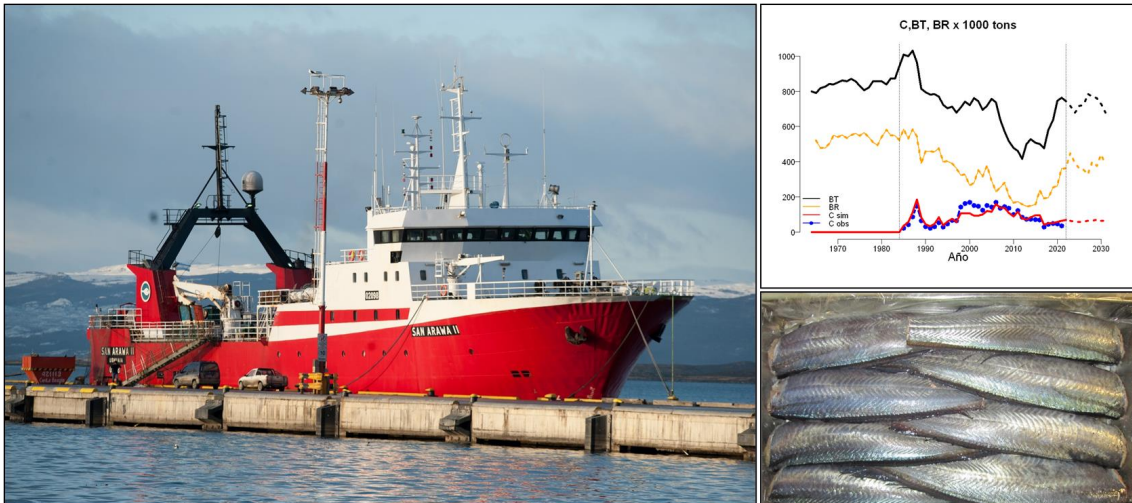


Serie: Informes científico-técnicos del Instituto
de Investigaciones Marinas y Costeras

Informe Técnico N°16

Modelado de la dinámica y predicción de la sustentabilidad de las
capturas de la pesquería de Merluza de cola argentina (*Macrurus
magellanicus*)



Autor: Marcelo J. Kittlein

Grupo de Ecología y Genética de Poblaciones de Mamíferos. Departamento de Biología. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata. Consejo Nacional de Investigaciones Científica y Técnicas (CONICET), Mar del Plata, Argentina.

Mar del Plata, julio 2023

Citar como: Kittlein, M. J.: (2023) Modelado de la dinámica y predicción de la sustentabilidad de las capturas de la pesquería de Merluza de cola argentina (*Macruronus magellanicus*). Informe Técnico solicitado por San Arawa S.A.U. Informes científico-técnicos del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras N°16 (UNMdP-CONICET). 10pp

Este informe es el resultado de un Servicio Técnico de Alto Nivel (STAN; CONICET) a la Empresa San Arawa S.A.U.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras.

ISSN 2796-9088

La utilización, redistribución, traducción y creación de obras derivadas de la presente publicación están autorizadas, a condición de que se cite la fuente original y que las obras que resulten sean publicadas bajo las mismas condiciones de libre acceso. Esta licencia se aplica exclusivamente al texto de la presente publicación. Para utilizar cualquier otro material que aparezca en ella (tal como textos, imágenes, ilustraciones o gráficos), será necesario pedir autorización a la Dirección del IIMyC iimyc@mdp.edu.ar. No está permitido utilizar el logotipo del IIMyC.

Si la obra se traduce, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la referencia requerida: “La presente traducción no es obra del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC). El IIMyC no se hace responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción. La edición original en el/los idiomas que se publique será el texto autorizado”.

Mar del Plata, julio 2023

MODELADO DE LA DINÁMICA Y PREDICCIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DE LAS CAPTURAS DE LA PESQUERÍA DE MERLUZA DE COLA ARGENTINA (*Macruronus magellanicus*)

Marcelo Javier Kittlein¹

¹Grupo de Ecología y Genética de Poblaciones de Mamíferos.

Departamento de Biología. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC).

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata.

