

Abundance distribution patterns of commercial shrimp off northwestern Mexico modeled with geographic information systems

Patrones de distribución de la abundancia de camarón comercial en el noroeste de México, modelados con sistemas de información geográfica

A Ruiz-Luna^{1*}, R Meraz-Sánchez², J Madrid-Vera²

¹ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. Unidad Mazatlán, Av. Sábalo-Cerritos s/n, A.P. 711, Mazatlán, CP 82010, Sinaloa, México. *E-mail: arluna@ciad.mx

² Instituto Nacional de la Pesca, Centro Regional de Investigación Pesquera en Mazatlán, Av. Sábalo-Cerritos s/n, Mazatlán, CP 82010, Sinaloa, México.

ABSTRACT. Abundance patterns for three species of penaeid shrimp off northwestern Mexico are explained based on sampling-catch data obtained by the National Fisheries Institute during closed fishing seasons (1995–2006). The bathymetry and fishing area (>14,000 km²) were determined from a depth dataset of >45,000 points. The catch data were obtained from a sampling network of 62 sites, with an average of 76 trawls per fishing season; the brown shrimp (*Farfantepenaeus californiensis*) was the most abundant species. The relative abundance models for the three species, produced by two geostatistical methods (inverse distance weighting (IDW) and Kriging), identified mid-northern Sinaloa as the most important area regarding the distribution of the resource, with each species displaying different distribution patterns. The spatial model allowed the categorization of data into three levels of relative abundance, taking the values between quartiles 1 and 3 as the medium abundance and the values below quartile 1 and above quartile 3 as the extremes (low and high). The two geostatistical techniques (IDW and Kriging) produced very similar abundance distribution maps, with values >0.7 of the Kappa index of agreement, particularly for areas of high abundance. These results could be useful to point out those areas that can be used to regulate fishing effort and reduce fishing mortality, supporting the sustainable development of the fishery.

Key words: abundance, distribution, geospatial models, geographical information system, shrimp fishery.

RESUMEN. Se determinaron los patrones de abundancia de tres especies de camarones peneidos, con base en datos de capturas obtenidos por el Instituto Nacional de la Pesca durante la época de veda (1995–2006), en el noroeste de México. Se generó un modelo batimétrico y se definió el área de pesca (>14,000 km²) a partir de una base de datos de >45,000 datos de profundidad. Los datos de captura provienen de una red de 62 estaciones, con un promedio de 76 lances por temporada de pesca, siendo el camarón café (*Farfantepenaeus californiensis*) la especie más abundante. Los modelos de abundancia relativa de las tres especies, generados con dos técnicas geoestadísticas (método del inverso de la distancia ponderada (IDW) y el de Kriging), ubican a la zona centro-norte de Sinaloa como la más importante para la distribución del recurso, con distintos patrones de distribución por especie. El modelo espacial permitió clasificar los valores de abundancia en tres niveles, correspondiendo la abundancia media a los comprendidos entre los cuartiles 1 y 3 de la distribución, mientras que los valores por debajo del cuartil 1 y por arriba del cuartil 3 fueron designados como los valores extremos (bajo y alto). Los mapas resultantes de las dos técnicas usadas (IDW y Kriging) mostraron concordancia elevada, con valores >0.7 para el índice de concordancia de Kappa, incrementándose dichos valores para las áreas de alta abundancia. Estos resultados podrían ser útiles para identificar áreas que pueden usarse para regular el esfuerzo pesquero y reducir la mortalidad por pesca, apoyando el manejo de la pesquería hacia un nivel sustentable.

Palabras clave: abundancia, distribución, modelos geoespaciales, pesquería de camarón, sistema de información geográfica.

INTRODUCTION

The Mexican shrimp fishery includes diverse penaeid species, mainly of the genera *Farfantepenaeus* and *Litopenaeus*. It produces around 60,000 t per year nationally, with approximately 70% coming from the Pacific coast (INAPESCA 2001). This fishery industry directly or indirectly employs about 37,000 people, and contributes about US\$500 million, which represents nearly 40% of the total value of the national fishery production.

This industry also has the largest fleet in the country, consisting of small and industrial boats that together have carried the fishery to its maximum level of exploitation.

INTRODUCCIÓN

La pesquería mexicana de camarón incluye diversas especies de peneidos, principalmente de los géneros *Litopenaeus* y *Farfantepenaeus*, produciendo cerca de 60,000 t por año, de las que alrededor del 70% proceden de la costa del Pacífico (INAPESCA 2001). Esta pesquería aporta cerca de 500 millones de dólares, lo que representa aproximadamente 40% del valor total de la producción pesquera nacional y genera cerca de 37,000 empleos, directa o indirectamente.

Esta industria cuenta con la mayor flota del país, formada por embarcaciones menores y de nivel industrial, que en

Consequently, the efforts of government authorities have focused on maintaining the biomass and recruitment to stabilize the yields at current levels and to reduce technological and environmental interactions (INAPESCA 2001, CNP 2006). As part of this policy, fishery managers have recommended that fishing effort should not increase and fishing mortality should be reduced in some strategic areas. In addition, Mexican fishing authorities from the National Commission for Aquaculture and Fishing (CONAPESCA) and the National Fisheries Institute (INAPESCA) have developed monitoring programs for the resource during both the closed and open fishing seasons, and a time series since 1992 of shrimp abundance records obtained before the fishing season opened is available.

Contributions on the dynamics of this resource from Morales-Bojórquez *et al.* (2001), Madrid-Vera *et al.* (2001a), Pérez (2003), and Paredes (2007) have used data derived from this monitoring program, introducing the concept of uncertainty and the maximum likelihood approach when modelling this fishery. Even so, there is a consensus that not enough information exists to adequately characterize the temporal and spatial patterns of this fishery, especially the latter, for which there is limited technical information about the distribution of commercial species in the Gulf of California (Rodríguez de la Cruz 1981, Sierra *et al.* 2000, Chávez-Herrera 2001, Madrid-Vera *et al.* 2001a). Our study aims to close these information gaps.

At present, mapping of natural resources, including fishing resources and their habitat, is a priority for management purposes, even when part of the necessary information is not completely available. This process exposes the main data deficiencies and allows the problems to be prioritized for their solution (Caddy and García 1985). Obtaining such inventories is even more difficult when unstable environments are involved, and particularly when short-life or complex-cycle species strongly depend on the environmental variables and are under environmental stress because of human activities such as fishing. With all these constraints, mapping resources and environments is a vital input for fisheries management programs focused on maintaining biomass and recruitment. These programs are more likely to succeed if information on resource distribution and abundance is available.

We analyzed information on the abundance of the blue shrimp *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson 1874), the white shrimp *L. vannamei* (Boone 1931), and the brown shrimp *Farfantepenaeus californiensis* (Holmes 1900) from the coasts of Sinaloa and Nayarit, northwestern Mexico, using the ability of geographical information systems (GIS) and interpolation techniques to emphasize the analysis spatially.

The purpose of this analysis was to produce indicators of shrimp abundance in the study area that allow the appropriate application of the fishing effort and the estimation of natural production variabilities, particularly in areas that have

conjunto han llevado a la pesca a su nivel máximo de explotación. Debido a esto, las autoridades gubernamentales concentran sus esfuerzos en mantener la biomasa y el reclutamiento en los niveles actuales para estabilizar los rendimientos y reducir las interacciones tecnológicas y ambientales (INAPESCA 2001, CNP 2006). Como parte de esta política, la administración pesquera recomienda no aumentar el esfuerzo pesquero y reducir la mortalidad por pesca en algunas zonas estratégicas. Adicionalmente, las autoridades pesqueras de México, representadas por la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA) y el Instituto Nacional de la Pesca (INAPESCA), tienen programas de monitoreo del recurso, tanto en temporada de veda como en la época de captura, gracias a lo cual se cuenta con una serie temporal de registros de abundancia de camarón obtenidos durante la temporada de veda, desde 1992 a la fecha.

Con base en datos derivados de este programa de monitoreo, Morales-Bojórquez *et al.* (2001), Madrid-Vera *et al.* (2001a), Pérez (2003) y Paredes (2007) han generado algunas contribuciones recientes sobre la dinámica de este recurso, introduciendo el concepto de incertidumbre y el enfoque de máxima verosimilitud para la modelización de esta pesquería. Aun así, el consenso señala que no existe suficiente información para caracterizar adecuadamente los patrones temporales y espaciales de esta pesquería, particularmente estos últimos, para los que existen limitados reportes técnicos sobre la distribución de las especies comerciales en el Golfo de California (Rodríguez de la Cruz 1981, Sierra *et al.* 2000, Chávez-Herrera 2001, Madrid-Vera *et al.* 2001a). Por lo tanto, el presente estudio contribuye a reducir las lagunas de información existentes en este sentido.

