



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS**



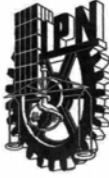
**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MERO
(*Epinephelus morio*) DEL BANCO DE
CAMPECHE, MÉXICO**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR
EN
CIENCIAS MARINAS

PRESENTA

MIRTHA ORALIA ALBÁÑEZ LUCERO

LA PAZ, B.C.S., MÉXICO. 2010



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 24 del mes de Mayo del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

**"DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MERO (*Epinephelus morio*)
DEL BANCO DE CAMPECHE, MÉXICO"**

Presentada por el alumno:

ALBÁÑEZ
Apellido paterno

LUCERO
materno

MIRTHA ORALIA
nombre(s)

Con registro:

B	0	6	1	1	4	6
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de:

DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director(a) de Tesis

DR. FRANCISCO ARREGUÍN SÁNCHEZ

DR. VÍCTOR MANUEL GÓMEZ MUÑOZ

DRA. AIDA MARTÍNEZ LÓPEZ

DR. JOSÉ LUIS CASTRO ORTIZ

DRA. MARÍA TEREZA CAVAZOS PÉREZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. RAFAEL CERVANTES DUARTE



**IPN
CICIMAR
DIRECCION**



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 28 del mes Mayo del año 2010
el (la) que suscribe MC. MIRTHA ORALIA ALBÁÑEZ LUCERO alumno(a) del
Programa de DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS
con número de registro B061146 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS
manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. FRANCISCO ARREGUÍN SÁNCHEZ

y cede los derechos del trabajo titulado:

"DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MERO (*Epinephelus morio*)

DEL BANCO DE CAMPECHE, MÉXICO"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: farregui@ipn.mx - mirtha.lucero@gmail.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

MC. MIRTHA ORALIA ALBÁÑEZ LUCERO

nombre y firma

DEDICATORIA

A mi *madre* por ser mi fortaleza y ejemplo a seguir.

A *Juan Pedro* por su amor, ayuda y comprensión.

A *Camila*, un gran regalo de Dios, que vino a cambiar mi vida.

A mis *hermanas* y *sobrinos* gracias por todo el amor, apoyo y los buenos ratos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR) y al Instituto Politécnico Nacional (I.P.N.) por darme la oportunidad de crecer profesionalmente, dándome el apoyo para la realización de mis estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca número 97741 durante la realización de este trabajo.

Al Comité Técnico de Prestaciones a Becarios (COTEPABE) por el apoyo recibido para la realización de una estancia de investigación como parte de la realización de este trabajo.

Al Dr. Francisco Arreguín-Sánchez por la confianza, el apoyo, asesorías y consejos tanto profesional como personalmente, siempre gracias.

A los miembros del comité, Dra. Tereza Cavazos Pérez, Dra. Aída Martínez López, Dr. Víctor Manuel Gómez Muñoz, Dr. José Luis Castro Ortiz y Dr. Ángel Rafael Jiménez Illescas, por sus observaciones para mejorar este trabajo.

A un gran amigo que me ha apoyado mucho y siempre está disponible a mi ayuda, Gerardo mil gracias.

A Humberto por sus consejos profesionales pero sobretodo personales, gracias.

A las personas que a pesar de todo me han brindado su amistad, gracias.

CONTENIDO

	página
Índice	i
Lista de figuras y tablas	ii
Glosario	vii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	xi
I. Introducción	
I.1 Antecedentes	1
I.2 Justificación	3
I.3 Hipótesis	4
I.4 Objetivos	4
II. Materiales y Métodos	
II.1 Redes Neuronales Artificiales y Mapa Auto-Organizado	6
II.2 Caso de Estudio (incluye selección del mero área de estudio y bases de datos)	14
II.3 Estrategia de Investigación	22
III. Resultados	
III.1 Distribución del mero (<i>E. morio</i>) en relación con tipos de fondo	24
III.2 Distribución del mero (<i>E. morio</i>) en relación con temperatura	36
III.3 Distribución del mero (<i>E. morio</i>) en relación con vientos y profundidad	44
III.4 Modelo integrado de distribución espacial del mero (<i>E. morio</i>)	55
IV. Discusión	61
V. Conclusión	68
VI. Literatura Citada	71
VII. Anexos	81

Lista de figuras y tablas

Figura	página
1. Estructura de la red neuronal de Kohonen.....	8
2. Topología de una red SOM	11
3. Distribución espacial de la operación de la flota pesquera de mero	17
4. Área de estudio dividida por zonas (cuadrantes de medio de grado por medio grado), incluyendo los diversos tipos de sustrato	20
5. Porcentaje de tipos de sustrato. Porcentaje de los tipos de sustrato más representativos.....	21
6. Matriz-U obtenida de la salida del proceso de modelado del SOM representado la distribución especial del mero en el Banco de Campeche.....	28
7. Mapas de matriz-U obtenidos del modelado de la distribución espacial del mero en Campeche, con relación a los trece tipos de fondo.	29
8. Mapa de matriz-U, como resultado del SOM de acuerdo a la relación con el hábitat y al proceso ecológico.	30
9. Distribución de los tipos de sustrato en la plataforma continental del Banco de Campeche (García, 1980). Los cuadros representan las áreas de medio grado por medio grado de la zona de estudio	31

10. Distribución de juveniles de <i>E.morio</i> , resultado del análisis del SOM con abundancia relativa, y tipos de sustratos	32
11. Distribución de preadultos de <i>E.morio</i> , resultado del análisis del SOM con abundancia relativa y tipos de sustratos	33
12. Distribución de adultos de <i>E.morio</i> , resultado del análisis del SOM con abundancia relativa y tipos de sustratos	34
13. Relación entre abundancia relativa de estadios de desarrollo del mero <i>E. Morio</i> y la temperatura superficial del mar, por estación, para el periodo 1973 to 1977	38
14. Mapa del SOM representando las principales relaciones entre las abundancias de los estadios de desarrollo del mero (<i>E. morio</i>) con la temperatura. Se observa la relación inversa entre la abundancia de adultos y la temperatura	39
15. Distribución del mero (<i>E. morio</i>) en la plataforma continental de Yucatán en función de la temperatura, expresada como anomalía	41
16. Distribución de la CPUE del mero (juveniles, preadultos, adultos) con relación a la profundidad del mar	46
17. Matriz-U de 5x5 unidades (resultado SOM) abundancia relativa con relación a la dirección y velocidad del viento	47
18. Promedio de la dirección y velocidad del viento por cada BMU	50
19. Promedio de la dirección y velocidad del viento de las 25 BMUs	51
20. Matriz-U de 5x5 unidades (resultado SOM) abundancia relativa con relación a la profundidad	52

21. Mapas de matriz-U obtenidos del modelado de la distribución espacial del mero en Campeche, con relación a cuatro de los principales factores ambientales.....	57
22. Relación entre la distribución de los diferentes estadios de vida del mero (panel derecho) con la temperatura Superficial del mar (panel izquierdo arriba) y vientos (panel izquierdo abajo). Nótese como las zonas de mayor concentración de peces coincide con las zonas de convergencia de los vientos.....	65

Tabla	página
1. Rango de correlación de Spearman de la abundancia del mero (número/día de pesca) con respecto a los tipos de sustrato más frecuentes basado en los resultados del análisis del SOM	27
2. Promedio de CPUE (Juv,Pre,Adu), TSM, número de BMU y número de muestras por BMU	40
3. Rango de correlación de Spearman de la abundancia del mero (número/día de pesca) con respecto a la temperatura superficial del mar basado en los resultados del análisis del SOM	40
4. Promedio de CPUE (Juv,Pre,Adu), dirección y velocidad del viento, número de BMU y número de muestras por BMU	48
5. Correlación de rangos de Spearman de la abundancia relativa del <i>E. morio</i> (número/día de pesca) con respecto a la dirección y velocidad del viento basado en las salidas del análisis del SOM	48
6. Promedio de CPUE (juveniles, preadultos, adultos), profundidad, número de BMU y número de muestras por BMU	49
7. Correlación de rangos de Spearman de la abundancia relativa del <i>E. morio</i> (número/día de pesca) con respecto a la profundidad del mar basado en las salidas del análisis del SOM	49
8. Promedio de CPUE (juveniles, preadultos, adultos), número de BMU, número de muestras por BMU, profundidad , temperatura y dirección y velocidad del viento	59

9. Correlación de rangos de Spearman de la abundancia relativa del <i>E. morio</i> (número/día de pesca) con respecto a las variables que tienen mayor influencia: profundidad del mar, temperatura superficial del mar, velocidad del viento, tipos de fondos basado en las salidas del análisis del SOM	60
---	----

Anexos

Anexo 1. Resultados científicos relacionados con el manejo de las pesquerías.	81
Anexo 2. Publicación en revista ISI: Abundancia de mero en relación con tipo de fondo	86
Anexo 3. Publicación en revista ISI: Análisis de variación espacio-temporal de capturabilidad del mero	94

GLOSARIO

Abundancia Relativa. Cantidad proporcional calculada de los individuos de una especie con respecto al porcentaje observado de la población en un área.

Captura por unidad de esfuerzo (CPUE). Es un índice que representa la cantidad de recurso pesquero en peso capturado por especie (o total), en un tiempo, área, con un tipo de arte de pesca, en función del esfuerzo invertido en la extracción.

Best-Machine Unit (BMU). Es el nodo en la serie de datos de entrada, conocido como unidad de mejor ajuste, el cual es declarado como “ganador” de la competencia y es localizado en el centro de un grupo de nodos vecinos (vecindad).

Error de cuantización (ϵ_q). Corresponde a la distancia promedio entre el vector de entrada del conjunto de prueba y el total de (BMUs) correspondientes.

Fase de ruda (ordenamiento). Primera fase realizada durante el entrenamiento en el algoritmo del mapa auto-organizado (SOM), cuyo propósito es respetar la topología de la red durante el ordenamiento, es decir, los vectores de pesos son colocados ordenadamente en la red tomando en cuenta la tasa de aprendizaje y la función de vecindad.

Fase de reajuste (convergencia). Segunda fase en el entrenamiento en el algoritmo del SOM, donde es necesario el reajuste de las características del mapa, proporcionando una cuantificación estadística precisa (minimizar el criterio óptimo de calidad) en el espacio de entrada.

Inicialización lineal. Las coordenadas de las unidades iniciales son colocadas regularmente en el subespacio de la distribución inicial X , de manera que las distancias entre los vecinos directos es la misma que ocupa en el subespacio de la red.

Inicialización aleatoria. A cada unidad se le asigna un vector de código al azar en el subespacio de la distribución inicial X .

Redes Neuronales Artificiales (RNA). Es un modelo computacional inspirado en redes neuronales biológicas que se consideran como un sistema de

procesamiento de información mediante la adaptación de sus parámetros, basado en el aprendizaje de acuerdo a los datos de entrada.

SOM. Self-Organizing Maps. Algoritmo de redes neuronales el cual hace uso de la regla de aprendizaje no supervisado (auto-organizado), por lo que es capaz de realizar análisis tipo *clusters*, representar densidades de probabilidad y proyectar un espacio de alta dimensión sobre otro de dimensión menor.

Surgencia. Movimiento vertical de agua más profunda, rica en nutrientes, hacia la superficie.

Funciones Kernel. Es una función simétrica que tiene como entrada dos datos (que pueden ser vectoriales) y produce un número real que mide la similitud entre estos datos. Estos métodos no se limitan sólo a los datos numéricos, dado que se pueden aplicar siempre y cuando la similitud entre los diferentes objetos se pueda medir como un escalar. Los métodos *kernel* se basan en el marco matemático de los espacios de Hilbert generados por *kernels* (RKHS).

“Distribución espacial del mero (*Epinephelus morio*) del Banco de Campeche, México”

RESUMEN

Matemáticamente existen técnicas que se usan en el análisis y exploración de grandes bases de datos las cuales permiten detectar patrones de comportamiento de manera análoga a un proceso de aprendizaje automático; a la gestión y almacenamiento de bases de datos, y al procesamiento en paralelo de la información dando soporte a la toma de decisiones. Una de estas técnicas son las Redes Neuronales Artificiales (RNAs), las cuales son métodos de procesamiento numérico que se pueden definir como modelos matemáticos compuestos por un gran número de elementos procesales, organizados en niveles y jerarquías que analizan la información por medio de un estado dinámico, agrupándoseles algunas veces con los métodos de clasificación. Los modelos basados en RNAs pueden manejar simultáneamente tanto datos continuos y discretos, como lineales y no lineales. El presente documento contiene el análisis y desarrollo de la aplicación del algoritmo de Kohonen, mapas auto-organizados (SOM, por sus siglas en inglés) al análisis de la distribución espacial del mero (*Epinephelus morio*) del Banco de Campeche. El SOM es uno de los algoritmos de redes neuronales usados en el manejo de bases de datos que a través de diversos mapas proyectan grupos formados con los datos evaluados y que se relacionan entre sí; siendo útiles en la toma de decisiones de acuerdo al área en cuestión. Los resultados obtenidos demostraron que los mapas auto-organizados son una herramienta útil para el análisis, visualización y reconocimiento de patrones de la distribución y abundancia del mero *E. morio* en el Banco de Campeche. El análisis se basó en la distribución de la abundancia de la población en relación a los tipos de sustrato, la temperatura superficial del mar y vientos (dirección y velocidad) utilizando observaciones de 325 registros en el Banco de Campeche (1973-1977, con cobertura de más del 80% de la distribución espacial y 65% de las abundancias relativas de *E. morio*). Se encontró que la presencia de juveniles y preadultos está asociada a los sustratos de arena y concha, mientras que

los adultos a los sustratos compuestos por coral y arena-coral; además, se identificó una zona de transición donde fue posible encontrar organismos de diversas tallas y edades, con influencia significativa de las variaciones en la temperatura e intensidad de vientos. Los resultados confirman el conocimiento empírico que se tenía del comportamiento de la especie en cuanto a la presencia de una agregación reproductiva que ocurre a finales de invierno su posterior dispersión a los largo de la plataforma continental de Yucatán. Desde el punto de vista metodológico, y una vez probada su aplicabilidad al caso de estudio se discuten diferentes aspectos relevantes sobre la aplicación de esta herramienta para la obtención y convergencia hacia resultados aceptables. Entre los aspectos más relevantes destacan la adecuada manipulación de las diferentes opciones del algoritmo en conjunto con la participación de un experto en el tópico analizado que supervise la interpretación correcta de las salidas del modelo, lo cual a su vez le da un importante sustento de confiabilidad a los resultados.

“Spatial Distribution of Red Grouper (*Epinephelus morio*) at Campeche Bank, México”

ABSTRACT

Mathematically there are techniques that are used in the analysis and exploration of large databases which can detect patterns of behavior in a way analogous to a machine learning process, the management and storage of databases, and parallel processing giving information to support decision making. One of these techniques are Artificial Neural Networks (ANNs), which are numerical processing methods that can be defined as mathematical models consisting of a large number of procedural items, organized into levels and hierarchies that process information through a dynamic state, even sometimes grouped with the methods of classification. ANNs-based models can simultaneously handle both continuous and discrete, and linear and nonlinear. This thesis is based on the analysis and development of tests using the Kohonen's self-organizing maps (SOM), to the analysis of the spatial distribution of red grouper (*Epinephelus morio*) from the Campeche Bank. The SOM is a neural network algorithms used in the management of databases across different project groups formed to map the data evaluated and which are interrelated, being useful in making decisions according to the area question. The results showed that self-organizing maps are a useful tool for analysis, visualization and recognition of patterns of distribution and abundance of *E. morio* in the Campeche Bank. The analysis was based on the distribution of population abundance in relation to the types of substrate, temperature and sea surface winds (direction and intensity) using observations of 325 records in the Campeche Bank (1973-1977, with coverage made more than 80% of the spatial distribution and 65% of the relative abundances of *E. morio*). It was found that the presence of juveniles and pre-adults is associated with substrates of sand and shell, while adults to substrates composed of coral reefs and sand, also identified a transition zone where it was possible to find organisms of different sizes and age, with significant influence of variations in temperature and wind intensity. The results confirm the empirical knowledge that it was the behavior of the species on the

presence of a reproductive aggregation occurs in late winter to spread further along the continental shelf of Yucatan. From the methodological point of view, and once tested its applicability to the case study discussed various aspects relevant to the application of this tool for the collection and convergence to acceptable results. Among the most important aspects include the proper handling of different options of the algorithm in conjunction with the participation of an expert on the topic analyzed to monitor the correct interpretation of the model output, which in turn gives an important support for reliability results.

I. Introducción

I.1 Antecedentes

A lo largo de los años se han realizado una gran variedad de estudios referentes a recursos naturales para mejorar el bienestar del ser humano, esencialmente para satisfacer las necesidades alimenticias. Muchos de estos estudios se han enfocado a la explotación de recursos marinos, por lo que se han desarrollado modelos para el monitoreo, evaluación, representación de procesos dinámicos y conservación, incluyendo su interacción con el medio ambiente. Desde el punto de vista cuantitativo, y a pesar del gran número de modelos matemáticos propuestos para el análisis de las ciencias pesqueras desde la década de los 40, existe cada vez mayor necesidad de conocimiento detallado de las pesquerías, dando lugar a nuevos enfoques de investigación. Estos nuevos enfoques tienden a abordar problemas de precisión y complejidad dada la pretensión de su utilidad para fines de manejo. Entre ellos y de manera particular se han desarrollado aquellos capaces de aprovechar la tecnología computacional, y capaces de simular la inteligencia humana y su aplicación a la solución de diversos problemas, incluso la posibilidad de modelar eventos naturales y en un momento dado predecirlos. Estos modelos se basan en el desarrollo de técnicas utilizadas principalmente para el análisis y exploración de grandes cantidades de datos con el objeto de detectar patrones de comportamiento; siendo una de estas herramientas las redes neuronales artificiales (RNA), a través de las cuales se pueden obtener resultados optimizados y confiables, ya que uno de sus objetivos es simular la inteligencia humana.

Desde un punto de vista metodológico, la aplicación de las RNAs como herramienta de análisis se ha venido generalizando a los más diversos tipos de datos y en los últimos años se han implementado algoritmos para modelar comportamientos oceánicos o atmosféricos que han proporcionado información relevante para la representación de patrones de variabilidad ambiental (Cavazos, 2000; Hsieh, 2000; Cavazos *et al.*, 2002; Albañez-Lucero, 2002; Andrade de Bem *et al.*, 2003). También se

han aplicado en algunos recursos pesqueros; entre los cuales puede mencionarse el análisis desarrollado por Drumm *et al.* (1999) en el que discuten la habilidad que tiene una RNA, en combinación con sistemas de información geográfica y datos ecológicos, para el modelado de patrones espaciales y predicción del hábitat preferencial del pepino de mar (*Holothuria leucospilota*) en Rarotonga, Islas Cook.

Huse y Ottersen (2003) utilizaron una RNA con series de tiempo de biomasa del stock desovante de bacalao, biomasa del arenque y del capelán, y la temperatura como factor ambiental determinante, con el fin de predecir el reclutamiento y el desarrollo de biomasa de bacalao del Nordeste del Ártico. Nishida & Komatsu (1998) utilizaron datos de captura por unidad de esfuerzo (CPUE) de la pesquería palangrera japonesa, la talla de captura de los diferentes recursos y algunas variables ambientales como el Índice Anual de la Oscilación del Sur y la temperatura superficial del mar y demuestran que las RNA podrían reproducir una tendencia aproximada de la CPUE. Dreyfus-León (1999) desarrolló un modelo basado en RNA que imita el comportamiento del pescador para la búsqueda del recurso (simula la toma de decisión del pescador). Así mismo, Dreyfus-León & Kleiber (2001) proponen un modelo espacial de la pesquería del atún aleta amarilla en el Pacífico Oriental basado en el comportamiento individual de los movimientos de las embarcaciones de la flota representando la decisión de dónde ir a pescar.

I.2 Justificación

Una RNA es un modelo computacional, inspirado en redes neuronales biológicas, que pueden ser consideradas como un sistema de procesamiento de información mediante la adaptación de sus parámetros, basado en el aprendizaje de acuerdo a los datos de entrada. Estos modelos son particularmente útiles para el reconocimiento de patrones, incluso algunas veces se incluyen entre con los métodos de clasificación. Entre sus características están la adaptabilidad y robustez, es decir, un buen manejo de datos multidimensionales, aunque es necesaria una buena interpretación para la gran cantidad de datos que maneja. Así mismo destaca su capacidad de generalización, de manejo de variables cuantitativas y cualitativas de manera simultánea, la capacidad de reconocer patrones con ruido, distorsionados o incompletos y tolerancia a fallas. A pesar de estas grandes ventajas una RNA no tiene la capacidad de determinar relaciones lineales entre variables, como lo tiene la estadística multivariada, además de que le resulta difícil la interpretación de resultados cuando el número de registros en la base de datos de entrada es reducido.

Tomando en cuenta las ventajas de las RNAs antes mencionadas, y considerando los diversos factores que pueden influir en la distribución y abundancia (dinámica espacial) de los recursos pesqueros, y que la información sobre dinámica espacial es cada vez más relevante en el manejo de recursos, es necesario probar el uso y aplicación de las RNA como herramienta que permita identificar patrones de distribución espacio-temporal de las distintas especies, así como de los factores ambientales que influyen en estos comportamientos. Por lo tanto, uno de los objetivos de esta tesis es probar una herramienta que permita sintetizar diversas fuentes de variación que permita describir y comprender procesos que gobiernan la distribución de las especies. De esta manera se propone la aplicación de un modelo basado en RNAs como herramienta opcional para la representación de la distribución espacial del mero, *Epinephelus morio* en la plataforma continental de Yucatán.

Desde el punto de vista académico, constituye una aportación novedosa al estudio de la pesquería de mero en la plataforma continental de Yucatán, a la vez que aporta conocimiento no existente sobre la distribución espacial del recurso.

Un tipo de RNA que en los últimos años se ha usado con bastante éxito es la red neuronal de Kohonen denominada mapas auto-organizados (Self-Organizing Maps, SOM, Kohonen, 2001) la cual es, en algunos aspectos, análoga al análisis de grupos. Es decir, se utiliza para clasificar en forma no lineal la interacción de un grupo de variables que se asocia con un fenómeno en particular. Los SOM se basan en un algoritmo de aprendizaje no supervisado que se usa para clasificar y proyectar datos multidimensionales en espacios de pocas dimensiones (1D o 2D). Los SOM se han aplicado en áreas tales como energía eléctrica (El-Sharkawi, 1993; Carpinteiro *et al.*, 2000); lingüística (Pedrycz & Card, 1992); análisis, monitoreo y control (Simula *et al.*, 1996); aplicaciones de ingeniería (Kohonen *et al.* 1996); finanzas (Deboeck, 1998); y diagnósticos climatológicos (Cavazos, 1999, 2000), obteniéndose resultados muy confiables en cuanto a la descripción, clasificación y evolución de fenómenos.

I.3 Hipótesis

Las herramientas de análisis de redes neuronales, particularmente las basadas en Mapas Auto-Organizados (SOM, por sus siglas en inglés) son aplicables al estudio y entendimiento de la distribución espacial de especies marinas, en nuestro caso particular, al mero, *Epinephelus morio*, del Banco de Campeche, México.

I.4 Objetivo

Explorar la aplicación de herramientas de redes neuronales, particularmente los Mapas Auto-Organizados (SOM), para caracterizar la distribución espacial de organismos marinos, seleccionando al mero (*Epinephelus morio*) del Banco de Campeche, México, como caso de estudio.

Objetivos específicos

- a. Identificar en la literatura científica las variables de mayor relevancia que determinan la distribución espacial del mero *E. morio* en el Banco de Campeche, México.
- b. Explorar la resolución más apropiada para el tratamiento de las diferentes variables identificadas en el inciso anterior para la aplicación del algoritmo del SOM al análisis de la distribución espacial del mero *E. morio* en el Banco de Campeche, México.
- c. Mediante el SOM, identificar las relaciones significativas entre distribución espacial de la abundancia del mero *E. morio* con las diferentes variables ambientales.
- d. Obtener un modelo multivariable basado en el SOM que represente la distribución espacial de la abundancia del mero *E. morio* del Banco de Campeche, México, y que permita la interpretación de los procesos biológicos y ecológicos asociados.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

II.1 Redes Neuronales Artificiales y Mapa Auto-Organizado (SOM)

Las Redes Neuronales Artificiales (RNAs) son sistemas computacionales cuya estructura emula el proceso biológico del aprendizaje humano, sin pretender modelar exactamente el comportamiento fisiológico del cerebro humano. Estos sistemas modelan matemáticamente un problema para posteriormente formular una solución mediante un algoritmo. Las RNAs basan su diseño en unidades de procesamiento de información, llamadas neuronas o nodos, que realizan operaciones simultáneamente, es decir, de forma paralela (Pajares & Santos, 2006). Cada nodo recibe como información de entrada una serie de datos numéricos x_i , la cual forma el nivel o capa de entrada que es asociada, a través de una multiplicación, a un vector de referencia (vector de pesos o ponderación) w_j , esto para definir si el nodo se activa o no por medio de la importancia relativa de cada dato de la entrada total:

$$u_k = \sum_{i=1}^m x_i + w_{ji} \quad (1)$$

La activación de un nodo depende de si la entrada total supera un cierto umbral, para lo que se aplica una *función de activación* ($f(\cdot)$) sobre la sumatoria de los datos de entrada y sus respectivos pesos (u_k), esta función puede ser, por ejemplo, una función tipo escalón o sigmoidea, para obtener una respuesta y_k (nivel o capa de salida):

$$y_k = f(u_k) \quad (2)$$

En una RNA la propiedad de mayor importancia es su habilidad para *aprender* a partir de los datos de entrada y a través de procesos interactivos para mejorar su desempeño. Este concepto se resume en la definición de *aprendizaje* de Mendel & McLaren (1970):

“El *aprendizaje* es un proceso en el que los parámetros de una red neuronal se adaptan a través de la simulación iterativa del entorno en el que se incluye la red. El tipo de aprendizaje está determinado por la manera en la que los parámetros cambian”.

Tomando como base la definición anterior, Haykin (1998) puntualiza una secuencia de eventos:

1. Una RNA simula un entorno y los compara con datos observados (o con los mismos datos de entrada),
2. Una RNA cambia sus parámetros libres como resultados de esta simulación y comparación.
3. Una RNA responde de una manera nueva para el entorno debido a los cambios que se producen en su estructura interna.

Los métodos de aprendizaje más usados en las RNAs son: supervisados y no supervisados. El aprendizaje supervisado es similar a enseñarle algo a una persona, es decir, está basado en un proceso de adaptación de acuerdo a la salida deseada, mientras que el no supervisado (auto-organizado) no requiere de un instructor, ya que se auto-organiza de acuerdo a sus datos de entrada.

Los modelos basados en RNA pueden manejar simultáneamente tanto datos continuos y discretos como lineales y no lineales. Entre las redes más usuales están las perceptrón multicapas, retropropagación y mapas auto-organizados (Self-Organizing Maps, SOM) de Kohonen (Kohonen *et al.*, 1995; Adriaans *et al.*, 1996), siendo este último el algoritmo de RNA propuesto para el estudio de la distribución espacial de la abundancia del mero, *E. morio*, del Banco de Campeche, México. Este tipo de red neuronal hace uso de la regla de aprendizaje no supervisado (auto-organizado), por lo que es capaz de realizar análisis de agrupamientos (*clusters*), representar densidades de probabilidad y proyectar un espacio de alta dimensión sobre otro de dimensión menor. Durante el proceso de aprendizaje una red auto-organizada debe descubrir por sí misma rasgos comunes, regularidades, correlaciones o categorías en los datos de entrada, e incorporarlos a su estructura. El SOM hace uso del aprendizaje competitivo, es decir, los nodos compiten entre sí con el fin de llevar a cabo una tarea dada. En este

tipo de aprendizaje, cuando se presenta cada nuevo vector de entrada se pretende que sólo uno de los nodos se active, resultando finalmente en un “nodo ganador” y el resto serían no activos o “inhibidos”. Un criterio lógico para seleccionar un nodo ganador podría ser la proximidad, así el nodo más próximo a la entrada actual sería el vencedor. En este contexto la distancia euclidiana se utiliza como criterio, y cuanto más próximos estén los vectores mejor será el resultado. Este criterio es también sensible a la magnitud de los vectores de entrada, por lo que los datos deben ser normalizados para evitar sesgos.

El SOM se define como un arreglo de nodos organizados de dos dimensiones, en el que cada vector de entrada $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ se asocia a un vector de referencia (vector de pesos ó ponderación) $w_j = [w_1, w_2, \dots, w_{ji}]^T$, el cual es diferente para cada nodo de entrada pero de la misma dimensión (Fig. 1). Cada nodo se conecta con los nodos adyacentes de acuerdo a una relación de vecindad y a la topología de la red, la cual puede ser rectangular o hexagonal. Así el propósito del SOM es estimar los valores de w_j para preservar las propiedades topológicas de la entrada de datos en la capa de salida manteniendo la distancia relativa entre los patrones de entrada.

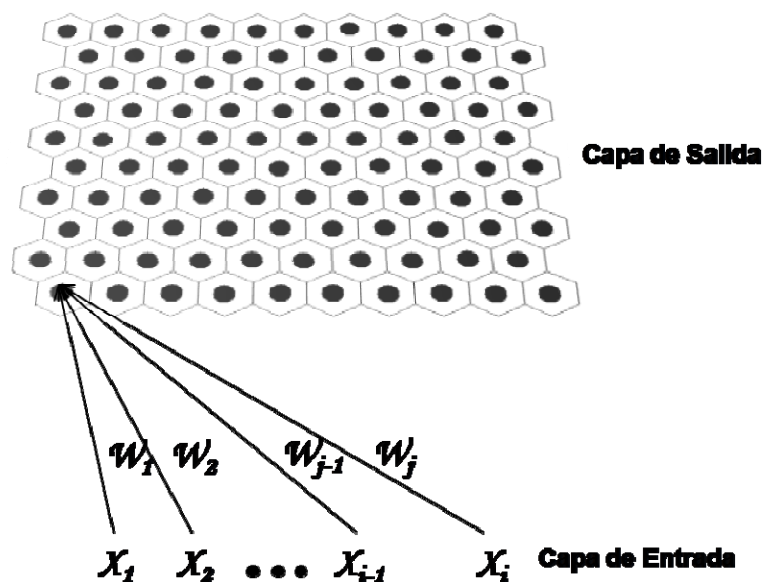


Figura 1. Estructura de la red neuronal de Kohonen (basada en Haykin, 1998).

El algoritmo del SOM antes de iniciar el proceso principal, inicializa el vector de pesos, esto lo hace a través de un generador de números aleatorios, de manera lineal o secuencialmente. Una vez inicializada la red, el algoritmo continúa por medio de tres procesos esenciales (Haykin, 1998):

1. *Competencia (entrenamiento)*. Para cada vector de entrada (patrón de entrada) los nodos de la red calculan sus respectivos valores a través de una función de discriminantes, que se basa en la competencia entre los nodos. El nodo con mayor valor de la función de discriminante es conocido como unidad de mejor ajuste (“best-matching unit”, BMU, por sus siglas en inglés) y es declarado como “ganador” de la competencia y es localizado en el centro de un grupo de nodos vecinos (vecindad). El criterio de BMU está basado en maximizar el producto punto $w_j^T x$, que matemáticamente es equivalente a minimizar la distancia Euclidiana entre los vectores x y w_j (Haykin, 1998; Carniel *et al.*, 2009):

$$|x - w_c| = \min_i |x - w_i| \quad (3)$$

donde w_c corresponde al valor de peso del nodo “ganador”.

2. *Proceso Cooperativo*. El nodo ganador determina la localización espacial de la vecindad de nodos y su topología, definida por una función de vecindad $h_{ci}(t)$ como sigue (Haykin, 1998; Hollmén, 1996):

$$h_{ci}(t) = h(d, t) \propto \quad (4)$$

donde $h(d, t)$ corresponde a la función de vecindad (gaussiana, sigmoideal, escalón, etc.).

3. *Proceso Adaptativo*. Es el último proceso en la auto-organización del SOM y consiste en la actualización del vector de pesos y de acuerdo al formalismo de

tiempo discreto, dado el vector de pesos $w_j(t)$ del nodo j a un tiempo t , la actualización del vector de pesos $w_j(t + 1)$ en un tiempo $t + 1$ es definido por (Kohonen, 2001; Haykin, 1998):

$$w_j(t + 1) = w_j(t) + \alpha(t)h_{ci}(t) (x - w_j(t)) \quad (5)$$

En esta parte del algoritmo se realizan dos fases: *Ordenamiento* y *Convergencia*. En la *fase de Ordenamiento* es donde los vectores de pesos toman sus lugares de acuerdo a la estructura del algoritmo del SOM, mediante la tasa de aprendizaje y la función de vecindad:

La tasa de aprendizaje es una función que decrece con el tiempo. Las funciones más utilizadas son la función lineal al tiempo (ec. 6) y la otra es inversamente proporcional al tiempo t (ec. 7). La tasa se inicia con un valor de 0.1 y debe reducirse gradualmente de acuerdo al parámetro alfa en las siguientes ecuaciones.

Los valores para alfa, en una función lineal, se modifican de acuerdo con:

$$\alpha(t) = \alpha(0)(1.0 - t/r\text{len}) \quad (6)$$

y en una función inversa:

$$\alpha(t) = C \alpha(0)/(C + t) \quad (7)$$

donde C puede ser, por ejemplo $C = r\text{len}/100$. $r\text{len}$ es el número de iteraciones durante el entrenamiento (Kohonen, *et al.*, 1995, Albáñez-Lucero, 2002).

Después de la fase de *Ordenamiento* se necesita llevar a cabo la *fase de Convergencia* para afinar los resultados dándole una precisión estadística de acuerdo al espacio de entrada, donde la tasa de aprendizaje tiene valores del orden de 0.01 a 0.

El SOM tiene tres formas de visualizar los resultados: a) la matriz de distancia unificada (matriz-U), b) el mapa de Sammon y c) planos de componentes (Ultsch & Siemon, 1990). La *matriz-U* visualiza la distancia entre los nodos, formando los grupos de datos análogos, que en la versión para DOS se muestra en tonalidades de grises o bien para la versión de Matlab mediante un color determinado. La figura 2 indica la topología de la matriz-U que puede ser rectangular o hexagonal, donde cada uno de los nodos conectados entre sí toma la forma de la topología seleccionada. Por otra parte los *mapas de Sammon* representan un mapeo no lineal de un conjunto de puntos de entrada en un plano tratando de preservar la distancia relativa entre los puntos de entrada, donde la salida óptima será aquella que represente la red más extendida; y la representación de *planos de los componentes* visualiza los valores de los componentes relativos del vector de pesos del SOM, donde cada plano muestra la distribución de un componente del vector de pesos representando la similitud entre ellos mediante un color determinado (Hollmén, 1996; Albañez-Lucero, 2002).

