyen la determinación de la dirección y magnitud de la corriente en la columna de agua enfrente de Punta Morro, así como Playitas.

La hipótesis que se plantea en el trabajo considera que el viento es el principal mecanismo de generación de las corrientes costeras en Playitas. En Punta Morro se plante el mismo mecanismo pero hay un mayor efecto de la forma de la línea de costa.

#### 4.- ÁREA DE ESTUDIO.

La BTS (Fig. 4), se localiza en la Península de Baja California, sobre la costa oeste entre los  $31^{\circ}40'$  y  $31^{\circ}55'$  de latitud norte y entre los  $116^{\circ}36'$  y  $116^{\circ}50'$  de longitud oeste; es una bahía semi-protégida con un área aproximada de  $166 \text{ Km}^2$ . La BTS tiene dos entradas bien diferenciadas presentando una división constituida por pequeñas islas al oeste, la entrada al noroeste limitada por punta San Miguel y la parte norte de la isla de Todos Santos, de 12 Km de ancho donde la profundidad máxima es de 50 m y algunos bajos de hasta 6 m a la mitad de la sección. En cambio de la entrada al Suroeste de 6 Km de ancho, se tienen pendientes pronunciadas sobre todo en las cercanías de las islas, próximas a los 300 m en el centro del cañón de Punta Banda (Ahumada-Sempoal, 1993).

La BTS es una cuenca somera, donde el 75% del área presenta profundidad promedio menor a los 50 m y bajos de hasta 10 m conforme nos acercamos a la costa, el restante 25% corresponde al Cañón de Punta Banda que se encuentra en la zona sur, paralelo a Punta Banda.

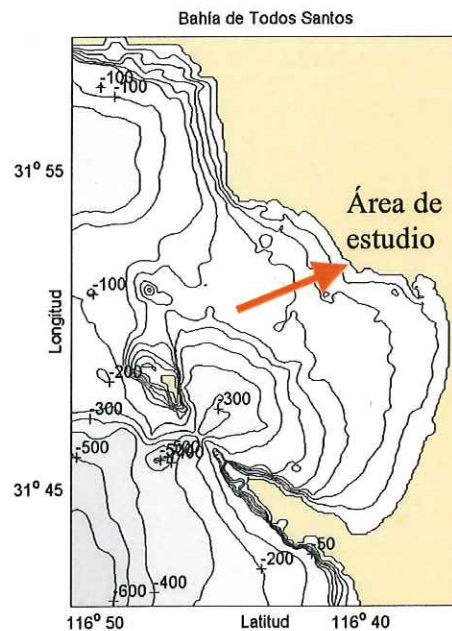


Figura 4. Bahía de Todos Santos.

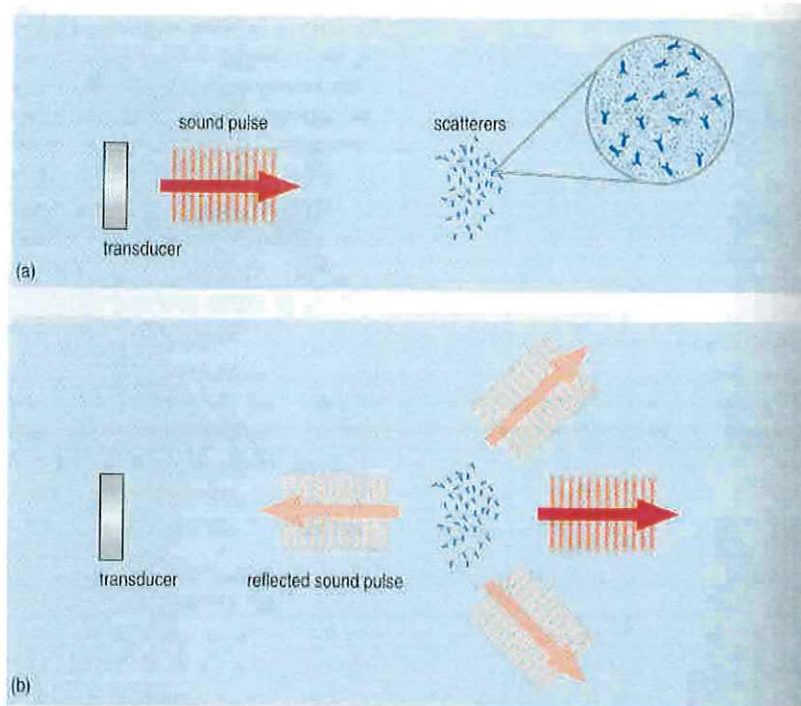
La zona de estudio está limitada al norte por PM (Fig. 1), la cual se encuentra constituida por rocas basálticas, su topografía es abrupta en un principio, después su pendiente no es tan pronunciada. Hacia el sur está limitada por Quintas Papagayo la cual también presenta una pendiente abrupta en su topografía. Intermedio de estos límites se encuentra la playa llamada “Playitas” es una zona muy visitada por bañistas, donde se realizan diferentes actividades acuáticas recreativas (kayak, velero, buceo, pesca, jet ski, etc.).

## **5.- METODOLOGÍA.**

### **5.1 Perfilador de Corriente Acústico Doppler**

En los años 80's la oceanografía observacional mostró un marcado desarrollo por la introducción del Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés). Este instrumento utiliza el sonido para medir la velocidad de la corriente, empleando el efecto Doppler, el cual establece la medida de frecuencia de vibración y el punto de observación (The Open University, 2001)

En el medio marino, la señal de sonido encuentra en su camino millones de pequeñas partículas en suspensión (sedimento, burbujas, plancton, etc.) éstas son el blanco acústico, en donde el promedio viajan a la misma velocidad horizontal que la corriente, éstas al recibir el impacto de la señal, dispersan el sonido hacia el aparato y éste “escucha” el eco reflejado, además de que lo amplifica para poder estimar la velocidad a diferentes capas en la vertical. El ADCP promedia los datos de los ecos de regreso medidos en un cierto intervalo de tiempo y además que utiliza el tiempo de arribo de cada eco, suponiendo que los ecos más alejados de la fuente les tomaría mayor tiempo en regresar al aparato que los cercanos, así la velocidad promedio de cada celda puede ser estimada (Fig. 5).



**Figura 5.** Diagramas esquemáticos que muestran como trabaja el perfilador de corrientes acústico Doppler. a) El pulso de sonido es emitido por un transductor. b) El sonido es dispersado en todas direcciones por las pequeñas partículas y el plancton suspendido en el agua y los ecos son modulados por el efecto Doppler según a la dirección del movimiento de los dispersores. (The Open University, 2001)

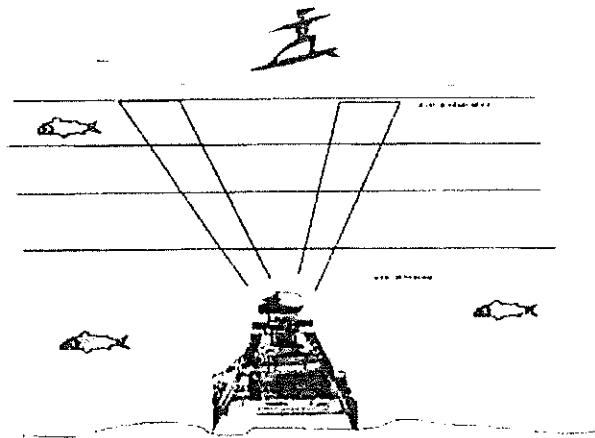
En muchas investigaciones hechas con el ADCP, ha revolucionado la investigación en la oceanografía física principalmente. Donde se ha vuelto común el empleo de ADCP's colocados en los cascos de los barcos para hacer las mediciones continuas de velocidades de corrientes a profundidades de varios cientos de metros, mientras la embarcación se encuentra navegando. Otra forma, como fue la usada en este estudio, es ponerlos en el fondo marino (ver Fig. 6)

La forma en que el ADCP interpreta los ecos recibidos de las partículas que viajan a la misma velocidad de la corriente, se determina de la siguiente ecuación.

$$f_0 = \frac{Vf_s}{V - v_s}$$

Donde  $V$  es la velocidad del sonido,  $v_s$  es la velocidad de la fuente,  $f_0$  es la frecuencia de la señal emitida por el ADCP y  $f_s$  es la señal de la partícula en movimiento.

Una gran ventaja al utilizar este equipo, comparado con el funcionamiento de los arreglos de los corrientímetros comunes, es que un solo ADCP puede realizar el trabajo de todo un arreglo, sin pérdida de datos a alguna profundidad.



**Figura. 6.** ADCP anclado en el fondo, se ve como emite la señal de sonido hacia la superficie del mar.(tomada de Blanco y Chee, 2000)

La facilidad que presentan los ADCP's es de que los perfiles y las corrientes pueden ser obtenidas rápidamente, de manera que los datos pueden tenerse en diferentes ordenes de magnitud mayor que la que sería posible obtener por métodos convencionales (i.e. corrientímetros, boyas de deriva, etc.). La penetración de las observaciones depende de las condiciones oceanográficas y los parámetros utilizados en la programación del ADCP.

## 5.2 Limitaciones.

En las fronteras en donde se encuentre el aparato (región inmediata al emisor y en la superficie del agua) no se pueden obtener mediciones de la corriente, en donde la presencia de la frontera de la superficie introduce una señal de ruido conocida como

efecto de lóbulo lateral, como también se debe corregir por los desniveles producidos por la marea, donde tomará capas de más cuando la marea sea alta.

### **5.3 Datos disponibles.**

#### **5.3.1 Corrientes**

Para el desarrollo de este trabajo de tesis se cuenta con mediciones de parámetros oceanográficos (corrientes), así como meteorológicos (viento) durante 6 semanas. En este periodo de tiempo se realizaron en Septiembre-Octubre 2002 donde se cubren dos ciclos de mareas vivas y muertas así como diferentes condiciones de viento.

El equipo que se utilizó para realizar las mediciones fueron 2 corrientímetros Doppler, los cuales fueron instalados uno enfrente de la playa conocida como "PL" y el otro enfrente de PM. De los cuales se tiene una serie de mediciones continuas de velocidad y dirección de corriente provenientes de un ADCP anclado en el fondo a 10 metros, con una resolución espacial de 1 metro y una resolución temporal de 30 minutos.

El ADCP usado en nuestras mediciones de corrientes (Sontek, ADP 1,000 Khz.) tiene tres emisores orientados a 25 grados del eje vertical, igualmente espaciados en ángulos de 120 grados en sentido azimutal. El perfilador acústico ADCP combina las tres velocidades a lo largo de los rayos de sonido y usa la orientación relativa a los transductores para calcular la velocidad del agua

#### **5.3.2 Vientos**

Los datos de viento (dirección y magnitud) fueron obtenidos de la estación meteorológica del Instituto de Investigaciones Oceanológicas localizada en PM, durante todo un año de registro del 2002, con un intervalo de tiempo de cada hora (Fig. 7) y (Tabla III).



**Figura 7.** Estación Meteorológica del IIO, localizada en Punta Morro.

**Tabla III.** Características del Periodo de Medición de los Aparatos

<b>Equipo</b>	<b>Período de Medición</b>	<b>Intervalo de muestreo</b>	<b>Tipo de medición</b>
ADCP	17 de septiembre (10:00) del 2002 al 30 de Octubre (10:00) del 2002 ( 6 semanas)	30 min.	Perfil vertical de las corrientes
Anemómetro	01 de Enero del 2002, al 31 de Diciembre del 2002	c/1 hr.	Velocidad y dirección del viento

## 5.4 Tratamiento de Datos

Una vez que el experimento concluye y se recupera el aparato, las series de datos crudos pasan por un programa de control de calidad, y así los datos pueden presentarse posteriormente de forma individual, o como contornos (la anomalía del nivel del mar, contornos de velocidad a lo largo de la costa y hacia la costa).

La precisión del aparato después de haber removido el ruido se basa en dos factores principales: la velocidad del sonido y la geometría del rayo de sonido. Los errores por la velocidad del sonido son menores al 0.1%, en cuanto a la geometría del rayo, ésta es fijada durante la fabricación y no necesita una recalibración. La precisión de la velocidad entonces es del orden de  $\pm 1\%$  de la velocidad medida.

El ruido es el resultado de los procesos físicos por los cuales las ondas de sonido son dispersadas por las partículas del agua y es referido como ruido Doppler. El ruido Doppler es aleatorio y puede asumirse que tiene una distribución gaussiana, donde el promediado de datos múltiples converge a un valor real sin introducir margen de error (Manual de operación ADCP, ver. 7.1). El ruido decrementa con la raíz cuadrada del intervalo promediado, es decir a un mayor intervalo promediado, menor ruido. Otro parámetro para evaluar el ruido es calculado directamente de los datos medidos por el ADCP, el error estándar. Este valor es reportado para cada componente de velocidad y para cada rango de celda, puede ser interpretado como un estimador de la precisión del dato de velocidad, el cual incluye la incertidumbre generada por el instrumento (el ruido Doppler), las variaciones reales en la velocidad del agua y el movimiento de la instalación del ADCP (por ejemplo, si es montado sobre una boya o una línea de anclaje o si es usado por una embarcación en movimiento).

El error estándar es calculado como sigue: un número de pulsos son promediados durante un intervalo específico, de esta forma se reporta un valor de velocidad media, de acuerdo al intervalo de promediado escogido. La desviación estándar para todos los pulsos es dividida entre la raíz cuadrada del número de pulsos para calcular el error estándar.

El perfil del error estándar debe ser constante con la intensidad de la señal acústica, donde ésta es mayor a 3 db y no hay ninguna frontera presente. La intensidad de la señal es accesada en amplitudes o decibeles. La razón de la señal de ruido (SNR) indica la intensidad en decibeles. Conforme SNR decrementa a un número menor que 3 db, el error estándar incrementa rápidamente, este incremento puede ser usado para determinar el final del perfil en situaciones sin frontera.

El ruido Doppler está en función de la configuración del sistema, de la frecuencia acústica, del tamaño de la celda y del número de muestras usadas para calcular el perfil de la velocidad media (Manual de operación ADCP). Éste es estimado como:

$$\sigma = \frac{235}{F \Delta z \sqrt{N}},$$

donde:

$\sigma$  = ruido Doppler de las mediciones de velocidad en la horizontal (m/s),  
 $F$  = frecuencia acústica (Khz.),  $\Delta z$  = tamaño de celda y  $N$  = número de muestras.

Los datos en su forma cruda consisten en mediciones de velocidad en la dirección este-oeste (componente  $u$ ) y en la dirección norte-sur (componente  $v$ ) y también en la vertical. La brújula con que cuenta el aparato fue calibrada y orientada al norte geográfico, para obtener la orientación de los datos. Los datos fueron corregidos por presión, así como también por señal de ruido (SNR) por el efecto frontera. Posteriormente se trataron con el software *View ADP*, en donde se grafican la SNR, las velocidades en cada componente y la desviación estándar. Por medio del programa MatLab, se trataron y se hicieron gráficas del transporte de la corriente utilizando la componente  $u$ ,  $v$ , de ambas localidades donde se encontraban los aparatos.

