

# Efectos económicos de alteraciones medioambientales en la pesquería de la sardina iberoatlántica

Torralba Cano, Julia \*      Besada Moráis, Manuel \*\*  
Garza Gil, M<sup>a</sup> Dolores.\*\*\*

Universidade de Vigo

## Resumen

En este trabajo pretendemos evaluar los posibles efectos de las alteraciones locales ambientales que acompañan al cambio climático sobre pesquerías relevantes para el sector pesquero español, en el que seleccionamos la pesquería de sardina iberoatlántica, dado que las especies pelágicas son especialmente vulnerables a impactos de tipo medioambiental. Para ello introducimos en el problema de gestión óptima de la pesquería, una variable ambiental, la temperatura superficial del mar. Analizamos los efectos de las oscilaciones en esta variable sobre la solución del problema del planificador pesquero, utilizando estimaciones de las funciones relevantes. Además, realizaremos análisis de sensibilidad, dentro del rango factible de temperaturas, del óptimo del problema respecto a modificaciones en los parámetros económicos.

*Clasificación JEL:* Q54, Q22, C61, D11

---

\*Departamento de Economía Aplicada. Facultade de Economía. Rúa Leonardo da Vinci (SN). 36310 Vigo. España. e-mail: jtorralba@uvigo.es, tel: 986 814 007.

\*\*Departamento de Matemáticas. Facultade de Economía. Rúa Leonardo da Vinci (SN). 36310 Vigo. España. e-mail: mbesada@uvigo.es, tel: 986 812 441.

\*\*\*Departamento de Economía Aplicada. Facultade de Economía. Rúa Leonardo da Vinci (SN). 36310 Vigo. España. e-mail: dgarza@uvigo.es, tel: 986 812 515.

# 1. Introducción

Una característica significativa de los océanos es que almacenan mucha mayor cantidad de energía que la atmósfera, con lo que los efectos posibles del calentamiento global tendrían mayor impacto sobre los ecosistemas marinos que sobre los terrestres. Esta idea es la que nos ha llevado a intentar realizar un análisis local del posible efecto de las alteraciones de los parámetros ambientales del océano sobre una de las actividades económicas con amplia tradición en algunas de las regiones costeras de la Península Ibérica: la pesquería de la sardina.

La pesquería de la sardina iberoatlántica (*Sardina pilchardus*), es la explotación de un recurso compartido por España y Portugal, en las aguas que rodean a la Península Ibérica comprendidas entre el Golfo de Vizcaya y el estrecho de Gibraltar.

Existen referencias históricas de esta pesquería en la costa atlántica ibérica que se remontan a los siglos XIII y XIV, tanto para el caso español, en Labarta (1979), como para el caso portugués, en Pestana (1989), así como en Domínguez, M. (2003). Desde sus orígenes, ha tenido una gran relevancia para el sector extractivo de ambos países y para la industria de transformación (salazón e industria conservera). La especie es capturada básicamente por las flotas que utilizan el arte de cerco (un 99 % de las capturas son realizadas por la flota cerquera, Domínguez M., 2003), destinándose la totalidad de las mismas al consumo humano.

Los procesos de reclutamiento de la sardina iberoatlántica podrían estar gobernados por condiciones oceanográficas de orden local y eventos climáticos de carácter global, lo que puede explicar las fluctuaciones en las descargas en los puertos peninsulares del Atlántico y Cantábrico. Una creciente influencia de las componentes climáticas subtropicales, como El Niño, aumentaría la temperatura del agua de la superficie oceánica, mientras desciende la frecuencia e intensidad del promedio de afloramientos costeros en la costa occidental de la península, con lo que probablemente esta combinación haría descender la productividad de la pesquería (Porteiro et al, 2007). Así, en este trabajo intentamos establecer algunas relaciones entre las alteraciones medioambientales que podría provocar el calentamiento global y la pesquería. Analizaremos un modelo bioeconómico en el que integraremos las alteraciones de la temperatura superficial del mar y estimaremos los efectos de las mismas sobre la dinámica de la población del recurso en la pesquería, a partir del análisis empírico de las funciones relevantes. Para ello, hemos estructurado el trabajo de la siguiente manera: en las secciones 2 y 3 describimos la pesquería objeto del estudio, en la sección 4 introducimos los parámetros económicos de la actividad productiva, pasando en las dos siguientes a abordar el modelo bioeconómico y la solución del mismo a partir de los resultados

de nuestras estimaciones. A través de las condiciones medioambientales definidas por la variable temperatura, inferimos el posible rango de resultados óptimos en la pesquería. Seguidamente, en la sección 7 realizamos un análisis de sensibilidad para la solución óptima ante modificaciones de los parámetros económicos y por último, cerramos este trabajo resaltando algunas conclusiones importantes relativas al impacto del calentamiento global sobre los resultados óptimos de la pesquería.

## **2. Componentes biológicas de la pesquería**

El organismo científico *Internacional Council for the Exploration of the Sea (ICES)*, incluye el Grupo de Trabajo para la valoración de los stocks pelágicos, es encargado de estimar la biomasa y la evolución anual de las capturas del recurso para los dos países que componen la pesquería. Desde 1980 y con la finalidad de proponer los diversos objetivos de gestión pesquera, considera como unidad de stock la población distribuida en las zonas VIIIc y IXa, desde la frontera marítima franco-española hasta el estrecho de Gibraltar

La evaluación de la biomasa de reproductores (SSB) en la región que comprende la pesquería, proporcionan estimaciones del tamaño del stock y de las opciones de captura, que serán utilizadas posteriormente por las autoridades responsables de la gestión pesquera para decidir las restricciones a las capturas: el Total Admisible de Capturas (TAC) anual y las cuotas nacionales en el seno de la UE en aquellas especies para las cuales se aplican estas medidas. (no es el caso de la sardina ya que no está sometida a TAC).

### **2.1. Temperatura superficial del mar**

El hábitat de la sardina iberoatlántica se desarrolla en zonas poco profundas y con elevada productividad primaria (fitoplancton y zooplancton). Este ecosistema está muy vinculado a las zonas de afloramiento costero, muy sensible a fluctuaciones en las temperaturas y las corrientes del océano.

En esta sección analizaremos las condiciones ambientales a través de la evolución de la temperatura superficial del mar, variable que denotamos por SST. Se han calculado las medias anuales a partir de los datos mensuales facilitados por el Departamento de Oceanografía del Instituto de Investigaciones Marinas (CSIC), para la serie 1960-2005. Las localizaciones marítimas van desde 35°N hasta 45 °N y desde 8°O hasta 12°O para el Océano Atlántico; y desde 43°N hasta 45°N con

desplazamiento horizontal desde 2°O hasta 8°O, que abarca toda la costa cantábrica. Hemos dividido la región en tres zonas: desde el Golfo de Cádiz hasta la costa de la ciudad de Oporto; desde Oporto hasta el límite con el Cantábrico en Galicia (Estaca de Bares) y, finalmente el Cantábrico. En cada zona hemos analizado la evolución de la temperatura media superficial. Las zonas mas cálidas se corresponden con el sur del litoral ibero-atlántico que supera en aproximadamente unos 2°C las temperaturas medias de la costa norte del Atlántico y en 1,5° aproximadamente la costa Cantábrica. La Figura 1, refleja la evolución de la temperatura por zona geográfica y la tendencia de cada una de las series.