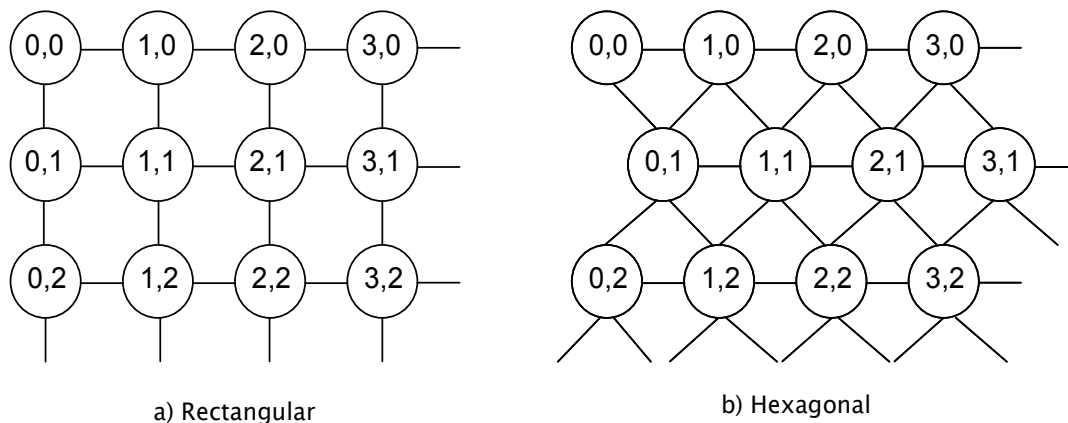


Figura 2. Topología de una red SOM: (a) Rectangular, (b) Hexagonal. Los números indican la posición x,y del nodo en una matriz bidimensional.

El algoritmo del SOM que se usó fueron basados en la versión para DOS (Kohonen *et al.*, 1995) y la versión para Matlab (SomToolBox; Vesanto *et al.*, 2000).

Para realizar la primera parte del análisis (Sección III.1) se usó la versión 3.1 para DOS del SOMP_PAK (Kohonen *et al.*, 1995). Se optó por organizar la base de datos, como una primera opción, manteniendo como registros independientes en cada cuadrante cada tipo diferente de sustrato (1240 registros); se probaron las dos funciones de inicialización del SOM: lineal (default) y aleatoria, y los parámetros usados para las dos fases de entrenamiento (tasa de aprendizaje) se encontraron en los rangos que propone Simula *et al.* (1996): Fase ruda (ordenamiento) $\alpha(t_0) = 0.3, \dots, 0.99$ y la Fase de reajuste (convergencia) $\alpha(t_0) = 0.01, \dots, 0.1$. Asimismo, se realizaron pruebas con las funciones de vecindad: burbuja y gaussiana y la topología fue hexagonal. En cuanto al tamaño de la red que genera el SOM se hicieron pruebas con matrices de diversos tamaños (15x15, 10x15, 11x11, 10x10, 6x6 y 5x5).

A partir de la segunda parte de estudio, se hizo con el SOM versión para Matlab (Vesanto *et al.*, 2000), esto debido a que esta versión ofrece mejor calidad en los resultados en cuanto a visualización de imágenes (matriz-U, histogramas, etc.). Después de hacer varias pruebas se optó por una matriz-U de forma rectangular, de 5x5, inicialización lineal y una función de vecindad gaussiana.

Sobre la base de datos, ésta se dividió en tres conjuntos; el primero se utiliza para la fase de entrenamiento de la red; el segundo, para verificación y el tercero para la modelación propiamente dicha. El tamaño de cada conjunto y la selección del conjunto particular a usar para cada fase son definidos de manera aleatoria. Lo que se espera es que cada conjunto esté compuesto de información contrastante conteniendo la amplitud completa de los rangos de variación de las variables utilizadas y que no estén sesgadas. Así por ejemplo, a pesar de que en cada etapa sea diferente el número de datos de entrada, los patrones dominantes identificados en cada sección serán

consistentes. Los conjuntos de datos que se usaron para las tres etapas del SOM fueron seleccionados de manera arbitraria, tratando de tener en cada conjunto todos los posibles eventos que se presentaron.

La razón de cambiar el tamaño del mapa del SOM (de 10x15 en tipos de fondos a 5x5 en otros análisis) es debido al mejor contraste de los eventos con el segundo tamaño de matriz-U. Como se mencionó anteriormente la prueba de las diferentes opciones que ofrece el SOM para resolver el modelo (por ejemplo, inicialización lineal vs. no-lineal, diferentes funciones de vecindad, tamaños de matriz, etc.) tiene como objeto la identificación, más clara posible, de los patrones de los procesos a modelar; en este caso, que los patrones observados fueran claramente congruentes y lo mas contrastante posible con el conocimiento de la biología y pesquería del mero en el Banco de Campeche. En este sentido no deja de resaltarse la necesidad de opinión del experto en validar estas interpretaciones.

II.2 Caso de Estudio

II.2.1 El mero

El mero (*Epinephelus morio*) descrito originalmente por Cuvier & Valenciennes (1828) es una especie bentónica, de zonas tropicales con temperaturas mayores a los 20 °C. Su rango óptimo, de acuerdo con sus máximas densidades, oscila entre los 20 °C y 25 °C. Se asocia a sustratos duros, arrecifes coralinos y cualquier refugio bentónico, no obstante algunos autores han reportado su presencia en sustratos lodosos (Heemstra & Randall, 1993). Es catalogada como una especie carnívora oportunista no especializada, que consume principalmente crustáceos, peces y moluscos (Brulé & Rodríguez Camche, 1993; Brulé *et al.*, 1994).

Con relación a sus adaptaciones biológicas, el mero tiene la particularidad de ser hermafrodita secuencial con inversión protogínica (Brulé *et al.*, 1999); ésta consiste en la transformación de hembras a machos conforme crecen. Los desoves se llevan a cabo de febrero a abril en la parte oriental del Banco de Campeche, entre los 20 y 90 m de profundidad y se ha registrado una fecundidad promedio de 250,000 huevos por hembra desovante (Giménez *et al.*, 2003). Como los huevos depositados son de vida pelágica y sus larvas planctónicas, las condiciones ambientales son de suma importancia sugiriéndose que los vientos y corrientes pueden ser factores determinantes con influencia directa en la dispersión, distribución y agregaciones de los primeros estadios de vida. Una vez que los juveniles alcanzan tallas entre 0.20 y 0.25 m migran hacia el ambiente bentónico, cerca del sustrato, que será su hábitat preferencial (Moe, 1969).

En cuanto a la pesquería, el reclutamiento del mero se presenta en los primeros dos años de vida, particularmente en la zona costera. Los juveniles y preadultos (de 1 a 3 años) se encuentran en aguas someras cerca de la costa, entre 10 y 30 m de profundidad y los adultos (mayores de 4 años) se encuentran en profundidades hasta de 130 m (Valdés & Padrón, 1980). En el Banco de Campeche, las áreas de concentración de *E. morio* responden a patrones estacionales asociados con la

dispersión de huevos y larvas, el comportamiento reproductivo, los hábitos alimenticios y la disponibilidad de refugios (Burgos-Rosas & Pérez-Pérez, 2006).

El generar conocimiento necesario sobre la distribución y abundancia de los recursos pesqueros es de suma importancia para el manejo del recurso evitando su sobreexplotación. Es por esto que es necesario realizar análisis de las pesquerías tomando en cuenta información biológica, series de tiempo de información pesquera consistente y de calidad, aplicando métodos cuantitativos que sirvan de soporte para la toma de decisiones. Dentro de los métodos aplicados al estudio de las pesquerías se pueden mencionar los modelos dinámicos de biomasa (i.e. basados en el modelo de Schaefer, 1957), incorporando factores ambientales físicos de importancia como pueden ser las anomalías de la producción primaria y de temperatura superficial del mar, o métodos basados en el análisis de la estructura por edades (Gulland, 1965; Pope & Shepherd, 1982, 1985; Deriso *et al.*, 1996, entre otros), los cuales han sido aplicados a un número importante de pesquerías. No obstante estos métodos y aproximaciones, si bien son utilizados con frecuencia, no ofrecen información específica sobre la distribución espacial de los recursos.

II.2.2 La pesquería del mero en el Banco de Campeche

La pesquería de mero (*Epinephelus morio*) es la más importante del Banco de Campeche, México, después del camarón, además de ser la pesquería que mayor producción genera en el estado de Yucatán con el 71% de la captura total (SAGARPA, 2003). En esta pesquería se captura un número importante de especies de peces demersales, donde el mero (*E. morio*) representa la mayor proporción con aproximadamente el 60 % de los desembarques de la flota de mediana altura y el 54 % en la captura de la flota artesanal (ribereña). La pesquería del mero emplea a más del 80 % de la mano de obra dedicada a la pesca, y se considera que cumple con los objetivos del plan sectorial ya que contribuye al desarrollo regional; a la economía de subsistencia; genera divisas por concepto de exportaciones y da ocupación a un

número importante de pescadores, empresarios, empleados de congeladoras, mecánicos, etc. (Burgos *et al.*, 2003).

Burgos-Rosas & Pérez-Pérez (2006) presentan una síntesis del estado del conocimiento del recurso en cuanto a algunos aspectos biológicos y su pesquería, particularmente orientado a aspectos de manejo. Estos autores mencionan que la captura de mero presentó un comportamiento de crecimiento exponencial desde sus inicios en 1947 hasta el año de 1972, cuando se alcanzó el máximo rendimiento de 19,886 t, en donde las flotas mexicanas (mayor y artesanal) contribuyeron con 14,086 t y la flota cubana registró 5,800 t de captura. En el 2001 el rendimiento del Banco de Campeche fue de 7,622 t, y para el 2004 se capturaron 5,551 t. Además, citan que la explotación del *E. morio* se lleva a cabo durante todo el año, tanto en zona costera como en alta mar, donde operan tres flotas: la flota menor mexicana (artesanal), la flota mayor mexicana y la flota cubana (tecnificada), cuyas áreas de operación son diferenciables (Fig.3). La primera está compuesta de 1835 embarcaciones tipo lancha con motor fuera de borda de dos tiempos. La flota industrial mexicana, por su parte, se compone de 515 embarcaciones de mediana altura de no más de 22 m de eslora. La flota cubana, según el convenio de pesca México-Cuba, es de 12 barcos tipo lambda con 6 lanchas chernereras cada uno. Cada flota contribuye de manera significativa con la producción de mero y de especies similares en el Banco de Campeche. El recurso es compartido con Cuba, mediante un convenio firmado en 1976, en el cual México le asigna una cuota anual de captura (Contreras *et al.*, 1993).

Moreno *et al.* (1991) demostraron que hacia fines de los 80 las flotas hacían uso compartido del recurso mero, mostrando superposición en sus áreas de operación, de 52% a 57% entre las flotas industrial y cubana; de cerca de 60% entre la flota industrial y la artesanal, y entre la artesanal y la cubana de 12% y 18%. En la actualidad, se sabe que la superposición entre flotas es mayor (55%, 90% y 53%, respectivamente) observándose una fuerte expansión de la flota artesanal y un incremento general en la vulnerabilidad a la pesca (Giménez *et al.*, 2006).

De acuerdo con la Carta Nacional Pesquera (DOF, 2006) y con Burgos-Rosas & Pérez-Pérez (2006) el estado actual del recurso es de sobrepesca intensa, siendo el

tamaño actual de la población de aproximadamente 30% del tamaño estudiado en los inicios de los 70.

Con excepción de la cuota para la flota cubana (actualmente 3,400 t de peces demersales al año), la pesquería, por parte de las flotas mexicanas, se comporta en la práctica casi como de acceso abierto, con una talla mínima de captura (30 cm de longitud total). Asimismo desde 2003 se implementó una veda de un mes para proteger la agregación reproductiva (DOF, 2006; Burgos-Rosas & Pérez-Pérez, 2006). Sin embargo, el recurso se encuentra en franco deterioro (DOF, 2006; Burgos-Rosas & Pérez-Pérez, 2006).

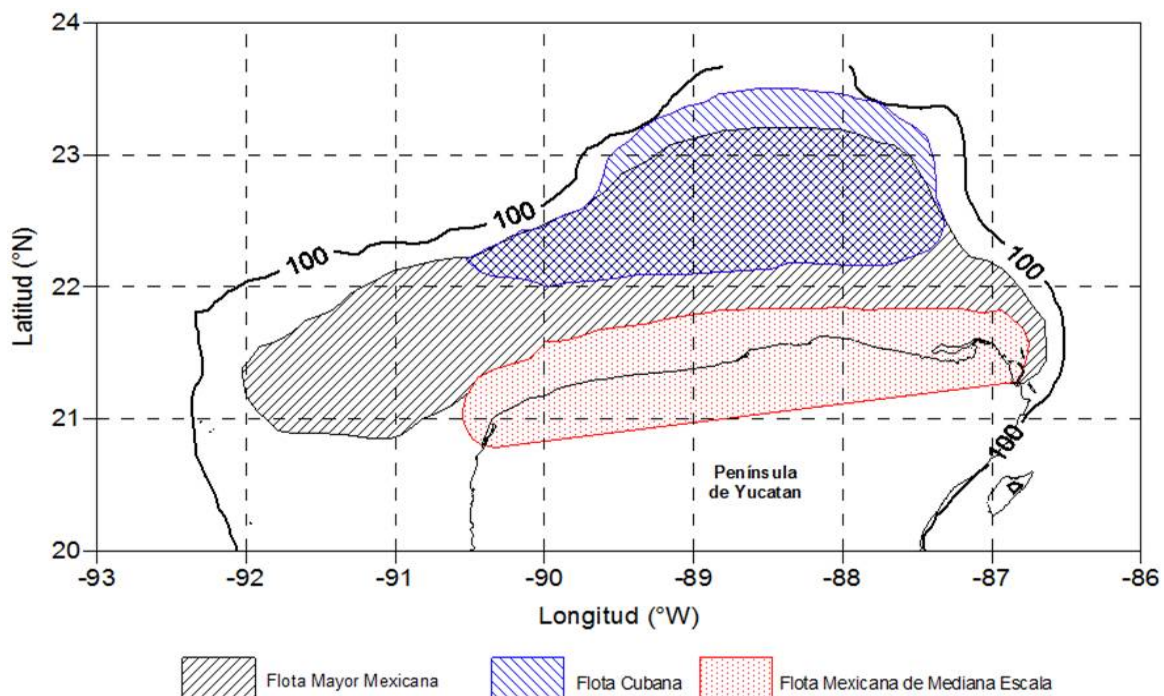


Figura 3. Distribución espacial de la operación de la flota pesquera del mero (Tomada de Moreno *et al.*, 1991).

A partir de los 90, cuando se identificó que la pesquería se encontraba plenamente explotada o con indicios de pesca excesiva se intensificaron los estudios científicos para soportar diversas acciones de manejo. Entre ellos se encuentran trabajos relacionados a los hábitos alimenticios en los diversos estadios del mero (Brulé &

Rodríguez, 1993; Brulé & Dèniel, 1993; Brulé *et al.*, 1994) mientras que Rodríguez (1986) y Giménez-Hurtado *et al.* (2006) realizaron estudios para la estimación de edad y crecimiento, reproducción y fecundidad del mero, respectivamente; y Arreguín-Sánchez *et al.* (1999) y Giménez-Hurtado *et al.* (2005) realizaron investigaciones relativas al reclutamiento. Además se han efectuado estudios detallados sobre capturabilidad, sobre evaluación del estado de la pesquería, sobre el papel del mero en el ecosistema, su interacción con las diversas especies de su entorno, con aproximaciones al manejo basado en el ecosistema (Doi *et al.*, 1981; Arreguín-Sánchez, 1992; 2000; Johnson & Collins, 1994; Moreno *et al.*, 1996; Arreguín-Sánchez *et al.*, 1999; Giménez-Hurtado *et al.*, 2005; Giménez-Hurtado, 2006; Lombardi-Carlson *et al.*, 2002; SEMARNAP, 2000; 2002; 2006).

A pesar de estos esfuerzos de investigación, el nivel de conocimiento actual no ha sido suficiente para evitar el actual estado de sobrepesca, siendo particularmente relevante la ausencia de información sobre la dinámica espacial del recurso la cual es casi inexistente con excepción de la información sobre segregación por tamaños con la profundidad que mencionan algunos autores (Moe, 1969; Seijo, 1986; Arreguín-Sánchez, 1992) y muy recientemente sobre variación de la capturabilidad y patrones de movimiento (López-Rocha, 2008; López-Rocha & Arreguín-Sánchez, 2008). En el Anexo 1 se sintetiza la literatura más relevante respecto a estudios realizados sobre el mero del Banco de Campeche.

II.2.3 Área de estudio

El Banco de Campeche está representado por la plataforma que rodea la Península de Yucatán con un área de 129,499.5 km² aproximadamente, delimitada por la isóbata de 200 metros y la línea de costa. El sustrato está caracterizado por sedimentos constituidos por proporciones variables de calizas, fango, arena y conchas, además de existir algunas irregularidades formadas por cayos y arrecifes coralinos (García, 1980; Fig. 4).

Por su situación geográfica, la plataforma de Yucatán se encuentra en la zona tropical. Bogdanov (1965) sugiere que dentro de las condiciones oceanográficas de importancia, el proceso que domina el ambiente costero en la Península de Yucatán es la Corriente de Yucatán, que fluye con fuerte intensidad por el Caribe y penetra en el Golfo de México a través del estrecho de Yucatán. Esta corriente presenta un flujo de 25 a 35 x 10⁶ m³s⁻¹ y una velocidad promedio de 0.80 ms⁻¹ en la superficie, y hasta de 1.50 ms⁻¹ a una profundidad de 300 m. Por debajo de la Corriente de Yucatán circula una contracorriente que es parte importante del mecanismo de surgencia en el Banco de Campeche (Reyes, 2005). Al respecto, Tamayo (1974) reporta que la corriente que baña las costas de la Península de Yucatán es uno de los ramales que se divide de la Corriente del Atlántico Norte y que viene desde el Mar de las Antillas, y bordea los litorales del Golfo de México hasta llegar a la Península de Florida. El otro ramal, bordea el litoral oriental de Cuba para posteriormente unirse a la Corriente del Golfo en la Península de Florida para juntas dirigirse al Atlántico Norte hacia las Islas Británicas. La región se encuentra en la zona de influencia de los vientos alisios, los cuales traen aire tropical desde el este, donde el periodo de seca es de noviembre a mayo y el de lluvias de junio a octubre.

El régimen hidrodinámico en el Banco de Campeche está determinado por dos tipos de circulación; la primera corresponde al aumento en la velocidad de la corriente de Yucatán (mayor a 3 nudos) y presenta temperaturas bajas cerca del sustrato en la zona oriental del Banco (hasta menos de 20 °C) y los valores de salinidad en la superficie son, en una gran parte de ésta, menores de 32.2 ‰. Las corrientes del segundo tipo corresponden a valores relativamente bajos (menor de 1.5 nudos) donde la temperatura cerca del sustrato es mayor de 22 °C y el área de baja salinidad disminuye (Bessonov *et al.*, 1971).

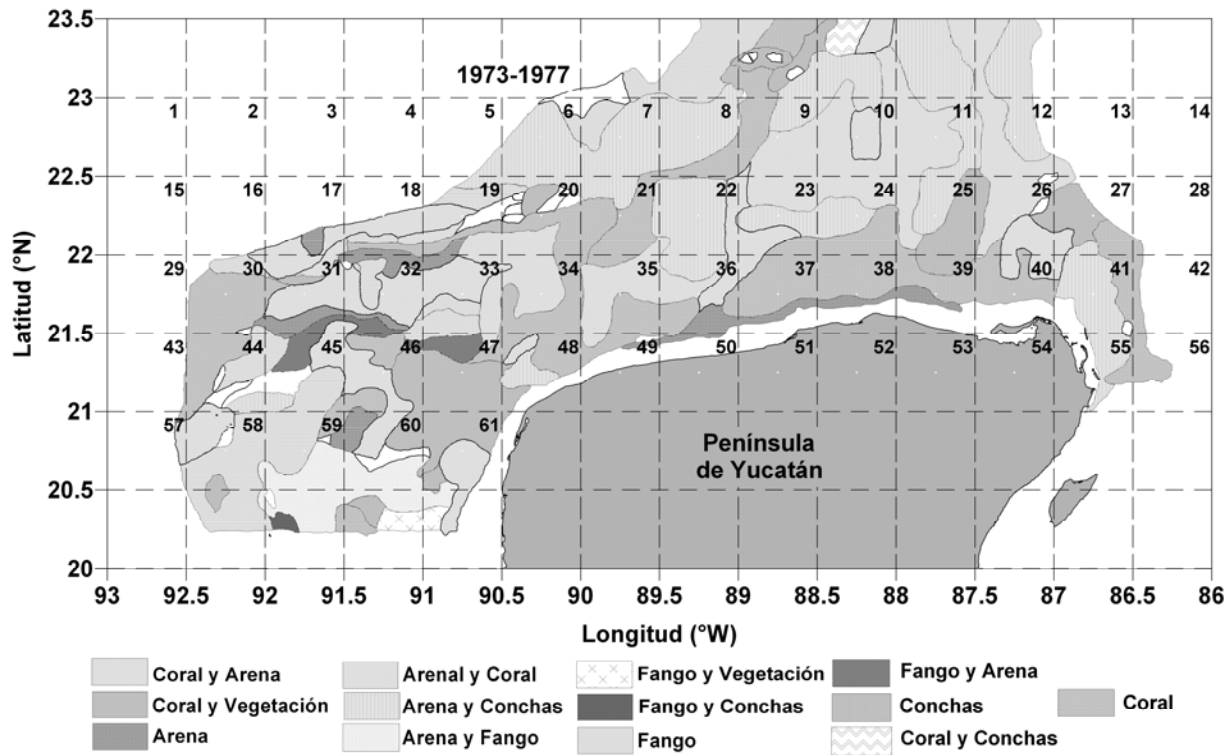


Figura 4. Área de estudio dividida en 61 zonas o cuadrantes (de medio de grado por medio grado), donde se muestran los diversos tipos de sustrato para el periodo 1973-1977.

El patrón anual de la temperatura de la superficie presenta una estrecha relación con la temperatura del aire. Los máximos se obtienen en verano entre 28°C y 29.5°C y mínimos en invierno y principios de primavera con valores entre 25°C y 23.5°C. En el caso de la temperatura del agua del fondo los mínimos corresponden a primavera y verano (Piñeiro *et al.*, 2001).

II.2.4 Base de Datos

Para el desarrollo de la presente investigación se cuenta con una base de datos con capturas de *E. morio* por parte de la flota comercial mexicana de mediana altura durante los años de 1973 a 1977 obtenida por el Instituto Nacional de Pesca (CRIP-Yucaltepen), que contiene datos de abundancia relativa, definida por la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) expresada como número de peces por día efectivo de

pesca, para tres estados de desarrollo, juveniles, preadultos y adultos; así como datos de profundidad de la zona de captura. Estos datos están organizados por mes, año y zona; definiéndose esta última a la división del área de estudio en cuadrantes de medio grado por medio grado, ubicada entre los 20 °N y 23 °N y los 86 °W y 93 °W (Fig. 5).

Se obtuvo información sobre la distribución de los tipos de sustrato encontrados en cada zona (Fig. 5), mostrándose las proporciones de cada uno en la figura 6.

Se cuenta también con bases de datos sobre temperatura superficial del mar (TSM), la dirección e intensidad del viento obtenidas del CISEL Research Data Archive (Computational and Information Systems Laboratory) de la base Research Data Archive (RDA; <http://dss.ucar.edu/>) y los datos de profundidad registrados en cada lance de pesca.

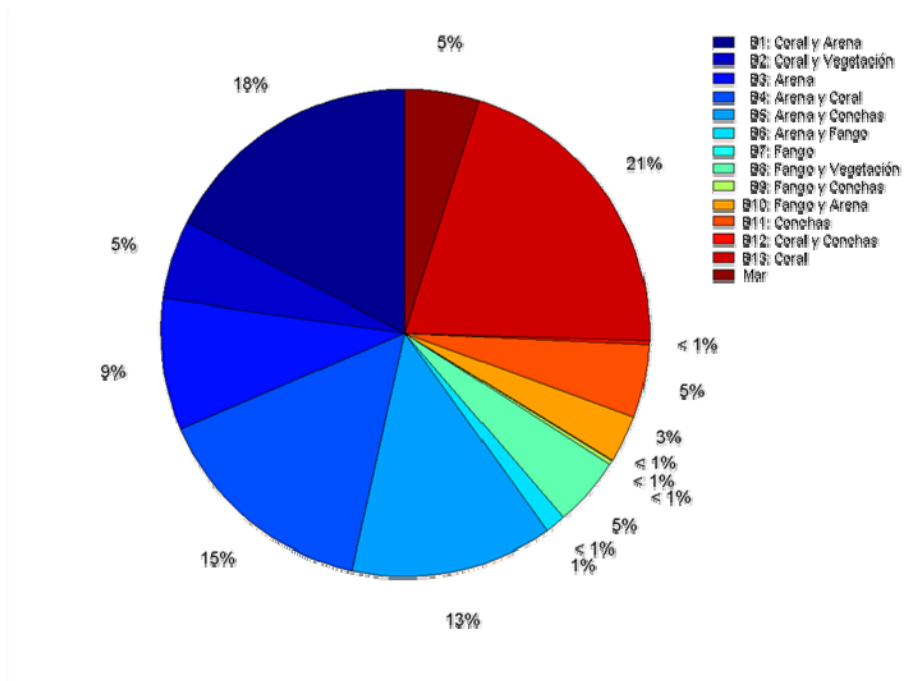


Figura 5. Porcentaje de tipos de sustrato correspondiente a la zona de estudio (incluye el porcentaje de mar, es decir, donde, no se tiene especificado el tipo de sustrato debido a la profundidad).

II.3 Estrategia de Investigación

Para la aplicación del SOM a la distribución espacial del mero *E. morio* se definió como estrategia abordar inicialmente la relación de cada variable, de manera independiente, con respecto a la abundancia relativa (CPUE) del mero y probar la significación de dicha relación. De esta manera se irán seleccionando únicamente aquellas variables que resulten significativas para la construcción de un modelo multivariable basado en el SOM.

De esta forma, en la sección de resultados se presentarán subsecciones correspondientes al análisis de cada variable individual y su relación con la distribución del mero, ya que cada una de ellas define un potencial proceso diferencial que permitirá la interpretación de los procesos más relevantes asociados a distribución de la especie. Así, se presentará una primera sección que relaciona la abundancia relativa del mero con los tipos de fondo. Una segunda sección analizará el efecto de la temperatura superficial del mar. En la tercera sección se presentará un análisis que contempla el efecto del viento (intensidad y dirección) y de la profundidad. Finalmente, en una cuarta subsección se presentará un modelo multivariado que representará la distribución del mero en función de las variables que hubiesen resultado estadísticamente significativas. En todos los casos los análisis incluyen la modelación y las diferencias ontogénicas al considerar juveniles, preadultos y adultos.

Para la aplicación del SOM a la distribución espacial del mero *E. morio* se definió como estrategia abordar inicialmente la relación de cada variable, de manera independiente, con respecto a la abundancia relativa (CPUE) del mero y probar la significación de dicha relación. De esta manera se irán seleccionando únicamente aquellas variables que resulten significativas para la construcción de un modelo multivariable basado en el SOM.

En la sección de resultados se presentará El análisis por separado de las diferentes variables, y del conjunto que resulte significativo. De esta forma, en la sección de resultados se presentarán subsecciones correspondientes a cada variable individual ya que cada una de ellas tiene una aportación diferencial en el entendimiento e interpretación de la distribución del mero. Así, se presentará una primera sección que relaciona la abundancia relativa del mero con los tipos de fondo. Una segunda sección analizará el efecto de la temperatura superficial del mar. En la tercera sección se presentará un análisis que contempla el efecto del viento (intensidad y dirección), así como de la profundidad. Finalmente, en una cuarta subsección se presentará un modelo multivariado que representará la distribución del mero en función de diversas variables significativas. En todos los casos los análisis incluyen una aproximación a las diferencias ontogénicas de la distribución del mero al considerar juveniles, preadultos y adultos.

I. Resultados

III.1 Distribución espacial del mero (*Epinephelus morio*) en el Banco de Campeche, México, en relación a los tipos de sustrato.

III.1.1 Introducción

El mero (*Epinephelus morio*) es históricamente una de las pesquerías más importantes del Banco de Campeche en el Golfo de México, donde dos flotas son de México y una de Cuba. El stock actual ha sido estimado como una tercera parte de la abundancia existente en 1970 (Doi *et al.*, 1981), alcanzando en 2004 menos de 6,000 t (Burgos-Rosas & Pérez-Pérez, 2006). La carta Nacional Pesquera (Alvarez-Torres *et al.*, 2002) declara un estado de sobrepesca del mero estableciendo como objetivo prioritario la recuperación del recurso, y entre las acciones principales se encuentra el establecimiento de una temporada de veda durante el invierno, usualmente durante enero, con el objeto de proteger el proceso reproductivo. No obstante que esta veda opera desde 1994, no se han observado efectos significativos. Burgos-Rosas & Pérez-Pérez (2006), como opinión técnica del gobierno federal, sugieren evaluar la implementación de un área de restricción de pesca como una herramienta de manejo que permita la recuperación. Esta situación indica la necesidad de conocer la distribución espacial del mero y los procesos asociados. De acuerdo con Bölke & Chaplin (1968) y Moe (1969) el mero es una especie gregaria asociada a tipos de sustrato duro, principalmente de origen calcáreo. Dado el estado actual del recurso, la información sobre su distribución antes del estado de deterioro resulta relevante para identificar los patrones que gobiernan este proceso así como para obtener información sobre los posibles hábitats críticos.

III.1.2 Manejo de datos y Actividades

Los primeros análisis se realizaron en la versión DOS del SOM, usando la abundancia relativa del mero en sus tres estados de desarrollo (juveniles, preadultos,

adultos), estación del año, año, los trece tipos de fondo y el número de zona (Fig. 4), incluyendo una columna con la etiqueta que indica la zona (primeros dos dígitos), tipo de sustrato y los dos últimos dígitos del año (ej. 22-1-77). La base de datos fue dividida en tres subconjuntos con el fin de llevar a cabo las tres fases del algoritmo (Haykin, 1998).

Para la fase de *entrenamiento* se uso un conjunto con 88 registros tratando de tener la mayor representación posible de las abundancias relativas, los cuales fueron normalizados con el fin de prever sesgos en el dominio de los grupos. Antes de realizar el entrenamiento de la red, es necesario inicializar el vector de pesos, en este caso usamos la opción de *inicialización aleatoria*, haciendo que el SOM converja a una mejor solución más rápidamente. Una vez generado el patrón de representación óptimo de los datos de entrada, se tomaron 143 registros con el fin de verificar que el patrón generado es el óptimo de acuerdo a los datos de entrada, y la necesidad de hacer un reajuste en el patrón producido. Con los datos restantes se determinaron los grupos y la posible asociación a los tipos de sustrato.

III.1.3 Resultados

La distribución de los tipos de sustrato fue tomado de García (1980), como se muestra en la figura 4. Los trece tipos de sustrato son clasificados como coral, arena, fango, restos de moluscos, vegetación y la combinación de estos. La figura 6 muestra un mapa típico de la matriz-U producida por el proceso del SOM. El mapa es una malla de 150 (10x15) nodos; los nodos ganadores son representados por puntos negros (o etiquetas), los cuales indican los parámetros estimados. Por ejemplo la etiqueta de la esquina inferior izquierda, 38-3-74, indica el área 38, tipo de sustrato 3 (arena) y los dos últimos dígitos del año (1974). Derivado de la aplicación del algoritmo SOM, en los primeros resultados se obtuvieron mapas de matriz-U y mapas de Sammon, donde se observan dos grupos de abundancia relativa, de juveniles y de adultos, delimitándose áreas que representan las abundancias relativas del mero, el tipo de sustrato asociado al recurso y el año de captura. Una inspección preliminar de la matriz-U general de los

datos y los planos de componentes de la abundancia relativa y los tipos de fondo, como se muestra en la figura 7, indicado por la coincidencia de los datos más altos (tonos rojos) en la misma orientación, sugiere que las mayores abundancias de adultos están fuertemente asociadas con sustratos arenosos, mientras que las mayores abundancias de los juveniles son encontrados en sustratos coralinos, que al georeferenciarlos nos confirman los resultados del SOM (figura 9). Los juveniles predominan cerca de la costa, en tanto que los adultos predominan en la región este-central de la plataforma continental. La asociación de preadultos con sustratos no es clara, sugiriendo que esta distribución es también asociada con sustratos coralinos o que existe un área de transición. Para clarificar estos patrones se hicieron pruebas de significación empleando el coeficiente de correlación de Spearman (Tabla 1) usando el porcentaje de cada tipo de sustrato y la abundancia relativa.

Los resultados indican una correlación significativa de 70% entre juveniles y preadultos con los sustratos de coral, mientras que los sustratos arenosos (coral-arena y arena-conchas) se correlacionan significativamente, 40-45%, con la distribución espacial de los adultos. En contraste hay también algunas áreas donde la ausencia de mero es significativamente explicada (coeficientes de significación negativa, Tabla 1). Por ejemplo, los sustratos arenosos se correlacionan significativamente en un 40-60% con la ausencia de juveniles y preadultos, mientras que los sustratos coral-arena en un 50% con la ausencia de adultos. Estos resultados sugieren que existe traslape entre juveniles y preadultos con respecto a los adultos. El patrón total de la distribución del mero en el Banco de Campeche se muestra en la figura 8, donde es posible identificar la dinámica estacional de la distribución del mero. Los datos de invierno y verano se agrupan en extremos opuestos del mapa SOM, mientras que primavera y otoño se muestran mezclados en la porción media del mapa sugiriendo una transición estacional. Se ha reportado que durante el invierno, los adultos exhiben la agregación reproductiva en el este de la plataforma continental (Arreguín-Sánchez & Pitcher, 1999; Burgos-Rosas & Pérez-Pérez, 2006); mientras que el verano, el recurso se dispersa en la plataforma continental. Primavera y otoño son consideradas estaciones de transición

antes y después de la agregación reproductiva. Estas dinámicas son claramente representadas por la matriz-U (Fig. 6).

De igual forma se separaron grupos de datos que indican una alta relación entre la abundancia y el tipo de sustrato. Valdés & Padrón (1980) sugieren que los cambios espaciales del mero (*E. morio*) responden a patrones estacionales asociados con el comportamiento y dinámica de la población, existiendo un marcado movimiento de oeste a este en invierno e inicio de la primavera y viceversa en verano-otoño. De acuerdo con estos autores este movimiento está íntimamente ligado con el proceso de reproducción. Los resultados obtenidos al momento sugieren este mismo comportamiento ya que se detectaron altas abundancias de peces adultos fuertemente asociados a sustratos de caliza y arena-caliza y arenal-coral. Por otra parte, las altas abundancias de juveniles se relacionaron con sustratos de arena y concha. Una vez determinadas estas asociaciones se realizaron nuevos análisis considerando los tipos de sustratos antes mencionados, observándose un tercer grupo de organismos relacionado con la zona de transición entre los dos grupos característicos de los tipos de sustrato ya citados.

Tabla 1. Rango de correlación de Spearman de la abundancia del mero (número/día de pesca) con respecto a los tipos de sustrato más frecuentes basado en los resultados del análisis del SOM.

Tipo de sustrato	CPUE Juveniles	CPUE Preadultos	CPUE Adultos
Coral-arena	-0.0185	0.0104	-0.4902*
Arena	0.3328	0.3616	-0.2066
Arena-coral	-0.5969*	-0.5749*	0.4487*
Arena-concha	-0.4015*	-0.4377*	0.3992*
Coral	0.7057*	0.6799*	-0.1498

* Significación de $p < 0.05$.