Para los datos de viento, de igual manera se obtuvieron de la estación meteorológica de PM (hora, velocidad, rapidez, dirección, presión atmosférica, etc.), junto con el programa de astillas se graficaron los datos de la dirección y magnitud de los vientos presentes en la zona.

Se graficaron las componentes  $u$  y  $v$  de las corrientes en la columna de agua para cada profundidad en que se midió, así como la marea y la presencia del viento en la zona, para las 6 semanas de datos.

Se utilizaron diagramas de vectores progresivos, para observar la trayectoria de la corriente a lo largo de la vertical y obtener el transporte neto. Se realizó una correlación vectorial compleja entre el viento y la corriente para diferentes capas de profundidad, para observar la posible influencia del viento sobre la corriente observada, para cada localidad en PM y PL.

Bajo las diferentes condiciones de marea que se tuvieron en el periodo de tiempo (marea viva o marea muerta), se analizó el comportamiento de las corrientes, el transporte neto a diferentes profundidades y el vector de la corriente en toda la columna de agua; además se obtuvieron las elipses de variación de la corriente para cada profundidad.

### **5.5 Correlación Vectorial Compleja.**

Este es un método basado en la descomposición de las series complejas evaluadas en componentes polarizadas. El vector velocidad (de viento y de la corriente) puede ser descompuesto para cada frecuencia, bajo dos movimientos circulares en rotación contraria, cada uno con su propia amplitud y fase, donde los movimientos ciclónicos corresponden a movimientos con frecuencias positivas y los movimientos anticiclónicos con frecuencias negativas.

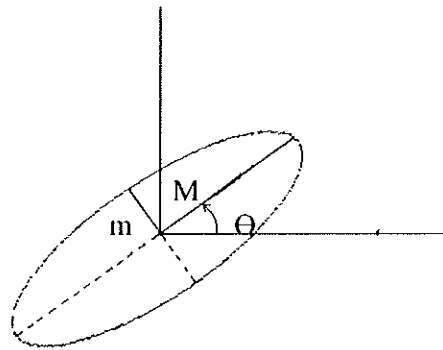
Los valores de fase cambian en una cantidad proporcional a la rotación. Por otro lado, las funciones de coherencia y fase de las dos series relacionan sus componentes ciclónicas, sus componentes anticiclónicas, la componente ciclónica de una con la anticiclónica de la otra y viceversa y finalmente es calculado el coeficiente de correlación a partir de las mediciones de coherencia entre un par de series complejas evaluadas, (Mooers, 1973). En este caso, las series evaluadas son el viento y la corriente. La amplitud de la correlación es de 0 a 1, donde 1 indica que están correlacionados mas no asegura que una serie es consecuencia de la otra y viceversa, la

fase nos indica la relación entre las direcciones de ambas series y la razón de transferencia es la relación entre sus magnitudes.

### 5.6 Elipse de Variación.

Las corrientes son registradas en coordenadas geográficas en las que los ángulos son medidos en el sentido de las manecillas del reloj teniendo como cero ( $0^\circ$ ) el norte geográfico; las mediciones en un punto toman la forma  $[V(t), \theta_{geo}(t)]$ , proporcionando la velocidad y la dirección geográfica de la corriente. En matemáticas los ángulos son medidos en contra de las manecillas del reloj a partir del eje  $x$  (desde la dirección este).

En la figura 8 se muestra la elipse de variabilidad de la corriente así como sus características, Semieje mayor  $M$ , semieje menor  $m$  y ángulo de inclinación.



**Figura 8.** Elipse de variabilidad de la corriente.

Puede darse el caso de que el semieje menor “ $m$ ” sea igual a cero, esto implica que la elipse se degenera convirtiéndose en una línea recta orientada en la dirección  $\theta$ . Cuando el semieje mayor “ $M$ ” es igual al semieje menor “ $m$ ”, entonces serán de la misma magnitud los dos, esto es;  $M = \pm m$ , en este caso la elipse componente se convierte en una círculo, la orientación pierde su significado.

## 6.- RESULTADOS.

### 6.1 Vientos

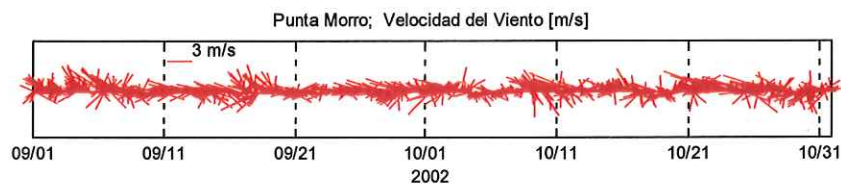
Para los datos de viento obtenidos de la estación meteorológica del IIO, se analizaron la magnitud y dirección del viento. Un día típico de los meses de septiembre – octubre del 2002, muestra la presencia de brisas marinas. El viento es representado en una gráfica de astillas (Figs. 9 y 10), donde se muestra su magnitud y dirección de donde proviene

Para determinar la velocidad y dirección predominante del viento, se analizó el promedio de las variables para todos los días de medición, así como también el promedio por estaciones del año para todo el 2002, (Figs. 9 – 13). Durante el periodo de tiempo de un año, se halló que en la primavera se tiene la mayor velocidad del viento y para otoño la mínima velocidad; el promedio de la velocidad del viento anual es de 3.3 m/s durante el día (Fig. 11). Durante los meses de septiembre-octubre del 2002, se encontró que para la estación meteorológica en la FCM, la velocidad promedio entre 3 y 3.4 m/s durante el día, teniendo su máximo de velocidad durante las 2:00 y 4:00 de la tarde y por la noche fue de 1.2 m/s (Fig. 10).

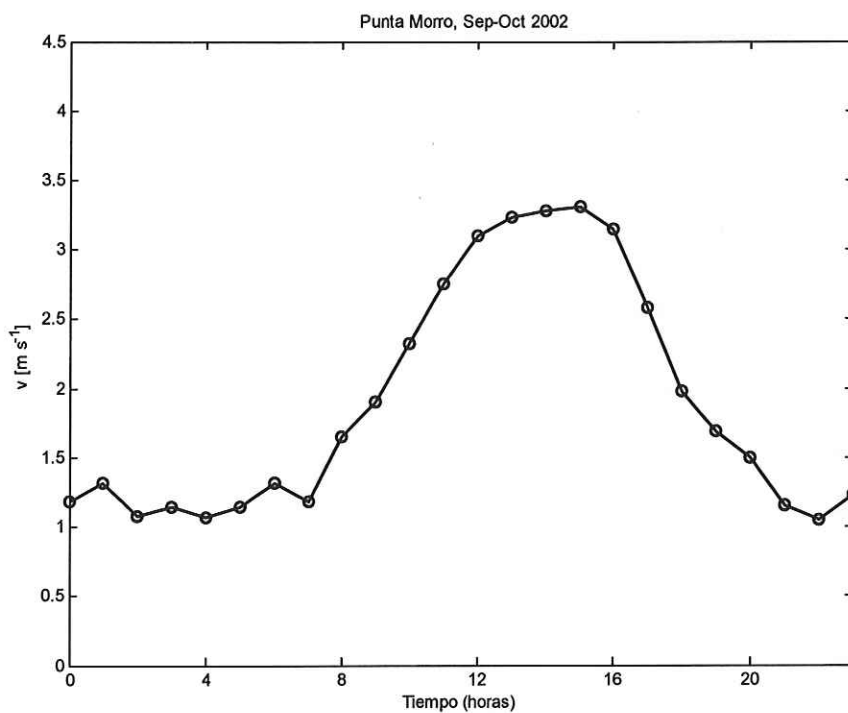
La dirección predominante del viento en el día fue del W y WNW, con menores frecuencias del WSW y por la noche hay un cambio en la dirección (Figs. 11 y 12).

Teniendo en cuenta estos resultados podemos observar que se presenta un régimen de brisas, describiendo que durante el día hay una brisa diurna que inicia de las 7:00 hasta las 19:00 horas con velocidades promedio de 3 m/s, que pueden llegar hasta los 8 m/s, con una dirección predominante del W y WNW siguiendo la forma de la línea de costa; y durante la noche del periodo de la brisa nocturna es de 20:00 a las 6:00 horas del día siguiente con velocidades promedio de 1.2 m/s y con una dirección variable.

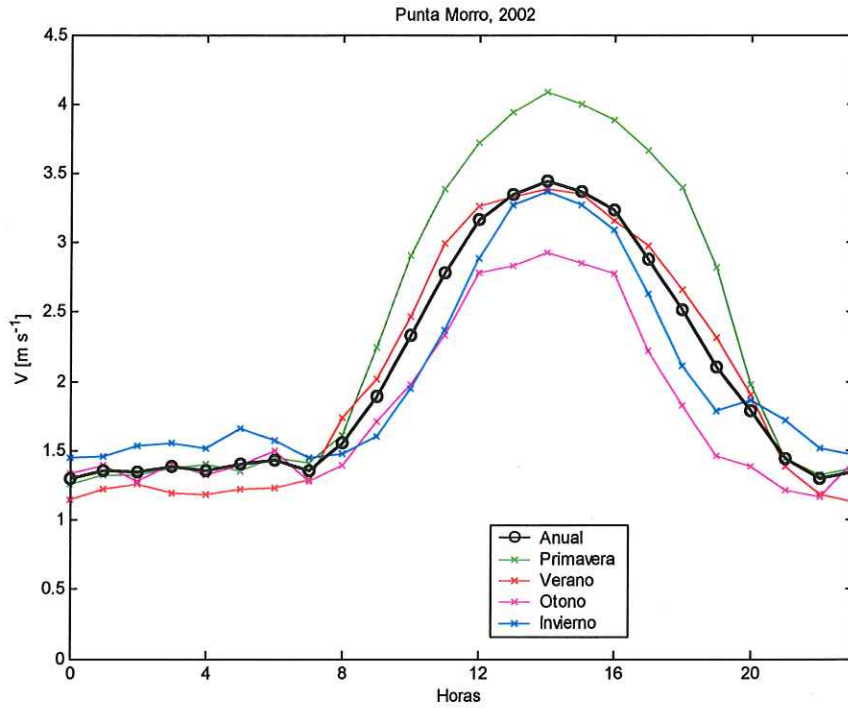
Se observa viento de otras direcciones, en cuanto a su ocurrencia no es alta comparada con las anteriores, y éstas no son tan importantes en cuanto a la magnitud de velocidad para la generación de corrientes en la superficie.



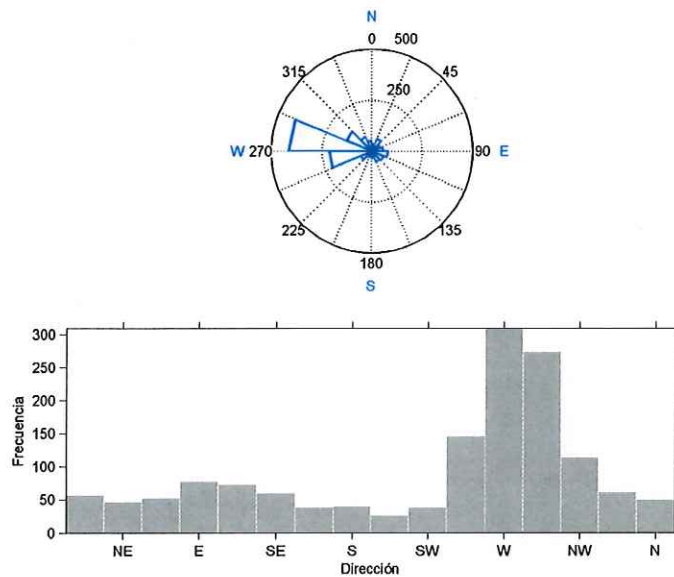
**Figura 9.** Representación del viento en la forma de astillas, durante los meses de septiembre – octubre 2002.



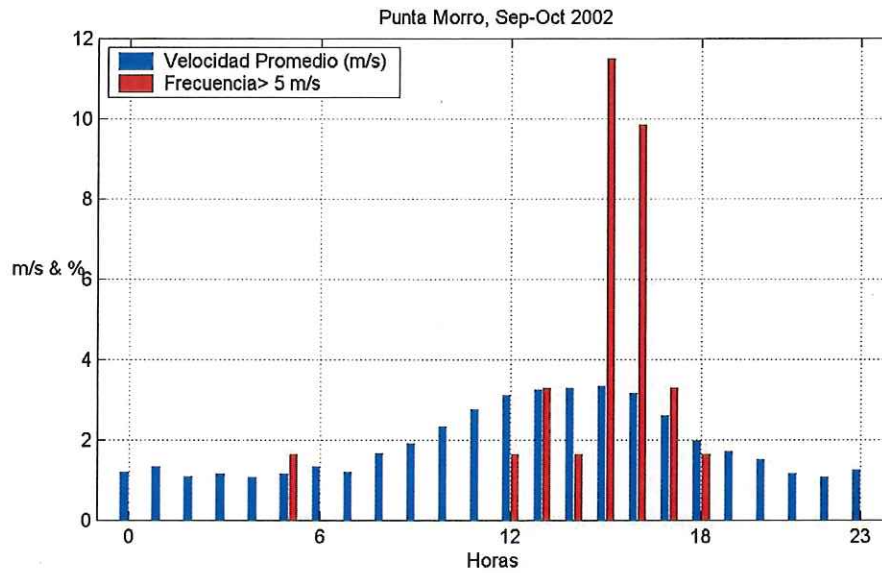
**Figura 10.** Día típico de la magnitud del viento durante septiembre – octubre de 2002, en la estación meteorológica de la FCM.



**Figura 11.** Magnitudes promedio del viento, durante el año del 2002, en la estación meteorológica de la FCM.



**Figura 12.** Histograma de frecuencias de la dirección del viento, durante los meses de septiembre – octubre del 2002 en la estación meteorológica en la FCM. Arriba diagrama en Rosa de la dirección del viento proveniente. Abajo histograma de direcciones del viento.



**Figura 13.** El histograma azul representa la velocidad promedio durante un día típico y el histograma rojo, el porcentaje en que la velocidad puede exceder los 5 m/s.

## 6.2 Estadística del Viento y Corrientes

Para el análisis estadístico se calculó la media y la desviación estándar (Emery y Thompson, 1998)

Media: 
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

Desviación Estándar 
$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

Coefficiente de Correlación Compleja

$$\rho = \frac{\langle w_1^*(t)w_2(t) \rangle}{\langle w_1^*(t)w_1(t) \rangle^{1/2} \langle w_2^*(t)w_2(t) \rangle^{1/2}} \quad (3)$$

donde  $w(t) = u(t) + iv(t)$ .

Se realizó el análisis estadístico a las componentes del viento y de las corrientes, se calculó el promedio ( $u$ ,  $v$ , velocidad y dirección) y la desviación estándar, (ver Tabla IV). Donde los valores del viento con respecto a velocidades son mayores comparados con los de las corrientes en PM y PL.