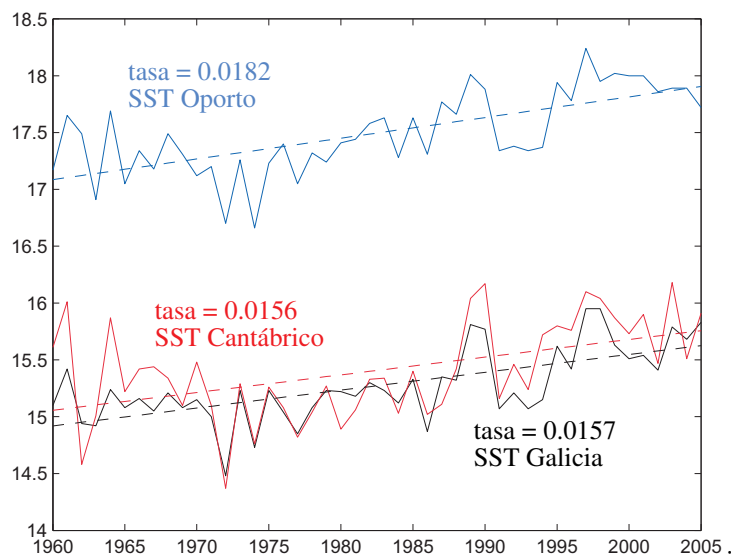


Figura 1: Evolución de las medias anuales de la temperatura superficial del mar

En el Cuadro 1 recogemos la medidas estadísticas de las series de temperaturas que nos permite realizar una comparación entre las tres zonas objeto de estudio. Como cabría esperar, la temperatura máxima, 18,24 °C, se alcanzó en la zona Cádiz-Oporto. También destacar que la temperatura mínima de esta región cuya latitud inferior está próxima al continente africano, fue de 16,66 °C, sensiblemente superior a las temperaturas máximas alcanzadas en las otras dos zonas. La temperatura mínima alcanzada en las tres regiones, de 14,37 °C, se produjo hacia 1973 en el Cantábrico,

Cuadro 1: Algunos estadísticos de las temperaturas

	Oporto-Galicia	Cantábrico	Cádiz-Oporto	Medias
Desv. Típica	0,321	0,431	0,362	0,351
Media	15,27	15,41	17,49	16,06
Coef. variación	0,021	0,028	0,021	0,022
mínimo	14,48	14,37	16,66	15,18
máximo	15,95	16,18	18,24	16,76

En cuanto a la dispersión en términos absolutos (a partir de la desviación típica), la menor variabilidad se alcanza en la zona Oporto-Galicia con 0,32 °C, siendo la mayor en el Cantábrico con 0,43 °C pero, en términos relativos, en Oporto-Galicia y Cádiz-Oporto ofrecen la misma variación, 2,1 por ciento, sensiblemente inferior a la zona del Cantábrico que se eleva al 2,8 por ciento.

## 2.2. Biomasa y capturas en la pesquería

De los datos utilizados del recurso pesquero, la serie de valores en toneladas de la biomasa de reproductores y las capturas, que abarca el periodo 1978-2005<sup>1</sup>, observamos una reducción de las capturas y una importante variabilidad de la biomasa del recurso. Así según el comportamiento del stock de peces durante el periodo de referencia, las fluctuaciones de biomasa son significativas. Sin embargo las capturas de las flotas española y portuguesa se han visto reducidas constantemente, sobre todo a partir de la incorporación de ambos países a la CEE. Este hecho parece ser sólo circunstancial, ya que aunque la Política Común de Pesca se transfirió de cada estado a la Comisión Europea, este recurso no ha sido objeto de legislación comunitaria para el control de esfuerzo o de capturas, sino que cada país ha seguido regulando esta pesquería en su litoral.

En la Figura 2 representamos la evolución de los valores de biomasa y capturas durante estos años. En este mismo gráfico reflejamos también las tendencias lineales de ambas variables, que vienen dadas por las ecuaciones (denotamos como *SSB* a la biomasa de reproductores y *H* a las capturas desembarcadas en los puertos de la península)

$$SSB = 12148749 - 5860 t$$

$$H = 8922543 - 4408 t,$$

<sup>1</sup>Report of the Working Group on the Assessment of Mackerel, Horse Mackerel, Sardine and Anchovy, Galway, Ireland, 5- 14 September 2006 (ICES CM 2006/ACFM:36).

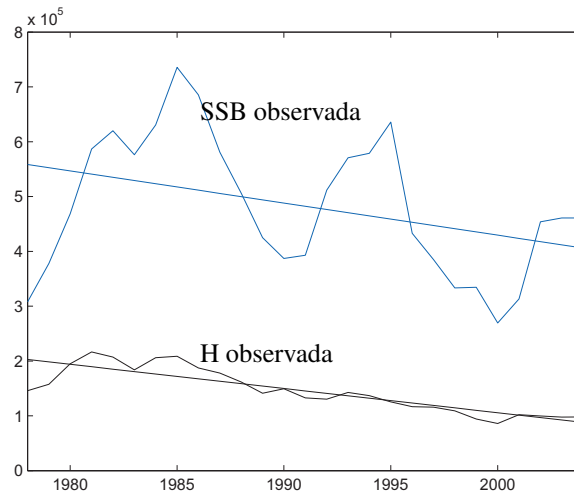


Figura 2: valores de biomasa y capturas observadas

de donde deducimos que la biomasa decrece más rápidamente, en tendencia, que las capturas. Estamos diciendo, por lo tanto, que anualmente en promedio el stock y las capturas de peces se reduce en 5860 y 4408 toneladas, respectivamente. Además, observamos una componente cíclica en la evolución de la biomasa, con tres ciclos, que parecen ir suavizándose con el paso del tiempo.

### 2.3. Relaciones entre la biomasa, las capturas y la temperatura superficial del mar

Antes de estimar las estructuras funcionales que integraremos en el modelo aplicado a la pesquería de la sardina, representaremos algunos estadísticos para las series de datos que disponemos. En epígrafes anteriores, hemos representado la variable temperatura superficial del mar como  $SST$ , la biomasa del recurso o nivel de stock del mismo por  $SSB$  y el nivel de producción o nivel de capturas por  $H$ . Las muestras que estamos utilizando en este trabajo constan de: 46 datos para  $SST$  (1960-2005), 28 datos para los valores de  $SSB$  y  $H$  (serie 1978-2005), 17 datos de esfuerzo pesquero para la muestra de 4 puertos españoles (1988-2005) y el total de puertos portugueses para el mismo periodo.