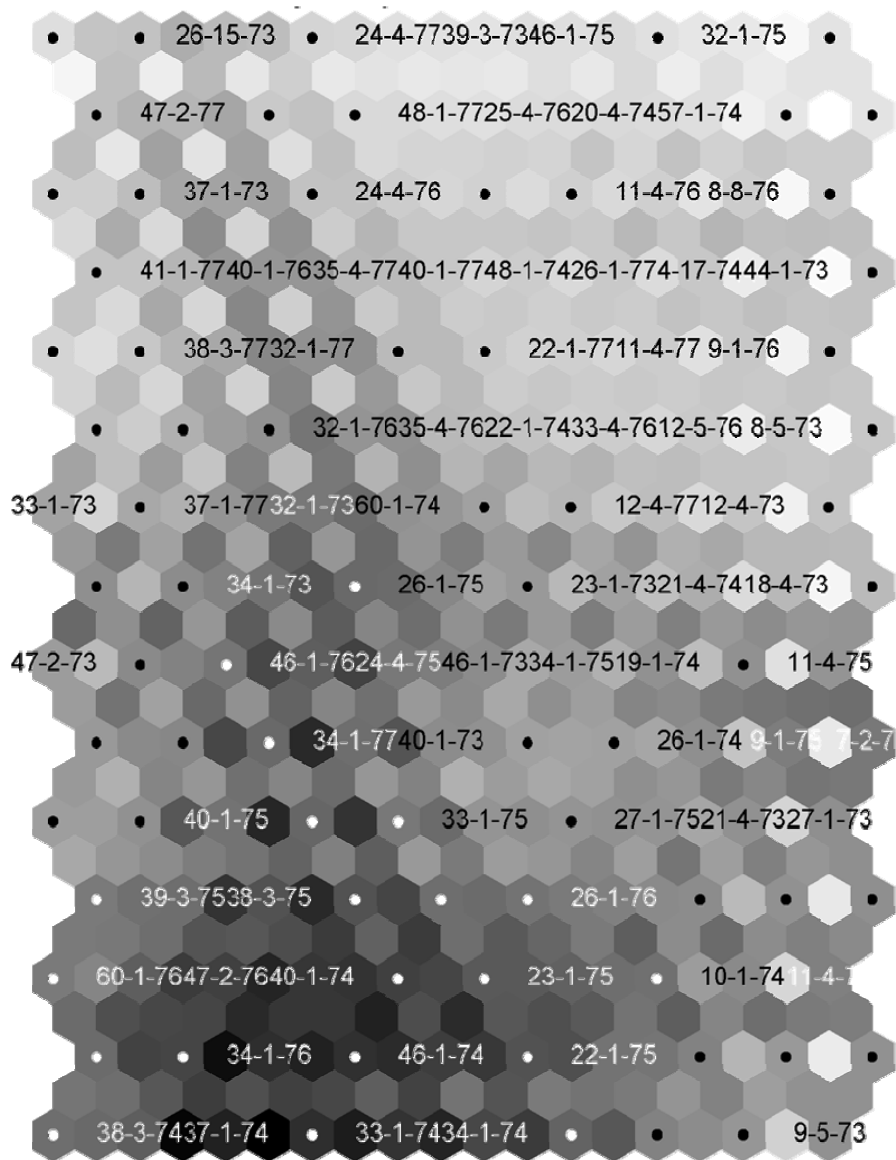


Figura 6. Matriz-U general obtenida de la salida del proceso de modelado del SOM (10x15 nodos, con topología hexagonal) representado la distribución espacial del mero en el Banco de Campeche. Los puntos negros indican la neurona ganadora; la etiquetas identifican las áreas definidas en la figura 4, indicando área, tipo de sustrato y año. Los conjuntos similares de tonos en gris están relacionados con la abundancia del stock, así por ejemplo, el conjunto más oscuro (neuronas de la parte inferior izquierda) destaca la asociación de mayor abundancia con fondos de tipo coralino, mientras que los tonos más claros (parte superior derecha) se asocian con menor abundancia en fondos arenosos.

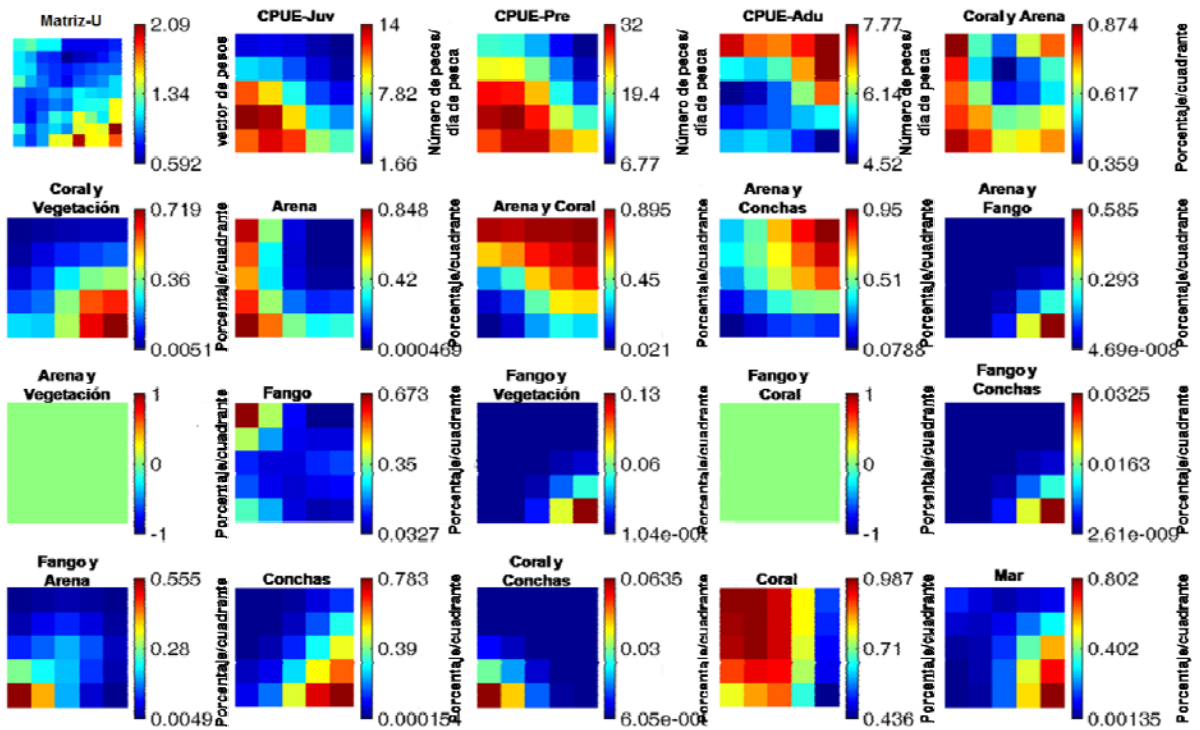


Figura 7. Mapas de matriz-U general y planos de componentes obtenidos del modelado del SOM (5x5 nodos, con topología cuadrangular) de la distribución espacial de los diferentes estadios de desarrollo del mero (*E. morio*) del Banco de Campeche, con relación a los trece tipos de fondo mostrados en la figura 4. La asociación de los colores en los arreglos matriciales de los componentes indican la relación entre los tipos de fondo y la abundancia; así por ejemplo, la posición de los nodos rojos del componente de adultos (cuarto arreglo matricial en la primera fila de arriba hacia abajo) sugieren alta abundancia en fondos compuestos por arena-concha (posición de nodos rojos, cuarto componente matricial de la segunda fila), y en sentido inverso entre juveniles (segundo arreglo matricial primer fila) con fondos de tipo arena-coral (tercer componente matricial de la segunda fila. Con respecto a los planos de componentes de los tipos de fondo: Arena y Vegetación y Fango y Coral, tienen un color similar, significa que la presencia de mero es nula). La significancia de estas relaciones ejemplificadas es mostrada en la Tabla 1.

Después de realizar el análisis de la abundancia relativa (CPUE) con los tipos de fondo, y con el objeto de probar la estacionalidad sugerida en la figura 8, se incluyó a la base de datos información sobre la temperatura superficial del mar, TSM. Se realizó el entrenamiento con los 173 registros, seguido de la calibración/validación del patrón generado en el proceso anterior (185 registros), para después realizar el tercer proceso del análisis para determinar, de acuerdo al patrón óptimo, el comportamiento de las variables y determinar su asociación de la abundancia relativa del mero para el efecto combinado de tipos de sustrato y la TSM.

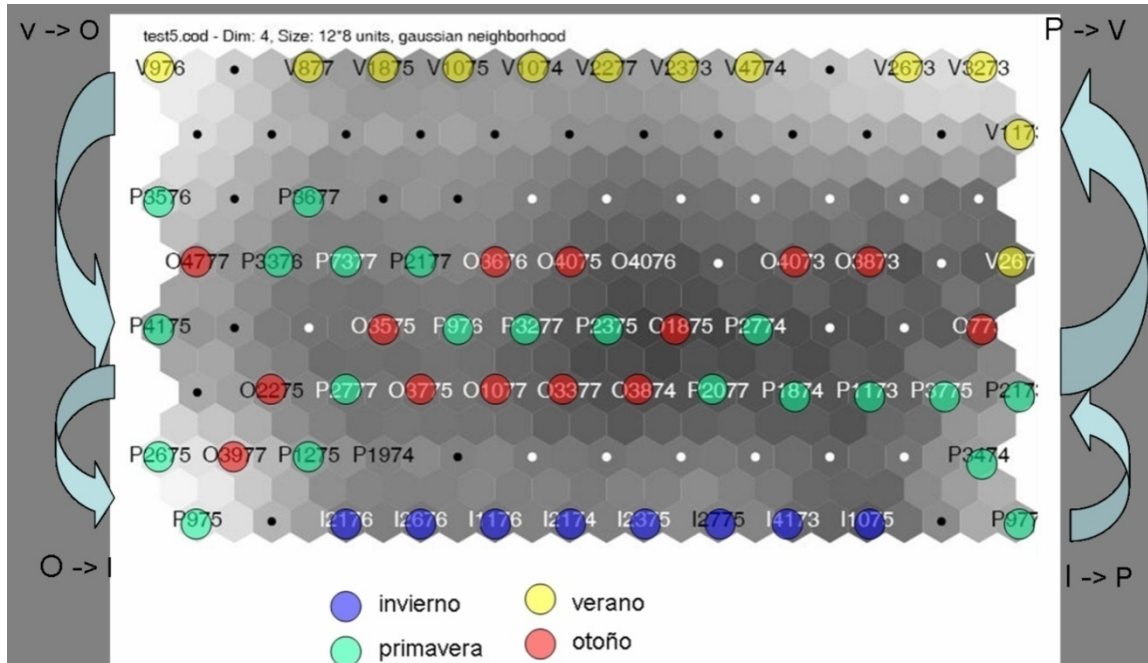


Figura 8. Mapa de matriz-U, como resultado del SOM de acuerdo a la relación con el hábitat y al proceso ecológico. En las orillas se muestran las transiciones estacionales de verano a otoño ($V \rightarrow O$), primavera a verano ($P \rightarrow V$), otoño a invierno ($O \rightarrow I$), invierno a primavera ($I \rightarrow P$).

De acuerdo a los resultados anteriores, las figuras 10, 11 y 12 muestran la distribución estacional del mero para juveniles, preadultos, adultos, respectivamente, donde se muestra parcialmente a la relación con el tipo de fondo, la estacionalidad y se sugiere una segregación positiva con respecto al estado de desarrollo (tal vez tamaño) de la especie, donde tienden a concentrarse los juveniles en zonas costeras y adultos a permanecer más en zonas profundas.

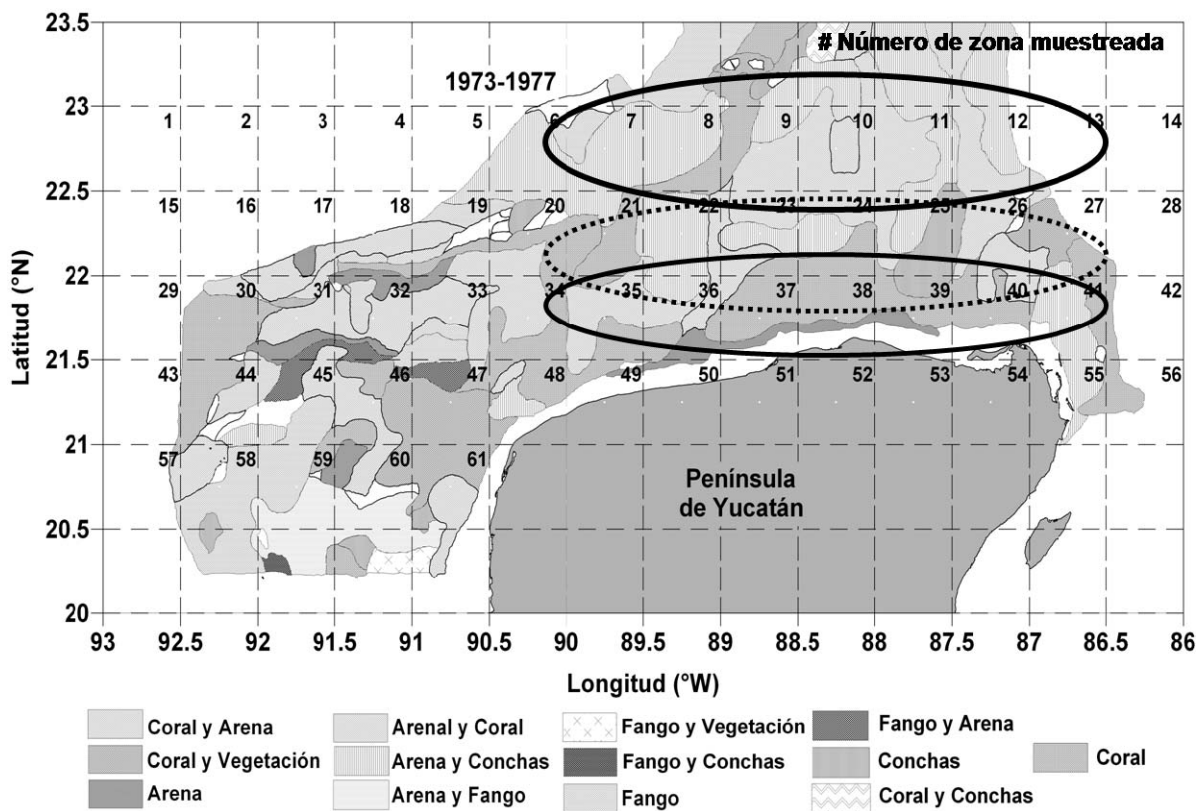


Figura 9. Distribución de los tipos de sustrato en la plataforma continental del Banco de Campeche (García, 1980). Los cuadros representan las áreas de medio grado por medio grado de la zona de estudio. Las áreas rodeadas por elipses indican la distribución espacial del mero. La línea delgada representa la distribución de los juveniles, la línea punteada los preadultos y la línea gruesa los adultos. El traslape entre las distribuciones de juveniles y preadultos corresponde a la correlación estadísticamente significativamente indicada en la Tabla 2.

La abundancia relativa mayor de los juveniles (Fig. 10) se observa durante el invierno y primavera en la zona central de la plataforma continental de Yucatán, cerca de la costa, asociada a los sustratos arenosos, y durante el verano se observan localizados en la región noreste de la costa. Durante el otoño, no se observaron agregaciones, sugiriendo que los peces juveniles se encuentran dispersos.

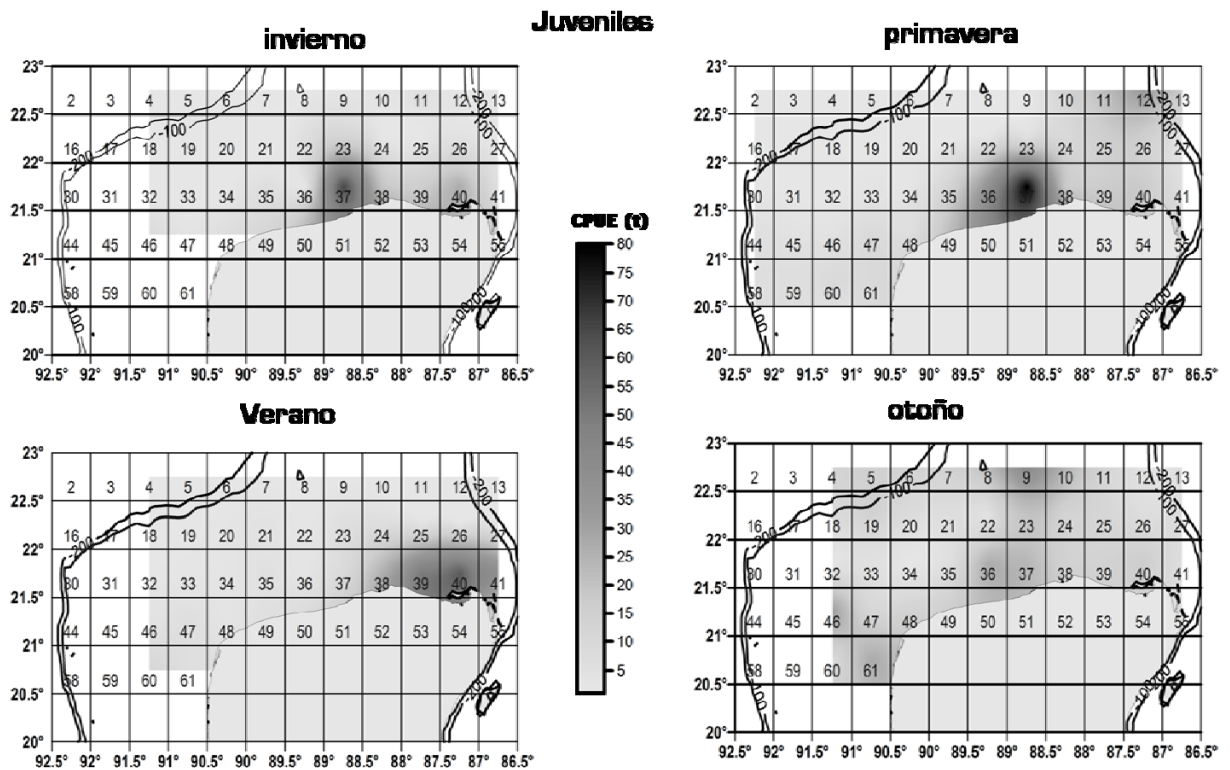


Figura 10. Distribución de juveniles de *E. morio*, resultado del análisis del SOM con abundancia relativa, y tipos de sustratos. Las zonas oscuras indican las áreas con mayor abundancia relativa CPUE (ver explicación en el texto).

Los preadultos (Fig. 11) muestran una mayor densidad a lo largo de la costa noreste de Yucatán durante el invierno; después de esta temporada se dispersan en la plataforma continental en las áreas relativamente cercanas a la costa. Durante el otoño, las mayores concentraciones se observan en la región oeste, probablemente asociadas con los arrecifes coralinos en esa área.

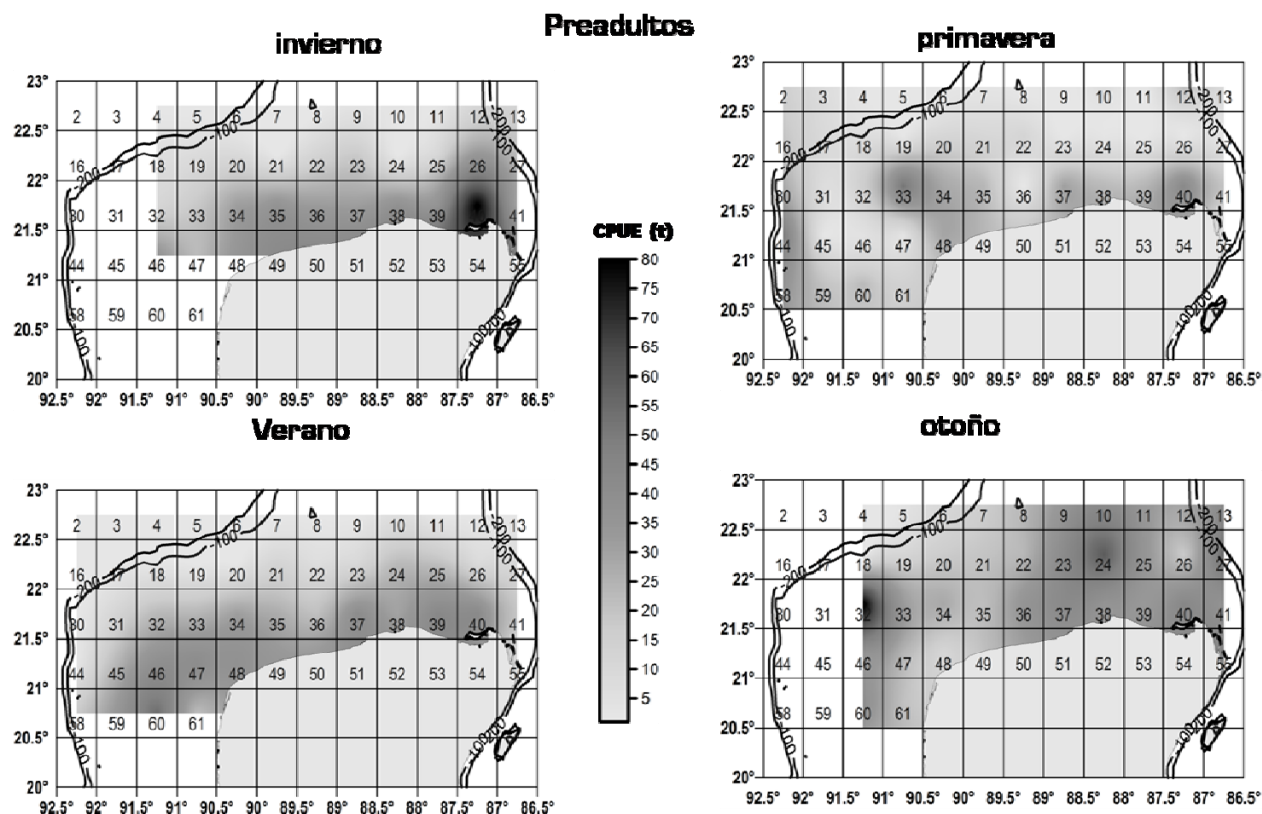


Figura 11. Distribución de preadultos de *E. morio*, resultado del análisis del SOM con abundancia relativa y tipos de sustratos. Las zonas oscuras indican las áreas con mayor abundancia relativa CPUE (ver explicación en el texto). Las líneas continuas indican las isobatas de 100 y 200 m.

Las áreas con mayor abundancia relativa de adultos son encontradas en aguas más profundas en la parte norte de la plataforma continental de Yucatán (Fig. 12). Estas altas concentraciones son observadas en invierno y primavera, consistentes con la agregación reproductiva reportada en la literatura (i.e., Arreguín-Sánchez & Pitcher, 1999; Burgos-Rosas & Pérez-Pérez, 2006).

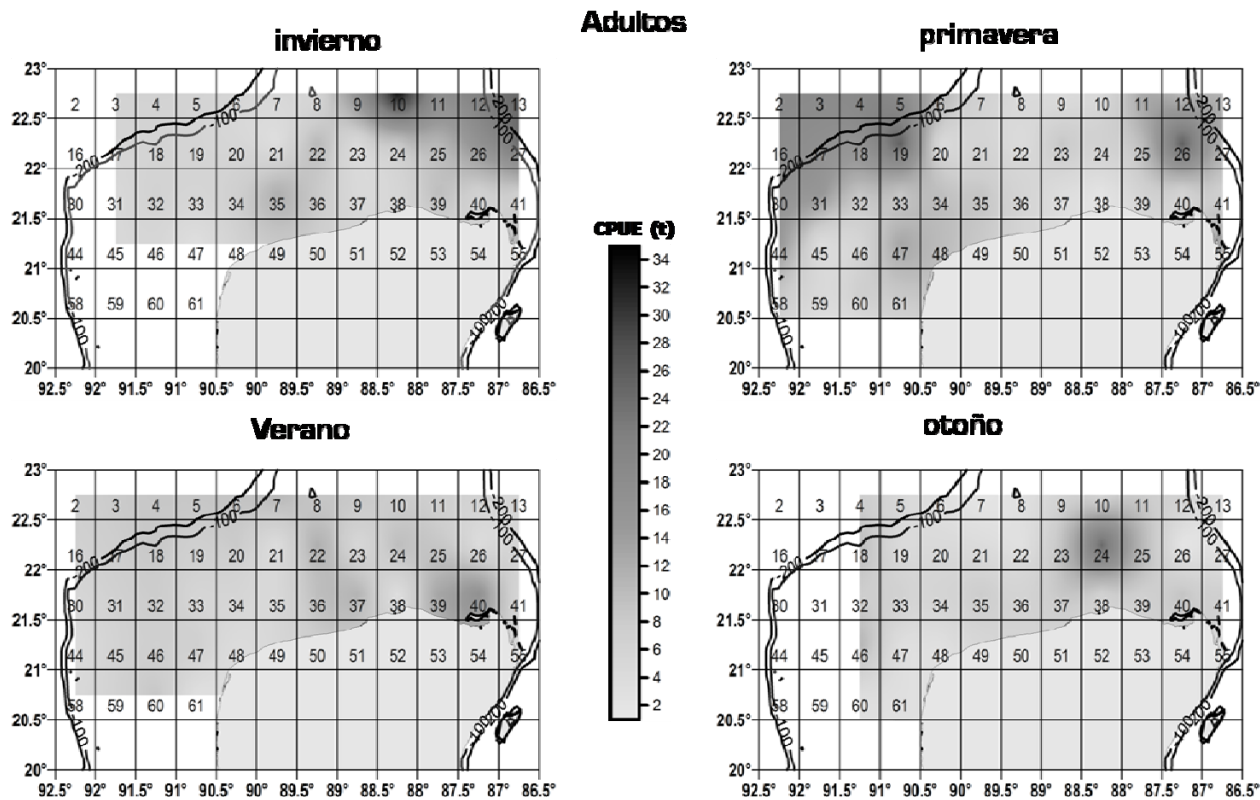


Figura 12. Distribución de adultos de *E.morio*, resultado del análisis del SOM con abundancia relativa y tipos de sustratos. Las zonas oscuras indican las áreas con mayor abundancia relativa CPUE (ver explicación en el texto). Las líneas continuas indican las isobatas de 100 y 200 m.

III.1.4 Discusión

En el Banco de Campeche (Doi *et al.*, 1981; Seijo, 1986; Arreguín-Sánchez, 1992; Giménez-Hurtado *et al.*, 2005) y en otras regiones (alrededor de Florida y Bahamas; Moe, 1969), el mero es conocido por ser una especie demersal gregaria asociada a los sustratos duros de tipo arrecifal, presentando agregaciones reproductivas y, consecuentemente, con movimientos estacionales. Diversos estudios hechos por investigadores cubanos y mexicanos en la pesquería del Banco de Campeche confirman este comportamiento (Doi *et al.*, 1981; Seijo, 1986; Arreguín-Sánchez *et al.*, 1996, 1997, 1999; Arreguín-Sánchez & Pitcher, 1999; Hernández *et al.*, 1999; Burgos et

al., 2003; Giménez-Hurtado, 2005; Burgos-Rosas & Pérez-Pérez, 2006; López-Rocha & Arreguín-Sánchez, 2008), donde indican que la distribución y patrones de movimientos del mero son determinados por los hábitats disponibles, los cuales se asocian con los tipos de sustrato, registrado por la mayoría de los autores.

Los resultados de este estudio muestran claramente los patrones de cambios estacionales en la distribución del mero. De acuerdo con la literatura, estas áreas de agregación están probablemente asociadas, además del tipo de fondo, con la disponibilidad de alimento. La región central y este de la costa norte de Yucatán son bien conocidos por su alta abundancia relativa de peces e invertebrados, posiblemente asociados con los sistemas costeros (p.e., Ria Lagartos-Dzilam y laguna Yalahau) y relacionados a los sustratos de coral (Arreguín-Sánchez *et al.*, 1996, 1997). Sólo durante el otoño, cuando los peces se dispersan, las agregaciones de juveniles son presentados a través del año en las localizaciones descritas en la figura 10.

Los preadultos muestran una simple área de alta abundancia durante el invierno en la región central-este de la plataforma continental debido al comportamiento de agregación reproductiva. Arreguín-Sánchez y Pitcher (1999) y López-Rocha y Arreguín-Sánchez (2008) sugieren que los peces de todas las tallas presentan movimientos temporales de este a oeste asociados a los procesos reproductivos. Durante otras estaciones, los preadultos se dispersan a lo largo de la plataforma continental (Fig. 11).

Los adultos muestran agregaciones durante el invierno y principios de la primavera desde la costa hasta las agua profundas en sustratos arenosos. Tales concentraciones se presentan en la plataforma continental norte (Fig. 12). Durante las otras estaciones, los peces adultos se dispersan a través de la plataforma continental.

III.2 Distribución del mero (*Epinephelus morio*) en el Banco de Campeche, México, en relación con la temperatura superficial del mar.

III.2.1 Introducción

La pesquería del mero (*Epinephelus morio*) ha sido históricamente una de las pesquerías más importante en las aguas territoriales mexicanas en el Golfo de México. El crecimiento de esta pesquería fue observada desde 1947 a 1972, cuando se registraron los mayores volúmenes de captura [cerca de 21,000 toneladas métricas (t)] (Doi *et al.*, 1981, Burgos-Rosas & Pérez-Pérez, 2006). En la actualidad la pesquería ha visto reducidos sus rendimientos obteniendo cerca de una tercera parte de lo estimado para principios de 1970 (6,000 t). Hace apenas una década algunos autores reportaron un decremento en la abundancia del recurso reflejado en la tasa de captura (Fig. 15; Arreguín-Sánchez *et al.*, 1996, 1997; Hernández *et al.*, 1999; Burgos & Defeo, 2000; Burgos *et al.*, 2003).

La temperatura superficial del mar (TSM) es una de las variables ambientales de gran importancia en ecosistemas marinos en procesos como reclutamiento, supervivencia larval, comportamiento reproductivo y áreas de desove entre otras, y por lo tanto generalmente tiene clara influencia en la distribución espacio-temporal de especies marinas. De los primeros estudios realizados para la zona del Banco de Campeche, Vasiliev & Serrano (1973) mostraron que existe una gran diferencia entre la parte norte y la suroeste, cuya división se estableció después del meridiano 90° 10' W, aunque se basó fundamentalmente en la temperatura de fondo, ya que las aguas superficiales no muestran diferencias notorias (García, 1980). Más recientemente se han hecho algunos estudios entre los cuales se encuentra el trabajo de Piñeiro *et al.* (2001) en el que se indica que la temperatura de superficie del Banco de Campeche está relacionada con la radiación solar y, por tanto, con el período del año que se trate, con una estrecha relación con la temperatura del aire, por lo que en la época del verano e inicio del otoño (julio a septiembre) se observaron los valores más elevados de

temperatura, que variaron entre 28 °C y 29.5 °C, siendo agosto el mes más cálido. Los valores mínimos se observaron en invierno y principios de primavera (diciembre a marzo) entre 25 °C y 23.5 °C.

En la sección anterior se estableció la asociación del mero con los tipos de fondos y se observaron cambios estacionales que se asociaron con la temperatura. Los mapas de distribución resultantes sugieren un importante efecto de esta variable lo cual coincide con lo reportado por varios autores en relación con el evento reproductivo, donde este proceso se lleva a cabo en aguas con baja temperatura durante la época de invierno (Bessonov *et al.*, 1971, Giménez-Hurtado *et al.*, 2003, 2005, 2006; Burgos-Rosas & Pérez-Pérez, 2006). En este contexto, el propósito de este análisis es probar si existe relación significativa entre la temperatura del mar y la distribución del mero.

III.2.2 Materiales y Métodos

En esta parte del análisis la base de datos que se usó contiene 299 registros de la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) de los tres estadios de desarrollo del *E. morio* (juveniles, preadultos y adultos) provenientes de la flota comercial mexicana de mediana altura de 1973 a 1977, de 61 áreas de medio grado por medio grado de la zona de estudio (figura 5). La temperatura superficial del mar (TSM) fue obtenida del CISL Research Data Archive (Computational and Information Systems Laboratory) de la base Research Data Archive (RDA; <http://dss.ucar.edu/>), organizada con la misma resolución espacial que la CPUE. El motivo porque se tomaron solo 299 registros en comparación con la sección anterior, es debido a que la base de datos de la TSM no está completa y se optó por eliminar los registros vacíos.

El algoritmo que se usó en esta parte fue el SOM versión para Matlab (Vesanto *et al.*, 2000; Kohonen, 2001) para representar patrones de la distribución del mero relacionados a la temperatura superficial del mar. Salvo el programa para la aplicación del algoritmo, que difiere en este caso, el proceso de datos por el SOM es similar al descrito en la sección anterior.

III.2.3 Resultados

De los resultados del SOM se obtuvo una matriz-U de 25 nodos (5x5 BMUs, best-matching unit) cada una con diferente número de muestras (Tabla 2), donde se observa la influencia que tiene la TSM sobre la distribución del mero. Al respecto se ha reportado que la distribución del mero se asocia a temperaturas relativamente altas, en un rango entre 23°C y 25°C aunque para la agregación reproductiva debe ser cercana a los 22°C (Bessonov *et al.*, 1971).

Al realizar un primer análisis de exploración de los datos, la figura 13 muestra un ejemplo de la distribución de la relación entre la abundancia de los diferentes estadios de desarrollo del mero con la TSM por estación. De manera particular para los adultos se observa mayor abundancia en el periodo invierno-primavera respecto a verano-otoño.

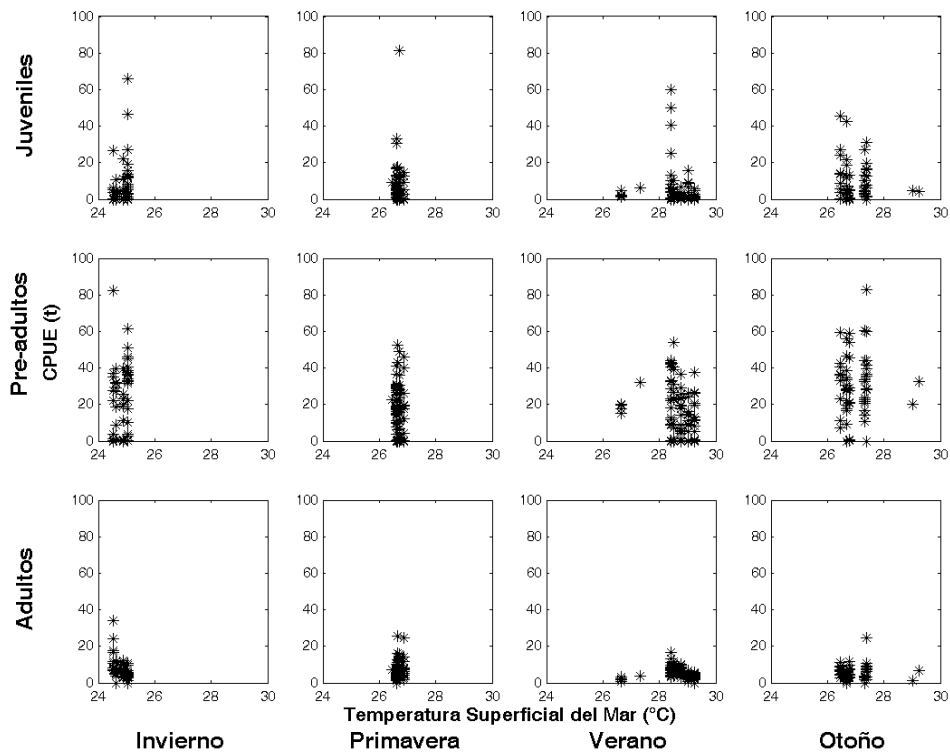


Figura 13. Relación estacional entre abundancia relativa de estadios de desarrollo del mero *E. Morio* y la temperatura superficial del mar (°C), para el periodo 1973 a 1977.

