

## Dispersión de larvas de langosta en el Caribe basada en simulaciones numéricas

### Dispersion of lobster larvae in the Caribbean based on numerical simulations

Alina Rita Gutiérrez Delgado,<sup>1</sup> Julio Baisre Alvarez<sup>2</sup> y Amaury Alvarez Cruz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Oceanología. Calle 184 entre 1ra. y 3ra., Rpto. Flores, Playa, La Habana, Cuba, teléfono: 271-6008,

E-mail: alinarita@gmail.com, alina@oceano.inf.cu, amaury@ama.cu

<sup>2</sup> Acuario Nacional de Cuba. Ave. 1ra. y 60, Playa, La Habana, Cuba

#### RESUMEN

En Cuba, la langosta espinosa *Panurilus argus* es el recurso marino de mayor importancia comercial. La mayor abundancia de larvas de la especie se colecta en las aguas oceánicas próximas a la región suroccidental. En esta región también se producen las mayores pesquerías de todo el archipiélago cubano. Este trabajo tiene el objetivo de esclarecer cuáles son los mecanismos físicos que propician este hecho, cuantificar los porcentajes potenciales de larvas que se retienen en la plataforma cubana y los aportes de las poblaciones vecinas de Campeche e Isla Caimán Grande. Se utiliza un modelo estocástico lagrangiano para estimar la dispersión de las larvas y se acoplan características del comportamiento de la especie como tiempo de duración larval, sitios históricos de desove, mortalidad y pico de desove. Las simulaciones evidencian que el desove producido en la región suroccidental de Cuba se retiene en gran cuantía en la plataforma cubana. Regiones como la costa NE de la Florida y Jamaica se benefician con estos desoves. Las larvas producidas al suroeste de Cuba llegan hasta regiones lejanas de América Central y la costa norte de América del sur. Los desoves de Campeche y de la Isla Caimán Grande no deben sustentar la población de langosta en Cuba, pero contribuyen significativamente al mantenimiento genético de la especie. Se concluye que en el Caribe la población de langosta está conectada. Principalmente, Cuba se conecta con el Caribe occidental. Las características del sistema de corrientes y del largo período de duración larval de la especie contribuyen a lograr conexiones entre regiones lejanas.

*Palabras clave:* conexión, langosta, modelo, lagrangiano.

#### ABSTRACT

In Cuba, the spiny lobster *Panurilus argus* is the marine resource of greater commercial importance. The highest abundance of larvae of the species is collected in ocean waters near the southwestern region. The region also produced the largest fisheries of the Cuban archipelago. This paper aims to clarify the physical mechanisms to promote this fact, also to quantify the potential percentages of larvae that are retained in the Cuban platform and the contribution of Campeche and Grand Cayman Island populations. We used a Lagrangian stochastic model of larval dispersal, coupling behavior of the species as larvae duration, historical spawning sites, mortality and peak of the spawning season. The simulations showed that spawning occurred in the SW region of Cuba is retained in large amounts in the Cuban platform. Regions such as the NE coast of Florida and Jamaica benefit with these spawns. However larvae produced southwest of Cuba reach remote regions of Central America and the northern coast of South America. The spawning from Campeche and Grand Cayman Island should not sustain the lobster population in Cuba, but contribute significantly to the genetic maintenance of the species. We conclude that the lobster population is connected in the Caribbean. Cuba is connected with the western Caribbean, mainly. The characteristics of the current system and the long period of larval duration of the species contribute to achieving connections between distant regions.

*Keywords:* connection, lobster, model, lagrangian.

## INTRODUCCIÓN

En Cuba, la langosta espinosa *Panurilus argus* es el recurso marino de mayor importancia comercial. Por este motivo numerosas investigaciones científicas tienen como objetivo conocer las características de la especie y la relación con su hábitat. Estudios precursores indican que las larvas permanecen en el océano aproximadamente de seis a ocho meses, durante ese período están expuestas a la temperatura, presencia o no de alimento, profundidad de la termoclina, luminosidad y a la depredación (Alfonso *et al.*, 2000).

Los trabajos de Cruz *et al.* (1991), reportan que el desove principal de esta especie se realiza entre febrero y mayo, el pico importante de entrada de puerulus a la plataforma es entre septiembre y noviembre, mientras que el pico de reclutamiento al área de pesca es entre marzo y mayo. En Cuba, el mayor reclutamiento de puerulus se localiza al SW de Cuba (Cruz *et al.*, 1991a). En concordancia con esta característica, la mayor abundancia de larvas de langosta se colecta en las aguas oceánicas próximas a la plataforma de esta región (Alfonso, *et al.*, 1991).

Este trabajo persigue esclarecer los mecanismos físicos que propician este hecho, así como cuantificar el porcentaje potencial de larvas que se autorecluta en la plataforma cubana y los aportes que pudieran realizar las poblaciones vecinas de langostas de Campeche e Isla Caimán Grande. Además de conocer las trayectorias más probables de los desoves de langosta que se producen al SW de Cuba.

Los estudios de conectividad oceánica entre las regiones del Caribe han estado en el centro de los debates durante las últimas décadas (Paris *et al.*, 2005; Cowen, 2009). En el proceso de conexión y transporte tienen relevante importancia los remolinos oceánicos como mecanismos físicos que intervienen en la retención (Guerrero, 2005; Jouanno *et al.*, 2008). Los sistemas de circulación cerrada pueden organizarse en vórtices de larga vida que dominan la dinámica del flujo. Se conoce que estos sistemas pueden actuar como trampas de comunidades planctónicas y nutrientes (Group, 1981; Yeung & Lee, 2002), por lo que constituyen escenarios favorables para la retención de larvas a lo largo de las plataformas (Lee & Williams, 2000).