Las altas correlaciones están en consonancia con lo que creemos que implica el calentamiento global sobre la productividad de los océanos, y en nuestro caso, de la pesquería de la sardina iberoatlántica. No es en absoluto despreciable la correlación negativa entre Biomasa  $SSB$  y temperatura  $SST$  con coeficiente de Pearson igual a  $-0,4692$ . Siendo incluso más alta entre las capturas  $H$  y la

temperatura superficial del mar  $SST$ , así el coeficiente anterior es de  $-0,66443$  y entre biomasa y capturas la correlación es de  $0,70262$ .

### 3. Esfuerzo de las flotas española y portuguesa

Para realizar la estimación de la función de producción de la pesquería, hemos decidido emplear los datos de esfuerzo, que denotamos por  $E$ , por barco tipo, medido en días de pesca. Recurrimos a una muestra representativa de la flota española formada por el número de mareas de los buques cerqueros que capturan sardina y tienen su base en los puertos de Vigo, Ribeira, Sada y Santoña, los datos de dicho esfuerzo han sido facilitados por el IEO. Queremos resaltar que ICES utiliza estos mismos puertos como representativos del conjunto de la flota española que opera en la pesquería objeto de nuestro análisis. En la Figura 3 representamos la evolución de la presión pesquera de los buques cerqueros que tienen su puerto base en los citados anteriormente.

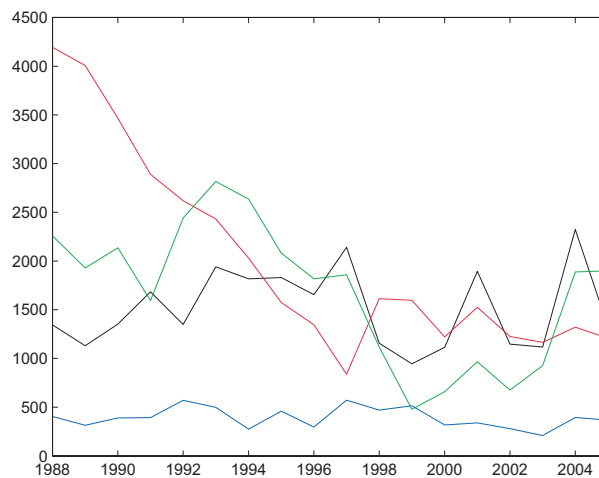


Figura 3: Esfuerzos observados en los puertos de referencia

A partir de los datos de esfuerzo y capturas desde 1988 a 2005 para estos puertos, hemos obtenido la proporción existente entre las capturas sobre las capturas anuales españolas. De esta forma, la proporción para cada año del conjunto de los 4 puertos será trasladada para la estimación anual de los esfuerzos pesqueros en el conjunto de la flota española. Además, al no disponer de algunos datos correspondientes al periodo de referencia para la muestra de esfuerzo en los puertos españoles utilizados, hemos recurrido a una interpolación lineal y así obtener estimaciones del esfuerzo. En el puerto en el que no disponemos de la serie completa,

una vez ordenados los datos según los desembarcos, elegimos los valores de los desembarcos (mayor y menor) más próximos al del esfuerzo desconocido y con estos, realizamos la combinación lineal convexa correspondiente. Así, en la Figura 4 reflejamos gráficamente las dos combinaciones lineales convexas utilizadas. Como resultado de dichas estimaciones hemos obtenido esfuerzos de 1076 y 1559 días de pesca para 2000 y 2005 respectivamente.

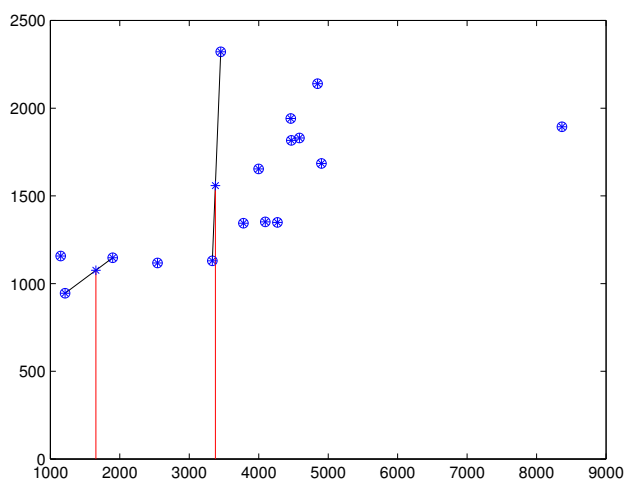


Figura 4: Estimación convexa de valores de esfuerzo no observados

Esta técnica ha sido utilizada para los Puertos de Ribeira y Santoña en los que tampoco disponíamos del total de datos del esfuerzo para la serie y cuyas estimaciones aparecen en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Esfuerzos estimados para los años sin observaciones

	1988	1999	2000	2005
Vigo			1076	1559
Ribeira			659	1899
Santoña	405	516	318	368

Para la flota portuguesa usamos los datos de esfuerzo pesquero, expresados en días de pesca, facilitados por el Instituto Nacional de Agricultura y Pesca de Portugal (IPIMAR). Por supuesto, asumimos que existe total homogeneidad entre las flotas de los dos Estados de la U.E. Finalmente, calculamos el total de esfuerzo



que corresponde al conjunto de la flota de los dos países, cuyos valores se recogen en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Estimación del esfuerzo total a partir de los datos

Año	SSB	Capturas	Esfuerzo
1988	519120	161531	47889
1989	437032	140961	43555
1990	398049	149429	49359
1991	404135	132587	43773
1992	523878	130250	49988
1993	583768	142495	47079
1994	591399	136582	39767
1995	648862	125280	35936
1996	441428	115814	34199
1997	391637	108924	34882
1998	337598	108924	36050
1999	337627	94091	33536
2000	270662	85785	30815
2001	309425	101957	27302
2002	437401	99672	31617
2003	439777	97831	29519
2004	444147	98020	30451
2005	385976	97345	33110

Fuente: Elaboración propia a partir de IEO (2008) y de IPIMAR

## 4. Parámetros económicos

En el modelo que utilizaremos en la sección 5, necesitaremos los valores del precio del pescado y el coste unitario del esfuerzo pesquero. Estos parámetros económicos habitualmente se asumen como fijos durante el periodo de análisis.

Para la estimación del precio medio del pescado desembarcado en los puertos, que denotamos por  $p$ , utilizamos los precios corrientes de primera venta facilitados por la plataforma tecnológica del gobierno gallego y los facilitados por el INE portugués. Aplicando el deflactor del PIB con base 2005 de cada Estado como índice, hemos transformado los precios nominales de cada año a moneda constante de 2005. Una vez eliminada la inflación general en el precio corriente del pescado, calculamos un índice de precios ponderado por las cantidades desembarcadas en

cada periodo. De esta forma, obtenemos un precio medio como estimación del precio constante de la sardina de 665,48 € por tonelada en primera venta.

