

**UNIVERSIDAD DEL MAR**

Campus Puerto Ángel



**RUTAS POTENCIALES DE TRANSPORTE LARVARIO Y CONECTIVIDAD  
DE CORALES PÉTREOS EN BAHÍAS DE HUATULCO, PACÍFICO TROPICAL  
NOR-ORIENTAL**

TESIS

Que para obtener el Título Profesional de

**Licenciada en Oceanología**

Presenta

**Brianda Lucero Domínguez Oliva**

Dirigida por:

**Dr. Miguel Ángel Ahumada Sempol**

Puerto Ángel, Oaxaca, México, a julio 2016

## Resumen

El objetivo del presente trabajo fue identificar las diferentes rutas potenciales de transporte larvario y conectividad potencial de corales pétreos en las bahías de Huatulco, Pacífico sur de México. Para ello se utilizó un modelo Lagrangiano que calcula trayectorias de partículas a partir de los campos de velocidad previamente simulados con un modelo hidrodinámico. Para generar la dinámica del océano se consideraron tres diferentes forzantes: (a) viento constante y espacialmente uniforme, (b) marea y (c) viento con marea. Los resultados indican que los patrones de transporte larvario y conectividad entre las áreas arrecifales de las bahías de Huatulco están fuertemente condicionados por el régimen de viento y marea, siendo esta última el forzamiento dominante. La circulación costera inducida por viento débil ( $\sim 3.3$  m/s) del NE, ocasiona una mayor tasa de reclutamiento, mientras que viento fuerte ( $\sim 6.7$  m/s) de la misma dirección incrementa la tasa de intercambio larvario, de E a O, a distancias entre 2 y 8 km. Por otro lado, durante la pleamar (flujo) el intercambio larvario se presentan en dirección entre O y NO, a distancias entre  $\sim 2$  y 4 km, mientras que durante la bajamar (reflujo) el desplazamiento de partículas es en dirección entre E y SE, promoviendo la acumulación de larvas dentro de localidades del Parque Nacional Huatulco (San Agustín, Riscalillo, Jicaral, Dos Hermanas y Maguey-Órgano). Cuando el forzamiento es con viento y marea, los patrones de transporte larvario y conectividad son muy similares a aquellos resultantes cuando el forzamiento es únicamente por marea. En general, en los primeros días posteriores a la liberación de partículas ( $\sim 4$  días) domina el auto-reclutamiento, y conforme aumenta el periodo de competencia larvaria (10 días), el reclutamiento subsidiario se ve favorecido entre las localidades más distantes, cuya separación no exceda los 10 km. Se identificaron tres localidades fuente: Maguey-Órgano, Santa Cruz y Tangolunda; y tres localidades sumidero: San Agustín, los arrecifes localizados en la parte externa de las bahías (Riscalillo, Jicaral y Dos hermanas), y Conejos.

Palabras clave: *corales pétreos, bahías de Huatulco, transporte larvario, conectividad, modelado numérico, ROMS, Ichthyop.*

## **Dedicatoria**

A:

*Mi lobo interno (o lupus), porque ni con toda su astucia y audacia no logró vencerme. Gracias a ti descubrí a la guerrera.*

*Mis padres, por darme el derecho a vivir por partida doble. Mamá, gracias por estar ahí cuando más te necesito. Papá, no hay palabras que definan tu importancia para mí.*

*Mis hermanos, “la Doña” y “el Pipe”, que siempre me enseñan a ver la luz al final del túnel. Sin ustedes estoy perdida.*

*Mi compañero de andares, Ernan, muchas gracias por ser un soporte para mí cuando lo he necesitado.*

*Mis médicos de cabecera, Imelda García y Alfredo Bobadilla, quienes con sus consejos y recomendaciones me ayudaron a no temerle al lobo y motivaron a seguir soñando.*

*Todos los homis, que he hecho en mí andar, que siempre me dan su luz en cualquier momento.*

*Mi familia paterna y materna que aun en la distancia siempre me motivan a seguir tirando para adelante.*

*Un grupo especial de amigos míos o mejor dicho a l@s guerrer@s que murieron en combate sin hacer realidad sus sueños, y para aquellos que se mantienen peleando sus propias batallas con sus lobos.*

## **Agradecimientos**

Agradezco enormemente a mi director de tesis, Dr. Miguel Ángel Ahumada Sempoal, por todo su apoyo, dedicación y tiempo. Gracias por compartirme todo su conocimiento del modelado numérico. Sin duda toda la ayuda que me proporcionó fue clave para poder realizar éste proyecto.