El sistema de corrientes oceánicas al suroeste de Cuba se caracteriza por mecanismos que actúan como trampas de partículas. Se han identificado contracorrientes, transporte de Ekman efectivo (Hernández *et al.*, 1995) y remolinos oceánicos cercanos a la plataforma (Siam, 1988). Según, Baisre *et al.* (1978) y García *et al.* (1991) estas condiciones pudieran retener larvas originadas en Cuba, así como atrapar larvas provenientes de otras localidades

del Caribe. En esta región el enlace de los remolinos oceánicos permite la conexión e intercambio entre aguas localizadas a grandes distancias. La relación de los remolinos oceánicos con la mayor abundancia de larvas de langosta, nutrientes, clorofila *a*, fitoplancton y bacterias en la región suroccidental de Cuba muestra que estos mecanismos deben ser el factor principal que propicia la retención al SW de Cuba, por sus características de estabilidad en la región de interacción océano-plataforma (Gutiérrez, *et al.*, 2009).

En esta investigación se simulan las trayectorias de larvas virtuales de langosta liberadas en localidades del suroeste de Cuba, Yucatán e Isla Caimán Grande. La simulación numérica de las trayectorias de larvas virtuales se logra con un modelo biofísico que incorpora el campo de corrientes entre los años 1995 y 2000, proveniente de una serie de datos de altimetría, un esquema estocástico lagrangiano y comportamiento de las fases larva-adulto de la langosta que incluye mortalidad de las larvas, período de duración larval (PDL), sitios y principales períodos de desove. En una primera aproximación la simulación de las trayectorias no incluye la difusión vertical.

Las simulaciones realizadas demuestran que las larvas de langosta liberadas al SW de Cuba tienen el mayor reclutamiento en Cuba, local o regional. La mayor retención observada en la región suroccidental de Cuba es consistente con los mayores recalos de puerulus y con los reportes de grandes pesquerías en la región (Puga, *et al.*, 1991).

La simulación de las trayectorias de larvas virtuales de langosta liberadas en Yucatán indica que el mayor porcentaje de las larvas se mantiene dentro del Golfo de México por los movimientos cíclicos de las corrientes. Otra significativa cantidad es arrastrada por la corriente de la Florida hacia el NE de la península de la Florida. La región noroccidental de Cuba es subsidiada con el 2,8 % del total liberado. Este porcentaje, sino contribuye al aumento de la población de langosta en Cuba, podría mantener la conexión genética entre Cuba y México.

Las simulaciones de las trayectorias de larvas liberadas en la Isla Caimán Grande, sugieren que la población de langosta de esta isla pudiera abastecer las poblaciones de Jamaica, República Dominicana-Haití. Los recalos que llegan a Cuba de la Isla Caimán Grande benefician en mayor cuantía la región NW de Cuba, con el 10 % del total desovado.

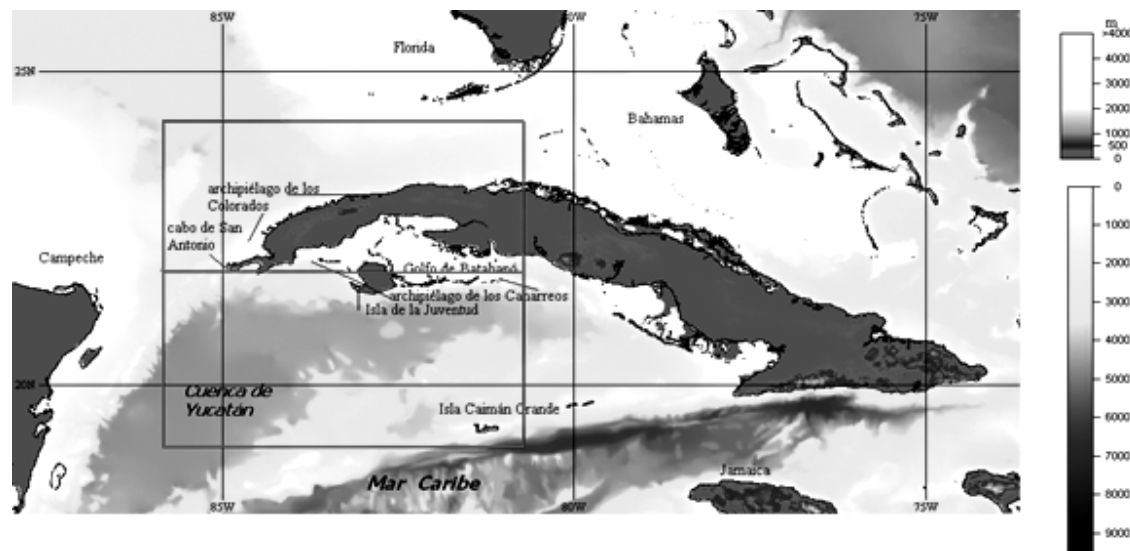
El conocimiento de las trayectorias de las larvas de langosta en el Caribe ofrece una perspectiva en el entendimiento de la conectividad entre las poblaciones de la plataforma cubana y áreas vecinas, es útil para mejorar los diseños de las redes de reservas marinas en la región y sugiere la conservación de los hábitas en el Caribe.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El Mar Intra-Americano es el escenario seleccionado para las simulaciones de las trayectorias de larvas de langosta,

comprendido en la cuadrícula (8°-30° N y 60°-92° W). En dos polígonos más pequeños, localizados al NW (22°-24° N y 80°50'-86° W) y SW (19°-22° N y 80°50'-86° W) de Cuba, se determinan características estadísticas del campo de corrientes y del campo de remolinos.



Fuente: Atlas GEBCO, [www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco](http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco).

Fig. 1 Ubicación geográfica de Cuba en el Mar Intra-Americano

El Mar Intra-Americano comprende las aguas del Golfo de México y del Mar Caribe (Mooers & Maul, 1998). En virtud de su localización también es conocido como Mar Mediterraneo. El archipiélago cubano ocupa la posición central de este mar. Bordeando la plataforma noroccidental de Cuba fluyen fuertes corrientes oceánicas como la del Lazo y la corriente de la Florida, las cuales modifican el patrón de circulación inmediato a esta plataforma, mientras la frontera sur del archipiélago cubano la limitan débiles flujos del Mar Caribe.