En relación a los costes unitarios del esfuerzo pesquero, que denotamos por  $w$ , hemos asumido un coste unitario del esfuerzo de 912,468 €, como resultado de calcular la media aritmética entre los costes reales para los años de la serie comprendida entre 1999 y 2004. Como fuente para la obtención de estos datos hemos utilizado la información recogida en los anuarios publicados por la Comisión Europea (Economic performance of selected European fishing fleets)

Para la estimación del factor de descuento, consideramos el tipo de interés real de los bonos del Estado a 10 años, A partir de un tipo de interés medio entre los años 1999 y 2005, que aproximadamente fue del 5% ,  $r = 0,05$  y utilizando la relación  $\delta = \ln(1 + r)$ , resulta una tasa instantánea de descuento  $\delta = 0,049$ .

Todas estas estimaciones sobre precios y costes para los parámetros del modelo deberán ser tomados con cautela ya que pueden distorsionar los resultados de las otras estimaciones más potentes que hemos realizado sobre la biomasa del recurso y sobre la función de capturas, ya que el rango de datos que estamos utilizando es significativamente menor en estos casos.

## 5. Modelo bioeconómico

Hemos tenido en cuenta que el calentamiento global puede influir en el rendimiento económico de las pesquerías fundamentalmente a través de dos factores:

1. El impacto del calentamiento global sobre la productividad biológica de las reservas de peces, al que nos referiremos como el “impacto directo”.
2. El impacto del calentamiento global sobre el resto de la economía y, por lo tanto, sobre los precios reales de entrada y salida a los que se enfrentan las industrias pesqueras, nos referimos a éste como el “impacto indirecto”

en este trabajo estudiamos el impacto directo, dejando para estudios posteriores la integración de ambos y el consiguiente análisis a nivel macroeconómico del efecto del cambio climático.

Para un análisis más exhaustivo del que estamos realizado en este trabajo, necesitaríamos tres componentes fundamentales para describir el impacto directo del cambio climático sobre la pesquería;

1. Referido al calentamiento global en sí. Utilizando los distintos escenarios

factibles que se puedan realizar como consecuencia del aumento de la temperatura superficial del mar.

2. Los efectos sobre la disponibilidad de las reservas de peces. Analizando cómo reacciona la biomasa del recurso ante shocks en alguna de las variables ambientales como la temperatura superficial del mar.
3. Influencia de la disponibilidad de dichas reservas sobre la producción neta de la pesquería y, por lo tanto, sobre su rendimiento económico.

A continuación, Intentaremos concentrar alguna de estas componentes mediante expresiones conjuntas de forma simple, para ello asumiremos que el ecosistema marino está constituido por una única especie, en nuestro caso la sardina y controlaremos los escenarios de alteraciones en el ecosistema marino dentro de la pesquería.

## 5.1. Modelo teórico

Denotamos el crecimiento biológico de esta especie mediante la función de crecimiento  $G(X, z)$ , donde  $X$  es la biomasa y  $z$  es un vector de variables medioambientales que puede incluir diversos factores que caracterizan un hábitat o ecosistema. Entre estos factores se encuentran las corrientes marinas, salinidad, afloramientos, procedencia de los vientos, temperatura del mar, etc. Y dado que estas variables medioambientales están fuertemente relacionadas entre sí, hemos considerado que la temperatura superficial del mar podría ser la representativa de las condiciones ambientales, así su variabilidad recogería los impactos del calentamiento global sobre la dinámica del recurso analizado.

Por comodidad de notación en el modelo matemático, la biomasa o stock de recurso que hemos denotado en secciones anteriores mediante  $SSB$ , será denotada en lo que sigue por la variable  $X$ , y la variable temperatura que ha sido denotada por  $SST$ , pasará a ser  $T$ .

De esta forma la función de crecimiento natural de la biomasa quedará explícitamente definida mediante  $G(X, T, t)$ , esto es, una función de la biomasa y de las condiciones climáticas ambientales, expresadas por la temperatura superficial del agua,  $T$ .

Consideramos además, que la dinámica de la biomasa viene definida por la siguiente expresión determinista

$$\frac{dX}{dt} = G(X, T, t) - H. \quad (1)$$

En este capítulo utilizamos un problema clásico a través de un modelo de optimización dinámica en tiempo continuo con horizonte temporal infinito, consideramos que la evolución del stock natural se está definiendo como una ecuación diferencial determinista. Además, suponemos que la producción en la pesquería es una función Cobb- Douglas, a la que en principio no exigimos rendimientos a escala específicos. Como argumentos de esta función de producción: el factor trabajo (viene determinado por el esfuerzo pesquero y que denotamos como  $L$ ) y el capital en el sector productivo (está representado por el stock de peces  $X$ ). De esta forma, el modelo matemático de optimización, se expresa mediante

$$\begin{aligned} \text{máx } E \left\{ \int_0^{\infty} e^{-\delta t} [pH(t) - \omega L(t)] dt \right\} \\ \text{s.a. : } dX = (G(X, T, t) - H(t))dt \end{aligned} \quad (2)$$

$$H_t = \alpha X_t^{\beta_1} L_t^{\beta_2} \quad (3)$$

$$X(t) \geq 0.$$

En este problema de optimización dinámica aplicado a la gestión de la pesquería, la variable de control refleja las capturas ejercidas por el total de la flota (portuguesa y española) y la variable de estado representa el stock o biomasa del recurso. El conjunto factible o conjunto de restricciones está formado por la ecuación de estado que describe el comportamiento temporal de la variable de estado, ecuación (1), y la función de producción de la pesquería, ecuación (3), además de las condiciones para la biomasa, que en ningún momento puede ser negativa.

## 5.2. Estimaciones econométricas

Para la obtención de las estimaciones de la estructura de la dinámica del recurso se ha utilizado los datos de capturas y biomasa desde 1978 hasta 2005. El stock de sardina que los científicos marinos han estimado para 2006 es significativamente superior al de los años anteriores (un 110,47 % superior al de 2005) por lo que finalizamos la serie de datos en 2005, por la influencia negativa en las estimaciones realizadas del dato, probablemente atípico, de biomasa en 2006.

