



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE  
LOS CONTAMINANTES VERTIDOS EN  
PLAYA NORTE, VERACRUZ

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICA

PRESENTA:

REBECA CECILIA DE BUEN KALMAN

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JORGE ZAVALA HIDALGO



JULIO 2007

Modelación de la dispersión  
de los contaminantes vertidos en  
Playa Norte, Veracruz

Rebeca Cecilia de Buen Kalman

## FACULTAD DE CIENCIAS



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

División de Estudios Profesionales

**ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ**  
**Jefe de la División de Estudios Profesionales**  
**Facultad de Ciencias**  
**P r e s e n t e .**

Por este medio hacemos de su conocimiento que hemos revisado el trabajo escrito titulado:

**“Modelación de la dispersión de los contaminantes vertidos en Playa Norte, Veracruz”**

realizado por **de Buen Kalman Rebeca Cecilia**, con número de cuenta **402049553**, quien opta por titularse en la opción de **Tesis** en la licenciatura en **Física**. Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Propietario	Dr.	Artemio Gallegos García	
Propietario Tutor(a)	Dr.	Jorge Zavala Hidalgo	
Propietario	Dra.	María Amparo Martínez Arroyo	
Suplente	M. en C.	Rosario de Lourdes Romero Centeno	
Suplente	Dra.	Susana Orozco Segovia	

Atentamente  
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”  
Ciudad Universitaria, D.F., a 10.4 de junio del 2007.  
**LA COORDINADORA DEL COMITÉ DE TITULACIÓN  
DE LA LICENCIATURA EN FÍSICA**

**M. EN C. ALICIA ZARZOSA PÉREZ**

FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Señor sinodal: antes de firmar este documento, solicite al estudiante que le muestre la versión digital de su trabajo y verifique que la misma incluya todas las observaciones y correcciones que usted hizo sobre el mismo.**



# Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres Judy y Odon porque siempre me han apoyado en todo. A mi hermano Benja, tu espíritu aventurero es un ejemplo a seguir. Los quiero y he llegado a donde estoy gracias a ustedes. Gracias por enseñarme a tirarle piedras a la luna. *My heart belongs to my mother and my father.* Mis papás me han enseñado lo mejor de dos mundos, y han creado uno muy bonito para mi. I hope I always do you proud.

Gracias al Dr. Jorge Zavala, por aceptarme como su estudiante, por su paciencia conmigo, su confianza en mi y porque no se puede pedir más de un asesor. Gracias por hacer que mi experiencia de tesista fuera tan agradable, aprendí mucho y sobre todo me divertí. A todo el equipo de trabajo del CCA, Rosario, Artemio, Adriana, Oscar, Valentin, Julio, Nidia y Maru (a quien consideré mi comadre desde el instante en que la conocí). Gracias por toda la ayuda, los consejos el apoyo, ha sido un placer trabajar, viajar y convivir con todos ustedes.

Para realizar esta tesis recibí una beca del proyecto CONACYT-CNA-2004-C02-24. Gracias a todos los mexicanos que pagan impuestos y que hacen posible este tipo de apoyos a estudiantes.

Gracias a la Dra. Susana Orozco, a la Dra. Amparo Martínez, al Dr. Artemio Gallegos y a la M. C. Rosario Romero por sus observaciones, por la confianza, y por acceder a hacerme revisiones con el tiempo apretado.

Por entrar por cambio de carrera a física, nunca me asignaron un tutor. Afortunadamente cuando necesité ayuda siempre encontré refugio con Dra. Isabel Gamboa de Buen. Gracias Isabel por el apoyo en los primeros semestres de la carrera y por el tiempo que dedicaste a ayudarme y a orientarme.

Gracias a la Dra. Jorge y Jorge por todo lo que me enseñó dentro y fuera del salon de clases, siempre será un ejemplo a seguir para mi. A Ana Irene Ramírez, por apoyarme y ayudarme a no perder la perspectiva. Gracias a León y a Silvia por ayudarme las veces que lo he necesitado y por depositar confianza en mi.

A mis amigos de la Facultad de ciencias Felipe, Fernando, Nacho, Frank, Santiago, Eduardo, Cajas, Radillo, Mario, Penélope, Luis , Henri y muchos más quienes fueron un gran apoyo en toda la carrera. Ustedes siempre me apoyaron y me ayudaron en todo lo que pudieron y no se puede pedir más en tus compañeros y de la escuela. Su amistad es de lo más importante para mi.

A mis amigas Serena, Xochitl y Anahí, ustedes ya forman parte de mi canasta básica y les agradezco su amistad con todo el corazón. No sé si hubiera sobrevivido sin ustedes. Serena, mi cómplice en las regresiones a la infancia, gracias por no dejarme olvidar esa parte que llevo dentro y por sacar mi espíritu aventurero; Anahi, admiro la cabeza que traes bien puesta, gracias por todo, estoy de verdad contenta de que seamos amigas y que al final aprendimos que nos podemos complementar, querer y apoyar, ahora estoy segura de que vamos a ser amigas por mucho tiempo; y Xochitl eres la única entiende un lado de mi que nadie más en Ciencias podría entender, gracias por tantos cafés domingueros, por prestarme tus oídos cuando los necesité y por los apuntes más bonitos que he visto en mi vida. De verdad las adoro a las tres y espero que la amistad nos dure muchos años. Gracias por toda su ayuda, dentro y fuera de la escuela. Les deseo todo el éxito del mundo.

A Marco, quien me hace reír (y por lo tanto llorar) como nadie más en el mundo, te quiero mucho; a Fer, Daniel y Her Royal Highness Princess Natalie Lifshitz. The maid and the butler will serve the Empire forever, with god as our witness! Ustedes fueron mis primeros amigos en la facultad y son muy importantes para mi.

A Rosy y a Don Nico, los pilares que sostienen a la familia de Buen Kalman. No solo les agradezco todo lo que hacen por nosotros; también les doy las gracias porque es un verdadero placer tenerlos con nosotros todos los días. Don Nico, usted es un ejemplo a seguir y si más gente fuera como usted, este mundo sería un mejor lugar. Es de las personas a las que yo más admiro. Gracias por todo lo que me ha enseñado y por toda la paciencia que me tiene. Y gracias por traer a Rosy a nuestras vidas.

Gracias a Miriam y a Mariana, mis mejores amigas de la infancia Con ustedes aprendí lo que significa la amistad. Nos hemos alejado un poco pero las sigo queriendo mucho. Les deseo lo mejor en sus vidas y me gustaría ser parte importante de ellas.

A mi Abuela Cuca, admiro tu fuerza y tu caracter. To my grandma Peewee and Grandpa Ted, I miss you every day. De todos ustedes (y a través de mis padres) aprendí de tolerancia, empatía y generosidad, y esto lo llevo siempre conmigo.

A las familia de Buen y Kalman extendidas, tíos, tías y primos. Siempre que he recurrido a ustedes me han apoyado y ayudado. Me siento muy orgullosa de formar parte de este grupo de personas tan

sofisticadas. Una mención honorífica a mis primas Ana, Andrea y Gimena, porque aunque todas somos muy diferentes hacemos un excelente equipo, gracias por su amistad, las quiero mucho. Jenny, I love you cuz, you are one of my best friends in the whole world!

A los Mireles, quienes me han tratado como parte de su familia desde el primer día que llegué a su casa hace más de cuatro años. Gracias por todo y por hacerme sentir en casa siempre que estoy con ustedes.

A mi amiga Mariana Mackinney, me encanta cómo nos entendemos y nos parecemos, nuestra amistad es única.

A Mariana Gutiérrez, mi primera amiga en este mundo, te quiero mucho.

A María Elena, porque ha sido un gran apoyo en una etapa difícil; no hay cómo tener a alguien que de verdad entiende por lo que estas pasando. Gracias por tu amistad, y por tu sabiduría. Admiro tu carácter y tu espíritu. A Pedro, porque siempre me iluminó el lado de la moneda que yo no puedo ver. Gracias por estar al tanto y por prestarme tus oídos (o tus ojos). Los puse a ustedes en el mismo párrafo porque gracias que ustedes y yo vivimos una situación similar en paralelo, yo me hice de dos muy buenos amigos. Les deseo lo mejor y los quiero mucho.

A Mariano, al Wassá y a Rocío, gracias por todo. A ver qué día comemos.

Gracias Davo por siempre creer en mí (aún cuando yo no siempre lo hago) y en nosotros; por todo tu apoyo y tu ayuda durante la carrera (incluyendo la elaboración de esta tesis), y porque siempre has estado cuando te he necesitado, aun cuando vives en otro país. Creo que de nuevo logramos ser a excepción a la regla. Eres mi piedra, y mi amor y espero que todos los sueños que hemos construido juntos se hagan realidad. Acabar esta tesis marca el final de una etapa muy difícil para nosotros, y me da orgullo llegar a este momento sabiendo que lo logramos. Te quiero chorros de chorros... y pronto estaremos de nuevo juntos.

Gracias a la UNAM y a todas las personas que hacen posible que funcione esta gran institución.

*Por mi raza hablará el espíritu*

Rebeca





# Resumen

La presente tesis es un estudio sobre la dispersión de los contaminantes vertidos en Playa Norte, Veracruz, sitio en donde se descargan alrededor del 80 % de las aguas residuales de la zona del Puerto de Veracruz. En la zona de estudio coexisten distintos usos de la zona litoral. Sobresalen el uso portuario, el uso recreativo de las playas y la pesca. En la región se ubica también el Sistema Arrecifal Veracruzano que es un sistema ecológico vulnerable a la contaminación. Para llevar a cabo el estudio, se hizo un análisis de las corrientes en la zona de trabajo. Se hicieron campañas de investigación de la zona y se recolectaron cuatro conjuntos de datos de corrientímetros fijos. Se trabajó con mediciones hechas en dos periodos temporales y en dos sitios distintos. El primer periodo fue del 8 de septiembre al 24 de octubre del 2006, mientras que el segundo periodo fue del 20 de diciembre del 2006 al 25 de enero del 2007. Los sitios en donde se colocaron los corrientímetros (de manera simultánea) fueron en los sitios denominados Gallega-Galleguilla (porque se colocó entre el arrecife la Gallega y la Galleguilla) e Isla Verde-Anegada de Adentro (llamado así porque el sitio en donde fue colocado se encuentra entre la Isla verde y la Anegada de Adentro).

Los datos de los corrientímetros se analizaron usando funciones empíricas ortogonales, filtros y se calculó la correlación de la corriente con la componente del esfuerzo del viento paralelo a la costa. De éste análisis se encontró que hay una dirección predominante para la corriente: noroeste-sureste, y que en esta dirección el factor principal de forzamiento es el viento. También se encontró que la circulación es casi barotrópica, es decir con poca estratificación en la vertical, y que sólo en las zonas más profundas se observa estratificación.

Para estudiar la dispersión de los contaminantes se usó un modelo barotrópico de ecuaciones primitivas con topografía realista. Se hicieron cuatro experimentos numéricos para simular las condiciones promedio de cuatro meses del año. De acuerdo al modelo, en los meses de enero y octubre la corriente se desplazó hacia el canal entre La Gallega y Galleguilla y posteriormente se desplazó hacia el sur, provo-

cando que los desechos vertidos en Playa Norte llegaran al puerto cuatro días después y pasaran enfrente de la zona de playas entre cinco y seis días después de haber sido vertidos. En los meses de abril y julio las corrientes modeladas son mucho más débiles que las de octubre y enero y su dirección es hacia el noroeste, tendiendo a mantenerse junto a la costa. En el mes de abril se observó una convergencia que genera un flujo del contaminante hacia afuera de la costa.

# Contenido

<b>Resumen</b>	<b>v</b>
<b>Contenido</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Introducción a la zona de estudio y al proyecto de investigación</b>	<b>1</b>
1.1. Datos geográficos . . . . .	1
1.2. Medio Ambiente . . . . .	3
1.3. Proyecto . . . . .	4
<b>2. Dinámica del Golfo de México</b>	<b>13</b>
2.1. Oceanografía de aguas poco profundas . . . . .	13
2.1.1. Conceptos generales . . . . .	13
2.1.2. Comparación entre el océano profundo y el océano costero . . . . .	15
2.1.3. Principales fuerzas que producen la circulación en el océano . . . . .	15
2.1.4. Balance Geostrofico . . . . .	17
2.1.5. La termoclina . . . . .	18
2.1.6. Influencia de la atmósfera . . . . .	18
2.2. Circulación Estacional las plataformas mexicanas del Golfo de México . . . . .	19
2.3. El Sistema Arrecifal Veracruzano . . . . .	24
<b>3. Contaminación</b>	<b>27</b>
3.1. Los recursos acuáticos y la contaminación . . . . .	27
3.2. Fuentes y causas de la contaminación en el agua . . . . .	28
3.3. Principales tipos de contaminantes . . . . .	29

3.3.1. Material que demanda oxígeno . . . . .	30
3.3.2. Los Nutrientes . . . . .	30
3.3.3. Microorganismos Patógenos . . . . .	30
3.3.4. Sólidos suspendidos . . . . .	31
3.3.5. Las sales . . . . .	31
3.3.6. Metales tóxicos y compuestos orgánicos tóxicos . . . . .	31
3.3.7. Sustancias que trastornan el sistema endócrino . . . . .	32
3.3.8. Arsénico . . . . .	32
3.3.9. Calor . . . . .	32
3.4. Calidad del agua en los océanos . . . . .	33
3.4.1. Cuantificación de la contaminación . . . . .	34
3.4.2. Ecuación de advección y difusión . . . . .	36
<b>4. Análisis de Corrientes</b>	<b>37</b>
4.1. Funcionamiento del corrientímetro . . . . .	37
4.2. Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales . . . . .	40
4.2.1. Análisis de componentes principales . . . . .	40
4.2.2. Descomposición en Valores Singulares . . . . .	45
4.3. Análisis de datos . . . . .	46
4.4. Discusión . . . . .	53
4.4.1. Periodo septiembre-octubre del 2006 . . . . .	53
4.4.2. Periodo diciembre del 2006-enero del 2007 . . . . .	64
<b>5. Modelación de la dispersión de contaminates</b>	<b>75</b>
5.1. Modelo . . . . .	76
5.2. Interpretación de los resultados del modelo . . . . .	77
<b>6. Conclusiones</b>	<b>83</b>
<b>Glosario</b>	<b>85</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>87</b>

# Capítulo 1

## Introducción a la zona de estudio y al proyecto de investigación

La presente tesis es un estudio sobre la dispersión de los contaminantes vertidos en Playa Norte, Veracruz, un sitio en donde se descarga alrededor del 80 % de las aguas municipales de la zona del Puerto de Veracruz. En este capítulo se presenta una introducción histórica y geográfica de la zona de estudio y se describe el proyecto dentro del cual se realizó este trabajo. También se describen, brevemente, algunas características de la plataforma continental en la zona del Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), que es una región de interés en este trabajo.

Históricamente, la ciudad de Veracruz (Figura 1.1) ha sido una de las más importantes de México. Fue el primer municipio fundado por los conquistadores españoles en el Nuevo Mundo y, desde entonces, por su posición estratégica y su importancia histórica, ha sido un lugar de mucha actividad. Esta ciudad, desde la conquista hasta la actualidad, ha tenido un papel crucial en la economía y la política de México, de modo que muchos eventos de trascendencia histórica del país están vinculados con la existencia y utilización del puerto de Veracruz.

### 1.1. Datos geográficos

El nombre oficial del estado es Veracruz de Ignacio de la Llave. Como se puede ver en la figura 1.1, en la frontera norte del estado está Tamaulipas, al Sur colinda con Oaxaca y Chiapas, al oriente con el Golfo

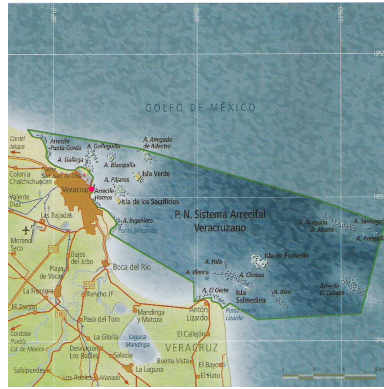


Figura 1.1: Ubicación del estado de Veracruz y sus ciudades principales, entre ellas Veracruz

de México, al oeste con San Luis Potosí, Hidalgo y Puebla y al sureste con Tabasco. Sus coordenadas geográficas son: al norte  $22^{\circ}28' N$ , al sur  $17^{\circ}09' N$ , al este  $93^{\circ}36' W$  y al oeste  $98^{\circ}39' W$  de longitud [9]. Su extensión litoral va desde el río Pánuco hasta la ciudad de Coatzacoalcos, lo cual abarca una franja de  $745 \text{ km}$  de longitud. Tiene una extensión territorial de  $72,815 \text{ km}^2$  que representa el 3.7 % de la superficie del país [9]. Por su extensión, Veracruz es el décimo estado de la República, con una población de 7 110 214 habitantes [11]. El territorio del estado de Veracruz está dividido en 212 municipios [9] y cuenta con 35% de los recursos hidrológicos del país [6], por lo que las tarifas de agua son las más bajas a nivel nacional. La población de este estado se encuentra en crecimiento constante desde 1900; a partir de 1940 se ha visto un crecimiento acelerado de la población de modo que desde entonces hasta el año 2000 la población del estado de Veracruz ha aumentado casi siete veces [10].

Veracruz es el principal generador de electricidad en México, generando 27,488 gigawatts-hora, que representan el 17 % del total nacional [6]. El estado cuenta con cinco plantas hidroeléctricas, tres termoeléctricas y una planta nuclear. Las principales empresas nacionales e internacionales que operan en México tienen presencia en Veracruz y el 10 % de todos los activos industriales del país se encuentran ahí [6]. La industria en Veracruz se dedica principalmente a las siguientes actividades [6]:

- Extracción de petróleo y petroquímica básica.
- Productos de tabaco, alimentos y bebidas.
- Industria de muebles y otros productos de madera.
- Productos metálicos, maquinaria y equipo.
- Industria del cuero, textiles y vestimenta.

- Productos minerales no metálicos (excluye petróleo y carbón).

El municipio más importante del estado es el municipio de Veracruz, el cual comprende también la más importante ciudad del estado de Veracruz. Sus coordenadas geográficas son:  $19^{\circ}12'$  de latitud norte y  $96^{\circ}08'$  de longitud oeste [9]. Tiene una superficie de  $241 \text{ km}^2$  que comprende el 0.0032% del total estatal [6]. Su población total es de 512 310 habitantes [11], y es la región más poblada del estado [9]. El Puerto de Veracruz también es un importante sitio turístico y sus playas son usadas para la recreación a lo largo del año.

Dada la importancia y la gran actividad en el Puerto de Veracruz, la falta de planeación para los desechos humanos e industriales, la zona del Puerto se encuentra muy contaminada.

## 1.2. Medio Ambiente

A pesar de su gran importancia como sitio turístico, las playas de Veracruz están contaminadas[17]. En la zona que va de Boca del Río al puerto de Veracruz hay varios puntos de descarga de aguas municipales que vierten a ríos o directamente al mar. Estos desagües vierten en promedio  $1,6 \times 10^8 \text{ m}^3/s$  de aguas residuales[21]. La contaminación representa un riesgo para la salud de población y para los turistas que vacacionan en este sitio. Los conductos de aguas negras, de los cuales la mayor parte desemboca directamente o indirectamente en el mar, son la principal causa de esta situación.

La contaminación de las playas tiene varias causas [17]:

- Falta de plantas de tratamiento, insuficiente capacidad e ineficiencia de las plantas de tratamientos de agua residual.
- Descargas de aguas residuales con niveles de contaminación por encima de los límites permisibles (esto se discutirá en el siguiente capítulo).
- Desagües que desembocan directamente al mar o a los ríos.
- Desechos químicos y orgánicos de talleres y lanchas.
- Desarrollo urbano sin planeación.
- Basura proveniente de las actividades turísticas y comerciales.
- No existe separación real del drenaje pluvial y el sanitario.

Algunos riesgos para la salud producto de la contaminación son infecciones en la piel, enfermedades gastrointestinales e infecciones del oído y ojos. La contaminación también tiene un efecto negativo sobre la economía pues impacta el turismo en la zona, el cual es, a su vez, una fuente importante de ingreso para el Puerto. Otro riesgo importante, tanto a la salud como a la economía, es que la flora y la fauna marina absorben las sustancias que se encuentran a su alrededor, y niveles muy altos de contaminación arriesgan la diversidad biológica de los ecosistemas marinos de la zona y afectan la calidad de los mariscos, presentando riesgos para la salud de las personas que los consumen.

En la zona de estudio coexisten distintos usos de la zona litoral. Sobresalen el uso portuario, el uso recreativo de las playas, la pesca y la existencia del Sistema Arrecifal Veracruzano, un tesoro ecológico y uno de los sistemas arrecifales más grandes y de mayor importancia biológica del país. Recientemente se ha buscado garantizar que esta compleja región cumpla con los estándares nacionales e internacionales de calidad del agua para zonas recreativas; en particular, se ha buscado cumplir con las normas que se refieren al contenido de enterococos. Esto requiere de un control de las descargas, con este objetivo se está trabajando bajo las directivas de un plan de saneamiento de la Bahía de Veracruz, el cual comprende la construcción de nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales, la ampliación o rehabilitación de otras, la construcción de colectores y la instalación o aumento de la capacidad de los sistemas de bombeo[21].

La problemática de la zona es compleja y no tiene una solución definitiva en el corto plazo, debido a que la ciudad de Veracruz se construyó sin separar el drenaje pluvial del drenaje sanitario, provocando que durante la temporada de lluvias no se tenga capacidad de tratar todo el volumen de aguas colectadas.

### 1.3. Proyecto

Este trabajo forma parte del proyecto *Clasificación de playas del Puerto de Veracruz, Boca del Río y zonas arrecifales adyacentes mediante modelación numérica y mediciones de la circulación costera y de contaminantes*, encabezado por el Dr. Jorge Zavala Hidalgo, del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. Este proyecto forma parte del Programa Playas Limpias de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [17, 3], que tiene el objetivo de impulsar la investigación y el desarrollo tecnológico y estudios para la clasificación, monitoreo y saneamiento de las playas turísticas mexicanas.

El Programa Playas Limpias busca promover el saneamiento de las playas y de los recursos hidrológicos y cuerpos receptores de agua relacionados. Tiene como objetivo “prevenir y corregir la contaminación



para proteger y preservar las playas mexicanas, respetando la ecología nativa y elevando la calidad y el nivel de vida de la población local y del turismo y la competitividad de las playas” [17] . Para ello, se han instalado 27 Comités de Playas Limpias en las diferentes áreas en las que se realiza el monitoreo en toda la República, coordinados en su mayoría por los Presidentes Municipales y Secretarías de Marina, Turismo y Medio Ambiente y Recursos Naturales locales. Los comités tienen como objetivo principal el de “coordinar, ejecutar y vigilar las acciones, así como el cumplimiento de los criterios aplicables y las metas establecidas”. Entre otros temas, dentro del Programa de Playas Limpias se busca avanzar en los siguientes puntos: [17]

- El adecuado manejo y disposición de los residuos sólidos.
- La limpieza de cauces previo a la temporada de lluvias.
- La detección de descargas clandestinas.
- La limpieza de las playas.
- La eficiente operación de las plantas de tratamiento.
- La actualización permanente de los programas de saneamiento.
- La seguridad y servicios para los bañistas.
- La educación ambiental de los usuarios y de la población local.

Durante el proyecto dentro del cual se realizó el presente trabajo, se hicieron varias visitas a la zona del puerto de Veracruz para identificar y clasificar las descargas. La zona de estudio se ilustra en las figuras 1.2 y 1.3.

Durante estas visitas se identificaron 35 descargas directas al mar. Las principales descargas, de acuerdo con su volumen, provienen del sistema de drenaje de la ciudad. También se identificaron colectores pluviales que, al parecer, transportan aguas negras. Otro grupo de descargas, particularmente en el municipio de Boca del Río, proviene de hoteles, viviendas, edificios, un balneario y restaurantes ubicados a lo largo de la línea de costa. De estos sitios, algunos presumiblemente cuentan con plantas de tratamiento propias, que sin embargo no están funcionando adecuadamente.

La identificación de las descargas, su localización, cuenca a la que pertenecen, variabilidad temporal y conexión con otras zonas, permitirá entender su influencia en la zona de playas, identificando su alcance



Figura 1.2: Mapa de la zona de Veracruz y Boca del Río. En amarillo se indican sitios de interés que fueron visitados y monitoreados. En esta figura se indican los sitios en la zona norte, desde la desembocadura del Río Medio hasta Paco Píldora, al sur del Acuario [21].

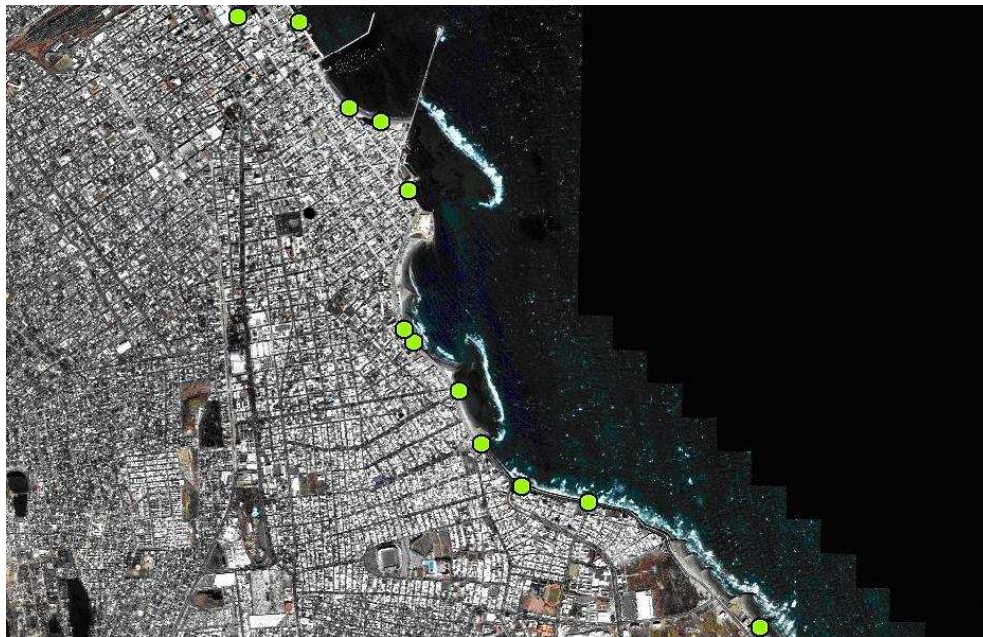


Figura 1.3: Mapa de la zona de Veracruz y Boca del Río. En amarillo se indican sitios de interés que fueron visitados. En esta figura se indican los sitios al sur del puerto hasta la zona de hoteles [21].

espacial y su tiempo de residencia, lo cual será fundamental para la planeación del uso recreativo de la zona en condiciones adecuadas para la salud y para la elaboración de la clasificación de las playas [21].

La principal fuente de contaminantes en las playas de Veracruz y Boca del Río proviene de las descargas que no son tratadas o son sólo parcialmente tratadas. Sobresale la descarga Arroyo el Cable situada en Playa Norte (figura 1.4) que en volumen es la mayor, con un aporte superior al 75 % del total. De esta descarga, alrededor de 700 l/s son tratados en la planta, durante el estiaje una cantidad similar de agua se vierte sin ser tratada, para un balance aproximado de 50 % del agua tratada [21]. Esta pluma es la que será estudiada y sus descargas en Playa Norte serán modeladas. La descarga Arroyo el Cable se ilustra en las figuras 1.4 y 1.5.