La topografía submarina al NW de Cuba muestra amplias llanuras abrasivo-acumulativas que se prolongan por el estrecho de la Florida y se conectan al Mar Caribe por el estrecho de Yucatán. En el Mar Caribe existen cinco cuencas principales. De estas, las próximas a la región suroccidental de Cuba son la cuenca de Caimán (15°-20° N y 75°-80° W), con una profundidad máxima de 7 100 m y la cuenca de Yucatán con una profundidad promedio de 5 000 m. Los rasgos notorios de la topografía submarina del Mar Caribe como dorsales y pasos angostos entre islas o entre plataformas submarinas, pueden originar remolinos y meandros de mesoescala (Molinari *et al.*, 1981). Los pasos y estrechos que rodean

a Cuba facilitan el paso de estos remolinos de mesoescala, que pueden trasladarse en el flujo principal desde regiones lejanas como el norte de Brasil (Johns *et al.*, 2003).

### Datos

Los datos de hidrodinámica provienen de una serie de corrientes entre los años 1995 y 2000 obtenida de los satélites ERS1/2. Esta serie de corrientes se utilizó en la modelación de las trayectorias de larvas virtuales. La data de 18 cruceros oceanográficos realizados en aguas cubanas entre los años 1966 y 2000, se utilizó para caracterizar el campo de vórtices de la región SW de Cuba (Gutiérrez *et al.*, 2009).

### Método lagrangiano

El cálculo de las trayectorias de las larvas virtuales se realizó mediante la ecuación de Langevin (Sawford, 2001):

$$dx/dt = u = u^* + u_{\sigma} \quad (1)$$

$$dy/dt = v = v^* + v_{\sigma} \quad (2)$$

donde:

$(x, y)$ : posición de la partícula.

$(u^*, v^*)$ : velocidad de cada posición de la partícula.

$(u_d, v_d)$ : son seleccionadas de manera que llevan una distribución normal.

Para calcular la posición de la partícula después de un tiempo  $\Delta t$ ,  $[x(t + \Delta t), y(t + \Delta t)]$  partiendo del punto  $[x(t), y(t)]$  se usa el método Runge-Kutta de segundo orden:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + k_2, \quad (3)$$

donde:

$$k_1 = \Delta t u[t, x(t)] \text{ y } k_2 = \Delta t u[t + \Delta t/2, x(t) + k_1/2].$$

De forma similar se calcula  $y(t + \Delta t)$  usando la velocidad  $v$ . El tiempo  $t$  se mide en minutos y el campo de corrientes  $(u, v)$  se mantiene constante durante cinco días. Para calcular la velocidad en los puntos de la trayectoria de la partícula se utiliza la interpolación bilinear de la velocidad euleriana con el método inverso de la distancia, que toma cuatro puntos de la rejilla entre los cuales está situada la partícula.

#### Selección de la componente aleatoria

La generación de registros de velocidades aleatorias  $(u_d, v_d)$  se obtiene mediante el método de Monte Carlo sujeto a ciertas restricciones estadísticas. El ruido aleatorio fue generado usando procesos estocásticos de Ornstein-Uhlenbeck (Numerical Recipes, 1985), el cual se expresa de la siguiente forma:

$$u_d = u^* - (\Delta t/T_u) u^* + (\Delta t/T_u \sigma_{ou} w)^{1/2}, \quad (4)$$

$$v_d = v^* - (\Delta t/T_v) v^* + (\Delta t/T_v \sigma_{ov} w)^{1/2}, \quad (5)$$

donde:

$T_u, T_v$ : tiempo lagrangiano integral.

$\sigma_{ou}, \sigma_{ov}$ : denotan las desviaciones estándar de las componentes horizontales  $u$  y  $v$  de la velocidad.

$w$ : ruido gaussiano con media cero y desviación estándar uno.

En el proceso Ornstein-Uhlenbeck las velocidades aleatorias varían en cada punto entre determinados límites, que dependen del coeficiente de difusión variable.

### Simulación de las trayectorias de larvas

Las simulaciones de larvas virtuales están basadas en un modelo biofísico el cual integra datos de corrientes cada cinco días, entre los años 1995 y 2000. El campo de circulación se acopla a un modelo estocástico lagrangiano (ver ecuaciones 3; 4 y 5) para simular la

trayectoria de larvas virtuales liberadas en la región suroccidental de Cuba, en Campeche (Yucatán) y en la Isla Caimán Grande. Las trayectorias fueron calculadas integrando en el tiempo la velocidad horizontal de las series de corrientes.

Para determinar la resolución espacial del modelo fue necesario conocer las características de los diámetros de los vórtices más frecuentes. La dimensión de un vórtice coherente está dada por el radio de deformación de Rossby ( $R_d$ ). Este radio oscila entre 37 y 38 km en la región SW de Cuba y entre 22 y 23 km en la región NW de Cuba (Gutiérrez & Álvarez, 2008). Para representar un vórtice, Franks (2008) sugiere que se tome al menos cinco puntos de rejilla sobre el  $R_d$  lo cual implica que el tamaño de la rejilla  $\Delta x$  debe variar entre 4 y 7 km, si conocemos que el  $R_d$  está entre 22 y 38 km. Oey *et al.* (2003) toman el criterio empírico  $\Delta x/R_d \approx 1/3$  o menos para la selección del tamaño  $\Delta x$ , aunque este criterio es raramente satisfecho en los modelos, en los que generalmente se utiliza  $\Delta x = R_d$ .

La producción del desove se simuló con la liberación de 26 912 larvas, cada cinco días en los meses de máximo desove durante seis años consecutivos (1995-2000). Se liberaron larvas virtuales en 58 sitios de la región SW de Cuba (Fig. 2). Estos sitios corresponden a lugares donde se conoce la dinámica poblacional de la langosta (Cruz *et al.*, 1991a). Entre los 58 puntos seleccionados aparecen diez puntos de registros históricos de abundancia de larvas (Alfonso *et al.*, 1991).

