

UNIVERSIDAD DEL MAR

Campus Puerto Ángel



**CIRCULACIÓN COSTERA AL OESTE DE SALINA CRUZ, OAXACA EN RESPUESTA
A EVENTOS TEHUANOS**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el título de Licenciado en
Oceanología

Presenta:

Magdalena Barragán Aparicio

Dirigido por:

Dr. A. Cristóbal Reyes Hernández

Puerto Ángel, Oaxaca.

A 18 de marzo de 2011.

Puerto Ángel, Oaxaca, a 18 de marzo del 2011.

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Después de realizar una revisión detallada de la tesis “Circulación Costera al Oeste de Salina Cruz, Oaxaca en Respuesta a Eventos Tehuanos”, presentada por la pasante de la Licenciatura en Oceanología Magdalena Barragán Aparicio, se considera que cumple con los requisitos y la calidad necesaria para ser defendida en el examen profesional.

COMISIÓN REVISORA

Dr. Austreberto Cristóbal Reyes Hernández
Director de tesis

C. Dr. Miguel Ángel Ahumada Sempoal
Miembro del comité

M. en C. Manuel Mancilla Peraza
Miembro del comité

M. en C. Ricardo R. Hernández Hernández
Miembro del comité

Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Miembro del comité

Dedicada a
mí hermano
Alfonso

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres, Gracielo Barragán Ramírez y Obdulia Aparicio Gutiérrez por toda la ayuda que me han brindado para salir adelante.

A mis hermanos Adriana, Margot, Alfonso, Amalia y Efrén por el cariño y apoyo que me han dado siempre, por animarme a seguir adelante con la tesis en todo momento.

A mis sobrinos José y Beto por darnos alegría y fortaleza en los momentos difíciles.

A Jacob por su amor, paciencia, comprensión y apoyo incondicional, por ser parte de mi vida.

Agradezco a mi director el Dr. A. Cristóbal Reyes Hernández por la paciencia, el apoyo y el tiempo brindado a lo largo de la realización de la tesis, gracias por todas las asesorías.

A mi comité de tesis: Ocean. Miguel Ángel Ahumada Sempoal, Dr. Reginaldo Durazo Arvizu y al M. en C. Ricardo R. Hernández Hernández por las revisiones y comentarios para mejorar este trabajo.

Quiero agradecer de manera especial al M. en C. Manuel Mancilla Peraza por su importante aporte y participación en el desarrollo de esta tesis, pero sobre todo por su disponibilidad, paciencia, confianza, consejos, ánimos. Muchas gracias por haberme guiado y por regalarme su amistad.

A mis profesores, que compartieron conmigo sus conocimientos. Especialmente a los profesores Roberto, Cecilia, Ragi, Francisco y María Auxilio por su comprensión y cariño, por escucharme y compartir conmigo muchos momentos, por darme su amistad.

A mis amigos y compañeros: Inés, Lucí, Vianey, Mauro, Elder, Irving, Isabel, Pili, Laura, Irasema, Viry, Shammir, Ivan, por todas las aventuras y desveladas, por los momentos divertidos que compartimos.

A las personas de Puerto Ángel que me brindaron su ayuda durante la carrera, en especial a Doña Inés por su calidad humana, gracias por preocuparse por mí.

Al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), la Facultad de Ciencias Marinas (FCM) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), la Universidad de Colima (UCOL) y la Universidad del Mar (UMAR), por formar parte del proyecto de investigación "Corrientes y Oleaje en el Golfo de Tehuantepec (COGOTE)" financiado por CONACYT con clave U40822-F.

A la Secretaria de Marina, de forma particular a la Estación de Investigación Oceanográfica de Salina Cruz, por su colaboración en el registro de los datos meteorológicos.