Tabla IV. Estadística de los datos de viento y corrientes, promedio de todas las capas

Estadística	Viento (m/s)	Corrientes Playitas (cm/s)	Corrientes Punta Morro (cm/s)
$\langle u \rangle$ (oeste - este)	-1.00	-2.07	-4.10
$\sigma_u$	1.72	5.23	1.63
$\langle v \rangle$ (norte - sur)	0.20	0.60	-1.07
$\sigma_v$	0.90	1.84	1.57
$\langle  \vec{u}  \rangle$	1.88	7.00	6.60

En comparación de corrientes entre PM y PL, se analizaron las velocidades máximas y la velocidad promedio entre estas dos localidades, para PM (ver Tabla V) se encontró la máxima velocidad de 65.96 cm/s y el promedio de 6.60 cm/s, donde no hay mucha diferencia con el PL, la máxima velocidad 61.24 cm/s y promedio de 6.99 cm/s (ver Tabla VI). Observando que ambos lugares las velocidades más altas se encuentran en la capa más superficial, aproximadamente a partir de los 4 metros de profundidad, así también como para las componentes de las corrientes ( $u$  y  $v$ ), en donde para la componente  $u$  (este-oeste) es predominante sobre la componente  $v$  (norte -sur).

Para PM se presentan los valores de las componentes ( $u$  y  $v$ ), guiándose con el signo, la corriente tiende a dirigirse hacia el suroeste y para PL hacia el noroeste, tendiendo a seguir la forma de la línea de costa.

Tabla V. Velocidades máximas y Promedios de velocidad de la corriente total y por marea para cada capa en Punta Morro.

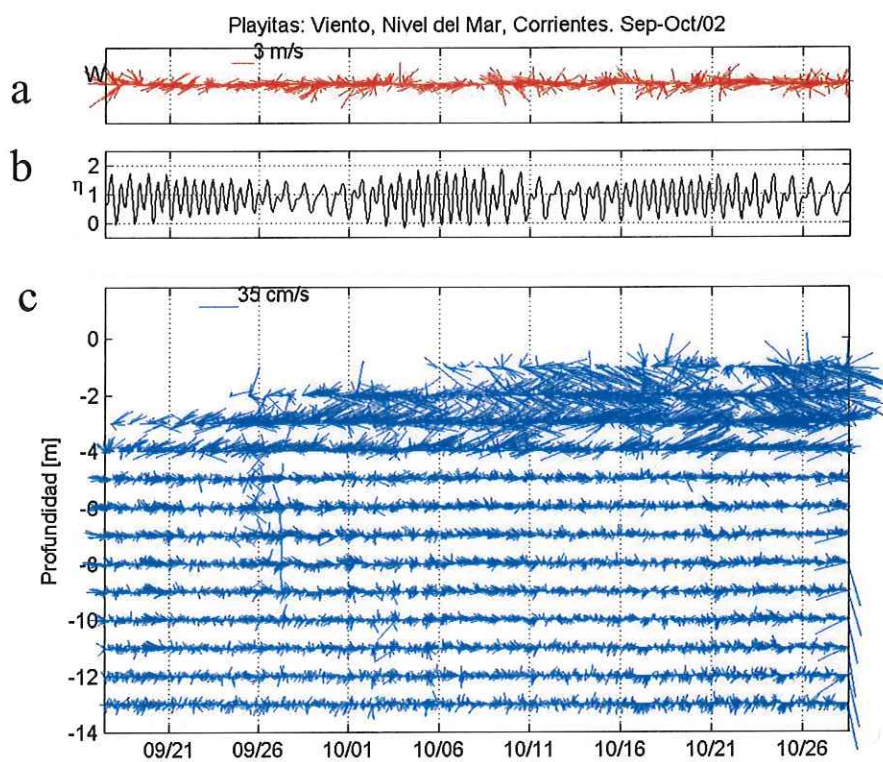
Nivel	Profundidad	$ V _{\max}$ [cm/s]	Velocidad Promedio Corriente ( V ) cm/s	Velocidad Promedio Corriente ( V  marea) cm/s
<b>Superficie</b>	1	57.58	<b>8.37</b>	<b>11.03</b>
	2	<b>65.96</b>	7.64	4.61
	3	59.01	8.11	3.48
	4	56.07	7.74	2.88
	5	44.20	7.23	2.44
	6	24.70	6.43	2.18
	7	21.86	5.50	1.93
	8	18.21	4.61	1.65
<b>Fondo</b>	9	15.47	3.71	1.26
	<b>Total</b>		<b>6.60</b>	<b>3.50</b>

Tabla VI. Velocidades máximas y Promedios de velocidad para cada capa en Playitas.

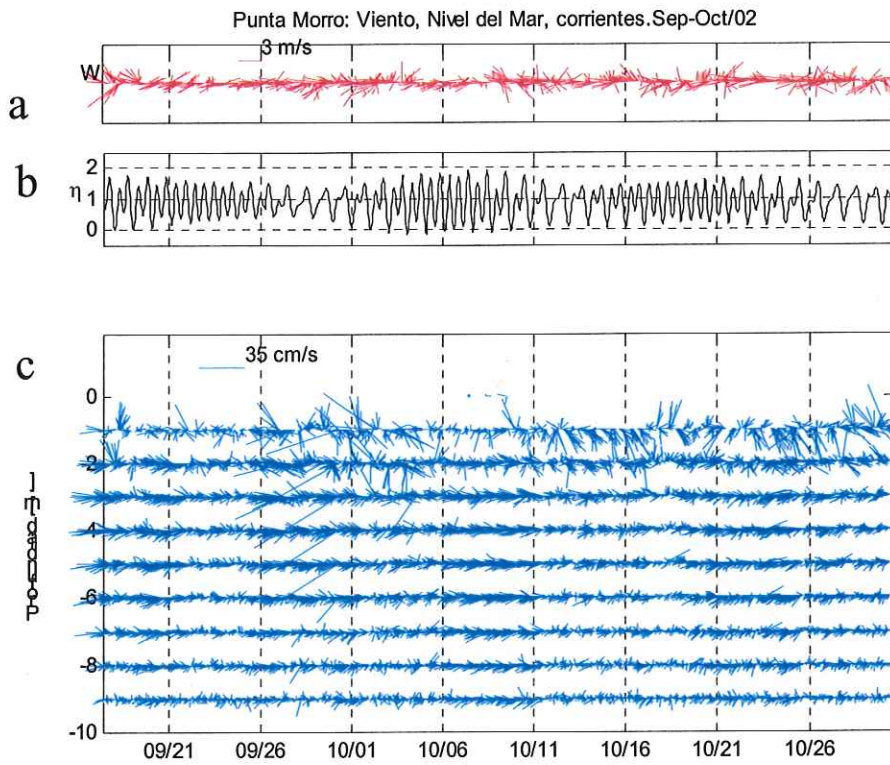
Nivel	Capa	V  max corriente cm/s	Promedio velocidad Corriente  V  cm/s	Promedio velocidad Corriente marea  V  cm/s
<b>Superficie</b>	1	<b>61.24</b>	<b>16.60</b>	
	2	<b>54.95</b>	<b>15.74</b>	<b>11.95</b>
	3	49.17	9.45	7.08
	4	29.08	5.55	2.67
	5	27.09	5.29	2.00
	6	29.42	5.10	1.75
	7	39.75	4.95	1.71
	8	41.63	4.66	1.57
	9	41.24	4.37	1.50
	10	45.16	4.11	1.37
	11	47.31	4.0442	1.37
<b>Fondo</b>	12	41.83	4.0443	1.37
	<b>Total</b>		<b>6.99</b>	<b>3.12</b>

### 6.3 Corrientes.

Las figuras 14 y 15, muestran las corrientes a diferentes niveles, el nivel del mar y el viento para PL y PM respectivamente, en la medición de las corrientes para Playitas se tienen más capas de medición al final, ya que en un inicio empezó con 10 capas, posteriormente el aparato sufrió un hundimiento y por tanto captó más capas hasta llegar a 13 capas, tres capas más que las del principio. En comparación para PM donde el ADCP midió 9 capas de corriente.



**Figura 14.** Diagrama de astillas dirección y magnitud de los vectores de viento y corrientes en Playitas, durante el periodo de tiempo de medición. **a.** Viento (astillas rojas), **b** nivel de marea, **c** Corrientes ADCP (astillas azules).



**Figura 15.** Diagrama de astillas dirección y magnitud de los vectores de viento y corrientes en Punta Morro, durante el periodo de tiempo de medición. **a.** Viento (astillas rojas), **b.** Nivel de marea, **c** Corrientes ADCP (astillas azules).

### 6.3.1 Análisis para días específicos

Análisis de  $u$  (oeste - este),  $v$  (norte - sur) y  $(u,v)$  para ambas localidades durante los días 29 y 30 de Septiembre del 2002, estos días se tienen las amplitudes de correlación más altas, bajo condiciones de marea muerta y vientos unidireccionales del NW con magnitudes aproximadamente de 6 m/s.

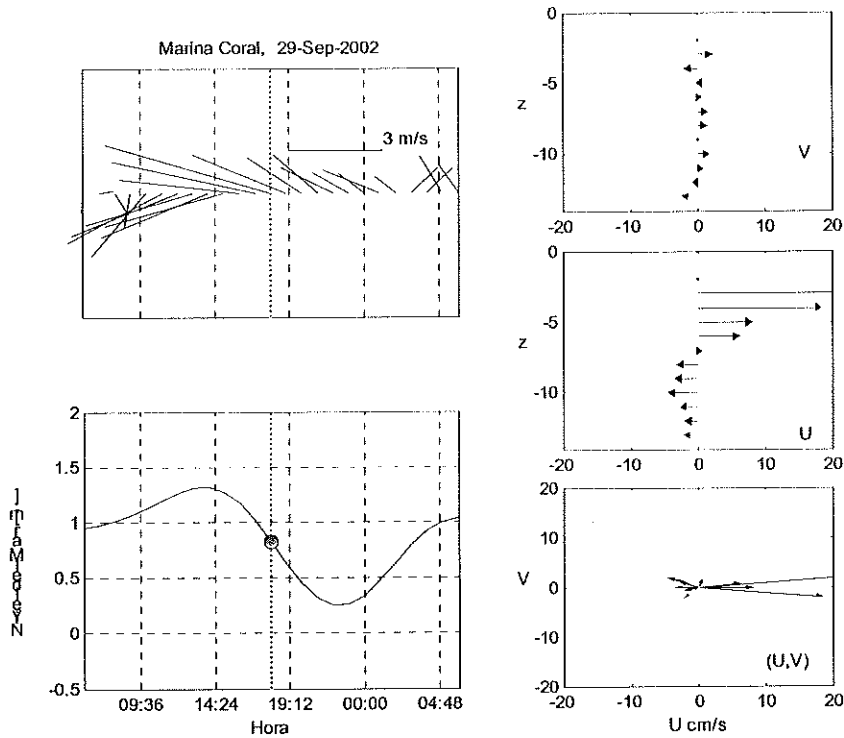
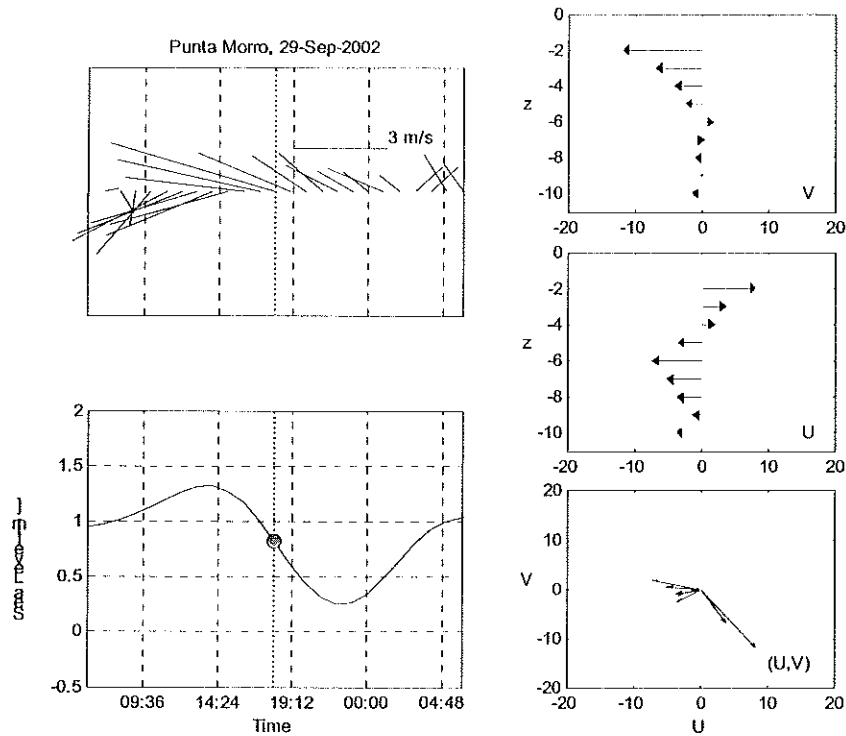
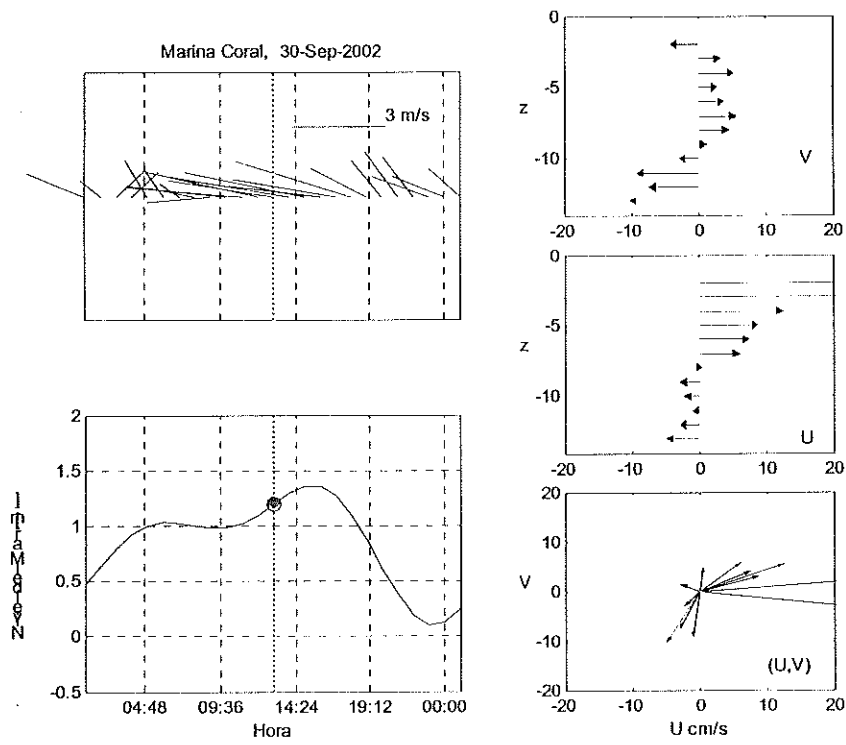


Figura 16. Perfil de velocidad para Playitas, para el día 29 de septiembre 2002 a las 6:50 PM, en condiciones de marea muerta, vientos de 4 m/s aproximadamente, y la marea bajando.