Consejo Nacional de Investigaciones Científica y Técnicas (CONICET),

Mar del Plata, Argentina. [Correspondencia: Marcelo J. Kittlein <kittlein@mdp.edu.ar>]

RESUMEN. La pesquería de la merluza de cola argentina (*Macruronus magellanicus*) reviste una gran importancia comercial en Argentina y Chile, su distribución abarca desde los 33°S en el Pacífico hasta los 37°S en el Atlántico. En Argentina la pesca se concentra principalmente en la plataforma austral, frente a Tierra del Fuego, estrechamente relacionada con la corriente de Malvinas. Los niveles máximos de captura se registraron durante la primera década de los años dos mil, con niveles por encima de las 130 000 toneladas. Durante los últimos 15 años las capturas han disminuido notablemente, asociada a una tendencia sostenida en la disminución de los niveles de reclutamiento. Para evaluar la sustentabilidad de las capturas en los próximos 10 años se presenta un prototipo de modelo de la dinámica de la pesquería, constituido esencialmente por una población estructurada por edades, que provee valores sobre la biomasa total, biomasa reproductiva y las capturas realizadas, a partir de los datos provistos en las evaluaciones sobre el estado de la pesquería realizadas por el Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP). El prototipo simula la evolución de estas variables a lo largo de la historia de la pesquería y provee predicciones sobre la captura realizada en los próximos 10 años si se mantiene una mortalidad por pesca igual al promedio estimado en los últimos 5 años, utilizando dos tipos de escenarios para la mortalidad natural (fijo, $M = 0.35$ o variable con promedio igual a 0.35 pero con mayor intensidad en las edades iniciales y finales del ciclo de vida) y tres escenarios de reclutamiento (valores aleatorios del número de reclutas estimado en las evaluaciones previas que comprenden toda la serie temporal de la pesquería, valores aleatorios de los últimos 15 años de estas estimaciones, o por una función aleatoria del modelo Beverton & Holt con un nivel de variabilidad similar al observado en las estimaciones realizadas previamente). Las captura promedio durante los próximos 10 años se mantuvo por encima de las 40 000 toneladas en todas las combinaciones de escenarios de mortalidad y reclutamiento considerados en este estudio. Los menores valores de captura futura, biomasa total y biomasa reproductiva, se registraron para la combinación de mortalidad constante y reclutamiento aleatorio de los valores estimados durante los últimos 15 años. En todos las combinaciones evaluadas la biomasa reproductiva se situó por encima de las 200 000 toneladas, valor que corresponde al Punto Biológico de Referencia Objetivo (40% de la biomasa reproductiva virgen estimada en 500 000 toneladas) utilizado como uno de los índices de referencia en la evaluación y manejo de la pesquería. Los resultados de las predicciones de captura se discuten en relación a la variabilidad del proceso de reclutamiento y al leve incremento de la biomasa total y reproductiva estimada para los últimos 4 años en la evaluación de la abundancia del recurso. En resumen, si durante los próximos 10 años se mantuvieran las capturas a los niveles establecidos por la captura máxima biológicamente admisible recomendada en los últimos años la pesquería se mantendrá estable.

ABSTRACT. Modeling of the dynamics and prediction of the sustainability of the catches of the Argentine long-tailed hake fishery (*Macruronus magellanicus*). The Argentine long-tailed hake (*Macruronus magellanicus*) is of great commercial importance in Argentina and Chile. Its distribution ranges from 33°S in the Pacific to 37°S in the Atlantic. In Argentina, fishing is concentrated mainly in the southern shelf, off Tierra del Fuego, closely related to the Malvinas Current. The highest catch levels were recorded during the first decade of the 2000s, with levels exceeding 130 000 tons. Over the past 15 years, catches have decreased significantly, associated with a sustained trend in the decline of recruitment levels. To assess the sustainability of catches in the next 10 years, a prototype model of fishery dynamics is presented. It is essentially constituted by an age-structured population, providing values on total biomass, reproductive biomass, and catches, based on data from assessments of the fishery conducted by the National Institute of Fisheries Research and Development (INIDEP). The prototype simulates the evolution of these variables throughout the history of the fishery and provides predictions on catches over the next 10 years if fishing mortality remains at the average estimated in the last 5 years. It uses two types of scenarios for natural mortality (fixed, $M = 0.35$, or variable with an average of 0.35