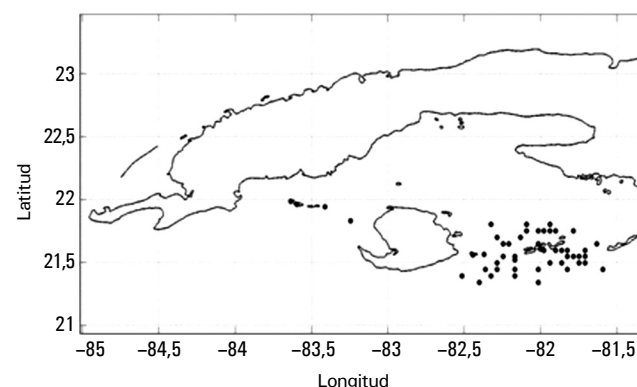


Fig. 2 Distribución espacial de las 58 localidades seleccionadas para el desove virtual en la región suroccidental de Cuba

Para conocer el aporte de larvas de Yucatán e Isla Caimán Grande a la población de langosta en Cuba, se simuló la liberación de larvas virtuales desde diez localidades de estas regiones (TABLA 1).

TABLA 1. Coordenadas de puntos de liberación de larvas virtuales en Cuba, Yucatán e Isla Caimán

Cuba	Longitud	Latitud	Yucatán	Longitud	Latitud	Caimán	Longitud	Latitud
Cayo Cantiles	-82,002	21,609	1	-86,970	20,253	1	-81,399	19,222
Cayo Cantiles 2	-82,120	21,650	2	-86,834	20,409	2	-81,262	19,247
Cayo Avalos	-82,168	21,519	3	-86,732	20,597	3	-81,160	19,272
Hicacos	-82,370	21,564	4	-86,680	20,875	4	-81,109	19,296
Hicacos 2	-82,410	21,564	5	-86,578	21,128	5	-81,041	19,321
Matías	-82,444	21,562	6	-86,663	21,431	6	-81,109	19,394
Cayo Los Indios	-83,244	21,833	7	-86,663	21,807	7	-81,194	19,394
Cayo Los Indios 2	-83,344	21,840	8	-87,055	21,979	8	-81,330	19,402
Cayo Campos	-82,404	21,602	9	-87,856	22,094	9	-81,484	19,402
Cayo del Rosario	-82,801	21,700	10	-89,645	22,028	10	-81,484	19,312

Al modelo biofísico se le incorporaron las características biológicas de la langosta *P. argus* como es el período de duración larval (PDL). Las simulaciones comienzan en los meses de máximo desove de la especie (febrero-marzo-abril-mayo) y finalizan cuando concluye el PDL. Los niveles de reclutamiento fueron escalados con mortalidad natural de  $0,9d^{-1}$  (Baisre, 2008, comunicación personal).

Las larvas que arriban a algún sustrato sólido antes que finalice el PDL son cuantificadas, mientras que las larvas que quedan fuera después que finaliza el PDL tienen una mortalidad de 100 %. El autoreclutamiento incluye el reclutamiento local y el de otras regiones de Cuba. El reclutamiento exportado es aquel que sale fuera de Cuba.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Simulación de las trayectorias de larvas de langosta liberadas al SW de Cuba*

Las larvas virtuales de langosta liberadas al SW de Cuba tienen el mayor reclutamiento en Cuba, local o regional (Fig. 3). A la región suroccidental del archipiélago cubano arriba el 27,97 % del total de larvas liberadas. Estos resultados concuerdan con estudios que exponen un buen grado de acople entre la producción de larvas y el autoreclutamiento (Lee & Williams, 2000). La mayor retención observada en la región SW de Cuba es consistente con los mayores recalos de puerulus (Cruz, *et al.*, 1991) y con los reportes de grandes pesquerías (Puga *et al.*, 1991). La región NW de Cuba es la segunda en importancia, con el 16,8 % reclutado del total liberado. En el SE de Cuba se retiene el 5,9 %,

mientras a la región NE de Cuba arriban cantidades más pequeñas en comparación con el resto de las regiones estudiadas.

Las simulaciones realizadas ofrecen cuantías potenciales del reclutamiento, sujetas a las variables físicas y biológicas empleadas en el modelo. No obstante, para lograr el reclutamiento exitoso y posteriormente abundantes pesquerías, numerosos factores deben de acoplarse en el medio. El reclutamiento efectivo en cada región del Caribe tiene limitaciones particulares y entre ellas, una de gran peso es la conservación de los hábitats.

La dinámica de los fluidos a que están expuestas las larvas liberadas en el SW de Cuba favorece que no entren en su totalidad dentro del flujo principal que fluye hacia el canal de Yucatán. El seguimiento de las trayectorias de partículas ejemplifica trayectorias circulares y caóticas al SW de Cuba, indicando que los remolinos de esta región deben dominar sobre el flujo medio (Fig. 4). El SW de Cuba es una zona de intercambio y de mezcla, beneficiada por el tiempo de permanencia de las partículas en el área (diez meses) (Richardson, 2005). Este período es tiempo suficiente para que las larvas de langosta *Panurilus argus* y de muchas especies tropicales concluyan su PDL (Linderman *et al.*, 2001).

En la figura 4 se observan las trayectorias de larvas virtuales en un período de ocho meses. Las trayectorias describen la abundancia de remolinos oceánicos al noroeste y sur de Cuba. Dentro de los remolinos las larvas permanecen cercanas, mientras que fuera de los vórtices las trayectorias son caóticas después que vencen el tiempo lagrangiano integral (Lacorata *et al.*, 2001).