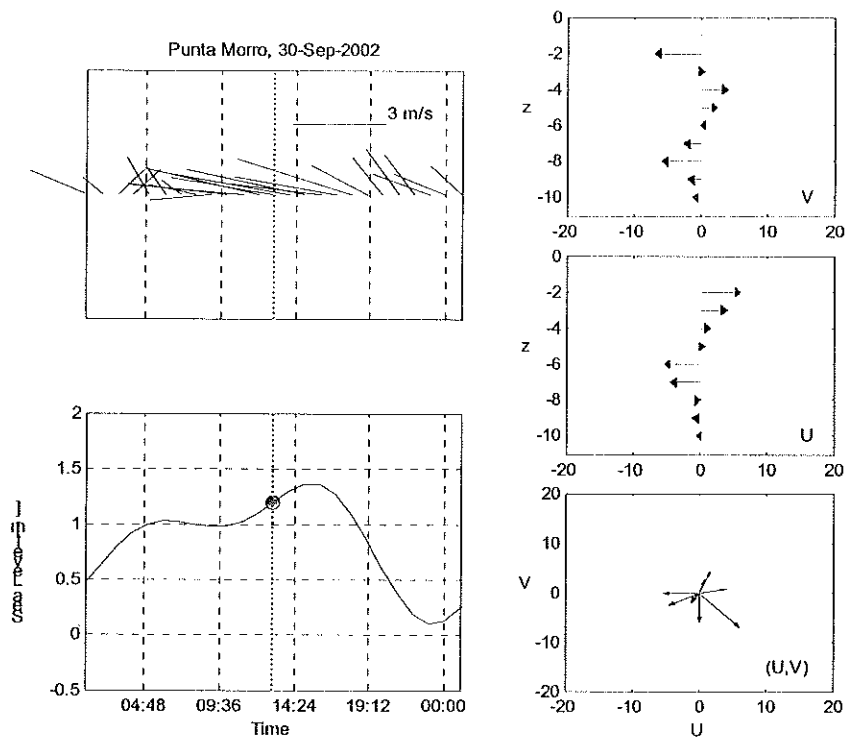


**Figura 17.** Perfil de velocidad para Punta Morro, para el día 29 de septiembre 2002 a las 6:50 PM, en condiciones de marea muerta, vientos de 4 m/s aproximadamente, y la marea bajando.

Para las figura 16 y 17, se observa las condiciones de viento, que estuvo soplando por 5 horas aproximadamente con velocidades de 5 m/s y proveniente del noroeste, se ve el efecto en las corrientes. Se observa que en PL (ver Fig. 16) para la componente  $v$  en las corrientes no hay mucha influencia del viento, y para la componente  $u$  es mayor la influencia del viento sobre las corrientes en la parte superficial, ésta llega a velocidades de 20 cm/s, ésta va disminuyendo con la profundidad hasta los 4 m, después el efecto del viento no se ve presente y la dirección y magnitud cambian, es menor hasta llegar a ser de 5 cm/s. En cambio para PM (ver Fig. 17), en la componente  $v$  las corrientes tienen una dirección negativa (sur), teniendo en la superficie la máxima velocidad de 10 cm/s, y para la componente  $u$ , las corrientes en la superficie tienen una orientación al este con velocidades de 8 cm/s, cambiando de orientación en la profundidad al oeste así como de velocidades de 5 cm/s.



**Figura 18.** Perfil de velocidad para Playitas, para el día 30 de septiembre 2002 a las 1:50 PM, en condiciones de marea muerta, vientos de 5 m/s aproximadamente y marea subiendo.



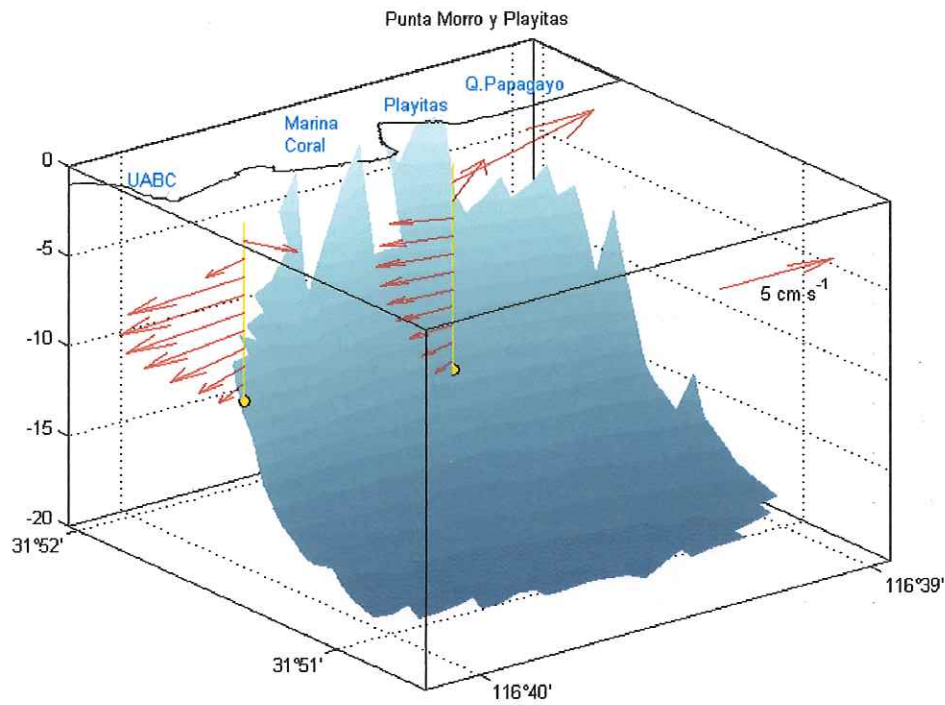
**Figura 19.** Perfil de velocidad para Punta Morro, para el día 30 de septiembre 2002 a las 1:50 PM, en condiciones de marea muerta, vientos de 5 m/s aproximadamente y marea subiendo.

En PL para el día 30 de septiembre del 2002 (Ver Fig.18), alrededor de la 2:00 PM las condiciones de viento son predominantes del noroeste con magnitudes de hasta 5 m/s, durante 3 horas, se observa el efecto que tiene en las corrientes sobre las componentes, en la componente  $v$  no es tan intenso, se ve que tiene magnitudes de 5 cm/s en la parte más superficial, en cambio en el fondo las velocidades son de 10 cm/s hacia el sur. Al contrario para la componente  $u$ , el efecto del viento tiene mayor influencia en las corrientes superficiales (afecta a 6 capas) siguiendo la misma dirección del viento hacia el este, con magnitudes mayores a 20 cm/s, y disminuyendo con la profundidad. El vector resultante de  $(u,v)$  se tiene mayor tendencia hacia el este con velocidades aproximadamente de 10 cm/s.

Para PM el día 30 de septiembre del 2002 (ver Fig. 19), en la componente  $v$  es mínimo el efecto del viento sobre las corrientes, llegan a ser de 8 cm/s, al igual que para la componente  $u$ , es pequeña la influencia del viento, teniendo velocidades de 8 cm/s en la parte más superficial, teniendo la misma dirección del viento y disminuyendo la velocidad con la profundidad.

Explicando así, la influencia del viento que tiene sobre las corrientes superficiales para cada localidad, y que éste es de más importancia en PL que en PM debido a diferentes factores, batimetría, forma de la línea de costa, el efecto de punta que existe en PM, donde la principal componente es  $u$  (oeste – este), y en la componente  $v$  (norte – sur) son mínimas las velocidades y direcciones.

En la figura 20, están colocados la velocidad promedio en la columna de agua, éstos se calcularon en toda la serie de tiempo y de cada profundidad, para ambos lugares PL y PM. En esta figura se distingue mejor la dirección y magnitud de las corrientes. En PL las velocidades superficiales indican direcciones y magnitudes muy diferentes al resto de la columna de agua, mostrando que la dirección predominante en la columna de agua es al noroeste. Las velocidades en PM, son más intensas, teniendo que la corriente en toda la columna de agua es más fuerte en este lugar, con dirección al oeste.



**Figura 20.** Velocidad promedio de la corriente en la columna de agua, para cada localidad Playitas y Punta Morro.

#### 6.4 Viento y Corrientes:

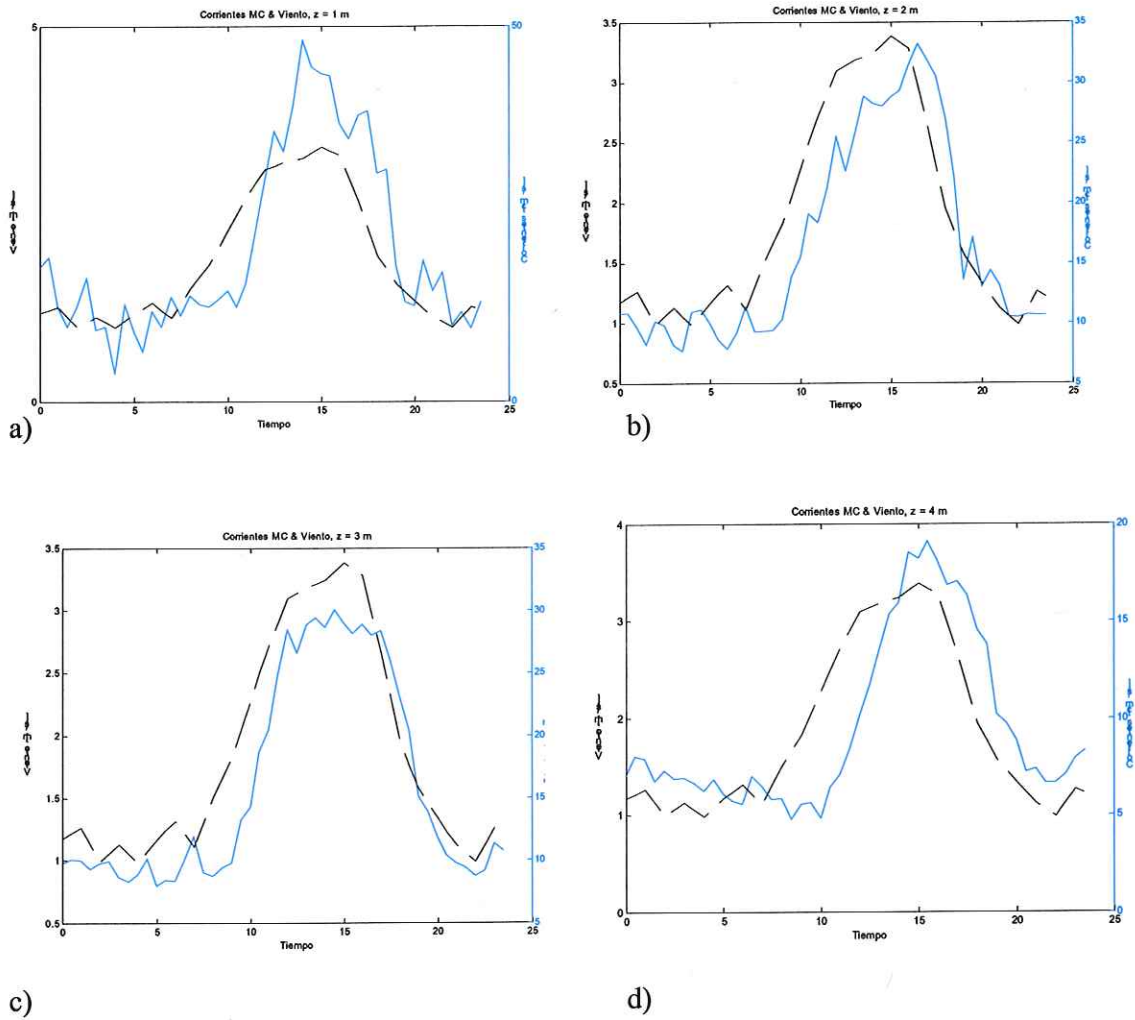
Analizar el efecto del viento sobre las corrientes es fundamental para este trabajo de tesis, para describir las corrientes en esta zona costera, observar el movimiento y transporte de agua, sedimentos, y del mismo modo participar con estos análisis sobre las posibles direcciones de contaminantes en la superficie del agua, por la presencia de diversas descargas de aguas residuales, de drenaje y pluviales.

La interacción del viento sobre las corrientes superficiales en el PL se puede observar (Fig. 21: a, b, c, d), que el viento inicia a soplar a las 7:00 de la mañana y éste va en incremento conforme pasa el tiempo, después de 3 ½ a 4 horas de soplar el viento, se nota la influencia de la corriente que inicia como a las 11:00 horas, y que empieza a incrementarse, debido al esfuerzo del viento que continúa soplando y que a partir de las 11:00 horas hasta las 17:00 es cuando están presentes los vientos más

intensos; entre 2.5 a 3.5 m/s, y por lo tanto la corriente también se intensifica en su magnitud hasta llegar ( 45 cm/s – 1<sup>era</sup> capa, 33 cm/s – 2<sup>da</sup> capa, 29 cm/s – 3<sup>era</sup> capa, y 18 cm/s – 4<sup>ta</sup> capa ), a las 20:00 horas es cuando el viento deja de soplar y la corriente disminuye a 10 cm/s. Después de la 4ta capa, la influencia del viento sobre la generación de la corriente superficial deja de ser significativo, y las velocidades a partir de los 4 metros al fondo son menores a 7 cm/s, lo cual sugiere una influencia de la circulación de mayor escala generada por el viento.

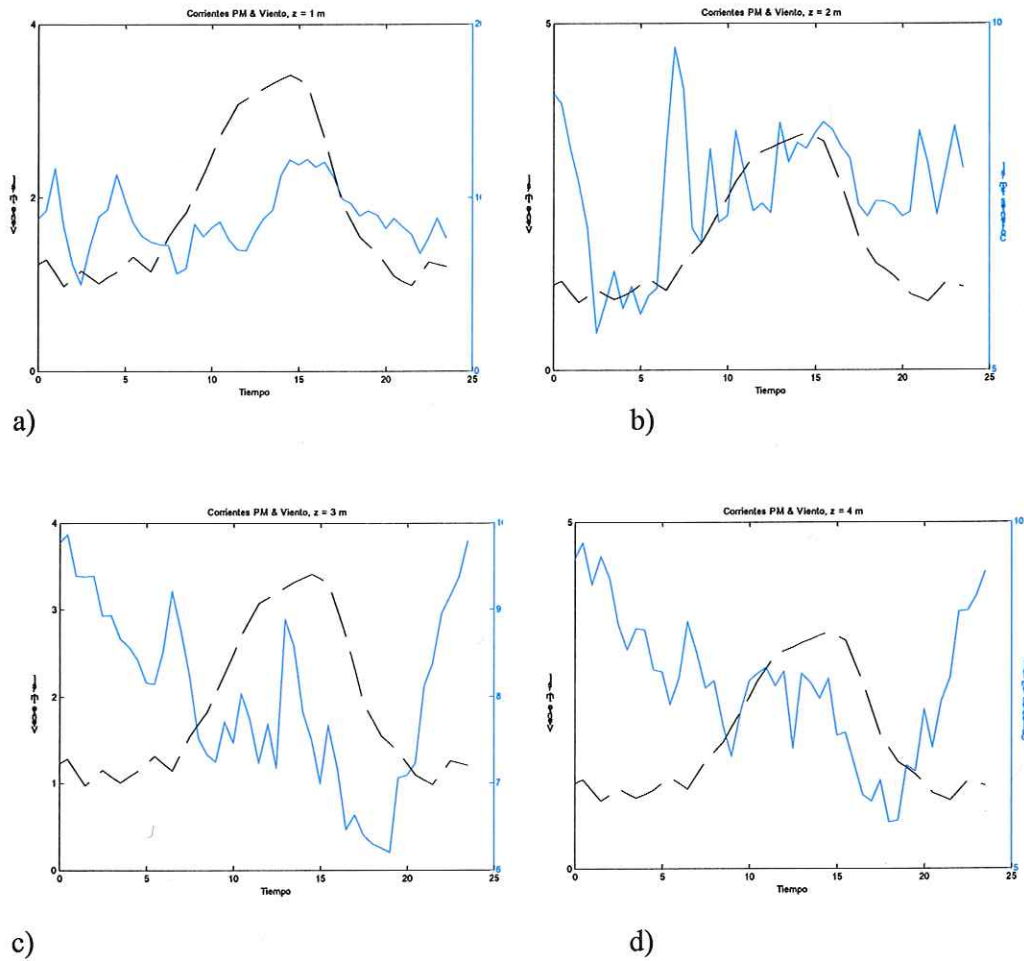
En cambio la interacción del viento sobre las corrientes para PM (Fig. 22: á, b, c, d). Sólo se observa que en la primera capa 1 m, el viento tiene poca influencia en la corriente superficial, alcanzando una magnitud de 12 cm/s, donde al igual que para el PL son las mismas características del viento en cuanto a dirección y magnitud. Cabe señalar que en PM, influyen otras características oceanográficas (batimetría, forma de la línea de costa, la presencia de otra corriente proveniente del norte y la influencia de la circulación de mayor escala.