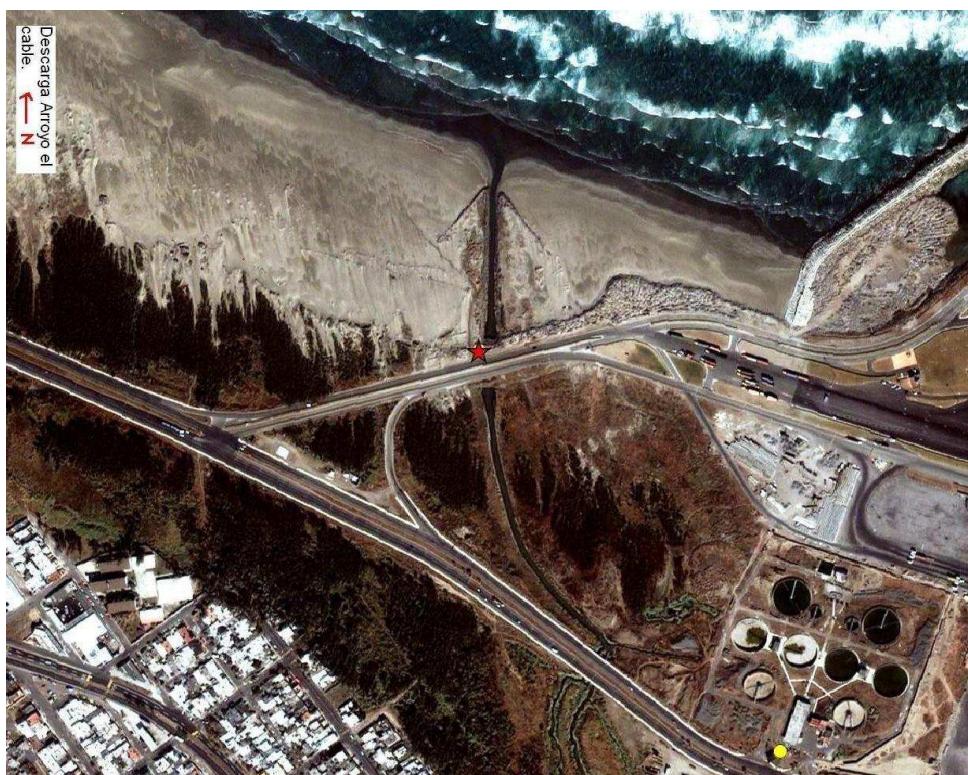


Figura 1.4: Descarga Arroyo El Cable [21]

En la figura 1.6 se ilustra la ubicación de las descargas encontradas durante las campañas de investigación a la zona de estudio que son vertidas directamente al mar. Se indica la magnitud de la descarga de acuerdo con la escala en la figura. En esta figura sobresale la descarga de Arroyo el Cable, la cual representa la mayor parte de las descargas.

Playa Norte es una zona en donde actualmente hay poco turismo, concentrado en la región norte de



Figura 1.5: Arroyo El Cable. Descarga ubicada en  $19^{\circ}12'51''$  N,  $96^{\circ}09'37''$  W. En este sitio se unen las descargas tratadas y no tratadas, con un gasto total aprox. de  $1700$  l/s. La mayor parte de las aguas residuales de la ciudad descargan en este sitio [21].

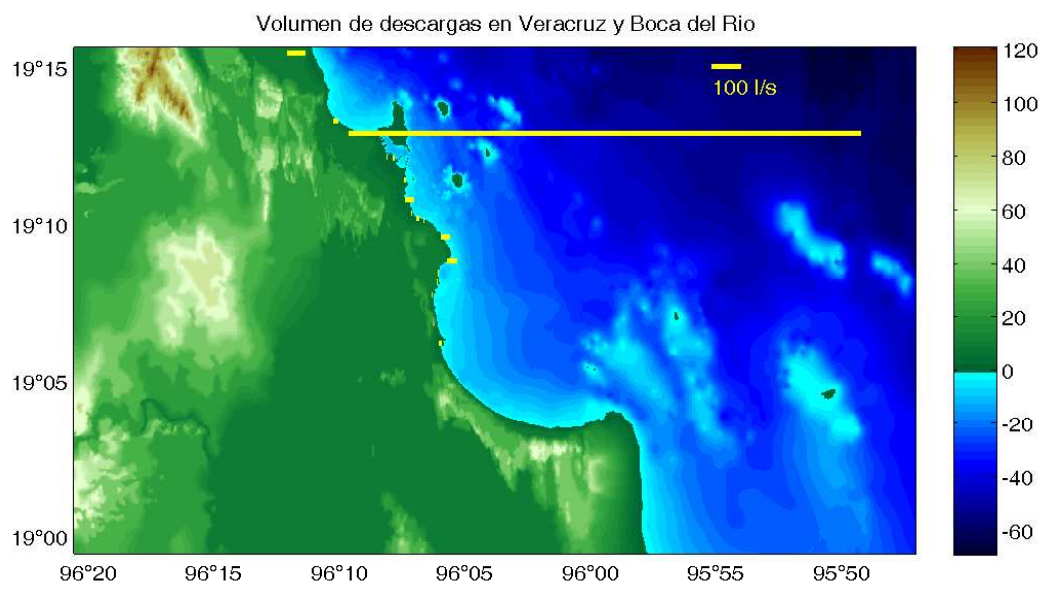


Figura 1.6: Ubicación de descargas directas al mar. Se indica la magnitud de la descarga de acuerdo con la escala indicada en la figura. En esta figura sobresale la descarga de Arroyo el Cable. [21]

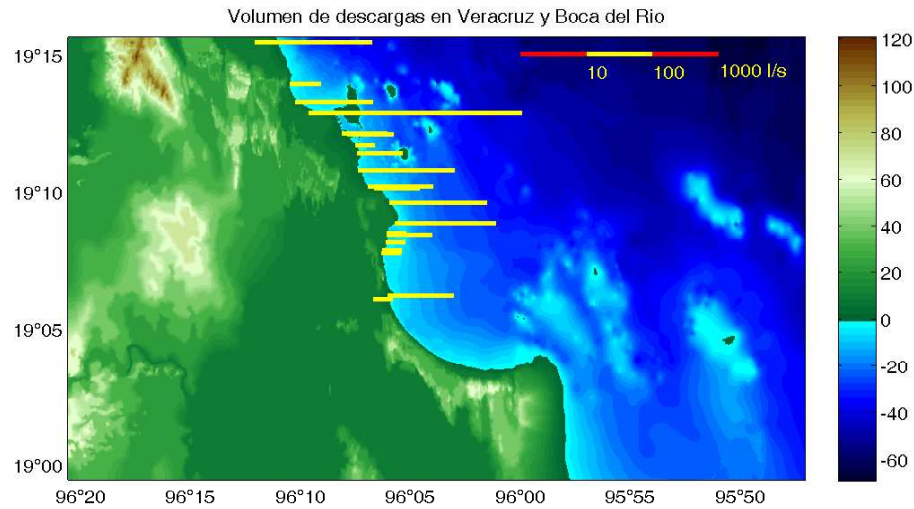


Figura 1.7: Ubicación de descargas directas al mar. Se indica la magnitud de la descarga de acuerdo con la escala indicada en la figura [21].

la playa. Esa descarga afecta principalmente la zona sur de Playa Norte y los arrecifes La Gallega y La Galleguilla (mostrados en la figura 1.8). Su influencia en la zona de playas de la Ciudad de Veracruz y Boca del Río y en los distintos arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano es incierta. El desplazamiento de la pluma de la descarga responde principalmente a las corrientes que, en su mayor parte, son ocasionadas por viento. Sin embargo, su advección y difusión son investigados en este trabajo.

Existen muchas otras descargas, que se pueden observar en la figura 1.7 donde la escala logarítmica permite apreciar la influencia relativa de las descargas. De estas se identificaron cuatro, con aportes de entre 10 y 100  $l/s$ , que en conjunto representan aproximadamente el 8% de las descargas en la zona. Sin embargo, excluyendo la descarga de Arroyo el Cable que se encuentra al norte de San Juan de Ulua, estas descargas representan alrededor de un 80% del flujo y son sin duda las que tienen un mayor impacto en la zona de playas de la Ciudad de Veracruz y Boca del Río. Su desplazamiento está influenciado por el oleaje, las mareas y las corrientes de fondo [21].

Existen además otras descargas de menor volumen, de las cuales se han identificado al menos 29; éstas corresponden a hoteles, viviendas, condominios, un centro balneario y restaurantes ubicados a lo largo de la línea costera, que descargan volúmenes relativamente pequeños (menores de 10  $l/s$ ), con distinta



Figura 1.8: Ubicación de los arrecifes La Gallega y La Galleguilla.

calidad del agua, pero en general sin tratamiento. La importancia de este grupo de descargas es bastante menor que la de los dos grupos anteriores [21].





## Capítulo 2

# Dinámica del Golfo de México

En el presente estudio, se analiza la salida de un modelo numérico de la circulación sobre la plataforma continental adyacente al Puerto de Veracruz. Es importante entender la dinámica de la región ya que los contaminantes vertidos son transportados por las aguas costeras. Por esta razón se incluye un resumen de los factores importantes en el transporte y la dinámica de aguas costeras, en ocasiones haciendo una comparación con la dinámica del mar profundo. En este capítulo se resume cómo es la circulación estacional a lo largo del Golfo de México, de los resultados de un estudio numérico [22], y se explica qué factores físicos son importantes al estudiar la dinámica de la circulación en la zona costera.

### 2.1. Oceanografía de aguas poco profundas

Para el estudio que se realiza en este trabajo es muy importante aclarar qué procesos físicos y oceanográficos como el viento, la marea, etc. son importantes en la circulación sobre las plataformas continentales. Las plataformas continentales se definen como regiones adyacentes a la costa cuyas profundidades son menores de 200 *m*. La siguiente sección es un resumen de los factores importantes que determinan cómo es la circulación costera y en qué se distingue de la circulación en el océano profundo.

#### 2.1.1. Conceptos generales

La costa define la frontera entre el agua y la tierra, pero no delinea el límite entre los continentes y los océanos. Una parte de las masas que conforman los continentes están sumergidas en el agua y estos “flotan” sobre la corteza terrestre. La masa continental se extiende a lo largo de varios kilómetros (la

extensión varía dependiendo de la zona geográfica) hasta que se acaba abruptamente a una profundidad de aproximadamente 200 *m* bajo el nivel del mar. La región de aguas someras que va desde la costa hasta el contorno del continente, que normalmente coincide con la isóbata de los 200 *m*, se llama *plataforma continental* (figura 2.1). El ancho de la plataforma varía en cada región, pues hay costas que casi no tienen plataformas y otras en las que estas se extienden decenas o centenas de kilómetros [19].

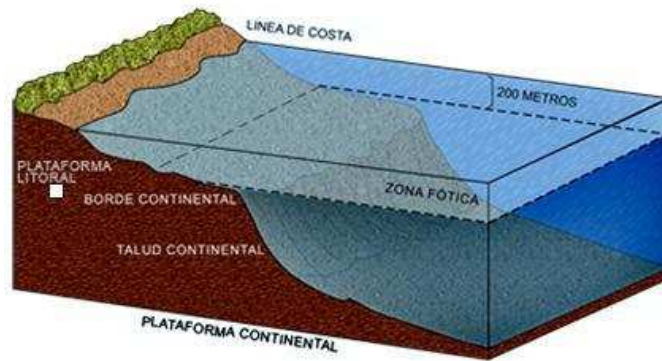


Figura 2.1: Ilustración de una plataforma Continental

Los *mares sobre las plataformas* incluyen una gran variedad de regiones con características oceanográficas diversas que están altamente relacionadas con las características físicas de la región, y siempre que se hacen estudios en estas regiones se debe tomar en cuenta la presencia de la costa y la topografía del suelo. Los principios físicos que gobiernan la circulación en las plataformas permiten clasificarlas de acuerdo a los forzamientos más importantes y los balances entre ellos. La zona de estudio de este trabajo se ubica sobre la plataforma continental y sus características particulares se discuten más adelante. Cabe mencionar que una de sus características más importantes es la existencia del Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV).

Para entender la circulación en las zonas costeras, también es importante considerar la circulación general del océano. La descripción dinámica de una región adyacente a la costa se vuelve mucho más complicada que la descripción dinámica de las aguas del océano profundo porque se tienen que tomar en cuenta los procesos de la circulación oceánica general, pero no se pueden considerar las simplificaciones que son posibles en el océano profundo [19].

### 2.1.2. Comparación entre el océano profundo y el océano costero

La dinámica en las zonas adyacentes a la costa difiere de la del océano profundo por varios factores. El hecho de que el agua en la zona costera sea poco profunda es muy importante para la dinámica, pues la presencia y las características de la topografía del suelo marino hacen que haya fricción y obstáculos para el flujo que no se pueden ignorar por su magnitud. En el caso del océano profundo, las corrientes son tan lentas y las aguas tan profundas que la fricción y los efectos del fondo se pueden descartar en muchos casos. Además, en el mar profundo, frecuentemente el flujo se puede considerar libre de fricción, mientras que en la plataforma esta simplificación no es válida [19].

Otra característica importante en las aguas costeras es que los movimientos de masas debidos a las mareas son mucho más intensos. Las mareas son ondas de longitud de onda larga que generalmente tienen amplitudes pequeñas en aguas profundas. Conforme la onda de marea se acerca a la plataforma continental, su amplitud aumenta y la propagación de la cresta de la onda se retrasa. Esto está asociado con un aumento significativo en la corriente de marea la cual, en varios mares de plataforma, se convierte en el factor dominante en el transporte de masas de agua. Las mareas son de gran importancia para la estratificación y el movimiento del agua en la plataforma, mientras que para aguas profundas esto se puede ignorar. [19].

La presencia de la costa también es importante en la dinámica de la circulación de las plataformas continentales. La costa es un obstáculo para el flujo libre del agua y una corriente que se aproxima a la costa empieza a desarrollar convergencia, lo cual acelera el flujo o hace que las aguas superficiales se sumerjan. Cuando el viento produce movimiento del agua hacia fuera de la costa la divergencia en la superficie crea zonas de surgencia. La surgencia es el proceso de movimiento vertical del agua hacia la superficie del océano. Cuando el viento desplaza masas de agua hacia afuera de la costa, el esfuerzo del viento provoca movimiento de la capa superficial del agua del mar, teóricamente ocurre un transporte neto a 90 grados con respecto a la dirección del viento. Este desplazamiento a su vez, provoca que suban masas de agua del fondo.

### 2.1.3. Principales fuerzas que producen la circulación en el océano

El movimiento de los fluidos se produce por la acción de fuerzas, que pueden ser tangenciales, como los esfuerzos producidos por el viento, o de cuerpo (que actúan sobre el cuerpo del fluido), como la gravedad. Si el movimiento se encuentra en un estado estacionario, significa que hay un balance entre las fuerzas

que actúan sobre él [4].

Las tres fuerzas principales necesarias para describir y entender la mayoría de las corrientes en el océano son: el campo de presiones, la fricción y la fuerza de Coriolis. La estructura del campo interno de presiones en el océano se puede describir por sus gradientes horizontales y verticales de presión, que a su vez se deben a cambios en la densidad (que responde principalmente a cambios en la temperatura y en la salinidad) y en la altura de la columna de agua. El gradiente vertical es el resultado del aumento de la presión con la profundidad, que existe en el fluido independientemente de su estado de movimiento (es decir, por el peso de la columna de agua encima de algún punto), y no es relevante para el estudio del movimiento de los fluidos. Por otro lado, los gradientes horizontales de presión no se sostienen si no hay movimiento en el fluido. Las partículas afectadas por la fuerza del gradiente de presión se desplazan desde regiones de alta presión hacia regiones de baja presión, moviéndose en la dirección opuesta al gradiente de presión. Los gradientes horizontales de presión se originan como resultado de diferencias en la altura del agua arriba de una región en cuestión, es decir, de las variaciones espaciales del nivel del mar en el agua. También resultan de diferencias en la densidad, que depende de la salinidad y la temperatura del agua.

El campo de presiones se obtiene de mediciones de salinidad y temperatura y usando la ecuación de estado del agua de mar, de donde se obtiene el campo de densidad. Los gradientes horizontales de presión se obtienen entonces determinando el peso del agua arriba de un punto de interés e integrando sobre la altura de la columna de agua (desde la superficie hasta el punto).

La siguiente fuerza de gran importancia en la circulación del océano es la fuerza de Coriolis. Los objetos que se mueven por grandes distancias en la superficie de la tierra sienten una deflexión de su camino original. Esta deflexión es consecuencia de la conservación del momento angular sobre un sistema en rotación. En el hemisferio norte la deflexión es hacia la derecha del movimiento del objeto y en el hemisferio sur hacia la izquierda. La aceleración producida por la fuerza de Coriolis, sobre un objeto que se mueve con velocidad  $v$  está dada por  $vf$ , donde  $f = 2\omega \sin \phi$ ,  $\omega$  es la velocidad angular de la tierra y tiene un valor de  $2\pi/T_d$ , donde  $T_d$  es el tiempo que le toma a la Tierra dar un giro sobre su eje, y  $\phi$  es la latitud.  $f$  tiene dimensiones de  $s^{-1}$  y se conoce como el parámetro de Coriolis [19].

La fricción es la tercera fuerza de importancia en la circulación oceánica, y su principal papel es el de transferir momento de la atmósfera hacia el océano. Sin ella, los vientos pasarían por encima del agua sin crear olas y sin generar corrientes. La fricción también es importante donde las corrientes intensas se arrastran sobre el fondo del mar.

En la circulación oceánica de aguas profundas las mareas no tienen gran importancia, sin embargo son importantes en la dinámica costera. A pesar de que las fuerzas que las generan son importantes y ningún cuerpo puede evitar sentir su influencia, producen un movimiento periódico de amplitud baja y no contribuyen al balance de fuerzas de la circulación en el estado estacionario. Las mareas y el movimiento promedio de las aguas en el estado estacionario forman un sistema lineal, es decir, se pueden estudiar de manera independiente, y sus efectos conjuntos sobre las partículas de agua y sobre la distribución de las propiedades del agua se pueden encontrar al sumar el efecto de dos componentes independientes. En el caso de los mares someros, las mareas no se pueden considerar débiles. Pueden resultar en movimientos netos de masas de agua. Las corrientes de marea provocan mezcla en las aguas poco profundas, las cuales tienen suficiente fuerza como para determinar la estratificación de algunos mares [19].

#### 2.1.4. Balance Geostrófico

En la mayor parte del océano profundo las corrientes se pueden considerar como libres de fricción. Las corrientes establecidas por un balance entre el gradiente horizontal de presión y la fuerza de Coriolis se llaman corrientes geostróficas y el método que se utiliza para derivarlas es determinando el campo de presiones y se denomina el método geostrófico.

Debido a que el campo de presiones se puede calcular integrando el campo de densidad, el cual a su vez se puede derivar de observaciones de salinidad y temperatura, el principio de la geostrofia nos permite derivar la corriente oceánica a partir de observaciones de temperatura y salinidad. La turbulencia es responsable del transporte de momento entre la atmósfera y el océano, pero su carácter todavía no se entiende por completo. Para regiones de agua poco profundas es necesario entender la turbulencia y la física del flujo que es otra razón por la que estas regiones son mucho más complicadas de entender.

Para describir la circulación en el océano, necesitamos tomar en cuenta las tres fuerzas principales y combinarlas en un solo balance. Esta descripción fue lograda por primera vez por Hans Ulrik Sverdrup y el balance se conoce como el balance de Sverdrup. De acuerdo a éste balance, la fricción sólo es importante en la capa de Ekman en la superficie, bajo la cual todo el movimiento se puede considerar libre de fricción. El movimiento debajo de la capa de Ekman está influenciado por el transporte de agua en la capa de Ekman hacia mayores profundidades como resultado de la divergencia y convergencia de flujos en la capa de Ekman. En el caso de la convergencia del flujo, el agua es forzada hacia abajo hacia profundidades mayores, proceso conocido como bombeo de Ekman. En el caso de la divergencia el agua

es bombeada hacia la capa de Ekman, proceso conocido como la succión de Ekman (o bombeo de Ekman negativo) [19].

En un estado estacionario, el volumen de agua contenido en cualquier región del océano no puede cambiar, es decir, el volumen de agua que entra a una región determinada debe ser igual al que sale. Esto significa que la circulación a través de una región dada está libre de convergencia. El balance de Sverdrup muestra que la convergencia del transporte en la capa de Ekman se compensa con la divergencia del flujo geostrofico en la capa inferior, que es libre de fricción. Como resultado de esto, las variaciones en el nivel del mar son muy pequeñas en el mar abierto y no pasan de un metro. El balance de Sverdrup opera sólo en vecindades pequeñas en escalas de cientos de kilómetros y falla en aguas someras en la vecindad de las costas. Esto implica que en estas zonas el viento puede causar grandes variaciones en el nivel del mar.

### **2.1.5. La termoclina**

En la dinámica del océano profundo otro factor importante es la termoclina permanente y estacional. La termoclina es una capa en la que se presenta un cambio abrupto de temperatura, de las aguas cálidas en la superficie del océano hacia las aguas frías en profundidades mayores. Se identifica como un máximo local en el gradiente vertical de temperaturas.

La zona con un máximo permanente en el gradiente vertical de temperatura se conoce como la termoclina permanente. La termoclina permanente no existe en los océanos costeros, pues estas regiones no son suficientemente profundas para mantener la termoclina permanente. Sin embargo, su existencia es importante para la oceanografía de costas porque la termoclina adyacente a la costa determina qué efecto tendrán procesos de intercambio entre el océano costero y el mar abierto sobre las propiedades del agua en la plataforma.

Esto es importante pues determina las condiciones hidrográficas como el contenido de oxígeno y los nutrientes que tienen grandes gradientes verticales en la termoclina permanente. La interacción entre el océano costero y la termoclina del océano profundo determina en gran medida el intercambio de este tipo de propiedades.

### **2.1.6. Influencia de la atmósfera**

La atmósfera ejerce esfuerzos sobre el océano de dos maneras principales. La primera es a través de esfuerzos tangenciales (viento) y la segunda es a través de modificar la flotabilidad del océano (por medio

del calentamiento, el enfriamiento, la evaporación y la precipitación). La respuesta del océano costero al primer tipo de forzamiento es un ajuste en el nivel del mar; y la respuesta al segundo es un flujo debido al cambio de la flotabilidad.

Las corrientes superficiales debidas al intercambio de momento con la atmósfera reflejan la estructura del campo de vientos en una variedad de escalas. En la escala global, la circulación general de la atmósfera domina la circulación del océano. En la escala sinóptica, las bajas presiones atmosféricas crean tormentas que introducen variabilidad a las corrientes oceánicas en escalas temporales de días a semanas. Las variaciones del viento crean convergencia y divergencia de la circulación del océano en todas las escalas.

En general la zona costera tiene gran variabilidad de temperatura y salinidad y, por lo tanto, de la densidad. Las variaciones de temperatura aumentan debido a la baja profundidad y al intercambio con la atmósfera de momento y de calor. Esto a su vez tiene efectos importantes sobre la circulación. La contribución de la variabilidad de la salinidad en los cambios de densidad son aun más importantes que los de la temperatura. La zona costera está expuesta a la precipitación y a la evaporación, que son procesos del océano general, pero además recibe agua fresca de lluvias que provienen del continente y de las descargas de los ríos. Estas contribuciones tienen un impacto muy grande en el campo de densidades en la plataforma y es un mecanismo importante para la circulación en esta zona.

## **2.2. Circulación Estacional las plataformas mexicanas del Golfo de México**

Para este trabajo es muy importante entender la circulación en el Golfo de México, sobre todo en la plataforma de Veracruz, en diferentes escalas temporales. Más adelante se discuten algunas mediciones de corrientes hechas en la zona de estudio en periodos de varias semanas. A continuación se explica la dinámica de la región en la escala mensual, con base en de una modelación numérica [22].

En un estudio numérico de alta resolución para analizar la dinámica estacional de esta región [22], los autores dividen la plataforma continental del Golfo de México en tres regiones principales de acuerdo a su dinámica. Estas son las plataformas Louisiana Texas (LATEX), las de Tamaulipas y Veracruz (TAVE) y el Banco de Campeche .

La plataforma continental en el oeste del Golfo de México incluye las plataformas de LATEX y las de TAVE, Tabasco, Campeche y parte de Yucatán, hasta Puerto Progreso. Si se fija la frontera en donde la

profundidad alcanza los 200  $m$ , la plataforma oeste tiene una extensión de 267,000  $km^2$  y una longitud de alrededor de 2,500  $km$ .

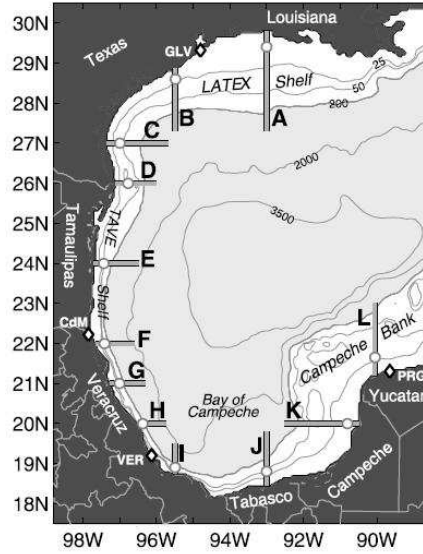


Figura 2.2: Plataforma continental del Golfo de México resaltando las plataformas de LATEX, TAVE, Tabasco, Campeche y parte de Yucatán. Las letras dividen a la plataforma en diferentes zonas dinámicas ( [22])

En la escala estacional (de baja frecuencia) la circulación en la plataforma LATEX se conoce bien, pues se han hecho numerosos estudios en esta región. Sin embargo, la cantidad de estudios al sur del Río Bravo son considerablemente menores. En este estudio se incluyó la plataforma de LATEX para relacionar la dinámica encontrada en LATEX, de la cual hay muchas mediciones, con la de TAVE y así validar los resultados.

Según el estudio, el transporte en la plataforma oeste del Golfo de México tiene una importante componente estacional, con diferencias regionales. Del Río Bravo al sur de la Bahía de Campeche (es decir, sobre la plataforma de TAVE), los principales transportes son los siguientes: de septiembre a marzo, los transportes entre la costa y las isóbatas de 25  $m$  y 50  $m$  son costa abajo (donde costa abajo se define como la misma dirección en la que viajaría una onda de Kelvin). De mayo a agosto, la circulación se invierte y los transportes son costa arriba sobre la plataforma de TAVE. La transición de la corriente, de costa arriba a costa abajo, frecuentemente comienza con la coexistencia de una corriente costa abajo en la parte interior de la plataforma y una corriente costa arriba en la parte exterior. La corriente interior se comienza a debilitar y termina por desaparecer unos días después. La inversión de la corriente no ocurre simultáneamente en toda la plataforma oeste. Sucede entre agosto y septiembre, empezando en el norte y



propagándose costa abajo, con un retraso de un mes entre la plataforma de LATEX y el sur de la Bahía de Campeche.

La temperatura y la salinidad de la zona están principalmente influenciadas por la descarga del sistema de ríos Mississippi-Atchafalaya. Durante el otoño y el invierno, agua de baja salinidad es advectada hacia la plataforma de TAVE, lo cual genera frentes importantes en la plataforma de Tamaulipas, cerca de la isóbata de 50 m. El agua proveniente de los ríos puede estar hasta 5°C más fría que el agua adyacente a la plataforma. Durante el verano, con la inversión de la corriente en la plataforma de Tamaulipas, el agua no alcanza a llegar a esta región y permanece recirculando en la plataforma de LATEX, o es transportada por el viento hacia el este de la desembocadura del Mississippi. La principal contribución de agua dulce a la plataforma de TAVE viene de los ríos locales, principalmente del Grijalva-Usumacinta, Coatzacoalcos, Papaloapan y Pánuco. Estos ríos son relativamente pequeños en comparación con el Mississippi y el Atchafalaya por lo que, a pesar de que descargan sus aguas directamente sobre las plataformas de TAVE y de Tabasco, y tienen sus mayores descargas en verano, la cantidad de agua dulce sobre la plataforma de TAVE es mayor en invierno. La descarga del Río Bravo es insignificante pues casi toda el agua de su cuenca se queda contenida en presas.

La componente del viento paralelo a la costa (CVPC) es el principal mecanismo de forzamiento de la plataforma oeste del Golfo de México, y explica las principales características observadas en la circulación en la zona. A lo largo de Tamaulipas y Veracruz, entre 18,5° N y 26° N, la CVPC es costa arriba de abril a agosto y costa abajo entre septiembre y marzo. La CVPC sobre la plataforma de LATEX es siempre costa abajo excepto en los meses del verano, en los cuales se debilita considerablemente y a veces se invierte.

Las corrientes más variables e intensas en la frecuencia estacional que se encontraron en la plataforma del Golfo se presentan en la plataforma de TAVE, en donde alcanzan una velocidad de  $0.70 \text{ ms}^{-1}$ . A la misma frecuencia, los vientos en esta región también son más intensos y variables que sobre el resto de la plataforma oeste. Debido a esta alta correlación entre los vientos y la circulación en la región, en este estudio se sugiere que la CVPC es el principal mecanismo de forzamiento de las corrientes, a bajas frecuencias, para esta zona.