El cartografiado de los recursos naturales, incluidos los pesqueros y su hábitat, es una prioridad actual y forma parte de los objetivos de la gestión, incluso cuando parte de la información necesaria no está completamente disponible. Sin embargo, a través de este proceso se exponen las deficiencias de los datos y se permite priorizar los problemas para su solución (Caddy y García 1985). Es un hecho que producir este tipo de inventarios se hace aún más complejo para ambientes inestables, particularmente cuando las especies con ciclos biológicos cortos o complejos tienen fuerte dependencia a las variables ambientales y más aún si se ejercen presiones ambientales, incluidas actividades como la pesca. Con todas estas limitantes, la cartografía de recursos y ambientes es un insumo vital para los programas de gestión pesquera relacionados con la conservación de la biomasa y el reclutamiento, que tienen mayores probabilidades de éxito si se dispone de información relacionada con la distribución y abundancia de los recursos.

Con ese enfoque, en este estudio se analizan datos de la abundancia del camarón azul *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson 1874), el camarón blanco *L. vannamei* (Boone 1931) y el camarón café *Farfantepenaeus californiensis* (Holmes 1900), obtenidos a lo largo de las costas de Sinaloa

historically been subject to intensive exploitation. Hence, we compared the results obtained using two different interpolation techniques (inverse distance weighting (IDW) and Kriging). Assuming that when output distribution patterns from both techniques are as close as possible, this information could give a better understanding of the resource distribution patterns, the appropriate conditions to attain biomass conservation, the reduction of environmental interactions, and the reduction of fishing mortality.

Under the assumptions that the results obtained from sampling the network stations of the INAPESCA monitoring program are representative of the distribution of shrimp species in the study area, that the surveys during the closed fishing season are the best available indicators of the abundance of the resource in the absence of fishing activity, and that the analytical methods are sufficiently robust, in this paper we present the spatial distribution patterns of abundance of three shrimp species based on a 12-year data series.

MATERIAL AND METHODS

Delimitation of the shrimp fleet's fishing area

The geographic area where the industrial shrimp-fishing fleet operates was defined by taking the 10- and 85-m isobaths as the minimum and maximum depths; the latter was selected as the maximum depth for fishing operations because of the technical limitations of the vessels and the natural distribution of the resource (Hendrickx 1996). Bathymetric maps at scales larger than 1:750,000 are not available for the study area, so a bathymetric model was created with more than 45,000 georeferenced data points, unevenly distributed along the coasts of Sinaloa and northern Nayarit. Data were acquired from oceanographic and fishing surveys completed by the National Autonomous University of Mexico (UNAM), the Mexican Navy, and the Regional Center for Fisheries Research (CRIP-INAPESCA). The model was produced by linear interpolation using the triangulation method (Lawson 1977) with Surfer v.7 software.

The coastline was digitized from the vector maps produced by the National Institute for Statistics, Geography, and Informatics (INEGI; 1:250,000) and later integrated into the bathymetric map. The vectorial model was then transformed to a cell format (*.grid), with 1×1 km pixel size and geographic coordinates (latitude-longitude) in decimal degrees, to be used as the base map for further analysis.

Abundance estimation

To estimate the abundance of the three shrimp species, the time-series data from the INAPESCA monitoring program were used. The samples were taken along the Pacific coast of Mexico, between 22°11' N and 25°47' N, off the coast of the states of Sinaloa and Nayarit (fig. 1). Depending on the weather conditions, from zero to two trawls were made each

y Nayarit, en el noroeste de México, enfatizando el aspecto espacial de la información con base en las capacidades de los sistemas de información geográfica (SIG) y el uso de técnicas de interpolación.

El propósito de este análisis fue generar indicadores de abundancia de camarón en el área de estudio que permitan adecuar la aplicación del esfuerzo pesquero y estimar variaciones de la producción natural, particularmente en áreas que históricamente han estado sujetas a explotación intensiva. Para ello, se compararon los resultados producidos con el uso de dos técnicas de interpolación (inverso de la distancia ponderada (IDW) y Kriging) que, bajo el supuesto de que cuando los patrones de distribución resultantes son similares, permiten una mejor comprensión de los patrones de distribución de los recursos; una condición necesaria para alcanzar los objetivos de conservación de la biomasa, la reducción de las interacciones medioambientales y la reducción de la mortalidad por pesca.

Suponiendo que los resultados obtenidos del muestreo de la red de estaciones del programa de monitoreo del INAPESCA son representativos de la distribución de las especies de camarón en el área de estudio, que los muestreos durante la temporada de veda son los mejores indicadores disponibles de la abundancia del recurso en ausencia de actividad pesquera y que los métodos de análisis son lo suficientemente robustos, se presentan los patrones de distribución espacial de la abundancia de tres especies de camarón, con base en una serie temporal de datos de 12 años.

MATERIALES Y MÉTODOS

Delimitación del área de operación de la flota pesquera

El área geográfica donde opera la flota de pesca industrial del camarón queda incluida entre las isóbatas de 10 y 85 m, constituidas como límites mínimo y máximo de profundidad, definiéndose esta última como la máxima profundidad de operación de pesca debido a las limitaciones técnicas de las embarcaciones y a la distribución natural de los recursos (Hendrickx 1996). Para el área de estudio no existen cartas batimétricas de escalas mayores de 1:750,000 por lo que fue necesario construir un modelo batimétrico, a partir de más de 45,000 puntos georreferenciados, distribuidos de forma desigual a lo largo de la costa de Sinaloa y norte de Nayarit. Los datos fueron registrados en diversas campañas oceanográficas y de pesca realizadas por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Armada de México y el Centro Regional de Investigación Pesquera-INAPESCA. El modelo fue elaborado por interpolación lineal utilizando el método de triangulación (Lawson 1977) con el *software* Surfer v.7.

La línea de costa se obtuvo a partir de los modelos vectoriales producidos por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI; 1:250,000) y posteriormente se integró al modelo batimétrico. El modelo vectorial

year at the 62 sampling sites in the fishing zone. The data series (1995–2006) includes 911 records gathered between July and August of each year, when commercial shrimp fishing is banned. Data consist of the total shrimp catch, the catch of each species (kg), and estimates of fishing effort standardized to one hour trawling. From these, catch per unit effort (CPUE) was assessed as an indicator of relative abundance (kg h^{-1}). The CPUE values per species and sampling station were used as seed data to simulate the spatial distribution of the relative abundance.

The base map and the CPUE-data records per sampling station and year were integrated into the GIS to produce relative abundance maps using the ArcView 3.2 platform. Density contour maps per year were created using two interpolation techniques (IDW and Kriging) to determine whether outputs produced differences in the spatial distribution patterns. The IDW technique assumes that the values of the variables assigned to unsurveyed locations are an average of the values for the contiguous sampled sites, weighted by the distance to these sites. This technique weighs distance to the closest sites and is inversely proportional to the distance between the unsampled point and the sampled point (Isaaks and Srivastava 1989). The interpolation model integrated into the ArcView platform is:

$$z_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_{ij}^B}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^B}}$$

where z_j is the estimated value (kg h^{-1}) for the unsampled site, z_i is the observed value (kg h^{-1}) recorded at site i , d_{ij} is the distance (km) from the reference sites with a known CPUE to the site for which the CPUE will be estimated, B is the weighting factor (2.0), and n is the number of reference sites used for the calculation (10).

The Kriging method is based on the hypothesis that spatial variations for the variable are statistically homogeneous along a surface. Its mathematical formulation uses a function called a variogram as a weighting function that expresses the spatial variation among data. It can be defined as half of the square of the mean distance in all sets of pairs of observations i separated by a distance h (Isaaks and Srivastava 1989). The general model used to estimate the empirical variogram is:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(x_i) - z(x_i + h))^2$$

where $\gamma^*(h)$ is the empirical variogram for distance h (distance between pairs of observations), N is the set of pairs of observations, and $Z(x_i)$ corresponds to the observed values

fue transformado a un formato de celda (*.grid), con píxeles de 1×1 km y coordenadas geográficas (latitud y longitud) en grados decimales, creándose de esta manera el mapa base que fue usado en análisis posteriores.

Estimación de la abundancia

La abundancia de las tres especies de camarón fue estimada a partir de las series temporales de datos generados dentro del programa de monitoreo del INAPESCA. Los muestreos se realizaron a lo largo de la costa del Pacífico de México, entre los $22^{\circ}11' \text{ N}$ y $25^{\circ}47' \text{ N}$, frente a la costa de los estados de Sinaloa y Nayarit (fig. 1). La red de muestreo cuenta con 62 estaciones dentro de la zona de pesca, donde dependiendo de las condiciones meteorológicas se produjeron de cero a dos arrastres por temporada. La base de datos (1995–2006) incluye 911 registros, generados entre julio y agosto de cada año, durante la época de veda. La serie de datos incluye la captura total y por especie de camarón (kg) y estimaciones del esfuerzo pesquero estandarizado a una hora de arrastre. A partir de la información anterior se estimó la captura por unidad de esfuerzo (CPUE), suponiéndose como un indicador de la abundancia relativa (kg h^{-1}). Los valores de CPUE por especie y estación de muestreo fueron utilizados como semilla para simular la distribución espacial de la abundancia relativa.