### Viento y corrientes: Playitas.



**Figura 21.** Serie de tiempo de intensidad del viento (en m/s, línea punteada negra) y corriente (en cm/s, línea continua azul) en Playitas. a) representa a la corriente a 1m, b) a 2m, c) a 3m, y d) a 4m de profundidad.

## Viento y Corrientes: Punta Morro.



**Figura 22.** Serie de tiempo de intensidad del viento (en m/s, línea punteada negra) y corriente (en cm/s, línea continua azul) en Punta Morro. a) representa a la corriente a 1m, b) a 2m, c) a 3m, y d) a 4m de profundidad.

Es importante mencionar que ambos lugares se encuentran separados a una distancia de aproximadamente 700 metros, y existe un cambio significativo en la generación, dirección y magnitud de las corrientes. La dirección de la corriente más superficial va hacer la misma que la dirección que lleva el viento, y ésta a su vez se va haber afectada por la forma de la línea de costa.

Estos resultados son importantes, ya que de aquí tenemos bases para generar un modelo de corrientes, cuando tenemos viento de magnitudes de 3.0 m/s a 3.5 m/s soplando por 4 horas, se generan corrientes de hasta 20 cm/s en los primeros 4 metros de profundidad, durante 3 horas en PL.

## 6.5 Correlaciones entre viento y corrientes

La amplitud de Correlación, es el valor que existe entre una variable y otra de tipo vectorial, en este caso entre el viento y las corrientes de la columna de agua. Se calculó (Amplitud de Correlación, Desfase y Transferencia), así como también se graficaron los valores calculados de amplitud de correlación entre el viento y las diferentes capas de la corriente.

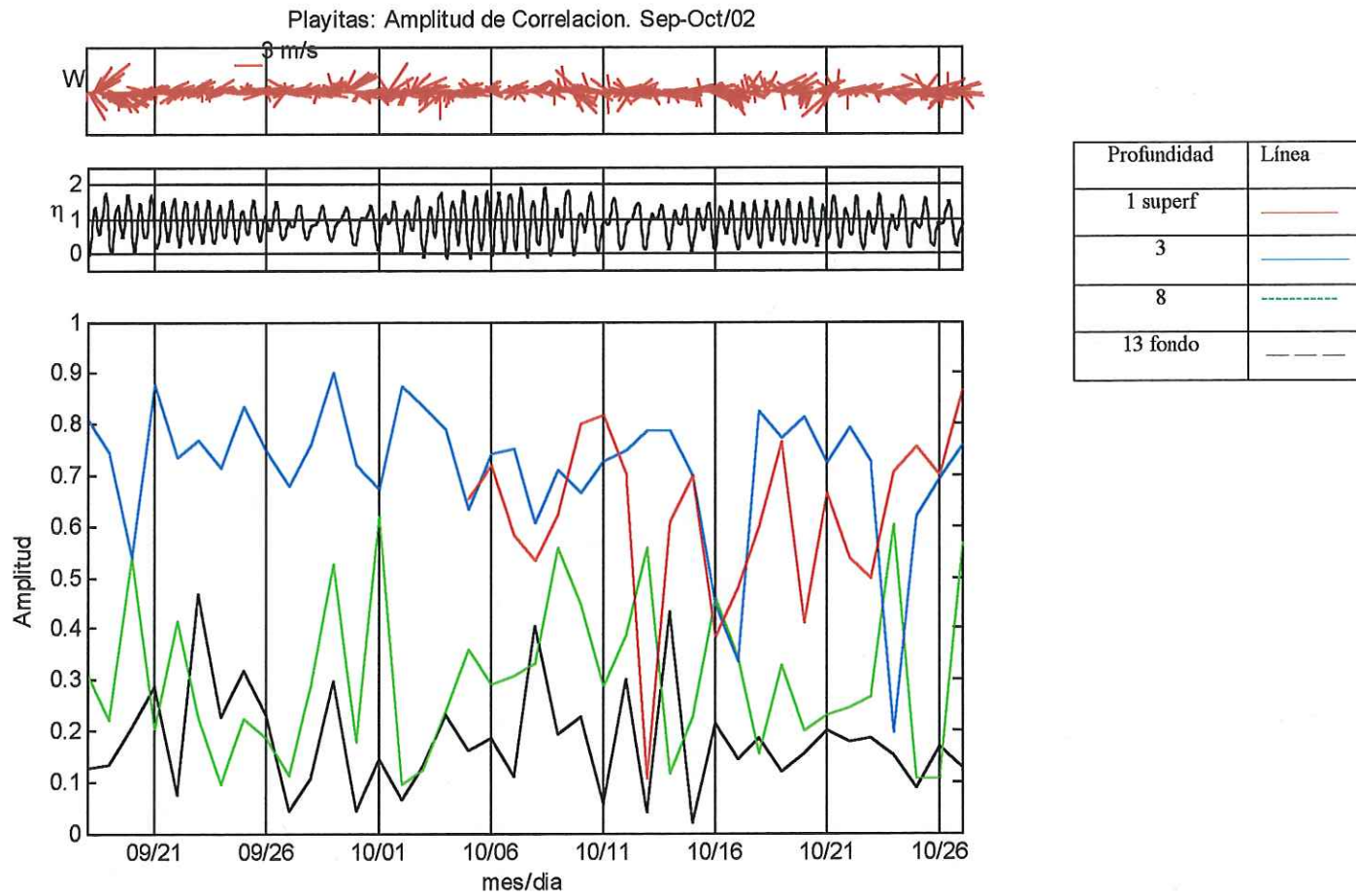
Para corroborar la influencia del viento sobre la corriente, se estimaron las correlaciones diarias que existen entre el viento y las corrientes para PL y PM, en donde se maneja, que una buena correlación es mayor a 0.80.

Para PL, las correlaciones fueron mayores entre el viento y las corrientes superficiales, en las capas 1ra a la 3ra los valores más altos se encuentran aquí, oscilan entre 0.75 y 0.90, comparado con los otros valores de las capas más profundas de menos de 0.60 (Tabla VII), en la figura 23, la amplitud de correlación se muestra entre estas 2 variables, además de que ésta asociado al ciclo de marea, en marea viva la amplitud de correlación disminuye, y cuando la marea es muerta, ésta aumenta.

En PM, los valores de la correlación son más bajos comparados con PL, éstos oscilan entre 0.60 y 0.35, son valores variables, en la capa más superficial se encuentran los valores más altos (Tabla VIII). Esos valores reportados no son pequeños para decir que existe una alta correlación entre el viento y las corrientes superficiales. El viento no tiene una alta importancia en este punto de las corrientes superficiales (ver Fig. 24).

Tabla VII. Valores de correlaciones para Playitas de los meses de Septiembre – Octubre 2002., entre el viento y las capas de corriente. Días con rojo (marea viva), días con color gris (marea muerta), color amarillo (valores más altos del día).

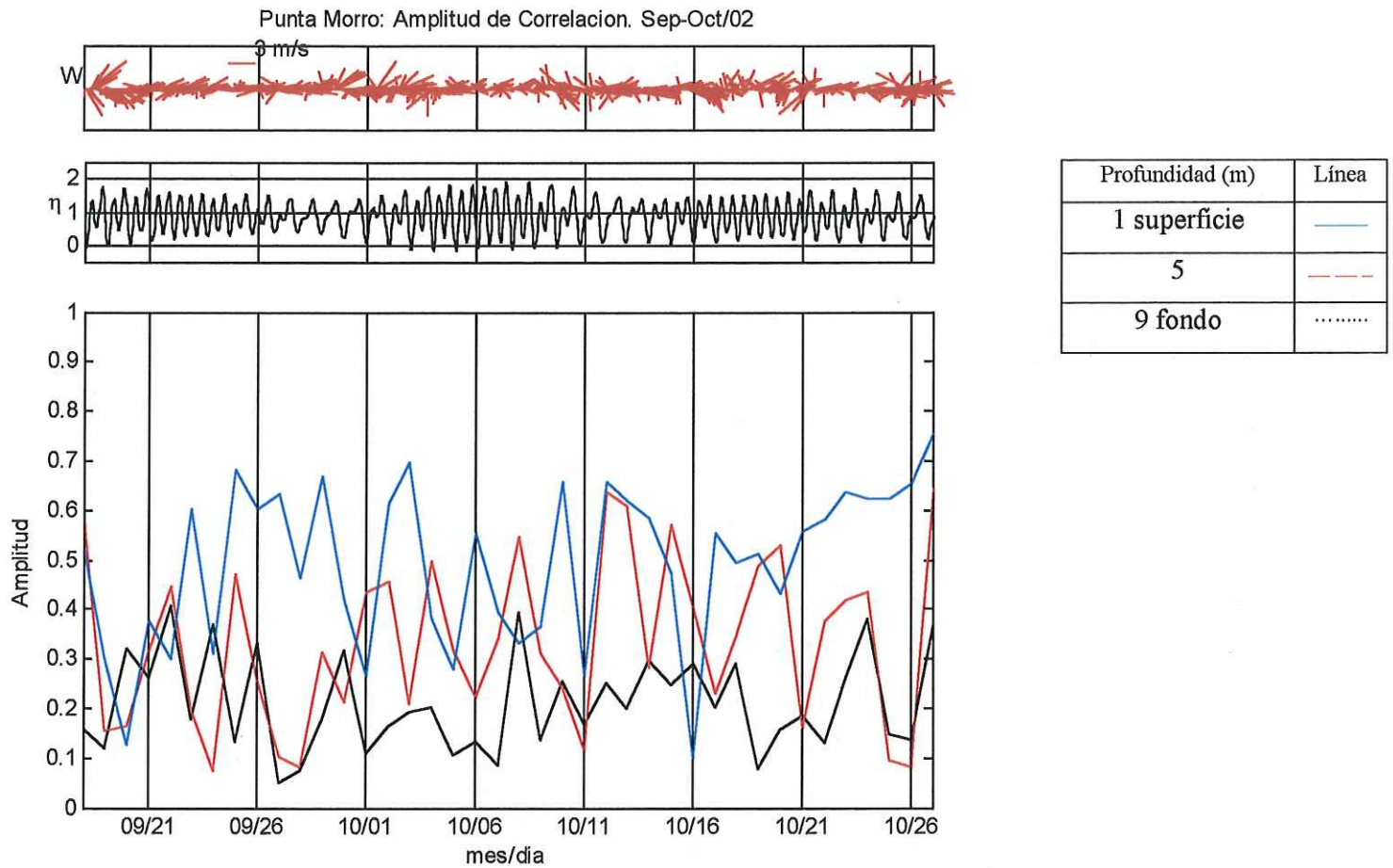
PLAYITAS													
Día	Superficie		Capas										Fondo
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
18	---	---	0.81	0.22	0.34	0.43	0.35	0.31	0.16	0.23	0.22	0.23	0.13
19	---	---	0.74	0.72	0.27	0.17	0.23	0.22	0.24	0.17	0.13	0.08	0.13
20	---	---	0.54	0.59	0.14	0.11	0.28	0.54	0.60	0.60	0.37	0.28	0.21
21	---	---	0.88	0.59	0.17	0.19	0.15	0.20	0.29	0.37	0.33	0.34	0.29
22	---	---	0.74	0.59	0.20	0.33	0.38	0.41	0.40	0.28	0.31	0.15	0.07
23	---	---	0.77	0.56	0.43	0.24	0.20	0.23	0.15	0.13	0.18	0.36	0.47
24	---	0.80	0.71	0.31	0.31	0.29	0.13	0.10	0.13	0.18	0.32	0.37	0.23
25	---	0.17	0.84	0.48	0.21	0.05	0.14	0.22	0.23	0.23	0.24	0.21	0.32
26	---	0.74	0.75	0.37	0.29	0.26	0.24	0.19	0.12	0.11	0.34	0.44	0.23
27	---	0.72	0.68	0.30	0.26	0.30	0.25	0.11	0.13	0.06	0.19	0.10	0.04
28	---	0.16	0.76	0.23	0.09	0.24	0.23	0.29	0.34	0.17	0.10	0.11	0.10
29	---	0.87	0.90	0.50	0.44	0.30	0.29	0.53	0.44	0.21	0.17	0.12	0.30
30	---	0.75	0.72	0.12	0.24	0.18	0.20	0.18	0.06	0.17	0.12	0.11	0.04
1	---	0.76	0.67	0.04	0.26	0.36	0.56	0.62	0.46	0.25	0.03	0.09	0.15
2	---	0.82	0.87	0.72	0.29	0.26	0.16	0.10	0.22	0.23	0.22	0.12	0.06
3	---	0.77	0.83	0.76	0.55	0.36	0.10	0.12	0.10	0.14	0.19	0.20	0.13
4	---	0.68	0.79	0.66	0.34	0.31	0.28	0.24	0.32	0.42	0.41	0.11	0.23
5	0.66	0.45	0.63	0.43	0.27	0.38	0.35	0.36	0.32	0.21	0.10	0.11	0.16
6	0.72	0.65	0.74	0.67	0.32	0.19	0.28	0.29	0.32	0.29	0.20	0.10	0.19
7	0.58	0.72	0.75	0.55	0.30	0.04	0.11	0.31	0.36	0.37	0.40	0.36	0.11
8	0.53	0.61	0.61	0.35	0.28	0.52	0.41	0.33	0.18	0.24	0.36	0.39	0.40
9	0.62	0.75	0.71	0.32	0.13	0.53	0.53	0.56	0.44	0.45	0.34	0.32	0.19
10	0.80	0.77	0.67	0.12	0.04	0.29	0.47	0.44	0.42	0.34	0.25	0.07	0.23
11	0.82	0.74	0.73	0.37	0.35	0.20	0.14	0.29	0.40	0.49	0.26	0.20	0.06
12	0.70	0.79	0.75	0.61	0.56	0.47	0.37	0.39	0.31	0.18	0.08	0.25	0.30
13	0.11	0.75	0.79	0.62	0.65	0.59	0.58	0.56	0.42	0.38	0.20	0.19	0.04
14	0.61	0.70	0.79	0.64	0.37	0.32	0.25	0.12	0.20	0.35	0.54	0.47	0.43
15	0.70	0.59	0.70	0.67	0.44	0.30	0.22	0.23	0.27	0.29	0.16	0.17	0.02
16	0.38	0.48	0.44	0.35	0.42	0.43	0.46	0.46	0.53	0.41	0.50	0.35	0.21
17	0.48	0.38	0.33	0.33	0.13	0.02	0.17	0.34	0.47	0.50	0.54	0.38	0.14
18	0.60	0.75	0.82	0.67	0.59	0.37	0.29	0.15	0.12	0.17	0.23	0.27	0.19
19	0.77	0.74	0.77	0.62	0.55	0.37	0.27	0.33	0.21	0.06	0.25	0.05	0.12
20	0.41	0.80	0.81	0.81	0.68	0.70	0.46	0.20	0.20	0.13	0.02	0.12	0.16
21	0.67	0.62	0.72	0.65	0.41	0.11	0.15	0.23	0.17	0.29	0.30	0.30	0.20
22	0.54	0.77	0.79	0.72	0.28	0.08	0.19	0.24	0.16	0.06	0.13	0.22	0.18
23	0.50	0.74	0.73	0.63	0.51	0.45	0.32	0.27	0.25	0.24	0.20	0.22	0.19
24	0.71	0.46	0.20	0.12	0.62	0.65	0.65	0.60	0.68	0.47	0.49	0.42	0.15
25	0.76	0.59	0.62	0.20	0.13	0.18	0.18	0.11	0.04	0.07	0.14	0.00	0.09
26	0.70	0.68	0.69	0.21	0.21	0.14	0.11	0.11	0.15	0.15	0.09	0.13	0.17
27	0.87	0.74	0.76	0.49	0.74	0.72	0.66	0.57	0.53	0.34	0.21	0.16	0.13