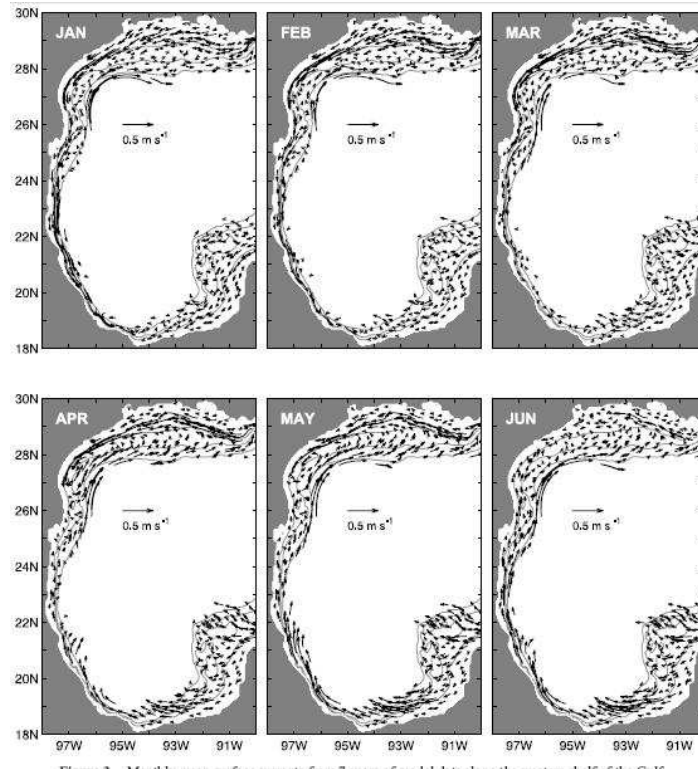


Figura 2.3: Corrientes superficiales promedio mensuales a lo largo del Golfo de México. Se muestran los datos correspondientes a los meses de enero a junio ([22]).

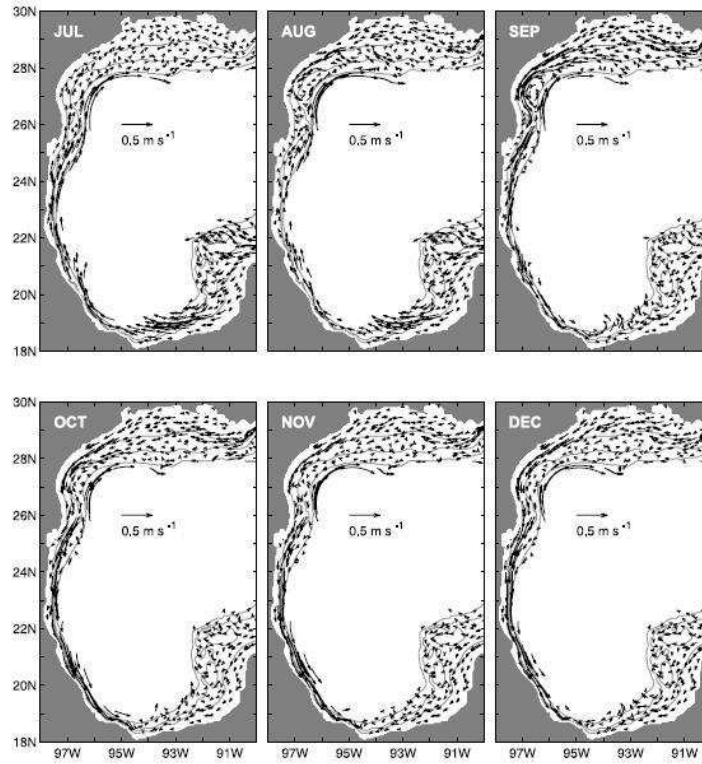


Figura 2.4: Corrientes superficiales promedio mensuales a lo largo del Golfo de México. Se muestran los datos correspondientes a los meses de julio a diciembre ([22]).

### 2.3. El Sistema Arrecifal Veracruzano

Los arrecifes coralinos a nivel mundial son ecosistemas muy frágiles que sostienen un conjunto grande de organismos, algas, plantas y animales, que son distintos en cada sistema arrecifal. Estos se encuentran en la plataforma continental. Los arrecifes atraen a una gran cantidad de turistas, y por esta razón, son la base de una gran cantidad de empleos y producen miles de millones de dólares anuales debidas al turismo, la recreación y la pesca. De los arrecifes se extraen importantes compuestos bioquímicos, algunos de los cuales se usan para producir nuevas medicinas. Las formaciones de arrecifes también evitan la erosión de la playa y protegen a la costa de las tormentas [13].

En la zona de este estudio se encuentra el SAV, que se considera el sistema arrecifal más extenso y desarrollado del Golfo de México. En este arrecife habitan miles de especies incluyendo algas, esponjas, anémonas, corales, gusanos, caracoles, almejas, crustáceos, estrellas de mar, erizos de mar y peces. En general, los arrecifes se consideran los ecosistemas marinos con mayor diversidad biológica. Los ecosistemas arrecifales del Golfo de México forman un corredor biológico, donde las especies marinas transitan y se establecen. La ruta de migración corre desde el Banco de Campeche hacia Texas, pasando por los arrecifes veracruzanos gracias a las corrientes marinas [7]. El SAV fue declarado Parque Nacional desde 1992; aun así, es también considerado a nivel regional como uno de los arrecifes más amenazados por las actividades humanas.

El Golfo de México es un mar rodeado por la costa cuya cuenca mide  $1,5 \times 10^6 \text{ km}^2$  [1] y es una zona que recibe grandes cantidades de descargas de los ríos y lagunas adyacentes. Gracias a estas descargas hay gran diversidad biológica en la zona y, a pesar de que las condiciones no son las adecuadas para el desarrollo de arrecifes coralinos en el Golfo de México, existe un sistema arrecifal bien desarrollado que cubre alrededor del 1% de la parte somera de la plataforma continental.

El Parque Nacional del Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV) está conformado por los arrecifes que se encuentran en la plataforma continental enfrente del Puerto de Veracruz y el pueblo de Antón Lizardo. Estos arrecifes son muy particulares porque se desarrollaron en un ambiente influenciado por las descargas de los ríos La Antigua, Jamapa y Papaloapan. El PNSAV es un área natural protegida de alrededor de 54,000 *Ha* en donde a pesar de que es un sitio de gran importancia, se han hecho pocos estudios formales en la zona y se sabe poco acerca de sus características oceanográficas.

En general, los arrecifes necesitan condiciones muy particulares, tanto oceanográficas como ambientales, para poder desarrollarse y sobrevivir. Estas condiciones son: aguas marinas someras, oligotróficas, de

temperaturas cálidas (óptimamente entre  $26 - 28^{\circ}C$ ), con salinidad entre 33-36 *ups*, con poca turbidez y poca energía producida por oleaje [8]; [2].

La costa de Veracruz y sus perfiles de profundidad se caracterizan por una distribución inclinada sobre una plataforma cuyo ancho es de aproximadamente 33 *Km*. El suelo tiene una topografía compleja, pues incluye una serie de islas, arrecifes y bancos de arena que forman canales de dimensiones variadas, la profundidad de la zona arrecifal es variable, llegando hasta los 50 *m*. Esta complejidad en la topografía tiene un papel importante en la circulación sobre la plataforma de Veracruz [16].



## Capítulo 3

# Contaminación

En este capítulo se discute brevemente el concepto de contaminación. Se describen los principales tipos de contaminantes que se encuentran en las aguas residuales debido a las actividades humanas, sus orígenes, cómo se cuantifican y cómo afectan al cuerpo receptor, así como algunos posibles riesgos a la salud. En particular se describe cómo afecta la contaminación a algunos ecosistemas marinos.

### 3.1. Los recursos acuáticos y la contaminación

El agua dulce, que no está congelada en los polos, representa sólo 1/10,000 del agua total en el planeta. En la escala global, esta cantidad es constante año con año, pues es reestablecida con agua que cae por precipitación de agua evaporada en el mar. Desafortunadamente, la mayor cantidad del agua cae de regreso en el mar. El agua fresca, la de los ríos, los lagos y el agua subterránea, se usa para todas las actividades humanas: para abastecimiento, agricultura, industria y recreación, y por ello está expuesta a una gran cantidad de contaminación, particularmente cuando no es utilizada con cuidado [15].

El resto de los recursos acuáticos se encuentran en el mar. Los océanos cubren el 71 % de la superficie de la Tierra y desempeñan un papel importante en el ciclo global del dióxido de carbono, del nitrógeno y del fósforo, son un recurso importante para la producción de alimentos, minerales, compuestos bioquímicos y también se usan para el transporte y la recreación [13]. La contaminación tiene efectos devastadores sobre los ecosistemas oceánicos. Más adelante en este capítulo se discuten algunos de estos efectos y las fuentes de la contaminación que los producen.

Las actividades humanas tienen como consecuencia la introducción de grandes cantidades de conta-

minantes en los cuerpos de agua en la Tierra. Los recursos de agua del planeta se han ido degradando, y lugares que en algún momento fueron paraísos cristalinos con gran diversidad biológica ahora son sucios, insalubres y pobres en cuanto a las especies que ahí habitan.

La contaminación es la introducción en un ecosistema o medio de elementos físicos, químicos o biológicos en formas o cantidades que rebasan la capacidad del receptor de procesarlos naturalmente. El término “contaminación” es un término cualitativo, que se usa para indicar que el nivel de contaminantes en la zona es tal que el uso que se le quiere dar a ese cuerpo de agua se ve afectado. Las diferentes actividades que usan agua requieren de diferentes niveles de calidad [13]; por ejemplo, agua que se considera demasiado contaminada para beber puede ser adecuada para la agricultura y la industria. El agua para beber, o para actividades como nadar, navegar y para la pesca, requieren de diferentes niveles de calidad.

La calidad del agua también es afectada por factores naturales, como el contenido mineral de una cuenca, el clima y la morfología de la región [13].

### **3.2. Fuentes y causas de la contaminación en el agua**

Las principales causas de la contaminación son las actividades humanas como la construcción, la agricultura, las industrias y el uso doméstico. También la precipitación pluvial puede contener partículas y materia disuelta que contribuyen a la contaminación de los cuerpos de agua receptores. Cerca de la costa la lluvia puede contener sales, y tierra adentro puede contener materia orgánica y ácidos disueltos provenientes de materiales suspendidos en la atmósfera, que llegan a este sitio por actividades humanas y procesos naturales [15].

La construcción y cambios en el uso del suelo son causas importantes de contaminación, pues implican la extracción de tierra, lo cual deriva en sedimentos y partículas en los cuerpos de agua adyacentes. Otros usos de la tierra que desestabilizan el suelo y provocan erosión contribuyen a este tipo de contaminación. Las partículas suspendidas y la materia coloidal pueden contener condiciones favorables para el desarrollo de microorganismos y son también un tipo importante de contaminación del agua.

Las aguas negras domésticas son aquellas que provienen de hogares, escuelas edificios y pequeños negocios como tiendas. Las aguas negras municipales incluyen las aguas negras domésticas y desechos industriales que pueden ser depositados en el drenaje sanitario. El drenaje doméstico incluye desechos humanos y otros materiales que provienen de las actividades en el hogar, como comida, jabones y detergentes, aceites y grasas, pinturas, etc. Estos desperdicios contienen microorganismos, metales, plásticos y



químicos xenobióticos. El drenaje municipal contiene los mismos componentes que el doméstico junto con agua que contiene desechos industriales, de escuelas, hospitales y aeropuertos que están conectados al sistema de drenaje municipal. En muchas ciudades, incluyendo la ciudad de Veracruz, las aguas arrastradas por la lluvia contribuyen a contaminar el drenaje municipal. La contaminación de cuerpos de agua por el drenaje municipal se da cuando estas aguas no son correctamente tratadas o cuando drenaje altamente tratado es depositado en sitios que no son capaces de absorber la carga de desperdicios depositados en él. Entonces, la contaminación puede resultar por no tratar las aguas o por la cantidad de desperdicios depositados. Los desperdicios humanos forman una parte importante de los contaminantes en el drenaje, pues contienen microorganismos y materia orgánica cuya importancia se discute más adelante. Se puede disminuir el riesgo sanitario que este tipo de contaminación representa si se minimizan los desechos y se le da un tratamiento adecuado al agua de desecho antes de descargarla en un cuerpo natural de agua [15, 13].

En general, las fuentes de contaminación son de dos tipos: puntuales y no puntuales, esta clasificación tiene que ver con la manera en que el agua contaminada llega al cuerpo receptor. Las aguas negras provenientes de los hogares y de la industria se llaman fuentes puntuales. La descarga Arroyo el Cable, así como todas las descargas estudiadas alrededor del puerto, son descargas puntuales. Esto significa que los desechos se recolectan mediante una red de tubos o canales que los conducen hacia un solo sitio en donde se descargan.

También hay fuentes de contaminación no puntuales que son escurrimientos agrícolas y urbanos que pasan sobre la superficie del terreno o por canales de drenaje natural, hasta llegar al cuerpo de agua más cercano. Frecuentemente estas fuentes de contaminación se deben a aguas pluviales o a deshielos. La contaminación de este tipo, sobre todo en época de lluvia, se recolecta en alcantarillados combinados, que conducen agua de lluvia y aguas negras municipales, y terminan, frecuentemente, en descargas puntuales [13].

### **3.3. Principales tipos de contaminantes**

En esta sección se describen los principales tipos de contaminantes, de dónde provienen así como los riesgos que presentan al ambiente acuático del cuerpo de agua receptor.

### 3.3.1. Material que demanda oxígeno

Los materiales que oxidan el agua en la que se encuentran y consumen el oxígeno molecular disuelto en ella, se llaman materiales que demandan oxígeno (o demanda de oxígeno). Este tipo de materiales en su mayor parte son materia orgánica biodegradable, junto con algunos compuestos inorgánicos. Los materiales que demandan oxígeno en las aguas negras domésticas provienen generalmente de residuos alimenticios y desechos humanos y de animales. Las industrias también descargan desechos demandantes de oxígeno. En general, casi toda la materia orgánica que llega a un cuerpo de agua contribuye a disminuir el oxígeno disuelto (OD). La demanda de oxígeno representa una amenaza para la flora y la fauna, y para las formas superiores de vida de un cuerpo de agua, quienes requieren del OD para sobrevivir. La concentración de OD necesario varía según la especie, pero los peces de mayor interés comercial y deportivo requieren de altas concentraciones (como la trucha que requiere  $7.5 \text{ mgL}^{-1}$ ) [15, 13].

### 3.3.2. Los Nutrientes

Los nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, que son requeridos por todos los seres vivos para su desarrollo (y que deben de encontrarse en la red alimenticia), se consideran contaminantes cuando se encuentran en cantidades grandes. Esto se debe a que los nutrientes en concentraciones excesivas favorecen el desarrollo de algunas especies sobre otras e interrumpe la red alimenticia. La presencia de muchos nutrientes beneficia, por ejemplo, el crecimiento de algas, las cuales al morir se asientan en el fondo y se convierten en materiales demandantes de oxígeno, disminuyendo el OD y dificultando el desarrollo de muchas otras especies. Los nutrientes en las aguas residuales provienen principalmente de detergentes y fertilizantes que contienen fósforo, desechos del procesamiento de alimentos así como del excremento animal y humano [13].

### 3.3.3. Microorganismos Patógenos

Muchos microorganismos intestinales que sobreviven en el drenaje y en las aguas superficiales en donde el drenaje es depositado pueden causar infecciones, enfermedades y hasta la muerte si hay contacto con ellos. En las aguas de desecho hay microorganismos patógenos, como virus, bacterias y protozoarios excretados por personas o animales. Con concentraciones mínimas de patógenos, las aguas se vuelven inadecuadas para beber, pero con concentraciones suficientemente altas, tampoco son adecuadas para nadar o para pescar. Algunos mariscos se vuelven tóxicos ya que absorben los microorganismos y los

concentran en sus tejidos, lo cual hace que las concentraciones de dichos microorganismos sean más altas que en los alrededores. Entre los microorganismos patógenos más importantes se encuentran los causantes de la tifoidea, el cólera y la giardiasis [13, 15].

#### **3.3.4. Sólidos suspendidos**

Los sólidos suspendidos son partículas orgánicas e inorgánicas arrastradas por el agua residual hasta el cuerpo de agua más cercano. Cuando estas partículas reducen su velocidad, al entrar en un estanque, se asientan en el fondo como sedimento. El término “suspendido” también incluye partículas erosionadas del suelo que son arrastradas por el agua, que no se han sedimentado. Los sólidos suspendidos pueden ser también material que demanda oxígeno. Estas partículas, que no se asientan con facilidad, a veces forman coloides y causan turbidez. Los sólidos erosionados vienen sobre todo de áreas de tala, explotación minera y construcción. Al aumentar la turbidez, las partículas suspendidas no dejan pasar la luz, lo cual puede contribuir a aumentar la concentración de bacterias y cuando estas se asientan en el fondo, destruyen el hábitat de muchos organismos. También en condiciones de movimiento, las partículas suspendidas, al ser arrastradas, pueden destruir los hábitats de organismos acuáticos [13].

#### **3.3.5. Las sales**

Todos los cuerpos de agua contienen sal. Las sales y otras sustancias que no se evaporan se denominan sólidos disueltos totales (SDT). Muchas industrias descargan sales en los cuerpos de agua. En algunos lugares se usa sal para fundir el hielo en las carreteras, las cuales terminan en los cuerpos de agua más cercanos. Si la concentración de sales es alta, se amenaza la flora y la fauna natural del agua, ya que el agua puede volverse inadecuada para el consumo humano y para la irrigación. La evapotranspiración también es un factor que afecta la concentración de sólidos disueltos. Esto puede ser peligroso porque cuando la concentración se eleva mucho, el suelo también absorbe las sales y se vuelve tóxico [13].

#### **3.3.6. Metales tóxicos y compuestos orgánicos tóxicos**

Los escurrimientos agrícolas, industriales y urbanos son fuentes importantes de compuestos metálicos y orgánicos tóxicos. Los pesticidas y herbicidas usados en los cultivos, las aguas industriales de desecho que contienen materiales orgánicos tóxicos y los escurrimientos urbanos con altos contenidos de zinc (provenientes del desgaste de los neumáticos) son ejemplos de estos compuestos. Si se descargan en grandes

cantidades, el cuerpo de agua en el que se depositan se vuelve inutilizable (excepto para la navegación), pues muchos de estos tóxicos son difíciles de tratar y son contaminantes persistentes. También, aun en pequeñas cantidades, se concentran en la red alimenticia y los peces y mariscos se contaminan y no son adecuados para el consumo humano. Por esto, aun cantidades pequeñas de sustancias tóxicas pueden afectar el ecosistema natural y volverlo inutilizable para actividades humanas [13].

### **3.3.7. Sustancias que trastornan el sistema endócrino**

Las sustancias que trastornan el sistema endocrino incluyen los bifenilos policlorados, los pesticidas, sustancias derivadas de la atrazina y los ftalatos. Estas se caracterizan porque pueden imitar a los estrógenos, los andrógenos, las hormonas tiroideas o a sus antagonistas. La presencia de estas sustancias puede interferir con los procesos de reproducción y desarrollo de varios animales (mamíferos, reptiles y peces). Estas sustancias también pueden afectar las funciones fisiológicas normales y la síntesis normal de hormonas de los organismos [13].

### **3.3.8. Arsénico**

El arsénico es un elemento presente naturalmente en el ambiente. En el agua subterránea se encuentra debido a que los minerales de rocas y suelos erosionados se disuelven. Los problemas de salud ocasionados por el arsénico son numerosas y variadas. Incluyen perturbaciones circulatorias, trastornos gastrointestinales, neuropatías periféricas y lesiones cutáneas. También se ha ligado con el cáncer de piel, hígado, vejiga, riñón y pulmones [13].

### **3.3.9. Calor**

El calor es un factor físico que puede alterar un ambiente. Desechar calor en los cuerpos de agua ocasiona problemas al ambiente y en este sentido se puede considerar como un contaminante. El calor no siempre es un problema, por ejemplo, si se deposita agua caliente en un cuerpo de agua durante el invierno, puede no tener consecuencias graves sobre el ambiente, pero si se deposita en el verano, la situación es diferente. La industria de generación eléctrica y varios otros procesos industriales descargan aguas a mucho mayores temperaturas que los cuerpos receptores, lo cual eleva la temperatura del agua. La elevación de la temperatura de las aguas receptoras generalmente tiene efectos negativos, pues muchos peces de importancia comercial y deportiva viven solo en aguas frías. En algunos lugares también

pueden causar problemas de desarrollo en algunos peces. Además, temperaturas arriba de las normales disminuyen la solubilidad del oxígeno, lo cual provoca mayor agotamiento del OD y un gran deterioro del cuerpo de agua. El aumento en la temperatura puede provocar también una mayor estratificación, inhibiendo con esto la mezcla vertical e impactando las concentraciones de OD.

### 3.4. Calidad del agua en los océanos

La evaluación de la calidad del agua varía según el tipo de cuerpo de agua en cuestión. En el presente proyecto son relevantes los océanos por lo que a continuación se presentan aspectos generales sobre la calidad del agua en este medio [13].

A pesar de que el volumen de agua en el mar puede parecer inmenso y que los contaminantes podrían dispersarse sin causar daños al ecosistema marino, los recursos del mar sí se pueden contaminar.

Generalmente, el mar se clasifica en tres regiones, tomando en cuenta diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos. Estas son: la zona costera, la capa de mezcla y el océano profundo. La zona costera, por sus características y su ubicación respecto al continente, es la más susceptible a la contaminación producida por las actividades humanas cotidianas, además de que frecuentemente recibe la contaminación proveniente de los ríos [13].

La zona costera se extiende de la línea de marea baja hasta el contorno de 200 *m*, que normalmente coincide con la frontera de la plataforma continental. La longitud de la zona costera varía, pero va desde menos de un kilómetro en algunos lugares a más de 1400 *Km* en otros. En promedio, las plataformas continentales miden 50 *Km* y conforman un 8% de la superficie del océano [13].

La descarga de sustancias orgánicas e inorgánicas en los océanos, el aumento de temperatura, las prácticas de pesca no sustentables y el transporte de sedimentos en el mar han puesto en gran peligro a los arrecifes del mundo. Las descargas agrícolas y domésticas, que tienen altas concentraciones de nutrientes, han provocado una sobrepoblación de algas que consumen OD y ahogan a los arrecifes coralinos. También atraen a sus depredadores. Todo esto contribuye a que se mueran los organismos dentro del arrecife y que este se torne blanco.

Otros factores que deben de ser tomados en cuenta para la dispersión de la contaminación en la plataforma continental son las características físicas de la plataforma. Pueden haber características morfológicas del suelo oceánico que compliquen la dispersión de aguas residuales, al no permitir el intercambio de agua con el océano profundo o la circulación de agua a su alrededor [13].

En el mar abierto también puede haber problemas de contaminación. En general, esta se debe a contaminación proveniente de la atmósfera que es precipitada sobre la superficie del océano, a derrames de petróleo, al uso de derivados de hidrocarburos que se depositan en el mar por navegación, por desechos industriales o por precipitación pluvial de los desechos emitidos por los automóviles. También se deben a que se depositan residuos peligrosos en esta zona. Los materiales solubles y más ligeros que el agua tienden a quedarse en la capa de mezcla superior en donde se empiezan a descomponer. La capa de mezcla es la más activa para la fotosíntesis y es de gran importancia biológica, pues es donde más prospera la vida vegetal y animal, por lo que la contaminación en esta zona tiene consecuencias importantes sobre la vida en el océano. La profundidad de la capa de mezcla varía según la estación del año y la ubicación geográfica, y normalmente tiene un grosor de 100 *m* a 1000 *m*. Entre la capa de mezcla y el océano profundo hay un gradiente de densidad grande que evita el intercambio de materia con la capa de mezcla, pero en ocasiones, partículas que se forman en la capa de mezcla o que son depositadas ahí se logran asentar y se integran a los sedimentos en el fondo del mar [13].

#### **3.4.1. Cuantificación de la contaminación**

Los métodos que se usan para cuantificar la contaminación en un cuerpo de agua están basados en las propiedades físicas y los procesos bioquímicos que determinan el decaimiento de los microbios y los químicos en el tiempo.

En los residuos humanos existen muchos tipos diferentes de microorganismos que son muy difíciles de cultivar y cuantificar, por lo que se tuvieron que buscar alternativas para determinar la calidad sanitaria del agua. Los desarrolladores de las técnicas de evaluación se conformaron con tomar el grupo de las bacterias coliformes como indicadores de la calidad del agua, pues son fáciles de cultivar. Este grupo de organismos es un buen indicador de materia fecal ya que se encuentra en los intestinos de un número grande de mamíferos y aves. Sin embargo, estas pruebas no son específicas y no indican la diversidad de organismos presentes. Se pueden usar otros indicadores como enterococos y coliformes fecales como indicadores de la calidad sanitaria del agua.

Algunas pruebas han mostrado que 99.99% de las bacterias indicadoras se pueden remover con tratamiento de las aguas residuales, pero el 0.01% restante sigue siendo un problema para diversos usos del agua, como el recreativo. La cantidad de bacterias en el drenaje es enorme (de 500 a 2,000 millones por cada 100 *ml*), por lo que el porcentaje que se elimina en el tratamiento no es tan indicativo

de la calidad del agua, y más bien se debe de evaluar el porcentaje que resta después del tratamiento. Para agua potable lo mejor es que la concentración de microorganismos sea cero, pero en general se acepta una concentración de 1 en 100 *mL*. Para usos recreativos la concentración permitida de enterococos es de 500 por 100 *ml* [17]. Tomando esto en cuenta, veamos un ejemplo [13]. Si el drenaje sin tratamiento de una población tiene una concentración de  $10^9$  por 100 *ml*, un tratamiento con eficiencia del 99.99% dejaría una concentración de 100,000 por 100mL, que sigue siendo muy alta.

Hay otro factor que se debe de tomar en cuenta al hacer una evaluación de la calidad del agua y es que la concentración de los organismos decrece con el tiempo y con la distancia que recorre al ser descargado. La concentración  $C$  de los indicadores bacteriológicos de la contaminación fecal disminuye con el tiempo de acuerdo a la ecuación de primer orden  $dC/dt = -KC$ , donde  $K$  es una constante que indica la tasa de mortandad. La solución general de esta ecuación  $C_t$ , al tiempo  $t$  dada la concentración inicial  $C_0$  es

$$C_t = C_0 e^{-kt},$$

con lo cual se puede calcular la mortandad en las descargas a las aguas receptoras [15].

Al analizar casos de mortandad en el ambiente marino, frecuentemente se usa un valor de  $K$  de 1.2 por hora, que es alrededor de tres veces mayor que el que se usa para agua dulce, y en general se usan valores que van desde 0.3 hasta 3.8 por hora [15]. El valor grande de esta constante para este caso se atribuye principalmente a la salinidad del ambiente marino y también se relaciona con una mayor concentración de animales depredadores. Tener el valor correcto de  $K$  es muy importante para tener un estudio preciso. Las variaciones en el valor de  $K$  para las bacterias indicadoras no son las únicas cosas que hay que tomar en cuenta. Algunos organismos patógenos pueden tener decaimientos diferentes que los indicadores coliformes.

Como ya se discutió, la materia orgánica biodegradable se descompone por bacterias y otros organismos que habitan en las aguas superficiales y la descomposición utiliza el OD del cuerpo receptor que es esencial para la supervivencia de las especies del ecosistema acuático receptor. El OD que puede tener el cuerpo receptor es función de la salinidad y la temperatura. La solubilidad del  $O_2$  disuelto disminuye con la temperatura. Una manera de cuantificar los efectos de la contaminación es calculando el oxígeno disuelto absorbido o desplazado por las sustancias presentes en el agua contaminada.

Un parámetro que se usa frecuentemente en residuos industriales es la demanda química de oxígeno (DQO), que es una medida del oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica y algunas sustancias

inorgánicas presentes en los residuos. Esta no es una medida del contenido orgánico de una muestra, sino del oxígeno necesario para la oxidación. Con esto se puede hacer una medición directa del impacto potencial del consumo de oxígeno contenido en el cuerpo de agua receptor.

Otro parámetro similar es la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) que es la más utilizada para el análisis de los recursos de  $O_2$  disueltos en agua. La DBO es la cantidad de oxígeno usado en el tiempo conforme se oxida la materia orgánica microbióticamente y químicamente. Cuando las aguas se tratan antes de ser descargadas, se remueve materia orgánica y se reduce la DBO. El impacto que tiene esta agua sobre los cuerpos receptores depende de las características del cuerpo. En general causan un déficit de OD [15].