El mapa base y los registros de CPUE por estación de muestreo y año se integraron al SIG para producir mapas de distribución de la abundancia relativa, usando la plataforma ArcView 3.2. Se produjeron mapas de contornos de densidad por año con dos técnicas de interpolación (IDW y Kriging) para determinar si los productos generaban diferencias en los patrones de distribución espacial. La técnica de IDW supone que los valores de las variables asignados a localidades no muestreadas, se obtienen como promedio de los valores observados en sitios de muestreo contiguos, ponderándose por la distancia a estos sitios. Esta técnica pondera la distancia a las localidades más cercanas, que cuentan con información y establece que son inversamente proporcionales a la distancia entre las localidades muestreadas y la no muestreada (Isaaks y Srivastava 1989). El modelo de interpolación usado se encuentra integrado a la plataforma de ArcView y se describe como:

$$z_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_{ij}^B}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^B}}$$

donde z_j es el valor estimado (kg h^{-1}) para el sitio no muestreado, z_i es el valor observado (kg h^{-1}) en el sitio i , y d_{ij} es la distancia (km) de los sitios de referencia, con un valor

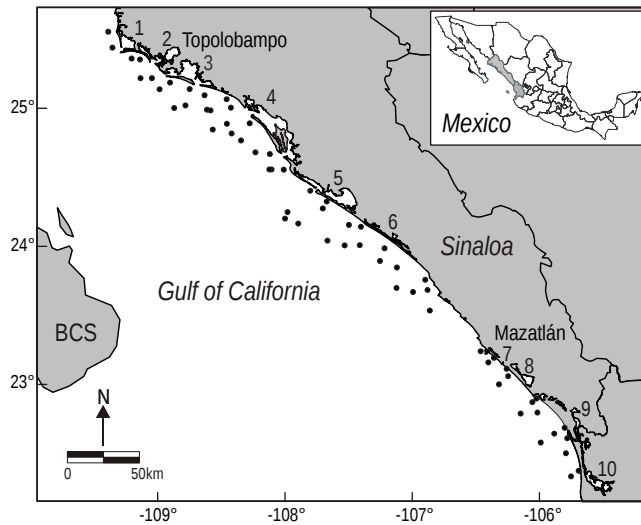


Figure 1. Study area off northwestern Mexico showing the main fishing harbours (Topolobampo and Mazatlán) and lagoon systems in the area. Black dots represent the CRIP-INAPESCA sampling network.

Figura 1. Área de estudio en el noroeste de México. Se muestran los principales puertos de pesca en la zona (Topolobampo y Mazatlán) y los sistemas lagunares. Los círculos negros representan las estaciones de muestreo del CRIP-INAPESCA.

(1) Lechuguilla, (2) Ohuira, (3) Navachiste, (4) Santa María-La Reforma, (5) Altata-Pabellones, (6) Ceuta, (7) Uriás, (8) Huizache-Caimanero, (9) Teacapan-Agua Grande, (10) Marismas Nacionales (Nayarit).

per sample and location (kg h^{-1}). To minimize the error, the variograms were optimized using Akaike criteria when data, previously transformed into natural logarithm ($x + 1$) to normalize the variance, were fitted to one of the models included in the ArcView 3.2 program. The two interpolation techniques, IDW and Kriging, were independently used with the CPUE values for each shrimp species and yielded continuous value maps that were then reclassified into three levels of relative abundance using quartiles to define the limits.

The lowest CPUE values, indicating low or zero abundance, included in quartile 1 were categorized with the value -1 . The CPUE values included between quartiles 1 and 3 were categorized with the value 0, indicating areas of medium abundance, and those above quartile 3 were categorized with the value 1, indicating areas of high abundance compared with the average values. The same procedure was done for each year to yield 12 maps per species and interpolation technique. To summarize and visualize the information in a single map, an algebraic sum of maps was made to produce a single product per species and technique. Thus, the extreme values in the final output vary from -12 , for areas with permanently low or zero abundance, to 12, for areas of high abundance in every year. Following the same approach as for the individual maps, the values were reclassified to

conocido de CPUE, al sitio para el que la CPUE se calcula. El término B corresponde al factor de ponderación (2.0) y n es el número de sitios de referencia utilizado para el cálculo (10).

Por otra parte, el método de Kriging se basa en la hipótesis de que las variaciones espaciales de la variable son estadísticamente homogéneas a lo largo de una superficie. Su formulación matemática aplica variogramas como funciones de ponderación, que expresan la variación espacial de los datos y se define como la mitad de la media cuadrada de la diferencia de todos los pares de datos observados i que están separados a una distancia h (Isaaks y Srivastava 1989). El modelo general para estimar el variograma empírico es:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(x_i) - z(x_i + h))^2$$

donde $\gamma^*(h)$ es el variograma empírico para la distancia h (distancia entre pares de observaciones), N es el número de pares de observaciones y $Z(x_i)$ corresponde a los valores observados (kg h^{-1}) por muestreo y localidad. Para minimizar el error, los variogramas fueron optimizados utilizando criterios Akaike cuando los datos se ajustaron a alguno de los modelos integrados en el programa ArcView 3.2, con previa transformación a logaritmo natural ($x + 1$), a fin de normalizar la varianza. Ambas técnicas de interpolación (IDW y Kriging) se aplicaron por separado con los valores de CPUE obtenidos para cada especie analizada, generándose mapas de valores continuos que posteriormente fueron recategorizados en tres niveles de abundancia relativa, usando cuartiles como criterio para definir los límites.

Los valores más bajos de CPUE, representativos de nula a baja abundancia, quedaron incluidos dentro de los límites del primer cuartil 1 y fueron clasificados con valor -1 . Los valores de CPUE incluidos entre los cuartiles 1 y 3 se clasificaron con el valor 0, lo que indica las áreas de abundancia media. Finalmente, los valores por encima del cuartil 3 se clasificaron con el valor de 1, indicando las zonas de mayor abundancia en comparación con los valores medios. El mismo procedimiento se realizó para cada año de la serie temporal, produciendo 12 mapas por especie y técnica de interpolación. Para resumir y visualizar la información se generó un mapa único por especie y técnica de interpolación, usando álgebra de mapas (suma algebraica). De esta manera, el producto final muestra valores extremos que pueden variar desde -12 , para las zonas que de manera permanente presentaron abundancia nula o escasa, hasta 12, para las zonas de alta abundancia en todos los años. Siguiendo los mismos criterios que para los mapas individuales, se reclasificaron los valores a abundancia baja, media, y alta por el método de los cuartiles.

Los mapas resultantes por especie y método de interpolación fueron contrastados para determinar el nivel de similitud entre ambos productos. Para ello, se aplicó una técnica de

low, medium, and high relative abundance levels by the quartile method.

The resulting maps were contrasted by species and interpolation method to determine the agreement between the two products. To do this, a technique for categorical map overlays was used, which produces a number of categories $= n^2$, where n is the initial number of categories in both maps. The result can be visualized as a contingency or confusion matrix from which the Kappa index of agreement (KIA) is assessed at both a general and a class level. This index measures the association between two numeric matrices of the same size, categorical maps in this case, acquiring values from -1 to 1 , where values close to -1 mean total dissimilarity between maps, and values close to 1 indicate zero difference. Values close to 0 are random differences (Rosenfield and Fitzpatrick-Lins 1986).

RESULTS

Given the available depth-referenced data for the limits of the study area, defined as the operational area for the shrimp-fishing fleet, a total surface area of about $14,500 \text{ km}^2$ represented by pixels of $1 \times 1 \text{ km}$ was estimated. The output map for the fishing area suggests a continental shelf with a relatively homogeneous width, extending about 40 km from the coastline (fig. 2); however, the bathymetry is not regular, the shelf narrowing at the northern limit and near Mazatlán to the south. The shelf has a moderate slope between Navachiste and Santa María-La Reforma, two of the most important lagoon systems in the area, where the width is about 50 km . The maximum width of about 60 km is found toward the southern limit, off the state of Nayarit.

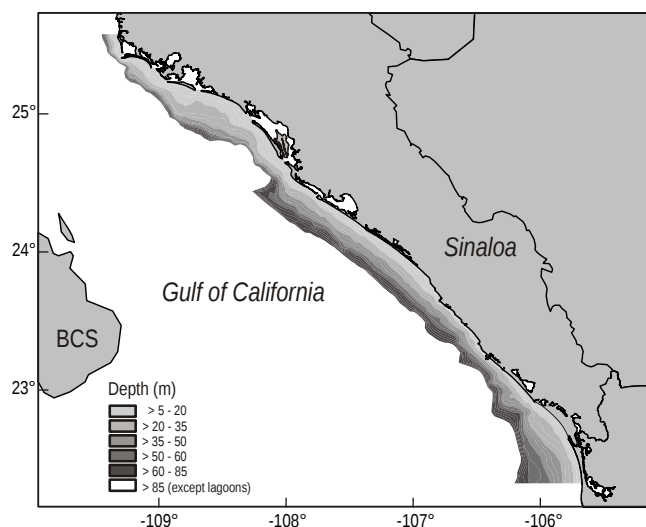


Figure 2. Bathymetric model and limits for the operation of the industrial shrimp fleet in the study area.