RESUMEN

Las series de tiempo durante dos periodos, del 11 de febrero al 14 marzo de 2004 y del 25 febrero al 26 marzo de 2005, en la parte occidental del Golfo de Tehuantepec fueron usadas para analizar la respuesta de la circulación costera ante el forzamiento de viento Tehuano. Los datos consisten de series de tiempo de viento, perfiles de corrientes, presión y temperatura del agua medidos en forma simultánea en tres estaciones a lo largo de la costa: Chipehua, Castillo y Espigón. Los datos de corrientes, presión y temperatura del agua fueron registrados mediante perfiladores acústicos de corrientes por efecto Doppler (ADCP). Los datos de viento fueron obtenidos de la Estación Meteorológica Automática de Superficie, de la Secretaria de Marina, en Salina Cruz, Oaxaca. El estudio es parte del proyecto de colaboración "Corrientes y Oleaje en el Golfo de Tehuantepec (COGOTE)" entre la Universidad Autónoma de Baja California y la Universidad del Mar. Cada serie fue corregida, alisada a un dato por hora. Las frecuencias más importantes fueron identificadas mediante técnicas de análisis espectral y aplicando un filtro Lanczos fueron eliminadas las frecuencias mayores a 0.03 cph. Los resultados indican que durante los eventos Tehuanos la circulación horizontal del agua generalmente fue hacia el NO y NE y hacia el SE durante vientos del SO en los tres anclajes. En correspondencia con la dirección de la corriente horizontal hacia la costa, el movimiento vertical fue hacia abajo y la temperatura del agua se incrementó. De igual forma en correspondencia con la dirección de la corriente hacia afuera de la costa, la velocidad vertical fue hacia arriba y la temperatura del agua disminuyó. Las velocidades horizontales y verticales, así como la temperatura del agua son consistentes con el concepto de hundimiento y surgencia creado por el transporte de Ekman. Este mecanismo de variabilidad y la presencia de la costa como limite oriental, sugieren la presencia de ondas atrapadas a la costa y ondas de Kelvin, lo anterior es reforzado por las frecuencias energéticas sub-inerciales que se encuentran a partir del análisis espectral. El forzamiento dinámico a lo largo de la costa fue gobernado principalmente por el gradiente horizontal en la elevación de la superficie del mar y el esfuerzo del viento en la superficie del mar.

ABSTRACT

Time series data collected along two periods, February 11th -March 14th 2004 and February 25th -March 26th 2005, in the western Gulf of Tehuantepec were used to analyze the response of the coastal circulation to “Tehuano” wind forcing. The data consist of time of series of wind, current profiles, pressure and water temperature measured simultaneously in three stations along the coast, Chipehua, Castillo and Espigón. Current, pressure and water temperature were recorded using Acoustic Doppler Currents Profilers (ADCP). Wind data was obtained from the Automatic Surface Weather Station belonging to Secretaría de Marina, in Salina Cruz, Oaxaca. This work is part of the collaborative project "Corrientes y Oleaje en el Golfo de Tehuantepec (COGOTE)", between the Universidad Autónoma de Baja California and the Universidad del Mar. Each series was processed in order to get corrected, smoothed hourly values. Also the main frequencies were identified through spectral analysis and a Lanczos filter was applied to remove frequencies above 0.03 cph. Results indicated that during “Tehuano” events the horizontal circulation generally was NW-NE and SE under SW wind in the three moorings. In correspondence with the horizontal flow direction towards the coast, vertical velocity was downwards and the water temperature increased. Conversely for off shore flow upward vertical velocity occurred and the water temperature dropped. Horizontal and vertical velocities as well as the water temperature were consistent with the concept of downwelling and upwelling by the Ekman transport. That mechanism of variability and the presence of the coast as an eastern boundary, suggest the presence of coastally trapped and Kelvin waves, this suggestion is reinforced by the energetic sub-inertial frequencies found from spectral analysis. The dynamic forcing along the coast was governed largely by the horizontal gradient of the sea surface elevation and wind stress on the sea surface.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	i
Resumen	iii
Abstract.....	iv
Índice	v
Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas.....	x
1. Introducción.....	1
1.1 Hipótesis de trabajo	4
2. Antecedentes	5
3. Objetivos	8
3.1 General	8
3.2 Específicos.....	8
4. Área de Estudio	9
4.1 Localización	9
4.2 Clima	9
4.3 Vientos.....	9
4.4 Marea.....	10
5. Metodología.....	12
5.1 Instrumentos utilizados.....	12
5.1.1 Perfiladores acústicos de corrientes por efecto Doppler	12
5.1.2 Estación meteorológica automática.....	13
5.2 Campañas efectuadas	14
5.3 Información obtenida	15
5.4 Procesamiento de datos	16
5.4.1 Detección de datos erróneos.....	16
5.4.2 Alisado y diezmado de datos.....	17
5.4.3 Sistema Coordinado.....	17
5.4.4 Procesamiento preliminar de los datos de presión	17
5.4.5 Análisis espectral.....	19
5.4.6 Filtrado de Datos	19
5.4.7 Análisis espectral cruzado	20