### 3.4.2. Ecuación de advección y difusión

Describiremos ahora la ecuación que controla la dispersión de un contaminante en un fluido. Dado un medio unidimensional, la concentración  $C(x, t)$  de un contaminante en el punto  $x$  al tiempo  $t$  está dada por la ecuación

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = A \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + Q \quad (3.1)$$

donde  $u$  es la velocidad del fluido y  $A$  es la constante de difusividad molecular. El término  $u \frac{\partial C}{\partial x}$  es el término advectivo de la ecuación y  $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$  es conocido como el término difusivo. Esta ecuación puede derivarse del principio de conservación de la materia. Notemos que si el término fuente  $Q = 0$ , esta ecuación tiene la solución analítica

$$C = c_0 e^{\pm ik(x-ut) - Ak^2 t}$$

Análogamente, la ecuación que describe la concentración  $C(v, t)$  de un contaminante en un medio tridimensional es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \nabla C = A \nabla^2 C + Q \quad (3.2)$$

donde de nuevo  $u$  es el vector velocidad y  $A$  la constante de difusividad molecular. En nuestro caso se desprecia la difusión molecular y se considera la difusión turbulenta, usando como constante  $A$  el coeficiente de difusión turbulenta.



## Capítulo 4

# Análisis de Corrientes

En este capítulo se analizan las corrientes en la zona de estudio. Se tomaron mediciones de las corrientes en dos periodos, en dos sitios distintos, con un corrientímetro Nortek, modelo Aquadopp profiler. Estas se analizaron encontrando la dirección de máxima varianza utilizando funciones empíricas ortogonales. Posteriormente se determinó la magnitud de las corrientes y su variabilidad en distintas escalas de tiempo; en particular en la escala diurna y en la asociada a la variabilidad de los vientos en escala sinóptica. Finalmente se determinó la correlación entre las corrientes y el esfuerzo del viento y el retraso en la respuesta del océano.

### 4.1. Funcionamiento del corrientímetro

El Corrientímetro Nortek Aquadopp<sup>®</sup> Profiler mide perfiles de corrientes en agua usando tecnología acústica Doppler. Está diseñado para usarse en modo estacionario, es decir, fijo en algún sitio, y se puede utilizar en el fondo del mar, sobre una boyao en cualquier otro tipo de estructura fija. Comúnmente este instrumento se usa para hacer estudios costeros, monitoreo en línea y estudios en ríos, lagos y canales.

El Aquadopp Profiler utiliza tres rayos acústicos inclinados  $25^\circ$  con relación a un eje principal, para medir el perfil de la corriente en un número elegible de profundidades, llamadas celdas 4.2. Tiene sensores internos de inclinación y una brújula, que calculan la dirección de la corriente [14]. También tiene sensores de presión de alta resolución que calculan la profundidad y detectan cambios debidos a la marea.

La cabeza del Aquadopp Profiler contiene sensores con tres trasductores acústicos, un sensor de inclinación, un sensor de temperatura y un sensor de presión [14]. La orientación del sensor de inclinación



Figura 4.1: Corrientímetro Nortek Aquadopp Profiler.

está establecida de acuerdo con la orientación del sistema durante su operación normal. La orientación estándar del Aquadopp Profiler es vertical, sin embargo, los sensores de inclinación en las cabezas están diseñados para usarse con orientación horizontal y se pueden montar y configurar para operar con esa orientación [14]. Todo Aquadopp Profiler se puede usar al revés (relativo a la orientación de diseño) sin problemas; es decir, mirando del fondo a la superficie o de la superficie al fondo.

Otras partes importantes del corrientímetro incluyen una tabla que contiene los principales componentes electrónicos, como el transmisor de energía, los procesadores de señales análogas y digitales, el modulador de energía y la memoria para grabar datos. El corrientímetro Aquadopp Profiler contiene una batería interna que permite al equipo operar en un periodo de hasta un año y tiene una batería de reserva en caso de que la fuente principal falle.

El Aquadopp Profiler tiene un magnetómetro interno que mide el campo magnético terrestre. Combinado con el sensor de inclinación forma un compás que permite al equipo obtener las coordenadas geográficas para las mediciones de velocidad [14]. El instrumento mide la corriente en un conjunto de celdas a lo largo de cada rayo para obtener el perfil de corrientes, como se muestra en la figura 4.2 en donde sólo se muestran cinco celdas que no se superponen por claridad (en realidad pueden haber hasta 128 celdas por rayo que sí se superponen) [14]. El número de celdas está limitado por el tamaño de los rayos y la resolución más alta permisible (i.e. tamaño más pequeño de celda).

El Blanking es el tiempo durante el cual no se toman mediciones, esencialmente para darles a los transductores tiempo para estabilizarse después de haber emitido un pulso (los transductores se usan tanto como emisores como receptores de la señal acústica).

El corrientímetro Aquadopp Profiler utiliza el efecto Doppler para medir la corriente al transmitir

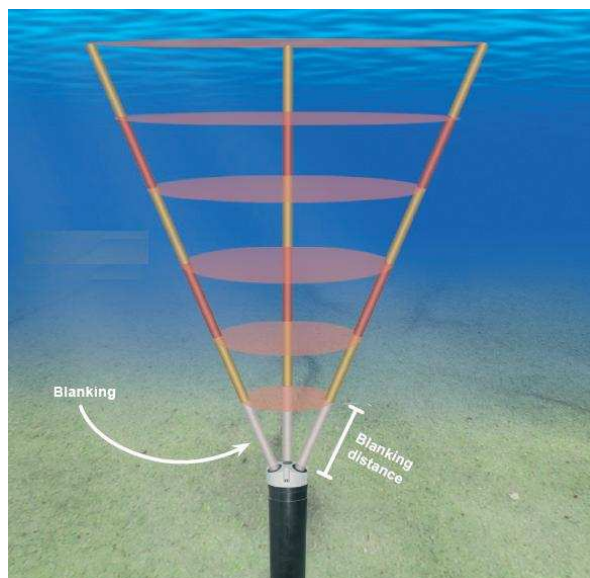


Figura 4.2: Ilustración de las celdas de un corrientímetro.

un pulso corto de sonido y escuchar su eco, midiendo la frecuencia de éste. El sonido no se refleja del agua misma, sino de partículas suspendidas en el agua, como zooplankton y sedimentos suspendidos. La velocidad de las partículas que el instrumento puede detectar es, en promedio, la misma velocidad que el agua.

Los sensores de corriente Doppler usan transductores grandes (en comparación con la longitud de onda del sonido emitido) para obtener rayos acústicos estrechos, que son esenciales para obtener datos con buena precisión. Cada rayo mide la velocidad paralela a éste y no registra en absoluto la velocidad perpendicular. El Aquadopp Profiler puede reconstruir las velocidades en tres dimensiones usando tres rayos que apuntan en direcciones diferentes. Si el flujo se puede considerar uniforme a lo largo de los tres rayos, entonces las velocidades se pueden calcular con trigonometría en tres dimensiones.

El Aquadopp Profiler mide las componentes de las velocidades paralelas a sus tres rayos. En general, las estructuras en las que se coloca el instrumento permiten que este rote y se incline libremente. Hace mediciones de la inclinación y usa su compás interno para convertir la información a coordenadas geográficas reales. Los datos que se sacan del corrientímetro al terminar el periodo de medición están separados por componentes y especifican la magnitud de la velocidad en cada celda [14].

La velocidad registrada es un promedio de muchos cálculos de velocidad (llamados pings). La incertidumbre de cada ping se denomina error de corto plazo. La incertidumbre de las mediciones se reduce al

tomar el promedio de varios pings. Hay un límite en cuanto a cuánto se puede reducir la incertidumbre, que se llama la tendencia a largo plazo. La tendencia a largo plazo para el corrientímetro Aquadopp Profiler típicamente es de una fracción de 1  $cm/s$ , y esta depende del procesamiento interno de las señales, los filtros y la geometría de los rayos.

## 4.2. Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales

En esta sección se explica detalladamente el método que se usa para analizar los datos.

### 4.2.1. Análisis de componentes principales

En estudios del medio ambiente es común encontrarse con grandes conjuntos de datos tomados como series de tiempo en posiciones geográficas distintas, a los que se desea comprimir para poderles extraer información. Típicamente se tienen conjuntos de datos de muestras instantáneas (mapeos) de un campo geofísico (en nuestro caso será la magnitud de la corriente en cada una de sus componentes), definido en un número de puntos (estaciones). El método de *Análisis de Componentes Principales* (*PCA* por sus siglas en inglés) es una técnica particularmente útil para comprimir series de datos.

El *PCA* es una herramienta muy útil del álgebra lineal aplicada. Cuando se toman mediciones, los datos obtenidos en un instante de tiempo dado pueden ser interpretados naturalmente como elementos de un espacio vectorial, donde cada variable medida en cada localidad representa una coordenada de dicho espacio. La base en la que estas quedan expresadas en general refleja el método de medición con el que se tomaron estos datos. Sin embargo, la base en la que expresamos nuestras mediciones es únicamente una consecuencia de la manera de recolectar la información y no es necesariamente la mejor manera de expresar los datos para extraer información útil de ellos. Con el *PCA* lo que se busca es una nueva *base* que represente de mejor manera nuestra serie de mediciones. Este análisis permite describir la variabilidad espacial y temporal de campos geofísicos y reducir series de datos complejas para encontrar en ellas alguna estructura. Este análisis busca proporcionar una descripción nueva de los datos en términos de funciones ortogonales. Es decir, el objetivo del *PCA* es encontrar la mejor *base* para expresar una serie de datos de modo que al representar los datos en términos de la nueva base, ésta nos de información acerca del sistema. Lo ideal es que la nueva manera de describir los datos ayude a distinguir el ruido de la estructura intrínseca de la serie. Frecuentemente la mayor varianza de una serie de datos distribuida en el espacio se encuentra en las primeras funciones ortogonales, cuyos patrones se pueden relacionar con

algunos mecanismos físicos del sistema. El *PCA* es un método para dividir la varianza de una serie de tiempo espacialmente distribuida [18].

En oceanografía, frecuentemente se refieren al *PCA* como *Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs)*. Se denomina empírica para reflejar el hecho de que las funciones ortogonales están definidas por la estructura de la covarianza de la serie de datos que se está analizando. La ventaja de este análisis es que con él se obtiene una descripción compacta de la variabilidad espacial y temporal en términos de funciones ortogonales. Este análisis se puede hacer tanto en el dominio espacial como en el temporal. El método general sólo se puede utilizar para describir oscilaciones estacionarias. En este caso nos preocupamos solamente por la variación temporal [5].

Dicho de manera más formal, el objetivo del *PCA* es el siguiente. Si consideramos una serie de datos que tiene  $N$  mapeos en tiempos  $t_i$ , para  $1 \leq i \leq N$ , cada uno consistente de variables escalares  $\Psi_m(t)$  tomadas en  $M$  lugares distintos  $\vec{x}_m$  ( $1 \leq m \leq M$ ), lo que se busca es encontrar  $M$  funciones espaciales  $\phi_i$  y coeficientes  $a_i(t)$  para cada tiempo  $t_i$  y cada  $1 \leq m \leq M$  de tal forma que podamos escribir la serie de datos como

$$(\Psi_m(t))_{m=1}^M = \sum_{i=1}^M [a_i(t)\phi_{im}]$$

donde  $a_i(t)$  representa la amplitud de la  $i$ -ésima función ortogonal al tiempo  $t_i$ . Esto significa que la variación temporal de la variable  $\Psi(\vec{x}_m, t)$  en cada lugar  $\vec{x}_m$  está dada por una combinación lineal de  $M$  funciones espaciales  $\phi_i$ , donde el peso  $a_i(t)$  de cada función ortogonal nos dice cómo varían los modos espaciales  $\phi_{im}$  con respecto a esta base en el tiempo. Cabe mencionar que las funciones  $\phi_{im}$  deben de ser ortogonales y, por tanto, satisfacen la condición de ortogonalidad:

$$\sum_{i=m}^M [\phi_{im}\phi_{jm}] = \delta_{ij}$$

El *PCA* hace una suposición muy importante, la de *linealidad*. Con esta suposición, el problema se simplifica bastante. Este método es en esencia un método matricial, lo que nos permite plantear la situación como un problema de álgebra lineal.

Hay dos maneras de realizar un análisis de *FEOs* para una cantidad dada de series de tiempo. En la primera forma se construye la matriz de covarianzas de la serie de datos y luego se descompone en sus eigenvalores y sus eigenvectores. En la segunda, conocida como *descomposición en valores singulares (SVD)* por sus siglas en inglés, se utiliza la SVD de la matriz de datos para obtener los eigenvectores,

los eigenvalores y las amplitudes que varían en el tiempo. La *SVD* tiene ventajas sobre la matriz de covarianza por su eficiencia computacional y su grado de sofisticación [20].

En ambos casos, primero se preparan los datos de la siguiente manera: supongamos que tenemos un conjunto de  $N$  mapeos tomados en tiempos  $t = 1, 2, 3, \dots, N$  donde cada mapeo contiene medidas del campo; si denotamos con  $\mathbf{X}$  a la matriz que contiene los datos originales, con los datos correspondientes a un instante dado en la misma columna y las mediciones correspondientes a un mapeo fijo en cada fila, es fácil ver que  $\mathbf{X}$  es una matriz de  $m \times n$  donde se midieron  $m$  variables para  $n$  instantes de tiempo. Como mencionamos anteriormente, si tenemos medidas de las variables  $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$  tomadas en tiempos  $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ , entonces para cada tiempo  $t_j$  podemos pensar en el conjunto de mediciones  $(x_i)_{i=1}^m$  como un punto en un espacio  $m$ -dimensional.

Buscamos ahora encontrar una matriz  $\mathbf{Y}$  de  $m \times n$  relacionada con  $\mathbf{X}$  por medio de una transformación lineal  $\mathbf{P}$  que nos permita encontrar la estructura en los datos recogidos. La relación entre  $\mathbf{X}$  y  $\mathbf{Y}$  está dada por:

$$\mathbf{P}\mathbf{X} = \mathbf{Y} \quad (4.1)$$

Definimos:

- $\vec{p}_i$  son las *filas* de  $\mathbf{P}$
- $\vec{x}_i$  son las *columnas* de  $\mathbf{X}$
- $\vec{y}_i$  son las *columnas* de  $\mathbf{Y}$

La ecuación (4.1) representa un *cambio de base* que se puede interpretar de varias maneras.  $\mathbf{P}$  es la matriz que transforma  $\mathbf{X}$  en  $\mathbf{Y}$ . Geométricamente  $\mathbf{P}$  representa una rotación seguida de un estiramiento del espacio vectorial en el que se encuentran las columnas de  $\mathbf{X}$ . Las filas  $\{\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots, \vec{p}_m\}$  de  $\mathbf{P}$  son los vectores de una nueva base en la cual expresamos las columnas de  $\mathbf{X}$ .

Al resolver la ecuación (4.1) se ve que cada entrada de los vectores  $\vec{y}_i$  es el producto punto de  $\vec{x}_i$  con la fila correspondiente en  $\mathbf{P}$ , es decir, la  $j$ -ésima entrada de  $y_i$  es la proyección de  $\vec{x}_i$  en el vector dado por la  $j$ -ésima fila de  $\mathbf{P}$ . La ecuación es una proyección sobre la base  $\{\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots, \vec{p}_m\}$  y es una nueva manera de representar a las *columnas* de  $\mathbf{X}$ . Los vectores  $\{\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots, \vec{p}_m\}$  en esta transformación se convierten en los *componentes principales* de  $\mathbf{X}$ .

Como ya habíamos mencionado, vamos a pensar en  $\mathbf{X}$  como una matriz de  $m \times n$  en donde las filas representan el *tipo de medición* y cada columna corresponde a un instante en el tiempo. Tomando esto en cuenta, podemos definir la matriz de covarianzas  $\mathbf{C}_x$ . Para construir esta matriz es necesario restar el promedio temporal de cada tipo de medición a cada medición. En otras palabras, a cada entrada de una fila de  $\mathbf{X}$  se le resta el promedio de dicha fila. Una vez hecho esto la matriz de covarianzas  $\mathbf{C}_x$  se define como:

$$\mathbf{C}_x = \frac{1}{N-1} \mathbf{X}^T \mathbf{X} \quad (4.2)$$

La matriz de covarianzas  $\mathbf{C}_x$  expresa las correlaciones entre todos los pares posibles de mediciones.  $\mathbf{C}_x$  es simétrica (de  $m \times m$ ), donde los términos de la diagonal representan la *varianza* de cada medición y los términos fuera de la diagonal son las covarianzas entre las mediciones.

Ahora buscamos una transformación lineal tal que la matriz de covarianzas de  $Y$  ( $\mathbf{C}_y$ ) sea diagonal, pues ésta es la manera óptima de representar una matriz. El *PCA* supone que todos los vectores de la base  $\{\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots, \vec{p}_m\}$  son ortonormales, es decir que  $\mathbf{P}$  es una matriz ortonormal. También supone que las direcciones con la mayor varianza son las "más importantes". Entonces,  $\mathbf{P}$  actúa como una rotación generalizada para alinear una base con el eje de mayor varianza. Lo que hace el *PCA* es encontrar una dirección normalizada en un espacio  $m$ -dimensional en la que la varianza de  $\mathbf{X}$  es máxima. A esta dirección le asignamos el nombre  $\vec{p}_1$ . A continuación, se busca otra dirección a lo largo de la cual la varianza es máxima, bajo la restricción de que esta dirección sea ortogonal a  $\vec{p}_1$ , y se le asigna el nombre  $\vec{p}_2$ . Este procedimiento se repite hasta tener una nueva base ortonormal con  $m$  vectores.

Lo que se pretende es encontrar una matriz ortonormal  $\mathbf{P}$  donde  $\mathbf{P}\mathbf{X} = \mathbf{Y}$  de tal modo que la matriz  $\mathbf{C}_y = \frac{1}{N-1} \mathbf{Y}^T \mathbf{Y}$  es una matriz diagonal. Las filas de  $\mathbf{P}$  serán las *componentes principales* de  $\mathbf{X}$ . Reescribiendo  $\mathbf{C}_y$  en términos de  $\mathbf{P}$  se obtiene:

$$\begin{aligned}
\mathbf{C} &= \frac{1}{N-1} \mathbf{Y}\mathbf{Y}^T \\
&= \frac{1}{N-1} (\mathbf{P}\mathbf{X})(\mathbf{P}\mathbf{X})^T \\
&= \frac{1}{N-1} \mathbf{P}\mathbf{X}\mathbf{X}^T\mathbf{P}^T \\
&= \frac{1}{N-1} \mathbf{P}(\mathbf{X}\mathbf{X}^T)\mathbf{P}^T \\
&= \frac{1}{N-1} \mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{P}^T
\end{aligned}$$

donde  $\mathbf{A} = \mathbf{X}\mathbf{X}^T$  es una matriz simétrica. Del álgebra lineal, sabemos que una matriz simétrica es diagonalizada por la matriz ortogonal de sus eigenvectores. Para una matriz simétrica  $\mathbf{A}$  se tiene que:

$$\mathbf{A} = \mathbf{E}\mathbf{D}\mathbf{E}^T \quad (4.3)$$

donde  $\mathbf{D}$  es una matriz diagonal y  $\mathbf{E}$  es la matriz con los eigenvectores de  $\mathbf{A}$  acomodados en columnas.

La matriz  $\mathbf{A}$  tiene  $r \leq m$  vectores ortonormales, donde  $r$  es el rango de la matriz. Si escogemos a  $\mathbf{P}$  de tal modo que cada fila  $\vec{p}_i$  es un eigenvector de  $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ , entonces  $\mathbf{P} \equiv \mathbf{E}^T$ . Sustituyendo  $\mathbf{A} = \mathbf{P}\mathbf{D}\mathbf{P}^T$  en la ecuación 4.3 tenemos que:

$$\begin{aligned}
\mathbf{C}_y &= \frac{1}{N-1} \mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{P}^T \\
&= \frac{1}{N-1} \mathbf{P}(\mathbf{P}^T\mathbf{D}\mathbf{P})\mathbf{P}^T \\
&= \frac{1}{N-1} (\mathbf{P}\mathbf{P}^T)\mathbf{D}(\mathbf{P}\mathbf{P}^T)
\end{aligned}$$

Como para una matriz ortonormal, la inversa es igual a la transpuesta, tenemos que

$$\mathbf{C}_y = \frac{1}{N-1} (\mathbf{P}\mathbf{P}^{-1})\mathbf{D}(\mathbf{P}\mathbf{P}^{-1})$$

y finalmente

$$\mathbf{C}_y = \frac{1}{N-1} \mathbf{D}$$

que es una matriz diagonal.

En el caso del corrientímetro los datos son series de tiempo de la magnitud de la velocidad de la



corriente en sus distintas componentes a lo largo de posiciones verticales (tomadas a varias profundidades distintas).

### 4.2.2. Descomposición en Valores Singulares

En esta sección se describe el método de Descomposición en Valores Singulares o *SVD*. Este método está íntimamente relacionado con el *PCA*, al grado que los términos del *SVD* y del *PCA*, a pesar de ser distintos, son usados indistintamente en ciertas áreas.

Como hemos mencionado anteriormente, el método *SVD* es una herramienta para re-escribir los datos obtenidos de una medición en una nueva base ortonormal que maximiza la varianza en la dirección de los elementos de la base, haciendo posible discriminar los datos importantes del ruido en las mediciones. De nuevo el punto de partida es la matriz de datos  $\mathbf{X}$ , donde cada columna corresponde a un instante en el tiempo y cada fila contiene todas las mediciones de una variable dada realizadas a lo largo del muestreo [18].

El objetivo final de la *SVD* es escribir la matriz  $\mathbf{X}$  en la siguiente forma:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T,$$

donde  $\mathbf{U}$  es una matriz ortonormal de  $m \times m$ ,  $\mathbf{V}$  es una matriz ortonormal de  $n \times n$  (después será claro porqué se usa su transpuesta) y  $\Sigma$  es una matriz de  $m \times n$  con entradas no negativas en la diagonal y ceros en todas las entradas fuera de la diagonal. Un resultado general del álgebra lineal garantiza que toda matriz rectangular puede descomponerse de esta manera, sin embargo nosotros daremos una descripción precisa de las matrices  $\mathbf{X}$ ,  $\Sigma$  y  $\mathbf{V}$  que mostrará la relación entre la *SVD* y el método *PCA*.

Denotemos por  $\{\vec{v}_i\}_{i=1}^r$  al conjunto ortonormal de vectores propios de  $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$ , donde cada vector  $\vec{v}_i$  tiene valor un propio asociado<sup>1</sup>  $\lambda_i$ , donde todos los  $\lambda_i$  son reales no negativos puesto que  $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$  es una matriz simétrica. Esto nos permite definir los *valores singulares*  $\sigma_i$  como  $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$ , la raíz cuadrada positiva de los valores propios  $\lambda_i$ . Definamos también el conjunto de vectores  $\{\vec{u}_i\}_1^r$  donde  $\vec{u}$  está dado por

$$\vec{u}_i = \frac{1}{\sigma_i}\mathbf{X}\vec{v}_i,$$

del álgebra lineal se sigue que el conjunto  $\{\vec{u}_i\}$  es un conjunto ortonormal de vectores.

---

<sup>1</sup>Cabe mencionar que típicamente ordenaremos los vectores  $\vec{v}_i$  de tal forma que los valores propios correspondientes  $\lambda_i$  estén ordenados decrecientemente.

Con las definiciones anteriores estamos en condiciones de demostrar que  $\mathbf{X}$  puede ser descompuesta en la manera previamente descrita. Notemos que los vectores  $\vec{v}_i$  son vectores en un espacio  $m$ -dimensional y los vectores  $\vec{u}_i$  son elementos de un espacio  $n$ -dimensional. Completamos los conjuntos ortonormales  $\{\vec{v}_i\}_{i=1}^r$  y  $\{\vec{u}_i\}_{i=1}^r$  para formar bases ortonormales

$$\{\vec{v}_i\}_{i=1}^m \quad \text{y} \quad \{\vec{u}_i\}_{i=1}^n,$$

y definimos las matrices

$$\mathbf{V} = [\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_m] \quad \text{y} \quad \mathbf{U} = [\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n],$$

donde los vectores  $\vec{v}_i$  y  $\vec{u}_i$  son interpretados como columnas; puesto que las columnas de ambas matrices son vectores ortonormales se sigue que  $\mathbf{V}$  y  $\mathbf{U}$  son matrices ortogonales. Si además definimos la matriz  $\Sigma$  como la matriz con valor  $\sigma_i$  en la  $i$ -ésima entrada de la diagonal para  $1 \leq i \leq r$ , y ceros en todas las demás entradas, entonces es fácil ver que

$$\mathbf{XV} = \mathbf{U}\Sigma,$$

de donde se sigue que

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T$$

lo que prueba que  $\mathbf{X}$  puede ser descompuesta en la forma descrita [20].

### 4.3. Análisis de datos

Durante las campañas de investigación se recolectaron cuatro conjuntos de datos de corrientímetros fijos; de dos periodos temporales, en dos sitios distintos. El primer periodo fue del 8 de septiembre al 24 de octubre del 2006, mientras que el segundo periodo fue del 20 de diciembre del 2006 al 25 de enero del 2007. Los sitios en donde se colocaron los corrientímetros (de manera simultánea) fueron en los sitios denominados Gallega-Galleguilla (porque se colocó entre los arrecifes la Gallega y la Galleguilla), y b) Isla Verde-Anegada de Adentro (llamado así porque el sitio en donde fue colocado se encuentra entre Isla Verde y la Anegada de Adentro). Los sitios de monitoreo se muestran en la figura 4.3. De este modo los datos que en esta sección se analizan son: 1. Gallega-Galleguilla en el periodo de septiembre-octubre del 2006, 2. Isla Verde-Anegada de Adentro en el periodo de septiembre-octubre del 2006, 3. Gallega-Galleguilla en el periodo de diciembre del 2006-enero del 2007, y 4. Isla Verde-Anegada de Adentro en el

periodo de diciembre del 2006-enero del 2007.

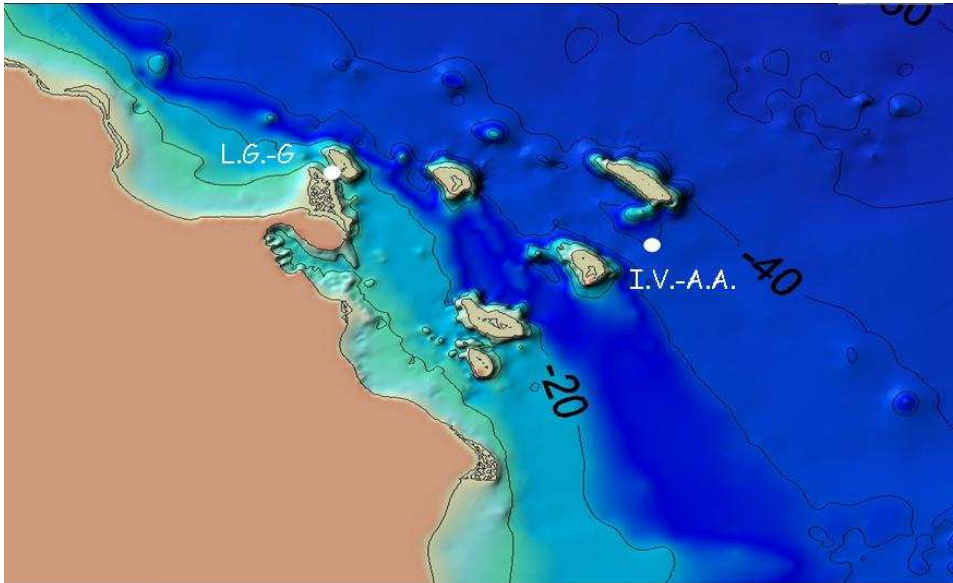


Figura 4.3: Sitios en donde se anclaron los corrientímetros: entre la Gallega y la Galleguilla (a 15m de profundidad) y entre Isla Verde y la Anegada de Adentro (a 30m de profundidad).

Los equipos tomaron datos a diferentes frecuencias. Dependiendo del equipo, se registraron datos cada 10, 15 o 20 minutos, pues cada uno de los corrientímetros estaba configurado de diferente manera. Las frecuencias de medición se muestran en la tabla 4.3.