Agradezco a los revisores de esta tesis, Dr. Andrés López Pérez, Dr. A. Cristóbal Reyes Hernández, Dr. Francisco Benítez Villalobos y M. en C. Bárbara Zavala Trujillo, porque sus comentarios y sugerencias enriquecieron este trabajo.

Extiendo mis agradecimientos a todos los profesores que tuve a lo largo de la carrera, de quienes he aprendido muchísimo. Gracias por compartir sus conocimientos y experiencias durante esta etapa de mi formación.

Agradezco a mis padres y hermanos (Brenda y Felipe), que siempre me motivan a seguir adelante. Gracias por todo su apoyo incondicional pase lo que pase. Gracias a ustedes, ha sido posible culminar esta etapa de mi vida académica.

Agradezco a Ernan, Mayra, Sergio, Fernando, Juan Carlos, Gloria, Miguel, Carolina, Karen, Tino, Evaristo, Claudia, Mauro, Laurita Penagos y Ana Betsabé. Gracias por brindarme su amistad y la oportunidad de contar con ustedes en todo momento. Esta etapa de mi vida en Puerto Ángel no hubiera sido lo mismo sin ustedes.

# ÍNDICE

1. Introducción .....	1
2. Antecedentes .....	4
3. Hipótesis.....	5
4. Objetivos .....	5
4.1. General.....	5
4.2. Particulares.....	5
5. Área de estudio.....	6
5.1. Ubicación.....	6
5.2. Clima.....	7
5.3. Mareas.....	8
5.4. Distribución de corales.....	9
6. Material y método .....	11
6.1. Modelo hidrodinámico .....	11
6.1.1. Configuración del modelo hidrodinámico .....	14
6.2. Modelo Lagrangiano .....	15
6.2.1. Configuración del modelo Lagrangiano .....	16
6.2.2. Transporte larvario y conectividad potencial.....	17
7. Resultados .....	18
7.1. Circulación costera.....	20
7.1.1. Influencia del viento.....	20
7.1.2. Influencia de la marea.....	21
7.1.3. Influencia conjunta de viento y marea .....	21
7.2. Rutas de transporte larvario .....	30
7.2.1. En condiciones de viento .....	30