La influencia de la temperatura, particularmente en el invierno (Fig. 14), sobre la distribución espacial del mero resultó ser significativa (Tabla 3, Spearman, $\rho=-0.57$, $p < 0.05$) únicamente para los adultos. Esto sugiere que la temperatura, durante el invierno, explica poco en más del 30% de la variación en la distribución de los adultos del mero. La influencia de la temperatura sobre la distribución del mero ha sido señalada por varios autores (Giménez-Hurtado, 2005), particularmente asociado al proceso reproductivo. Aunque en la figura 14 la mayor abundancia relativa de los juveniles y preadultos está con las temperaturas menores a 27 °C, estadísticamente no se muestra la relación (Tabla 3). El mero, además de su asociación con fondos tipo coralino, requiere de relativamente bajas temperaturas para llevar a cabo la reproducción (22 °C de acuerdo con Bessonov *et al.* 1971), condiciones que encuentra en la región noreste de la plataforma continental de Yucatán durante el invierno (Fig. 15). En el anexo 3 se muestran mayores detalles respecto a estos análisis.

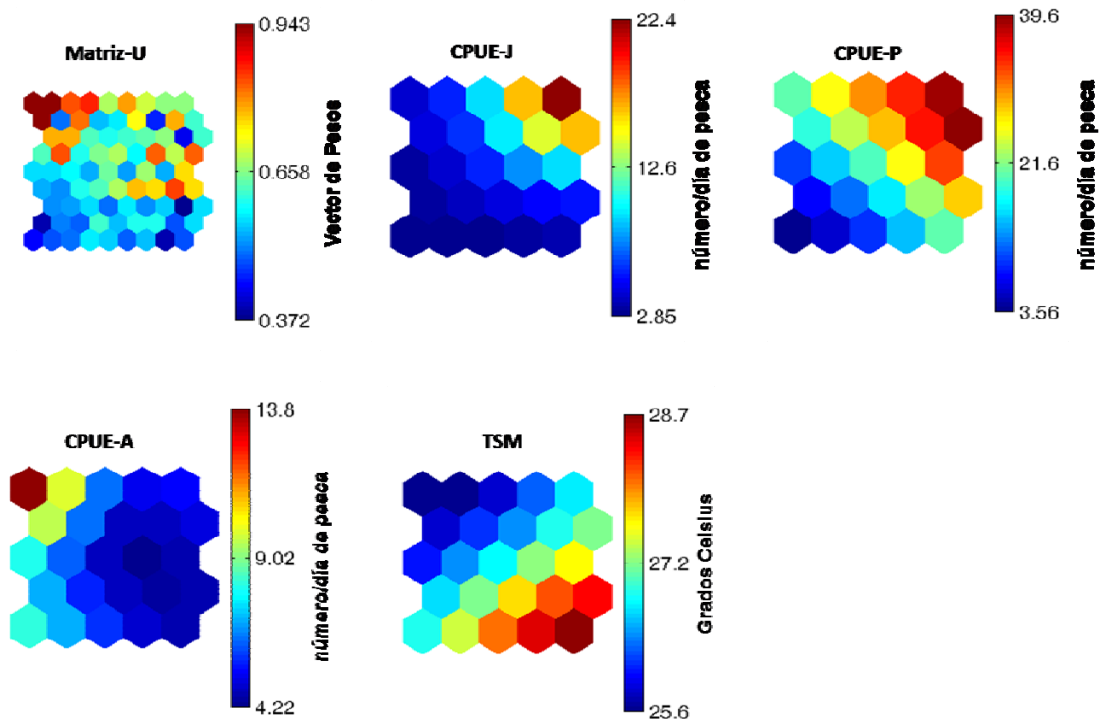


Figura 14. Matriz-U general y plano de componentes de cada variable de 5x5 nodos (topología hexagonal) representando las principales relaciones entre las abundancias de los estadios de desarrollo del mero (*E. morio*) con la temperatura superficial del mar (TSM). CPUE-J=abundancia relativa de juveniles; CPUE-P=abundancia relativa de preadultos; CPUE-A=abundancia relativa de adultos.

Tabla 2. Promedio de CPUE (Juv,Pre,Adu), TSM, número de BMU y número de muestras por BMU. NaN=Ausencia de Dato.

# BMU	# Mues	CPUE Juv (t)	CPUE Pre (t)	CPUE Adu (t)	TSM (°C)
1	15	18.37	49.46	8.65	25.99
2	9	9.87	37.10	5.73	25.72
3	13	4.38	31.72	8.27	24.88
4	12	0.74	6.55	7.69	25.10
5	20	0.09	3.47	16.52	25.82
6	12	44.60	33.26	6.67	26.85
7	3	12.34	27.61	3.22	26.10
8	12	4.82	23.26	6.08	26.13
9	8	0.58	8.91	5.38	26.01
10	8	0.00	0.18	9.71	26.68
11	7	20.43	24.93	1.87	27.11
12	14	7.13	24.34	1.87	26.67
13	13	5.63	16.24	2.98	26.62
14	10	0.75	6.89	3.27	26.81
15	20	0.00	0.68	6.14	26.72
16	4	11.51	40.59	0.42	26.65
17	5	3.85	31.99	2.70	27.06
18	12	3.74	17.14	1.92	26.99
19	0	NaN	NaN	NaN	NaN
20	7	0.00	0.04	9.59	28.48
21	13	5.74	50.56	5.10	27.12
22	15	5.40	34.81	6.94	28.57
23	8	3.49	24.64	4.38	28.77
24	25	2.95	16.55	4.45	28.96
25	34	0.42	3.25	5.67	28.82

Tabla 3. Rango de correlación de Spearman de la abundancia del mero (número/día de pesca) con respecto a la temperatura superficial del mar (TSM) basado en los resultados del análisis del SOM.

	CPUE Juv (t)	CPUE Pre (t)	CPUE Adu (t)	TSM (°C)
CPUE Juv (t)	1.00			
CPUE Pre (t)	0.81*	1.00		
CPUE Adu (t)	-0.22	-0.41*	1.00	
TSM (°C)	-0.38	-0.14	-0.57*	1.00

* Indicadores de significación de $p < 0.05$. Juv = juveniles, Pre = preadultos y Adu= adultos.

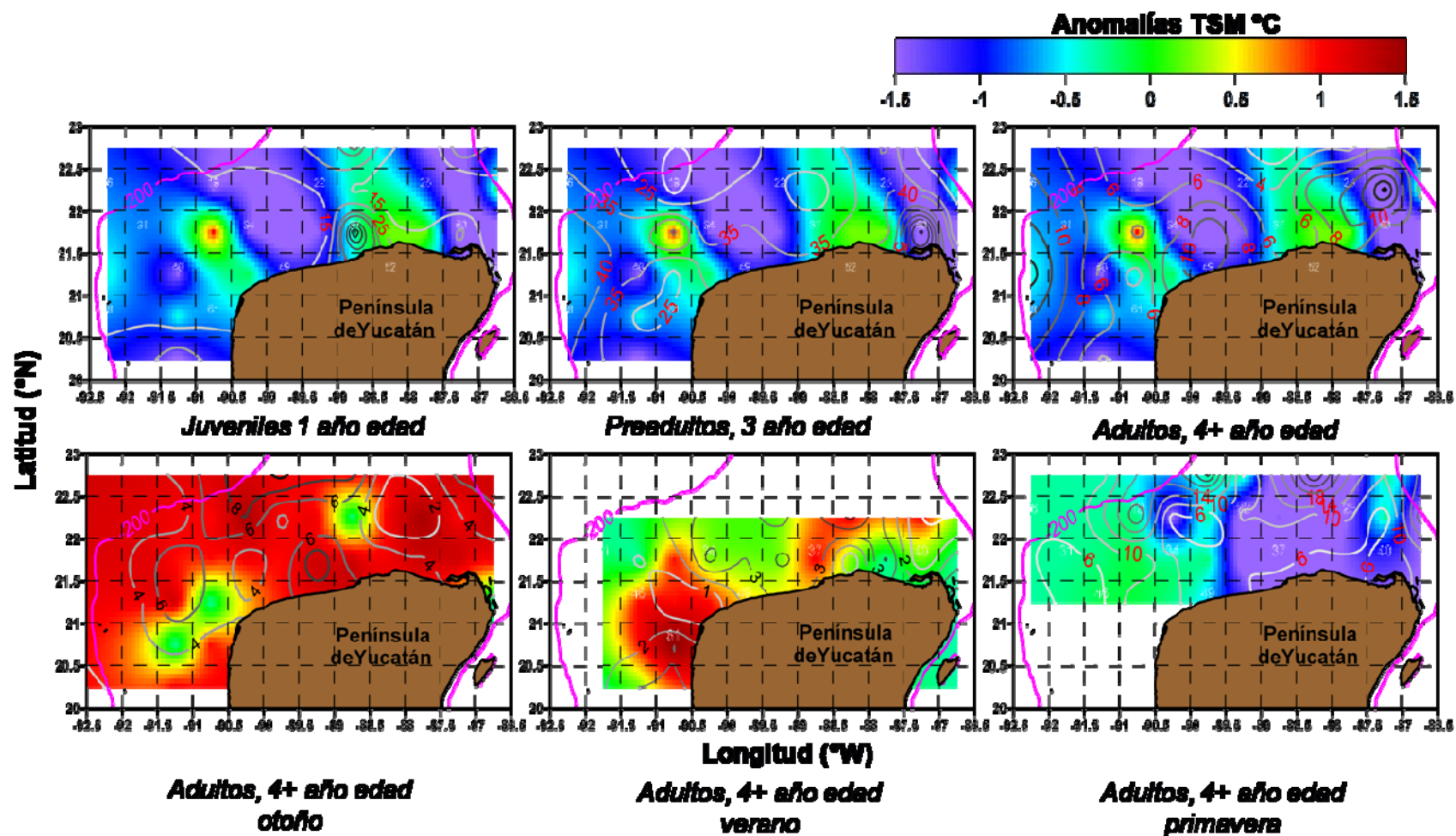


Figura 15. Distribución del mero (*E. morio*, líneas continuas) en la plataforma continental de Yucatán en función de la temperatura, expresada como anomalía. Panel superior: estadios de desarrollo en el invierno. Última figura del panel superior y el panel inferior muestra la distribución estacional de adultos. Las líneas moradas indican las isobatas de 100 y 200 m.

III.2.4 Discusión

En la pesquería del Banco de Campeche (Doi *et al.*, 1981; Seijo, 1986; Arreguín-Sánchez, 1992; Giménez-Hurtado *et al.*, 2005) y en otras regiones (i.e., alrededor de Florida y Las Bahamas; Moe, 1969) el mero es conocido por ser una especie demersal gregaria asociada con fondos duros además de presentar agregaciones reproductivas influenciadas por las estaciones del año. Los resultados obtenidos muestran un claro patrón de cambios estacionales en la distribución. En términos generales, los juveniles se presentan en dos regiones principales de alta abundancia cercanas a la costa, lo cual está asociado probablemente a la disponibilidad de alimento.

Las regiones central y este en el norte de la costa de Yucatán son bien conocidas por estas altas abundancias de peces e invertebrados, probablemente asociados con sistemas costeros (i.e., Ria Lagartos-Dzilam y Launa Yalahau) y relacionados con sustratos coralinos (Arreguín-Sánchez *et al.*, 1996, 1997). A excepción de otoño, cuando la especie parece dispersarse, las agregaciones de juveniles se presentan durante todo el año en las localidades antes descritas (ver Fig. 15). Los preadultos presentan un área de mayor abundancia en el invierno en la región este-central de la plataforma continental (Fig. 15), muy probablemente como reflejo del comportamiento reproductivo (agregación en invierno), en tanto que en las otras estaciones se encuentran dispersos. Arreguín-Sánchez & Pitcher (1999) y López-Rocha & Arreguín-Sánchez (2008) sugieren claros movimientos estacionales, en sentido este-oeste, de los adultos de mero formando agregaciones reproductivas en el invierno. Esto es confirmado en este estudio en el que encontramos que los adultos muestran una agregación durante invierno y principios de primavera, y como se indicó anteriormente, asociados a sustratos tipo arenoso. Estas concentraciones se presentan en el norte-noreste de la plataforma continental, en tanto que en las otras estaciones, los peces adultos están dispersos por toda la plataforma (Fig. 15).

De acuerdo a García & De León (1980) se observa que durante el otoño el área de pesca fundamental de la especie se encuentra en la parte occidental del Banco, mientras que para el invierno hacia la región central, continuando hacia el oriente y en zonas más profundas para finales de esta temporada. En el verano, la abundancia del mero se ubica de nuevo, hacia la zona occidental, sin embargo se detecta un ligero incremento en la concentración hacia la región central.

Nuestros resultados muestran claramente patrones de distribución con base en cambios estacionales con influencia significativa de la temperatura sobre los adultos.

III.3 Distribución del mero (*Epinephelus morio*) en el Banco de Campeche, México en función de vientos y profundidad.

III.3.1 Introducción

Dentro de la gran variedad de hábitats que pueden ocupar las especies demersales, es de suma importancia la influencia de factores físico-químicos de mediana o gran escala presentes en el Golfo de México en las diversas etapas del ciclo de vida de esta especie dando lugar a sitios con las mejores condiciones propias para su alimentación y el desove. Entre los aspectos que se han sugerido como relevantes para la distribución de la especie son los vientos, debido a que los huevos depositados son de vida pelágica y sus larvas planctónicas. Así mismo se ha sugerido la presencia de una segregación por tamaños (edad) de acuerdo con la profundidad, encontrándose los organismos más longevos a mayor profundidad. Por estos motivos el propósito es demostrar y describir la influencia del viento y profundidad del mar en la plataforma continental de la Península de Yucatán, sobre la distribución del *E. morio*.

III.3.2 Material y Métodos

La base de datos usada para este análisis consta de 325 muestras de la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) de las tres tallas del *E. morio* (juveniles, preadultos, adultos), obtenidos de la flota comercial mexicana de mediana altura durante 1973 a 1977, a través del Centro Regional de Investigación Pesquera del Instituto Nacional de Pesca (México). También se usó el promedio de los valores de viento y profundidad del mar obtenidos de la CISL Research Data Archive (RDA Computational and Information Systems Laboratory, <http://dss.ucar.edu/>), organizados en una malla de medio grado de resolución espacial de la misma manera que los datos de CPUE (Fig. 4). Al hacer un primer análisis con todos los

datos observamos que mientras los juveniles y preadultos se encontraron en profundidades de hasta 80 m, aunque en abundancias relativas menores a las 40 t, los adultos se localizaron en zonas con profundidades menores a los 40 m (Fig. 16).

El algoritmo usado fue la versión del SOM para Matlab (Vesanto *et al.*, 2000). Se creó la estructura de la red SOM (matriz de 5x5 nodos) usando la ecuación gaussiana como función de vecindad. Las profundidades donde se hicieron las capturas de mero, oscilaron entre los 10 m y los 120 m, teniendo como promedio general los 22 m. El análisis de la CPUE del mero y la velocidad y dirección del viento se hicieron por separado empleando también una estructura de la red de 5x5 nodos.

III.3.3 Resultados

Aunque existe poca literatura donde reporten los efectos directos del viento sobre el mero, se encontraron aspectos generales acerca de la influencia del viento sobre el Golfo de México, como lo reportan Caso *et al.* (2004) donde indican que los vientos del norte en invierno, y del este en las otras estaciones, influyen sobre las corrientes y mareas y por consecuencia contribuyen a la formación e intensidad de los giros y surgencias provocando que en el Banco de Campeche haya áreas con proliferaciones y como consecuencia de alta productividad, lo que favorece la preferencia de hábitats de las diversas especies que ahí habitan (Bogdanov *et al.*, 1969).

La tabla 4 muestra los resultados de las 25 BMUs que se obtuvieron del análisis del SOM, lo que se refleja en la figura 17, que muestra que la velocidad del viento tiene mayor significancia en la abundancia relativa de la talla de adultos del mero (Tabla 5, Spearman, $\rho=0.89$, $p < 0.05$), mientras que indica que la abundancia relativa de juveniles y preadultos se encuentra por debajo de los 5 m de la velocidad del viento.

Las figuras 18 y 19 nos indican la velocidad y dirección del viento por cada BMU.

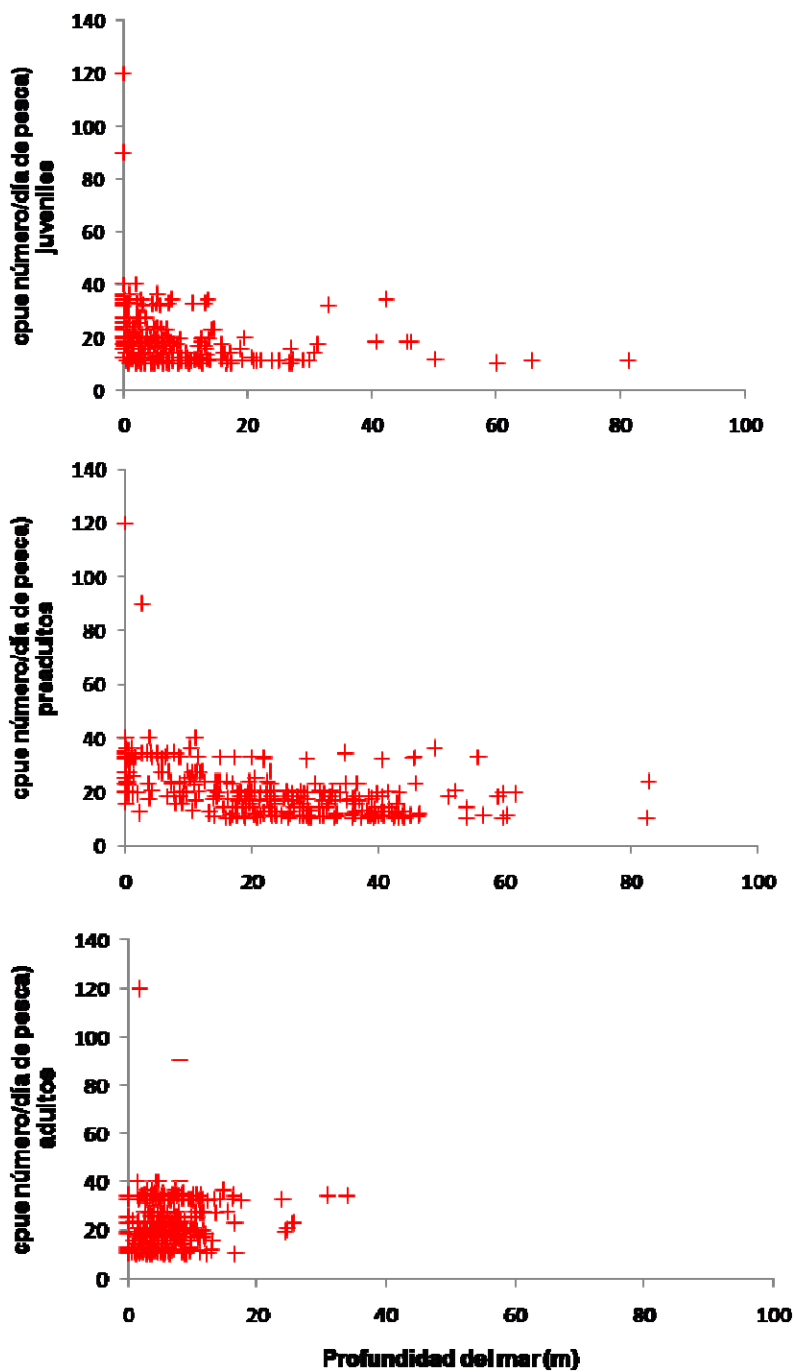


Figura 16. Distribución de la CPUE del mero (juveniles, preadultos, adultos) con relación a la profundidad del mar (m).

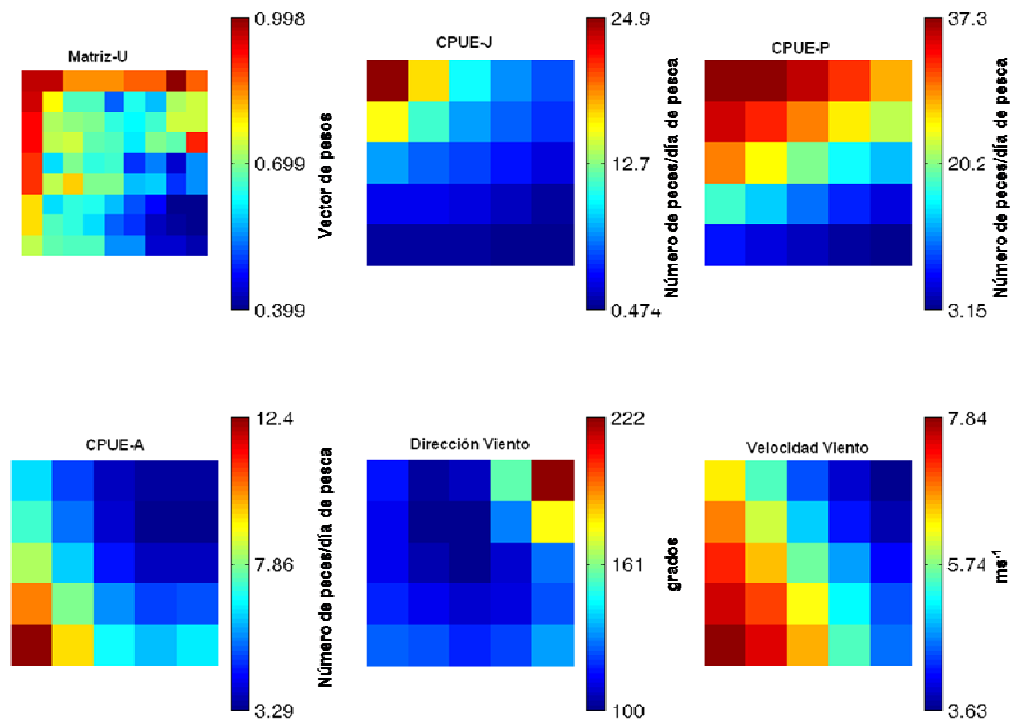


Figura 17. Matriz-U general y plano de componentes de las cuatro variables (5x5 nodos con topología rectangular) abundancia relativa del mero con relación a la dirección y velocidad del viento. CPUE-J=abundancia relativa de juveniles; CPUE-P=abundancia relativa de preadultos; CPUE-A=abundancia relativa de adultos.

En lo que se refiere a las zonas de mayor abundancia del mero con relación a la profundidad, García & De León (1980) indican que el mero tiene como hábitat usual los fondos coralinos, los cuales se desarrollan mayormente en la región norte de la plataforma continental de Yucatán, en profundidades que van desde la costa hasta los 50 m. Por lo que las zonas de pesca del mero, durante el otoño, son mayores en la región occidental del Banco de Campeche, en profundidades entre 40 y 70 metros. Los resultados que generó el SOM en una estructura de red de 5x5 nodos, tras el proceso de análisis de la CPUE con relación a la profundidad del mar (Tabla 6), indican que la profundidad tiene mayor significación sobre la CPUE de los juveniles y preadultos (Tabla 7, Spearman, $\rho=-0.71$, $\rho=-0.92$, $p < 0.05$), relaciones que se observan de manera clara en la figura 20.

Tabla 4. Promedio de CPUE (Juv,Pre,Adu; t), dirección y velocidad del viento, número de BMU y número de muestras por BMU.

BMU	# MUES	CPUE Juv (t)	CPUE Pre (t)	CPUE Adul (t)	Dirección Viento	Velocidad Viento (ms ⁻¹)
1	20	37.98	34.27	6.34	132.69	6.63
2	7	14.58	46.19	10.46	128.59	7.86
3	21	5.36	36.61	9.43	112.23	7.40
4	5	2.46	19.34	9.29	103.78	8.49
5	18	0.09	4.23	18.32	130.93	8.13
6	5	19.30	44.91	4.89	54.58	4.91
7	4	8.41	33.88	3.00	70.42	6.62
8	15	4.24	25.96	5.61	106.69	6.81
9	6	3.18	10.88	6.73	96.71	7.43
10	20	0.47	2.15	8.91	142.95	7.87
11	21	9.52	44.49	3.88	75.59	3.56
12	13	6.40	28.27	3.35	76.97	4.81
13	18	5.08	19.20	3.32	92.06	5.78
14	8	2.75	11.05	3.51	118.82	7.10
15	17	0.17	0.94	6.16	114.13	7.19
16	11	8.99	38.51	3.54	171.25	4.59
17	9	5.23	23.31	2.81	105.67	2.85
18	12	4.56	16.38	2.82	92.50	4.47
19	12	0.80	5.22	4.08	87.02	5.06
20	12	0.02	0.72	6.29	110.59	5.55
21	21	4.91	25.76	3.86	296.87	3.53
22	8	3.58	19.95	1.98	187.90	3.30
23	7	1.49	13.62	3.24	132.03	3.61
24	16	0.48	3.23	4.33	108.95	3.58
25	19	0.16	2.42	8.83	171.30	4.25

Tabla 5. Correlación de rangos de Spearman de la abundancia relativa del *E. morio* (número/día de pesca) con respecto a la dirección y velocidad del viento basado en las salidas del análisis del SOM que se muestran en la Fig. 18.

Variable	CPUE Juv (t)	CPUE Pre (t)	CPUE Adu (t)	Dirección Viento (grados)	Velocidad Viento (ms ⁻¹)
CPUE Juv (t)	1.00				
CPUE Pre (t)	0.84*	1.00			
CPUE Adu (t)	-0.15	-0.33	1.00		
Dirección Viento	-0.16	0.00	-0.24	1.00	
Velocidad Viento (ms ⁻¹)	0.05	-0.14	0.89*	-0.50*	1.00

* Indicadores de significación de $p < 0.05$. Juv = juveniles, Pre = preadultos y Adu= adultos.

Tabla 6. Promedio de CPUE (juveniles, preadultos, adultos; t), profundidad, número de BMU y número de muestras por BMU.

BMU	# MUES	CPUE Juv (t)	CPUE Prea (t)	CPUE Adu (t)	PROFUNDIDAD (m)
1	22	5.7533	23.7979	1.7033	12.4712
2	19	5.2651	17.5333	2.8613	15.2702
3	20	3.4157	13.8652	2.3758	20.8408
4	8	5.8356	10.5749	3.2332	30.2417
5	28	0.2548	1.7039	3.7613	39.9663
6	10	4.9273	35.3362	1.9598	15.0691
7	9	7.0000	205.1111	4.4793	25.8090
8	4	8.0000	187.2500	3.8499	16.2006
9	8	1.1818	6.4289	4.7768	25.4988
10	17	152.8235	0.0631	1.5461	6.6452
11	18	8.6445	49.5567	2.8743	16.3739
12	14	5.0657	34.6444	5.5410	20.6933
13	10	1.7864	21.6101	6.5900	21.3986
14	15	0.1391	3.6872	7.0009	21.1166
15	16	0.5049	1.2991	8.5299	30.7190
16	9	17.2211	37.2819	4.0064	13.5430
17	6	8.5085	37.4294	6.8097	15.3828
18	14	3.3575	25.5693	8.2047	18.5195
19	5	0.6254	12.1031	9.7023	21.4563
20	15	0.0000	0.1150	10.9646	29.0155
21	21	37.5813	36.0507	6.0355	15.0408
22	8	14.9605	42.7264	8.8851	13.4352
23	11	6.8051	40.1464	12.5976	17.3041
24	5	2.5947	19.6074	12.9749	18.5495
25	13	0.1257	5.5767	20.9662	29.9893

Tabla 7. Correlación de Spearman de los rangos de la abundancia relativa del *E. morio* (número/día de pesca) con respecto a la profundidad del mar basado en las salidas del análisis del SOM.

Variable	CPUE Juv (t)	CPUE Prea (t)	CPUE Adu (t)	Profundidad (m)
CPUE Juv (t)	1.00			
CPUE Pre (t)	0.86*	1.00		
CPUE Adu (t)	-0.12	-0.18	1.00	
Profundidad (m)	-0.71*	-0.92*	0.27	1.00

* Indicadores de significación de $p < 0.05$. Juv = juveniles, Pre = preadultos y Adu= adultos.

Promedio de la Dirección y Velocidad del Viento
por cada BMU

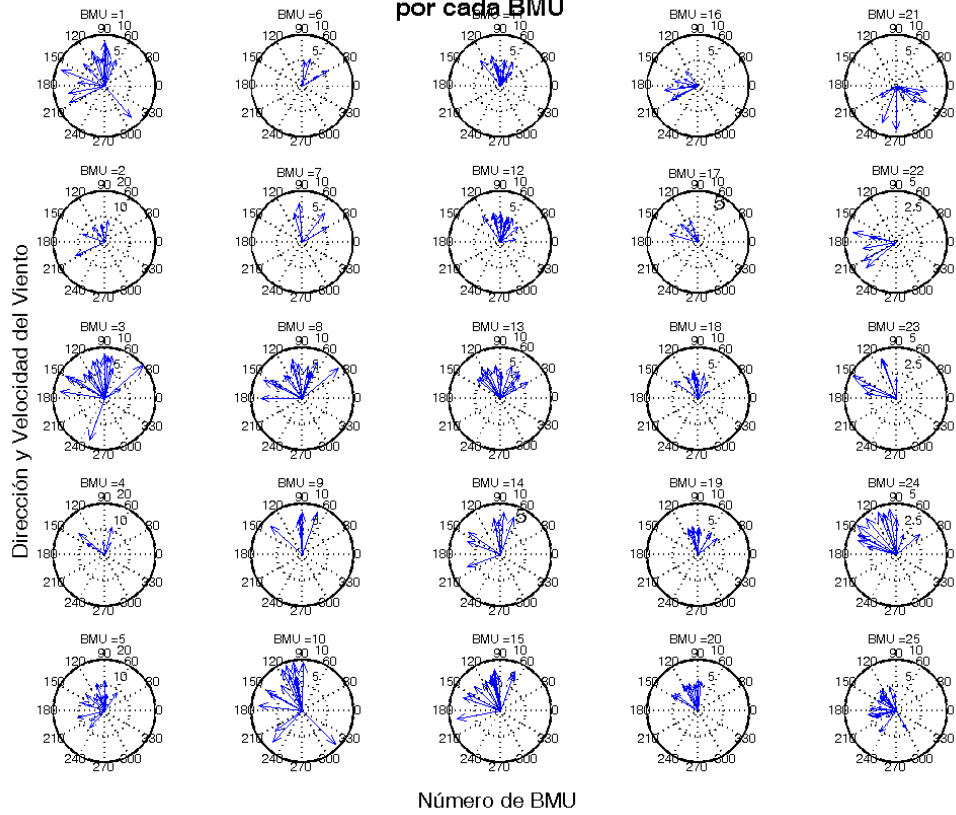


Figura 18. Promedio de la dirección y velocidad del viento por cada BMU (25).

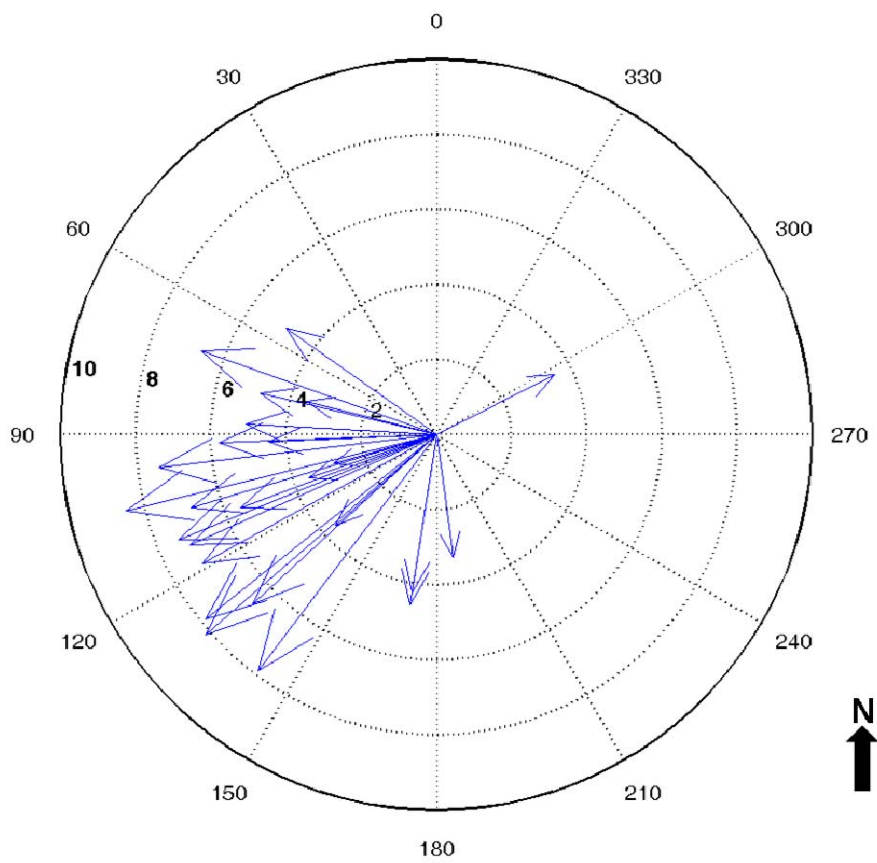


Figura 19. Promedio de la dirección y velocidad del viento de las 25 BMUs.

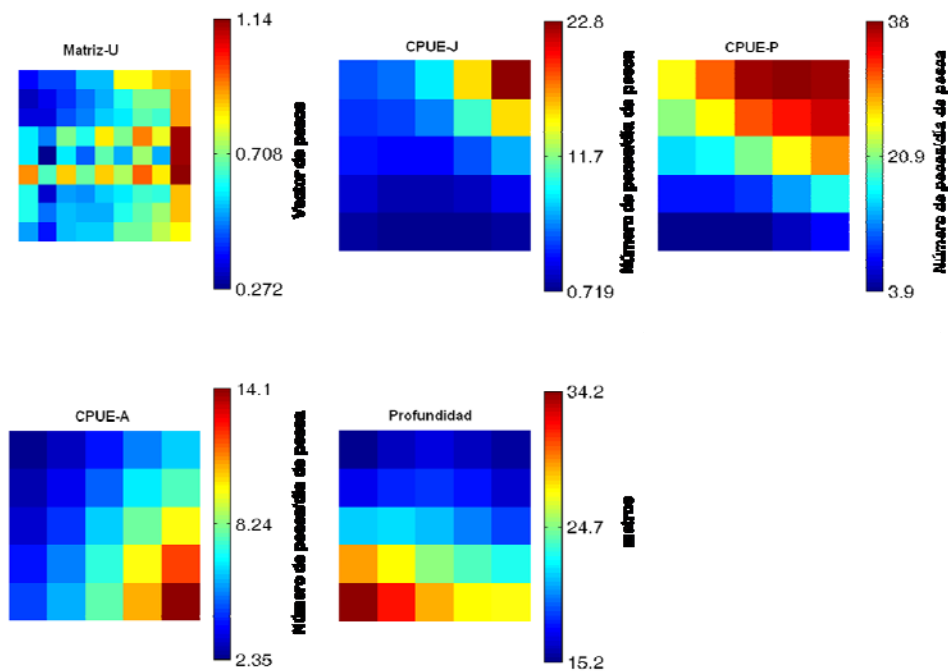


Figura 20. Matriz-U general y plano de componentes de cada variable de 5x5 nodos (resultado SOM) abundancia relativa de los grupos de *E. morio* con relación a la profundidad. CPUE-J=abundancia relativa de juveniles; CPUE-P=abundancia relativa de preadultos; CPUE-A=abundancia relativa de adultos.