Periodo	Ubicación	Frecuencia de medición (min)
Sept-Oct	GG	10
	IV AA	20
Dic-Ene	GG	10
	IV AA	15

Tabla 4.3: Frecuencias de toma de datos de cada uno de los corrientímetros.

El corrientímetro registra por separado las mediciones de la magnitud de la velocidad de la componente norte-sur, este-oeste, y arriba-abajo. La manera en que estas series de datos se despliegan, al extraerlas del equipo, es en forma de matriz, en donde cada entrada es la magnitud de la velocidad en esa componente para una profundidad y a un tiempo. Cada fila representa una celda, y cada columna es un tiempo en el que se hizo una medición.

Lo primero que se hizo con los datos fue visualizarlos, para ver si se observaba algún patrón. Para esto, se graficaron en un diagrama de dispersión los datos de la componente E-O contra los de la N-S, donde cada uno de estos estaba promediado en la columna vertical.

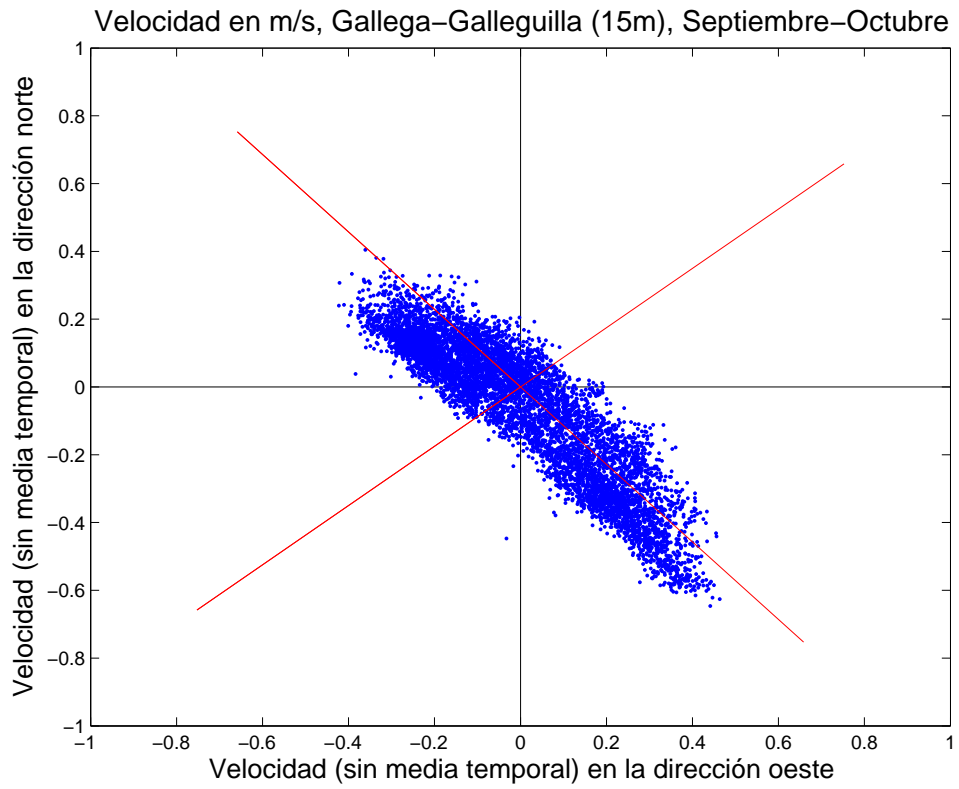


Figura 4.4: Variabilidad de la corriente respecto a la media para el sitio La Gallega-Galleguilla en el periodo de septiembre-octubre del 2006. El ángulo de la dirección preferencial respecto a la dirección norte es de 43.01 grados.

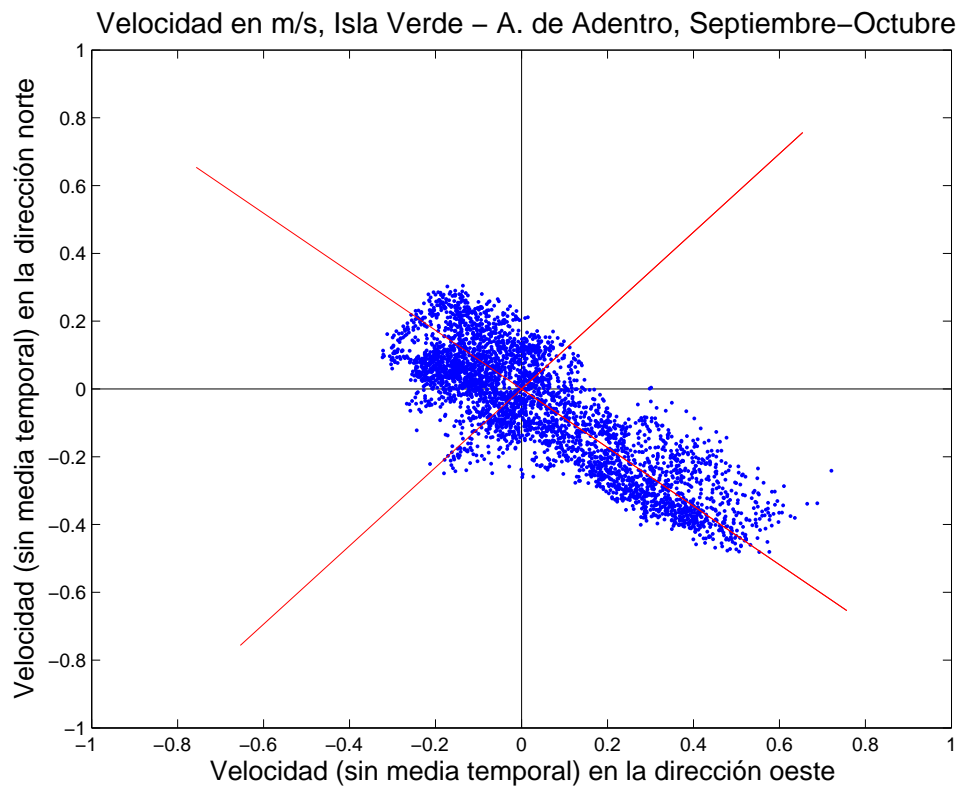


Figura 4.5: Variabilidad de la corriente respecto a la media para el sitio Isla Verde-A. de Adentro en el periodo de septiembre-octubre del 2006. El ángulo de la dirección preferencial respecto a la dirección norte es de 52.12 grados.

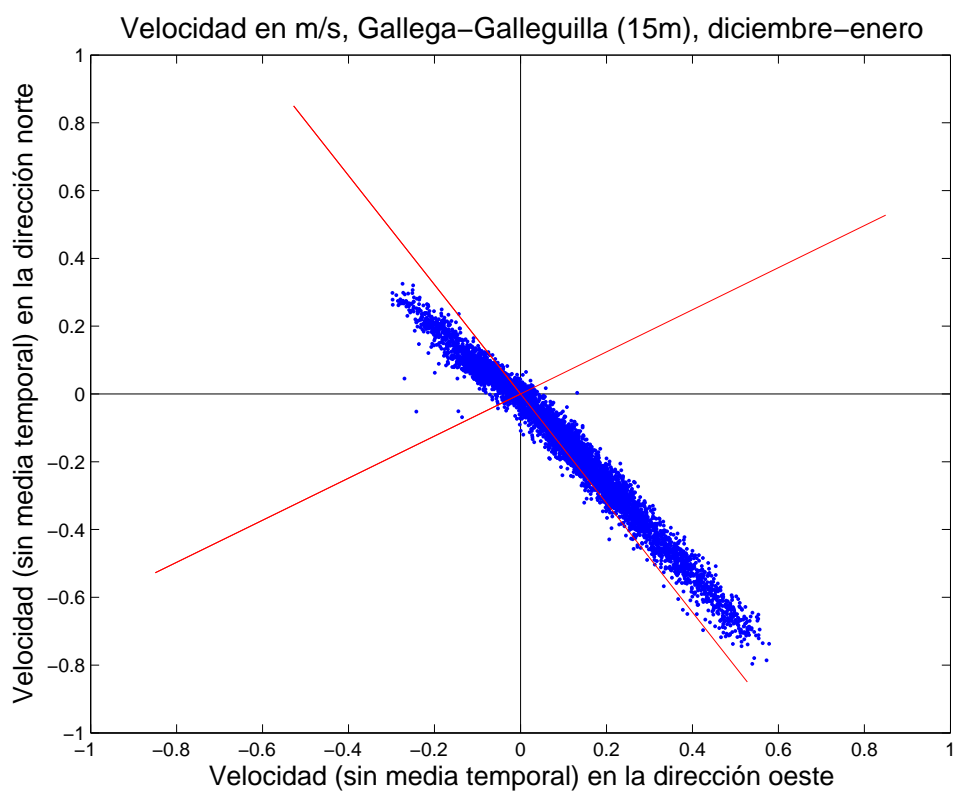


Figura 4.6: Variabilidad de la corriente respecto a la media para el sitio La Gallega-Galleguilla en el periodo de diciembre del 2006-enero del 2007. El ángulo de la dirección preferencial respecto a la dirección norte es de 42.15 grados.

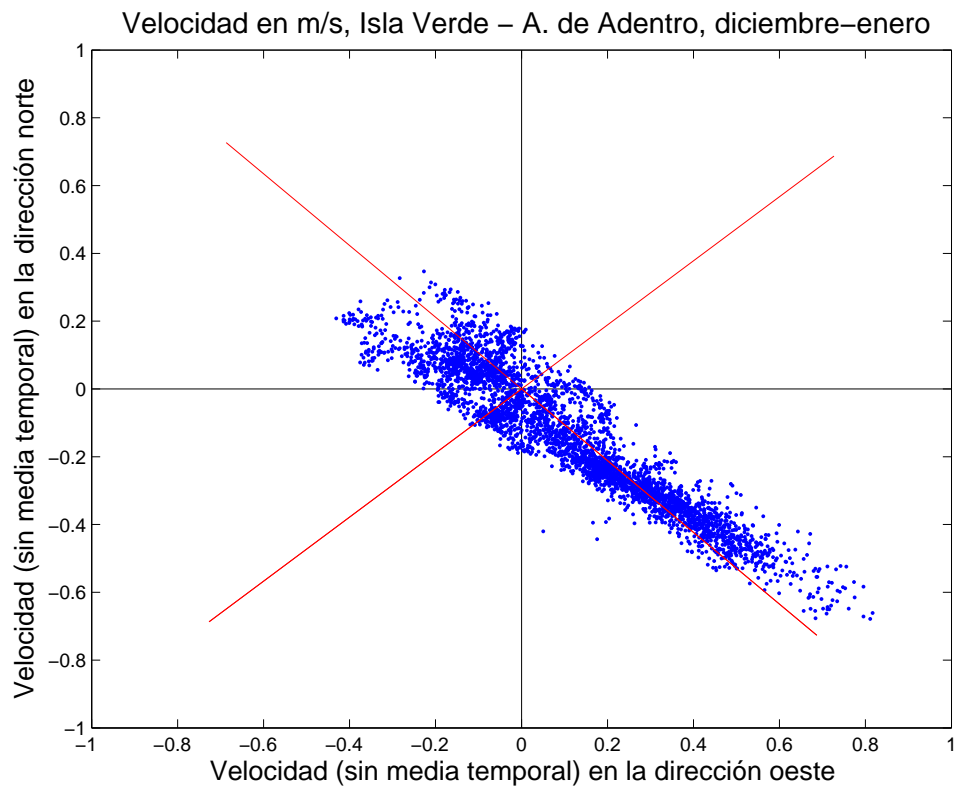


Figura 4.7: Variabilidad de la corriente respecto a la media para el sitio Isla Verde-A. de Adentro en el periodo de diciembre del 2006-enero del 2007. El ángulo de la dirección preferencial, respecto a la dirección norte en este caso es 53.88 grados.

Las figuras 4.4, 4.5, 4.6, y 4.7 muestran la variabilidad de la corriente, promediada verticalmente, respecto a la media temporal en el anclaje de La Gallega-Galleguilla e Isla Verde-Anegada de Adentro, en los dos periodos monitoreados. En estas figuras se puede observar una dirección predominante sureste noroeste, a la cual llamamos dirección principal (DP) y, como se verá posteriormente, representa el primer modo obtenido por el análisis de *FEO*. La dirección ortogonal a la DP le llamamos dirección secundaria (DS) y representa el segundo modo (función empírica ortogonal) obtenido por el análisis de *FEO*. El ángulo que tiene la dirección preferencial, respecto a la dirección norte es similar, en ambos sitios y en los distintos periodos monitoreados. También se ve que la magnitud de la velocidad en la DP está en el rango de 0 a  $1 \text{ m s}^{-1}$  en los cuatro casos.

De aquí se ve que hacer un análisis de *FEO* sobre los datos de cada corrientímetro tiene sentido, ya que hay una dirección predominante en donde se puede explicar la mayor parte de la varianza, y entonces, de este análisis se podrá extraer información acerca del comportamiento dinámico de las corrientes. Con el análisis de *FEO*, las mediciones de corriente quedan expresadas en términos de las componentes principal y secundaria (primer modo y segundo modo respectivamente), y con esto podemos analizar con más detalle la variabilidad de las corrientes en estas direcciones, en donde sabemos (por el análisis de *FEO*) que ocurre la mayor parte de esta variabilidad. Del análisis se obtuvo el porcentaje de varianza en cada dirección.

A continuación se hizo un análisis de *FEO* sobre los datos de los corrientímetros, del cual se pudo extraer información detallada acerca del comportamiento de las corrientes en la zona de estudio en los periodos monitoreados. Los resultados del análisis se explican en la siguiente sección. A los datos obtenidos en el análisis de *FEO*, se aplicaron distintos filtros digitales, por hora y cada 24 horas para filtrar señales de altas frecuencias y para observar la señal diurna. El análisis de corrientes se comparó con un análisis de los vientos (hecho por Julio Rojas) a lo largo de la costa en la zona de estudio. Para esto se buscaron bases de datos de vientos superficiales correspondientes a los meses de septiembre y octubre de 2006 para el primer periodo y diciembre de 2006 y enero de 2007 para el segundo. Se usaron dos bases de datos, una de ellas como referencia, está basada en datos medidos con una estación meteorológica de la Secretaría de Marina localizada en el municipio Antón Lizardo, también conocido como El Salado, y la otra datos de reanálisis de la NOAA [21].



## 4.4. Discusión

### 4.4.1. Periodo septiembre-octubre del 2006

Para el periodo de septiembre-octubre del 2006, en el sitio La Gallega-Galleguilla, se observa en la figura 4.8, la distribución vertical de la corriente en la DP desde la superficie hasta el fondo, donde la estructura vertical es casi barotrópica, con velocidades entre  $-0.80$  a  $0.80\text{ms}^{-1}$ . Debido a que se trata de una zona somera cercana a la costa, se observa poca estratificación, y la intensidad de la corriente prácticamente se conserva en toda la columna de agua. Las corrientes más intensas, que se mantienen durante periodos de mayor duración, van en dirección sureste y tienen una duración de varios días.

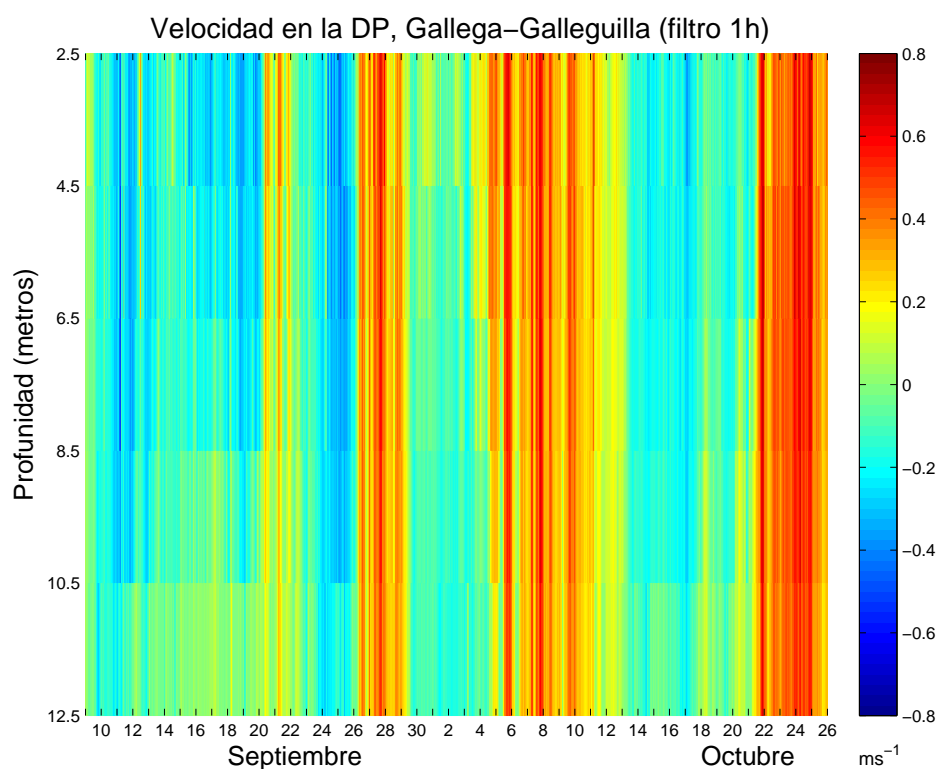


Figura 4.8: Distribución vertical de la corriente en la DP, en el anclaje la Gallega-Galleguilla, para los meses de septiembre y octubre del 2006. A los datos se les aplicó un filtro de medias móviles de una hora. Los valores positivos indican una dirección sureste.

En la figura 4.9 se observa el promedio vertical de la velocidad en la DP, para el mismo corrientímetro. Si comparamos con la figura 4.8, hay una correspondencia clara en los máximos de corriente. También se observa que hay un comportamiento definido en las corrientes, pues la señal es muy fuerte y el ruido es muy pequeño en comparación de esta. Esto se aprecia claramente, pues aunque se hayan filtrado las

altas y las bajas frecuencias en la figura 4.9 el comportamiento sigue siendo muy parecido en todos los casos. En esta dirección se explica el 78.4% de la variabilidad de la zona.

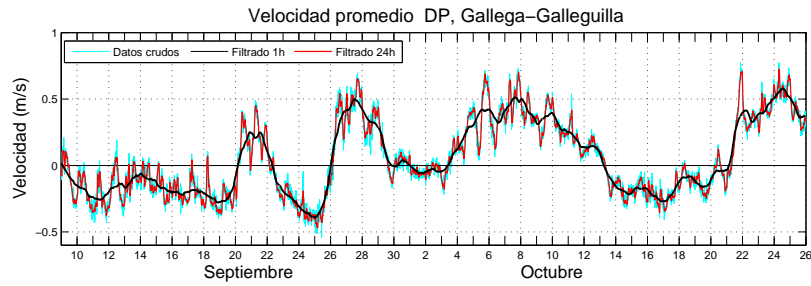


Figura 4.9: Serie de tiempo de la velocidad promedio en la DP en el anclaje la Gallega-Galleguilla, para los meses septiembre y octubre del 2006. Se observan los datos crudos, la señal filtrada con medias móviles por hora y por día. Los valores positivos indican una dirección sureste.

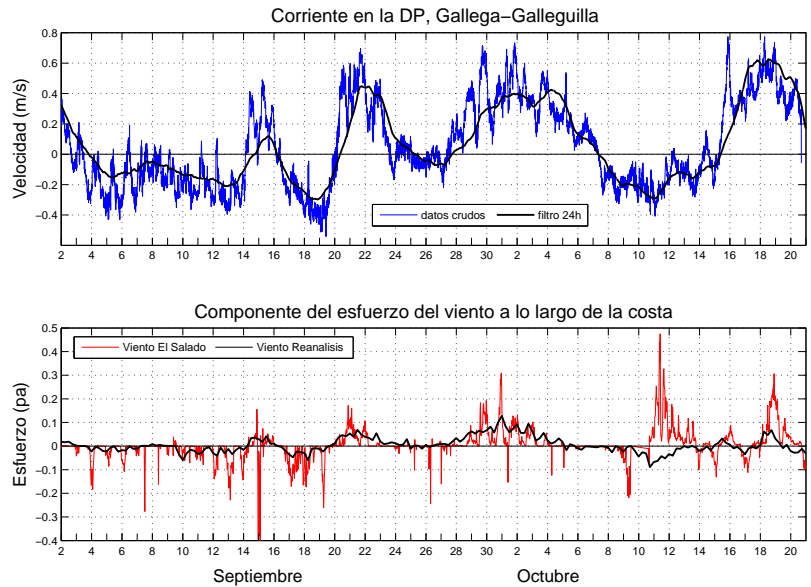


Figura 4.10: Componente del esfuerzo del viento paralela a la costa, y corriente promedio en la DP, periodo de septiembre-octubre del 2006, en Gallega-Galleguilla. Los valores positivos indican dirección sureste.

Si observamos los diferentes conjuntos del campo de viento a lo largo de la costa, medido para el mismo periodo de tiempo (figura 4.10), podemos observar que la componente del viento a lo largo de la costa coincide con la dirección de la corriente, lo que indica que es un forzamiento importante en la dinámica de la zona. Los máximos de corriente, y las señales dominantes coinciden con los eventos atmosféricos de escala sinóptica. La correlación entre la componente del esfuerzo del viento a lo largo de

la costa y las corrientes en la dirección principal se muestran en la figura 4.11, y los máximos se señalan en la tabla 4.11.

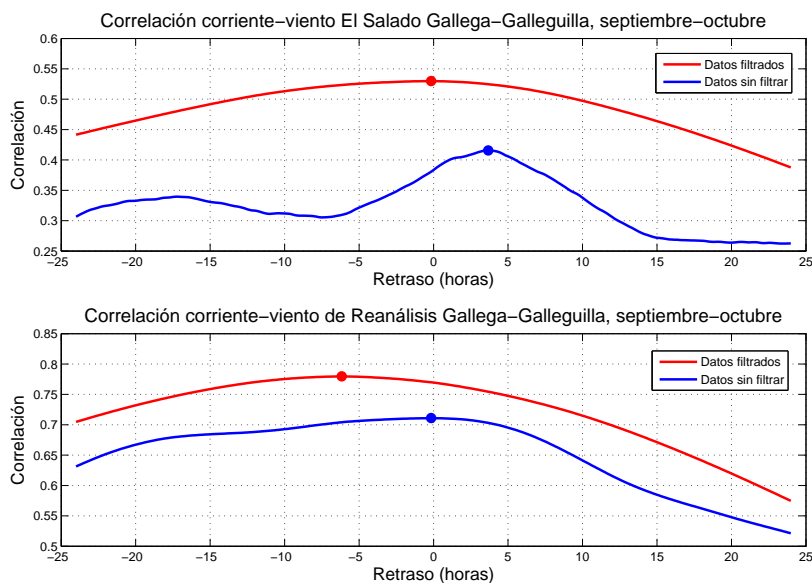


Figura 4.11: Correlación entre la componente del viento a lo largo de la costa y corrientes en la DP para el periodo septiembre-octubre del 2006, en Gallega-Galleguilla.

Datos de viento	Correlación	Retraso (h)
Reanálisis		
Filtro diario	0.77	-6.16
Datos crudos	0.71	-0.16
El Salado		
Filtro diario	0.53	-0.16
Datos crudos	0.41	-0.16

Tabla 4.11: Correlaciones máximas entre la componente del esfuerzo del viento paralela a la costa y la corriente en la DP, con sus respectivos retrasos, para el sitio La Gallega-Galleguilla en el periodo septiembre-octubre del 2006.

Por otra parte, en el segundo modo del análisis de *FEO*, que corresponde a la dirección suroeste-noreste, y a la cual llamamos *DS*, se puede observar que la velocidad a lo largo de esta componente es de mucho menor intensidad y que hay mucha variabilidad a lo largo de toda la columna de agua (figura 4.12). En esta dirección se explica el 21.5% de la variabilidad de la corriente. Antes de aplicar el filtro de medias móviles por hora, se observa mucho ruido. Después de filtrar las frecuencias altas, que pueden deberse a contribuciones aleatorias del aparato, no se observan fenómenos de baja frecuencia (es

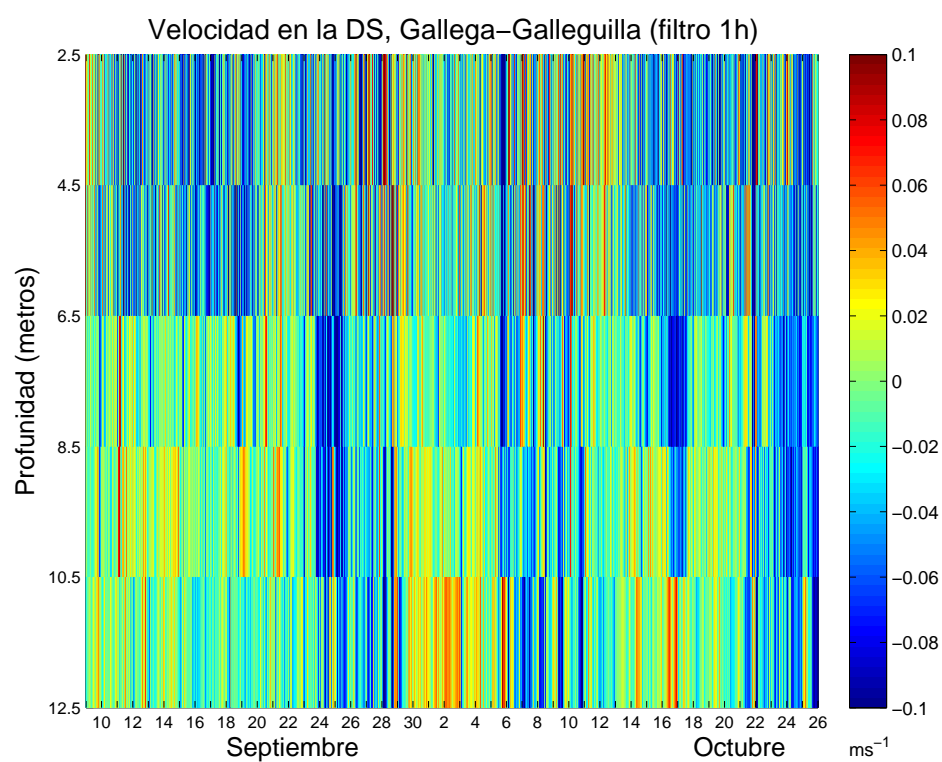


Figura 4.12: Distribución vertical de la corriente en la DS en el anclaje la Gallega-Galleguilla, para los meses septiembre y octubre del 2006. A los datos se les aplicó un filtro de medias móviles de una hora. Los valores positivos indican una dirección noreste.

decir, en periodos de varios días). La velocidad es más intensa en las capas superiores, hay una tendencia hacia el suroeste, pero no hay estructura definida en la vertical; sin embargo se pueden observar eventos de altas frecuencias, asociados a los efectos de la brisa marina y la marea entre otros; En esta dirección las corrientes van de  $-0.1$  a  $0.1 \text{ ms}^{-1}$ . La velocidad no cambia mucho en la vertical, para los periodos en donde la velocidad alcanza  $0.1 \text{ ms}^{-1}$ , pero en general no hay estructura vertical en esta dirección.

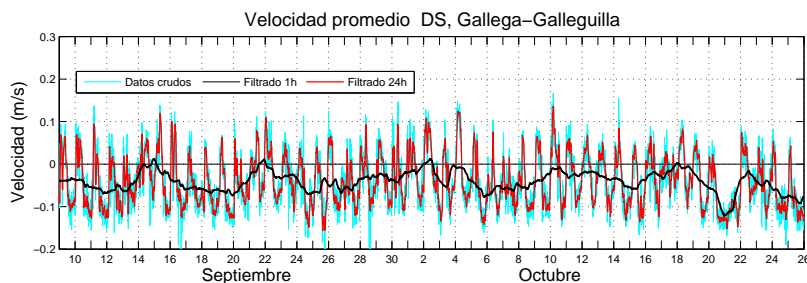


Figura 4.13: Serie de tiempo de la velocidad promedio en la DS en el anclaje de la Gallega-Galleguilla, para los meses septiembre y octubre del 2006. Se observan los datos crudos, la señal filtrada con medias móviles por hora y por día. Los valores positivos indican una dirección noreste.