Hemos ensayado con diversas estructuras para la dinámica del stock de la pesquería, habiendo incluido la temperatura superficial del mar como variable explicativa en todas ellas. Para seleccionar la función de la dinámica del recurso

utilizamos el coeficiente de determinación, el coeficiente ajustado que, junto con los estadísticos *A.I.C. de Akaike* y *S.C. de Schwarz*, nos han permitido seleccionar el modelo más apropiado. El modelo estimado que posee mayores coeficientes de determinación y menores errores de predicción al tener menores *A.I.C. de Akaike* y *S.C. de Schwarz*, ha sido estimado,

$$\ln[\widehat{X_{t+1}} + H_t] = 6,127 + 1,0158 \ln X_t - 0,028674T_t \ln X_t$$

$$(1,22) \quad (0,1025) \quad (0,00625)$$

$$R^2 = 0.8068 \quad \bar{R}^2 = 0,7907$$

$$A.I.C. \text{ de Akaike} = 0.1465 \cdot 10^{-1} \quad S.C. \text{ de Schwarz} = 0,16919 \cdot 10^{-1},$$

los errores estándar aparecen entre paréntesis, bajo cada estimación del parámetro respectivo.

Por lo tanto, la estructura de la dinámica del stock que estimamos es

$$\widehat{X}_{t+1} = 458,1057 X_t^{1.0158 - 0,028674T_t} - H_t.$$

Utilizamos esta ecuación para construir la estructura que representa el crecimiento natural neto de la población de sardina iberoatlántica,

$$\frac{dX}{dt} = (458,1057 X_t^{1.0158 - 0,028674T_t} - X_t) - H_t. \quad (4)$$

Por otra parte, para la función de capturas utilizamos una función de producción de tecnología neoclásica en la que los inputs productivos son el nivel de biomasa y el esfuerzo pesquero y el output está representado por las capturas de la flota que opera en la pesquería. En este sentido, la regresión estimada para la función de producción en la que podemos asumir homogeneidad de grado uno, se puede expresar a partir de la siguiente transformación lineal estimada por MCO, el la que los errores estándar aparecen entre paréntesis

$$\ln \frac{\widehat{H}_t}{X_t} = 0,63381 + 0,78773 \ln \frac{L_t}{X_t}$$

$$(0,2097) \quad (0,08563)$$

Estimamos, de esta forma, la función de producción para el conjunto de la pesquería iberoatlántica a través de la siguiente expresión, en la que hemos aceptado rendimientos a escala constantes para la producción pesquera.

$$\hat{H}_t = 1,8848 \cdot X_t^{0,21227} L_t^{0,78773}. \quad (5)$$

### 5.3. Solución del modelo

Utilizando las estimaciones econométricas para las estructuras de crecimiento de la biomasa y de la tecnología pesquera, ecuaciones (4) y (5), podemos despejar la variable esfuerzo en la función de producción y sustituirla en la función objetivo, con lo que el problema de optimización (2) se simplifica notablemente,

$$\begin{aligned} \text{máx } E \left\{ \int_0^\infty e^{-\delta t} \left[ p H(t) - \omega \frac{1}{\alpha^{\frac{1}{\beta_2}}} X(t)^{\frac{-\beta_1}{\beta_2}} H(t)^{\frac{1}{\beta_2}} \right] dt \right\} \\ \text{s.a. : } dX = [aX(t)^{b+cT(t)} - X(t) - H(t)]dt \\ X(t) \geq 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Por el principio del máximo de Pontryagin, se establecen las condiciones de optimalidad del problema. Además exigiendo que el equilibrio sea estacionario, se obtiene la condición del equilibrio a partir de la ecuación

$$\begin{aligned} \beta_1 A X_t^{-\frac{\beta_1+\beta_2}{\beta_2}} (aX_t^{b+cT} - X_t)^{\frac{1}{\beta_2}} + \\ + \left[ p - A X_t^{-\frac{\beta_1}{\beta_2}} (aX_t^{b+cT} - X_t)^{\frac{1-\beta_2}{\beta_2}} \right] [a(b+cT_t)X_t^{b+cT-1} - 1 - \delta] = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

donde  $A = \frac{\omega}{\beta_2 \alpha^{\frac{1}{\beta_2}}}$ .

Según esta ecuación, el valor óptimo de la biomasa del recurso se resuelve en función de la variable temperatura. Por lo tanto, los resultados numéricos dependerán del nivel de temperatura del agua superficial del mar.

## 6. Solución numérica

Utilizando la ecuación (7) hemos construido un M-archivo en MATLAB que nos permite resolver esta ecuación utilizando los parámetros estimados en la sección 5.2 para las funciones utilizadas. La solución del problema vendría representada por la biomasa de sardina en la pesquería dependiente de la temperatura superficial del mar, la cual es variable exógena del modelo. Conseguimos soluciones numéricas de la biomasa óptima, recurriendo a diversas condiciones de la variable ambiental. Partimos de escenarios en las condiciones medioambientales en los que la dispersión de las temperaturas se amplía, extendemos los valores observados para aumentar la selección de condiciones climáticas (utilizamos intervalos de 0,2°C). Los valores resultantes para algunas temperaturas más bajas de las observadas aparecen en el Cuadro 4

Cuadro 4: envolvente óptima de biomasa y capturas

SST	SSB óptima	H óptima
12,00	60346,39	684705,60
12,20	47717,73	550500,69
12,40	37996,47	445848,68
12,60	30456,39	363608,11
12,80	24565,87	298502,02
13,00	10792597,36	4466645,35
13,20	8246672,87	3468057,86
13,40	6354480,85	2714868,23
13,60	4935855,54	2141920,76
13,80	3863389,69	1702530,73
14,00	3046143,22	1362942,08
14,20	2418624,99	1098533,44
14,40	1933267,30	891195,81
14,60	1555237,22	727503,18
14,80	1258826,58	597424,99
15,00	1024918,49	493412,14

Fuente: Elaboración propia

De estos valores podemos deducir que, para nuestro modelo, las condiciones óptimas de temperatura para un tipo de especie dentro de los pequeños pelágicos, como es la sardina iberoatlántica, se encuentran a partir de los 12,9°C aproximadamente, donde se observa el pico de biomasa óptima. En estas condiciones ambientales tenemos una cantidad de recurso de 12387198 toneladas, valor muy

superior a los que se han venido observando para el periodo en el que se tiene referencias de biomasa de sardina.

Cuadro 5: biomasa y capturas óptimas y observadas

SST	SSB óptima	H óptima	año	SSB obs.	H obs.
15,73	506868,94	256704,97	1986	685533	187363
15,81	471164,85	239920,24	1978	307774	145609
15,84	458524,93	233957,72	1980	468347	194802
15,86	450314,08	230078,50	1991	392956	132587
15,88	442271,26	226273,99	1993	570797	142495
15,89	438311,64	224399,23	1981	586656	216517
15,91	430513,67	220703,73	1979	378214	157241
16,02	390365,31	201602,45	1983	576243	183837
16,06	376843,85	195139,52	1983	576243	183837
16,07	373547,99	193561,77	1982	620007	206946
16,08	370285,16	191998,89	1987	580749	177696
16,12	357556,94	185892,90	1985	735984	208439
16,13	354453,86	184402,01	1988	505939	161531
16,24	322284,74	168891,11	2002	454104	99673
16,32	300990,91	158564,79	1996	432842	116736
16,36	290953,53	153679,60	2004	460934	98020
16,41	278943,76	147818,77	2000	269237	85786
16,45	269745,72	143318,02	1995	635908	125280
16,48	263076,06	140047,65	2001	313035	101957
16,49	260895,19	138977,03	2005	388246	97345
16,50	258735,12	137915,98	1999	334507	94091
16,61	236285,33	126849,94	1990	387004	149429
16,62	234358,22	125896,61	1989	425164	140961
16,64	230558,13	124015,08	1998	333210	108924
16,76	209195,62	113395,11	1997	384981	115814
15,81	471164,85	239920,24	1984	630815	206005
16,08	370285,16	191998,89	1994	578776	136582
16,62	234358,22	125896,61	2003	460893	97831