but with greater intensity in the initial and final ages of the life cycle) and three recruitment scenarios (random values from previous assessments covering the entire time series of the fishery, random values from the last 15 years of these estimates, or a random function from the Beverton & Holt model with a variability level similar to that observed in previous estimates). The average catch over the next 10 years remained above 40,000 tons in all combinations of mortality and recruitment scenarios considered in this study. The lowest values of future catch, total biomass, and reproductive biomass were recorded for the combination of constant mortality and random recruitment from the estimates of the last 15 years. In all evaluated combinations, the reproductive biomass was above 200 000 tons, a value that corresponds to the Biological Point of Reference Objective (40% of the estimated virgin reproductive biomass of 500 000 tons), which is used as one of the reference indices in the assessment and management of the fishery. The results of the catch predictions are discussed in relation to the variability of the recruitment process and the slight increase in the estimated total and reproductive biomass over the last 4 years in the assessment of resource abundance. In summary, if the catches during the next 10 years are maintained at the levels established by the recommended maximum admissible yield in recent years, the fishery will remain stable.

Palabras clave: Biomasa, capturas, dinámica de poblaciones, *Macruronus magellanicus*, merluza de cola argentina, reclutamiento, simulaciones.

Key words: Biomass, captures, argentine long-tailed hake, *Macruronus magellanicus*, population dynamics, recruitment, simulations.

INTRODUCCIÓN

La merluza de cola argentina (*Macruronus magellanicus*) es una especie de la familia Merlucciidae que habita en las aguas frías de los Océanos Pacífico y Atlántico Sur; posee un cuerpo alargado y cilíndrico, con una longitud máxima de alrededor de un metro. Su color es marrón oscuro en la parte superior y plateado en la parte inferior. Tiene una cola larga y delgada, que origina su nombre común y comercial (Cousseau *et al.* 2013). Tiene una gran importancia comercial en Argentina, con la mayor parte de la actividad pesquera concentrada en la plataforma austral, frente a Tierra del Fuego, estrechamente relacionada con la corriente de Malvinas. La pesca de esta especie se realiza mediante redes de arrastre (Giussi *et al.* 2016).

La explotación más intensa de este recurso comenzó a mediados de la década de los ochenta, con capturas totales por debajo de las 40 000 toneladas hasta finales de la década de los noventa. Las capturas se incrementaron notablemente por encima de las 100 000 toneladas durante la primera década de los años dos mil. En los últimos 15 años las capturas han disminuido progresivamente estabilizándose por debajo de las 40 000 toneladas en los últimos 7-8 años (Giussi *et al.* 2022).

La importancia comercial de la merluza de cola esta basada en la producción de filetes y productos congelados para exportación. Sin embargo, en los últimos años ha habido una disminución y una mayor variabilidad en las capturas, posiblemente debido a la impredecible y variable tasa de reclutamiento. Los reclutamientos han mostrado variaciones importantes a lo largo del tiempo, alternando periodos de estabilidad y fluctuaciones, especialmente con valores altos en algunos años. Sin embargo, recientemente se observaron bajas incorporaciones de individuos, excepto aquellos nacidos durante la época reproductiva de 2015; en el año 2021 se registró el menor valor de reclutamiento estimado hasta el momento (Zavatteri y Giussi 2022).

El seguimiento del estado de la pesquería y las recomendaciones sobre los niveles de captura son llevadas

a cabo por parte del laboratorio de recursos demersales del Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP). Las evaluaciones de abundancia y las recomendaciones de captura están basadas en los registros de capturas realizadas por la flota pesquera y por las estimaciones de abundancia realizadas durante prospecciones anuales llevadas a cabo por los buques de investigación del INIDEP. Las estimaciones de abundancia se realizan mediante un modelo estadístico de captura a la edad, utilizando la serie temporal de índices de abundancia derivados de las prospecciones y capturas comerciales. El modelo contempla una serie de fuentes de incertidumbre en los parámetros estimados de modo que las estimaciones de biomasa total, biomasa reproductiva y la recomendación de las capturas son obtenidas con un rango de valores representados por los intervalos de confianza; en general asociados a una probabilidad del 95% de incluir los verdaderos valores de los parámetros e índices de interés (Giussi 2012; Zavatteri y Giussi 2022).

Como criterio de evaluación para establecer el estado de la pesquería se tiene en cuenta como Punto Biológico de Referencia Objetivo (PBRO) que la biomasa reproductiva no disminuya por debajo del 40% de la biomasa reproductiva virginal (BRV; estimado en alrededor de 500 000 toneladas). Se define además otro Punto Biológico de Referencia Límite (PBRL) en donde la biomasa reproductiva bajo ninguna circunstancia debe caer por debajo del 25% de la BRV.