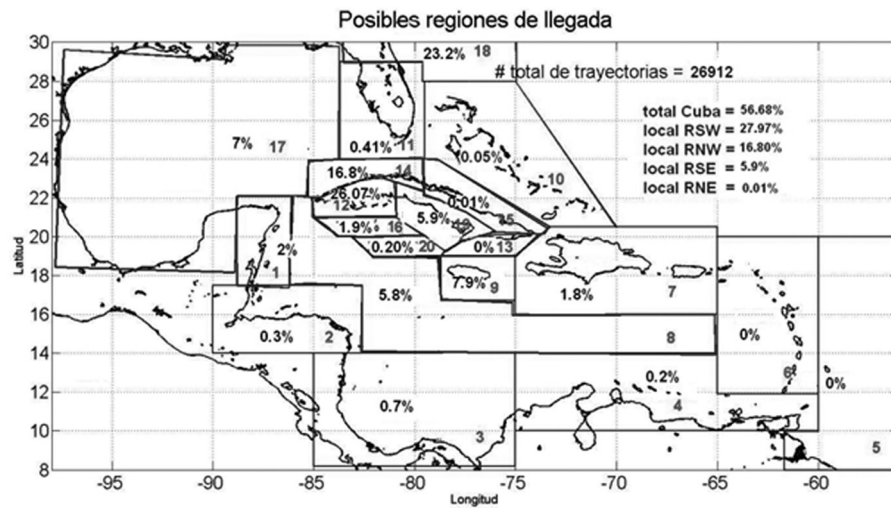


Fig. 3 Distribución en polígonos de los porcentajes de larvas virtuales que arriban al Caribe. Las larvas se liberaron en la región SW de Cuba. Retención en orden de importancia: Región SW de Cuba 27,97 %, NE de la península de La Florida 23,2 %, Región NW de Cuba 16,8 %, Jamaica 7,9 %, Golfo de México 7 %, Región SE de Cuba 5,9 %, Yucatán 2 %

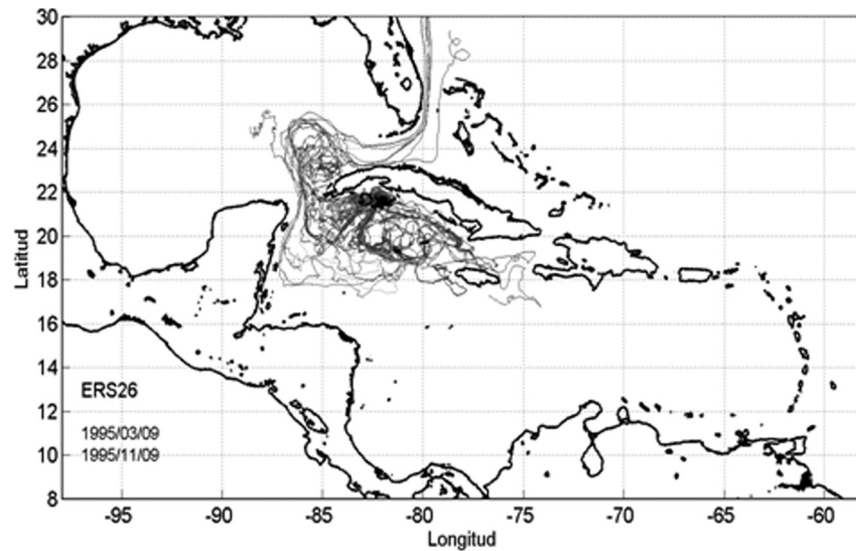


Fig. 4 Trayectorias lagrangianas de larvas virtuales de langosta liberadas al SW de Cuba en marzo de 1995

El campo de remolinos al SW de Cuba se caracteriza por la mayor cantidad de estas estructuras por encima de la latitud de 21° (área de interacción océano-plataforma) (Gutiérrez & Álvarez, 2008). Esta característica debe estar relacionada con la fricción que ejercen la topografía submarina y los cayos que bordean la plataforma. El efecto de la fricción propicia la formación de pequeños vórtices por el fraccionamiento de los vórtices grandes en otros más pequeños.

Los vórtices más frecuentes en el área de interacción océano-plataforma tienen escalas entre 24 y 41 km. El radio de deformación de Rossby ( $R_\rho$ ) concuerda con el de los remolinos más estables, que son los más frecuentes en la región de interacción océano-plataforma. Esta particularidad es favorable para la permanencia y el desarrollo de la fase larvaria de la langosta. El análisis de EOF realizado a una

serie de remolinos oceánicos adyacentes a la región suroccidental de Cuba durante los años 1995-2000, no muestra un patrón temporal que implique que el campo de vórtices más frecuentes responda a una época climática específica (Gutiérrez & Álvarez, 2012). Por lo que además de la retención que pueden ejercer los remolinos oceánicos, otros factores y mecanismos deben de estar actuando en múltiples escalas de manera simultánea.

Las simulaciones numéricas corroboran que la contracorriente cubana que fluye al NW de Cuba, trae nuevamente a la región SW de Cuba las larvas que fueron advectadas hacia el N de Cuba por la corriente de Yucatán. La contracorriente expone las larvas por el borde de la plataforma suroccidental cubana y también las traslada a otras islas en el Caribe. La comunicación oceánica entre la región NW y SW de Cuba, observada en las simulaciones

numéricas concuerda con los experimentos de tarjetas y botellas de deriva, y con las mediciones de corrientes realizadas en aguas cubanas (Emilsson & Tápanes, 1971; García *et al.*, 1991; Gutiérrez *et al.*, 1998-1999).

Otro factor que favorece la permanencia de las larvas al SW de Cuba es la baja difusión que caracteriza esta área, unido a la existencia de bajas velocidades de las corrientes (Gutiérrez *et al.*, 2009). La baja difusión posibilita que los parches de larvas puedan permanecer concentrados y las bajas velocidades aseguran un transporte lento de E a W de estos parches. La acción conjunta de estos factores favorece la cercanía de las larvas a la plataforma cubana como una estrategia de supervivencia.

El tiempo de arribo de las larvas a la plataforma suroccidental de Cuba es entre dos días y ocho meses posteriores al desove. Las larvas que llegan antes de culminar su PDL podrían permanecer atrapadas por movimientos cíclicos, respondiendo a valores de menor difusión y a movimientos estables dentro de los vórtices, ayudadas también por las habilidades sensoriales de la especie.

De la producción desovada al SW de Cuba, una pequeña fracción se exporta a localidades vecinas en el Caribe. Las poblaciones del sur de la Florida y Yucatán reclutan porcentajes muy bajos del total de larvas virtuales liberadas al SW de Cuba (Fig. 3). De manera similar Paris *et al.* (2005) reportan baja retención de larvas de pargos al sur de la Florida. En concordancia con la autora, el bajo reclutamiento al sur de la Florida debe de estar relacionado con la imposibilidad de las larvas de cruzar la fuerte corriente de la Florida para asentarse en los cayos. Acorde con este criterio, existe baja probabilidad de que las poblaciones de langosta del sur de la Florida puedan sostenerse con larvas provenientes de la región suroccidental de Cuba. Las presentes simulaciones exponen que las pequeñas concentraciones de larvas que arriban a los cayos de la Florida no deben hacer grandes aportes al incremento de la

población, pero pueden contribuir al mantenimiento de la conexión genética de la especie.