Podemos observar la serie de tiempo de la velocidad en esta dirección, en la figura 4.13, en donde se ve que las magnitudes de las velocidades son pequeñas en comparación con la DP y que la componente diurna es dominante. También se observa que la magnitud del ruido es grande en comparación con la señal observada, pero con el filtro horario se elimina la mayor parte del ruido.

Para el mismo periodo temporal observamos la variabilidad de la corriente en la columna vertical para el anclaje de Isla Verde-A. de Adentro. La dirección predominante también es sureste-noroeste. En esta dirección se explica el 74.4% de la variabilidad de la corriente y se muestra en la figura 4.14.

La estructura vertical se ve estratificada a lo largo de la columna. Para los periodos de mayor intensidad la corriente es mayor en la superficie y disminuye gradualmente hacia el fondo, en donde se puede observar la influencia del fondo. Las velocidades oscilan entre  $-0.80$  y  $0.80 \text{ ms}^{-1}$ . Los máximos corresponden con los del sitio La Gallega-Galleguilla para este periodo, pero en este caso son más intensas y duran menos. Este sitio se encuentra más lejos de la costa y tiene la influencia de otras masas de agua que vienen del Golfo de México.

La figura 4.15, muestra que los picos de máxima velocidad corresponden con los días de máxima intensidad que se ven en la figura 4.14, pero la intensidad máxima promedio es menor que la intensidad máxima en la estructura vertical debido a la estratificación.

Si ahora observamos el campo de viento paralelo a la costa, en la figura 4.16 se observa que también

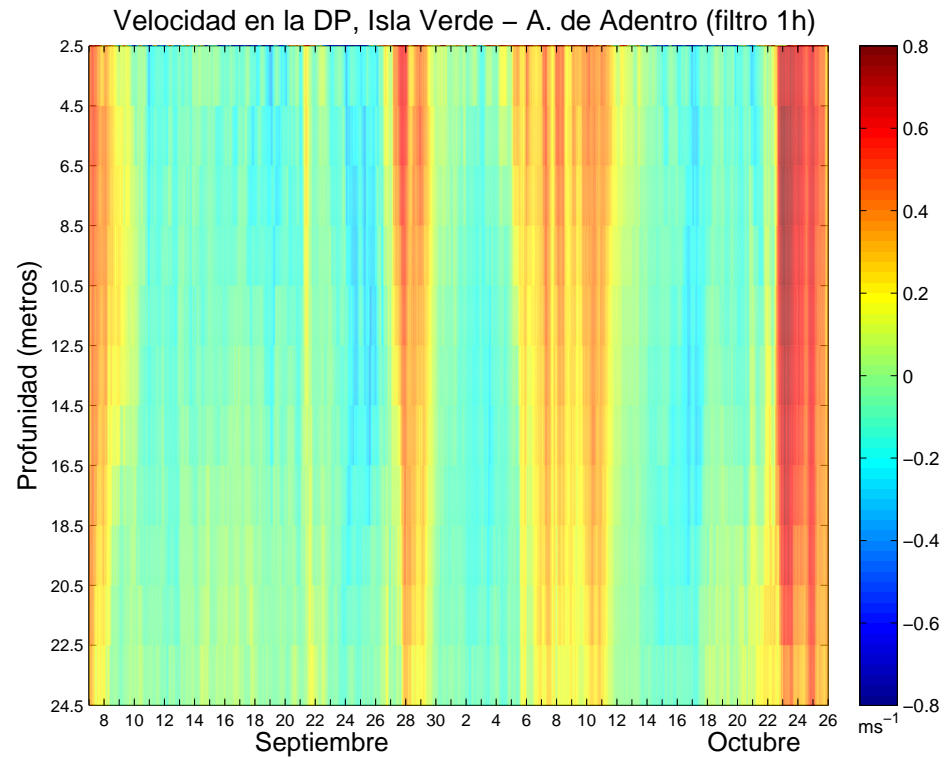


Figura 4.14: Distribución vertical de la corriente en la DP en el anclaje Isla Verde-A. de Adentro, para los meses septiembre y octubre del 2006. A los datos se les aplicó un filtro de medias móviles de una hora. Los valores positivos indican una dirección sureste.

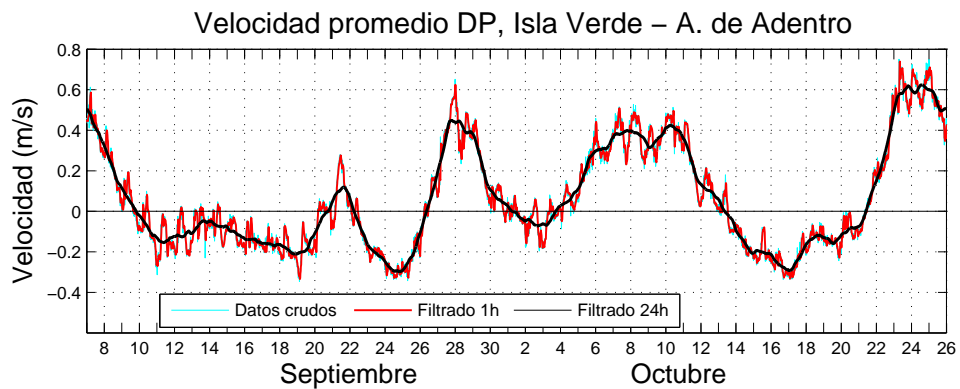


Figura 4.15: Serie de tiempo de la velocidad promedio en la DP en el anclaje de Isla Verde-A. de Adentro, para los meses septiembre y octubre del 2006. Se observan los datos crudos, la señal filtrada con medias móviles por hora y por día. Los valores positivos indican una dirección sureste.

las corrientes responden a los eventos de viento en la escala sinóptica . En general, las corrientes tienen la misma dirección que el viento y vientos intensos llevan a corrientes intensas. La correlación entre la corriente en la dirección principal y el esfuerzo del viento paralelo a la costa se observa en la figura 4.17, y los máximos de correlación se muestran en la tabla 4.17.

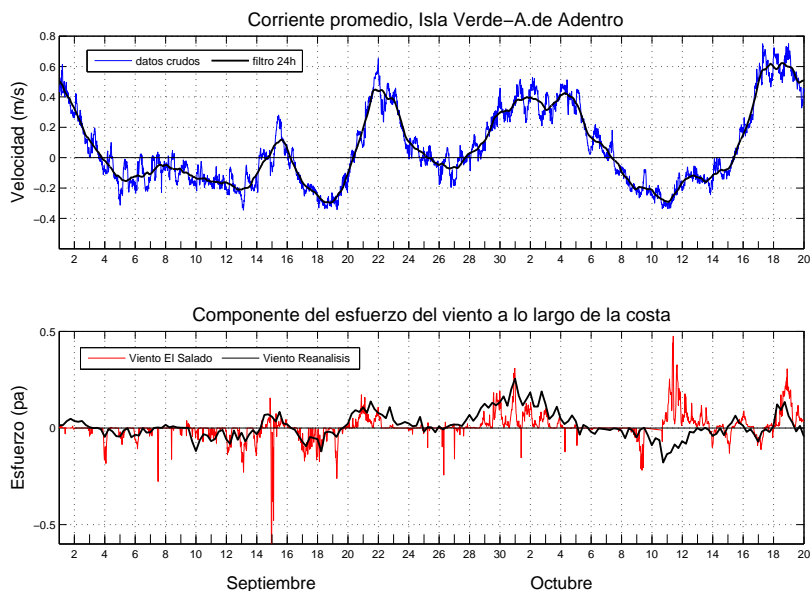


Figura 4.16: Componente de la componente del esfuerzo del viento paralela a la costa, y corriente promedio en la DP, para el periodo de septiembre-octubre del 2006, en Isla Verde-A. de Adentro. Los valores positivos indican una dirección sureste.

Datos de viento	Correlación	Retraso (h)
Reanálisis		
Filtro diario	0.44	-20
Datos crudos	0.31	-19
El Salado		
Filtro diario	0.62	-17.3
Datos crudos	0.67	-19

Tabla 4.17: Correlaciones máximas entre la componente del esfuerzo del viento paralela a la costa y la corriente en la DP con sus respectivos retrasos, para el sitio Isla Verde-A.de Adentro en el periodo septiembre-octubre 2006.

Las corrientes en la DS para el periodo en cuestión en el anclaje de Isla Verde-A. de Adentro, se observan en la figura 4.18, que muestra la estructura vertical en esta dirección. La DS nuevamente corresponde a una dirección noreste-suroeste, y se observa que la corriente tiene menor intensidad, que en la DP. Hay variabilidad en la columna de agua, y no se observa una estructura vertical bien definida,

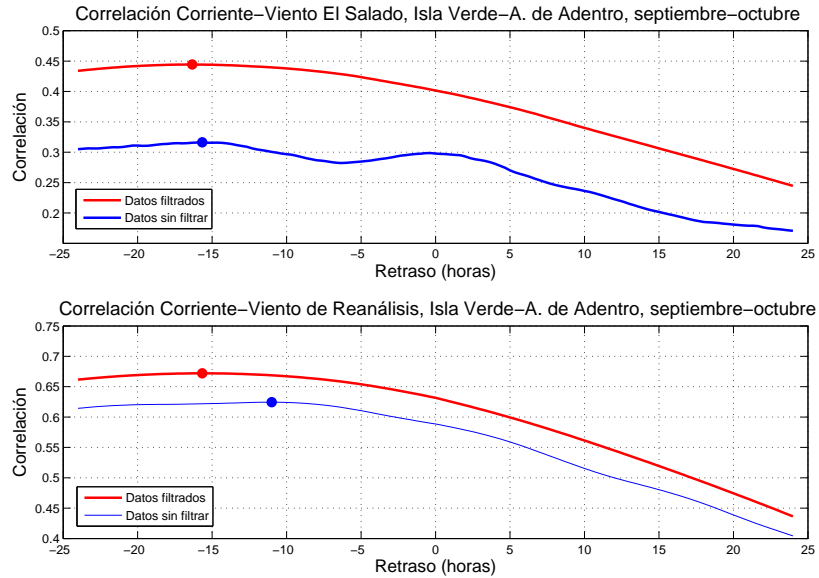


Figura 4.17: Correlación entre la componente del esfuerzo del viento a lo largo de la costa y corrientes para el periodo septiembre-octubre del 2006 en Isla Verde-Anegada de Adentro.

aunque se observa un patrón más definido que para la DS en la Gallega-Galleguilla. En esta dirección se explica el 25.5% de la variabilidad de la zona. La señal que se observa es, en general, de alta frecuencia, y no se observan patrones en la escala sinóptica. Nuevamente, la señal es de baja intensidad y, aunque se aplicó un filtro digital para quitar la señal de alta frecuencia, no se distingue muy claramente una señal de la corriente del ruido. Se observan eventos de alta frecuencia. En esta dirección las corrientes van de  $-0.3$  a  $0.3 \text{ ms}^{-1}$ , aunque la mayor parte del tiempo oscilan entre  $-0.05$  y  $0.05 \text{ ms}^{-1}$ .

.

.

En la figura 4.19 podemos observar la serie de tiempo de la velocidad en esta dirección para el anclaje Isla Verde-A. de Adentro, en la figura 4.19, en donde se distingue un poco más el comportamiento de las corrientes, y en donde se alcanzan a distinguir eventos que duran varios días. También se observa, como en el caso de la DS en el anclaje de la Gallega-Galleguilla, que la magnitud del ruido es grande en comparación con la señal observada.

La figura 4.20 muestra la velocidad promedio de la corriente en los dos anclajes para el periodo de septiembre-octubre del 2006. Se observa una alta correspondencia entre las corrientes de ambos sitios, en donde se observa que la corriente del anclaje en Isla Verde-Anegada de Adentro tiene un ligero retraso con



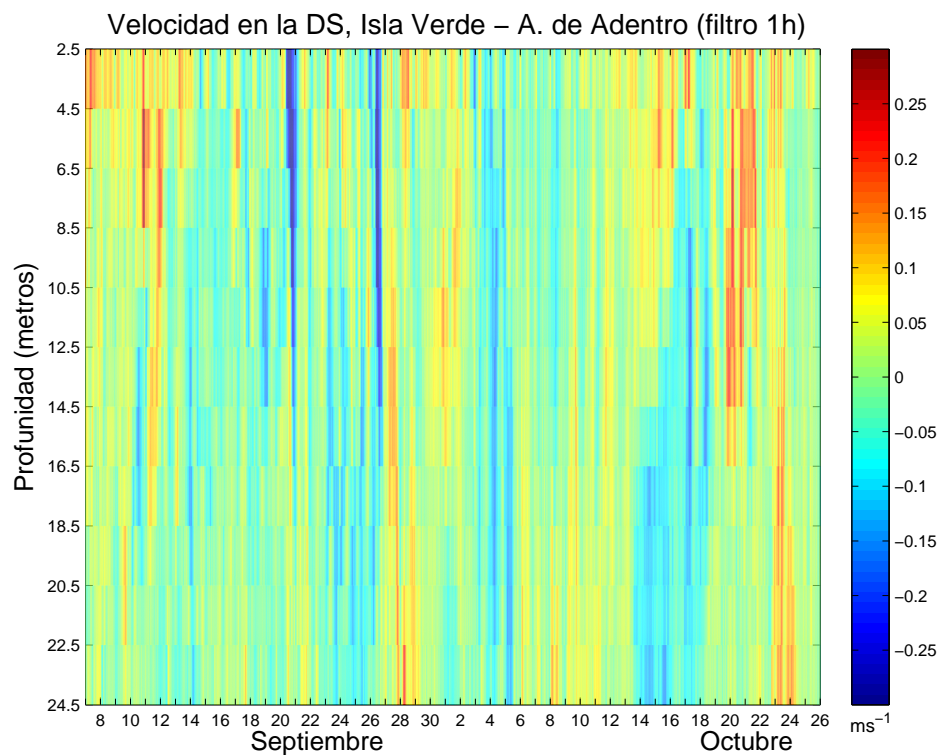


Figura 4.18: Distribución vertical de la corriente en la DS en el anclaje Isla Verde-A. de Adentro, para los meses septiembre y octubre del 2006. A los datos se les aplicó un filtro de medias móviles de una hora. Los valores positivos indican una dirección noreste.

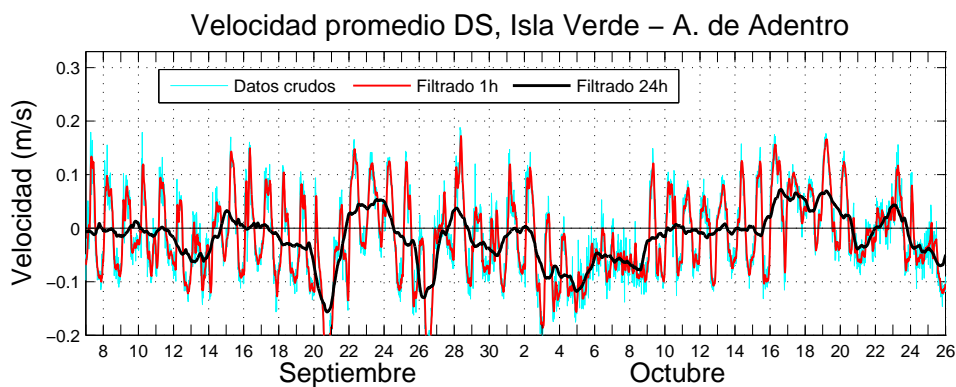


Figura 4.19: Serie de tiempo de la velocidad promedio en la DS, en el anclaje Isla Verde-A. de Adentro, para los meses septiembre y octubre del 2006. Se observan los datos crudos, la señal filtrada con medias móviles por hora y por día. Los valores positivos indican una dirección noreste.

respecto a la corriente en el anclaje de la Gallega-Galleguilla. Al calcular la correlación (figura 4.21), se obtuvo que la correspondencia alcanza su máximo para el filtro de medias móviles de 1h con un retraso de 5 horas y vale  $r = -0.92$  para el filtro de medias móviles de 24h con un retraso de 5 horas y vale  $r = -0.92$ . En este caso el retraso significa que el evento llega primero a La Gallega-Galleguilla, y posteriormente a Isla Verde-A. de Adentro.

El retraso, probablemente, se debe a que el anclaje en Gallega-Galleguilla está en aguas más someras (15 m, mientras que en Isla Verde la profundidad es de 30 m), y por tanto tiene menor inercia en la columna de agua, por lo cual responde más rápidamente a cambios en los vientos. En esta dirección, como se vió en las figuras 4.10 y 4.16, el factor principal de forzamiento es el viento y las corrientes están gobernadas principalmente por procesos atmosféricos de escala sinóptica.

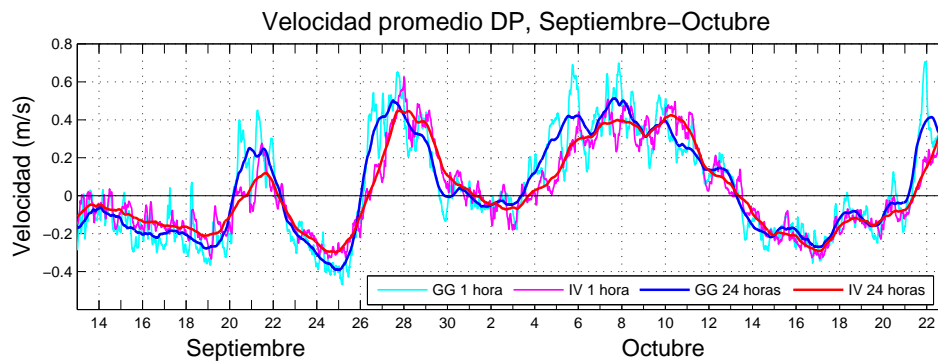


Figura 4.20: Series de tiempo de la velocidad promedio en la DP de los anclajes la Gallega-Galleguilla e Isla Verde-A. de Adentro, para los meses septiembre y octubre del 2006. Se observan la señal filtrada con medias móviles por hora y por día en cada caso. Los valores positivos indican una dirección sureste.

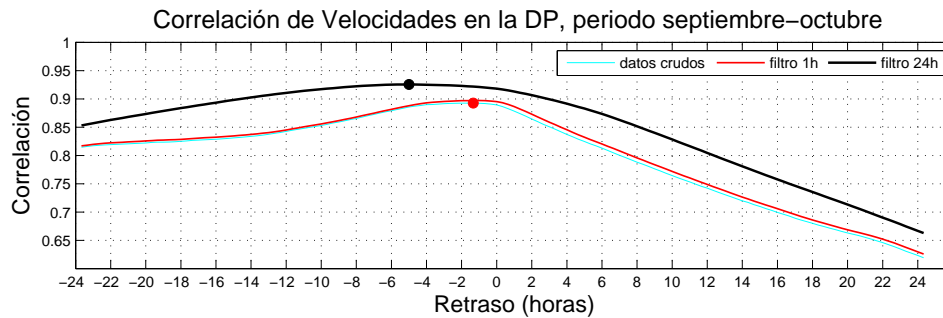


Figura 4.21: Correlación de la corriente promedio en la DP de los anclajes la Gallega-Galleguilla e Isla Verde-A. de Adentro, para los meses septiembre y octubre del 2006. Se observan las correlaciones entre la señal filtrada con medias móviles por hora y por día en cada caso.

Filtro	Correlación	Retraso (h)
1h	0.89	-1.3
24h	0.92	-5

Tabla 4.21: Correlaciones máximas entre los dos sitios para la DP en el periodo septiembre-octubre del 2006

Para la DS, no hay una correspondencia tan clara entre los dos sitios, a primera vista. En la figura 4.22 se muestran las velocidades promedio en los dos anclajes para este periodo. Al calcular la correlación (figura 4.23) se observa que las correlaciones son menores que las de la DP; en esta dirección los procesos que gobiernan las corrientes no son necesariamente los mismos, y no es tan claro cuáles son.

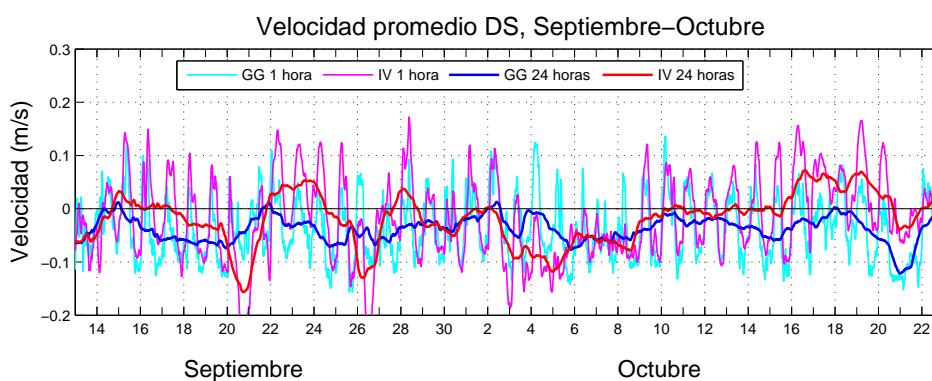


Figura 4.22: Series de tiempo de la velocidad promedio en la DS, los anclajes la Gallega-Galleguilla e Isla Verde-A. de Adentro, para los meses septiembre-octubre del 2006. Se observan la señal filtrada con medias móviles por hora y por día en cada caso. Los valores positivos indican una dirección noreste.

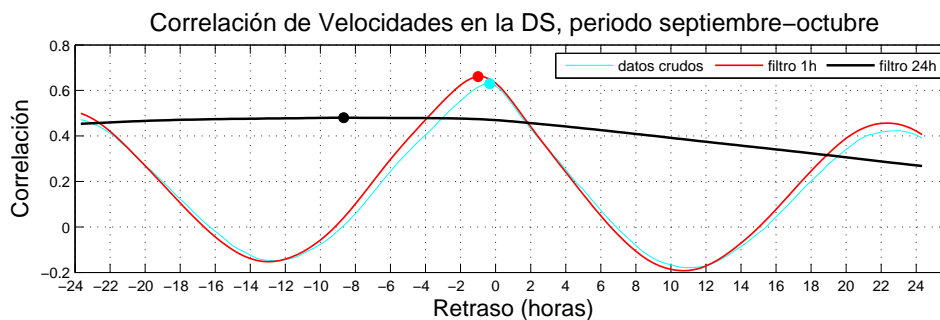


Figura 4.23: Series de tiempo de la velocidad promedio en la DS, los anclajes la Gallega-Galleguilla e Isla Verde-A. de Adentro, para los meses septiembre y octubre del 2006. Se observan la señal filtrada con medias móviles por hora y por día en cada caso. Los valores positivos indican una dirección noreste.

Filtro	Correlación	Retraso (h)
1h	0.66	-1
24h	0.48	-8.6

Tabla 4.23: Correlaciones máximas entre los dos sitios para la DS en el periodo septiembre-octubre del 2006

#### 4.4.2. Periodo diciembre del 2006-enero del 2007

Las corrientes para el periodo de diciembre del 2006-enero del 2007, en el sitio La Gallega-Galleguilla, se observan en la figura 4.24, la distribución vertical de la corriente en la DP, donde la estructura vertical es casi barotrópica, con velocidades entre  $-0.50$  a  $0.80 \text{ ms}^{-1}$ . Las corrientes intensas se mantienen de la superficie hasta el fondo, se observa una estructura vertical casi uniforme. Esto coincide con lo que se observó en el periodo anterior para este sitio. Nuevamente las corrientes más intensas se mantienen durante periodos de varios días; las corrientes más intensas van en dirección sureste.

En la figura 4.25, se observa el promedio de la velocidad a lo largo de la columna de agua en la DP. Si comparamos con la figura 4.24, hay una correspondencia clara en los máximos de corriente y, como no se observa estratificación, el promedio coincide con el valor de la corriente en toda la columna. También se observa que hay un comportamiento definido en las corrientes, y que el ruido es despreciable en comparación con la magnitud de la señal. En esta dirección se explica el 77.9% de la variabilidad de la zona.

Si observamos el campo de viento a lo largo de la costa cercano al sitio, medido para el mismo periodo de tiempo (figura 4.26), podemos observar que la componente del viento a lo largo de la costa coincide con la dirección de la corriente, lo que indica que es un forzamiento importante en la dinámica de la zona. Además la correlación vuelve a ser alta como se ve en la figura 4.27. Los máximos se muestran en la tabla 4.27 y vuelven a ser altos, como en el caso anterior.

Por otra parte, en la DS, que corresponde a la dirección suroeste-noreste, se puede observar que las corrientes son de mucho menor intensidad y que hay mucha variabilidad a lo largo de toda la columna de agua (figura 4.28). En esta dirección se explica el 22.0% de la variabilidad de la zona. Después de filtrar la señal se observan algunas señales de baja frecuencia (en periodos de horas para eliminar las altas frecuencias producidas por el ruido); también se pueden observar eventos de altas frecuencias. No hay una estructura vertical clara y la magnitud del ruido es comparable con la magnitud de la señal,

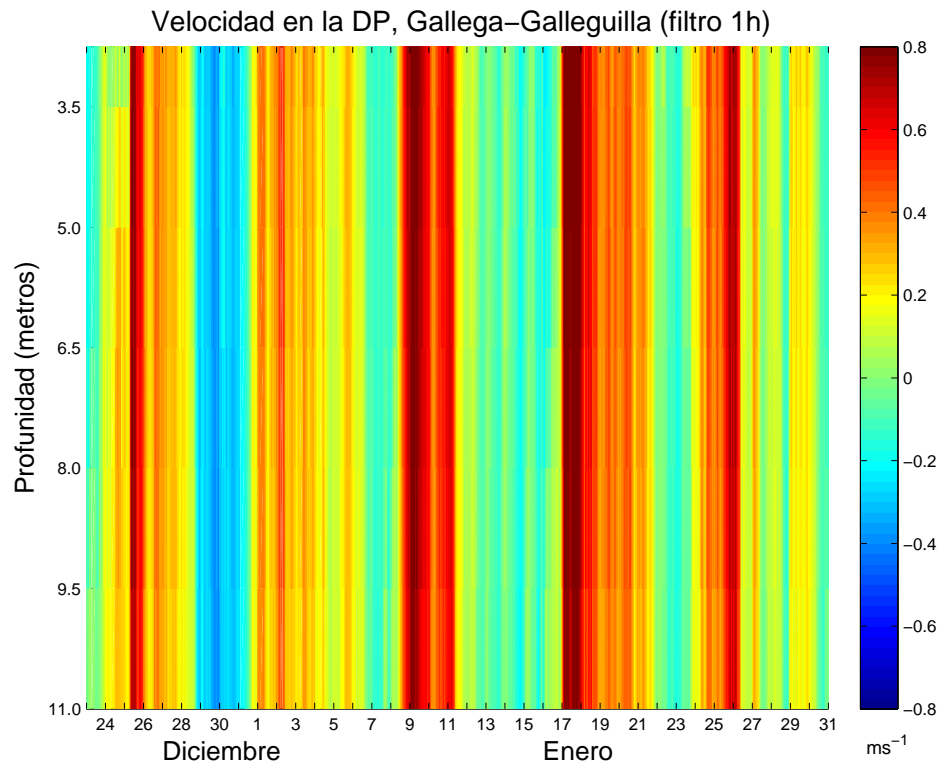


Figura 4.24: Distribución vertical de la corriente en la DP, en el anclaje la Gallega-Galleguilla, para el periodo diciembre del 2006-enero del 2007. A los datos se les aplicó un filtro de medias móviles de una hora. Los valores positivos indican una dirección sureste.

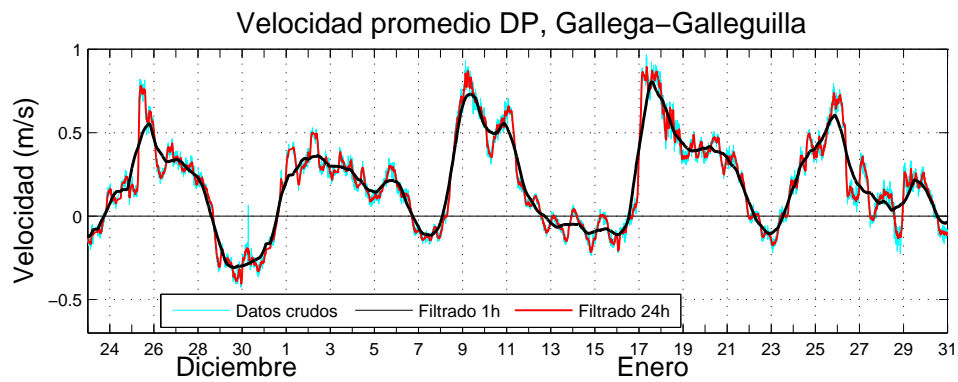


Figura 4.25: Serie de tiempo de la velocidad promedio en la DP en el anclaje la Gallega-Galleguilla, para los meses diciembre del 2006-enero del 2007. Se observan los datos crudos, la señal filtrada con medias móviles por hora y por día. Los valores positivos indican una dirección sureste.