7.2.2. En condiciones de marea.....	31
7.2.3. En condiciones de viento y marea.....	32
7.3. Patrones de conectividad.....	40
7.3.1. En condiciones de viento .....	40
7.3.2. En condiciones de marea.....	40
7.3.3. En condiciones de viento y marea.....	41
8. Discusiones .....	46
8.1. Circulación costera.....	46
8.2. Rutas de transporte larvario .....	47
8.3. Patrones de conectividad.....	48
9. Conclusiones .....	49
10. Recomendaciones.....	50
11. Literatura citada .....	51
12. Anexos .....	58
A. Ecuaciones del modelo hidrodinámico en coordenadas sigma .....	58
B. Ecuaciones del modelo hidrodinámico en coordenadas curvilíneas ortogonales ....	60
C. Malla numérica empleada en el modelo hidrodinámico .....	62
D. Campos de velocidad verticalmente integrada en condiciones de viento NE con intensidad de 3.31 y 4.50 m/s.....	63
E. Matrices de conectividad considerando tiempos de competencia larvaria de 2, 4, 6, 8 y 10 días .....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Localización geográfica y distribución de corales pétreos (diamantes) en las bahías de Huatulco, Oaxaca, México. Los recuadros cercanos a la línea de costa indican las zonas de liberación y conteo de partículas. Sitios con estatus de protección ecológica (Parque Nacional Huatulco): San Agustín (SAN) incluye los arrecifes de la playa e isla San Agustín, arrecifes localizados en la parte externa de las bahías correspondiente a Riscalillo, Jicaral y Dos hermanas (EXP) y bahía de Maguey-Órgano (MAO). Sitios sin estatus de protección ecológica: Santa Cruz (STA) incluye los arrecifes de La Entrega y Dársena, Tangolunda (TAN) donde se ubican los arrecifes de isla Montosa, Mixteca y Manzanilla; y Conejos (CON) con los arrecifes de Rincón Sabroso y Tejoncito. .... 6
- Figura 2.** Precipitación (barras) y temperatura del aire (línea con cuadros) media mensual en las bahías de Huatulco, Oaxaca, México (fuente de datos CONAGUA 2014)..... 8
- Figura 3.** Series de tiempo de energía cinética total cuando el modelo hidrodinámico es forzado únicamente por (a) viento, (b) marea y (c) simultáneamente por viento y marea. .... 19
- Figura 4.** Campos de velocidad verticalmente integrada en condiciones de viento. La dirección del viento se indica en el recuadro inferior derecho: (a) NE (6.71 m/s), (b) NO (6.83 m/s), (c) O (4.9 m/s) y (d) SO (6.83 m/s) ..... 24
- Figura 5.** Campos de velocidad verticalmente integrada en un ciclo de marea ( $M_2+K_1$ ). La fase de marea se indica en el recuadro inferior derecho: (a) 3 hrs, (b) 9 hrs, (c) 15 hrs y (d) 21 hrs. .... 25
- Figura 6.** Campos de velocidad verticalmente integrada en condiciones de viento NE (6.71 m/s) y marea ( $M_2+K_1$ ). La fase de marea se indica en el recuadro inferior derecho: (a) 3 hrs, (b) 9 hrs, (c) 15 hrs y (d) 21 hrs. .... 26
- Figura 7.** Campos de velocidad verticalmente integrada en condiciones de viento NO (6.83 m/s) y marea ( $M_2+K_1$ ). La fase de marea se indica en el recuadro inferior derecho: (a) 3 hrs, (b) 9 hrs, (c) 15 hrs y (d) 21 hrs. .... 27
- Figura 8.** Campos de velocidad verticalmente integrada en condiciones de viento O (4.9 m/s) y marea ( $M_2+K_1$ ). La fase de marea se indica en el recuadro inferior derecho: (a) 3 hrs, (b) 9 hrs, (c) 15 hrs y (d) 21 hrs ..... 28
- Figura 9.** Campos de velocidad verticalmente integrada en condiciones de viento SO (6.83 m/s) y marea ( $M_2+K_1$ ). La fase de marea se indica en el recuadro inferior derecho: (a) 3 hrs, (b) 9 hrs, (c) 15 hrs y (d) 21 hrs. .... 29

**Figura 10.** Trayectorias seguidas por partículas pasivas en condiciones de viento: (a) NE, (b) NO, (c) O y (d) SO. Las estrellas indican los sitios de liberación de partículas. Sitios con estatus de protección ecológica (Parque Nacional Huatulco): San Agustín (SAN), arrecifes localizados en la parte externa de las bahías correspondiente a Riscalillo, Jicaral y Dos hermanas (EXP) y Maguey-Órgano (MAO). Sitios sin estatus de protección ecológica: Santa Cruz (STA), Tangolunda (TAN) y Conejos (CON). El color azul cielo (azul marino) indica las posiciones de las partículas entre los días 2-5 (6-10) después de su liberación. .... 34

**Figura 11.** Trayectorias seguidas por partículas pasivas en un ciclo de marea ( $M_2+K_1$ ). La fase de marea se indica en el recuadro inferior derecho: (a) 3 hrs, (b) 9 hrs, (c) 15 hrs y (d) 21 hrs. Las estrellas indican los sitios de liberación de partículas. Sitios con estatus de protección ecológica (Parque Nacional Huatulco): San Agustín (SAN), arrecifes localizados en la parte externa de las bahías correspondiente a Riscalillo, Jicaral y Dos hermanas (EXP) y Maguey-Órgano (MAO). Sitios sin estatus de protección ecológica: Santa Cruz (STA), Tangolunda (TAN) y Conejos (CON). El color azul cielo (azul marino) indica las posiciones de las partículas entre los días 2-5 (6-10) después de su liberación..... 35