5.4.8	Análisis de Admitancia	20
5.5	Descripción del Modelo de Circulación Costera.....	21
6.	Resultados	25
6.1	Información lograda con el tratamiento preliminar.....	25
6.2	Viento	26
6.3	Circulación costera	29
6.3.1	Corriente horizontal y vertical frente a Chipehua durante la primera campaña.....	29
6.3.2	Corriente horizontal y vertical frente a Castillo durante la primera campaña	31
6.3.3	Corriente horizontal y vertical frente a Espigón durante la primera campaña.....	34
6.3.4	Corriente horizontal y vertical frente a Chipehua durante la segunda campaña	36
6.3.5	Corriente horizontal y vertical frente a Castillo durante la segunda campaña.....	39
6.3.6	Corriente horizontal y vertical frente a Espigón durante la segunda campaña	41
6.4	Circulación horizontal del agua promedio durante los eventos Tehuanos	44
6.5	Altura del nivel del mar sin filtrar	47
6.6	Altura del nivel del mar filtrada	48
6.7	Gradientes horizontales en la elevación de la superficie del mar.....	50
7.	Discusiones.....	52
7.1	Patrón promedio de circulación costera durante los eventos Tehuanos	52
7.2	Tiempo de respuesta de la circulación horizontal del agua y del nivel del mar a los vientos Tehuanos	52
7.3	Respuesta de la velocidad vertical del agua a los vientos Tehuanos y Suroeste.....	53
7.4	Balance dinámico	56
8.	Conclusiones	58
9.	Literatura Citada.....	59
10.	Anexo	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de los fenómenos inducidos por los viento Mistral y Tramontana (tomada de Millot, 1990).	2
Figura 2. Mapa de la Topografía y localidades geográficas referidas (tomado de Chelton <i>et al.</i> , 2000).	3
Figura 3. Diagrama esquemático de la frecuencia del viento en el Golfo de Tehuantepec y las corrientes superficiales asociadas: (a) Junio-Agosto, (b) Octubre-Enero, (c) Febrero-Abril y (d) Mayo y Septiembre. Las flechas indican la dirección de la corriente (línea continua velocidades $>20 \text{ cms}^{-1}$, línea discontinua velocidades $<20 \text{ cms}^{-1}$) (tomado de Blackburn, 1962).	6
Figura 4. Diagrama esquemático de corriente superficial ante un evento Tehuano (Tomado de Valle-Levinson, 1985).	6
Figura 5. Localización del área de estudio y de los instrumentos de medición.	11
Figura 6. Esquema del anclaje de los perfiladores Nortek (Tomado de NORTEK AS, 2009).	15
Figura 7. Modelo esquemático del sistema coordenado.	17
Figura 8. Método para la obtención de la profundidad promedio del instrumento.	18
Figura 9. Ilustración del sentido de los gradientes horizontales en la elevación del nivel del mar, entre las estaciones de Chipehua y Castillo, de acuerdo al sistema de coordenadas empleado.	19
Figura 10. Representación esquemática del filtro pasa bajas.	20
Figura 11. Ilustración de la relación del gradiente horizontal de presión y la elevación de la superficie del mar.	22
Figura 12. Serie de viento filtrada de la primera campaña (febrero 11 – marzo 14, 2004), expresado en convención meteorológica.	27
Figura 13. Serie de viento filtrada de la segunda campaña de muestreo (febrero 25 – marzo 26, 2005), expresado en convención meteorológica.	29
Figura 14. Corriente horizontal y vertical en la estación de Chipehua 2004. Período: febrero 11 – marzo 14, 2004.	31
Figura 15. Corriente horizontal y vertical en la estación de Castillo 2004. Período: febrero 11 – marzo 14, 2004. A fin de resaltar las altas velocidades verticales registradas al final del muestreo, la grafica de velocidad vertical (c) se dividió del día 42-67 y del 68 al 75.	33