**Figura 23.** Amplitud de Correlación entre el viento y las corrientes a diferentes profundidades en toda la serie de tiempo, Playitas Sep-Oct 2002.

Tabla VIII. Valores de correlaciones para Punta Morro de los meses de Septiembre –Octubre 2002, entre el viento y las capas de corriente. Días con rojo (marea viva), días con color gris (marea muerta), color amarillo (valores más altos del día).

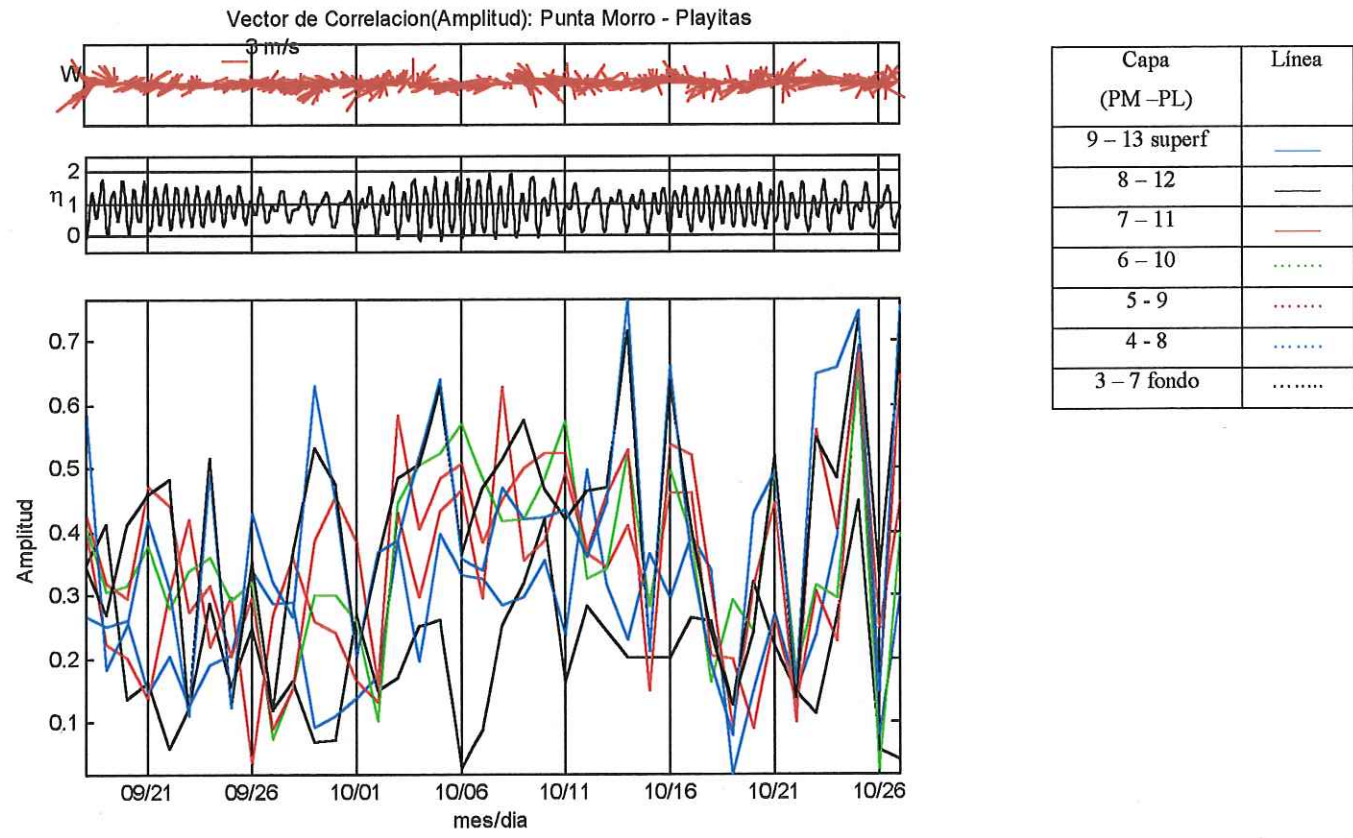
Punta Morro.									
Día	Capas								Fondo
	Superficie		3	4	5	6	7	8	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
18	0.52	0.34	0.60	0.61	0.57	0.50	0.43	0.35	0.16
19	0.30	0.19	0.30	0.11	0.16	0.13	0.13	0.20	0.12
20	0.13	0.32	0.26	0.10	0.17	0.03	0.10	0.27	0.26
21	0.38	0.21	0.27	0.24	0.32	0.36	0.20	0.29	0.26
22	0.30	0.21	0.39	0.50	0.45	0.40	0.38	0.26	0.41
23	0.60	0.41	0.56	0.37	0.20	0.17	0.16	0.25	0.18
24	0.31	0.23	0.12	0.11	0.08	0.20	0.29	0.17	0.37
25	0.68	0.65	0.64	0.57	0.47	0.32	0.08	0.01	0.14
26	0.60	0.33	0.33	0.28	0.25	0.23	0.32	0.28	0.33
27	0.63	0.15	0.18	0.10	0.10	0.09	0.12	0.23	0.05
28	0.46	0.32	0.27	0.18	0.08	0.11	0.25	0.06	0.07
29	0.67	0.61	0.67	0.49	0.31	0.31	0.33	0.24	0.18
30	0.42	0.35	0.26	0.20	0.21	0.26	0.16	0.28	0.32
1	0.27	0.26	0.34	0.46	0.44	0.42	0.24	0.18	0.11
2	0.62	0.44	0.51	0.52	0.46	0.41	0.26	0.23	0.16
3	0.69	0.67	0.65	0.47	0.21	0.18	0.13	0.07	0.19
4	0.38	0.46	0.35	0.45	0.50	0.46	0.43	0.33	0.20
5	0.28	0.23	0.29	0.35	0.32	0.29	0.21	0.17	0.11
6	0.55	0.30	0.31	0.08	0.22	0.18	0.16	0.20	0.14
7	0.39	0.25	0.36	0.24	0.34	0.37	0.22	0.10	0.08
8	0.33	0.10	0.49	0.55	0.55	0.59	0.48	0.34	0.39
9	0.37	0.24	0.42	0.48	0.31	0.29	0.42	0.26	0.14
10	0.66	0.15	0.13	0.07	0.24	0.13	0.21	0.20	0.26
11	0.27	0.13	0.25	0.15	0.12	0.23	0.28	0.25	0.17
12	0.66	0.63	0.75	0.72	0.64	0.54	0.49	0.35	0.25
13	0.62	0.52	0.49	0.54	0.61	0.58	0.58	0.40	0.20
14	0.59	0.35	0.29	0.28	0.28	0.41	0.37	0.44	0.30
15	0.47	0.63	0.63	0.50	0.57	0.57	0.51	0.27	0.25
16	0.10	0.33	0.42	0.34	0.40	0.52	0.45	0.41	0.29
17	0.55	0.45	0.13	0.15	0.23	0.23	0.24	0.10	0.20
18	0.50	0.59	0.55	0.44	0.34	0.34	0.36	0.34	0.29
19	0.51	0.58	0.56	0.51	0.49	0.38	0.28	0.25	0.08
20	0.43	0.64	0.64	0.59	0.53	0.38	0.18	0.08	0.16
21	0.56	0.29	0.32	0.26	0.16	0.20	0.14	0.23	0.19
22	0.58	0.42	0.45	0.42	0.38	0.34	0.31	0.33	0.13
23	0.64	0.58	0.65	0.56	0.42	0.35	0.24	0.22	0.26
24	0.62	0.16	0.47	0.44	0.43	0.44	0.43	0.44	0.38
25	0.62	0.16	0.24	0.20	0.10	0.07	0.04	0.06	0.15
26	0.65	0.20	0.22	0.13	0.08	0.12	0.22	0.15	0.14
27	0.75	0.56	0.73	0.71	0.65	0.68	0.65	0.54	0.37



**Figura 24.** Amplitud de Correlación entre el viento y las corrientes a diferentes profundidades en toda la serie de tiempo, Punta Morro Sep-Oct 2002.

Tabla IX. Valores de correlaciones entre capas de corriente de Playitas y Punta Morro, de los meses de Septiembre –Octubre 2002. Días con rojo (marea viva), días con color gris (marea muerta), color amarillo (valores más altos del día).

Correlación de capas entre PM y PL							
Día	Capas						Fondo
	Superficie						
	9-13	8-12	7-11	6-10	5-9	4-8	3-7
18	0.58	0.34	0.42	0.41	0.40	0.27	0.35
19	0.19	0.27	0.32	0.31	0.22	0.25	0.41
20	0.25	0.41	0.30	0.32	0.20	0.26	0.14
21	0.42	0.46	0.47	0.38	0.14	0.15	0.16
22	0.31	0.48	0.44	0.28	0.31	0.21	0.06
23	0.11	0.11	0.28	0.34	0.42	0.13	0.12
24	0.49	0.52	0.32	0.36	0.22	0.19	0.29
25	0.12	0.12	0.20	0.29	0.30	0.21	0.16
26	0.43	0.35	0.30	0.32	0.03	0.34	0.25
27	0.11	0.11	0.28	0.34	0.42	0.13	0.12
28	0.27	0.36	0.15	0.16	0.36	0.29	0.17
29	0.63	0.53	0.39	0.30	0.26	0.09	0.07
30	0.45	0.47	0.46	0.30	0.24	0.11	0.07
1	0.20	0.20	0.38	0.26	0.16	0.14	0.27
2	0.37	0.36	0.16	0.10	0.13	0.17	0.15
3	0.39	0.48	0.58	0.45	0.43	0.39	0.17
4	0.52	0.51	0.40	0.50	0.30	0.20	0.25
5	0.64	0.63	0.49	0.52	0.43	0.40	0.26
6	0.36	0.37	0.51	0.57	0.47	0.33	0.03
7	0.34	0.47	0.38	0.48	0.30	0.33	0.09
8	0.47	0.51	0.45	0.42	0.63	0.28	0.25
9	0.42	0.58	0.50	0.42	0.36	0.30	0.32
10	0.42	0.47	0.52	0.48	0.39	0.36	0.42
11	0.44	0.42	0.52	0.58	0.49	0.24	0.16
12	0.36	0.47	0.37	0.33	0.37	0.50	0.28
13	0.45	0.47	0.46	0.34	0.35	0.32	0.24
14	0.77	0.72	0.53	0.53	0.41	0.23	0.20
15	0.21	0.22	0.15	0.28	0.29	0.37	0.20
16	0.66	0.64	0.54	0.50	0.46	0.30	0.20
17	0.36	0.41	0.52	0.39	0.46	0.39	0.27
18	0.19	0.24	0.31	0.16	0.20	0.34	0.26
19	0.08	0.13	0.09	0.29	0.20	0.02	0.13
20	0.43	0.24	0.31	0.24	0.09	0.15	0.32
21	0.49	0.52	0.45	0.50	0.26	0.27	0.22
22	0.16	0.14	0.10	0.18	0.13	0.15	0.15
23	0.65	0.52	0.56	0.32	0.30	0.24	0.11
24	0.66	0.49	0.40	0.29	0.23	0.39	0.26
25	0.75	0.74	0.68	0.65	0.68	0.69	0.45
26	0.15	0.33	0.15	0.03	0.25	0.08	0.06
27	0.75	0.69	0.65	0.40	0.45	0.30	0.04
Total	0.50	0.49	0.47	0.45	0.39	0.31	0.24



**Figura 25.** Grafica de amplitud de correlación de Punta Morro y Playitas, entre las diferentes capas de corriente.

Al comparar las corrientes entre PL y PM, los valores de amplitud de correlación son bajos aproximadamente de 0.65 (Tabla 8), no existe una buena correlación entre estaciones, en cuestión de magnitud y dirección, los valores máximos de correlación se presentan en la capas más superficiales (Ver Fig. 25) (9-13 y 8-12) y estos se dan en condiciones de marea muerta.

Hay varios factores en la determinación de la correlación entre el viento y las corrientes superficiales, tal como es el efecto de la batimetría del lugar, corriente residuales, así como otros factores oceanográficos como el flujo de otra corriente, la presencia de giros, afectan el análisis de la correlación vectorial, son factores que se afectan la circulación superficial de la corriente y no se tomaron en cuenta en el análisis.

## 6.6 Marea y Corrientes

Se tomó una parte de la serie de tiempo, del 26 de septiembre al 01 de octubre del 2002, que están bajo condiciones de marea muerta y viento unidireccional predominante, para ambas localidades; y se analizó el comportamiento de las corrientes bajo estas circunstancias.