**Figura 12.** Trayectorias seguidas por partículas pasivas en condiciones de viento NE y marea ( $M_2+K_1$ ). La fase de marea se indica en el recuadro inferior derecho: (a) 3 hrs, (b) 9 hrs, (c) 15 hrs y (d) 21 hrs. Las estrellas indican los sitios de liberación de partículas. Sitios con estatus de protección ecológica (Parque Nacional Huatulco): San Agustín (SAN), arrecifes localizados en la parte externa de las bahías correspondiente a Riscalillo, Jicaral y Dos hermanas (EXP) y Maguey-Órgano (MAO). Sitios sin estatus de protección ecológica: Santa Cruz (STA), Tangolunda (TAN) y Conejos (CON). El color azul cielo (azul marino) indica las posiciones de las partículas entre los días 2-5 (6-10) después de su liberación. .... 36

**Figura 13.** Trayectorias seguidas por partículas pasivas en condiciones de viento NO y marea ( $M_2+K_1$ ). La fase de marea se indica en el recuadro inferior derecho: (a) 3 hrs, (b) 9 hrs, (c) 15 hrs y (d) 21 hrs. Las estrellas indican los sitios de liberación de partículas. Sitios con estatus de protección ecológica (Parque Nacional Huatulco): San Agustín (SAN), arrecifes localizados en la parte externa de las bahías correspondiente a Riscalillo, Jicaral y Dos hermanas (EXP) y Maguey-Órgano (MAO). Sitios sin estatus de protección ecológica: Santa Cruz (STA), Tangolunda (TAN) y Conejos (CON). El color azul cielo (azul marino) indica las posiciones de las partículas entre los días 2-5 (6-10) después de su liberación. .... 37

**Figura 14.** Trayectorias seguidas por partículas pasivas en condiciones de viento O y marea ( $M_2+K_1$ ). La fase de marea se indica en el recuadro inferior derecho: (a) 3 hrs, (b)



9 hrs, (c) 15 hrs y (d) 21 hrs. Las estrellas indican los sitios de liberación de partículas. Sitios con estatus de protección ecológica (Parque Nacional Huatulco): San Agustín (SAN), arrecifes localizados en la parte externa de las bahías correspondiente a Riscalillo, Jicaral y Dos hermanas (EXP) y Maguey-Órgano (MAO). Sitios sin estatus de protección ecológica: Santa Cruz (STA), Tangolunda (TAN) y Conejos (CON). El color azul cielo (azul marino) indica las posiciones de las partículas entre los días 2-5 (6-10) después de su liberación. .... 38

**Figura 15.** Trayectorias seguidas por partículas pasivas en condiciones de viento SO y marea ( $M_2+K_1$ ). La fase de marea se indica en el recuadro inferior derecho: (a) 3 hrs, (b) 9 hrs, (c) 15 hrs y (d) 21 hrs. Las estrellas indican los sitios de liberación de partículas. Sitios con estatus de protección ecológica (Parque Nacional Huatulco): San Agustín (SAN), arrecifes localizados en la parte externa de las bahías correspondiente a Riscalillo, Jicaral y Dos hermanas (EXP) y Maguey-Órgano (MAO). Sitios sin estatus de protección ecológica: Santa Cruz (STA), Tangolunda (TAN) y Conejos (CON). El color azul cielo (azul marino) indica las posiciones de las partículas entre los días 2-5 (6-10) después de su liberación. .... 39

**Figura 16.** Matrices y patrones de conectividad considerando el porcentaje máximo de transporte exitoso entre el día 2 y 10 del periodo de competencia larvaria en condiciones de viento NE (a), NO (b) y O (c). En las matrices de conectividad (paneles lado izquierdo) las líneas punteadas delimitan los arrecifes con estatus de protección ecológica. En los mapas (paneles lado derecho) las líneas delgadas representan la importancia relativa del transporte larvario exitoso entre el 1 y 10%, y las líneas gruesas entre el 20 y 30%; mientras que la flecha indica la dirección del intercambio de larvas entre localidades. Las estrellas indican los sitios de liberación/reclutamiento. Sitios incluidos con estatus de protección ecológica (Parque Nacional Huatulco): San Agustín (SAN), arrecifes localizados en la parte externa de las bahías correspondiente a Riscalillo, Jicaral y Dos hermanas (EXP) y Maguey-Órgano (MAO). Sitios sin estatus de protección ecológica: Santa Cruz (STA), Tangolunda (TAN) y Conejos (CON). .... 43