Figura 2. Modelo batimétrico y límites para la operación de la flota industrial de pesca de camarón en el área de estudio.

superposición de mapas categóricos, cuyo resultado produce un número de categorías $= n^2$, donde n es el número inicial de las categorías en ambos mapas. El resultado puede ser visualizado como una matriz de contingencia o de confusión, donde puede evaluarse el índice de concordancia de Kappa (KIA), tanto a nivel de clase como para el mapa en su conjunto. Este índice mide la asociación que existe entre dos matrices numéricas del mismo tamaño, en este caso mapas categóricos, adquiriendo valores de -1 a 1 , donde valores cercanos a -1 son indicadores de diferencias importantes entre los mapas, mientras que valores cercanos a 1 indican total semejanza. Los valores cercanos a 0 se suponen como diferencias producto del azar (Rosenfield y Fitzpatrick-Lins 1986).

RESULTADOS

Con base en la disponibilidad de datos de profundidad georeferenciados para la zona de estudio, que define el área de operación de la flota pesquera de camarón, se estimó una superficie total de aproximadamente $14,500 \text{ km}^2$, representada por píxeles de $1 \times 1 \text{ km}$. El mapa resultante sugiere una plataforma continental de amplitud relativamente homogénea, de aproximadamente 40 km a partir de la línea de la costa (fig. 2). Sin embargo, la batimetría no es regular, estrechándose la plataforma en el límite norte y hacia el sur, cerca de Mazatlán. La plataforma tiene una pendiente moderada entre Navachiste y Bahía Santa María-La Reforma, dos de los sistemas lagunares más importantes de la zona, donde la anchura se aproxima a 50 km . La anchura máxima, cercana a 60 km , se ubica hacia el límite sur, en el estado de Nayarit.

Se obtuvo un promedio de 76 muestras (arrastres) por temporada de captura, produciendo un rendimiento medio de 1 t año^{-1} , incluyendo las tres especies de camarón, durante los 12 años de muestreo. El camarón café fue la especie más abundante, representando en promedio 61% de la captura total en los 12 años, con un máximo de alrededor de 88% del total en 2001. Le siguieron en importancia el camarón azul (27%) y el camarón blanco (11%). Sin embargo, la proporción varió en 1996, 1997 y 1998, con un aumento en la captura de camarón azul, que representó 44%, 78% y 43%, respectivamente. Por otra parte, el camarón blanco observó sus menores niveles en los años 2000 y 2001, cuando representó el 1% y 5% de la captura total (tabla 1).

Una vez obtenidas las estimaciones de la CPUE por año, se utilizó la mediana como medida de tendencia central, con el mayor valor global de 5.1 kg h^{-1} para el camarón café, usando la técnica de IDW. Para esta especie la CPUE mínima presentó un valor de 2.1 kg h^{-1} en 1997, mientras que el máximo alcanzó los 16 kg h^{-1} en 2006 (fig. 3a). Con el algoritmo de Kriging, las estimaciones fueron siempre menores, con una mediana general de 1.4 kg h^{-1} y los valores mínimo y máximo de 0.8 kg h^{-1} en 1996 y 2.2 kg h^{-1} en 2006, respectivamente (fig. 3b).

Al utilizar el método IDW, para el camarón azul la mediana fue de 0.9 kg h^{-1} , con un valor mínimo de 0.1 kg h^{-1}

From the survey, an average of 76 samples was obtained per fishing season, producing a mean total yield of 1 t yr^{-1} during the 12 years surveyed and including the three shrimp species. The brown shrimp was the most abundant species, averaging 61% of the total catch for the 12 years, with a maximum of about 88% of the total in 2001. The blue shrimp accounted for 27% of the total catch and the white shrimp 11%. However, the proportion per species varied: in 1996, 1997, and 1998 the blue shrimp accounted for 44%, 78%, and 43% of the catch, respectively, while in 2000 and 2001 the white shrimp had its lowest abundance, representing only 1% and 5%, respectively, of the total catch (table 1).

Once the CPUE estimates per year had been obtained, the median was used as a measure of the central tendency,

en 2005, y el valor máximo de 2.0 kg h^{-1} en 2006 (fig. 3c). Al aplicar el algoritmo Kriging, la mediana estimada fue de 0.4 kg h^{-1} para el camarón azul, con un valor mínimo de CPUE de 0.3 kg h^{-1} en 2001 y un valor máximo de 0.9 kg h^{-1} en 1997 (fig. 3d).

La mediana de los valores de CPUE obtenidos con el método IDW para el camarón blanco *L. vannamei* fue de 0.5 kg h^{-1} , dentro de un intervalo que varió de 0.1 kg h^{-1} en 2000 a 2.7 y 2.8 kg h^{-1} en los años 1999 y 2006 (fig. 3e). Con el método de Kriging la mediana fue de 0.4 kg h^{-1} , con un valor mínimo de 0.1 kg h^{-1} en 1996 y un máximo de 0.9 kg h^{-1} en 2006 (fig. 3f). Cabe señalar que de manera consistente, para el año 2006 se presentaron los valores máximos de CPUE para todas las especies.

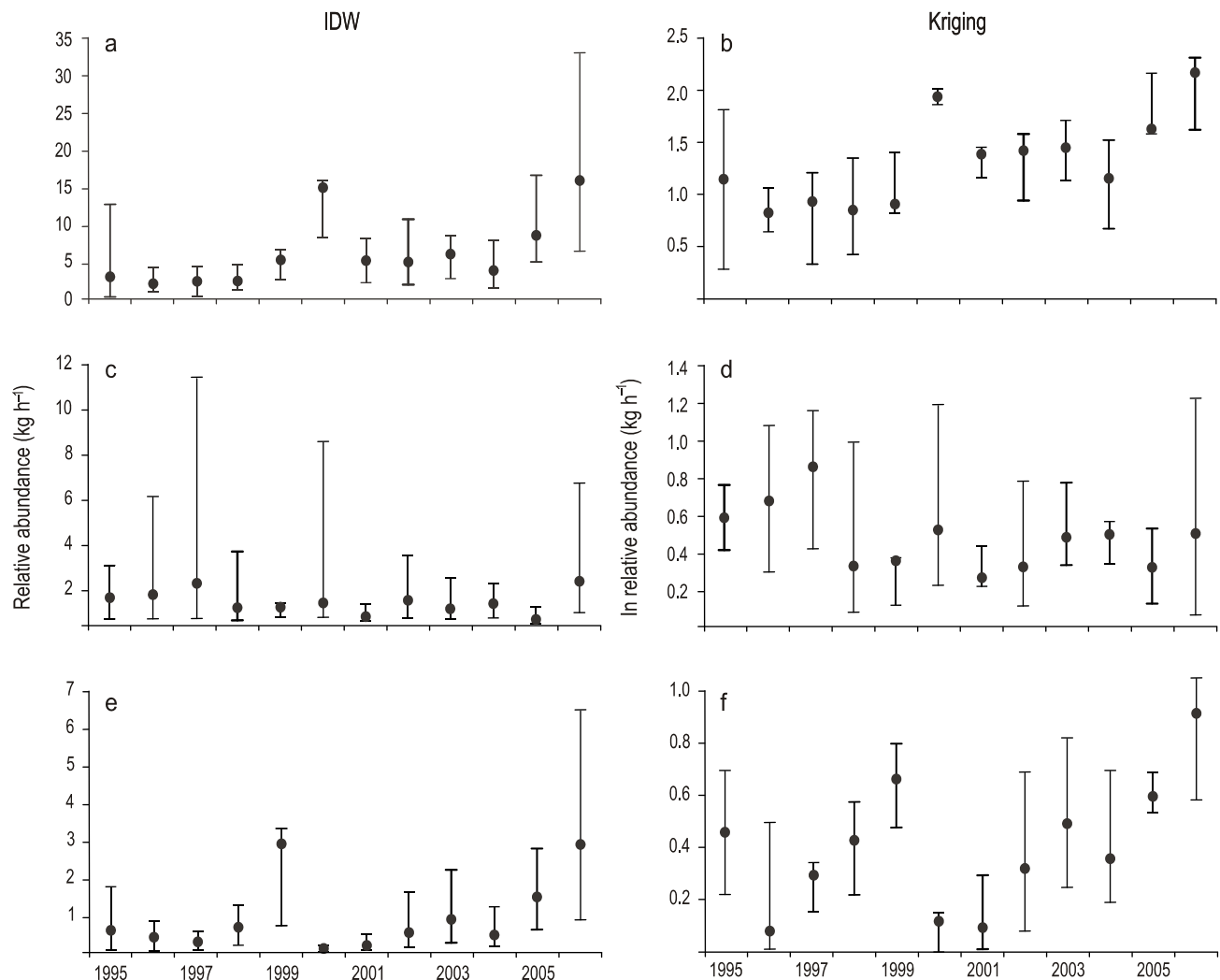


Figure 3. Time-series of measures of central tendency (median and quartiles 1 and 3) of the relative abundance (CPUE) estimates for three commercial shrimp species off northwestern Mexico using inverse distance weighted (IDW) and Kriging interpolation techniques: (a, b) brown shrimp *Farfantepenaeus californiensis*, (c, d) blue shrimp *Litopenaeus stylirostris*, and (e, f) white shrimp *L. vannamei*.