Los estudios de Alfonso *et al.* (2000) sobre el papel que desempeña el transporte de Ekman sobre los primeros estadios de filosomas de langosta *Panulirus argus*, sugieren que este mecanismo favorece la retención al SW de Cuba. Un reciente estudio en la región encuentra que las zonas de afloramientos y hundimientos provocadas por el viento no son estables y por tanto el transporte de Ekman hacia la costa sur durante y finalizando el PDL podría ser un mecanismo más para lograr un reclutamiento exitoso, pero no indispensable (Gutiérrez *et al.*, 2009).

El porcentaje retenido en el Caribe de las larvas virtuales liberadas al SW de Cuba, entre los años 1995 y 2000 se muestra en la figura 5. En este período, el reclutamiento en Cuba fue significativo en las regiones SW (polígono 12), NW (polígono 14) y SE (polígono 19) en comparación con otras regiones del Caribe. El NE de la península de la Florida (polígono 18) se beneficia con notables cantidades de larvas. En este caso, las larvas que llegan a este polígono fueron advectadas por las fuertes corrientes del sistema de la corriente del Golfo hacia regiones alejadas del Caribe. En el interior del Golfo de México (polígono 17), la dinámica de la región también favorece que cantidades importantes queden atrapadas. A la región central del Caribe (polígono 8), arriban cantidades que al no encontrar un sustrato sólido donde asentarse tienen alta probabilidad de perecer por depredación. La plataforma de Jamaica (polígono 9), se beneficia con cantidades importantes que pueden subsidiar la población de esta isla. Existen otras localidades representadas por los polígonos 2; 3; 4; 5; 6; 10; 11 y 20, donde los porcentajes que recalán son muy bajos, pero permiten las conexiones de la especie.

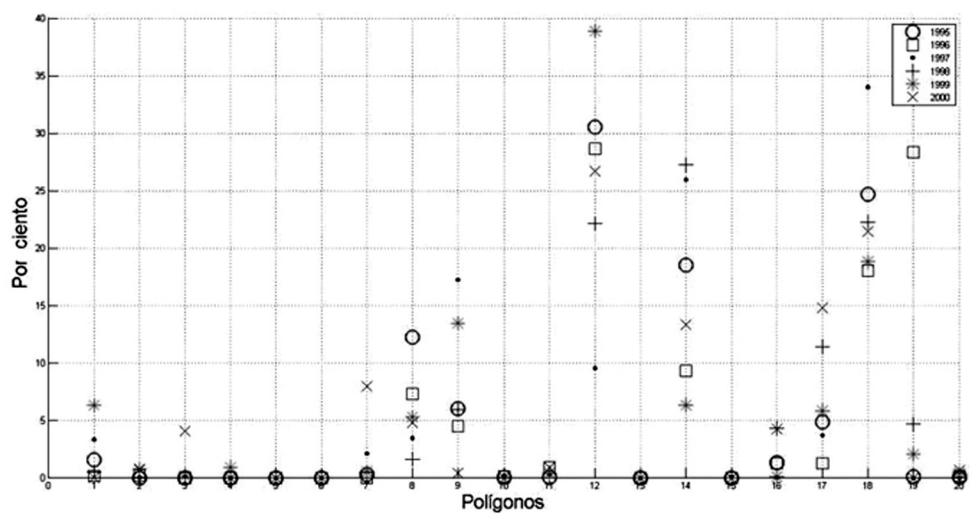


Fig. 5 Porcentaje de larvas reclutadas durante los años 1995-2000 en 20 polígonos localizados en el Caribe. Las larvas virtuales se liberaron al SW de Cuba

### **Larvas liberadas en Yucatán y en la Isla Caimán Grande**

Para conocer el aporte de las poblaciones de langosta cercanas a Cuba se simula la liberación de larvas virtuales en diez localidades de Campeche-Yucatán, durante los años (1995-2000). De manera similar se liberan larvas virtuales en la Isla Caimán Grande, en el mismo período de estudio. La simulación de las larvas liberadas en Yucatán muestra que el mayor porcentaje de las

partículas (61,9 %) es arrastrado por la corriente del Golfo y mantenido dentro del Golfo de México por los movimientos cíclicos de las corrientes. Otra significativa cantidad (33 %) es arrastrada hacia el NE de la península de la Florida, siguiendo el fuerte flujo que mueve casi la totalidad de las partículas. La región noroccidental de Cuba se subsidia con 2,8 % del total liberado, mientras que regiones como la costa sur de la Florida reciben contribuciones aún menores (0,17 %), que no sustentan la población, pero ayudarían al mantenimiento de la conexión genética y demográfica de la especie (TABLA 2).

TABLA 2. Porcentaje del recalo de las larvas virtuales de langosta en el Caribe. Larvas virtuales liberadas en Yucatán y en la Isla Caimán Grande

<b>Salida de Yucatán. Regiones de arribo</b>	<b>Porcentaje del recalo</b>	<b>Salida de la Isla Caimán Grande. Regiones de arribo</b>	<b>Porcentaje del recalo</b>
Golfo de México	61,89 %	Jamaica	56,54 %
Costa NE de la Florida	33,17 %	La Española	20,41 %
Región NW de Cuba	2,83 %	Región NW de Cuba	10,10 %
Península de Yucatán	1,94 %	Costa NE de la Florida	7,91 %
Sur de la Florida	0,17 %	Región SE de Cuba	1,66 %
		Sur de la Florida	1,27 %
		Mar Caribe central	0,49 %
		Belice	0,39 %
		Golfo de México	0,29 %
		Región SW de Cuba	0,20 %
		Península de Yucatán	0,20 %
		Panamá-Colombia	0,20 %

Las larvas liberadas en Yucatán arriban a la región NW de Cuba en aproximadamente tres meses, cuando aún no ha concluido el PDL. Pero, si se considera que estas larvas puedan permanecer atrapadas en remolinos coherentes hasta que culmine su PDL, entonces este o parte de este porcentaje podría ser considerado dentro de los subsidios de regiones vecinas, lo que sería beneficioso para compensar las exportaciones que realiza la población de Cuba a otras localidades en el Caribe.