III.3.4 Discusión

El análisis del SOM muestra una relación significativa de la distribución de la abundancia de mero con la intensidad de los vientos en el caso de los adultos, y con la profundidad para juveniles y preadultos. En el primer caso, pareciera estar asociado a los eventos conocidos como “nortes” que son vientos que se originan en la región boreal y se dirigen hacia el sur arrastrando consigo masas de aire frío. La época típica de inicio de la incursión de los “nortes” en el Golfo de México, incluida la península de Yucatán, es a finales del otoño e inicios del invierno. Por otro lado se sabe que la agregación reproductiva del mero ocurre hacia finales del invierno e inicio de la primavera, y que está asociada a la disminución de temperatura lo cual es un evento clave para la reproducción. Los resultados obtenidos parecieran estar

reflejando la asociación de estos dos factores, vientos intensos del norte y disminución de temperaturas con el proceso reproductivo.

Los resultados parecen sugerir una covarianza entre la intensidad-vientos y baja temperatura con una influencia en la abundancia relativa de adultos; sin embargo, de García (1974) muestra cómo la reducción de temperaturas está relacionada con la incursión estacional de masas de agua de la región oriental de la península de Yucatán, mientras que la incidencia de los eventos “nortes” corresponde a vientos intensos de provenientes de la zona boreal. Estas evidencias demostrarían la falta de correlación entre la intensidad de vientos y las temperaturas, y en contraste parece tratarse de dos factores que suman sus características haciendo evidente la relación con el evento reproductivo.

Por lo que respecta a la profundidad, los datos observados registran la presencia de peces de la zona costera, menor a 10 m hasta los 120 m de profundidad; sin embargo, sólo se observan tres registros a profundidades mayores a 40 m de profundidad. Dentro de este contexto, las correlaciones significativas estimadas entre abundancia de juveniles y preadultos con la profundidad resultaron ser inversas, esto es, la abundancia relativa disminuye conforme aumenta la profundidad (figura 16); contrastando con la ausencia de relación significativa con los adultos. En el caso de los adultos se observa claramente como el perfil de la relación entre abundancia relativa de adultos y la profundidad tiende a ser inverso durante el verano y el otoño, cambiando de signo en el invierno y primavera, cuando se observa una relación proporcional, aunque resulta no significativa. La falta de significación en este último caso puede deberse por un lado a la distribución de los valores observados (en dos periodos muestran una relación inversa y en otros dos una relación proporcional); no obstante la relación inversa significativa con la profundidad para el caso de la abundancia relativa de juveniles y preadultos pareciera sugerir la existencia de una segregación con la profundidad.

La importancia relativa de una segregación con la profundidad radica en los procesos poblacionales; parece que la zona costera proporciona refugio y alimento a las tallas menores y conforme los peces se vuelven cazadores más hábiles y aumenta su capacidad de desplazamiento, se van alejando hacia aguas más profundas.

III.4 Influencia de los principales factores ambientales sobre la distribución del mero (*Epinephelus morio*) en el Banco de Campeche, México.

III.4.1 Introducción

En los capítulos anteriores se analizó y discutió el efecto individual de algunas variables ambientales como la temperatura superficial del mar, el tipo de suelo y la intensidad y dirección del viento sobre la distribución espacial de mero en el Banco de Campeche. El objetivo de esta sección es construir un modelo para diagnosticar la abundancia y distribución del *E. morio* que integre el efecto de cada una de estas variables ambientales.

III.4.2 Material y Métodos

La base de datos que se usó para los análisis se compone de 325 muestras de la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) de los tres estados de desarrollo del *E. morio* (juveniles, preadultos, adultos), obtenidos de la flota comercial mexicana en los años de 1973 a 1977, por estación del año; además de cuatro variables más (cinco tipos de fondo más frecuentes: coral-arena, arena, arena-coral, arena-conchas, coral; la temperatura superficial del mar; intensidad del viento y profundidad del mar) las cuales resultaron estadísticamente significativas para la distribución del mero (ver subtemas III.1, III.2, III.3, respectivamente).

El algoritmo RNA usado fue la versión del SOM para Matlab (Vesanto *et al.*, 2000); y se continuó manejando una estructura de red topológica rectangular de 5x5 nodos, y como función de vecindad se usó la función gaussiana.

III.4.3 Resultados

Del proceso de análisis del SOM con las once variables, se obtuvo una matriz-U (Fig. 21) la cual indica las influencias y tendencias de la correlación entre las

variables involucradas, obteniendo los 25 grupos (BMUs; Tabla 8). Se observa que las zonas con mayores concentraciones de juveniles y de preadultos son en regiones someras (Tabla 9, Spearman, $\rho=-0.79$, $\rho=-0.95$, respectivamente, ambos con $p < 0.05$). Sin embargo, en las regiones donde se encuentran mayores abundancias relativas de mero de tallas grandes (adultos), la intensidad del viento y profundidad del mar resultaron ser las variables significativas (Tabla 9, Spearman, $\rho=0.74$, $\rho=0.74$, respectivamente, ambos con $p < 0.05$). En relación a los tipos de sustrato, los resultados indican que cerca del 50% de la variación de la abundancia relativa de juveniles es explicada significativamente por la presencia de sustratos de arena, y el otro 50% se asocia a sustratos arena-coral y arena-conchas, aunque éstos dos últimos con significación inversa (Tabla 8). Algo similar ocurre con juveniles donde el sustrato arena-coral y arena-conchas se correlaciona en más de 70% con la variación en abundancia de juveniles y preadultos, también con signo negativo (significación inversa); y para juveniles también con el sustrato coral pero con signo positivo. En el caso de los adultos los sustratos arena-coral y arena-conchas resultaron significativos y con signo positivo mientras que el sustrato arena es significativo pero con signo negativo, con correlaciones mayores a 50% y en el caso de arena-coral cerca de 90%.

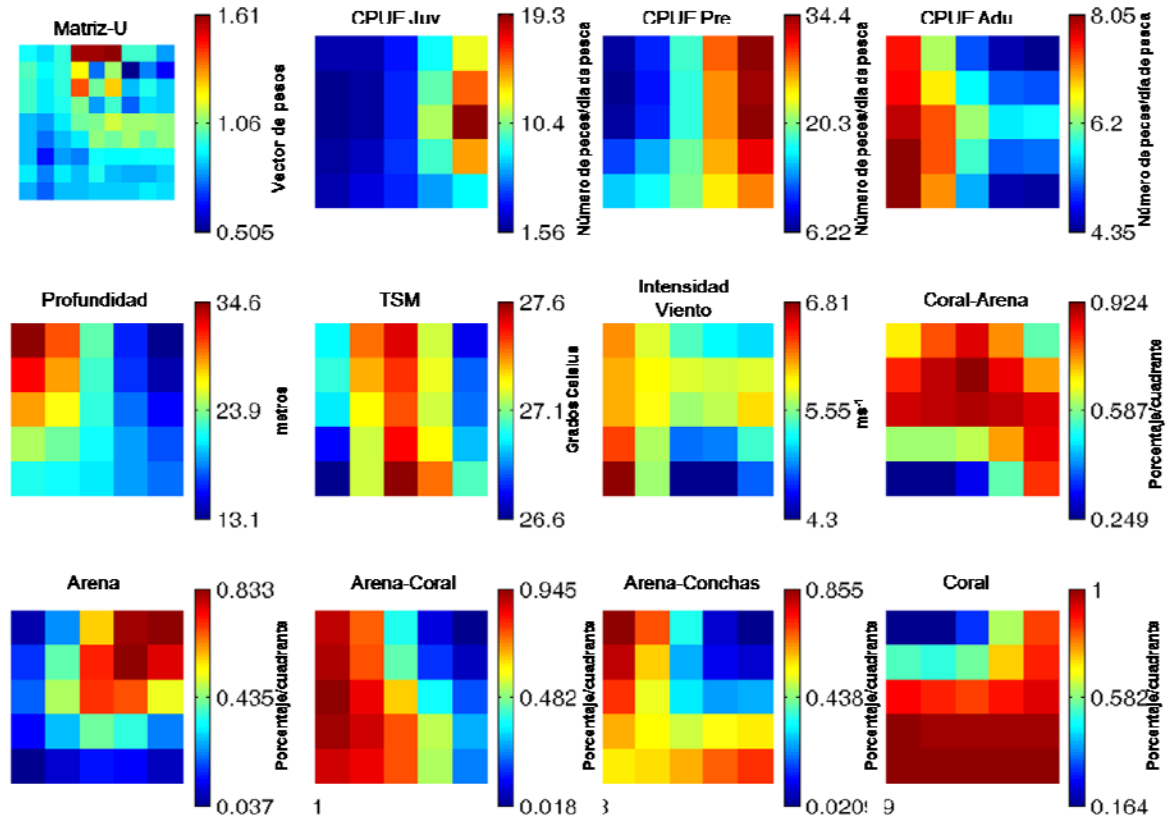


Figura 21. Mapas de matriz-U y plano de componentes de cada variable con topología rectangular de 5x5 nodos obtenidos del modelado de la distribución espacial del mero en Campeche, con relación a tres de los principales factores ambientales y los cinco tipos de fondo donde hay presencia importante del mero. CPUE-J=abundancia relativa de juveniles; CPUE-P=abundancia relativa de preadultos; CPUE-A=abundancia relativa de adultos.

III.4.4 Discusión

En principio la interpretación de los signos se refiere a relaciones proporcionales entre las variables, mientras que el signo negativo representa relaciones inversas. De esta manera por ejemplo es notorio que los adultos tienen un comportamiento opuesto a los juveniles y preadultos, esto es, las mayores abundancias son mayores con la profundidad, en la época cuando la intensidad de los vientos es mayor y en fondos arena-coral y arena-conchas. En cambio, respecto a estas variables, las mayores abundancias de juveniles y preadultos se presentan

en zonas someras, y los preadultos en particular en épocas de menor intensidad de vientos, y en cuanto a tipos de vientos la abundancia de juveniles es mayor en fondos arenosos mientras que los preadultos en fondos de coral (Tabla 9). Estas relaciones se reflejan también en los coeficientes de correlación significativos entre estados de desarrollo, por ejemplo un coeficiente positivo entre juveniles y preadultos que se interpreta razonable por efecto de denso-dependencia ya que la supervivencia directa (inmediata en tiempo) de juveniles (2-3 años de edad) se ve reflejada en los preadultos (4 años de edad). Los valores negativos de las correlaciones significativas entre juveniles y preadultos con los adultos (5 a +25 años) sugieren una distribución diferencial de estos estadios.

En relación con la profundidad, no hay diferencias claras entre la distribución de los tres estados de desarrollo; sin embargo los resultados aquí obtenidos sugieren la existencia de diferencias. Diversos autores (Seijo, 1986; Arreguín-Sánchez *et al.*, 1996; 1997; Arreguín-Sánchez y Pitcher, 1999; Giménez-Hurtado, 2005; Burgos-Rosas & Pérez-Pérez, 2006) han señalado una distribución diferencial de los estados de desarrollo, lo cual se confirma en este análisis. El mero es una especie gregaria y territorial, y las preferencias de los adultos en cuanto a las características ambientales de las zonas donde es mayor su abundancia coinciden con las zonas de menor abundancia de los estadios juveniles y preadultos. En cambio, las condiciones bajo las cuales estos dos últimos estadios son más abundantes son similares. Esto probablemente esté asociado a la cercanía en hábitos y comportamiento en estas dos etapas de desarrollo y a que claramente una de ellas, los preadultos, dependen directamente de la abundancia de la otra.

La única discrepancia que parece notoria respecto al análisis individual de cada variable es que la temperatura en este modelo resultó ser no significativa para ningún estado de desarrollo, no obstante que en los análisis anteriores se demostró que la temperatura tiene un efecto significativo y de relevancia como proceso biológico ligado a la reproducción. Lo que parece ocurrir en este modelo integrado es que el contraste de la intensidad de los vientos (predominantemente vientos del norte durante el invierno) enmascaran la variación en temperatura. Una posible sugerencia es un efecto de covarianza, donde las bajas temperaturas estuvieran inducidas por

los vientos del norte. Sin embargo, y aunque seguramente tienen influencia directa en la temperatura (Tabla 9, Spearman, $\rho=-0.56$, con $p < 0.05$), se ha descrito claramente la incursión de masas de agua fría del Mar Caribe hacia la plataforma continental alcanzando justamente la mayor cobertura en la época de invierno, no obstante ambos procesos son totalmente independientes entre sí.

La representatividad del modelo resultó ser también relevante en cuanto a las relaciones definidas por los vectores estimados asociados a cada variable.

Tabla 8. Promedio de CPUE (juveniles, preadultos, adultos; t), número de BMU, número de muestras por BMU, profundidad, temperatura y dirección y velocidad del viento.

# MUES	# BMU	CPUE Juv (t)	CPUE Pre (t)	CPUE Adu (t)	Prof (m)	TSM (°C)	Dir Viento (°)	Vel Viento (ms ⁻¹)
24	1	4.95	24.50	4.04	16.85	27.40	284.37	3.29
10	2	3.59	23.79	3.91	16.59	28.69	135.46	2.49
31	3	3.61	22.83	5.41	17.84	28.85	96.85	4.28
8	4	131.50	1.32	7.65	6.14	24.84	28.67	131.18
31	5	133.87	0.04	1.41	6.22	38.22	28.77	124.85
4	6	292.00	11.37	23.03	1.94	13.03	26.65	163.54
6	7	6.31	22.60	2.63	14.74	27.20	72.00	2.83
3	8	2.45	19.32	5.26	17.06	28.61	102.63	6.88
2	9	0.40	5.20	6.96	19.68	28.60	98.33	7.20
9	10	0.33	2.28	4.09	33.87	27.27	110.41	5.19
24	11	9.41	43.35	2.92	14.79	26.12	94.10	4.20
9	12	6.01	26.77	1.43	14.52	26.67	93.67	5.67
17	13	4.77	17.07	2.44	21.08	26.78	99.59	6.15
5	14	1.08	7.73	3.44	24.89	26.73	105.93	6.83
16	15	0.86	0.81	6.48	31.21	26.49	129.90	5.78
7	16	18.38	44.81	5.07	13.44	26.15	87.24	5.23
6	17	6.26	38.80	4.63	20.84	26.47	103.99	7.20
14	18	5.32	26.58	5.27	22.53	26.09	139.92	7.09
10	19	0.37	5.29	6.22	22.57	26.32	99.74	7.99
14	20	0.77	0.64	7.99	31.28	26.12	149.17	7.52
21	21	37.10	34.63	6.47	15.50	26.67	130.62	6.64
10	22	11.01	43.33	10.80	13.87	26.96	123.03	7.82
16	23	4.43	31.37	9.29	18.50	25.44	99.61	7.74
9	24	0.40	6.67	9.59	21.29	24.99	118.16	7.37
19	25	0.09	3.88	17.84	30.40	25.81	132.75	7.91

Tabla 9. Correlación de rangos de Spearman de la abundancia relativa del *E. morio* (número/día de pesca) con respecto a las variables que tienen mayor influencia: profundidad del mar, temperatura superficial del mar, velocidad del viento, tipos de fondos basado en las salidas del análisis del SOM.

Variable	CPUE Juv (t)	CPUE Pre (t)	CPUE Adu (t)	Prof (m)	TSM (°C)	Veloc. Viento (ms ⁻¹)	Coral - Arena	Arena	Arena - Coral	Arena-Conchas	Coral
CPUE Juv (t)	1.00										
CPUE Pre (t)	0.91*	1.00									
CPUE Adu (t)	-0.65*	-0.83*	1.00								
Prof (m)	-0.79*	-0.95*	0.74*	1.00							
TSM (°C)	-0.33	-0.18	-0.26	0.16	1.00						
Veloc. Viento (m s ⁻¹)	-0.22	-0.46*	0.74*	0.43*	-0.56*	1.00					
Coral-Arena	0.21	0.03	-0.18	0.11	0.16	0.13	1.00				
Arena	0.47*	0.51	-0.51*	0.51*	0.13	-0.06	0.47*	1.00			
Arena-Coral	-0.84*	-0.90*	0.87*	0.81*	0.13	0.34	-0.30	-0.69*	1.00		
Arena-Conchas	-0.60*	-0.69*	0.55*	0.74*	0.07	0.06	-0.19	-0.92*	0.77*	1.00	
Coral	0.30	0.41*	-0.08	0.58*	-0.25	-0.27	-0.38	-0.12	-0.06	-0.10	1.00

* Indicadores de significación de $p < 0.05$. Juv = juveniles, Pre = preadultos y Adu= adultos.

II. Discusión

Aunque existen pocos trabajos de RNAs en el área de las ciencias pesqueras, en su mayoría hacen uso de algoritmos como la red “feed-foward” o retropropagación (back-propagation) usados para el modelado y/o predicción tanto de la abundancia relativa, como reclutamiento y hábitats preferenciales de diversos recursos pesqueros. Uno de estos estudios realizado por Nishida & Komatsu (1998) en el que indican que los resultados obtenidos durante el análisis de modelado de atún aleta amarilla en el Océano Indico podrían reproducir tendencias aproximadas de su abundancia relativa, incluso haciendo el modelado de una posible predicción del recurso, demostrando que una RNA es adecuada en este estudio. De igual manera Chen & Hare (2006) haciendo uso tanto el algoritmo feed-foward como la lógica difusa (rama de la inteligencia artificial) para realizar un análisis del reclutamiento del lenguado del Pacífico, pero no resultó adecuado para realizar análisis de predicción; en tanto que Dreyfus-León & Gaertner (2006) encontraron resultados satisfactorios al modelar la relación entre la CPUE y la abundancia del atún en la pesquería de cerco. Estas investigaciones sugieren que los algoritmos de RNAs son una buena herramienta en el área de las pesquerías.

El algoritmo del SOM ha estado más enfocado al modelado y análisis de procesos atmosféricos y oceánicos (Cavazos, 2000; Cavazos *et al.*, 2002), incluso los resultados obtenidos han servido como datos de entrada a otros algoritmos de redes neuronales para la predicción. En la presente investigación se demostró que el algoritmo del SOM resulta ser una herramienta adecuada para el modelado de la abundancia relativa del mero en la plataforma continental de Yucatán.

El objetivo principal de esta investigación es explorar la aplicación de algoritmos basados en redes neurales, particularmente el SOM, para la representación de la distribución espacial de especies, específicamente sobre el mero, *E. morio*, del Banco de Campeche, seleccionado como caso de estudio. En este contexto uno de

los elementos de mayor relevancia es el análisis de las diferentes etapas involucradas en la aplicación del SOM.

Es bien sabido por los pescadores del Banco de Campeche que el mero es una especie que habita asociada a fondos duros de tipo arrecifal presentando agregaciones reproductivas en el invierno e inicios de la primavera, hacia la región media de la región oriental de la plataforma continental, dispersándose en toda la plataforma el resto del año. Este conocimiento ha sido reportado por diversos autores (Doi *et al.*, 1981; Seijo, 1986; Arreguín-Sánchez *et al.*, 1996, 1997, 1999; Arreguín-Sánchez & Pitcher, 1999; Hernández *et al.*, 1999; Burgos *et al.*, 2003; Giménez-Hurtado *et al.*, 2005; Burgos-Rosas & Pérez-Pérez, 2006; López-Rocha & Arreguín-Sánchez, 2008), y su conocimiento empírico se traduce en una mayor eficiencia de pesca.

El estado actual del recurso ha sido definido en la Carta Nacional Pesquera (Alvarez *et al.*, 2002) como sobreexplotado siendo el tamaño actual de la población aproximadamente un tercio del reportado para mitad de los 1970. En este sentido se define como objetivo explícito de manejo la recuperación de la población a los niveles de producción que tenía en los 70's. Burgos-Rosas y Pérez-Pérez (2006) hacen en una recomendación técnica desde la perspectiva del Instituto Nacional de la Pesca, como entidad responsable del gobierno federal de soportar técnica y científicamente la toma de decisiones, en el sentido de explorar el uso de áreas de restricción a la pesca los sitios de agregación de peces, intentando favorecer así la recuperación del recurso ya que otras técnicas, como la implementación de una talla mínima de captura y el establecimiento de una veda de un mes de duración durante el invierno no han dado los resultados esperados.

En este contexto es que resulta relevante generar mayor conocimiento sobre la distribución espacial del mero y de los procesos asociados que determinan esos patrones de comportamiento. En este trabajo, de manera particular, no se pretende suministrar recomendaciones de manejo, sino que, por el estado del uso de la

herramienta de redes neurales, se pretende probar la utilidad de las redes neurales en generar conocimiento sobre los patrones de distribución de esta especie.

Los resultados obtenidos confirman la asociación del *E.morio* con tipos de sustrato duros y de caliza que había sido mencionada por Bölke & Chaplin (1968) y Smith (1971) para la zona de las Bahamas. En cuanto al Banco de Campeche, estos hallazgos resultan de mayor importancia dadas las agregaciones de adultos durante el proceso reproductivo, tiempo en el cual el recurso es altamente vulnerable a la pesca. Es importante señalar que aunado al tipo de sustrato, las asociaciones pueden responder a zonas donde existen las condiciones idóneas o donde convergen varios factores (mecanismos de disparo) que hacen factible el desove de estos organismos. De acuerdo con algunos autores la agregación masiva para el desove, como ocurre en otras especies de serránidos tropicales, no se observa en *E. morio* en el Banco de Campeche (Giménez *et al.*, 2003), no obstante los resultados demuestran la existencia de una agregación hacia la región oriental del Banco, confirmando lo mencionado por Arreguín-Sánchez *et al.*, 1996, 1999; y Arreguín-Sánchez & Pitcher 1999 con base en información indirecta.

En este sentido el modelado basado en redes neuronales permitió la identificación de la asociación entre abundancia relativa de mero y ciertos tipos de sustrato específicos, aspecto que resulta importante para la determinación de hábitats relevantes para la especie a lo largo de su desarrollo ontogénico (Albañez-Lucero & Arreguín-Sánchez, 2009, ver anexo 2).

De los resultados obtenidos del análisis de la abundancia relativa con respecto a los tipos de sustrato, y de acuerdo Arreguín-Sánchez *et al.* (1996, 1997) y Giménez-Hurtado *et al.* (2005) se encontró que los sustratos con mayor preferencia para el mero son los fondos coralinos para los juveniles y preadultos mientras que los adultos prefieren los fondos arenosos. Con respecto a la temperatura sólo se

encontró una correlación inversa significativa con adultos, lo cual se asocia al a los aumentos de abundancia por agregación en el periodo reproductivo en la época fría del año coincidiendo con lo reportado por González *et al.* (1974) quienes reportan temperaturas en estas condiciones una TSM preferible entre los 23 °C y los 25 °C.

Con respecto a vientos, se encontró de una correlación inversa significativa entre velocidad del viento y abundancia de adultos. En principio se formulan dos posibles hipótesis; 1) la inducción de bajas temperaturas ya que las mayores intensidades de vientos ocurre en la temporada de nortes, en la época fría del año, promoviendo bajas temperaturas, lo cual está asociado al proceso reproductivo; y 2) que a nivel local donde ocurre mayor presión atmosférica se generan vientos cuyos frentes arrastran plancton y convergen en ciertas áreas. Esto produce concentración de organismos localmente, lo cual provee de alimento a los peces, es decir, el plancton es arrastrado y se concentra constituyendo zonas de mayor disponibilidad de alimento, siendo a su vez alimento de invertebrados y peces jóvenes, los cuales a su vez son presas de meros (figura 22). Este último concepto coincide con el concepto de “tríada” propuesto por Bakun (1996), donde los procesos oceanográficos que promueven la concentración, el enriquecimiento y la retención podrían ser determinantes para explicar la estrategia reproductiva y el éxito del reclutamiento. Los resultados obtenidos en este estudio muestran de manera general que las mayores abundancias se presentan en las zonas de baja intensidad donde tienden a converger los vientos.

En consecuencia se comprueba que tanto la intensidad del viento como la TSM son variables significativas para la distribución del mero, lo que nos hace suponer que el mecanismo físico sugerido es que zonas locales donde ocurre mayor presión atmosférica genera vientos radialmente y que cuando éstos tienden a debilitarse arrastran consigo plancton. Esto produce concentración de organismos localmente lo cual provee de alimento a los peces, es decir, que al arrastrarse plancton se concentran, también por alimento, invertebrados y peces jóvenes, los cuales a su vez son presas de meros; dando lugar a un proceso de distribución por “parches”,

considerando que las aportaciones de alimento son del océano y no de aportaciones terrestres.

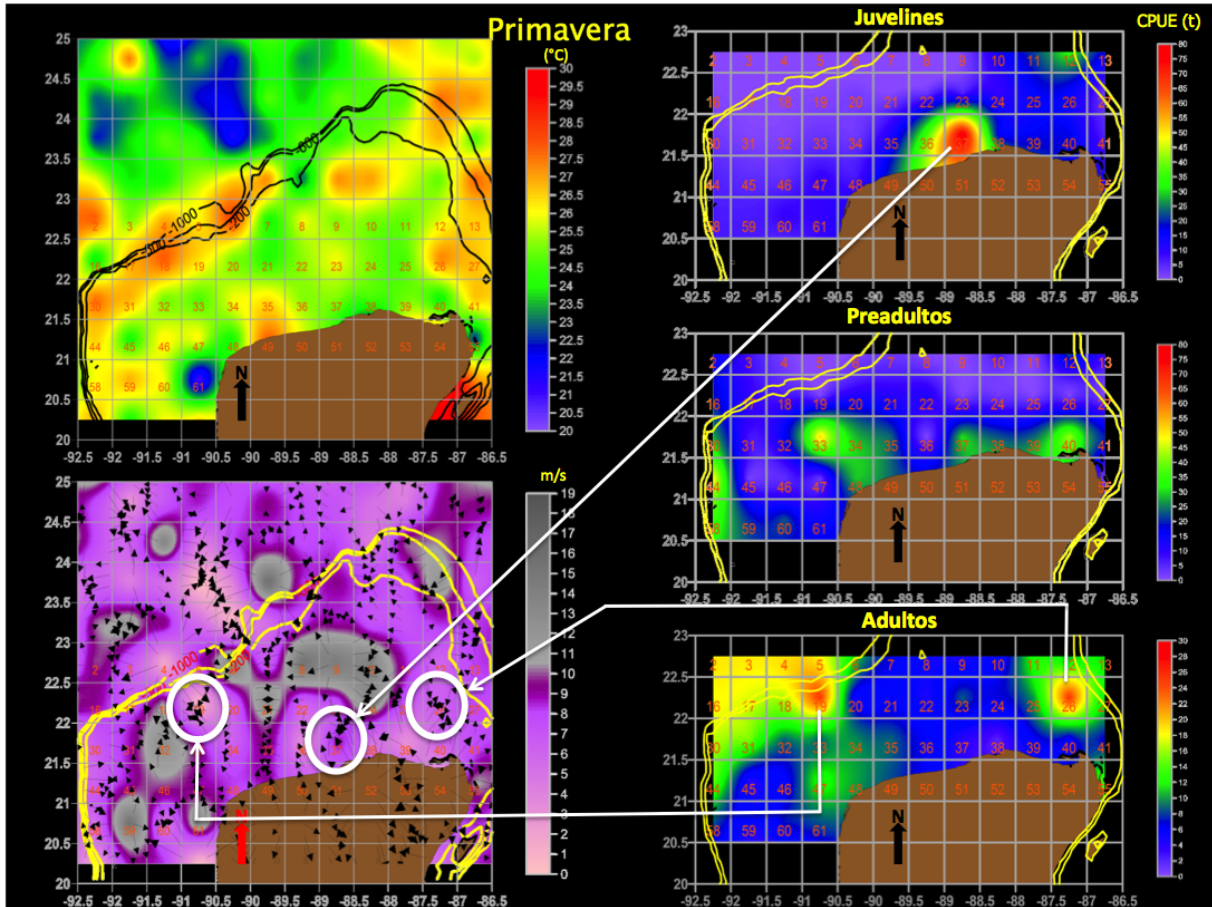


Figura 22. Relación entre la distribución de los diferentes estadios de vida del mero (panel derecho) con la temperatura superficial del mar (panel izquierdo arriba) y vientos (panel izquierdo abajo). Nótese que las zonas de mayor concentración de peces coinciden con las zonas de convergencia de los vientos.

En este caso se considera que no hay un efecto de covarianza entre la temperatura y la intensidad de vientos ya que los mecanismos son diferentes. García (1980) reporta la introducción de masas de agua fría provenientes de la región del Caribe, mientras que los vientos se generan a partir de procesos atmosféricos. La segunda hipótesis tiene que ver disponibilidad de alimento, y esto a su vez con la forma como inciden los vientos en la superficie del mar, generando frentes locales que inducen la concentración de plancton. En este sentido la concentración de

plancton induce también la concentración de niveles tróficos superiores incluyendo al mero, provocando mayores abundancias, hipótesis que está bien documentada en otras especies. En este caso la relación inversa estaría asociada justamente a que en las zonas de frentes se generan condiciones locales estables evidenciadas por el poco arrastre de plancton y en lugar de esto su concentración. Este proceso estaría favorecido en la época fría del año por la incidencia de vientos más intensos. Los mecanismos particulares para cualquiera de las dos hipótesis deberán ser estudiados a profundidad.

El SOM resultó ser una herramienta con capacidad para identificar los principales rasgos que determinan la distribución espacial y la variación estacional de la misma. Se identificaron correlaciones significativas de los diferentes estados de desarrollo del mero con los tipos de fondo, sin embargo algunas relaciones significativas resultaron ser diferentes cuando se asoció sólo el tipo de sedimento respecto a cuando se incorporaron todas las variables en el mismo modelo (modelo global). Las relaciones adultos con coral-arena y juveniles con arena dejaron de ser significativas, mientras que las relaciones de juveniles y adultos aparecen como significativas. Algo similar ocurre con adultos y la profundidad que de no ser significativa la correlación, lo es en el modelo global; la velocidad del viento y la abundancia de juveniles aparece en este mismo modelo como significativo y la correlación de la temperatura deja de ser significativa con adultos.

Dos aspectos resultan relevantes en este contexto, por un lado los modelos que asocian la abundancia del mero con una sola variable permiten examinar procesos puntuales, mientras que con el modelo global es la interacción de las variables las que determinan la distribución del mero. De esta manera por ejemplo, la temperatura deja de ser significativa, como variable, para la distribución del mero (con ningún estadio resultó ser significativa la correlación), sin embargo es bien sabido que la relevancia que tienen las bajas temperaturas para que se den las condiciones necesarias para que se lleve a cabo el proceso reproductivo. Este resultado pareciera contradictorio sin embargo la correlación entre temperatura y viento resulta

inversa y negativa, esto es, a mayor intensidad de vientos menor temperatura. Al respecto, se demostró que los vientos dominantes provienen del norte solo en la época fría del año. Como se mencionó antes, parece ser que en el modelo global el efecto de los vientos enmascara el efecto de la temperatura lo cual puede deberse a la propia naturaleza de la variable (aun cuando los datos de entrada son estandarizados), o bien que el dominio de la intensidad del viento es prácticamente el mismo (vientos del norte) en prácticamente todos los cuadrantes de medio grado por medio grado en que fue dividida la plataforma continental.

Otro aspecto que resultó de interés es que en el modelo global aparecieron correlaciones inversas significativas entre juveniles y adultos y preadultos y adultos. Estas relaciones no identificadas anteriormente reflejan un efecto denso-dependiente lo cual se puede explicar por el comportamiento gregario de esta especie.

El hecho de que en el modelo global aparezcan diferencias respecto a los modelos que consideran solo una variable ambiental, sugiere que el modelo identifica procesos de distribución asociados a las características del hábitat, considerando el hábitat como el espacio multivariado en el cual las especies se desarrollan.

Si bien existe un conocimiento empírico sobre como algunas variables, como tipo de fondo y temperatura, se relacionan con la presencia o ausencia del mero en el medio marino, los resultados obtenidos no solo confirman este conocimiento sino que aportan información cuantitativa sobre las magnitudes y tiempos. Adicionalmente, surge información adicional sobre el efecto significativo de los vientos. Esta información cuantitativa, dado que ofrece una visión tangible de la distribución de la abundancia del mero por estadio de vida en el Banco de Campeche, resulta ser de mucha utilidad para apoyo a las iniciativas propuestas por Burgos-Rosas & Pérez-Pérez (2006) en cuanto a la necesidad de evaluar el uso posible de áreas de restricción de la pesca; particularmente en cuanto a localización y una aproximación al tamaño de la misma. Al respecto, López-Rocha & Arreguín-Sánchez (2008), considerando los resultados aquí obtenidos sobre la relación del

tipo de fondo y temperatura, en adición a la distribución espacial de la capturabilidad (vulnerabilidad a pesca), realizan un primer intento de ubicación de áreas restringidas (ver anexo 4).

III. Conclusiones

El objetivo principal de esta investigación se orientó a probar si la aplicación de algoritmos de redes neurales, particularmente los Mapas Auto-Organizados, SOM, son una herramienta útil y aplicable a estudios sobre distribución espacial de especies marinas, eligiendo como caso de estudio el mero, *Epinephelus morio*, del Banco de Campeche, México.

Se dispuso de información estacional de abundancia relativa (expresada como captura por unidad de esfuerzo) del mero en cuadrantes de medio grado. Se realizó una revisión de la literatura en relación al tipo de variables ambientales que podrían afectar la distribución espacial del mero así como una revisión sobre la disponibilidad de este tipo de información de manera compatible con la de abundancia relativa. Las variables seleccionadas fueron: tipos de fondo, temperatura superficial del mar, dirección e intensidad de vientos y profundidad.

De la experiencia adquirida sobresalen varios aspectos que se consideran clave para la aplicación del SOM. Como se trata de un algoritmo basado en aprendizaje, este proceso debe de estar sustentado por un experto del tema para asegurar que lo aprendido corresponde con los procesos a modelar. En nuestro caso, existe información diversa sobre el comportamiento de la especie en relación a algunas de las variables a modelar que, si el aprendizaje es adecuado, el modelo debe de replicar adecuadamente. Esta interpretación es un elemento básico para continuar hacia los procesos de validación y estimación. En este camino hay decisiones a tomar en relación a la aplicación del algoritmo de modelación, tales como la función de inicialización, la selección de las funciones de vecindad, tamaño de la matriz para la representación de los mapas del SOM y el tipo de mapa más adecuado. Dado que

la finalidad es la representación de procesos la estrategia, salvo que uno tenga evidencia que aporte una definición a priori de una selección de criterio determinada, es probar diferentes opciones y combinaciones que resulten en la mejor resolución posible, de ahí la importancia del experto. Generalmente esta etapa se resuelve en un proceso recursivo entre las etapas de aprendizaje y validación. De esta manera, una vez definidos los diferentes criterios de aplicación del SOM, se procede a la etapa de estimación.

Para el caso de estudio, después de varios ensayos con los criterios elegidos se encontró que los mejores resultados se obtuvieron al inicializar la red linealmente en lugar de hacerlo de forma aleatoria, empleando una función de vecindad de tipo logístico con la representación de mapas a través de una matriz de 5x5. En cuanto a la representación visual del mapa, se recurrió a la observación de las diferentes representaciones con el fin de visualizar los resultados no obstante que en la etapa final fue más conveniente generar una matriz-U de 5x5, lo cual es indicado por un menor error de cuantización y lo proyectado en las matrices-U que se generaron en cada análisis.

Con respecto al caso de estudio se logró definir la afinidad del mero por tipos de fondo y aunque en general corresponde a fondos coralinos y arenosos, los diferentes estadíos tienen mayor preferencia por ciertos tipos o combinaciones específicas. En el caso de la temperatura los resultados coinciden totalmente con el conocimiento reportado en la literatura, en particular para los adultos, coincidiendo las altas abundancias con temperaturas bajas y esto a su vez asociado con el comportamiento reproductivo de la especie. En el caso de la profundidad se encontró una relación inversa particularmente para juveniles y adultos lo cual también coincide con lo reportado en la literatura en el sentido de que juveniles tienden a permanecer cerca de la costa. No existen antecedentes sobre la relación entre vientos y la distribución del mero, particularmente con la intensidad de los mismos donde se encontró una relación inversa significativa con la distribución de la abundancia de los adultos. En este contexto se formulan dos hipótesis que deberán ser probadas más

adelante; una de ellas asociada a la temperatura ya que los vientos más intensos ocurren en la época de nortes que se presenta en la temporada más fría del año, y estas bajas temperaturas, como ya se mencionó antes, están directamente asociadas con el comportamiento de agregación reproductiva.