Figura 16. Corriente horizontal y vertical en la estación de Espigón 2004. Período: febrero 11 – marzo 14, 2004.	36
Figura 17. Corriente horizontal y vertical en la estación de Chipehua. Periodo: febrero 25 – marzo 26, 2005.	38
Figura 18. Corriente horizontal y vertical en la estación de Castillo. Periodo: febrero 25 – marzo 26, 2005. A fin de resaltar las altas velocidades verticales registradas al final del muestreo, la grafica de velocidad vertical (c) se dividió del día 56-77 y del 78 al 85.	41
Figura 19. Corriente horizontal y vertical en la estación de Espigón. Periodo: febrero 25 – marzo 26, 2005.	43
Figura 20. Circulación horizontal promedio durante los eventos Tehuanos de la primera campaña de muestreo. El vector negro indica la circulación de viento y los vectores de colores la circulación costera según la celda muestreada (rojo 3.5 m, verde 11.5 m, morado 19.5 m, para la estación de Chipehua y rojo 2.1 m, verde 8.1 m, morado 14.1 m, para las estaciones de Castillo y Espigón). Cabe mencionar que los vectores de la circulación (verde y rojo) se desplazaron con respecto a la localización de la estación para lograr una mejor visualización del comportamiento de la circulación en la columna de agua.	45
Figura 21. Circulación horizontal promedio durante los eventos Tehuanos de la segunda campaña de muestreo. El vector negro indica la circulación de viento y los vectores de colores la circulación costera según la celda muestreada (2.1 m, verde 8.1 m, morado 14.1 m, para las tres estaciones). Cabe mencionar que los vectores de la circulación horizontal del agua (verde y rojo) se desplazaron con respecto a la localización de la estación para lograr una mejor visualización del comportamiento de la circulación en la columna de agua.	46
Figura 22. Series de tiempo filtradas de la altura del nivel del mar (m) de la primera campaña, en las estaciones Chipehua (azul), Castillo (rojo) y Espigón (negro), b) Velocidad del viento (ms^{-1}) y c) Dirección del viento ($^{\circ}$).	49
Figura 23. Series de tiempo filtradas de la altura del nivel del mar (m) de la segunda campaña, en las estaciones Chipehua (azul), Castillo (rojo) y Espigón (negro), b) Velocidad del viento (ms^{-1}) y c) Dirección del viento ($^{\circ}$).	49
Figura 24. Series de tiempo a) Gradientes horizontales en la elevación en la superficie del mar entre las estaciones Chipehua-Castillo (rojo) y Castillo-Espigón (negro), b) Velocidad del viento (ms^{-1}) y c) Dirección del viento ($^{\circ}$), de la primera campaña de muestreo (febrero 11 – marzo 14, 2004).	50

Figura 25. Series de tiempo a) Gradiente horizontal en elevación en la superficie del mar entre las estaciones Chipehua-Castillo (rojo) y Castillo-Espigón (negro), b) Velocidad del viento (ms^{-1}) y c) Dirección del viento ($^{\circ}$), de la segunda campaña de muestreo (febrero 25 – marzo 26, 2005).