Fuente: Elaboración propia

En todo caso notar que los óptimos obtenidos en esta tabla y los valores observados son similares en el intervalo de temperaturas entre 15,7 y 16 grados centígrados (obsérvese la Figura 5 y el Cuadro 5). Los datos confirman que la especie de sardina de la zona objeto de estudio, se desarrolla en unas condiciones óptimas



de temperatura inferiores a las que se han registrado en los últimos años, lo que parece indicar que el incremento de la temperatura superficial del mar perjudica el desarrollo de esta especie.

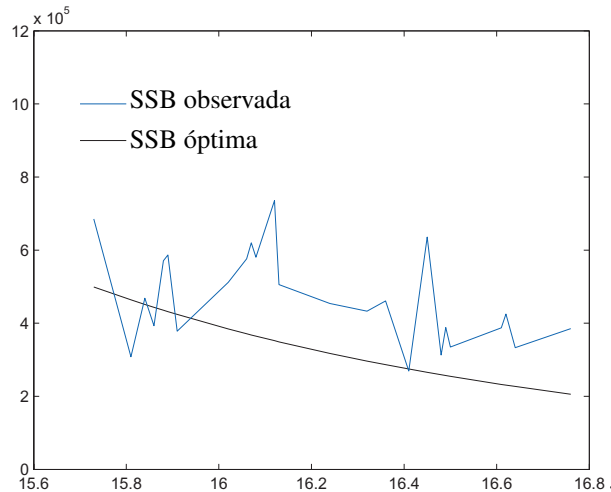


Figura 5: gráficas de biomasa y capturas óptimas superpuestas

La Figura 5 contiene las gráficas de los valores de la biomasa de recurso observada y la biomasa óptima para el rango de temperaturas que se han registrado en el periodo de referencia. Y en la Figura 6 hemos representado las gráficas de los valores observados y estimados para las capturas de la pesquería, las capturas óptimas son significativamente mayores que las observadas, con ello se está justificando que para obtener el óptimo bioeconómico se debería pescar más de lo que se está haciendo en el periodo de referencia.

Analizando las dos figuras conjuntamente, cabe destacar que podría existir un exceso de stock en el ecosistema, que es susceptible de pescarse para mejorar los resultados de la pesquería en el largo plazo, siempre que las condiciones climáticas se comporten de modo similar en la variabilidad actual de la temperatura superficial del mar.

En el Cuadro 4, en el que hemos recogido los valores óptimos de las capturas y de la biomasa según las distintas temperatura, se observa correlación significativa entre ambas variables. La representación gráfica de estos datos y esta correlación destaca significativamente en la Figura 7, donde  $X^*(T)$  es la biomasa óptima frente a la temperatura, habitualmente denominada función envolvente de la biomasa y  $H^*(T)$  son las capturas óptimas frente a la temperatura, que también se conoce

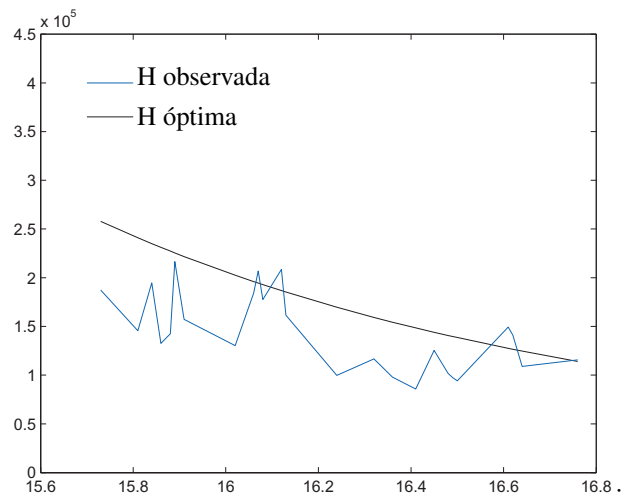


Figura 6: gráficas de biomasa óptima y observada para los niveles de temperatura como función envolvente de las capturas.

## 7. Análisis de sensibilidad ante modificaciones de los parámetros económicos

En esta sección asumimos distintos escenarios plausibles para los parámetros económicos tales como el coste por unidad de esfuerzo,  $w$ , y los ingresos por unidad de capturas,  $p$ . Analizamos cómo se alteran los resultados óptimos en la pesquería ante modificaciones para cada uno de ambos parámetros.

Desde el último periodo en el que hemos centrado el análisis de los datos muestrales, 2005, hasta la actualidad, hemos asistido a constantes alteraciones de algunos de los costes variables de las empresas pesqueras, sobre todo los costes asociados al combustible. Esto nos lleva a la conveniencia de realizar un análisis de sensibilidad de los resultados de la pesquería frente a modificaciones en el parámetro de costes.

Respecto al parámetro económico del precio del output, consideramos un análisis de variabilidad en torno al dato del precio real de una tonelada de sardina en primera venta que estamos suponiendo constante (sección 4).

Asumimos que existe estabilidad estructural en la relaciones de las variables del modelo bioeconómico, lo que justifica el estudio de distintos escenarios para los parámetros económicos. Partiendo de que el coste unitario del esfuerzo medio

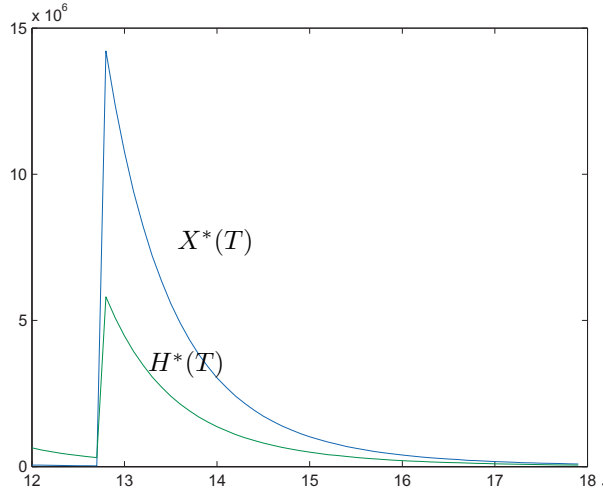


Figura 7: envolventes de biomasa y capturas

observado en el periodo objeto de estudio es  $w = 912.47$ , analizamos los valores óptimos,  $X^*(T, w)$ , para distintos valores de  $w$  entre 750 y 1000 unidades monetarias. El resultado se recoge en la Figura 8. Como podemos observar en esta figura, la función  $X^*(T, w)$  es estrictamente decreciente en la variable temperatura y, además, es independiente de los distintos valores del coste del esfuerzo a partir de  $\max_T X^*(T, w_0)$ , para algún  $w_0 \in [750, 1000]$ .