Respecto al modelo global, integrando todas las variables que resultaron significativas, este mostró resultados ligeramente diferentes en cuanto a la significación de las diferentes variables. En algunos la correlación significativa de la abundancia de algún estadio de desarrollo resultó diferente a la obtenida con esa misma variable de manera individual, pero en todos los casos fue posible hacer una interpretación razonable respecto al conocimiento de la biología de la población. Lo que éstas diferencias señalan puede ser interpretado como hábitat preferencial, esto es, la combinación de condiciones ambientales clave que definen la distribución de la especie.

IV. Literatura Citada

Adriaans, P. & D. Zantinge. 1996. Data Mining. Adison Wesley Longman. England.

Albañez-Lucero, M.O. 2002. Análisis y visualización de datos multidimensionales utilizando mapas auto-organizados. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México, 74.

Albañez-Lucero, M.O. & F. Arreguín-Sánchez. 2009. Modelling the spatial distribution of red grouper (*Epinephelus morio*) at Campeche Bank, México, with respect substrate. *Ecological Modelling*. Volume 220, issue 20. 24 Octubre 2009. ISSN 0304-3800. Elsevier.

Alvarez-Torres, P., Díaz-de-León-Corral, A., Ramírez-Flores, O. & E. Bermúdez-Rodríguez. 2002. National fisheries Chart 2000: a new instrument for fisheries management in inland waters. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 12 (2–3), 317–326.

Andrade de Bem, R., Cota Botelho Da, S.S. & M. Magalhães Mata. 2003. Apliação de redes neurais artificiais na análise de padrões de variabilidade de mesoescala. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brazil, 05 – 10 abril 2003, INPE. 2007-2014.

Arreguín-Sánchez, F. 1992. An approach to the study of the catchability coefficient with application to the red grouper (*Epinephelus morio*) fishery from the continental shelf of Yucatan, Mexico. PhD. dissertation. Centro de Investigación de Estudios Avanzados del IPN, México. 222 p.

Arreguín-Sánchez, F., Contreras, M., Moreno, V., Burgos, R., & D. Valdés. 1996. Population dynamics and stock assessment of the red grouper (*Epinephelus morio*) fishery on the Campeche Bank. In: Arreguín-Sánchez, F., J.L. Munro, M. Balgos and D. Pauly (Eds.), *Biology, Fisheries and Culture of Tropical Groupers and Snappers*. ICLARM Conf. Proc. 48, pp. 210–225.

Arreguín-Sánchez, F., Contreras, M., Valdés, R., Moreno, V. & Burgos, R. 1997. Biología y pesquería del mero (*Epinephelus morio*) del Banco de Campeche,

- México. En prensa. In: Flores-Hernández, D., Sánchez-Gil, P., Seijo, J.C., Arreguín-Sánchez, F. (Eds.), Análisis y diagnóstico de los recursos pesqueros críticos del Golfo de México. EPOMEX Serie Científica 7, México.
- Arreguín-Sánchez, F., J.A. Sánchez, D. Flores-Hernández, J. Ramos-Miranda, P. Sánchez-Gil & A. Yáñez-Arancibia. 1999. Stock - Recruitment relationships (SRRs): a scientific challenge to support fisheries management in the Campeche Bank, Mexico. p. 225-235. In: H. Kumpf and K. Sherman (eds.). The Gulf of Mexico Large Marine ecosystem. Blackwell Science. USA.
- Arreguín-Sánchez, F. & T.J. Pitcher. 1999. Catchability estimates accounting for several sources of variation: application to the red grouper fishery of the Campeche Bank, México. *Fish. Bull.* 97(4):746-757.
- Arreguín-Sánchez, F. 2000. Octopus-red grouper interaction in the exploited ecosystem of the northern continental shelf of Yucatan, Mexico *Ecological Modelling*. Volume 129:2-32-3, 119-129, Elsevier.
- Bakun, A. 1996. Patterns in the ocean: ocean processes and marine population dynamics. University of California Sea Grant, San Diego, California, USA, and Centro de Investigaciones Biológicas de Noroeste, La Paz, Baja California Sur, México, 323 p.
- Bessonov, N.M., A.A. Elizarov & O. González. 1971. Rasgos principales de la formación de las condiciones oceanográficas. Investigaciones Pesqueras Soviético-Cubanas. Fascículo 3:14-32, figs. 1-8, tablas 1-2.
- Bogdanov, D. V. 1965. Algunos rasgos de la oceanografía del Golfo de México y del Mar Caribe. *Invest. Pesq. Sovietico-Cubanas VNIRO-CIP*, Moscú. 23-45.
- Bogdanov, D., A. Sokolov & S. Jromov. 1969. Regiones de alta productividad biológico y pesquera en el Golfo de Mexico y el Mar Caribe. *Moskua Okeanologia*. 8: 371-381.

- Burgos, R. & O. Defeo. 2000. Un marco de manejo precautorio para la pesquería del mero (*Epinephelus morio*) del banco de Campeche, México. *Oceánides* 15 (2), 129–140.
- Burgos, R., Moreno, V. & E. Giménez. 2003. Informe de Investigaciones Conjuntas México-Cuba sobre el mero (*Epinephelus morio*, Valenciennes, 1828) en el banco de Campeche 2003. Convenio Internacional de Pesca México-Cuba. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (México) y Ministerio de la Industria Pesquera (Cuba). *Informe Internacional Interno*, 25 pp.
- Burgos-Rosas R. & L. Pérez-Pérez, 2006. La Pesquería de Mero. En: Sustentabilidad y Pesca Responsable en México. Evaluación y Manejo. SAGARPA. *Instituto Nacional de Pesca*. 544 pp.
- Brölke, J.E. & C.C.G. Chaplin. 1968. Fishes of the Bahamas and adjacent tropical waters. *Acad. Nat. Sci. Philadelphia*. XXI + 771p.
- Brulé, T. & L. Rodríguez C. 1993. Food habits of juvenile red groupers, *Epinephelus morio* (Valenciennes, 1828), from Campeche Bank, Yucatán, México. *Bulletin of Marine Science* 52(2): 772-779.
- Brulé, T. & C. Dèniel. 1993. Biological research on the red grouper (*Epinephelus morio*) from the southern Gulf of Mexico. In: Arreguin-Sanchez, F., Munro, J.L., Balgos, M.C., and Pauly, D. (eds.) Biology, fisheries and culture of tropical groupers and snappers. Makati City-Philippines *ICLARM Conference Proceedings* 48: 28-42.
- Brulé, T., D. Ordaz, M. Avila, M. Sánchez & C. Dèniel. 1994. Seasonal and diel changes in diet composition of juvenile red grouper (*Epinephelus morio*) from Campeche Bank. *Bulletin of Marine Science* 55(1): 255-262.
- Brulé, T., C. Dèniel, T. Colas-Marrufo y M. Sánchez-Crespo. 1999. Red grouper reproduction in the southern Gulf of Mexico. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 128:385-402.

- Carniel, R., Barbui, L. & P. Malisan. 2009. Improvement of HVSR technique by selforganizing map (SOM) analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29 (6), 1097–1101.
- Caso, M., Pisantry, I. & E. Ezcurra. 2004. Ed. Instituto Nacional de Ecología, ISBN 9688177059, 9789688177051.
- Carpinteiro, O.A.S. & A.P.A. Silva. 1999. A hierarchical neural model in short-term load forecasting. Engineering Applications of Neural Networks. *Memorias, 5th International Conference on Engineering Applications of Neural Networks (EANN'99)*. Wydawnictwo Adam Marszalek, Torun, Poland. 75-80.
- Cavazos, T. 1999. Large-scale circulation anomalies conducive to extreme events and simulation of daily rainfall in northeastern Mexico and southeastern Texas. *J. Climate*. 12 1506–1523.
- Cavazos, T. 2000. Using Self-organizing maps to investigate extreme climate events: An application to wintertime precipitation in the Balkans. *J. Climate*, 13 1718-1732.
- Cavazos, T., Comrie, A.C. & D.M. Liverman. 2002. Intraseasonal anomalies associated with wet monsoons in southeast Arizona. *J. Climate*, 15. 2477-2490.
- Contreras, M., V. Moreno & R. Burgos. 1993. Estado actual de la pesquería del mero *Epinephelus morio* en Yucatán. En *Atlas Pesquero de México. Pesquerías Relevantes. XXX Aniversario del INP. Secretaría de PESCA y Centro Nacional Editor de Discos Compactos*, Univ. de Colima. México.
- Cuvier, G. & A. Valenciennes. 1828. Histoire naturelle des poissons. Tome second. Livre Troisième. Des poissons de la famille des perches, ou des percoïdes. *Histoire Naturelle Des Poissons*, 2:1-490.
- Chen, D.G. & S.R. Hare. 2006. Neural network and fuzzy logic models for pacific halibut recruitment analysis. *Ecol. Model.* 195, 11–19.

- Deboeck, G.J., 1998. Financial applications of self-organizing maps. *Neural Network World*. (8) 2:213-241.
- Deriso, R.B., J.T. Barnes, L.D. Jacobson & P. Arenas. 1996. Catch-At-Age Analysis for Pacific sardine (*Sardinops Sagax*), 1983-1995. *ColCOFI Rep.* 37:175-187.
- Doi, T., Mendizabal, D. & M. Contreras. 1981. Análisis preliminar de la población de mero *Epinephelus morio* (Valenciennes), en el Banco de Campeche. *Ciencia Pesquera* 1 (1). I. N. P. SEPESCA, México.
- DOF. Carta Nacional Pesquera. *Diario Oficial de la Federación*. México. 2006.
- Dreyfrus-León M. 1999. Individual-based modeling of fishermen search behavior with neural network and reinforcement learning. *Ecol. Model.* 129 (1-3). 287-297.
- Dreyfus, M. & P. Kleiber. 2001. A spatial individual behaviour-based model approach of the yellowfin tuna fishery in the eastern Pacific Ocean. *Ecol. Modell.* 146, 47–56.
- Dreyfus-León, M. & D. Gaertner. 2006. Modelling performance and information exchange with artificial neural networks. *Ecological Modelling* Vol195, 30–36.
- Drumm, D., Purvis, M. & Q. Zhou. 1999. Spatial ecology and artificial neural network: modeling the habitat preference of the sea cucumber (*Holothuria leucospilota*) on Rarotonga, Cook Islands. *The 11th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Center*. New Zealand.
- El-Sharkawi, M.A. & R. Atteri. 1993. Static security assessment of power system using Kohonen neural network. *Memorias, International Conference on Engineering Applications of Neural Networks. Engineering Applications of Neural Networks. (EANN'93)*. 373-377.
- Flores-Hernández, D., P. Sánchez Gil, J.C. Seijo & F. Arreguín Sánchez. 1997. Panorama de los recursos pesqueros críticos en el Golfo de México y Caribe. In: Flores-Hernández, D., P. Sánchez-Gil, J.C. Seijo & F. Arreguín Sánchez

- (Eds). Análisis y diagnóstico de los recursos pesqueros críticos del Golfo de México. *EPOMEX. Serie Científica*. 7: 1-17
- García, C., 1980. Caracterización General del Banco de Campeche. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras* 5 (2).
- García, C. & Ma. E. De León. 1980. Características pesqueras del banco. *Rev. Cub. Inv. Pesq.* 5(2).
- Giménez, E., Moreno, V., Burgos, R., Alfonso, S., 2003. Reproducción y fecundidad de la cherna americana (*Epinephelus morio*) en el banco de Campeche, México. *Oceánides* 18 (1), 13–22.
- Giménez-Hurtado, E., Coyula-Pérez-Puelles, R., Lluch-Cota, S.E., González-Yañez, A.A., Moreno-García, V., Burgos-De-La-Rosa, R., 2005. Historical biomass, fishing mortality, and recruitment trends of the Campeche Bank red grouper (*Epinephelus morio*) *Fisheries Research*, Mar 2005.
- Giménez-Hurtado, E. 2005. Análisis de la pesca del mero *Epinephelus morio* (Serranidae: Pisces, Valenciennes 1928) en el Banco de Campeche. Tesis de Doctorado. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, B.C.S, México. 93 pp.
- Giménez-Hurtado, E. 2006. Reproducción y fecundidad de la cherna americana (*Epinephelus morio*) en el Banco de Campeche, México.
- Giménez-Hurtado, E., Arreguín Sánchez, F. & S. Lluch_Cota. 2006. Catchability in the red grouper (*Epinephelus morio*) fishery in the Campeche Bank. *In Press*.
- González, P., S. Zupanovic y H. Ramis. 1974. Evaluación de los niveles de explotación de la cherna americana en el Banco de Campeche. *Res. Invest. INP/CIP*, Cuba, 1:172-175.
- Gulland, J.A. 1965. Estimation of mortality rates. *Annex to Arctic Fisheries Working Group Rep.*, 3: 9.

- Haykin, S. 1998. *Neural Network: A Comprehensive Foundation*. New York, Macmillan. 842 pp.
- Heemstra, P.C. & J.E. Randall. 1993. *FAO species catalogue. Volume. 16. Groupers of the world (Family Serranidae, Subfamily Epinephelinae). An annotated and illustrated catalogue of the grouper, rockcod, hind, coral grouper and lyretail species known to date*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Hernández, A., Monroy, C., Moreno, V., Giménez, E., 1999. Informe de Investigaciones Conjuntas México-Cuba sobre el mero (*Epinephelus morio*, Val., 1828) en el banco de Campeche 1997-1998. Convenio de Pesca México-Cuba, CRIP Yucaltepén INP, SEMARNAP-México, CIP-Cuba (inédito).
- Hollmén, J., 1996. Process modelling using the self-organizing map. Master's Thesis, Helsinki University of Technology, 52 pp.
- Huse, O. 2003. Forecasting recruitment and stock biomass of Northeast Arctic cod using neural networks. *Scientia Marina* 67 (Suppl. 1), 325–335.
- Huse G. & G. Ottersen. 2003. Forecasting recruitment and stock biomass of Northeast Arctic cod using neural network. *SCI. MAR.*, 67 (Suppl. 1):325-335.
- Hsieh, W. W. 2000. Nonlinear canonical correlation analysis of the tropical pacific climate variability using a neural network approach. *Journal of Climate*, 14:2528-2539.
- Johnson, A.G. & L.A. Collins. 1994. Age-size structure of Red grouper (*Epinephelus morio*) from the Eastern Gulf of Mexico. *Northeast Gulf Science* 13(2): 101-106.
- Kohonen, T., Hynninen, J., Kangas, J. & J. Laaksonen. SOM_PAK: 1995. The Self-Organizing Map Program Package, Technical Report A31, 1995, Helsinki University of Technology, http://www.cis.hut.fi/research/som_lvq_pak.shtml.

- Kohonen, T., Oja, E., Simula, O., Visa, A., & J. Kangas. 1996. Engineering applications of the self-organizing map. *Proceedings of the IEEE*. 84:1358-1384.
- Kohonen, T., 2001. Self-Organizing Maps, 3er. Extended Edition. Springer, 260 pp.
- Lek, S., Guégan, J.F., 1999. Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction. *Ecol. Model.*, 120.
- Lombardi-Carlson, L.A., Fitzhugh, G.R., & J.J. Mikulas. 2002. Red grouper (*Epinephelus morio*) age-length structure and description of growth from the Gulf of Mexico: 1992- 2001. Panama City Laboratory Contribution Series 2002-06.
- López-Rocha, J. A. 2008. Dinámica espacial del mero *Epinephelus morio* en la plataforma continental de Yucatán, México. Tesis de Grado. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. 215 pp.
- López-Rocha, J.A. & F. Arreguín-Sánchez. 2008. Spatial distribution of red grouper *Epinephelus morio* (Serranidae) catchability on the Campeche Bank of Mexico. *Journal of Applied Ichthyology* 24, 282–289.
- Mendel, J.M. & R.W. McLaren. 1970. Reinforcement learning control and pattern recognition systems. In J. M. Mendel, & K. S. Fu (Eds.), *Adaptive, learning and pattern recognition systems: Theory and applications*. New York: Academic Press. 287-318.
- Moe, M.A., 1969. Biology of the Red grouper, *Epinephelus morio* (Valenciennes 1828), from the eastern Gulf of Mexico. Florida Department of Natural Resources Marine Research Laboratory, *Professional Paper*, 10, 1-95 pp.
- Moreno, V., Valdés, R., Nieto, S., González, M.E., Pol, J., Ríos, V., Zetina, C., Burgos, R. & M. Contreras. 1991. Informe de Investigaciones conjuntas México-Cuba sobre el mero (*Epinephelus morio*, Valenciennes, 1828) en el Banco de Campeche, 1991. Archivos Convenio de pesca México-Cuba, CRIP-INP México/CIP-MIP Cuba, La Habana.

- Moreno, V., Burgos, R., Contreras, M. & J. Mena. 1996. Composición por especies de la captura comercial de mero en Yucatán durante 1995. Resúmenes del II Simposio en Biología y Oceanografía Pesquera en México. CICIMAR-IPN La Paz, BCS, México, 8 pp.
- Nishida, T. & T. Komatsu. 1998. Analysis and predictions of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) catch rates of longline fisheries in the Western Indian Ocean using a neural network. *7th Expert Consultation on Indian Ocean Tunas, Victoria, Seychelles*. 241-250.
- Pajares, G. & M. Santos. 2006. Inteligencia artificial e ingeniería del conocimiento. México, Alfaomega. ISBN: 9701511662. 364 pp.
- Pedrycz, W. & .H.C. Card. 1992. Linguistic interpretation of self-organizing maps. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Marzo 8-12. 371-378.
- Piñeiro, R. y E. Giménez. 2001. Características térmicas del Banco de Campeche. *Ciencia Pesquera*. INP. 15. 83-87.
- Pope, J.G. & J.G. Shepherd. 1982. A simple method for the consistent interpretation of catch-at-age data. *J. Cons. Cons. Int. Explor. Mer*, 40: 176–184.
- Reyes, M.A., 2005. Avance y Perspectiva Órgano de Difusión del CINVESTAV “*Conocimiento multidisciplinario y equilibrio en los sistemas ecológicos marinos*”. Vol. 24 Núm. 3. Julio-Septiembre 2005. México ISSN0185-1411.
- Rodríguez, H. 1986. Estudio comparativo de dos estructuras rígidas (otolito y hueso mesopteridoide) para la estimación de edad y crecimiento del mero (*Epinephelus morio*) del Banco de Campeche. Univ. Autón., Nuevo León, México. Tesis profesional.
- Secretaría de Medio ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 2000. Sustentabilidad y pesca responsable en México. Evaluación y Manejo. 1997-1998. SEMARNAP-INP, México, 691 pp.

- Secretaría de Medio ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 2002. Sustentabilidad y pesca responsable en México. Evaluación y Manejo. 1999-2000. SEMARNAP-INP, México, 1111 pp.
- Secretaría de Medio ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 2006. Sustentabilidad y pesca responsable en México. Evaluación y Manejo. 2001-2005. SEMARNAP-INP, México, 576 pp.
- SAGARPA. 2003. Anuario Estadístico de Pesca. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 271 pp.
- Schaefer, M., 1957. A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the eastern tropical Pacific Ocean. Bull. IATTC / Bol. CIAT, 2: 247-268.
- Seijo, J.C., 1986. Comprehensive simulation model of the tropical demersal fishery: red grouper (*Epinephelus morio*) of the Yucatan continental shelf. Ph.D. Dissertation, Michigan State University, 210 pp.
- Simula O., Alhoniemi E., Hollmén J. & J. Vesanto. 1996. Monitoring and modeling of complex processes using hierarchical self-organizing maps. Memorias, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'96)*, volume Supplement. 73-76.
- Tamayo, L.J. 1974. Geografía Moderna de México. *Editorial Trillas Octava Ed.* México. 390 pp.
- Valdés, E. & G. Padrón. 1980. Pesquerías de Palangre. *Rev. Cub. Inv. Pesq.* 5 (2), 38–52.
- Vassiliev, G. & F. Serrano. 1973. Régimen térmico de las aguas del Banco de Campeche. *Informe de investigación No. 5. 4a. Reunión de Balance de Trabajo CIP. Inst. Nac. Pesca. Cuba.*
- Vesanto, J., Himberg J., Alhoniemi, E. & J. Parhankangas. 2000. SOM Toolbox for Matlab 5. *Report A57*, Helsinki University of Technology, Neural Networks Research Centre, Espoo, Finland, April 2000.

Anexos

Anexo 1. Trabajo científico relacionado con el manejo de las pesquerías.

TEMA	PERIODO	LITERATURA
DESARROLLO TEMPRANO		
HÁBITOS ALIMENTICIOS	1990	<p>Brulé, T. & L. Rodríguez Canché. 1993. Food habits of juvenile red groupers, <i>Epinephelus morio</i> (Valenciennes, 1828), from Campeche Bank, Yucatan, Mexico. <i>Bulletin of Marine Science</i> 52(2): 772-779.</p> <p>Brulé, T., D. Ordaz, M. Avila, M. Sánchez & C. Dèniel. 1994. Seasonal and diel changes in diet composition of juvenile red grouper (<i>Epinephelus morio</i>) from Campeche Bank. <i>Bulletin of Marine Science</i> 55(1): 255-262.</p> <p>Brulé, T. & Dèniel, C. 1993. Biological research on the red grouper (<i>Epinephelus morio</i>) from the southern Gulf of Mexico. In: Arreguin-Sanchez, F., Munro, J.L., Balgos, M.C., and Pauly, D. (eds.) <i>Biology, fisheries and culture of tropical groupers and snappers</i>. Makati City-Philippines ICLARM Conference Proceedings 48: 28-42.</p>
REPRODUCCIÓN	2003	<p>Giménez E., V. Moreno, R. Burgos & S. Chioldes. 2003. Reproducción y fecundidad de la cherna (<i>Epinephelus morio</i>) en el Banco de Campeche, México. <i>Oceánides</i> 18:(1): 13-21.</p>

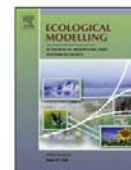
CRECIMIENTO	1973-1986	Rodríguez, H. 1986. Estudio comparativo de dos estructuras rígidas (otolito y hueso mesopteridoide) para la estimación de edad y crecimiento del mero (<i>Epinephelus morio</i>) del Banco de Campeche. Univ. Autón., Nuevo León, México. Tesis profesional.
CAPTURABILIDAD	1972-2003	<p>Arreguín-Sánchez, F. 1992. An approach to the study of the capturability coefficient with application to the red grouper (<i>Epinephelus morio</i>) fishery from the continental shelf of Yucatan, Mexico. Centro de Invest. Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México. 222 p. Ph.D. dissertation.</p> <p>Arreguin-Sanchez, R., & Pitcher, T. J. 1999. Catchability estimates and their application to the red grouper (<i>Epinephelus morio</i>) fishery of the Campeche Bank, Mexico. Fishery Bulletin 97(4):746-757.</p> <p>Giménez-Hurtado, E. 2006. Reproducción y fecundidad de la cherna americana (<i>Epinephelus morio</i>) en el Banco de Campeche, México.</p>
RECLUTAMIENTO	1972-2003	Arreguín-Sánchez, F., J.A. Sánchez, D. Flores-Hernández, J. Ramos-Miranda, P. Sánchez-Gil & A. Yáñez-Arancibia. 1999. Stock - Recruitment relationships (SRRs): a scientific challenge to support fisheries management in the Campeche Bank, Mexico. p. 225-235. In: H. Kumpf and K.

		<p>Sherman (eds.). The Gulf of Mexico Large Marine ecosystem. Blackwell Science. USA</p> <p>Giménez-Hurtado, E., R. Coyula-Pérez-Puelles, S.E. Lluch-Cota, A.A. González-Yañez, V. Moreno-García & R. Burgos-de-la-Rosa. Historical biomass, fishing mortality, and recruitment trends of the Campeche Bank red grouper (<i>Epinephelus morio</i>) <i>Fisheries Research</i>, Mar 2005.</p>
<p>EVALUACIÓN ESTRUCTURA POR EDADES</p>	<p>1973-2003</p>	<p>Doi, T., Mendizábal, D. & Contreras, M. 1981. Análisis preliminar de la población de mero, <i>Epinephelus morio</i>, en el Banco de Campeche. <i>Ciencia Pesquera</i> 1(1): 1-15.</p> <p>Moreno, V., Burgos, R., Contreras, M. & Mena, J. 1996. Composición por especies de la captura comercial de mero en Yucatán durante 1995. Resúmenes del II Simposio en Biología y Oceanografía Pesquera en México. CICIMAR-IPN La Paz, BCS, México, 8p.</p> <p>Johnson, A.G. & Collins, L.A. 1994. Age-size structure of Red grouper (<i>Epinephelus morio</i>) from the Eastern Gulf of Mexico. <i>Northeast Gulf Science</i> 13(2): 101-106.</p> <p>Lombardi-Carlson, L.A., Fitzhugh, G.R., & Mikulas, J.J. 2002. Red grouper (<i>Epinephelus morio</i>) age-length structure and description of growth from the Gulf of Mexico: 1992- 2001. Panama City</p>

		<p>Laboratory Contribution Series 2002- 06.</p> <p>Giménez-Hurtado, E. 2006. Reproducción y fecundidad de la cherna americana (<i>Epinephelus morio</i>) en el Banco de Campeche, México.</p>
MANEJO DE LA PESQUERÍA	2000-2006	<p>Secretaría de Medio ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 2000. Sustentabilidad y pesca responsable en México. Evaluación y Manejo. 1997-1998. SEMARNAP-INP, México, 691p.</p> <p>Secretaría de Medio ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 2002. Sustentabilidad y pesca responsable en México. Evaluación y Manejo. 1999-2000. SEMARNAP-INP, México, 1111p.</p> <p>Secretaría de Medio ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 2006. Sustentabilidad y pesca responsable en México. Evaluación y Manejo. 2001-2005. SEMARNAP-INP, México, 576p.</p>
MODELOS DE EVALUACIÓN INTEGRAL	1972-1987	<p>Arreguin-Sánchez, F., Contreras, M., Moreno, V., Burgos, R., & Valdes, R. 1996. Population dynamics and stock assessment of red grouper (<i>Epinephelus morio</i>) fishery on Campeche Bank, Mexico. In: Arreguin-Sanchez, F., Munro, J.L., Balgos, M.C., and Pauly, D. (eds.) Biology, fisheries and culture of tropical groupers and snappers. Makati City-Philippines ICLARM no. 48: 202-217.</p>

<p>PESQUERÍA EN EL CONTEXTO DEL ECOSISTEMA</p>		<p>Arreguín-Sánchez, F., J.C. Seijo & E. Valero. 1993. An application of the ECOPATH II to the North continental shelf ecosystem of Yucatan, Mexico. 269-278. In: Christensen, V. and D. Pauly. Trophic box models of Aquatic Ecosystems. ICLARM Conf. Proc. 26. Philippines. 39.</p> <p>Arreguín-Sánchez, F. 2000. Octopus - red grouper interaction in the exploited ecosystem of the northern continental shelf of Yucatan, Mexico. Ecological Modelling. 129:119-129.</p>
--	--	---

Anexo 2. "Modelling the spatial distribution of red grouper (*Epinephelus morio*) at Campeche Bank, México, with respect substrate". Mirtha O. Albañez-Lucero, Francisco Arreguín-Sánchez. Ecological Modelling. Volumen 220, issue 20. 24 Octubre, 2009. ISSN 0304-3800. Holanda.



Modelling the spatial distribution of red grouper (*Epinephelus morio*) at Campeche Bank, México, with respect substrate

M.O. Albañez-Lucero*, F. Arreguín-Sánchez

Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del IPN, Apartado, Postal 592 La Paz, 23000, Baja California Sur, México, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 January 2009

Received in revised form 2 July 2009

Accepted 5 July 2009

Available online 14 August 2009

Keywords:

Epinephelus morio

Campeche Bank

Artificial neural networks

Spatial distribution

ABSTRACT

The red grouper (*Epinephelus morio*) has historically been one of the most important fisheries of the Campeche Bank area in the Gulf of México, where two fleets from México and one from Cuba participate. Current stocks have been estimated to be a third or less as abundant as in the 1970s; hence, the fishery has been declared to be over-exploited. The federal government of México has expressed the need to investigate the potential use of protected areas as a management tool for recovery of this species. Based on artificial neural network (ANN) modelling, we analysed the spatial distribution of red grouper with respect substrate, considering the demographic structure of the stock. We found a significant relationship between the type of substrate and the three stages of development (juveniles, pre-adults and adults). Juveniles are distributed in shallow waters close to the coast on coral substrates; pre-adults are also associated with coral substrates, but at an intermediate depth; adults are found in deeper waters on sandy substrates. We also identified seasonal reproductive aggregation patterns, always in relation to substrate types. Reproductive aggregation during the winter and early spring in the north-eastern continental shelf and the almost permanent (exception in autumn) concentration of juveniles in coastal waters around the central and eastern coast of Yucatan are of particular importance for management. These patterns represent seasons and areas of high fish vulnerability, which is the basic criterion for further analysis of protected areas.

© 2009 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The red grouper (*Epinephelus morio*) fishery has historically been the most important finfish fishery in the Mexican territorial waters within the Gulf of Mexico. Growth of the fishery was observed from 1947 to 1972, when the highest yields were recorded [about 21000 metric tons (t)] (Burgos-Rosas and Pérez-Pérez, 2006). Since then, the fishery has been depleted; by 2004, yields were less than 6000 tons. Present stocks are about a third of those estimated in the early 70s (Doi et al., 1981). About one decade ago, some authors reported a decreasing trend in stock abundance, reflected in decreasing catch ratios (Fig. 1) (Arreguín-Sánchez et al., 1996, 1997; Burgos et al., 2003; Burgos and Defeo, 2000; Hernández et al., 1999).

The National Fishing Chart (Alvarez-Torres et al., 2002), which is an instrument of the federal government that describes the condition of and management objectives for Mexican fisheries, defines the red grouper fishery as overfished and states that recovery is the primary objective for its management. In 2004, a closure was imple-

mented during the reproductive aggregation season (winter). The closure lasts for one month (usually January) and is meant to protect the reproductive process; however, no significant effects have been observed. In a Federal Government report, Burgos-Rosas and Pérez-Pérez (2006) suggest the exploration of restriction-of-fishing areas as a potential management tool for stock recovery.

The situation described above indicates a need for greater knowledge of the spatial distribution of red grouper. Since red grouper is a demersal, gregarious species, we assume that its distribution is related to substrate types, as has been reported by Bölle and Chaplin (1968) and Moe (1969). Given the present state of the fishery, information about the distribution of the stock in a non-declining state is highly relevant, because it may offer a picture of close-to-optimal habitat usage that can be used as reference when comparing stock recovery hypotheses. We used information from 1972 to 1977 to model the spatial distribution of the red grouper during the period when the highest yields were obtained, before the declining trend began and when the stock was presumably in optimal condition.

We used artificial neural network (ANN) tools to model red grouper distribution since ANNs can model dynamic, non-linear and noisy data, especially when the underlying relationships are not fully understood. In our case, we used ANNs to relate discrete relative abundance data to different substrates within and between

* Corresponding author. Tel.: +52 612 1230350; fax: +52 612 1225322.

E-mail addresses: malbanez@ipn.mx (M.O. Albañez-Lucero), farregui@ipn.mx (F. Arreguín-Sánchez).

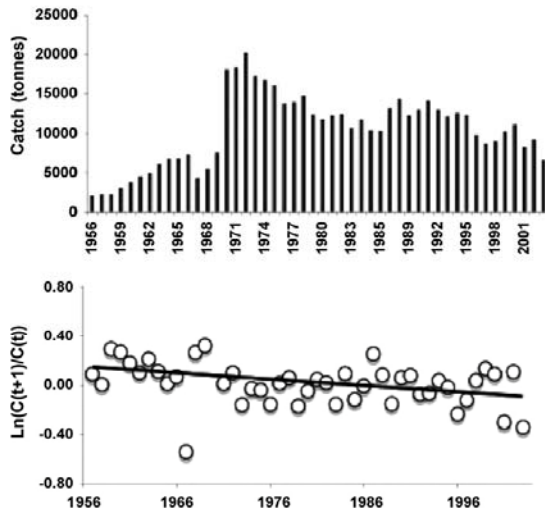


Fig. 1. Historical commercial catches of the red grouper (*Epinephelus morio*) on the Campeche Bank (top), and catch ratios (bottom). Both tendencies indicate a decreasing yield of the fishery at the present time.

2. Materials and methods

Data used in our research came from the catches of *E. morio* taken by a mid-sized commercial fleet (Arreguín-Sánchez and Pitcher, 1999) from 1973 to 1977. The dataset consists of catch-at-length per boat per day per fishing area (half-degree squares) values, expressed as catch per unit of effort (CPUE). This information was provided by the National Fisheries Institute through the Regional Fisheries Research Centre in Yucaltepen, Yucatan, Mexico. CPUE values were grouped by fish life stage: juveniles (20–30 cm total length, TL), pre-adults (31–50 cm TL) and adults (larger than 51 cm TL) (Giménez et al., 2003; Brulé et al., 1999). Based on CPUE data per boat, the data were allocated to half-degree squares as shown in Fig. 2. Substrate types on the continental shelf were taken from García and Gómez (1974) and García (1980). Located in the Campeche Bank area on the northern continental shelf of Yucatan (20–24°N and 86–93°W), the study area was divided into 84 (6 × 14) half-degree squares covering the range of operation of the mid-sized Mexican fleet and most of the range of the red grouper (Fig. 2). Substrate types were digitised and the area covered by each specific substrate within each square was computed. We assume that a particular ocean bottom composition or structure determines the suitability of habitat for the red grouper.

For the modelling process, we used the Self-Organizing Maps (SOMs) algorithm (Kohonen et al., 1995) to classify and represent patterns of red grouper distribution related to ocean bottom structure. The SOM is structured in two layers, an input data (x_i) layer connected to a bidimensional output layer through weighting vectors (m_j). The aim of the SOM is to estimate the m_j values that preserve the topological properties of the input data in the output layer by maintaining the relative distance between input patterns. The complete process consists of three phases: training, calibration/validation and estimation.

For the training phase, we used 88 observed samples and 19 variables as input data, representing 13 types of substrate (sand, coral, shells, mud and combinations of these) and relative abundances of red grouper juveniles, pre-adults and adults. Before the training phase, the weighting vectors are randomly initialised, making the SOM converge to a good solution more quickly. The neural network

defined areas, in order to provide a reliable distribution map. The use of ANNs as ecological modelling tools has been the subject of a number of investigations (Lek and Guégan, 1999). Due to the multiple advantages offered by algorithms based on neural networks, this method has been applied to many types of data, including the behaviour of oceanic and atmospheric processes (Andrade De Bem et al., 2003; Cavazos et al., 2002; Albañez-Lucero, 2002), fishery behaviour (Nishida and Komatsu, 1998; Dreyfus-León and Gaertner, 2002, 2006) and biological and ecological processes (Huse and Ottersen, 2003, among others).