Figura 3. Series temporales de las medidas de tendencia central (mediana y cuartiles 1 y 3) de la abundancia relativa (CPUE) estimada para tres especies de camarón comercial del noroeste de México, usando las técnicas de interpolación IDW y Kriging: (a, b) camarón café *Farfantepenaeus californiensis*, (c, d) camarón azul *Litopenaeus stylirostris* y (e, f) camarón blanco *L. vannamei*.

Table 1. Total number of shrimp trawls (STn) and proportion per species of the total annual catch (kg) obtained by the CRIP-INAPESCA sampling program during closed fishing seasons (1995–2006).**Tabla 1.** Número total de arrastres de camarón (STn) y proporción por especie de la captura total anual obtenidos por el programa de muestreo del CRIP-INAPESCA durante la temporada de veda (1995–2006).

Year	STn	Proportion (%)			Total catch (kg)
		Brown shrimp	Blue shrimp	White shrimp	
1995	79	75	17	8	1184
1996	108	48	44	8	715
1997	81	18	78	4	887
1998	78	43	43	14	566
1999	43	67	14	19	518
2000	41	59	40	1	1093
2001	83	88	7	5	684
2002	82	63	27	9	904
2003	75	58	18	25	752
2004	81	61	21	18	652
2005	81	76	9	15	1352
2006	79	64	23	13	2655
Total	911	61	27	11	11962

with the highest overall value of 5.1 kg h⁻¹ for the brown shrimp obtained with the IDW technique. This species had a minimum CPUE value of 2.1 kg h⁻¹ in 1997 and a maximum value of 16 kg h⁻¹ in 2006 (fig. 3a). With the Kriging method, the values were consistently smaller, with a general median of 1.4 kg h⁻¹, and minimum and maximum values of 0.8 kg h⁻¹ in 1996 and 2.2 kg h⁻¹ in 2006, respectively (fig. 3b).

For the blue shrimp, with IDW the median was 0.9 kg h⁻¹, with a minimum value of 0.1 kg h⁻¹ in 2005 and a maximum value of 2.0 kg h⁻¹ in 2006 (fig. 3c). With Kriging, the general median was 0.4 kg h⁻¹, with a minimum CPUE value of 0.3 kg h⁻¹ in 2001 and a maximum value of 0.9 kg h⁻¹ in 1997 (fig. 3d).

For the white shrimp *L. vannamei*, the general median value obtained with the IDW method was 0.5 kg h⁻¹, with a minimum value of 0.1 kg h⁻¹ in 2000 and maximum CPUE values of 2.7 and 2.8 kg h⁻¹ in two years (1999 and 2006) (fig. 3e). With the Kriging method, the general median was 0.4 kg h⁻¹, with a minimum value of 0.1 kg h⁻¹ in 1996 and a maximum value of 0.9 kg h⁻¹ in 2006 (fig. 3f). The year 2006 consistently had the maximum CPUE values for all the species in the whole time series.

Regarding the spatial distribution of the relative abundance of the shrimp species, summarized in categorical maps as low, medium, and high abundance, it is evident that the largest area had medium abundance levels of the three species. For the brown shrimp, the maximum relative abundance estimates obtained by the two interpolation methods were recorded in two main areas, associated with the Santa María-La Reforma and Ceuta lagoon systems, in the north

Con respecto a la distribución espacial de la abundancia relativa de las especies de camarón, resumidas como baja, media y alta abundancia en los mapas categóricos, se evidenció que la mayor superficie se asocia con niveles de abundancia media de las tres especies. Para el camarón café, la mayor abundancia relativa, estimada con ambos métodos de interpolación, se registró en dos áreas principalmente, asociadas con los sistemas lagunares de Bahía Santa María-La Reforma y Ceuta, en el norte y centro de la zona de estudio (fig. 4a). Para el extremo sur de la zona de estudio, el registro de esta especie es reducido, con valores de abundancia cercanos a cero en la proximidad de los sistemas lagunares Huizache-Caimanero en Sinaloa y Teacapan-Agua Grande en Nayarit. Para los extremos de abundancia, la plataforma continental presentó condiciones similares, caracterizada por una pendiente suave y profundidades someras en promedio, aunque esta característica es más evidente para el norte de Sinaloa, próximo al sistema lagunar de Santa María-La Reforma.

Para el camarón azul se observó la mayor coincidencia en los patrones de distribución espacial generados con ambas técnicas, mientras que para el camarón café, la mayor abundancia relativa se registró en la zona norte, si bien en este caso sigue un patrón continuo desde Navachiste hasta la bahía de Ceuta (fig. 4). Los resultados obtenidos con la técnica de Kriging indican que las mayores densidades de camarón azul se localizan en zonas más someras que las registradas para camarón café, información congruente con los patrones de distribución batimétrica propuestos por el INAPESCA (2001). Esta especie también tiene una baja

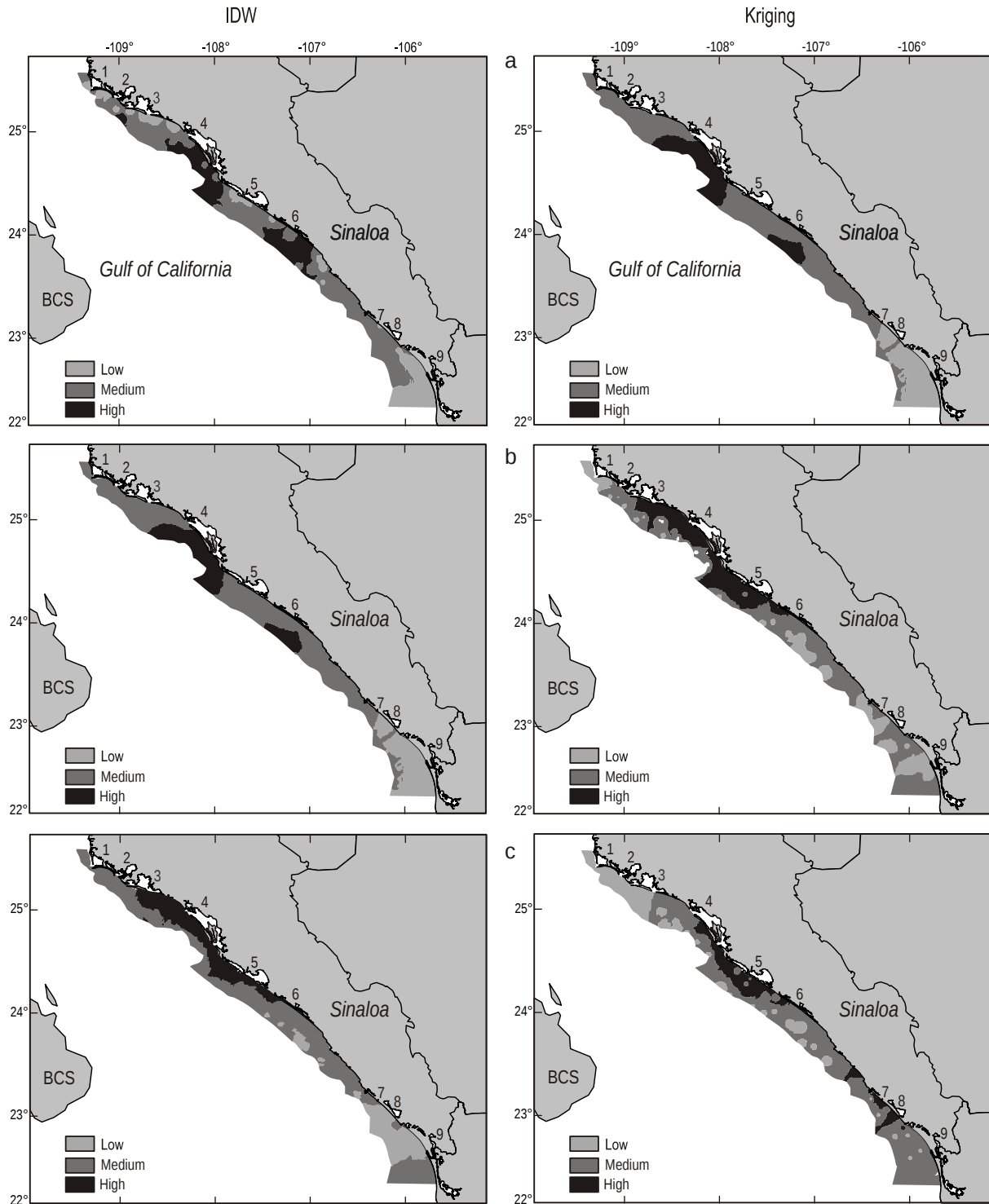


Figure 4. General distribution pattern of relative abundance of three commercial shrimp species off northwestern Mexico obtained using inverse distance weighted (IDW) and Kriging interpolation methods after a 12-year survey: (a) brown shrimp *Farfantepenaeus californiensis*, (b) blue shrimp *Litopenaeus stylirostris*, and (c) white shrimp *L. vannamei*.