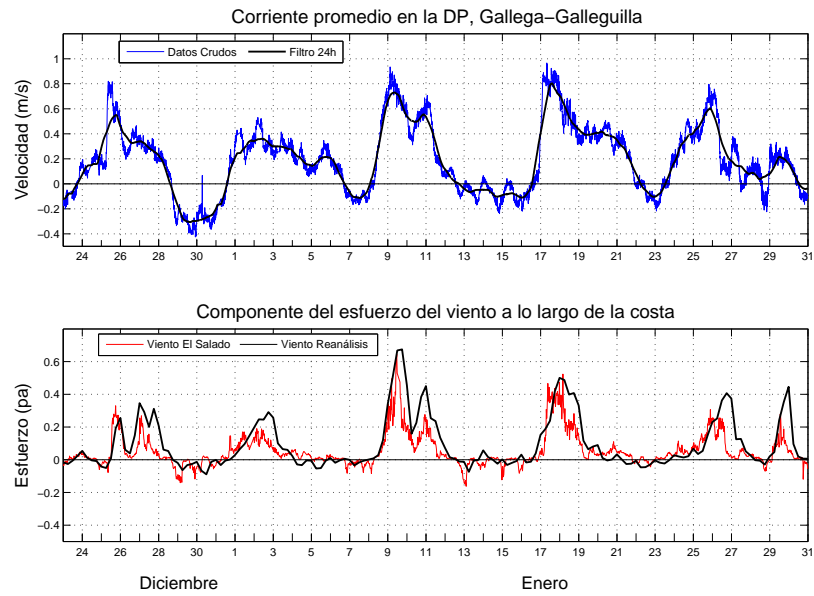


Figura 4.26: Componente del esfuerzo del viento paralela a la costa, y corriente promedio en la DP, periodo de diciembre del 2006-enero del 2007, en el anclaje de la Gallega-Galleguilla. Los valores positivos indican una dirección sureste.

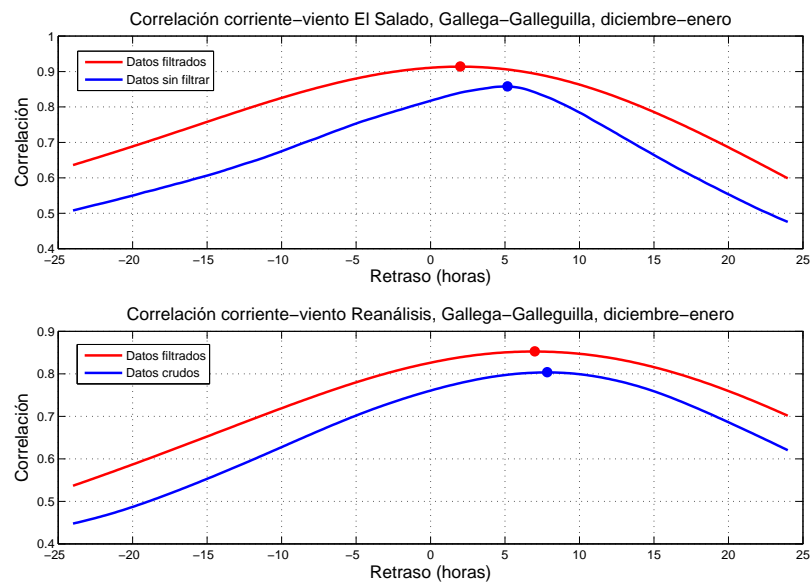


Figura 4.27: Correlación entre el esfuerzo del viento paralela a la costa y corrientes en la DP para el periodo diciembre del 2006-enero del 2007 en Gallega-Galleguilla.

Datos de viento	Correlación	Retraso (h)
Reanálisis		
Filtro diario	0.85	-7.1
Datos crudos	0.80	-8
El Salado		
Filtro diario	0.91	-2.66
Datos crudos	0.85	-5.3

Tabla 4.27: Correlaciones máximas entre la componente del esfuerzo del viento paralela a la costa y la corriente en la DP con sus respectivos retrasos, para el sitio La Gallega-Galleguilla en el periodo diciembre del 2006-enero del 2007.

por lo que es difícil extraer información. En esta dirección las corrientes van de  $-0.1$  a  $0.1 \text{ ms}^{-1}$  y las velocidades más altas son siempre hacia el noreste.

Podemos observar la serie de tiempo de la velocidad en esta dirección, en la figura 4.29, en donde se ve que las magnitudes de las velocidades son pequeñas y que hay una gran variabilidad en la corriente. De la serie de datos crudos se observa que hay una gran cantidad de ruido y que es del orden de magnitud de la señal.

Para el mismo periodo, en el anclaje de Isla Verde-A. de Adentro, observamos la variabilidad de la corriente a lo largo de la columna vertical, como se ve en la figura 4.30. La DP se conserva hacia el sureste noroeste. En esta dirección se explica el 73.3% de la variabilidad de la zona.

En la figura 4.30 ya no se ve estratificada la corriente, como se observó en el mismo anclaje en el periodo de septiembre-octubre del 2006. En los meses de invierno los vientos son más intensos mezclando el agua hasta mayores profundidades, esto hace que haya una menor estratificación en esos meses. Las velocidades oscilan entre  $-0.40$  a  $0.80 \text{ ms}^{-1}$ . Las corrientes intensas tienen duración es de varios días.

Si observamos la figura 4.31, que muestra la velocidad promedio a lo largo de la columna de agua, vemos que los picos de máxima velocidad corresponden con los días de máxima intensidad que se ven en la figura 4.30, y que la intensidad promedio corresponde a la velocidad que se observa a lo largo de toda la columna de agua.

Si ahora observamos el campo de viento paralelo a la costa, que se grafica junto con las corrientes en la DP (figura 4.32), se observa que también las corrientes en este periodo responden a los eventos de viento en la escala sinóptica. En general, las corrientes tienen la misma dirección que el viento y vientos intensos llevan a corrientes intensas. La correlación entre la corriente en la dirección principal y el esfuerzo del viento tangente a la costa se muestra en la figura 4.33 y sus valores máximos en la tabla 4.33.

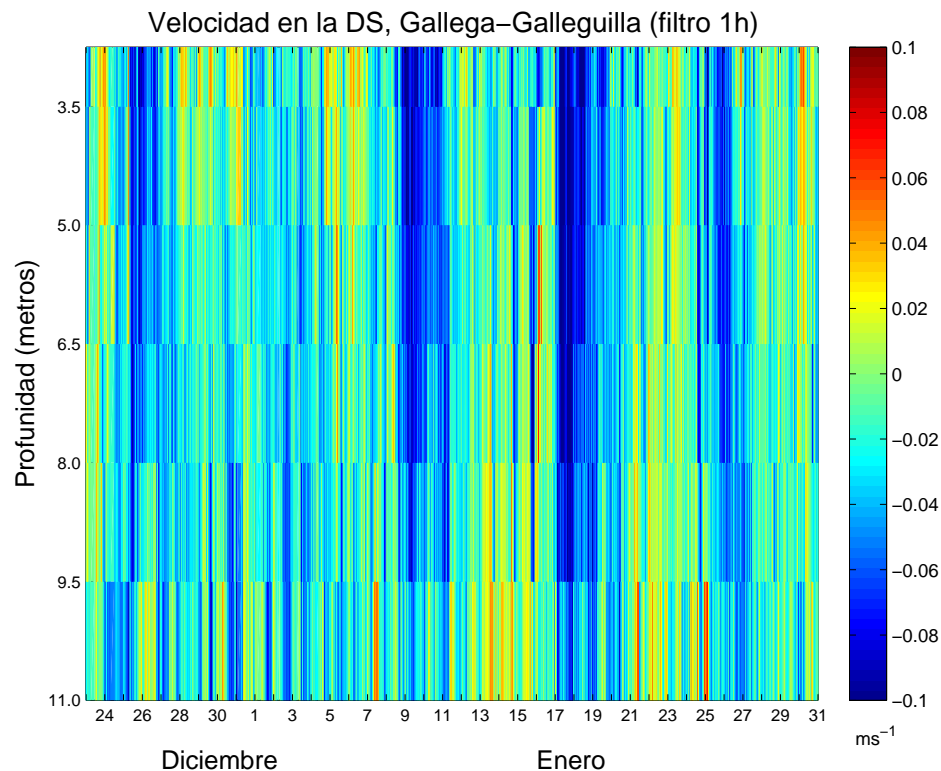


Figura 4.28: Distribución vertical de la corriente en la DS en el anclaje la Gallega-Galleguilla, para el periodo de diciembre del 2006-enero del 2007. A los datos se les aplicó un filtro de medias móviles de una hora. Los valores positivos indican una dirección noreste.

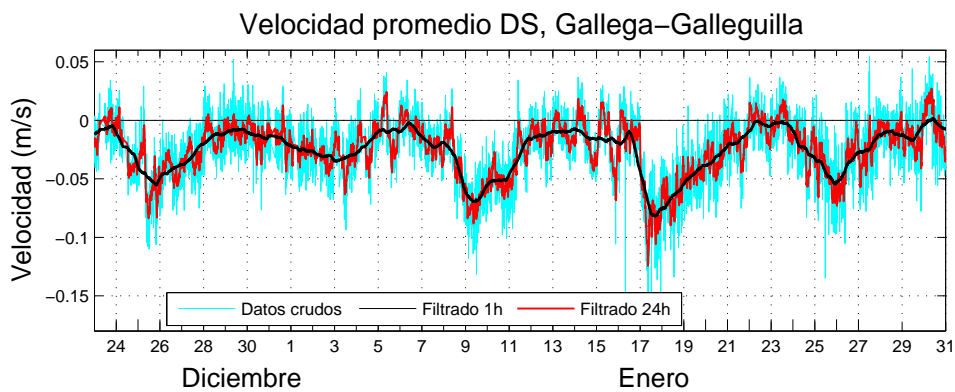


Figura 4.29: Serie de tiempo de la velocidad promedio en la DS en el anclaje de la Gallega-Galleguilla, para el periodo de diciembre del 2006-enero del 2007. Se observan los datos crudos, la señal filtrada con medias móviles por hora y por día. Los valores positivos indican una dirección noreste.



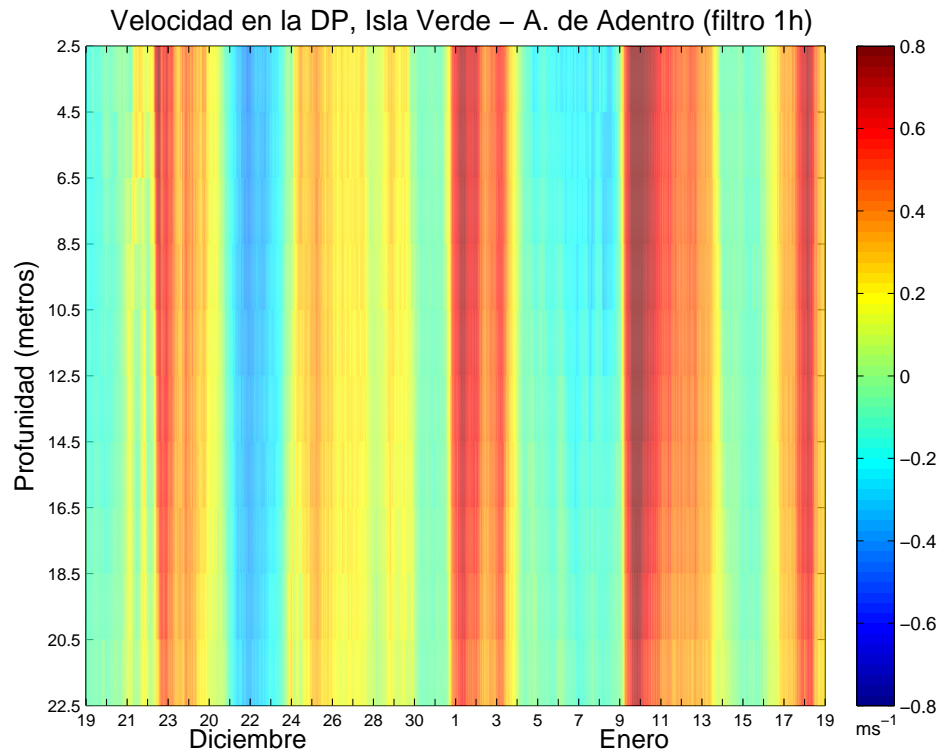


Figura 4.30: Distribución vertical de la corriente en la DP en el anclaje Isla Verde-A. de Adentro, para el periodo de diciembre del 2006-enero del 2007. A los datos se les aplicó un filtro de medias móviles de una hora. Los valores positivos indican una dirección sureste.

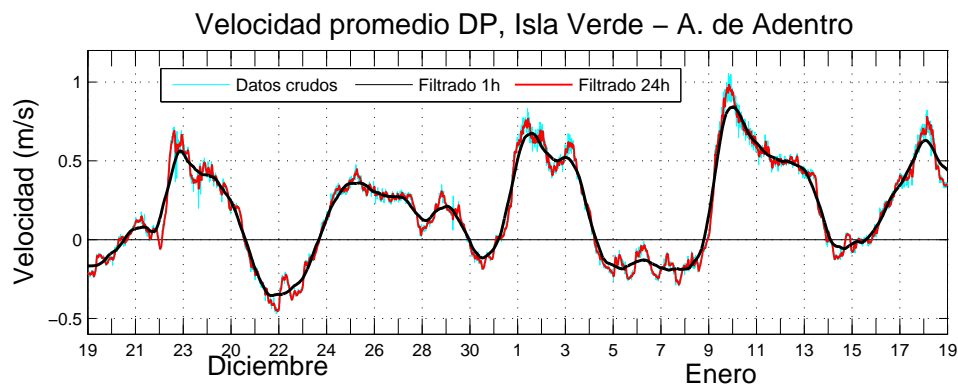


Figura 4.31: Serie de tiempo de la velocidad promedio en la DP en el anclaje de la Gallega-Galleguilla, para el periodo de diciembre del 2006-enero del 2007. Se observan los datos crudos, la señal filtrada con medias móviles por hora y por día. Los valores positivos indican una dirección sureste.

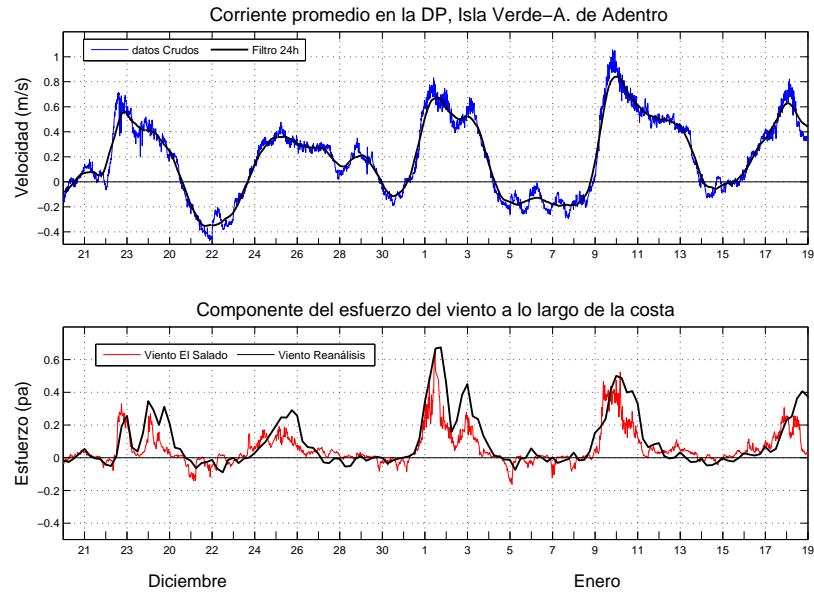


Figura 4.32: Componente del esfuerzo del viento paralela a la costa, y corriente promedio en la DP, periodo de diciembre del 2006-enero del 2007, en Isla Verde-A. de Adentro. Los valores positivos indican una dirección sureste.

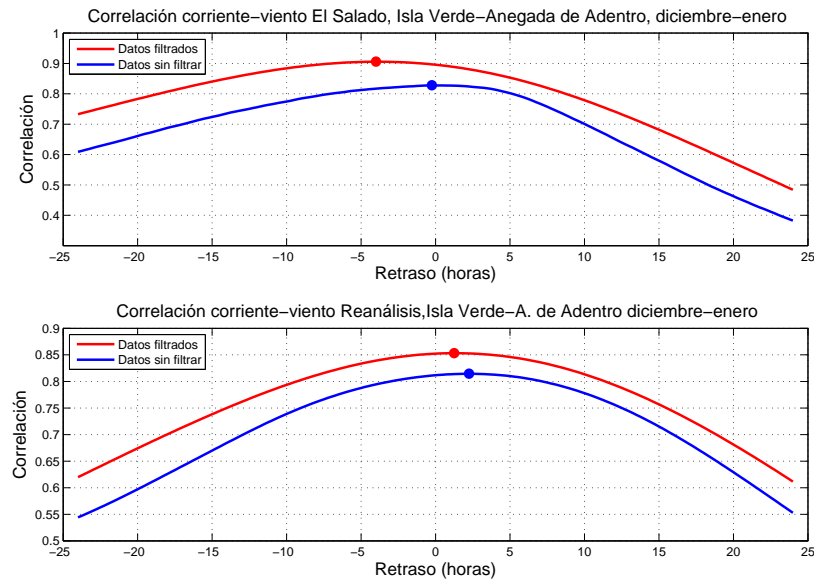


Figura 4.33: Correlación entre la el esfuerzo del viento a lo largo de la costa y corrientes en la DP para el periodo diciembre del 2006-enero del 2007 en Isla Verde-Anegada de Adentro.

Datos de viento	Correlación	Retraso (h)
Reanálisis		
Filtro diario	0.81	-6.3
Datos crudos	0.85	-7
El Salado		
Filtro diario	0.9	-10.5
Datos crudos	0.82	-8

Tabla 4.33: Correlaciones máximas entre la componente del esfuerzo del viento paralela a la costa y la corriente en la DP, con sus respectivos retrasos, para el sitio Isla Verde-A.de Adentro en el periodo diciembre del 2006-enero del 2007.

La corriente en la DS, en el anclaje de Isla Verde-A. de Adentro, para el periodo de diciembre del 2006-enero del 2007, se observa en la figura 4.34. La DS nuevamente corresponde a una dirección noreste-suroeste, y se observa que la corriente tiene una intensidad pequeña en comparación con la DP. Hay una gran variabilidad en la columna de agua, y no se observa una estructura vertical bien definida. En esta dirección se explica el 26.6 % de la variabilidad de la zona. La señal que se observa es de alta frecuencia, y no se observan patrones en periodos de varios días. Nuevamente, la señal es de baja intensidad y no se distingue muy claramente una señal definida producida por la corriente del ruido. En esta dirección las corrientes van de  $-0.15$  a  $0.15 \text{ m s}^{-1}$ .

Podemos observar la serie de tiempo de la velocidad en esta dirección para el anclaje Isla Verde-A. de Adentro en la figura 4.31, en donde se distingue un poco más en comportamiento de las corrientes que para el anclaje la Gallega-Galleguilla, y en donde se alcanzan a distinguir eventos que duran varios días. Se observa nuevamente que la magnitud del ruido es muy grande en comparación con la señal observada.

La figura 4.36 muestra la velocidad promedio de la corriente en los dos anclajes juntos para el periodo de diciembre del 2006-enero del 2007. Se observa una correspondencia alta entre las corrientes de ambos sitios, en donde, y se observa que la corriente del anclaje en Isla Verde-A. de Adentro tiene un ligero retraso con respecto a la corriente en el anclaje de la Gallega-Galleguilla. Las correlaciones máximas con sus respectivos retrasos se observan en la figura 4.37. En esta dirección, nuevamente, el factor principal de forzamiento es el viento, y las corrientes están gobernadas sobre todo por procesos atmosféricos de escala sinóptica. La correlación es muy alta en este periodo, tanto para los datos filtrados por hora como para los filtrados por día.

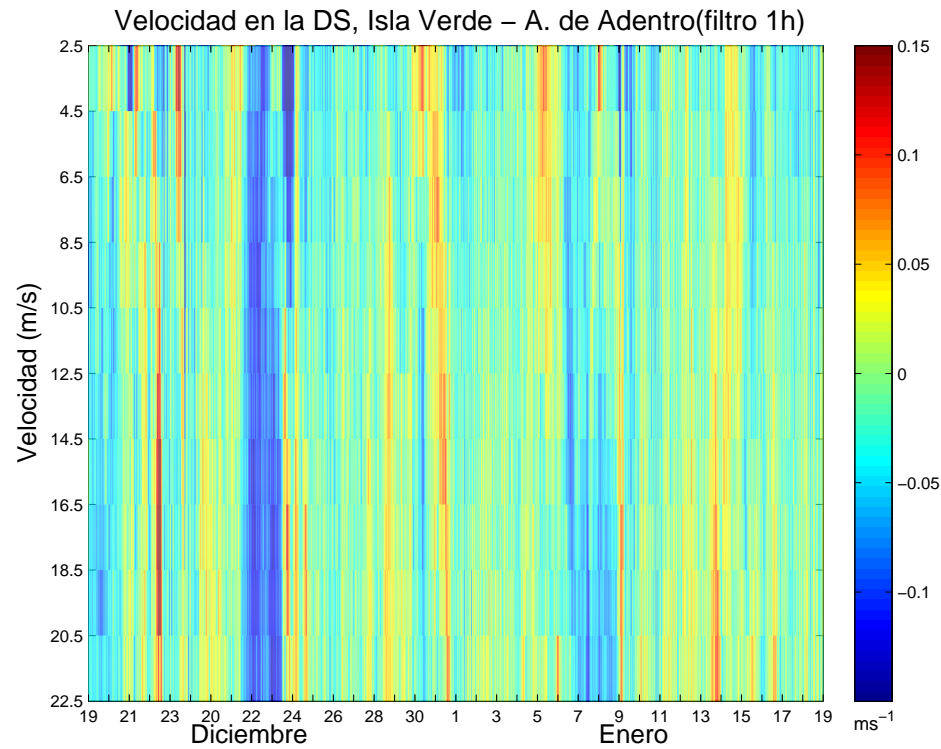


Figura 4.34: Distribución vertical de la corriente en la DS en el anclaje Isla Verde-A. de Adentro, para el periodo de diciembre del 2006-enero del 2007. A los datos se les aplicó un filtro de medias móviles de una hora. Los valores positivos indican una dirección noreste.

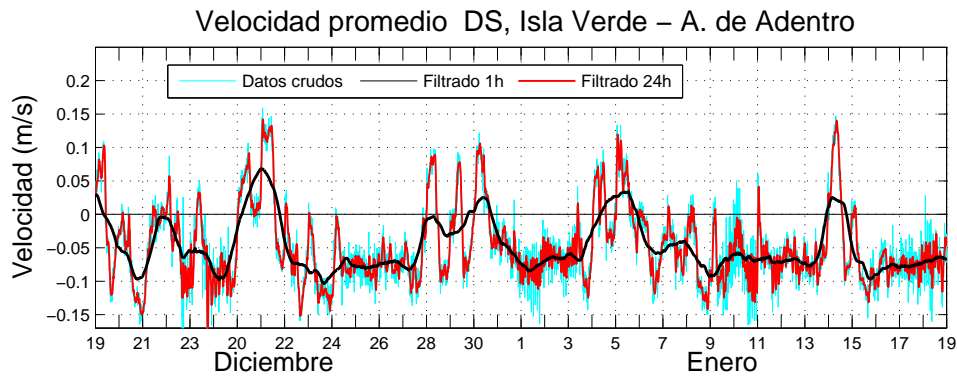


Figura 4.35: Serie de tiempo de la velocidad promedio en la DS, en el anclaje Isla Verde-A. de Adentro, para el periodo de diciembre del 2006-enero del 2007. Se observan los datos crudos, la señal filtrada con medias móviles por hora y por día. Los valores positivos indican una dirección noreste.

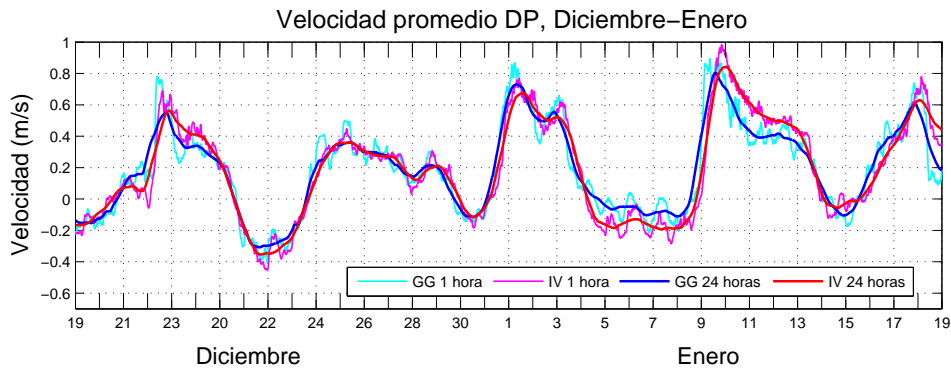


Figura 4.36: Series de tiempo de la velocidad promedio en la DP de los anclajes la Gallega-Galleguilla e Isla Verde-A. de Adentro, para los meses diciembre del 2006-enero del 2007. Se observan la señal filtrada con medias móviles por hora y por día en cada caso. Los valores positivos indican una dirección sureste.

Para la DS, también se puede observar una ligera correspondencia. En la figura 4.38 se muestran las velocidades promedio en los dos anclajes para este periodo. En la figura 4.39 se muestra la correlación de la velocidad promedio en los dos sitio, y los máximos correspondientes se muestran en la tabla 4.39. Como para el periodo anterior, se observa que en esta dirección los procesos que gobiernan las corrientes no son necesariamente los mismos pero en este caso hay una mayor correlación.

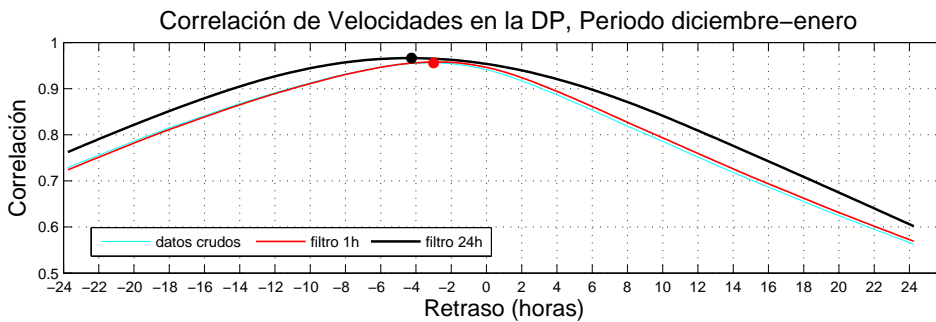


Figura 4.37: Correlación de la corriente promedio en la DP de los anclajes la Gallega-Galleguilla e Isla Verde-A. de Adentro, para los meses diciembre del 2006-enero del 2007. Se observan las correlaciones entre la señal filtrada con medias móviles por hora y por día en cada caso.

Filtro	Correlación	Retraso (h)
1h	0.95	-3.25
24h	0.96	-1.7

Tabla 4.37: Correlaciones máximas entre los dos sitios para la DP en el periodo diciembre del 2006-enero del 2007

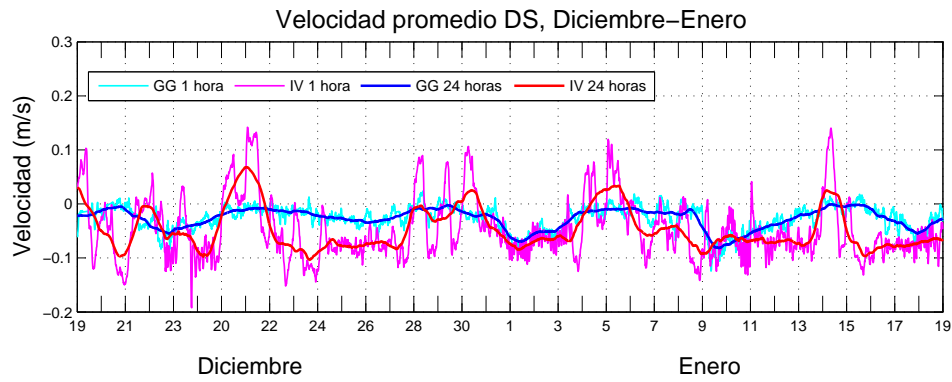


Figura 4.38: Series de tiempo de la velocidad promedio en la DS, los anclajes la Gallega-Galleguilla e Isla Verde-A. de Adentro, para los meses diciembre del 2006-enero del 2007. Se observan la señal filtrada con medias móviles por hora y por día en cada caso. Los valores positivos indican una dirección noreste.