La distribución en el Caribe de las larvas liberadas en la Isla Caimán Grande sugiere que esta isla ocupa una posición estratégica en el Caribe (ver TABLA 2). El desove producido en la isla puede abastecer las poblaciones de langosta de Jamaica, República Dominicana-Haití. A estas regiones arriban significativos recalos de 57 y 21 %, respectivamente, lo que manifiesta una fuerte conexión de la población de langosta entre estas islas.

De los recalos que llegan a Cuba, la región NW es la más beneficiada con cerca del 10 % del desove de la Isla Caimán Grande, a continuación le sigue la región SE de Cuba con ~ 2 % de recalos y con un porcentaje más pequeño se favorece la región SW de Cuba. En la distribución de los porcentajes que arriban a Cuba influye la variabilidad del flujo principal del Caribe. Las intensas corrientes que fluyen muy cerca de la Isla Caimán Grande pueden advechar importantes concentraciones que se retienen al NW de Cuba, mientras que los pequeños porcentajes que se contienen al SW de Cuba deben ser favorecidos por la presencia de remolinos oceánicos. Las cantidades significativas de larvas que exporta la Isla Caimán Grande, distribuidas principalmente en la región occidental del Caribe demuestran las conexiones genéticas de la especie *Panurilus argus*, propuestas en el estudio de Espinosa *et al.* (1991).



## CONCLUSIONES

1. Las larvas virtuales de langosta liberadas al SW de Cuba tienen el mayor reclutamiento en Cuba, local o regional. A la región SW del archipiélago cubano arriba el 27,97 % del total de larvas liberadas, lo que demuestra un buen grado de acople entre la producción y el autoreclutamiento.
2. En la región suroccidental de Cuba existen condiciones físicas que propician la retención de las larvas de langosta. En la zona de interacción océano-plataforma, existe mayor cantidad de remolinos y son los más estables. El largo período de residencia de los remolinos oceánicos favorece el tiempo de permanencia de las larvas en el área. La baja difusión que caracteriza la región posibilita que las concentraciones de larvas permanezcan cercanas y las bajas velocidades aseguran un transporte lento de E a W. La acción conjunta de estos factores favorece la cercanía de las larvas a la plataforma cubana lográndose una estrategia de retención.
3. El tiempo de arribo de las larvas a la plataforma suroccidental de Cuba es entre dos días y ocho meses posteriores al desove. Las larvas que llegan antes de culminar su PDL permanecen atrapadas en movimientos cíclicos, respondiendo a valores de menor difusión y a movimientos estables dentro de los vórtices, ayudadas también por las habilidades sensoriales de la especie.
4. Las poblaciones del sur de la Florida y Yucatán reclutan porcentajes muy bajos de las concentraciones liberadas al SW de Cuba. Los bajos niveles de reclutamiento en estos lugares no deben hacer grandes aportes al incremento de la población, pero contribuyen al mantenimiento de la conexión genética y demográfica de la especie.
5. Las trayectorias de las larvas liberadas en Yucatán muestran que el mayor porcentaje (61,9 %) se mantiene dentro del Golfo de México, por los movimientos cíclicos de las corrientes. Otra cantidad significativa (33 %), es arrastrada hacia el NE de la península de la Florida, siguiendo el fuerte flujo que mueve casi la totalidad de las partículas. La región noroccidental de Cuba se subsidia con 2,8 % del total liberado, mientras que regiones como la costa sur de la Florida reciben contribuciones aún menores (0,17 %), que no sustentan las poblaciones, pero ayudan a conectarlas.
6. Las larvas desovadas en la Isla Caimán Grande pueden abastecer las poblaciones de langosta de Jamaica y República Dominicana-Haití. A estas regiones arriban significativos recalos que manifiestan una fuerte conexión de la población de langosta entre

estas islas. De los recalos que llegan a Cuba, la región NW es la más beneficiada con cerca del 10 % del desove de la Isla Caimán Grande.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este estudio agradecen la colaboración y ayuda del doctor Julio Candela, del CICESE Baja California, México, por ceder parte de los códigos que se utilizaron en el modelo matemático. También agradecemos las valiosas recomendaciones de la doctora Consuelo Valle, de la UABC. Con gran respeto agradecemos el trabajo desarrollado por las investigadoras Máster en Ciencias Pilar Frías e Irma Alfonso, en el estudio de la fase larvaria de especies que habitan las aguas del Mar Caribe.

## REFERENCIAS

- Alfonso, I., Frías, M. P., Baisre, J. & Campos, A. (1991). Distribución y abundancia de larvas de la langosta *Panulirus argus* en aguas oceánicas alrededor de Cuba. *Rev. Inv. Mar.*, 12 (1-3), 5-19.
- Alfonso, I., Frías, M. P. & Baisre, J. (2000). Distribución larval de la langosta comercial *Panulirus argus*, en relación con algunos factores hidrometeorológicos, al Sur de Cuba. *Rev. Inv. Mar.*, 21 (1-3), 23-32.
- Baisre, J. A., Blanco, W., Alfonso, I. & Ruiz de Quevedo, M. E. (1978). Distribución y abundancia relativa de las larvas de langosta (*Panurilus argus*) en el Mar Caribe y las Bahamas. *Rev. Cub. Inv. Pesq.*, 3 (1), 1-21.
- Candela, J., Tanahara, S., Crepon, M., Barnier, B. & Sheinbaum, J. (2003). Yucatán Channel flow: Observations versus CLIPPER ATL6 and MERCATOR PAM models. *J. Geophys. Res.*, 108 (C12).
- Cowen, R. & Sponaugle, S. (2009). Larval dispersal and marine population connectivity. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 1, 443-66.
- Cowen, R. K., Paris, C. B. & Srinivasan, A. (2006). Scaling of connectivity in marine populations. *SCIENCE*, 311, 522-527.
- Cruz, R. & León, M. E. de (1991). Dinámica reproductiva de la langosta *Panurilus argus* en el archipiélago cubano. *Rev. Inv. Mar.*, 12 (1-3), 234-245.
- Cruz, R., León, M. E. de, Díaz, E., Brito, R. & Puga, R. (1991a). Reclutamiento de puerulus de langosta *Panurilus argus* a la plataforma cubana. *Rev. Inv. Mar.*, 12 (1-3), 66-75.
- Emilsson, I. & Tápanes, J. J. (1971). Contribución a la hidrología de la plataforma sur de Cuba. *Serie Oceanológica*, 9 (32).