Figura 4. Patrones generales de distribución de la abundancia relativa de tres especies de camarón comercial del noroeste de México, obtenidas con los métodos de interpolación inverso de la distancia ponderada (IDW) y Kriging, a partir de una serie temporal de muestreos durante 12 años: (a), camarón café *Farfantepenaeus californiensis*, (b) camarón azul *Litopenaeus stylirostris* y (c) camarón blanco *L. vannamei*.

(1) Lechuguilla, (2) Ohuira, (3) Navachiste, (4) Santa María-La Reforma, (5) Altata-Pabellones, (6) Ceuta, (7) Uriás, (8) Huizache-Caimanero, (9) Teacapan-Agua Grande.

and middle of the study area (fig. 4a). The southern end of the study area had fewer brown shrimp, with almost zero abundance in the lagoon systems of Huizache-Caimanero in Sinaloa and Teacapan-Agua Grande in Nayarit. For both maximum and minimum abundances, the continental shelf of the associated areas is characterized by a smooth slope and shallow depths, although this feature is more obvious for northern Sinaloa near the Santa María-La Reforma lagoon system.

The blue shrimp had the highest spatial agreement among the distribution patterns, regardless of the interpolation technique used. As for the brown shrimp, the northern area had the highest relative abundance values, but this distribution pattern follows a continuum between the Navachiste and Ceuta lagoon systems (fig 4). With the Kriging technique, higher densities of blue shrimp relative to brown shrimp occurred in shallower areas, which agrees with the bathymetric distribution patterns proposed by INAPESCA (2001). This species also had low abundances to the south of the study area, though here the minimum values corresponded to deeper areas.

For the white shrimp, the high abundance areas were off mid-Sinaloa, facing the Santa María-La Reforma, Altata, and Ceuta lagoon systems, and in the south near the Uriás, Huizache-Caimanero, and Teacapan-Agua Grande systems, but at shallower depths than those of the other two species (fig. 4c). The areas of lower abundances were in the northern part. This differed from the spatial distribution patterns of brown shrimp, which showed high and medium abundances all along the coast, and from the blue shrimp, whose abundance was higher to the north and lower to the south.

Even though the three species are found throughout the study area, there is an evident latitudinal stratification: blue and white shrimp occur in the upper and lower latitudinal extremes, whereas the brown shrimp has a wide latitudinal distribution. The abundance estimated for the brown shrimp is almost ten times greater than the abundance of the other two species.

Regarding the differences in the abundance distribution patterns determined from the paired maps, the overall agreement for the three species was >70% (table 2), but similarity varied among abundance levels between 43% and 90%. In most cases, the equivalence between both estimates was higher for the high density areas, reaching 90% for the blue shrimp and about 80% for the brown shrimp. In contrast, the lowest agreement for the white shrimp was in the high abundance category and the best agreement was for the medium density category.

The above results were further confirmed by those derived from the pixel by pixel spatial analysis, which gave KIA values as indicators of spatial agreement. This analysis revealed that even though there is some level of agreement between relative abundance maps for each species, in most cases it is moderate when using the classification proposed

abundancia en el sur de la zona, aunque aquí los valores mínimos se encuentran en zonas más profundas.

Para el camarón blanco, las zonas con mayor abundancia se determinaron hacia el centro de Sinaloa, frente a los sistemas lagunares de Bahía Santa María-La Reforma, Altata y Ceuta, así como en relación con los sistemas de Uriás, Huizache-Caimanero y Teacapan-Agua Grande al sur, si bien a menores profundidades que las observadas para las otras dos especies, encontrándose los valores de menor abundancia en el norte de la zona de estudio (fig. 4c). Este patrón de distribución espacial difiere del observado para el camarón café, que presenta valores de abundancia alta y media prácticamente a lo largo de la zona de estudio, mientras que para el camarón azul la mayor abundancia se observa en el norte, con disminución hacia el sur.

Aunque las tres especies se distribuyen en toda la zona de estudio, existe una evidente estratificación latitudinal, con mayor presencia del camarón azul y el blanco en los extremos latitudinales norte y sur, respectivamente, mientras que el camarón café tiene un amplio patrón de distribución latitudinal. Por otra parte, aunque la abundancia de las tres especies se distribuye en toda la zona de estudio, la abundancia estimada de camarón café es casi diez veces superior a la abundancia de las otras dos especies.

Con respecto a las diferencias en los patrones de distribución de abundancia determinadas a partir de pares de mapas, se encontró que el nivel de concordancia general fue >70% en todos los casos (tabla 2); sin embargo, sí hubo diferencias de similitud entre los niveles de abundancia, variando de 43% a 90% de concordancia. En la mayoría de los casos, se obtuvieron los mayores valores para las zonas definidas como de alta densidad, llegando a 90% de afinidad para el camarón azul y alrededor de 80% para el camarón café. En contraste, el nivel de concordancia más bajo para el camarón blanco se presentó en la categoría de alta abundancia, mientras que para la abundancia media se presentó el mayor nivel de concordancia.

Los resultados anteriores fueron confirmados con los obtenidos mediante el análisis espacial realizado píxel por píxel, que dio valores del KIA como indicadores de la afinidad espacial. Este análisis reveló que aunque hay un cierto nivel de coincidencia entre los mapas de abundancia relativa para cada especie, éste es moderado en la mayoría de los casos, siguiendo los criterios de clasificación desarrollados por Landis y Koch (1977) para determinar la concordancia de datos categóricos y que en función de los valores de Kappa, se clasifican desde pobre ($KIA < 0.00$), hasta concordancia casi perfecta ($KIA = 0.81 - 1.00$)

En general, el valor más bajo de concordancia ($KIA = 0.48$) se obtuvo para el camarón blanco, siendo ligeramente mayor para los camarones café y azul, con valores de KIA de 0.52 y 0.53, respectivamente. A pesar de ello, la tendencia advertida en el análisis anterior se mantuvo, con la mayor coincidencia entre píxeles clasificados como de abundancia relativa alta, en comparación con las abundancias media y

by Landis and Koch (1977), which provides criteria to classify categorical data into six levels of agreement, from poor agreement ($KIA < 0.00$) to almost perfect ($KIA = 0.81$ to 1.00).

The lowest overall KIA value (0.48) was obtained for the white shrimp, while the brown and blue shrimp had slightly higher KIA values of 0.52 and 0.53, respectively. Despite this, the tendency shown by the previous analysis abided, with higher agreement among pixels categorized as high relative abundance compared with medium and low relative abundance (table 3). This was especially apparent in the case of brown and blue shrimp, the latter species reaching KIA values of 0.88. The white shrimp had the lowest agreement between areas of high density values.

DISCUSSION

The use of geostatistical techniques allowed us to achieve two goals that contribute to the Mexican Pacific shrimp fishery management programs. First, a base map (bathymetry) for the coasts of Sinaloa and northern Nayarit was developed, based on a dataset provided by research and fishing vessels, to establish the operation area ($>14,000 \text{ km}^2$) for the industrial shrimp-fishing fleet. This result improved previous attempts developed for this region, which had used smaller databases and provided less precise and less reliable models (Pérez 2003, Montana 2005). There are some clear discrepancies with those models and official data, but they can be explained mostly by differences in the definition of the maximum depth limit and by our use of data from areas from which trawl fishing is naturally excluded (rocky bottoms). Certainly the model needs to be improved, particularly regarding the continental shelf configuration, useful for fleet operations and the assignment of management areas. However, it is evident from our results that the slope and the proximity to coastal aquatic systems play an important role in the distribution of the resource abundance, partially agreeing with the latitudinal and bathymetric distribution of the shrimp species reported by Madrid-Vera *et al.* (2001a, 2001b, 2003).