**Figura 17.** Matrices y patrones de conectividad considerando el porcentaje máximo de transporte exitoso entre el día 2 y 10 del periodo de competencia larvaria en condiciones de viento SO (a), marea (b) y viento NE y marea (c). En las matrices de conectividad (paneles lado izquierdo) las líneas punteadas delimitan los arrecifes con estatus de protección ecológica. En los mapas (paneles lado derecho) las líneas delgadas representan la importancia relativa del transporte larvario exitoso entre el 1 y 10%, y las líneas gruesas entre el 20 y 30%; mientras que la flecha indica la dirección del intercambio de larvas entre localidades. Las estrellas indican los sitios de liberación/reclutamiento. Sitios incluidos con estatus de protección ecológica (Parque Nacional Huatulco): San Agustín (SAN), arrecifes localizados en la parte externa de las bahías correspondiente a Riscalillo,

Jicaral y Dos hermanas (EXP) y Maguey-Órgano (MAO). Sitios sin estatus de protección ecológica: Santa Cruz (STA), Tangolunda (TAN) y Conejos (CON). ..... 44

**Figura 18.** Matrices y patrones de conectividad considerando el porcentaje máximo de transporte exitoso entre el día 2 y 10 del periodo de competencia larvaria en condiciones de viento NO y marea (a), O y marea (b) y SO y marea (c). En las matrices de conectividad (paneles lado izquierdo) las líneas punteadas delimitan los arrecifes con estatus de protección ecológica. En los mapas (paneles lado derecho) las líneas delgadas representan la importancia relativa del transporte larvario exitoso entre el 1 y 10%, y las líneas gruesas entre el 20 y 30%; mientras que la flecha indica la dirección del intercambio de larvas entre localidades. Las estrellas indican los sitios de liberación/reclutamiento. Sitios incluidos con estatus de protección ecológica (Parque Nacional Huatulco): San Agustín (SAN), arrecifes localizados en la parte externa de las bahías correspondiente a Riscalillo, Jicaral y Dos hermanas (EXP) y Maguey-Órgano (MAO). Sitios sin estatus de protección ecológica: Santa Cruz (STA), Tangolunda (TAN) y Conejos (CON). ..... 45

**Figura C.1.** Batimetría y línea de costa de las bahías de Huatulco. Los puntos negros represan el centro de cada celda en la malla numérica usada en el modelo hidrodinámico. .... 62

**Figura D.1.** Campos de velocidad verticalmente integrada en condiciones de viento. La dirección del viento se indica en el recuadro inferior derecho: (a) NE (3.31 m/s) y (b) NE (4.50 m/s). ..... 63

**Figura E.1.** Matrices de conectividad considerando un periodo de competencia larvaria de 2, 4, 6, 8 y 10 días en condiciones de viento NE (a), NO (b) y O (c). Las líneas punteadas delimitan los arrecifes con estatus de protección ecológica. La dirección del viento se indica en el recuadro inferior derecho. .... 64

**Figura E.2.** Matrices de conectividad considerando un periodo de competencia larvaria de 2, 4, 6, 8 y 10 días en condiciones de viento NE (a), marea (b) y viento NE y marea(c). Las líneas punteadas delimitan los arrecifes con estatus de protección ecológica. La dirección del viento se indica en el recuadro inferior derecho. .... 65

**Figura E.3.** Matrices de conectividad considerando un periodo de competencia larvaria de 2, 4, 6, 8 y 10 días en condiciones de viento NE y marea (a), O y marea (b) y SO y marea (c). Las líneas punteadas delimitan los arrecifes con estatus de protección ecológica. .... 66

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla I</b> Vientos dominantes mensuales en la región para el periodo 1989-1991 (tomado de Romero-Centeno <i>et al.</i> 2003 y Elliott <i>et al.</i> 2004).....	8
<b>Tabla II</b> Período, amplitud y fase de las siete componentes principales de marea en las bahías de Huatulco, Oaxaca, México (modificado de SEMAR, 2008) .....	9
<b>Tabla III</b> Ubicación, cobertura y profundidad de los arrecifes coralinos en las bahías de Huatulco (modificado de Glynn y Leyte-Morales 1997).....	10
<b>Tabla IV</b> Escenarios considerados en las simulaciones del modelo hidrodinámico.....	15
<b>Tabla V</b> Ubicación de los polígonos considerados para la liberación y conteo de partículas pasivas en el modelo Lagrangiano .....	17