51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Principales Componentes Armónicas del Puerto de Salina Cruz, Oaxaca. Fase con respecto al Meridiano 090° O. (Tomado de Secretaria de Marina, 2009).	10
Tabla II. Planos de Mareas Referidos al Nivel Medio del Mar para el Puerto de Salina Cruz, Oaxaca. Período: Enero 2002 a Diciembre 2006. (Tomado de Secretaria de Marina, 2009).	10
Tabla III. Características técnicas de los perfiladores acústicos de corrientes por efecto Doppler (Tomado de NORTEK AS, 2009; SONTEK, 2009).	13
Tabla IV. Rango de medición y precisión de la estación meteorológica (Davis Instruments, 1996).	13
Tabla V. Características de las series de tiempo originales de corriente, presión y viento obtenidas en la primera campaña de muestreo.	16
Tabla VI. Características de las series de tiempo originales de corriente, presión y viento obtenidas en la segunda campaña de muestreo.	16
Tabla VII. Características de las series de tiempo obtenidas después del tratamiento preliminar de los datos, de la primera campaña de muestreo (febrero 11 – marzo 14, 2004).	25
Tabla VIII. Características de las series de tiempo obtenidas después del tratamiento preliminar de los datos, de la segunda campaña de muestreo (febrero 25 – marzo 26, 2005).	25
Tabla IX. Frecuencia del viento por sector de dirección y velocidad máxima, mínima y promedio del viento sin filtrar, de la primera campaña de muestreo (febrero 11 – marzo 14, 2004).	26
Tabla X. Frecuencia del viento por sector de dirección y velocidad máxima, mínima y promedio del viento filtrado de la primera campaña (febrero 11 – marzo 14, 2004).	27
Tabla XI. Velocidad del viento Tehuano de la primera campaña (febrero 11 – marzo 14, 2004).	27
Tabla XII. Frecuencia del viento por sector de dirección y velocidad máxima, mínima y promedio del viento sin filtrar, de la segunda campaña de muestreo (febrero 25 – marzo 26, 2005).	28
Tabla XIII. Frecuencia del viento por sector de dirección y velocidad máxima, mínima y promedio del viento filtrado de la segunda campaña (febrero 25 – marzo 26, 2005).	28

Tabla XIV. Velocidad del viento Tehuano de la segunda campaña (febrero 25 – marzo 26, 2005).	29
Tabla XV. Velocidad de la corriente costera de la estación de Chipehua, durante la primera campaña (febrero 11 – marzo 14, 2004).	30
Tabla XVI. Velocidad de la corriente costera de la estación de Castillo, durante la primera campaña (febrero 11 – marzo 14, 2004).	33
Tabla XVII. Velocidad de la corriente costera de la estación de Espigón, durante la primera campaña (febrero 11 – marzo 14, 2004).	35
Tabla XVIII. Velocidad de la corriente costera de la estación de Chipehua, durante la segunda campaña (febrero 25 – marzo 26, 2005).	38
Tabla XIX. Velocidad de la corriente costera de la estación de Chipehua, durante la segunda campaña (febrero 25 – marzo 26, 2005).	40
Tabla XX. Velocidad de la corriente costera de la estación de Espigón, durante la segunda campaña (febrero 25 – marzo 26, 2005).	43
Tabla XXI. Análisis de admitancia entre las series horarias de altura de nivel del mar, de las estaciones de Espigón, Castillo y Chipehua, durante la primera campaña (febrero 11 – marzo 14, 2004).	47
Tabla XXII. Análisis de admitancia entre las series horarias de altura de nivel del mar, de las estaciones de Espigón, Castillo y Chipehua, durante la segunda campaña (febrero 25 – marzo 26, 2005).	48
Tabla XXIII. Orden de magnitud de cada término de la fórmula de la velocidad vertical producida por el bombeo de Ekman.	56
Tabla XXIV. Variables hidrodinámicas de la primera campaña de muestreo ($\times 10^{-6}$) (febrero 11 – marzo 14, 2004).	57
Tabla XXV. Variables hidrodinámicas de la segunda campaña de muestreo ($\times 10^{-6}$) (febrero 25 – marzo 26, 2005).	57