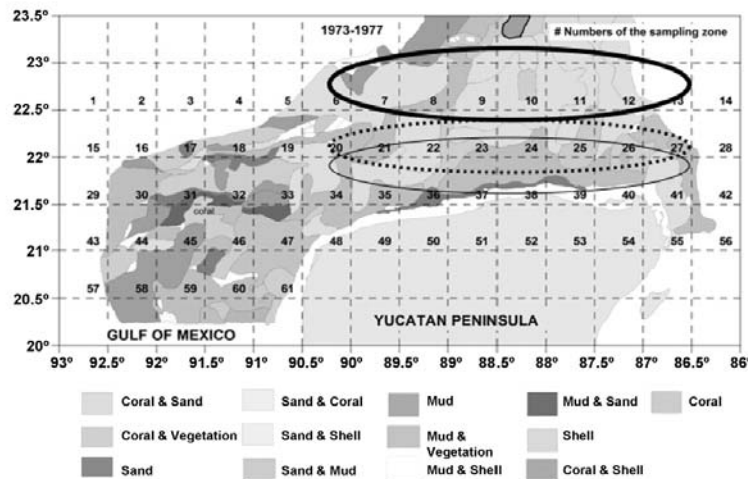


Fig. 2. Distribution of the type of bottoms of the continental shelf of the Campeche Bank (García, 1980). Squares represents one half-degree areas considered in our study. Areas surrounded by ellipses indicate gross spatial distribution of red grouper following SOM in Fig. 3. Thin line represents juveniles distribution, dashed line pre-adults and bold line adults. Overlap between juveniles and pre-adults distribution corresponded to statistical significant correlation in Table 1.

is trained using an iterative process; one sample vector X_i (unit) is randomly chosen from the input data set and its similarity (Euclidian distance) to all the weighting vectors (m_i) is computed. The unit that is most similar to the input, known as the best matching unit (BMU), is declared as the “winner” unit. This process is computed as follows (Hollmén, 1996; Carniel et al., 2009):

$$|X_i - m_c| = \min_i |X_i - m_i| \quad (1)$$

where m_c is the “winner” unit and X_i and m_i are as defined above. Once the BMU is found, the weighting vector is updated; this means that the BMU and its topological neighbours are moved to the input vector in the input space, while those further away are inhibited. The SOM update rule for the weighting vector is (Kohonen, 2001).

$$m_i(t+1) = \begin{cases} m_i(t) + \alpha(t)[x(t) - m_i(t)], & i \in N_C(t) \\ m_i(t), & i \notin N_C(t) \end{cases} \quad (2)$$

where t is the time step (iteration), $x(t)$ is the input vector randomly selected from the input data set at time t , $\alpha(t)$ represents a time-decreasing learning rate that varies within the range $0 < \alpha(t) < 1$, and N_C is the neighbourhood kernel associated with the “winner” unit, which is defined by a neighbourhood function $h_{ci}(t)$ as follows (Hollmén, 1996):

$$h_{ci}(t) = h(d, t)\alpha(t) \quad (3)$$

where $h(d, t)$ is the set of available neighbourhood functions, for which we used the Gaussian function. The training process consisted of 10,000 iterations.

Once the convergence and training of the neural network are completed, the map is topologically ordered and represented by a U-matrix (unified distance matrix; Ultsch and Siemon, 1990). After these comprehensive outputs are obtained, the calibration/validation phase is performed. The quality of the SOM representation is determined by its accuracy and the preservation of the topology. The SOM is also sensitive to the magnitude of the vectors, so they were standardised. For the calibration/validation phase, we used 94 observed samples different from those used for training and ran the algorithm based on the winner neurons from the training process.

If the outputs satisfy the desired criteria for representation, then we proceed with the estimation phase; but if the outputs are not satisfactory, we repeat the training and calibration/validation phases. Our decisions about whether the outputs are satisfactory are based on our knowledge of the process to be modelled (in our case, information available in the literature about the relationship between red grouper distribution and substrate types).

For the estimation phase, we used the 143 samples available from our original data to represent the spatial distribution of red grouper. The outputs are represented as a map (i.e., a U-matrix)

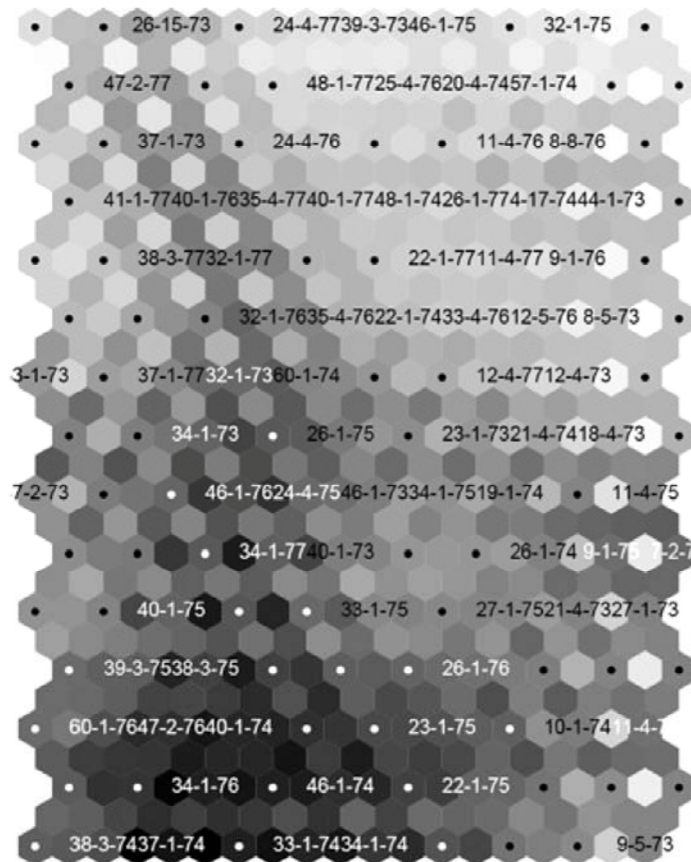


Fig. 3. U-matrix obtained as output of the SOM modelling process representing the spatial distribution of the red grouper on the Campeche. Black dots indicates the winner neuron; labels identify spatial areas defined in Fig. 2; labeling notation indicates area, type-of-bottom and year, while grey colors are the similarities related to stock abundance.

Table 1
Spearman rank correlation of red grouper abundance (number/fishing-day) with respect to the most frequent substrate types (by area covered) based on the outputs of SOM analysis.

Type of substrate	CPUE-J	CPUE-P	CPUE-A
Coral-sand	-0.0185	0.0104	-0.4902*
Sand	0.3328	0.3616	-0.2066
Sand-coral	-0.5969*	-0.5749*	0.4487*
Sand-shell	-0.4015*	-0.4377*	0.3992*
Coral	0.7057*	0.6799*	-0.1498

* Indicates significance at $p < 0.05$. J = juveniles, P = pre-adults and A = adults.

within which winner neurons are grouped according to the proximity of their relationship. Each winner neuron, as defined above, can be identified in the map to obtain the corresponding parameters.

3. Results

The distribution of substrate types, as taken from García (1980), is shown in Fig. 2. There are 13 types of substrate classified among coral, sand, mud, mollusc remains, vegetation and combinations of these.

Fig. 3 shows a typical map for the U-matrix produced by the SOM procedure. The map is a grid of 150 (10 × 15) neurons; winner neurons are represented by black dots (or labels), and labels indicate the estimated parameters. For example, the label on the lower left corner, 38-3-74, indicates the area, substrate type and year. Labels also contain information about the stock abundance for each area, while colors represent neurons grouped according to similarity (in this case, related to stock abundance). A preliminary inspection of the U-matrix map (Fig. 3) suggests that high abundances of adults are strongly associated with sandy substrates, whereas high abundances of juveniles are found on coral substrates. Juveniles predominate near the coast, but adults predominate in the east-

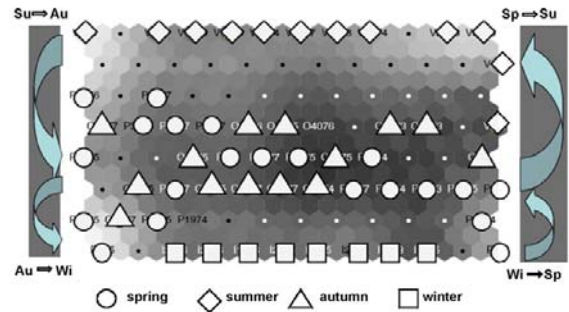


Fig. 4. U-matrix obtained as output of the SOM modelling process representing the seasonal distribution of red grouper on the Campeche. Black dots indicate the winner neuron; labeling notation indicates season, type-of-bottom and year, while grey colors are similarities related to stock abundance.

central region of the continental shelf. The association of pre-adults with substrates is not clear, suggesting that their distribution is also associated with coral substrates or that a transition area is present. To clarify these patterns and test for significance, we computed Spearman rank correlation coefficients (Table 1) using the percentage of each type of substrate and the stock abundance. The results indicate that about 70% of the variation in abundance of juveniles and pre-adults is significantly explained by coral substrates, while sandy substrates (sandy-coral and sandy-shell) explain 40–45% of the variation in spatial distribution of adults. In contrast, there are also some areas where the absence of red grouper is significantly explained (significant negative coefficients in Table 1). For example, sandy substrates explain 40–60% of the absences of juveniles and pre-adults, while coral-sand substrates explain 50% of the absences of adults. Our results also suggest that there is little spatial overlap between juveniles and pre-adults with respect to adults, as

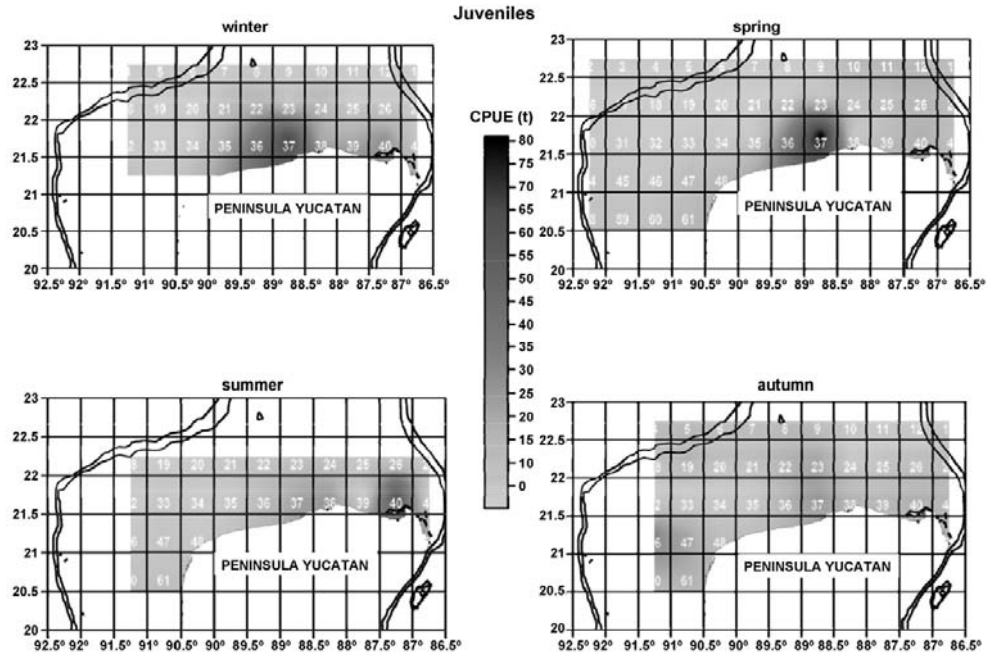


Fig. 5. Seasonal distribution of juveniles of the red grouper (*Epinephelus morio*) on the Campeche Bank. Dark color indicates areas with higher relative abundance given as CPUE (see text for explanation).

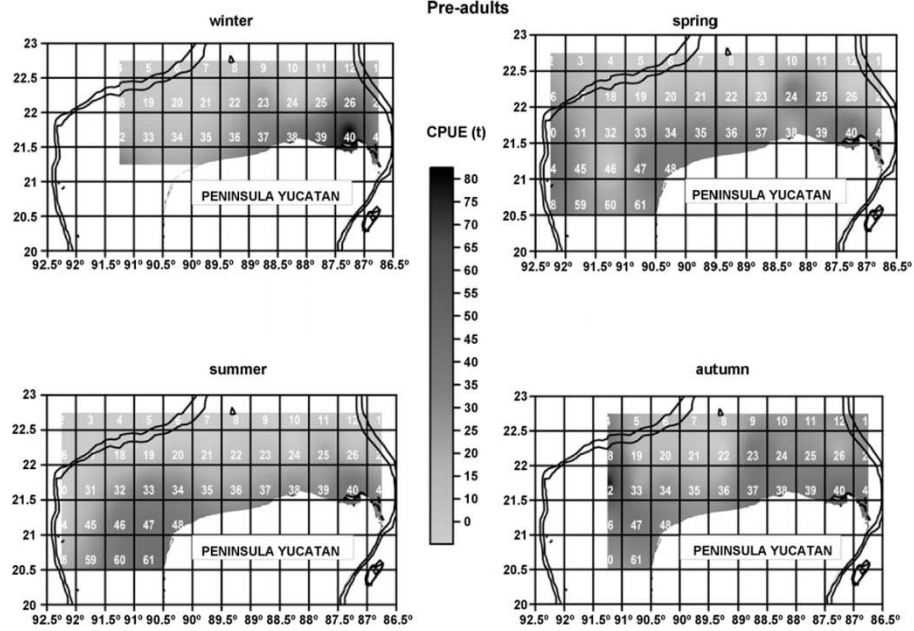


Fig. 6. Seasonal distribution of pre-adults of the red grouper (*Epinephelus morio*) on the Campeche Bank. Dark color indicates areas with higher relative abundance given as CPUE (see text for explanation).

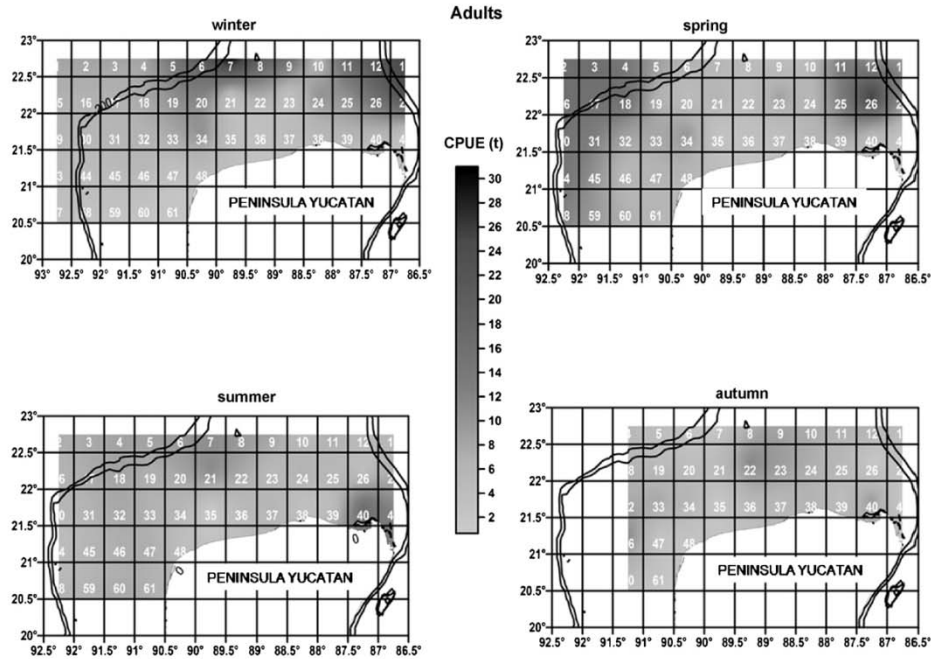


Fig. 7. Seasonal distribution of adults of the red grouper (*Epinephelus morio*) on the Campeche Bank. Dark color indicates areas with higher relative abundance given as CPUE (see text for explanation). Note scale of abundance is different than those in Figs. 5 and 6.

indicated by the opposite signs of the significant coefficients. The overall pattern of distribution of red grouper in the Campeche Bank area by developmental stage is shown in Fig. 2.

The U-matrix represented in Fig. 4 shows the seasonal dynamics of red grouper. During the winter, adults show reproductive aggregation on the eastern continental shelf (Arreguín-Sánchez and Pitcher, 1999; Burgos-Rosas and Pérez-Pérez, 2006); during the summer, individuals are widely dispersed. Spring and autumn are considered transitional seasons before and after reproductive aggregation. These dynamics are represented in the U-matrix, which shows winter and summer to be completely separated with respect to the aggregation behaviour of red grouper.

A more detailed representation of the seasonal and spatial distribution of the developmental stages of red grouper in the Campeche Bank area is shown in Figs. 5–7 for juveniles, pre-adults and adults, respectively.

Greater relative abundance of juveniles (Fig. 5) is observed during the winter and spring on the central continental shelf of Yucatan, near the coast and associated with sandy substrates, and during the summer in the north-eastern coastal region. During the autumn, no aggregations are observed, suggesting that juvenile fish are dispersed.

Pre-adults (Fig. 6) show high density along the north-eastern coast of Yucatan during the winter; after that, pre-adult fish are dispersed on the continental shelf in areas relatively near the coast. During the autumn, higher concentrations are observed in the western region, probably associated with coral reefs in that area.

Areas with greater relative abundance of adults are found in deeper waters in the northern part of the continental shelf of Yucatan (Fig. 7). These higher concentrations are observed during the winter and spring, consistent with the reproductive aggregation reported in the literature (i.e., Arreguín-Sánchez and Pitcher, 1999; Burgos-Rosas and Pérez-Pérez, 2006).

4. Discussion

In the Campeche Bank fishery (Doi et al., 1981; Seijo, 1986; Arreguín-Sánchez, 1992; Giménez-Hurtado et al., 2005) and in other regions (i.e., around Florida and the Bahamas; Moe, 1969) red grouper is known to be a gregarious demersal species that is associated with hard reef-type substrates and that presents reproductive aggregations and, consequently, seasonal movements. Studies by Cuban and Mexican researchers in the Campeche Bank fishery have confirmed this behaviour (Doi et al., 1981; Seijo, 1986; Arreguín-Sánchez et al., 1996, 1997, 1999; Arreguín-Sánchez and Pitcher, 1999; Hernández et al., 1999; Burgos et al., 2003; Giménez-Hurtado et al., 2005; Burgos-Rosas and Pérez-Pérez, 2006; López-Rocha and Arreguín-Sánchez, 2008). The distribution and patterns of movement of the red grouper are determined by the available habitat, which most authors associate with ocean bottom substrate type.

Appropriate management measures require a foundation of strong scientific evidence. For the red grouper, knowledge about the distribution of abundance is critical both for fishing success and for management and conservation. In the present state of the fishery, because of the declining stocks, federal authorities have expressed a need for such information in order to explore the potential use of restriction-of-fishing areas. Our results offer a detailed picture of the distribution and habitat usage of red grouper previous to the decline of the stock. This information can serve as a reference point for the identification of potential restriction-of-fishing areas, because it indicates areas with greater probability of survival, growth and reproductive success.

Our results show a clear pattern of seasonal changes in distribution. In general terms, juveniles show two main regions of high abundance near the coast. According to the literature, these areas of aggregation are probably associated with food availabil-

ity. The central and eastern regions of the northern Yucatan coasts are well known for their relatively high abundances of fishes and invertebrates, probably associated with coastal systems (e.g., Ria Lagartos-Dzilam and Yalahau lagoon) and related to coral substrates (Arreguín-Sánchez et al., 1996, 1997). Except during the autumn, when fish appear to be dispersed, aggregations of juveniles are present throughout the year in the locations described above (see Fig. 5).

Pre-adults show a single area of high abundance during the winter on the eastern-central region of the continental shelf, due to reproductive aggregation behaviour. Arreguín-Sánchez and Pitcher (1999) and López-Rocha and Arreguín-Sánchez (2008) suggest that fishes of all ages present east to west seasonal movements associated with the reproductive process. During other seasons, pre-adult fish are dispersed along the continental shelf (Fig. 6).

Adults show aggregation during the winter and early spring, relatively far from the coast in deeper waters on sandy-type substrates. Such concentrations are present on the northern continental shelf (Fig. 7). During other seasons, adult fish are dispersed throughout the continental shelf.

For the conservation and management of the red grouper fishery, knowledge of spatial distribution permits the identification of optimal areas where juveniles could be protected to avoid overfishing, as well as areas of higher concentrations of adults during the reproductive aggregation. The protection of such areas could help to promote recruitment. The protection of such areas also coincides with the protection of the processes behind the stock/recruitment relationship, which is a key process for the management and sustainability of the fishery (Arreguín-Sánchez et al., 1999).

Acknowledgments

The authors thank the Incofish (European Commission Contract 003739) and SPI-IPN (20060579, 20070767, 20080765) projects and the National Polytechnic Institute (through EDI and COFAA) for their support of this research. MOAL is supported by CONACyT.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data associated with this article can be found, in the online version, at doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.07.007.

References

- Albarez-Lucero, M.O., 2002. Análisis y visualización de datos multidimensionales utilizando mapas auto-organizados. Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México, 74 pp.
- Alvarez-Torres, P., Díaz-de-León-Corral, A., Ramírez-Flores, O., Bermúdez-Rodríguez, E., 2002. National fisheries Chart 2000: a new instrument for fisheries management in inland waters. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 12 (2–3), 317–326.
- Andrade De Bem, R., Cota Botelho Da, S.S., Magalhães Mata, M., 2003. Aplicação de redes neurais artificiais na análise de padrões de variabilidade de mesocscala. *Anais XI SBSR*, 05–10 abril 2003, INPE, Belo Horizonte, Brazil, 2007–2014.
- Arreguín-Sánchez, F., 1992. An approach to the study of the catchability coefficient with application to the red grouper (*Epinephelus morio*) fishery from the continental shelf of Yucatan, Mexico. Ph.D. Dissertation. Centro de Investigaciones, Estudios Avanzados del IPN, México, 222 pp.
- Arreguín-Sánchez, F., Pitcher, T.J., 1999. Catchability estimates accounting for several sources of variation: application to the red grouper fishery of the Campeche Bank, Mexico. *Fishery Bulletin* 97, 746–757.
- Arreguín-Sánchez, F., Sánchez, J.A., Flores-Hernández, D., Ramos-Miranda, J., Sánchez-Gil, P., Yáñez-Arancibia, A., 1999. Stock – recruitment relationships (SRRs): a scientific challenge to support fisheries management in the Campeche Bank, Mexico. In: Kumpf, H., Sherman, K. (Eds.), *The Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem*. Blackwell Science, USA, pp. 225–235.
- Arreguín-Sánchez, F., Contreras, M., Moreno, V., Burgos, R., Valdés, D., 1996. Population dynamics and stock assessment of the red grouper (*Epinephelus morio*) fishery on the Campeche Bank. In: Arreguín-Sánchez, F., J.L. Munro, M. Balgos and D. Pauly (Eds.), *Biology, Fisheries and Culture of Tropical Groupers and Snappers*. ICLARM Conf. Proc. 48, pp. 210–225.
- Arreguín-Sánchez, F., Contreras, M., Valdés, R., Moreno, V., Burgos, R., 1997. Biología y pesquería del mero (*Epinephelus morio*) del Banco de Campeche, México. en

- prensa. In: Flores-Hernández, D., Sánchez-Gil, P., Seijo, J.C., Arreguín-Sánchez, F. (Eds.), Análisis y diagnóstico de los recursos pesqueros críticos del Golfo de México. EPOMEX Serie Científica 7, México.
- Bölke, J.E., Chaplin, C.C.G., 1968. Fishes of the Bahamas and adjacent tropical waters. Acad. Nat. Sci. Philadelphia, XXI+771 pp.
- Brulé, T., Déniel, C., Colas-Marruto, T., Sánchez-Crespo, M., 1999. Red grouper reproduction in the southern Gulf of Mexico. Trans. Am. Fish. Soc. 128, 385–402.
- Burgos, R., Defeo, O., 2000. Un marco de manejo precautorio para la pesquería del mero (*Epinephelus morio*) del banco de Campeche, México. Oceanides 15 (2), 129–140.
- Burgos, R., Moreno, V., Giménez, E., 2003. Informe de Investigaciones Conjuntas México-Cuba sobre el mero (*Epinephelus morio*, Valenciennes, 1828) en el banco de Campeche 2003. Convenio Internacional de Pesca México-Cuba. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (México) y Ministerio de la Industria Pesquera (Cuba). Informe Internacional Interno, 25 pp.
- Burgos-Rosas, R., Pérez-Pérez, M., 2006. Mero. Citado en Sustentabilidad y Pesca Responsable de México: Evaluación y Manejo, 544 pp.
- Carniel, R., Barbui, L., Malisan, P., 2009. Improvement of HVSR technique by self-organizing map (SOM) analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 29 (6), 1097–1101.
- Cavazos, T., Comrie, A.C., Liverman, D.M., 2002. Intraseasonal anomalies associated with wet monsoons in southeast Arizona. J. Climate 15, 2477–2490.
- Doi, T., Mendizabal, D., Contreras, M., 1981. Análisis preliminar de la población de mero *Epinephelus morio* (Valenciennes), en el Banco de Campeche. Ciencia Pesquera 1 (1). I. N. P. SEPESCA, México.
- Dreyfus-León, M., Gaertner, D., 2002. Fleet dynamics and information exchange simulation modelling with artificial neural network. In: Hallam, B., Floreano, D., Hayes, G., Meyer, J.-A., Hallam, J. (Eds.), "From Animals to Animats 7", Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behaviour, ISAB. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, pp. 397–398.
- Dreyfus-León, M., Gaertner, D., 2006. Modelling performance and information exchange with artificial neural networks. Ecological Modelling Vol195, 30–36.
- García, C., 1980. Caracterización General del Banco de Campeche. Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras 5 (2).
- García, C., Gómez, J.A., 1974. Carta de fondos del Banco de Campeche. Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras 1, 37–39.
- Giménez, E., Moreno, V., Burgos, R., Alfonso, S., 2003. Reproducción y fecundidad de la cherna americana (*Epinephelus morio*) en el banco de Campeche, México. Oceanides 18 (1), 13–22.
- Giménez-Hurtado, E., Coyula-Pérez-Puelles, R., Lluch-Cota, S.E., González-Yañez, A.A., Moreno-García, V., Burgos-De-La-Rosa, R., 2005. Historical biomass, fishing mortality, and recruitment trends of the Campeche Bank red grouper (*Epinephelus morio*). Fisheries Research, Mar 2005.
- Hernández, A., Monroy, C., Moreno, V., Giménez, E., 1999. Informe de Investigaciones Conjuntas México-Cuba sobre el mero (*Epinephelus morio*, Val., 1828) en el banco de Campeche 1997–1998. Convenio de Pesca México-Cuba, CRIP Yucaltepén INP, SEMARNAP-México, CIP-Cuba (inédito).
- Hollmén, J., 1996. Process modelling using the self-organizing map. Master's Thesis, Helsinki University of Technology, 52 pp.
- Huse, Ottersen, 2003. Forecasting recruitment and stock biomass of Northeast Arctic cod using neural networks. Scientia Marina 67 (Suppl. 1), 325–335.
- Kohonen, T., Hynninen, J., Kangas, J., Laaksonen, J., Som, Pak, 1995. The Self-Organizing Map Program Package. Technical Report A31, 1995, Helsinki University of Technology, http://www.cis.hut.fi/research/som_lvq_pak.shtml.
- Kohonen, T., 2001. Self-Organizing Maps, 3er. Extended Edition. Springer, 260 pp.
- Lek, S., Guégan, J.F., 1999. Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction. Ecol. Model., 120.
- López-Rocha, J.A., Arreguín-Sánchez, F., 2008. Spatial distribution of red grouper *Epinephelus morio* (Serranidae) catchability on the Campeche Bank of Mexico. Journal of Applied Ichthyology 24, 282–289.
- Moe, M.A., 1969. Biology of the Red grouper, *Epinephelus morio* (Valenciennes 1828), from the eastern Gulf of Mexico. Florida Department of Natural Resources Marine Research Laboratory, Professional Paper, 10, 95 pp.
- Nishida, T., Komatsu, T., 1998. Analysis and predictions of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) catch rates of longline fisheries in the Western Indian Ocean using a neural network. In: 7th Expert Consultation on Indian Ocean Tunas, Victoria, Seychelles, pp. 241–250.
- Seijo, J.C., 1986. Comprehensive simulation model of the tropical demersal fishery: red grouper (*Epinephelus morio*) of the Yucatan continental shelf. Ph.D. Dissertation, Michigan State University, 210 pp.
- Ultsch, A., Siemon, H.P., 1990. Kohonen's self organizing feature maps for exploratory data analysis. In: In Proc. INNC'90 Int. Neural Network Conf. Kluwer, Dordrecht, Netherlands, pp. 305–308.

Anexo 3. Jorge A. López-Rocha, Mirtha O. Albañez-Lucero, Francisco Arreguín-Sánchez & Juan A. de Anda-Montañez. "Análisis de la variación espacio-temporal en capturabilidad del mero, *Epinephelus morio* (Valenciennes, 1828) en el Banco de Campeche antes de su sobrepesca (1973-1977)". *Revista de Biología marina y Oceanografía*. 44(3):751-761 Diciembre, 2009. Chile.

Analysis of the spatial and seasonal variation in catchability of red grouper, *Epinephelus morio* (Valenciennes, 1828), in the Campeche Bank before overfishing (1973-1977)

Análisis de la variación espacio-temporal en capturabilidad del mero, *Epinephelus morio* (Valenciennes, 1828) en el Banco de Campeche antes de su sobrepesca (1973-1977)

Jorge A. López-Rocha¹, Mirtha O. Albañez-Lucero², Francisco Arreguín-Sánchez² and Juan A. de Anda-Montañez³

¹Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Sisal, Yucatán, C.P. 97130, México

²Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-IPN, Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, B.C.S. 23096, México

³Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Mar Bermejo N° 195, Col. Playa Palo de Santa Rita Apdo. Postal 128, La Paz, B.C.S. 23090, México
jlopezr@ipn.mx

Resumen. La pesquería de mero *Epinephelus morio* en el Banco de Campeche, frente a la costa norte de la Península de Yucatán, está sobreexplotada. Las principales causas son la elevada presión de pesca en zonas de agregación reproductiva y en zonas de crianza de juveniles. Se realizó un análisis de la variación espacio-temporal de la capturabilidad, usando datos de 1973 a 1977, con el objetivo de detectar las zonas de mayor vulnerabilidad del mero según su estado de desarrollo (juveniles, preadultos y adultos). Los resultados mostraron que durante la época de reproducción (enero-marzo) la capturabilidad de los adultos fue mayor en la parte oriental del Banco de Campeche. Se encontraron centros de alta capturabilidad en juveniles durante todas las estaciones del año en las regiones cercanas a Celestún, Dzilam de Bravo, Río Lagartos y el Cuyo. Se recomienda la creación de zonas de restricción de pesca en dichas áreas con el objetivo de reducir la mortalidad por pesca para permitir la recuperación de la población.

Palabras clave: Agregación reproductiva, zonas de restricción de pesca, vulnerabilidad

Abstract. The red grouper *Epinephelus morio* fishery in the Campeche Bank, northern coast of the Yucatan Peninsula, is overfished. The main causes are high fishing pressure in areas of reproductive aggregation and juvenile nursery zones. An analysis of the spatial-seasonal variation in catchability was undertaken using data from 1973 to 1977, with the aim to detect areas of higher vulnerability to fishing, taking into account the red grouper developmental stages (juvenile, pre-adults, and adults). Results showed that the adult catchability was higher during the reproductive period (January-March) in the eastern part of the Campeche Bank. High catchability zones for juveniles were found along the year in coastal areas near Celestún, Dzilam de Bravo, Río Lagartos, and El Cuyo. We recommend these locations to be considered as fishing restricted areas to reduce fishing mortality and promote stock recovery.

Key words: Spawning aggregations, fishing restricted areas, vulnerability

Introduction

The red grouper, *Epinephelus morio* (Valenciennes, 1828), is a demersal species exploited by three fishery fleets: 1) a fleet of Mexican small vessels in coastal areas, 2) a Mexican mid-sized vessels fleet, and 3) a Cuban large vessels fleet. The fishing, which is carried out year round, generates a considerable number of jobs and contributes to the regional economy (Arreguín-Sánchez *et al.* 1997). Currently, almost 100% of red grouper landings are exported to the United States: hence, the fishery is an important source of foreign revenue (Burgos-Rosas & Pérez-Pérez 2006).

The coastal fleet uses short lines and long lines of 150 fishhooks, the mid-sized fleet uses 7 to 10 rowboats (locally named 'alijos'), operating a long line of ~150 fishhooks each. Since 1990, long lines attached to hydraulic reels containing 1,500 to 2,000 fishhooks were implemented. The Cuban fleet uses large fishing vessels with six small boats (named 'chernerás') operating long lines containing 350 fishhooks. Since 1972, annual landings have progressively declined. In 1972, annual landings reaching 20,000 t were taken but recent (2000s) annual catches averaged about 6,000 t (Burgos-Rosas & Pérez-Pérez 2006).

The red grouper of the Campeche Bank is overfished (Giménez-Hurtado *et al.* 2005, Burgos-Rosas & Pérez-Pérez 2006). In 2003, its estimated biomass was ~45,500 t well below the Reference Limit Point of ~74,500 t (Burgos-Rosas & Pérez-Pérez 2006), and about one third of the stock size in the early 1970s.

In spite of its strong territorial behavior, the red grouper regularly moves along the northern shelf off the Yucatan Peninsula (around 90,000 km²) with larger densities at the eastern side during winter (Valdés & Padrón 1980, Arreguín-Sánchez *et al.* 1997, Arreguín-Sánchez & Pitcher 1999, Hernández & Seijo 2003), mostly associated to the spawning aggregations, being this behavior a key element for the managing of the fishery. The reproductive aggregation makes red grouper highly vulnerable in specific areas and seasons (Arreguín-Sánchez & Pitcher 1999).

The fishery is regulated by the government by issuing fishing permits and a minimum legal size of 30 cm total length. Since 2003, a closed season was implemented, from 15th February to 15th March, to protect red grouper during reproductive season. Recently, accomplishing closed season, a new minimum legal size was defined as 51 cm fork length. The Cuban fleet is governed by an agreement that sets a catch quota that is revised annually amounting 3,500 t of demersal fish from which red grouper constitutes around 70% (Burgos-Rosas & Pérez-Pérez 2006).

Alternative management policies have been proposed to promote population recovery. Giménez-Hurtado (2005) recommends closure for waters <20 m deep to protect juveniles and greater than 70 m deep to protect adults. Other suggestions accounts for critical areas (for nursery and spawning aggregation) and the need of their protection (Giménez-Hurtado 2005, Burgos-Rosas & Pérez-Pérez 2006).

Arreguín-Sánchez & Pitcher (1999) and López-Rocha & Arreguín-Sánchez (2008) demonstrated that catchability of the red grouper in the Campeche Bank is affected by their aggregation reproductive behavior when fish density increases. Estimates of spatial and seasonal variation of catchability could be useful in developing management actions, since catchability reflects areas and seasons when red grouper is more vulnerable to fishing and is related to high yields. This study is focused on determining spatial and seasonal variation of catchability and its implication for fishery management by considering Fishing Restricted Areas.

Although the data used in this paper come from the years when the red grouper was not overfished (1973-

1977), a strong relationship between bottom type and the red grouper distribution has documented (Albañez-Lucero & Arreguín-Sánchez, 2009). Considering that there was no disturbance that results in changes in the bottom distribution, it is reasonable expects at least a similar pattern in terms of spatial distribution of red grouper despite the current depleted state of the stock. In this sense, the results of this study may serve as a guide to the location Restricted Fishing Areas, recommending reassess these areas with current information.