Second, the previous results were used to complete models of the relative abundance distribution of three commercial shrimp species in the Mexican Pacific. In agreement with these models, the brown shrimp was generally the most abundant of the three shrimp species with CPUE values regularly greater than those of the other two species, even when annual brown shrimp catches varied from 18% to 88% of the total. This is not evident in the output maps, but the method used integrates the temporal variation in the 12-year data series, including the effects of extreme oceanographic events such as the 1997/98 El Niño, when brown shrimp CPUE values were the lowest, and at least two La Niña events (www.esrl.noaa.gov/psd/people/klaus.wolter/MEI). Our results contribute to a better understanding of the general distribution patterns of the three shrimp species during the study period.

baja (tabla 3). Esto fue más evidente con las especies de camarón café y azul, que llegaron a alcanzar valores de $KIA = 0.88$ para la última especie. El camarón blanco resultó con el nivel más bajo de concordancia entre las zonas con valores correspondientes a alta abundancia relativa.

DISCUSIÓN

Con la aplicación de técnicas geoestadísticas fue posible alcanzar dos objetivos que contribuyen con los programas de gestión pesquera del recurso camarón en el Pacífico mexicano. En primer término, se produjo un modelo batimétrico para la costa de Sinaloa y norte de Nayarit basado en datos de cruceros científicos y generados por la flota pesquera, con los

Table 2. Confusion matrices to evaluate overall and by-class agreement among 14,477 pixels of 1 km^2 , representing the area of relative abundance (high, medium, and low) of three commercial shrimp species off northwestern Mexico. Comparisons are among estimates from two interpolation methods, using Kriging as reference.

Tabla 2. Matrices de confusión para evaluar la concordancia general y por clase de 14,477 píxeles de 1 km^2 , representantes de abundancia relativa (alta, media y baja) para tres especies de camarón comercial del noroeste de México. Se comparan las estimaciones obtenidas con dos métodos de interpolación, con Kriging como referencia.

<i>Farfantepenaeus californiensis</i>		Kriging		
	Abundance	High	Medium	Low
IDW	High	2285	976	0
	Medium	616	6293	1073
	Low	0	1371	1863
	Class agreement	79%	73%	63%
		Overall agreement 72%		
<i>Litopenaeus stylirostris</i>		Kriging		
	Abundance	High	Medium	Low
IDW	High	2849	861	0
	Medium	282	6162	1123
	Low	6	1704	1490
	Class agreement	91%	71%	57%
		Overall agreement 73%		
<i>Litopenaeus vannamei</i>		Kriging		
	Abundance	High	Medium	Low
IDW	High	1148	1128	0
	Medium	1482	7136	659
	Low	12	730	2182
	Class agreement	43%	79%	77%
		Overall agreement 72%		

Table 3. Values of the Kappa index of agreement as indicators of similarity among IDW- and Kriging-derived spatial patterns of relative abundance for three species of commercial shrimp off northwestern Mexico. Values close to one represent maximum agreement and values close to zero indicate a random arrangement.

Tabla 3. Valores del índice Kappa de concordancia como indicadores de similitud entre patrones espaciales de abundancia relativa derivados con IDW y Kriging, para tres especies de camarón comercial del noroeste de México. Valores cercanos a uno indican máxima concordancia y valores cercanos a cero indican un arreglo generado al azar.

Abundance	Blue shrimp	Brown shrimp	White shrimp
Low	0.45	0.53	0.71
Medium	0.38	0.39	0.42
High	0.88	0.73	0.33
Overall	0.53	0.52	0.48

Our results also reveal the importance of the northern part of the study area, between the Ohuira and Ceuta lagoon systems, where the highest relative abundance levels of the three species are mainly concentrated. The southern part is also an area of resource concentration and the white shrimp is the predominant species. The relative abundance information, using the three proposed categories, can be used to define areas for conservation of biomass and to reduce the fishing effort in low density areas, reducing environmental impact and fishing mortality rate.

Our results agree with other reports on the distribution and abundance of shrimp species in the Mexican Pacific, produced using different technical approaches than the one used here (Rodríguez de la Cruz 1981, Sierra *et al.* 2000, Chávez-Herrera 2001, Madrid-Vera *et al.* 2001a); however, our results seem to satisfactorily predict the spatial distribution trends for the three shrimp species, with a spatial resolution higher than that offered by the above authors. In addition to the general description offered by the above-cited reports, our study gives a detailed graphic output useful for management purposes. The spatial models offer a dynamic graphic output, not included with the other approaches, allowing further analysis for management purposes, at higher scales.

Although different estimates of relative abundance were obtained by the two interpolation methods, the similarity was relatively high for all the species to confidently identify areas of high shrimp production and other areas for conservation and management purposes. The agreement was better for areas of high relative abundance of the resource, and although coincidence exists in the results from both methods, the Kriging method gives a better option. Fitting results to different distribution models produces a variogram, a mathematical function that characterizes the spatial continuity or roughness of a dataset, for which this method is recommended. Furthermore, our study found that comparison among categorical data with spatial attributes increased the

que se establecieron los límites de operación de la flota industrial pesquera de camarón, cuya superficie se estimó en >14,000 km². Este primer resultado ofrece un modelo más preciso que otros productos batimétricos generados con fines similares pero cuyas bases de datos han sido más limitadas (Pérez 2003, Montana 2005). Algunas de las discrepancias observadas con dichos modelos, así como con los datos oficiales, están claramente detectadas y la diferencia se explica principalmente con base en diferencias del límite máximo de profundidad y por la adición de datos procedentes de zonas donde la pesca de arrastre queda excluida naturalmente (fondos rocosos).

El modelo se ve limitado por la insuficiencia de información para mejorar el conocimiento sobre la configuración del piso batimétrico, de utilidad para efectos de operación de la flota y asignación de áreas para el manejo de la pesquería. Pese a ello, los resultados obtenidos permiten evidenciar que tanto la pendiente como la cercanía a sistemas acuáticos costeros desempeñan una función importante en la distribución del recurso, coincidiendo parcialmente con las propuestas de Madrid-Vera *et al.* (2001a, 2001b, 2003) sobre la distribución latitudinal y batimétrica de las especies de camarón consideradas.

Partiendo del resultado previo, se derivó el principal producto de este estudio, consistente en una serie de modelos de distribución de abundancia de tres especies comerciales de camarón en el Pacífico mexicano. Se estableció que el camarón café fue normalmente la más abundante de las tres especies incluidas en el presente estudio, con estimaciones de CPUE consistentemente superiores a las de las otras dos especies, aun cuando su aportación a las capturas varió de 18% a 88% del total, dependiendo de la temporada. Esta variación no se refleja directamente en los resultados, pero considerando el método empleado, está implícita en los mapas finales que incorporan la variación a lo largo de 12 años, incluyendo los posibles efectos de eventos extremos como El Niño de 1997/1998, cuando la CPUE de camarón café obtuvo el menor registro, y al menos dos eventos más correspondientes al fenómeno de la Niña (www.esrl.noaa.gov/psd/people/klaus.wolter/MEI/). Los resultados contribuyen a entender los patrones generales de abundancia de las tres especies durante el periodo analizado.

De igual manera es posible destacar la importancia de la zona norte de la región, entre los sistemas lagunares de Ohuira y Ceuta, donde se concentran altos niveles de abundancia relativa para las tres especies. La región meridional es también una zona de concentración de recursos, donde el camarón blanco es la especie predominante. Aunado a lo anterior, la información sobre la abundancia relativa, con el uso de las tres categorías propuestas, puede utilizarse para definir las áreas destinadas a la conservación de la biomasa y reducción del esfuerzo pesquero en zonas con baja densidad, reduciendo el impacto ambiental y la tasa de mortalidad por pesca.

reliability of the results, making it possible to detect error margins and to facilitate the identification of areas with differing results.

The results obtained from the KIA analyses produce enough elements of certainty to reject the hypothesis that agreement between pairs of maps is caused by chance. For the three species, the KIA results for the overall map-to-map comparison are in moderate agreement (0.41–0.60), reaching in some cases the almost perfect agreement category (0.81–1.00) when using the Landis and Koch (1977) proposal to evaluate affinity among categorical data. The highest Kappa values were obtained for high relative abundance pixels for the blue and the brown shrimp, and could initially be considered for further validation with the support of the fishing fleet.

In conclusion, the analysis of the time-spatial trends in this study has shown high consistency in the forecasts of abundance distribution patterns of commercial shrimp off northwestern Mexico, allowing the identification of areas that can be used to regulate fishing effort, to reduce fishing mortality, and to create new references for the spatial component of fishing activity (Babcock *et al.* 2005), helping to maintain the biomass and its recruitment, and stabilize the yields at current levels.