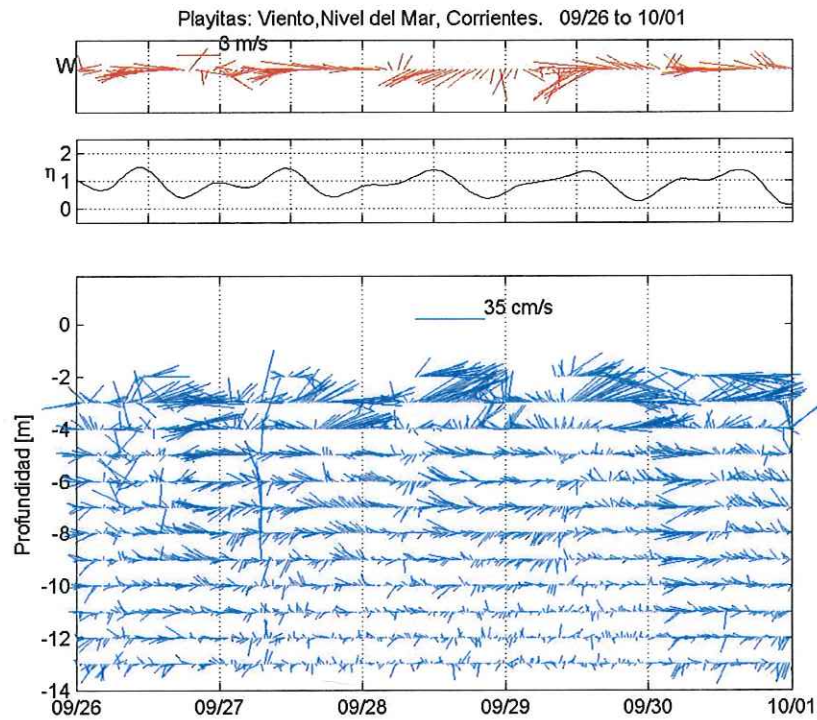
En estos días, los vientos presentes provienen del suroeste principalmente de 3-4 m/s, bajo periodos de marea muerta, las corrientes en PL tienden a orientarse al noroeste, con magnitudes de 35 cm/s, por lo tanto siguen la dirección del viento; se ve cómo el viento tiene su efecto hasta la 4ta capa en la columna de agua, a partir de aquí la dirección y magnitud cambian, teniendo direcciones de la corriente hacia el noroeste presentando velocidades de 15 cm/s aproximadamente, disminuyendo la velocidad al aumentar la profundidad (Fig. 26). Es mayor la intensidad de la corriente en la superficie que en el fondo.

En PL, (Ver Fig. 27), se representan las corrientes pero en una serie de colores, para las componentes  $u$  y  $v$ , los colores amarillo-rojo muestran valores positivos y azul los negativos. Claramente se ve como está el viento soplando y afecta a las corrientes, en la superficie para la componente  $v$ , la dirección predominante es al norte; en cambio para la componente  $u$  en la superficie se observa una orientación al este con magnitudes alrededor de a 30 cm/s, aproximadamente a los 5 m, en el resto de la columna de agua

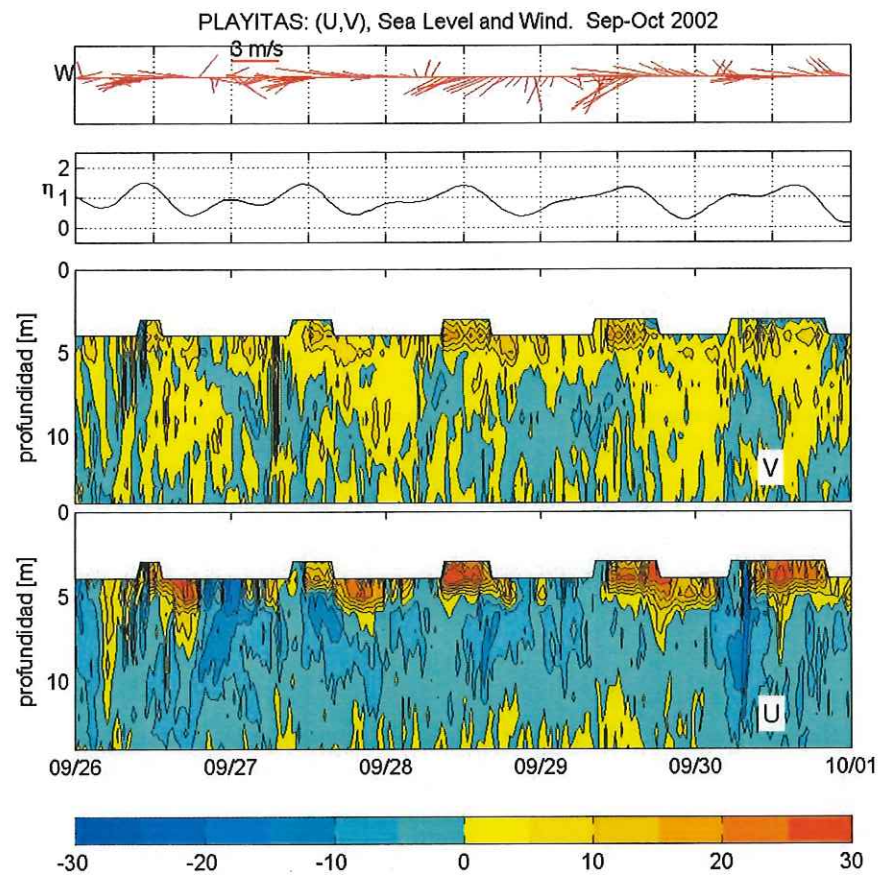
(5 – 12 m ) el color predomina en tonalidades de azules, indicando un cambio de dirección al oeste con magnitudes de 10 cm/s aproximadamente.

Analizando las figuras 26 y 27, en ambas se ve marcado el efecto del viento que viene del SW sobre las corrientes superficiales. Combinándolas tenemos que hay dos direcciones en la columna de agua marcadas, en la superficie (1 – 4 m, hacia el noreste de 30 cm/s) y en lo profundo (5 – 12 m, hacia el noroeste de 10 cm/s). Durante estos días la amplitud de correlación son valores altos de entre 0.80 a 0.90.

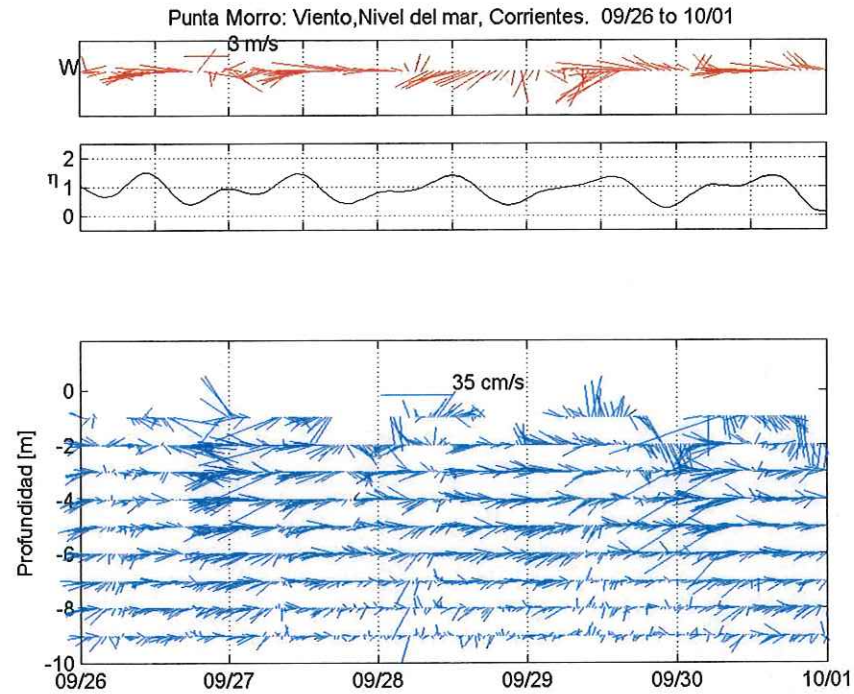
Para PM (ver Fig. 28) la influencia directa del viento sobre las corrientes es pequeña, sólo se observa en la primera capa 1 m, en el resto de la columna de agua no se observa claramente el esfuerzo del viento, las corrientes mantienen una dirección predominante al suroeste con magnitudes de 15 cm/s aproximadamente. La intensidad de la corriente disminuye conforme la profundidad, en fondo son menos intensos que en la superficie. Como se puede apreciar en la figura 29, las corrientes predominantes son hacia el suroeste, solamente se aprecia un intervalo de tiempo en que son hacia el sureste en la parte superficial de algunos días (27 y 28), cuando la marea es baja y la presencia del viento del NE. Los valores de correlación promedio en estos días es de 0.60, una amplitud de correlación baja.



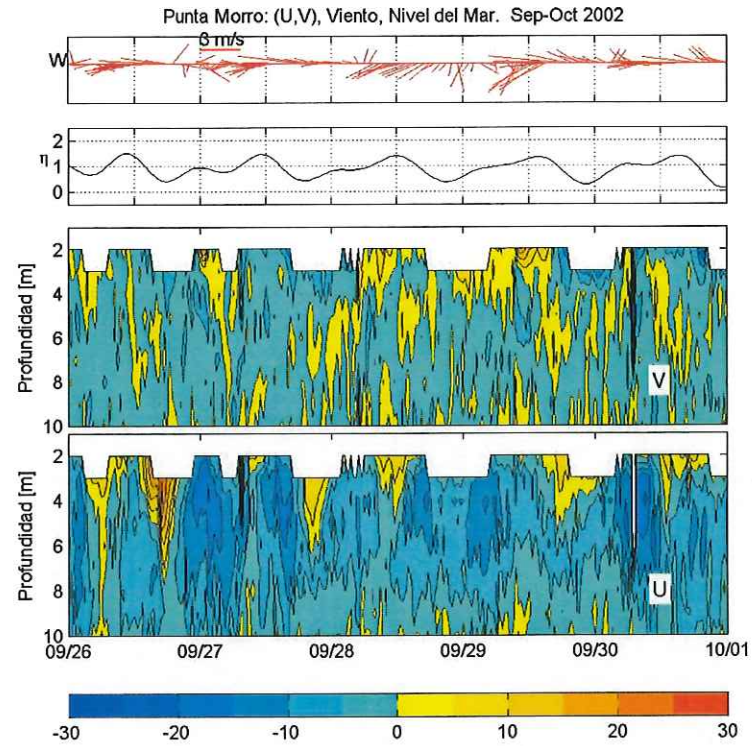
**Figura 26.** Representación de las corrientes en Playitas para los días del 26 sep – 01 oct 2002. Bajo condiciones de marea muerta y viento unidireccional. Viento (astillas rojas), nivel del mar, corrientes (astillas azules).



**Figura 27.** Representación de las corrientes en sus componentes u y v en Playitas para los días del 26 sep - 01 oct 2002. Bajo condiciones de marea muerta.



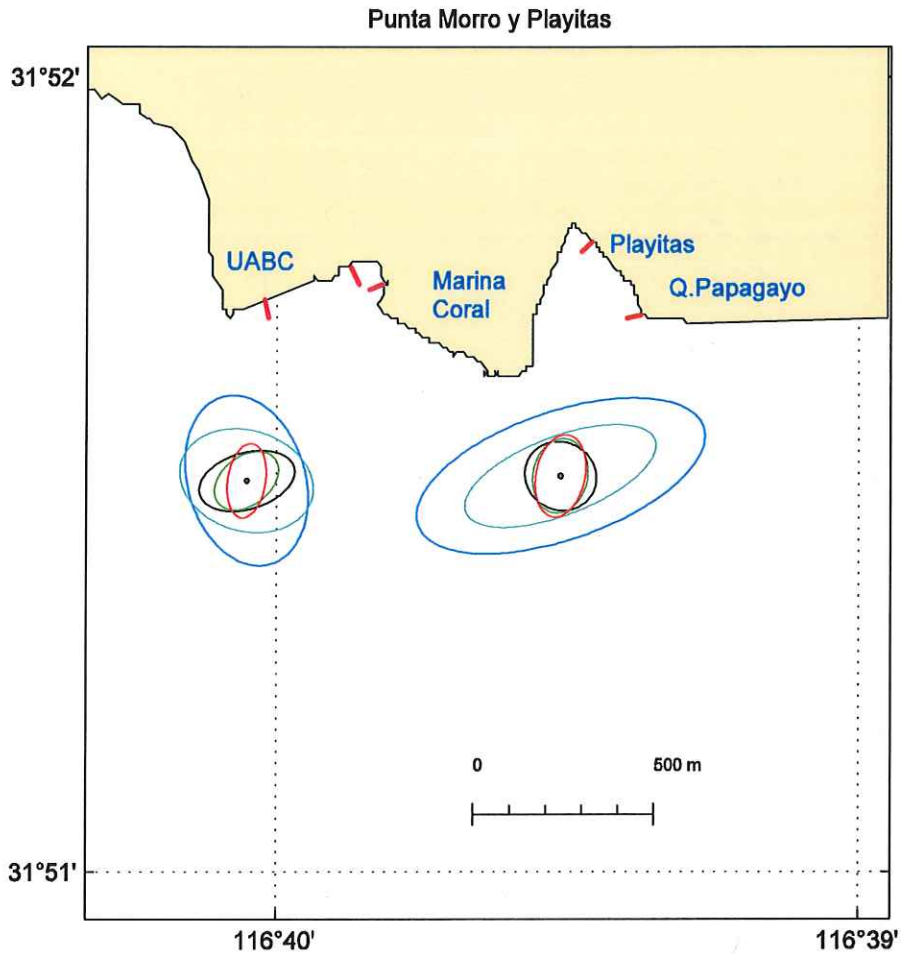
**Figura 28.** Representación de las corrientes en Punta Morro para los días del 26 -01 sep-oct 2002. Bajo condiciones de marea muerta y viento unidireccional.



**Figura 29.** Representación de las corrientes en sus componentes u y v en Punta Morro para los días del 26 -01 sep-oct 2002. Bajo condiciones de marea muerta.

## 6.8 Elipses de Variación de la Corriente

Para las elipses de variación de la corriente, se calcularon para todas las profundidades, las más representativas se muestran en figura 30. Las corrientes en el mar, en ríos y en estrechos fluyen en línea recta, dentro de casi la totalidad de la columna de agua, sin embargo adquieren una forma más elíptica en la superficie ó cerca del fondo donde la fricción se vuelve importante.



**Figura 30.** Elipses de variación de corrientes, a diferentes profundidades. Colores azules fuerte y claro es superficie (1 y 2 m respectivamente), negro a media agua (5 m PM y 6 m PL), verde y rojo profundidad (8 y 9 m PM y 10 y 11 m para PL).

Tabla X. Datos de Elipse de variación para PL y la razón de excentricidad.