Es decir, para temperaturas superiores a aquellas donde se alcanza este valor máximo las envolventes de la biomasa coinciden. De otra forma, dados  $w_1 < w_2$  sean  $T_1$  y  $T_2$  tales que

$$X^*(T_i, w_i) = \max_T X^*(T, w_i), \quad i = 1, 2,$$

entonces

$$X^*(T, w_1) = X^*(T, w_2), \quad \text{para todo } T \geq T_2.$$

El solapamiento de las gráficas de la Figura 8 indica que las variaciones del coste del esfuerzo no influyen en la biomasa óptima a partir de cierto valor de la temperatura superficial del mar, que coincide justo en el punto en el que la biomasa óptima alcanza su mayor nivel para cada coste de esfuerzo. Podemos establecer entonces, una única curva de envolvente de la biomasa para los distintos valores de coste unitario del esfuerzo que se representa en la Figura 9, que denotamos por  $SSB^*$ .

Los datos del Cuadro 6 se corresponden con esos valores máximos de stocks dependientes de la temperatura superficial del mar. De los mismos deducimos que

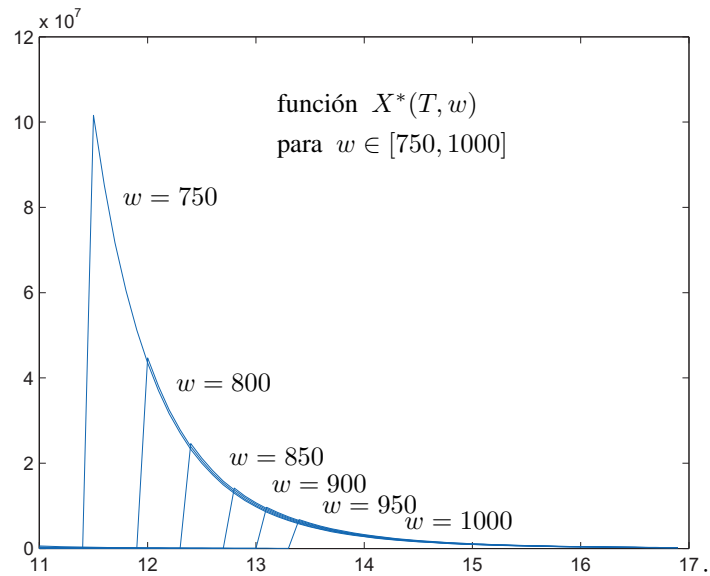


Figura 8: Biomasa óptimas superpuestas para distintos costes del esfuerzo

la biomasa óptima se reduce a medida que aumenta la temperatura para cualquier valor del coste.

Cuadro 6: Mayores valores de biomasa óptima y temperaturas asociada a ellos

SST	SSB*
11.2	174036815
11.5	100674204
11.8	59956997
12.1	36679311
12.4	23002598
12.7	14760781
13.0	9676042
13.3	6469775
13.6	4406470
13.9	3053256
14.2	2149880
14.5	1536718
14.8	1114016
15.1	818329
15.4	608635
15.7	457993

16.0	348448
16.3	267869
16.6	207951
16.9	162937
17.2	128790
17.5	102647
17.8	82456

Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro 7 se recogen para cada valor del coste de esfuerzo, el valor de la temperatura en la que se alcanza el máximo resultado de la envolvente de biomasa y que coincide con los "picos" de cada una de las envolventes de la Figura 8. Podemos observar que este máximo está lejos de los valores observados, lo cual justifica el carácter decreciente de cada una de estas envolventes para temperaturas similares a las observadas en los últimos años.

Cuadro 7: Coste y temperatura en el máximo de la biomasa óptima

Coste de esfuerzo	Temperatura
750.00	11.5
800.00	12.0
850.00	12.4
900.00	12.8
950.00	13.1
1000.00	13.4

Por ejemplo, para un coste del esfuerzo  $w = 950$ , valor muy próximo al utilizado en nuestro análisis,  $T=13,1^{\circ}\text{C}$  es la temperatura en la que se maximiza la envolvente de la biomasa y, en estos valores,  $X^*(13.1, 950) = 9569495$  toneladas, lo cual está muy lejos de las biomásas observadas, véase Cuadro 5. De aquí se puede inferir que las condiciones ambientales idóneas para obtener resultados óptimos, elevados en volumen de biomasa, en la pesquería debe ser con temperaturas inferiores a  $15,73^{\circ}\text{C}$ .

Estamos trabajando con un rango de temperaturas muy amplio, entre las cuales los primeros datos son muy bajos y coinciden con los valores más altos de las biomásas óptimas. Esto hace que los resultados de dichas biomásas sean excepcionalmente elevados respecto a los registrados en las observaciones. Los valores de temperatura superficial más próximos a los registrados conllevan máximos de bio-

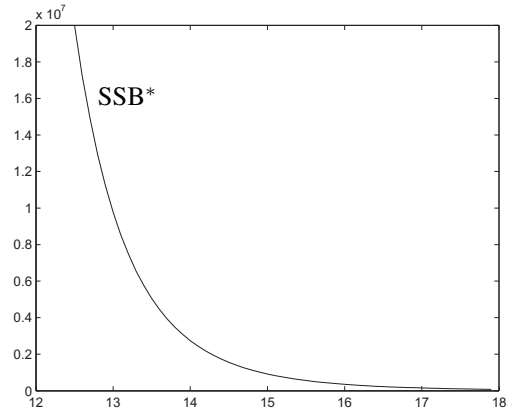


Figura 9: Biomasa óptima para el menor coste de esfuerzo utilizado

masa óptima significativamente menor a los máximos registrados en temperaturas por debajo de  $15.73^{\circ}\text{C}$

Para cada coste del esfuerzo, existe una temperatura en la que la biomasa óptima alcanza su máximo, que hemos denotado como  $SSB^*$ . Utilizando los datos del Cuadro 7, hemos realizado un ajuste cuadrático para conocer la relación entre estas variables. El ajuste es

$$T = -10^{-5}w^2 + 0.025w - 1.65,$$

por lo que podemos escribir la función envolvente bajo la forma

$$X^*(T) = \begin{cases} SSB^* & \text{si } T \geq -10^{-5}w^2 + 0.025w - 1.65 \\ 0 & \text{se } T < -10^{-5}w^2 + 0.025w - 1.65 \end{cases}$$

Si el análisis de sensibilidad lo realizamos respecto a variaciones en el parámetro del precio por tm de sardina. Los efectos son opuestos a los ocurridos sobre los resultados óptimos de la pesquería alterando el coste, ya que la función objetivo es creciente respecto a este parámetro (contrariamente al carácter decreciente de la función de la corriente de beneficios respecto a los costes unitarios).