- Espinosa, G., Díaz, R. & Berovides, V. (1991). Análisis Genético Bioquímico de Larvas de *Panulirus argus* de la ZEE del sur de Cuba. *Rev. Inv. Mar.*, 12, 20-28.
- Franks, P. (2008). Real-time coastal observing systems for marine ecosystem dynamics and harmful algal blooms. Theory, instrumentation and modelling. Paris, Francia: UNESCO.
- García, C., Chirino, A. & Rodríguez, J. (1991). Corrientes geostroficadas en la Z.E.E al sur de Cuba. *Rev. Cub. Inv. Pesq.*, 12 (1-3), 29-38.
- Group, R. (1981). Gulf Stream cold core rings: their physics, chemistry and biology. *Science*, 212, 1091-1100.
- Guerrero, L. (2005): Identificación y seguimiento de remolinos en el Mar Caribe. Tesis de Maestría, CICESE. Baja California. México.
- Gutiérrez, A. & Álvarez, A. (2008). Los remolinos oceánicos: mecanismos físicos de retención de partículas. *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental*, 8 (1), 185-196.
- Gutiérrez, A. & Álvarez, A. (2012). Variabilidad espacial y temporal de los remolinos oceánicos en la región suroccidental de Cuba. *Serie Oceanológica*, No. 11 (Número Especial), ISSN 2072-800x.
- Gutiérrez, A. *et al.* (2009). Proyecto: Los procesos oceanográficos y su relación con especies marinas de interés comercial. Importancia regional y trascendencia extrarregional. Programa Ramal de Ciencia e Innovación Tecnológica: Protección del Medio Ambiente y el Desarrollo Sostenible Cubano (1999-2009). ISBN 978-959-300-06-2
- Gutiérrez, A., Pérez, J., Barbeito, R. & Moreau, P. (1998-1999). Estudio de las características hidrológicas y de la circulación de las aguas oceánicas alrededor de Cuba durante septiembre de 1998 y mayo de 1999. Informes C-T, GEOCUBA Estudios Marinos, La Habana.
- Hernández, B., Puga, R., Piñeiro, R., Peñate, A., Alfonso, I. & Baisre, J. (1995). Transport, turbulence and hypothetical ocean-shelf coupling mechanism in Punta del Este, southwestern Cuba. *Rev. Cub. Inv. Pesq.*, 19 (1), 67-72.
- Jouanno, J., Sheinbaum, J., Barnier, B., Molines, J., Debreu, L. & Lemarie, F. (2008). The mesoscale variability in the Caribbean Sea. Part I: Simulations and characteristics with an embedded model. *Ocean Modelling*, 23, 82-101.
- Lacorata, G., Aurell, E. & Vulpiani, A. (2001). Drifter dispersion in the Adriatic Sea: Lagrangian data and chaotic model. *Annales Geophysicae*, 19, 121-129.
- Lee, M. M. & Williams, R. G. (2000). The role of eddies in the isopycnic transfer of nutrients and their impact on biological production. *Journal of Marine Research*, 58, 895-917.
- Linderman, K. C., Lee, T., Wilson, W. D., Claro, R. & Ault, J. S. (2001). Transport of larvae originating in southwest Cuba and Dry Tortugas: Evidence for partial retention in grunts and snappers. *Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 1 (52), 732-747.
- Mooers, C.N. K. & Maul, A. (1998). Intra-americas sea circulation. *The Sea*, 11, 183-197.
- Molinari, R. L., Spillane, M., Brooks, I., Atwood, D. & Duckett, C. (1981). Surface currents in the Caribbean Sea deduced from Lagrangian observations. *J. Geophys. Res.*, 86, 653-654.
- Numerical Recipes (1985). The art of scientific computing. Cambridge University Press.
- Oey, L. Y., Lee, H. C. & Schmitz, W. J. (2003). Effects of winds and Caribbean eddies on the frequency of Loop Current eddy shedding: A numerical model study. *J. Geophys. Res.*, 108, 22-25.
- Paris, C. B., Cowen, R. K., Claro, R. & Linderman, K. C. (2005). Larval transport pathways from Cuban snapper (lutjanidae) spawning aggregations based on biophysical modeling. *Marine Ecology Progress Series*, 296, 93-106.
- Puga, R., León, M. E. de & Cruz, R. (1991). Evaluación de la pesquería de langosta espinosa *Pannulirus argus* en Cuba. *Rev. Inv. Mar.*, 12 (1-3), 286-292.
- Richardson, P. L. (2005). Caribbean Current and eddies as observed by surface drifters. *Deep-Sea Research*, 52, 429-463.
- Sheng, J. & Tang, L. (2003). A numerical study of circulation in the western Caribbean Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 2049-2069.
- Sawford, B. (2001). Turbulent Relative Dispersion. *J. Fluid. Mech.*, 33, 289-317.
- Siam, C. L. (1988). Corrientes superficiales alrededor de Cuba. *Rev. Cub. Inv. Pesq.*, 13 (1-2), 98-107.
- Yeung, C. & Lee, T. N. (2002). Larval transport and retention of the spiny lobster *Panulirus argus* in the coastal zone of the Florida Keys USA. *Fish. Oceanogr.*, 11 (5), 286-309.