The results are not definitive, but considering the intrinsic abilities of GIS, the addition of new information layers, such as quality of the oceanic floor, temperature, species proportion in the catch, and other variables with geographic attributes, as proposed by Pérez-Catañeda and Defeo (2004) for Gulf of Mexico shrimp, should allow us in the medium term to have cartographic products with more accurate distribution models of the resources. These tools and products will surely contribute to the resource management, allowing managers to organize better exploratory surveys that should regularly provide information to understand mechanisms about the resource distribution patterns and the environment they inhabit, which is important for comprehending the ecological processes in the region and managing sustainable fishing activities.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank CRIP-Mazatlán and CONAPESCA for the permission granted to access their databases. Financial assistance provided by CONACYT to R Meraz (postgraduate scholarship) and A Ruiz (sabbatical funding) is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- Babcock EA, Pikitch EK, McAllister MK, Apostolaki P, Santora C. 2005. A perspective on the use of spatialized indicators for ecosystem-based fishery management through spatial zoning. *ICES J. Mar. Sci.* 62: 469–476.

Nuestros resultados coinciden con informes sobre la distribución y abundancia de las especies de camarón en el Pacífico mexicano, producidos mediante técnicas distintas a la que aquí se presenta (Rodríguez de la Cruz 1981, Sierra *et al.* 2000, Chávez-Herrera 2001, Madrid-Vera *et al.* 2001a), aunque a diferencia de éstos, los modelos espaciales generados en este estudio predicen satisfactoriamente las tendencias de la distribución de las tres especies de camarón, con una resolución espacial mayor que la que se deriva de los estudios anteriores. Aunado a la descripción general que ofrecen las obras antes citadas, nuestro estudio proporciona una salida gráfica dinámica, que permite generar información más detallada, útil para fines de la gestión.

Pese a las diferentes estimaciones de abundancia relativa obtenidas por los dos métodos geoestadísticos, la similitud de los resultados obtenidos con ambos métodos permite confiabilidad en la identificación de zonas que históricamente generan mayor producción y otras que pudieran destinarse para propósitos de manejo y conservación. La concordancia fue mejor para las zonas con una alta abundancia relativa del recurso. Si bien existe coincidencia en los resultados de ambos métodos, el método de Kriging da una mejor opción, al permitir el ajuste de los resultados a diferentes modelos de distribución, con la producción de un variograma, una función matemática que caracteriza la continuidad o desigualdad espacial de un conjunto de datos, por lo que se recomienda este método. Además, nuestro estudio encontró que la comparación entre datos categóricos con atributos espaciales aumentó la fiabilidad de los resultados, permitiendo detectar márgenes de error y facilitando la localización de zonas donde existe divergencia de resultados.

A partir de los resultados obtenidos para el análisis KIA, se generaron suficientes elementos de confianza que permitieron rechazar la hipótesis de que la similitud entre pares de mapas es producida al azar. Para las tres especies, los resultados del índice KIA para la comparación global mapa a mapa, fueron de moderados (0.41 a 0.60) hasta niveles considerados como de concordancia casi perfecta (0.81–1.00), asignándose esta clasificación de acuerdo con los criterios de Landis y Koch (1977) para evaluar la afinidad entre datos categóricos. Los valores más altos del índice de Kappa se obtuvieron para píxeles clasificados como abundancia relativa alta, para las especies de camarón azul y café, por lo que inicialmente pudieran ser considerados para su futura validación con el apoyo de la flota pesquera.

En conclusión, el actual análisis de las tendencias espaciotemporales de la distribución de abundancia de camarón comercial en el noroeste de México ha demostrado una alta consistencia en sus predicciones, lo que permite la identificación de áreas que pueden ser utilizadas para regular el esfuerzo pesquero, para reducir la mortalidad por pesca y para generar nuevos puntos de referencia para el componente espacial de la actividad pesquera (Babcock *et al.* 2005). Lo anterior apoya los esfuerzos orientados a mantener la

- Caddy JF, García S. 1985. Fisheries thematic mapping: A pre-requisite for intelligent management and development of fisheries. *Oceanogr. Trop.* 21: 31–52.
- Chávez-Herrera D. 2001. Aspectos sobre la abundancia y la distribución de los camarones peneidos de la costa de Sinaloa y el norte de Nayarit, México, de 1992 a 2000. M.Sc. thesis, Universidad Autónoma de Sinaloa, México, 79 pp.
- CNP, Carta Nacional Pesquera. 2006. Diario Oficial de la Federación (25/08/2006), primera sección, CONAPESCA, México. 35 pp.
- Hendrickx ME. 1996. Los camarones *Penaeoidea bentónicos* (Crustacea: Decapoda: Dendrobranchiata) del Pacífico Mexicano. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, 147 pp.
- INAPESCA. 2001. Plan de manejo para la pesquería de camarón en el litoral del Océano Pacífico mexicano. Instituto Nacional de la Pesca, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México, 76 pp.
- Isaaks EH, Srivastava RM. 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford Univ. Press, New York, 592 pp.
- Landis RJ, Koch GG. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33: 159–174.
- Lawson CL. 1977. Software for C1 surface interpolation. In: J. Rice (ed.), *Mathematical Software III*. Academic Press, New York, pp. 161–194.
- Madrid-Vera J, Chávez-Herrera D, Melchor-Aragón JM. 2001a. Situación actual de las poblaciones de camarón café (*Farfantepenaeus californiensis*), en las costas de Sinaloa y norte de Nayarit, México. Doc. Téc. INAPESCA-CRIP-Mazatlán, Sinaloa, México, 12 pp.
- Madrid-Vera J, Melchor AJM, Castro-Castro D, Chávez-Herrera D. 2001b. Áreas de pesca restringidas y protegidas al camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) en las costas del norte de Nayarit y Sinaloa. Doc. Téc. INAPESCA, México, 16 pp.
- Madrid-Vera J, Aguirre VH, González AE. 2003. Abundance and distribution patterns of commercial shrimp (*Penaeoidea*) during closed seasons in the Nayarit coast, Mexico. Doc. Téc. INAPESCA, México, 13 pp.
- Montana CJ. 2005. Diseño de sistemas de información geográfica para la pesca artesanal de Sinaloa. M.Sc. thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 116 pp.
- Morales-Bojórquez E, López-Martínez J, Hernández-Vázquez S. 2001. Dynamic match-effort model for brown shrimp *Farfantepenaeus californiensis* from the Gulf of California, Mexico. *Cienc. Mar* 27: 105–124.
- Paredes MR. 2007. Estimación de la abundancia de las poblaciones de camarón café *Farfantepenaeus californiensis* (Holmes, 1900) en el sureste del Golfo de California aplicando el teorema de Bayes. M.Sc. thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 54 pp.
- Pérez-Vivar TL. 2003. Dinámica poblacional del camarón blanco *Litopenaeus vannamei* (Boone 1931) en la plataforma

biomasa y su reclutamiento, estabilizando los rendimientos en los niveles actuales.

Los resultados no son definitivos, pero considerando la capacidad intrínseca de los SIG, se espera que la adición de nuevas capas de información, tales como la calidad del fondo oceánico, temperatura, proporción de especies en la captura y otras variables con atributos geográficos, como lo proponen Pérez-Castañeda y Defeo (2004) para camarones del Golfo de México, permitirá en el mediano plazo disponer de productos cartográficos, con modelos más precisos de distribución de los recursos. Con certeza, estas herramientas y productos contribuirán a la gestión de los recursos, ya que permitirá a los interesados una mejor organización de campañas exploratorias que de manera regular proporcionen información útil para comprender los mecanismos que regulan los patrones de distribución de los recursos y procesos que ocurren en el ambiente en que viven, importantes para el entendimiento de los procesos ecológicos en la región y en la gestión de una actividad pesquera sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CRIP-Mazatlán y CONAPESCA el permiso otorgado para acceder a sus bases de datos. De igual manera, R Meraz (estudiante de postgrado del CIAD) y A Ruiz (año sabático) agradecen el apoyo económico otorgado por el CONACYT.

-
- continental de Sinaloa y Nayarit. M.Sc. thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 86 pp.
- Pérez-Castañeda R, Defeo O. 2004. Spatial distribution and structure along ecological gradients: Penaeid shrimps in a tropical estuarine habitat of Mexico. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 273: 173–185.
- Rodríguez de la Cruz MC. 1981. Aspectos pesqueros del camarón de alta mar en el Pacífico mexicano. *Cienc. Pesq. (INAPESCA)* 1: 1–19.
- Rosenfield GH, Fitzpatrick-Lins K. 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogr. Eng. Rem. Sens.* 52: 223–227.
- Sierra RP, Acosta CC, García BJA, García JAR, Liedo GA, Melchor AJM, Ramos CS, Rosas CA, Toledo DMP, Zarate BE. 2000. Camarón. Pesquerías del Océano Pacífico. In: Cisneros-Mata MA, Beléndez-Moreno LF, Zárate-Becerra E. (eds.), *Sustentabilidad y Pesca Responsable en México: Evaluación y Manejo 1999–2000*. INAPESCA, SEMARNAT, México, pp. 1–50.

Received June, 2009;
accepted February, 2010.