Las envolventes de precios, se solapan desde el mayor de los precios hasta el menor de la serie utilizada, justo al contrario de lo que ocurre con las variaciones en el parámetro de los costes unitarios.

## 8. Conclusiones

El océano es uno de los grandes aliados de la humanidad frente las alteraciones en los ecosistemas locales que puede provocar el cambio climático, cumple un papel fundamental en la estabilización del clima. La alteraciones en las condiciones ambientales a nivel regional podrían significar pérdidas relevantes en la actividad pesquera que se desarrolla en estas zonas. Tanto los sucesos climáticos globales como locales repercuten en los ecosistemas regionales. Aunque resulta muy difícil aislar tales efectos, se pueda aproximar una valoración sobre los resultados de la pesquería.

El efecto de las alteraciones medioambientales asociadas al cambio climático se incorpora a través de las oscilaciones de la temperatura superficial en el mar y sus repercusiones en el crecimiento neto del recurso marino. A partir de las estimaciones para las funciones de producción y de evolución de la biomasa del recurso pesquero, hemos observado que la temperatura superficial del mar es una de las variables que condicionan la evolución del stock en la pesquería iberoatlántica de sardina, por lo que repercute directamente sobre los resultados económicos de la misma.

Las condiciones óptimas de temperatura para la sardina iberoatlántica, según nuestro análisis, se encuentran a partir de los 12,9 °C aproximadamente, donde se observa el pico de biomasa óptima y una cantidad de recurso de 12387198 toneladas, valor muy superior a los que se ha venido muestreando en el periodo en el que se tiene referencias de biomasa de sardina. Probablemente como la temperatura superficial del mar en la que se alcanzarían estos valores óptimos es significativamente inferior a las temperaturas medias que se han registrado en el periodo que de 1960 a 2005 (inferiores a 15.73°C), el stock observado es también menor a los máximos obtenidos en nuestro modelo de gestión estimado. Según esto las temperaturas registradas de los últimos 48 años está muy por encima de las que serían preferibles para obtener los mejores resultados de producción óptima pesquera. Con lo que los incrementos previstos en la temperatura no vendrían más que a acentuar la reducción de los stocks óptimos en la pesquería y la necesidad de aumentar las capturas (las óptimas están muy por encima de la biomasa de sardina capturada en los últimos años).

En cuanto al análisis de las variaciones del coste del esfuerzo, estas parecen que no influyen en la biomasa óptima, si tenemos en cuenta los valores de temperatura observados en los últimos tiempos, por lo que no influye sobre stock optimo de la pesquería. Ocurre lo mismo en sentido contrario con la variaciones en el precio de venta del bien, cuanto mayor es la temperatura menor es el precio al que la biomasa óptima alcanza su valor más elevado.

## Referencias

- [1] ACIA. *Artic climate impacts asseement: Overview Report*. Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- [2] J. Adda and R. Cooper. *Dynamic Economics: Quantitative Methods & Applications*. MIT Press, Cambridge, 2003.
- [3] R. Arnason. *Climate Change and Fisheries: Assessing the Economic Impact in Iceland and Greenland*. Workshop on Economics Effects of Climate Change on Fisheries, Bergen, 2006.
- [4] R. Arnason. *Global warming, small pelagic fisheries and risk*. Workshop on Economics Effects of Climate Change on Fisheries, Bergen, 2006.
- [5] D. Bertsekas. *Dynamic programming and optimal control*. Athena Scientific, Massachusetts, 1995.
- [6] T. Bjorndal, D. Gordon, R. Arnason, and R. Sumaila. *Advances in Fisheries Economics*. Blackwell, Oxford, 2007.
- [7] C.W Clark. *Mathematical bioeconomics : The optimal management of renewable resources*. John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [8] M. Domínguez. *La gestión de recursos pesqueros en el marco de la Política Común de Pesca: Análisis de la Cooperación*. Tesis Doctoral, Universidad de Vigo, Vigo, 2003.
- [9] COMISION EUROPEA. *Economic performance of selected European fishing fleets*. Annual Report, Bruselas, varios años.
- [10] Pestana. G. *Mannacial Ibero-Atlántico de sardiha. Sua avaliaçao e medidas de gestao*. Instituto Nacional de Investigaçao das Pescas, Lisboa, 1989.
- [11] C. Gallastegui. *An economic analysis of sardine in the Gulf of Valencia (Spain)*. Journal of Environmental Economics and Management (10), 1983.
- [12] J.L. Guerra and A. Sánchez Lizaso. *Fundamentos de explotación de recursos vivos marinos*. Acribia, Zaragoza, 1998.
- [13] R. Hannesson. *Bioeconomics analysis of fisheries*. Fishing News Books, Blackwell, Oxford, 1993.



- [14] R. Hannesson. *Sharing the herring: fish migrations, strategic advantage and climate change. Climate change and the economics of the world's fisheries.* Ed. Edward Elgar Publishing, 2006.
- [15] R. Hannesson, Samuel F. H. Jr., and M. Barange. *On the consequences of climate change in pelagic fish populations: a conclusión. Climate change and the economics of the world's fisheries.* Ed. Edward Elgar Publishing, 2006.
- [16] R. Hilborn and C.J. Walters. *Quantitative fisheries stock assessment: Choice, dynamics and uncertainty.* Chapman and Hall, New York, 1992.
- [17] ICES. *Report of the Working Group on the assessment of mackerel, horse mackerel, sardine and anchovy. 5-14 September 2006.* ICES, Copenhagen, 2006.
- [18] ICES. *Report of the Workshop on the Integration of Environmental Information into Fisheries Management. Strategies and Advice, (anexe 6), 2007.*
- [19] S. Jablonski and L. F. Loureiro. *Quantifying environmental effects on the recruitment of the Brazilian sardine (Sardinella brasiliensis).* CSIC, 2008.
- [20] M. Kamien and N. Schwartz. *Dynamic optimization. The Calculus of Variations and Optimal Control in Economics and Management.* Ed. North-Holland, 1991.
- [21] L. Kenneth. *Numerical methods in economics.* MIT Press, Cambridge, 1998.
- [22] U. Labarta. *Galicia Mariñeira: Historia económica y científica en estudio y explotación del mar en Galicia.* Ed. Universidad de Santiago, Santiago de Compostela, 1979.
- [23] C. Porteiro and J.M. Cabanas. *Report of the Workshop on the Integration of Environmental Information into Fisheries Management. Strategies and Advice, (anexe 6), 2007.*
- [24] S.J Tol Richard. *Economic models for sustainable. Modelling sustainable development.* Ed. Edward Elgar Publishing, 2009.