Material and methods

This study used information from 668 fishing trips (taken from the period 1973-1977) by the mid-sized fleet working the Campeche Bank which covered about 80% of the fishing grounds and overlap other fleets in a range of 60% to 85%. This information is part of the red grouper database maintained by the Centro Regional de Investigación Pesquera (Regional Center of Fishing Research) of the National Institute of Fishing, in Yucalpeten, Yucatan, Mexico. The information included the number of effective days of fishing (EDF), an estimate of the geographical fishing position, catch size, and the frequency of each length category associated with each fishing trip.

Estimates of catchability vary with the zone, stage of development (juvenile, pre-adult, and adult) and season. In order to analyze the spatial data, the Campeche Bank was divided in cells (1/2° × 1/2°) and estimates of catchability were computed for each cell. For each stage of development, catchability-at-length was estimated for length intervals of 2 cm (within the range 20 to 90 cm TL). The categories established were: juveniles (20-30 cm TL), pre-adults (30-50 cm TL), and adults (>50 cm TL). Average catchability for each stage was weighed by catch per unit effort (U). Seasonal changes in catchability were also obtained.

Catchability-at-length were estimated following Arreguín-Sánchez (1996) and Arreguín-Sánchez & Pitcher (1999), who used the Leslie's transition matrix (Shepherd 1987, Caswell 1988) and length frequency distributions. The model represents the structure of the population, as follows:

$$N(\ell, t+1) = A(\ell, k) N(\ell, t), \quad (1)$$

where $N(\mathbf{l}, t)$ is the population size at time t , k and \mathbf{l} are successive intervals of length, and A is the transition matrix that depends on growth and mortality. The length distribution frequencies of each fishing trip, in terms of catch per unit effort (number of individuals • EDF⁻¹), were

grouped by month and by cell ($1/2^\circ \times 1/2^\circ$). The resulting vectors of relative abundance by size class $[N(l, t)]$ were used to estimate catchability through the transition matrix in each cell and on a monthly basis within the five-year analysis.

Growth and mortality were expressed as the product of two values (Shepherd 1987):

$$A(l, k) = G(l, k) \times S(k), \quad (2)$$

where G is the effect of growth in the absence of mortality and S is survival and effect of fishing gear selection.

Estimating the matrix $G(l, k)$ (assuming that growth of red grouper can be represented by the von Bertalanffy growth equation) was done by assigning probabilities of growth to each size class, according to Shepherd (1987) (Table 1). The survival matrix $S(k)$ was expressed in terms of mortality:

$$S(k) = \exp[-Z(k)t] = \exp[-(M + q(k, t) s(k) E(t))], \quad (3)$$

where $S(k)$ are elements of the main diagonal of the survival matrix (Caswell 1988), $Z(k)t$ is total instantaneous mortality rate for the k^{th} -length group at time t , M is the instantaneous rate of natural mortality, $s(k)$ is the probability of fishing gear selection for the k^{th} -length group, $E(t)$ is the fishing effort to time t , and $q(k, t)$ is the catchability for the k^{th} -length group to time t .

Equation 3 was solved for $q(k, t)$ by numerical iteration using the minimum squared algorithm in the fitting process. Estimations were made using the Catchability program (Martínez-Aguilar *et al.* 1999), including the following values as inputs: asymptotic length (L_∞) was 87 cm, growth coefficient (K) was 0.12 year⁻¹, and natural mortality (M) was 0.3 year⁻¹ (Arreguín-Sánchez & Pitcher 1999). The factor of selection for each length class $s(l)$ was set as $s(l) = 1$ because information was no available.

Analysis of catchability-at-length, as proposed by Arreguín-Sánchez & Pitcher (1999), needs additional assumptions for spatial analysis. Here, we assumed that probability of distribution of red grouper within areas is related to the type of substrate following Albañez-Lucero & Arreguín-Sánchez (2009) whose abundance is reflected by the catch per unit effort (U), representing population size (N) through the relationship ($U = N / q$), where catchability q varied with density of fish (Arreguín-Sánchez & Pitcher 1999). Therefore, variations in catchability can be assigned to changes of catchability among areas. Spatial variation of catchability was estimated as:

$$\text{Ln} [U(l, z) / U(l, \bullet)] = \text{Ln} [q(l, z) / q(l, \bullet)], \quad (4)$$

where $U(l, z)$ is the catch per unit of effort of length l in zone z , $U(l, \bullet)$ is the average of catch per unit of effort of length l in the entire study area, $q(l, z)$ is the catchability of length l in zone z , and $q(l, \bullet)$ is the average catchability of length l in the entire study area. This could be interpreted as the deviation of catchability-at-length in zone z relative to the average catchability-at-length pattern. Arreguín-Sánchez & Pitcher (1999) demonstrated this ratio is a linear function of size, and can be represented as:

$$\text{Ln} [U(l, z) / U(l, \bullet)] = \ell(z) + \ell(z) \ell \quad (5)$$

where $\ell(z) = \text{Ln} [q(l+1, z) / q(l, \bullet)] - \text{Ln} [q(l, \bullet) / q(l, \bullet)]$

The intercept $\ell(z)$ is interpreted as the relative vulnerability of smallest fish and can also be interpreted as an index of recruitment to the area. The slope $\ell(z)$ expresses the rate of change of catchability-at-length relative to the mean pattern.

Table 1

Criteria for assigning probabilities in the growth matrix (G) per length class according to Shepherd (1987)

Criteria for the assignment of probabilities of the growth matrix (G) by length class according to Shepherd (1987)

1. $G(l, k) = 0$	...if...	$L(k+1) < \tilde{L}(l)$
2. $G(l, k) = [(L(k+1) - \tilde{L}(l)) / \Delta L]$	...if...	$L(k) < \tilde{L}(l) < L(k+1)$
3. $G(l, k) = 1.0$	...if...	$\tilde{L}(l) < L(k)$ and $L(k+1) < \tilde{L}(l+1)$
4. $G(l, k) = [(\tilde{L}(l+1) - L(k)) / \Delta L]$	...if...	$L(k) < \tilde{L}(l+1) < L(k+1)$
5. $G(l, k) = 0$	...if...	$\tilde{L}(l+1) < L(k)$
6. $G(l, k) = 1.0$ (for the last length interval)	...if...	$L = L_{\text{max}}$ and $\tilde{L}(l) < L(k)$

ℓ and k are successive length intervals; $\Delta L = L(k+1) - L(k)$ is the interval size (constant for all lengths); $\tilde{L}(l) = (L(l) - \lambda) / \rho$; $\lambda = L_\infty \cdot (1 - \rho)$; and $\rho = \exp(-K \cdot \Delta t)$; K and L_∞ are parameters of von Bertalanffy growth model

Results

Catchability estimates ranked as follows: preadults ($q_{pre} = 0.06940$), adults ($q_{adu} = 0.04949$), and juveniles ($q_{juv} = 0.03245$). Based on seasonal variations, the maximum catchability of adults occurred in winter and progressively diminished during summer and autumn. Higher catchabilities of pre-adults occurred in winter and progressively diminished during spring and summer, before switching upward again in autumn. Catchability of juveniles occurred in winter and spring progressively diminished in the summer and autumn (Fig. 1).

Maximum values of catchability of adults were registered during the spring and the winter of 1973. Catchability of preadults is more variable with peaks in winter and spring. Catchability of juveniles shows the maximum values in spring, except in 1973 when higher catchability occurred in winter (Fig. 2).

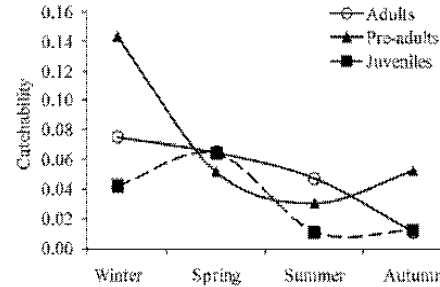


Figure 1

Average seasonal pattern of catchability for the red grouper *E. morio* on the Campeche Bank, Mexico, per stage of development from 1973 to 1977

Variación estacional de la capturabilidad por sector de población de mero *E. morio* en el Banco de Campeche, México de 1973 a 1977

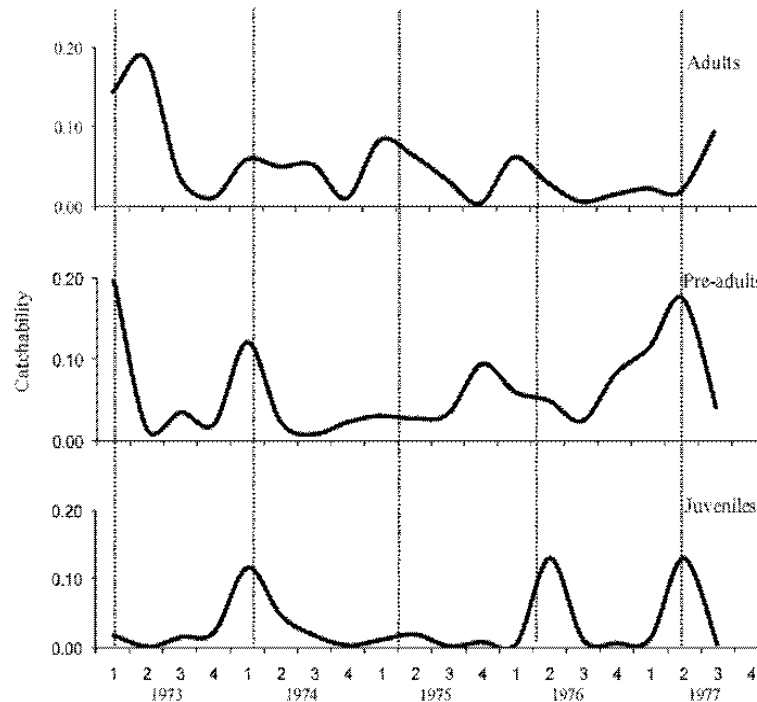


Figure 2

Catchability trends of red grouper *E. morio* (1973-1977) by stage of development on the Campeche Bank, Mexico, (1 = winter, 2 = spring, 3 = summer, 4 = autumn)

Tendencias de la capturabilidad por sector de población de mero *E. morio* (1973-1977) en el Banco de Campeche, México, (1 = invierno, 2 = primavera, 3 = verano, 4 = otoño)

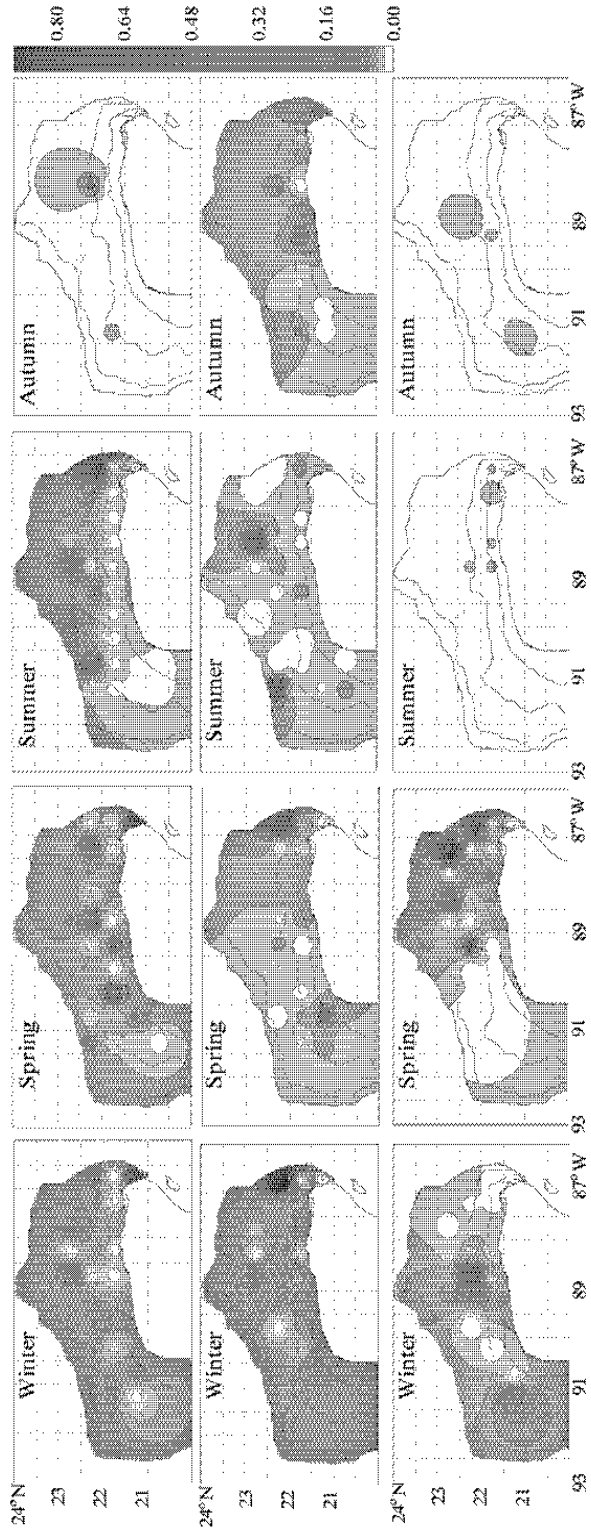


Figure 3
Seasonal and spatial distribution of catchability for the red grouper *E. morio* on the Campeche Bank, Mexico, from 1973 to 1977. (A) adults, (B) pre-adults, and (C) juveniles
 Distribución espacio temporal de la capturabilidad de mero *E. morio* en el Banco de Campeche, México, de 1973 a 1977. (A) adultos, (B) preadultos, y (C) juveniles

The zones of higher catchability values for adults during winter were in the northeastern part of the Campeche Bank (22.5°-23.0°N, 87.5°-89.0°W) and in the west (22.0°-22.5°N, 90.5°-92.0°W). Distribution in spring was similar to winter. High catchability values were found during summer on the northeastern region (22.0°-22.5°N, 86.5°-87.0°W) and on the north, near Arrecife Alacranes (~22.6°N, 89.7°W). In autumn, higher catchabilities were found to the eastern continental shelf (~22.5°N, 88.0°W); and on the west, similar to conditions in the winter (Fig. 3A).

Higher catchability values pre-adults were observed during the winter and spring in the east (22.0°-22.5°N, 86.5°-87.0°W) and in the southwest near Celestún-Sisal (21.0°-22.0°N, 90.0°-91.0°W). In summer areas with higher values of catchability were far from the coast; in autumn, higher catchabilities were near to the coast (Fig. 3B).

High catchabilities of juveniles in winter occurred in the central (22.0°-22.5°N, 88.5°-89.5°W) and west (21.0°-22.0°N, 91.0°-92.0°W) regions of the north continental shelf of Yucatan Peninsula. In spring, higher catchabilities occurred in the northeast border-end of the continental shelf; and in summer and autumn higher catchabilities were near the coast (Fig. 3C).

Computations based on Equation 5 show the departure

of catchability-at-length for each zone with regard to the average pattern, where Figs. 4 and 5 represent positive and negative deviations respectively. Positive values for the β coefficient indicate higher vulnerability in the larger sizes and negative numbers indicate higher vulnerability in the smaller sizes. A pattern of positive deviations occurred in area farther from the coast. Evident change occurs in autumn toward high vulnerability of smaller fishes (Table 2). In winter, positive values of β were constant north of 22°N, except in the central part of the Campeche Bank. In this season, negative values of β appear along the coast, especially at Dzilam de Bravo

Table 2

Seasonal variation of the β and α coefficients (Equation 5) for the red grouper *E. morio* fishery on the Campeche Bank, Mexico, from 1973 to 1977

Variación estacional de los coeficientes β y α (ecuación 5), en la pesquería de mero *E. morio* en el Banco de Campeche, México, de 1973 a 1977

	β	α
Winter	0.0405	2.42
Spring	0.0392	2.67
Summer	0.0363	2.63
Autumn	-0.0210	0.86

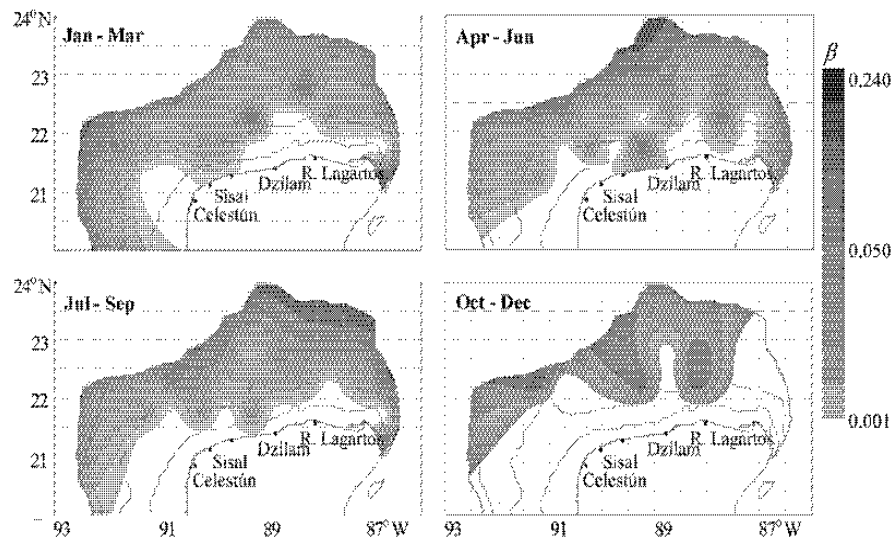


Figure 4

Seasonal distribution of the positive values of the β coefficient (Equation 5) (indicating high catchability for adults) for the red grouper *E. morio* fishery on the Campeche Bank, Mexico, from 1973 to 1977

Distribución temporal de valores positivos del coeficiente β (ecuación 5) (indicando alta capturabilidad en adultos) en la pesquería de mero *E. morio* en el Banco de Campeche, México, de 1973 a 1977

and Río Lagartos (Fig. 5). During spring, high positive values of β appear in the broad north region and moderate values to the east and west (Fig. 4). The western area had negative values of β , which indicates higher vulnerability of smaller fishes (Fig. 5). In summer, the pattern of positive deviations in the larger sizes in the northern area continued. In addition, there were important areas of negative values for β near Río Lagartos, Dzilam de Bravo, and west of Celestún (Fig. 5) meaning higher vulnerabilities for smaller fish. Near Celestún, a pattern of constant catchability-at-length also occurred. During autumn, the pattern was completely different than for other seasons. Negative β values were distributed almost across the entire Bank, including the northern area, where this pattern had not appeared (Fig. 5).

Discussion

Our survey showed spatial and seasonal variations of catchability-at-length pattern among the developmental stages of the red grouper in the Campeche Bank from 1973 to 1977. Catchability was higher in adults during winter and spring in the central and eastern parts of the Campeche Bank. Arreguín-Sánchez & Pitcher (1999) reported that catchability changes seasonally in proportion to population density, which in turns suggests that adults aggregate during late winter and earlier spring in the eastern region of the Campeche Bank. Arreguín-

Sánchez *et al.* (1997) suggested that immature individuals have similar seasonal movements than adults, but in areas nearer the coast. Our findings showed that the scenario from 1973 to 1977 reflects that high catchability for juveniles and preadults were found in coastal areas, but also in areas of medium and greater depths, which suggest transition areas with juveniles moving to the north in autumn.

During spring and summer from 1973 to 1977, high catchability areas were widely dispersed within the bank, especially on the west during summer. In autumn, there was a notable decline in catchability for all developmental stages. Hernández & Seijo (2003) suggested that red grouper is not attracted by fishing bait because they are moving to the eastern part of the bank, there is high dispersion of red grouper at this season, or by changes in fleet dynamics because change of target species by fleet to the Mexican four-eyed octopus *Octopus maya*. This situation is more notable for adults and pre-adults. From 1973 to 1977, during autumn the departure of catchability-at-length, as represented by the β coefficient of Equation 5 (Fig. 5), had predominantly negative values, which represents a higher vulnerability for small fishes. Important areas were near Celestún-Sisal, Dzilam de Bravo-Río Lagartos, and El Cuyo. In these coastal areas, high catchability occurred during all seasons, clearly indicating the importance of coastal areas for juveniles.

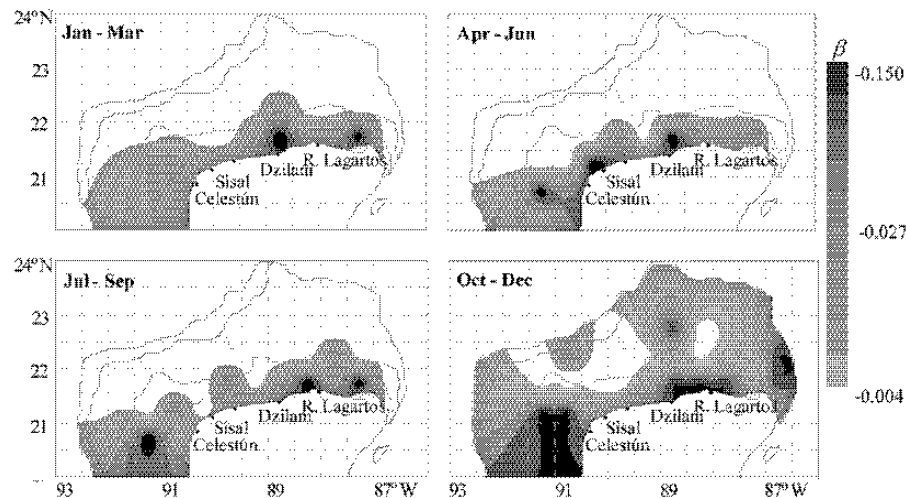


Figure 5

Seasonal distribution of the negative values of the β coefficient (Equation 5) (indicating higher catchability for juveniles) for the red grouper *E. morio* fishery on the Campeche Bank, Mexico, from 1973 to 1977

Distribución temporal de valores negativos del coeficiente β (ecuación 5) (indicando alta capturabilidad en juveniles) en la pesquería de mero *E. morio* en el Banco de Campeche, México, de 1973 a 1977

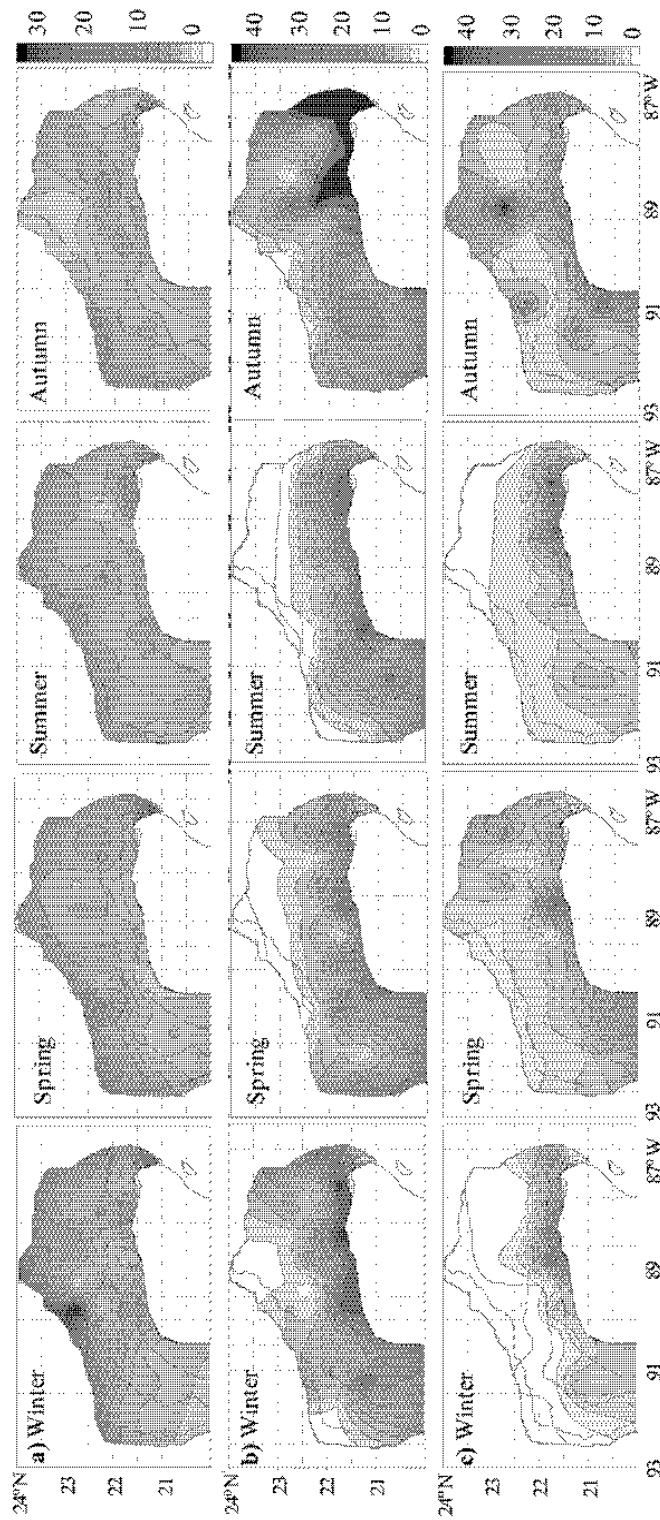


Figure 6

Distribution of the relative abundance (catch per unit effort in number of fishes per effective day of fishing) for the red grouper *E. morio* on the Campeche Bank, Mexico, from 1973 to 1977. (A) adults, (B) pre-adults, and (C) juveniles

Distribución de la abundancia relativa (captura por unidad de esfuerzo en número de peces por día efectivo de pesca) de mero *E. morio* en el Banco de Campeche, México, de 1973 a 1977. (A) adultos, (B) preadultos, y (C) juveniles

Our estimation of catchability was based on the historical period of greatest landings (1973-1977), when the red grouper stock was not overfished yet as it is considered now; therefore, if catchability is considered as a measure of interaction between the resource and the fishing effort, catchability estimates of a depleted population could be reflecting more the fishing strategies than the population behavior. Thus, is important the current estimates of catchability as well as, the knowledge of the spatial-temporal patterns of catchability when the red grouper was not overfished.

At least two situations have been recognized as responsible for the decline of the red grouper stock: 1) a high fishing pressure in areas where reproductive adults aggregate, and 2) high fishing pressure in nursery areas (Burgos-Rosas & Pérez-Pérez 2006). Protection of critical habitats has been suggested for the red grouper stock to recover by creating Fishing Restricted Areas in places where juveniles concentrate and where reproduction takes place (Giménez-Hurtado 2005, Burgos-Rosas & Pérez-Pérez 2006, López-Rocha & Arreguín-Sánchez 2008). The Mexican government has established temporary fishing bans, from February 15 to March 15 each year since 2003, for the entire Campeche

Bank offering protection during reproductive season. However, this measure has a limited value since the red grouper reproduction begins on January and continues through March (Brulé *et al.* 1999, Giménez *et al.* 2003). A variation of this government policy to achieve more effective protection could be a ban on fishing but inside reproduction areas for at least those three months. This implementation may represent a potential solution that combines the stock protection and the short-term interests of fishers. Locations of high density of groupers on the eastern continental shelf varied, but coincided with the high catchability region. Thus, a protection area that covered this region was defined within the ranges 22°-23.5° N and 86°-89° W. Despite the evidence that reproduction can occur elsewhere than just in the eastern area (Brulé *et al.* 1999, Giménez *et al.* 2003) and that some authors (Shapiro 1987, Sadovy 1996) suggested red grouper does not form typical spawning aggregations than other serranid species, red grouper density in the eastern Campeche Bank during reproductive season is over five times than that showed during other seasons; this fact coincides with criteria suggested by Domeier & Colin (1997). Such red grouper aggregation corresponded to higher catchability values; therefore, fishing bans in

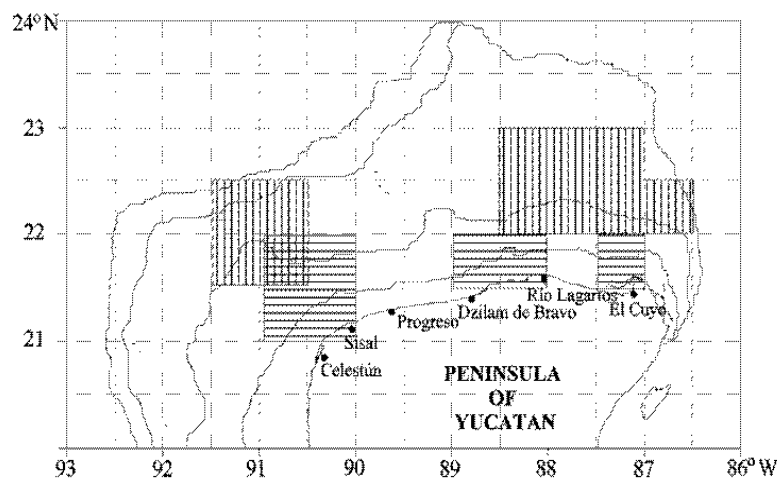


Figure 7

Proposed zones from this study as Fishing Restricted Areas for the red grouper *E. morio* fishery on the Campeche Bank, Mexico. Areas with vertical lines are suggested to protect adults while areas with horizontal lines are suggested to protect juveniles

Áreas propuestas de este estudio como zonas de restricción de pesca en la pesquería de mero *E. morio* en el Banco de Campeche, México. Zonas con líneas verticales indican zonas de protección de adultos mientras que las áreas con líneas horizontales indican zonas de protección de juveniles

these regions, implemented as Fishing Restricted Areas, may give desirable results for proper management. Within this framework, Fig. 6 shows seasonal changes of the stock abundance (1973-1977) (Albañez-Lucero & Arreguín-Sánchez 2009) related bottom types. It is clearly noticed that highest concentrations of fishes coincide with highest values of catchability.

Juvenile had four areas with high catchability adjacent to Celestún, Dzilam de Bravo, Río Lagartos, and El Cuyo locations, the same areas reported by Renán *et al.* (2003) as nursery areas for *E. morio* and other species of groupers (see Fig. 6). Fishing restrictions in these areas can be considered appropriated since average size-at-first-capture (30 cm LT) is below first maturity size (50 cm LT) (Burgos-Rosas & Pérez-Pérez 2006).

Based on distributions of catchability obtained for 1973 to 1977 and stock abundance (Albañez-Lucero & Arreguín-Sánchez 2009), Fig. 7 shows areas that may be suitable for Fishing Restricted Areas, which could positively impact red grouper survival by reducing fishing mortality within high densities areas. Certainly is advisable reevaluate the proposed areas with current information. However, as mentioned earlier, due to the strong relationship between the red grouper distribution and the bottom type, one can expect a similar pattern of red grouper distribution at present. Hernandez & Seijo (2003) analyzed the red grouper distribution in the Campeche Bank from 1984 to 2001. They found significant high abundances every year during January and February in the eastern part of the bank. These results confirm that there has been continuity in the general pattern of red grouper distribution even under overfishing conditions. Therefore, the results obtained in this work can guide the location of Fishing Restricted Areas to promote stock recovery.

Acknowledgments

We express our gratitude to the European Community for support through the project INCOFISH (contract INCO 003739); SAGARPA-CONACYT (project 12004) and Instituto Politécnico Nacional (projects: 20060579, 20070767, 20080765). JALR was a recipient of a CONACYT doctoral fellowship and FAS is an EDI and COFAA fellow of the Instituto Politécnico Nacional. JAAM thanks Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología for financial support (CONACYT operating Grant 290537-IPN). Authors also thank Instituto Nacional de la Pesca for facilitating information on the red grouper fishery. We appreciate the valuable comments of two anonymous reviewers.

Literature cited

- Albañez-Lucero MO & F Arreguín-Sánchez. 2009.** Modelling spatial distribution of red grouper (*Epinephelus morio*) of Campeche Bank, México, with respect substrate. *Ecological Modelling* 220(20): 2744-2750.
- Arreguín-Sánchez F. 1996.** Catchability, a key parameter for fish stock assessment. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 6: 221-242.
- Arreguín-Sánchez F & TJ Pitcher. 1999.** Catchability estimates accounting for several sources of variation: application to the red grouper fishery of the Campeche Bank, México. *Fishery Bulletin* 97: 746-757.
- Arreguín-Sánchez F, M Contreras, V Moreno, R Valdés & R Burgos. 1997.** La pesquería de mero (*Epinephelus morio*) de la Sonda de Campeche, México. In: Flores-Hernández D, P Sánchez-Gil, JC Seijo & F Arreguín-Sánchez (eds). *Análisis y diagnóstico de los recursos pesqueros críticos del Golfo de México*, pp. 307-332. Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX Serie Científica, México.
- Brulé T, C Déniel, T Colás-Marrufo & M Sánchez-Crespo. 1999.** Red Grouper reproduction in the southern Gulf of Mexico. *Transactions of the American Fisheries Society* 128: 385-402.
- Burgos-Rosas R & L Pérez-Pérez. 2006.** Mero. In: Arreguín-Sánchez F, L. Meléndez-Moreno, I Méndez-Gómez-Humarán, R Solana-Sansores & C Rangel-Dávalos (eds). *Sustentabilidad y pesca responsable en México: evaluación y manejo*, pp. 503-522. Instituto Nacional de la Pesca, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México.
- Caswell H. 1988.** Approaching size and age in matrix population models. In: Ebenman E & L Persson (eds). *Size-structured populations*, pp. 85-105. Springer-Verlag, Berlin.
- Domier ML & PL Colin. 1997.** Tropical reef fish spawning aggregations: Defined and reviewed. *Bulletin of Marine Science* 60: 698-726.
- Giménez E, V Moreno, R Burgos & S Alfonso. 2003.** Reproducción y fecundidad de la cherna americana (*Epinephelus morio*) en el banco de Campeche, México. *Oceánides* 18: 13-22.
- Giménez-Hurtado E. 2005.** Análisis de la pesca del mero *Epinephelus morio* (Serranidae: Pisces, Valenciennes 1928) en el Banco de Campeche. Tesis de Doctorado, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, 93 pp.
- Giménez-Hurtado E, R Coyula-Pérez-Puelles, S Lluch-Cota, AA González-Yáñez, V Moreno-García & R Burgos-Rosas. 2005.** Historical biomass, fishing mortality, and recruitment trends of the Campeche Bank red grouper (*Epinephelus morio*). *Fisheries Research* 71: 267-277.
- Hernández A & JC Seijo. 2003.** Spatial distribution analysis of red grouper (*Epinephelus morio*) fishery in Yucatán, Mexico. *Fisheries Research* 63: 135-141.

- López-Rocha JA & F Arreguín-Sánchez. 2008.** Spatial distribution of red grouper *Epinephelus morio* (Serranidae) catchability on the Campeche Bank of Mexico. *Journal of Applied Ichthyology* 24: 282-289.
- Martínez-Aguilar S, E Morales-Bojórquez, F Arreguín-Sánchez & JA de Anda-Montañez. 1999.** Catchability: programa computarizado para estimar el coeficiente de capturabilidad en función de la longitud, 16 pp. Centro Regional de Investigación Pesquera de La Paz del INP, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-IPN, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz.
- Renán X, K Cervera-Cervera & T Brulé. 2003.** Probable nursery areas for juvenile groupers along the northern coast of the Yucatan peninsula, Mexico. *Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute* 54: 496-505.
- Sadovy Y. 1996.** Reproduction of reef fish species. In: Polunin NVC & CM Roberts (eds). *Reef fisheries*, pp. 15-59. Chapman and Hall, London.
- Shapiro D. 1987.** Reproduction in groupers. In: Polovina JJ & S Ralston (eds). *Tropical snappers and groupers: biology and fisheries management*, pp. 295-325. Westview Press, Boulder.
- Shepherd JC. 1987.** A weakly parametric method for estimating growth parameters from length composition data. In: Pauly D & GP Morgan (eds). *Length based methods in fisheries research*. ICLARM Conferences Proceedings 13: 113-119.
- Valdés E & G Padrón. 1980.** Pesquerías de palangre. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras* 5: 38-52.

Recibido el 6 de febrero de 2009 y aceptado el 29 de septiembre de 2009