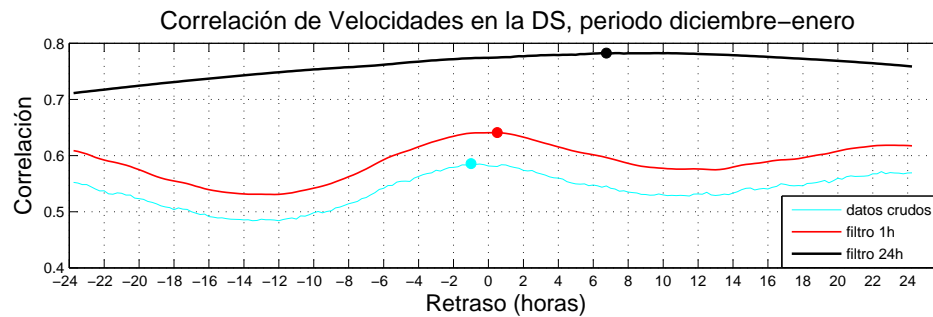


Figura 4.39: Correlación de la corriente promedio en la DS de los anclajes la Gallega-Galleguilla e Isla Verde-A. de Adentro, para los meses diciembre del 2006-enero del 2007. Se observan las correlaciones entre la señal filtrada con medias móviles por hora y por día en cada caso.

Filtro	Correlación	Retraso (h)
1h	0.64	-6.5
24h	0.78	-12.7

Tabla 4.39: Correlaciones máximas entre los dos sitios para la DS en el periodo diciembre del 2006-enero del 2007.

## Capítulo 5

# Modelación de la dispersión de contaminantes

La naturaleza es muy compleja y, en general, las ecuaciones con las que se describe no tienen solución analítica. Un modelo numérico es un conjunto de ecuaciones matemáticas cuya solución requiere de métodos numéricos. Los modelos de circulación oceánica son modelos numéricos que permiten efectuar pronósticos de las condiciones oceanográficas [12].

Los modelos oceánicos se clasifican de acuerdo a varios criterios, por ejemplo:

- Los diferentes procesos físicos. Los modelos pueden ser hidrodinámicos y/o termodinámicos. También pueden incluir procesos fisicoquímicos y condiciones biológicas.
- La condición de la superficie del océano.
- El número de grados de libertad vertical que maneja.
- Si es un modelo global, o sólo de una región.
- Si modela una zona costera o una zona de océano profundo.
- Si utiliza la condición hidrostática.
- Si es barotrópico o baroclínico.

## 5.1. Modelo

Para estudiar la dispersión de los contaminantes, se usó un modelo barotrópico (de dos dimensiones sin variaciones en la vertical) de ecuaciones primitivas con topografía realista. Como se observó en el análisis de las corrientes, casi no hay variaciones en la columna vertical de agua, por lo que suponer movimiento barotrópico para la circulación de la zona de estudio resulta en una buena aproximación. También se suponen temperatura y salinidad constantes, lo cual implica densidad constante. Esta es una suposición válida pues se trata de una zona somera.

Las ecuaciones son:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla \cdot (\nu u) + Qu + fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + F_u, \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla \cdot (\nu v) + Qv - fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + F_v, \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g, \quad (5.3)$$

$$\nabla \cdot \nu = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial z} = Q, \quad (5.4)$$

$$F = \text{cte}, \quad (5.5)$$

$$S = \text{cte}, \quad (5.6)$$

$$\rho = \text{cte}. \quad (5.7)$$

En donde cada variable representa la siguiente cantidad:



$Q$	Término de fujo de volumen.
$x, y, z$	Coordenadas de dirección.
$t$	Tiempo.
$\nu = (u, v)$	Vector velocidad en dos dimensiones.
$T$	Temperatura potencial
$S$	Salinidad.
$\eta$	Elevación del nivel del mar.
$f$	Parámetro de Coriolis.
$p$	Presión.
$\rho$	Densidad del agua.
$g$	Aceleración de la gravedad.
$F_u, F_v$	Términos de mezcla horizontal para las ecuaciones de momento.

Debido a que las corrientes en la zona están principalmente gobernadas por procesos atmosféricos, el esfuerzo del viento es un factor muy importante. Este se toma en cuenta al generar el campo de velocidades promedio, sobre el cual se libera el contaminante. La zona de estudio se puede considerar casi geostrófica, pero debido a que es una zona poco profunda, en el caso tridimensional se deben de tomar en cuenta los términos de fricción causados por el viento y el fondo. En la ecuación de advección-difusión, domina el término advectivo.

## 5.2. Interpretación de los resultados del modelo

Para estudiar la dispersión de contaminantes, se usó una ecuación de advección-difusión, en donde el término difusivo se aproximó con un término aleatorio. La dispersión de contaminantes está representada por el desplazamiento de partículas. Se realizaron cuatro experimentos numéricos en los que se analiza la dispersión de partículas sembradas en la zona de la descarga de Arroyo el Cable. Cada hora se sembraron quince partículas y son advectadas por el campo de velocidad promedio para las condiciones de los meses de enero, abril, julio y octubre. La advección se realiza sobre el campo de velocidad generado por la simulación numérica por medio de un Runge-Kutta de segundo orden. En las figuras se representa el campo medio de velocidad para cada uno de esos meses y el desplazamiento de las partículas se puede estimar a partir de su color debido a que este cambia cada 24 horas.

En enero, la corriente se desplaza hacia el canal entre La Gallega y Galleguilla y posteriormente se

desplaza hacia el sur, pasando enfrente del puerto cuatro días después y de la zona de playas entre cinco y seis días después de que fueron vertidas, como se observa en la figura 5.1. El desplazamiento promedio de la corriente coincide con lo que se observó en las mediciones, pues el campo promedio de velocidades indica que el agua se transporta hacia el sureste.

Estos periodos de tiempo pueden considerarse intermedios en términos de la contaminación pues los microorganismos (enterococos y *E. coli*, por ejemplo) mueren, en su mayor parte dos o tres días después de entrar en contacto con el agua de mar. Otros contaminantes, como el exceso de materia orgánica y nutrientes requieren un análisis más detallado, pero los resultados sugieren que pueden tener un fuerte impacto negativo en los arrecifes cercanos a la costa y en particular en la Gallega-Galleguilla.

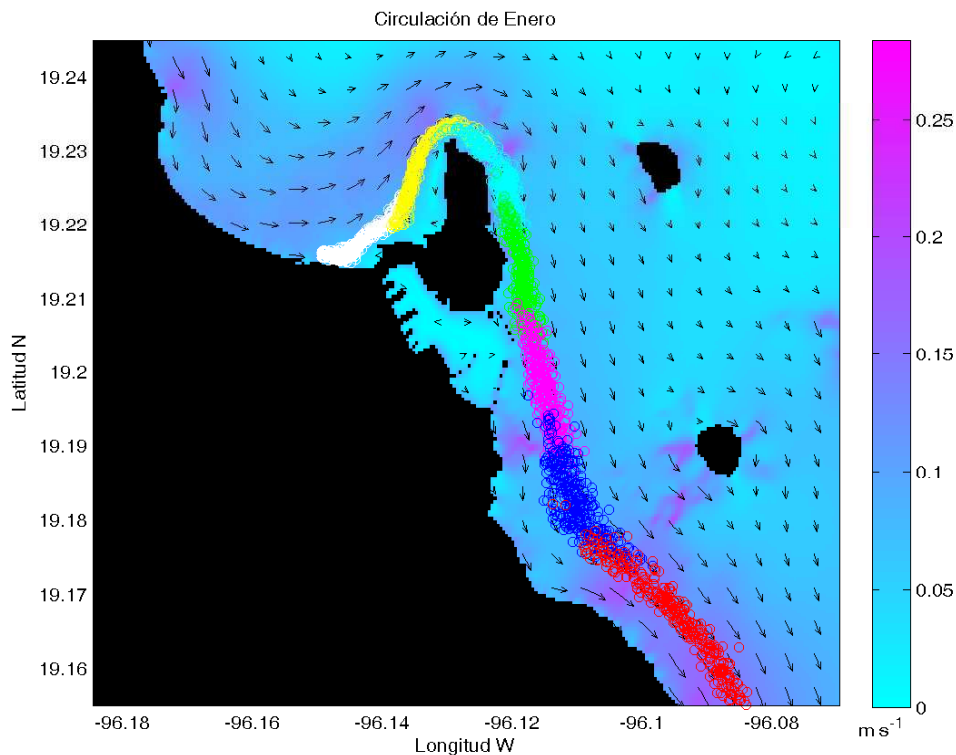


Figura 5.1: Resultados de la corrida del modelo para el mes de enero. Se observa la trayectoria de partículas sembradas en el Arroyo el Cable. Los colores de las partículas cambian cada 24 horas.

En los meses de abril y julio que se pueden caracterizar como primavera y verano, (ver figuras 5.1 y 5.3) las corrientes modeladas son mucho más débiles que las de octubre y enero y su dirección es hacia el noroeste, tendiendo a mantenerse junto a la costa. En el mes de abril se observa una convergencia que genera un filamento hacia afuera de la costa en la parte media de playa norte. Para estos meses no

se obtuvieron datos de corriente que pudieran validar estos resultados. En términos de contaminación, debido a que el contaminante se queda estancado, la contaminación en estos periodos debe de ser alta en Playa Norte, pero no alcanza a llegar al puerto ni a la zona de playas.

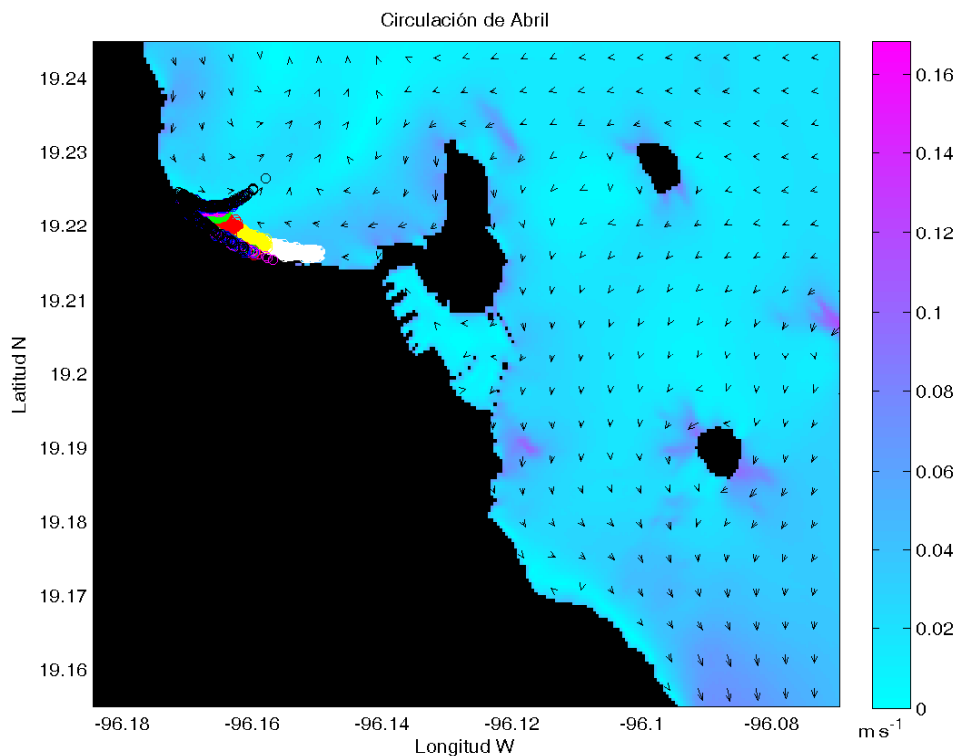


Figura 5.2: Resultados de la corrida del modelo para el mes de abril. Se observa la trayectoria de partículas sembradas en el Arroyo el Cable. Los colores de las partículas cambian cada 24 horas.

En octubre se observa el mismo comportamiento que en enero, y nuevamente encontramos que las partículas, después de varios días se transportan a lo largo de la costa, en dirección sureste, lo cual coincide con lo que se encontró para las corrientes en este periodo.

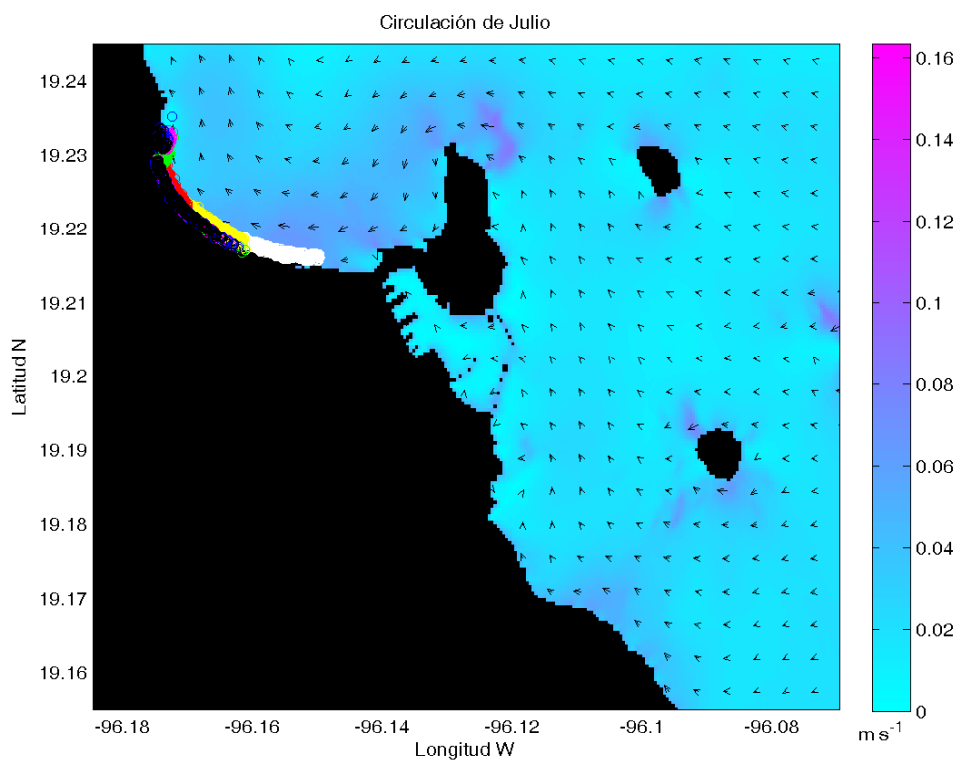


Figura 5.3: Resultados de la corrida del modelo para el mes de julio. Se observa la trayectoria de partículas sembradas en el Arroyo el Cable. Los colores de las partículas cambian cada 24 horas.

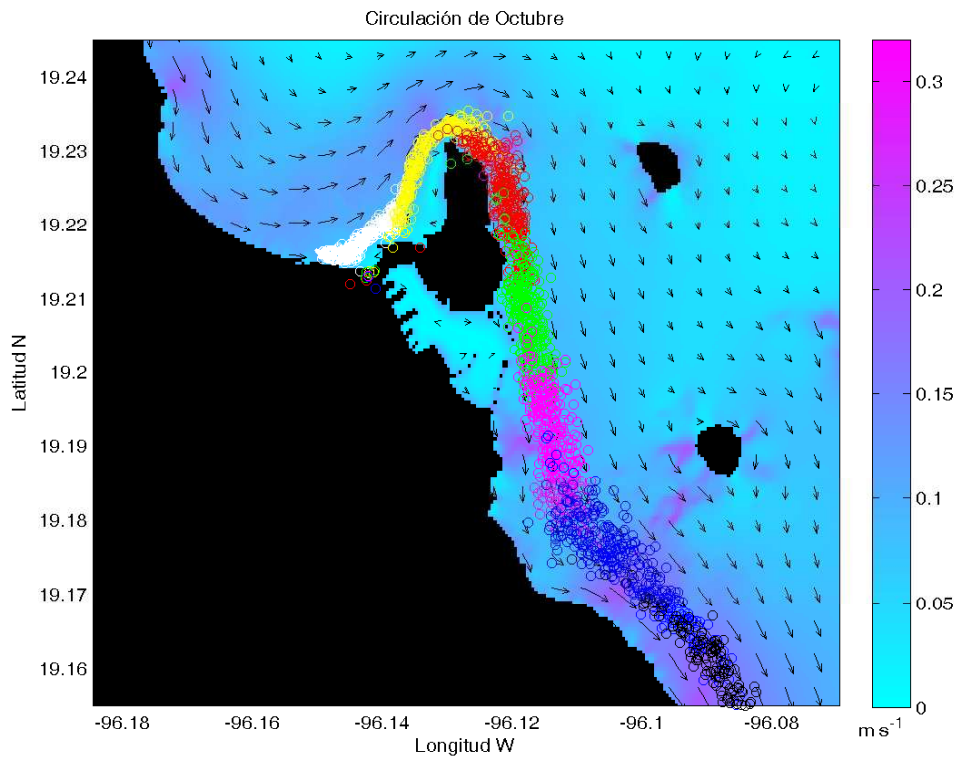


Figura 5.4: Resultados de la corrida del modelo para el mes de octubre. Se observa la trayectoria de partículas sembradas en el Arroyo el Cable. Los colores de las partículas cambian cada 24 horas.



## Capítulo 6

# Conclusiones

El análisis de las corrientes en dos sitios del Sistema Arrecifal Veracruzano, mostró que existe una dirección dinámica predominante; las corrientes variaron principalmente a lo largo de la dirección noroeste-sureste, teniendo asociada casi el 80 % la varianza. La mayor parte de esta varianza está asociada al forzamiento por viento, dejando en segundo término la marea y las brisas. Otros forzamientos como el efecto de remolinos de aguas profundas adyacentes a la plataforma no se identificaron en los datos analizados.

La correlación entre los vientos de escala sinóptica y las corrientes fue de  $r=0.77$  y  $r=0.62$  en el periodo de septiembre-octubre del 2006 y diciembre enero, respectivamente. Se alcanzaron velocidades hasta  $1\text{ms}^{-1}$ , donde las más intensas estaban relacionadas a eventos de norte. L

La frecuencia diurna tiene una amplitud de 0.1, siendo mucho menor a que la asociada a eventos atmosféricos de escala sinóptica que alcanzan, en ocasiones,  $1\text{ms}^{-1}$ . En promedio, para estos periodos, las corrientes tienden hacia el sureste en los dos periodos observados. La dirección de la corriente se alterna, siguiendo la variabilidad de los vientos.

Las modelaciones numéricas, que se llevaron a cabo usando el esfuerzo del viento promediado mensualmente, estimado a partir de los datos de satélite, generan corrientes hacia el sureste para enero y octubre y muy débiles hacia el noroeste para abril y julio.

Las simulaciones de la dispersión de contaminantes muestran que para enero y octubre, que se pueden caracterizar como otoño e invierno, las descargas vertidas en arroyo el cable se desplazan hacia el canal entre La Gallega-Galleguilla, pasa por este y posteriormente se desplaza hacia el sureste en una pluma paralela a la costa. La pluma tarda aproximadamente cuatro días en llegar a la zona enfrente del Puerto

de Veracruz y de cinco a siete días para estar enfrente de las playas de Veracruz y Boca del Río. Los resultados de la modelación coinciden con lo que se observó en las corrientes medidas. Estos periodos de tiempo pueden considerarse intermedios en términos de la contaminación pues los microorganismos (enterococos y E. coli, por ejemplo) mueren, en su mayor parte dos o tres días después de entrar en contacto con el agua de mar. Otros contaminantes, como el exceso de materia orgánica y nutrientes requieren un análisis más detallado, pero los resultados sugieren que pueden tener un fuerte impacto negativo en los arrecifes cercanos a la costa y en particular en la Gallega-Galleguilla.

Las corrientes modeladas para abril y julio, que se pueden caracterizar como primavera y verano, son mucho más débiles que las de octubre y enero y su dirección es hacia el noroeste, tendiendo a mantenerse junto a la costa. En el mes de abril se observa una convergencia que genera un filamento hacia afuera de la costa en la parte media de playa norte. Para estos meses no se obtuvieron datos de corriente que pudieran validar estos resultados. En abril las descargas vertidas en Arroyo el Cable se estancan en Playa Norte, provocando altos niveles de contaminación en la zona.

Debido a que se trata de una zona somera en donde las velocidades son casi barotrópicas, el modelo que se utilizó da una buena aproximación de la realidad. En esta zona, toda la profundidad se considera una capa de mezcla, y los cambios en la vertical son de una escala muy pequeña. Para dar una visión completa y modelar la estructura vertical, se podría con un modelo en tres dimensiones baroclínico, aunque se necesitaría una resolución muy alta para apreciar movimientos verticales. También podría mejorar el modelo si se usaran datos reales de viento en lugar de un promedio mensual.



# Glosario

**Advección.-** Proceso a través del cual se transportan propiedades de un fluido en movimiento, por ejemplo, calor o concentración de sal en el oceano, o contenido de humedad en la atmósfera. Aunque formalmente el término podría ser usado para transporte en cualquier dirección, el término usualmente se refiere a transporte horizontal, mientras que a los movimientos de transporte vertical se les refiere como *convección*.

**Capa de Ekman.-** Delgada capa de agua en la superficie del oceano que es afectada por la acción del viento.

**Convergencia.-** Se refiere al fenómeno que se presenta cuando la trayectoria de aguas de distinto origen se intersecta.

**Coriolis, fuerza de.-** Es una fuerza que actúa sobre una partícula en movimiento en un sistema en rotación. La fuerza de Coriolis provoca una desviación de la partícula. En la superficie terrestre, esta fuerza provoca desviación a la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda en el hemisferio sur. Su magnitud es proporcional a la velocidad de la partícula y al seno de la latitud geográfica.

**Divergencia.-** Fenomeno que se presenta cuando las líneas de flujo de un fluido se ramifican.

**Frente.-** Región del oceano que separa parcelas de agua de características marcadamente distintas.

**Geostrofia.-** Método para analizar las corrientes, basado en la suposición de que existe un balance entre la fuerza de Coriolis y el gradiente horizontal de presión.

**Isóbaras.-** Línea o superficie que une los puntos de presión constante sobre una gráfica en el espacio o tiempo.

**Isóbata.-** Línea o superficie que conecta los puntos a profundidad constante sobre una gráfica en el espacio.

**Isohalina.-** Línea o superficie que conecta los puntos con igual contenido salino sobre una gráfica en el espacio.

**Isopicna.-** Línea o superficie que une los puntos de densidad constante sobre una gráfica en el espacio o tiempo.

**Oligotrófico.-** Reservas de agua o lagos con bajos niveles de nutrientes.

**Onda de Kelvin.-** Ondas gravitatorias que viajan atrapadas por una costa o por el ecuador, cuyo balance lateral está restringido a encontrarse en balance geostrófico. Un ejemplo común en el hemisferio norte es la onda de marea sobre un canal, en el cual la onda de marea presentará un apilamiento mayor en el lado derecho de la dirección de viaje de la ola.

**Plataforma continental.-** Area extendida de los continentes que es cubierta por mares poco profundos y golfos. La plataforma termina en una región de pendiente pronunciada conocida como la *barrera continental*.

**Surgencia.-** Ascenso de aguas subsuperficiales, más frías y con mayor concentración de nutrientes, que reemplazan las aguas superficiales en zonas restringidas del oceano. Las surgencias costeras son provocadas por vientos hacia el ecuador en los océanos con frontera oriental.

**Termoclina.-** Capa que presenta un cambio abrupto de temperatura con la profundidad. En los océanos se pueden encontrar termóclinas temporales, las cuales tienen una variación estacionaria (anual) y termoclinas permanentes.

**Xenobióticos.-** Compuesto químico que se encuentra en un organismo pero usualmente no debería estar presente. El concepto también se refiere a substancias presentes con una concentración mayor a la habitual.

# Bibliografía

- [1] BRYANT, W., LUGO, J., CÓRDOVA, C., AND SALVADOR, A. Physiography and bathymetry. In *The Geology of North America. The Gulf of Mexico Basin.* (1991), A. Salvador, Ed., vol. J, The Geological Society of America., pp. 1–18.
- [2] CARRICART-GANIVET, J. Sea surface temperature and the growth of the west atlantic reef-building coral *montastrea annularis*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 302 (2004), 249–260.
- [3] CONAGUA. Sistema nacional de información sobre cantidad, calidad, usos y conservación del agua. <http://www.cna.gob.mx/SINA/>.
- [4] CURRIE, I. G. *Fundamental Mechanics of Fluids.* Mcgraw-Hill College, 1993.
- [5] EMERY, W. J., AND THOMSON, R. E. *Data analysis methods in physical oceanography.* Elsevier science, 2001.
- [6] GOBIERNO DEL ESTADO DE VERACRUZ. Portal del ciudadano. <http://portal.veracruz.gob.mx/>.
- [7] HORTA-PUGA, G. El sistema arrecifal veracruzano, un ecosistema marino único. <http://www.jornada.unam.mx/2005/10/31/eco-c.html>.
- [8] HUBBARD, D. Reefs as dynamics systems. In *Life and Death of Coral Reefs* (1997), C. Birkeland, Ed., Chapman and Hall, pp. 43–67.
- [9] INEGI. El inegi en su entidad, veracruz de ignacio de la llave. <http://www.inegi.gob.mx/est/default.aspx?e=30>.
- [10] INEGI. Xii censo general de población y vivienda 2000. [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx), 2000.
- [11] INEGI. Segundo conteo de población y vivienda. <http://www.inegi.gob.mx>, 2005.

- [12] JASSO, A. M. *Desarrollo de una aplicacion para visualizar salidas de modelos numericos de circulacion oceanica*. UNAM, Facultad de Ingenieria, 2007.
- [13] MACKENZIE, D. L., AND MASTEN, S. J. *Ingeniería y ciencias ambientales*. McGraw Hill, 2005.
- [14] NORTEK. *Aquadop Current Profiler, User Guide*, 2005. [www.nortek-as.com](http://www.nortek-as.com).
- [15] PEPPER, I., GERBA, C., AND BRUSSAV, M. *Pollution Science*. Academic Press, 1996.
- [16] SALAS-PÉREZ, J., VARGAS-HERNÁNDEZ, J., ARENAS-FUENTES, V., AND BALDERAS-CRUZ, P. Trayectoria de masas de agua en el parque nacional sistema arrecifal veracruzano y modelos numéricos: Circulación de verano. In *Investigaciones Científicas en el Sistema Arrecifal Veracruzano*, A. Granados-Barba, L. Abarca-Arenas, and J. Vargas-Hernández, Eds., UV-Promep-Epomex.
- [17] SEMARNAT. Programa integral de playas limpias, veracruz. <http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Pages/playas.aspx>.
- [18] SHLENS, J. A tutorial on principal component analysis. <http://www.snl.salk.edu/shlens/pub/notes/pca.pdf>, 2005.
- [19] TOMCZAK, M. Shelf and coastal oceanography. <http://gyre.umeoce.maine.edu/physicalocean/Tomczak/ShelfCoastalOceanography>, 1998.
- [20] VENEGAS, S. A. Statistical methods for signal detection in climate. Tech. Rep. 2, 2001.
- [21] ZAVALA-HIDALGO, J., FERNÁNDEZ-EGUIARTE, A., VARGAS, J., AND SARABIA-BUENO, C. Reporte de la visita de prospección a las playas de veracruz y boca del río. Tech. rep., Proyecto: Clasificación de playas del Puerto de Veracruz, Boca del Río y zonas arrecifales adyacentes mediante modelación numérica y mediciones de la circulación costera y de contaminantes CNA-2004-C02-024, 2006.
- [22] ZAVALA-HIDALGO, J., MOREY, S. L., AND O'BRIEN, J. J. Seasonal circulation on the western shelf of the gulf of mexico using a high-resolution numerical model. *Journal Of Geophysical Research* 108 (2003).