Profundidad	M (cm)	m (cm)	$\Theta$ grados	Excentricidad (M/m)
<b>1</b>	<b>16.9366</b>	<b>5.4998</b>	<b>12.8123</b>	<b>3.08</b>
2	11.298	3.3826	14.429	3.34
3	5.4142	2.6775	0.52633	2.02
4	4.7763	2.6758	-1.0095	1.78
5	4.3382	2.7189	-2.4035	1.60
<b>6</b>	<b>4.1146</b>	<b>2.8862</b>	<b>-5.3055</b>	<b>1.43</b>
7	3.8747	2.8151	-7.5935	1.38
8	3.633	2.7499	-6.8318	1.32
9	3.3715	2.8423	-0.13492	1.19
10	3.3335	2.9631	40.1218	1.13
<b>11</b>	<b>3.5949</b>	<b>2.7361</b>	<b>65.3277</b>	<b>1.31</b>

Tabla XI. Datos de Elipse de variación para PM y la razón de excentricidad.

Profundidad	M (cm)	m (cm)	$\Theta$ grados	Excentricidad (M/m)
<b>1</b>	<b>7.8068</b>	<b>6.2809</b>	<b>-47.2704</b>	<b>1.19</b>
2	7.657	4.2672	-7.7116	1.79
3	7.0134	2.994	2.6028	2.34
4	6.1449	2.6486	8.0117	2.32
<b>5</b>	<b>5.5176</b>	<b>2.3938</b>	<b>9.88</b>	<b>2.30</b>
6	4.8515	2.3519	10.8448	2.06
7	4.2829	2.2119	13.9012	1.94
8	3.8105	2.1816	20.6209	1.75
<b>9</b>	<b>3.1767</b>	<b>2.1328</b>	<b>28.2494</b>	<b>1.49</b>

En las tablas X y IX se muestran los valores de las componentes de las elipses de variación de ambas regiones a diferentes profundidades. La razón de excentricidad indica la forma de la elipse, el valor más cercano a 1 significa que la corriente es más variable.

Para la figura 30, en la superficie se observa que las elipses son de mayor dimensión, éstas disminuyen en función a la profundidad, teniendo que las corrientes son más intensas en la parte superficial

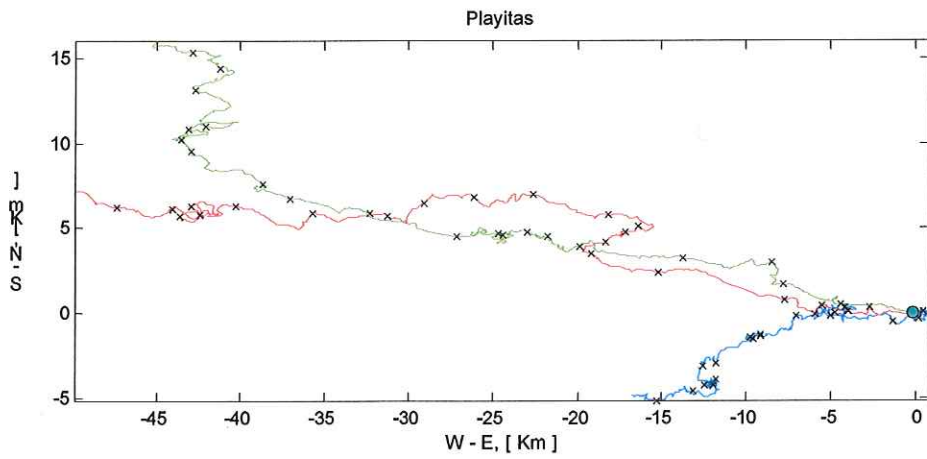
Las elipses de la superficie son variables en cuanto a la dirección y magnitud, ya que se tiene la influencia de diferentes variables (viento, marea, corriente de retorno, forma de la línea de costa), conforme aumenta la profundidad, se nota más el efecto de fricción entre las corrientes y el fondo.

En PL la orientación de las elipses es con la componente  $u$ , siguiendo la forma de la costa, y éstas son de mayor tamaño, asumiendo algún factor de mayor importancia aquí. Para PM, se observa en la superficie las elipses no son de mayor tamaño comparadas con PL, teniendo diversos factores como ya se mencionó antes, la principal componente aquí es la  $v$ .

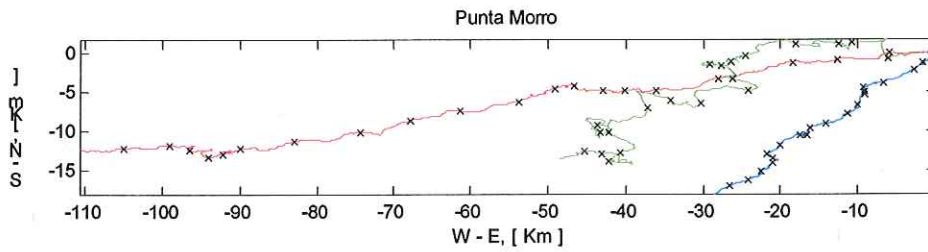
#### **6.9 Transporte neto.**

En la figura 31 y 32 se grafican el transporte a 3 diferentes profundidades; para PL (Fig. 31) en toda la serie de tiempo el máximo transporte aproximadamente fue de 50 Km donde se presentó a una profundidad intermedia y con dirección al noroeste (NW), comparado con el fondo éste cambia de dirección y el transporte es menor, porque es menor la fuerza de la corriente; y para PM (Fig. 32) acusa un mayor transporte en el periodo de tiempo que fue superior, debido a que la corriente es más intensa, éste fue de aproximadamente de 110 Km en la parte sub-superficial, orientada al oeste suroeste (WSW), comparada con las otras profundidades el transporte fue menor, y casi con la misma dirección mayormente al suroeste (SW)

Vectores progresivos a diferentes profundidades.



**Figura 31.** Vectores progresivos a 3 diferentes profundidades en Playitas (verde – sub-superficial; rojo – intermedia; azul – fondo).



**Figura 32.** Vectores progresivos a 3 diferentes profundidades en Punta Morro (verde – sub-superficie; rojo – intermedia; azul – fondo).

## 7.- DISCUSIONES.

El comportamiento de las corrientes que se presentan en estas áreas cercanas a la costa es compleja, por presentar diferentes factores que son importantes en su comportamiento; como son: viento, mareas, forma de la línea de costa, batimetría, oleaje, surgencias costeras y la presencia de la circulación en gran escala en la BTS.

La hidrodinámica en la zona costera entre PM y PL durante los meses de medición Septiembre y Octubre 2002, principalmente la corriente en el fondo (5 m al fondo) hay una influencia por el efecto de la circulación de gran escala y la marea, y en las corrientes superficiales (4m a 1m de la superficie) se ve afectada directamente por el viento y por la forma de la línea de costa y en menor medida los factores mencionados anteriormente.

Existe un mayor efecto del viento sobre las corrientes superficiales en la región de PL que en la de PM. La velocidad se incrementa conforme nos vamos hacia la superficie, donde llega a alcanzar valores de hasta 50 cm/s. En aguas intermedias el efecto del viento deja de ser importante, y están presentes principalmente la marea, la forma de línea de costa y la circulación a gran escala, donde las corrientes alcanzan valores de hasta 15 cm/s aproximadamente. En la capa más cercana al fondo se ve el efecto de la forma de la línea de costa, que es como cuña, de PL y el espigón cercano.

El transporte neto en la columna de agua en PM tiene una dirección predominante hacia el WSW. Se tiene una correlación baja entre el viento y las corrientes en toda la columna de agua. En la superficie se ve una corriente hacia el SW, debida principalmente a un flujo, forzado por el viento, proveniente del N debido a la forma de la línea de costa. En aguas intermedias se ve un flujo hacia el WSW debido principalmente a la circulación, debido al viento, de gran escala en toda la BTS. En el fondo es un flujo más débil que en capas intermedias, de menor escala y ligeramente modificado por la batimetría.

En nuestros resultados, la corriente producida por el viento tiene una influencia directa en la columna de agua, hasta unos 3 metros de profundidad aproximadamente. Lo anterior es más evidente en PL, en PM se ve modificado el flujo proveniente del N.

En aguas intermedias se ve un efecto de circulación de gran escala de corrientes forzadas por el viento. Lo anterior apoya a las características de la circulación obtenidas por observaciones y esfuerzos de modelaje realizados por Argote *et al.* (1975, 1991).

Las corrientes presentan un panorama diferente en las dos estaciones, a pesar de que están separadas aproximadamente 700m. Se ve que la orientación de la línea de costa juega un papel importante principalmente en PM, ya que se hace evidente un flujo superficial que proviene de la parte norte de PM. Las corrientes en el fondo son débiles, debido al efecto de fricción, en comparación con la superficie.

Las elipses de variación de corriente variabilidad obtenidas a diferentes profundidades en PM y PL, dan una buena idea de la variación en magnitud y orientación de las corrientes. Muestran la circulación en gran escala en las capas intermedias, el efecto del viento en las capas superficiales y el efecto de fricción y forma de la línea de costa en las capas cercanas al fondo.

## 8.- CONCLUSIONES.

La brisa diurna se presenta de 7:00 a las 19:00 horas, con velocidades de 3m/s llegando a ser más intensas en la tarde (14:00) de hasta 8 m/s, provienen del W y WNW; y por la noche la brisa nocturna se establece entre las 20:00 a las 6:00 horas del día siguiente con velocidades promedio de 1.2 m/s y dirección variable.

Las corrientes en Playitas presentan una variación en dirección y magnitud de acuerdo con la profundidad, en la parte más superficial (1 m) la magnitud promedio es de **15 cm/s** y con dirección NE, en el fondo (12 m) se tienen velocidades promedio de **4.04 cm/s**, con direcciones SW, en general el transporte neto en toda la columna de agua es al WNW siguiendo la forma de la línea de costa.

De la misma manera que en Playitas, las corrientes en Punta Morro tienen variación vertical, para la parte más superficial (1 m) son de magnitudes promedio de **8.37 cm/s** y con dirección SE, siguiendo una trayectoria hacia adentro de la BTS; y en el fondo (10 m) se tienen velocidades promedio de **3.71 cm/s**, con una dirección al SW. El transporte neto observado de la corriente en toda la columna de agua es en dirección WSW.

En Punta Morro se tiene la presencia de las corrientes más intensas (**66 cm/s**) que en Playitas (**55 cm/s**), debido a la batimetría, forma de línea de costa y a la corriente que proviene del N. Para Playitas la presencia del viento es un factor importante en cuanto a la generación de las corrientes superficiales (0 – 4 metros). De las capas intermedias al fondo provienen de la circulación de gran escala generada por el viento

## **9.- RECOMENDACIONES.**

Los resultados presentados aquí sólo representan una parte del periodo de un año y una parte de la BTS, de los cuales deberían ser el principio de varios estudios de corrientes cerca de la costa, que son de alta importancia para el desarrollo de diferentes actividades comerciales, recreativas y de conservación.

Es necesario la toma de mayor cantidad de datos, donde las series de tiempo sean más largas, con el fin de lograr identificar variaciones temporales de mayor escala, como inversiones de corriente, el comportamiento de corrientes en diferentes estaciones, así como en condiciones de vientos Santana.

Es de importancia hacer estudios más detallados de las corrientes costeras y el de realizar observaciones costeras para conocer e identificar los procesos físicos que afectan el interés social y ambiental en la bahía de todos santos.

## 10. Bibliografía.

- Ahumada Sempoal, M.A. (1993). Corrientes Litorales inducidas por el Oleaje en la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de Licenciatura. FCM UABC 38 pp.
- Álvarez Sánchez, L.G. (1971). Medición de Corrientes Superficiales en la Bahía de Todos Santos. B.C. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC .54 pp.
- Álvarez Sánchez, L.G. (1977). Vientos en la Bahía de Todos Santos, Baja California. Ciencias Marinas. Vol 4. Num 1, 1977.
- Argote-Espinoza, M.L., Amador-Buenrostro, A., y Morales-Zúñiga, C. (1975). Distribución de los parámetros de salinidad y temperatura y tendencias de la circulación en la Bahía de Todos Santos, B.C. CIBCASIO. 2, 3-30.
- Argote-Espinoza, M.L., Gavidia-Medina, F.J., y Amador-Buenrostro, A. (1991). Wind induced circulation in Todos Santos Bay, B.C. México. *Atmósfera*. 4,101-115
- Athie de Velasco, G. (2002). Patrones de Circulación Superficial en el Canal de Yucatán basados en datos de ADCP de Barco. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC. 84 pp.
- Barrera Gaona, J.A. (1998). Patrón de Dispersión de Sedimentos en la Bahía de Todos Santos, Baja California. México. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC.
- Blanco Betacourt R. y Chee, A. (2000). Los Corrientímetros Doppler, una alternativa para medir corrientes en el mar, en lagunas costeras o en ríos. Manual de Funcionamiento de ADCP.
- Camarena Acevedo, M.B. (1994). Proyecto de Regeneración artificial de "Playitas" utilizando el método de transferencia de Arena. Tesis de Licenciatura. FCM UABC. 36 pp.
- Cárdenas Brachini, R. (1970). Modelos en Oceanografía Física y sus Aplicaciones. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC. 66 pp
- Emery J.W. y Thompson, R.E. (1998). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon. 634 pp.
- García J, Robles, J.M., Flores, C. y S. Sánchez. (1995). Observaciones de Corrientes y Temperaturas en Bahía de Todos Santos, B.C. Durante mayo–octubre 1994, Informe Técnico. CTOFT9508, 72 pp. CICESE, Oceanografía Física. Ensenada, B.C.
- García Silva, M.A. (1993). Modelación de Corrientes Residuales en el Golfo de California Mediante la utilización de diferentes tamaños de malla. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC. 48 pp

- Gutiérrez Gutiérrez, O.Q. (1999). Análisis Numérico y Descripción de la Circulación Barotrópica en la Bahía de Todos Santos. B.C. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC. 64 pp
- Hernández Walls, R. (1986) Circulación inducida por el viento en la zona Costera. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC. 69 pp
- Kundu, K.P (1976). Ekman Veering Observed near the Ocean Bottom. *Journal of Physical Oceanography*. **6**, 238 -242.
- Marvan Gargollo, F. (1996). Diseño de una toma de agua de mar y su red de distribución para la UABC. Campus Ensenada. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC. 50 pp
- Mooers, K.C. (1973). A technique for the cross spectrum analysis of pairs of complex-value time series with emphasis on properties of polarized components and rotational invariants. *Deep-Sea Research*. Vol **20**. 1129–1141.
- Pavía, E y Reyes, S. (1983). Variaciones Espaciales y Estacionales del Viento superficial en la Bahía de Todos Santos, B.C., *Ciencias Marinas*, Vol. 9 (1), pp151 -167, 1983.
- Pawłowicz, R., Beardsley B., y Lentz S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Computers Geosciences*. **28**, 929 – 937.
- Robinson, I.S., (1983) Tidally induced residual flows, en *Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas*, editado por B, Johns, pp 321 – 356, Elsevier, Inglaterra.
- The Open University. (2001). *Ocean Circulation*. The Open University press and Butterworth-Heinemann. Oxford. U.K. 286 pp.
- Torales Rodríguez, A. (2002). Estructura Vertical de las Corrientes de Marea en el Umbral del Estrecho de Gibraltar. Tesis de Licenciatura. F.C.M. Ensenada. B.C. 69 pp.
- [http://gnotide.unalmed.edu.co/documento/analisis\\_marea\\_05descomposicion.pdf](http://gnotide.unalmed.edu.co/documento/analisis_marea_05descomposicion.pdf)