La existencia de zonas reproductivas en la merluza de cola argentina no ha sido establecida con clara definición hasta el momento. Se ha sugerido un movimiento reproductivo desde el talud continental hacia las aguas costeras y diferentes áreas de desove en el Golfo San Matías y el Golfo San Jorge. Respaldan estas afirmaciones la detección de grupos de desove en el Golfo San Matías durante el invierno y en el Golfo San Jorge en primavera (Inada 1983; Perier 1999).

También se han detectado individuos en etapas avanzadas de madurez y desove en áreas ubicadas entre los

52°S y 55°S, a una profundidad mayor de 200 m, de junio a octubre; sugiriendo la existencia de pequeñas áreas reproductivas con características adecuadas para el desove y la retención de larvas y juveniles (Gorini y Pájaro 2014).

También se ha informado sobre la presencia de larvas al sur de Tierra del Fuego e Isla de los Estados, a profundidades inferiores a 200 m, que podrían considerarse como áreas de crianza, donde la eclosión ocurre a finales de octubre o principios de noviembre citepmachinandiarena1999deteccion.

La confirmación y delimitación de la presencia de diferentes áreas de desove necesita un estudio más profundo y la utilización de diferentes aproximaciones (Gorini *et al.* 2021)

Un elemento de suma importancia en la evaluación del recurso y en la predicción de futuras capturas para recomendar pautas de manejo, esta dado por la forma en que se considera la incorporación de nuevos individuos a la población. El reclutamiento, se constituye entonces en una variable esencial de muy difícil predicción, ya que las distintas aproximaciones realizadas para relacionarlo con la biomasa reproductiva previa o con variables ambientales no han tenido éxito hasta el momento. Como la renovación poblacional depende directamente del reclutamiento, si este es impredecible la anticipación de los estados de la población en el futuro y la predicción de capturas asociadas solo es posible de establecer utilizando herramientas de modelado que simulen posibles escenarios de reclutamiento y la respuesta de la pesquería a distintos niveles de esfuerzo pesquero.

La simulación es una herramienta valiosa en el manejo de los recursos pesqueros ya que permite evaluar distintos escenarios de manera objetiva y con un alto grado de precisión. Con la ayuda de modelos de simulación, los responsables de la toma de decisiones pueden predecir el impacto de las políticas y acciones propuestas antes de implementarlas, lo que les permite tomar decisiones informadas y mejorar el uso sostenible de los recursos pesqueros.

Estos procedimientos permiten ordenar la validación y el contraste de los resultados de distintos los métodos de evaluación de “stocks” y subconjuntos de información (pesquería, encuestas, crecimiento, edad, etc.) para ensayos virtuales donde se conocen los verdaderos parámetros de la población y donde se violan suposiciones comunes hechas habitualmente en las evaluaciones de “stocks”. Además, los modelos de simulación pueden ayudar a identificar problemas y desafíos a largo plazo en el manejo de los recursos pesqueros, como la sobrexplotación, la disminución de las poblaciones de peces y la degradación del medio ambiente marino. Al tener una comprensión más profunda de estos problemas y su dinámica a lo largo del tiempo, se pueden desarrollar soluciones efectivas y sostenibles para la gestión de los recursos pesqueros. Asimismo, pueden ser útiles en la evaluación de la efectividad de diferentes políticas y acciones. Por ejemplo, se pueden comparar los resultados de diferentes tamaños de cuotas de pesca o de diferentes métodos de gestión de la pesca para determinar cuál es

el más efectivo para alcanzar objetivos de conservación y gestión sostenible.

En este informe se presenta una evaluación realizada mediante simulaciones basadas en la información disponible y reportada por el INIDEP en numerosos informes técnicos. El objetivo principal consiste en reproducir, con base a esta información, la dinámica de la pesquería y evaluar la respuesta del “stock” (niveles de biomasa total, biomas reproductiva y capturas) en los próximos 10 años en un escenario en donde la mortalidad por pesca se mantenga en los niveles registrados durante los últimos 5 años de la explotación del recurso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se desarrolló un prototipo de una población hipotética estructurada por edades para realizar el seguimiento y sintetizar la evolución temporal de los niveles de biomasa y de capturas de la pesquería. La población consta de 11 clases de edad anuales. Con el prototipo se realizaron simulaciones de la dinámica de la pesquería durante un período de 68 años, comenzando en el año 1965 hasta el año 2031. Las simulaciones se realizaron en el programa R (R Core Team 2020, ver ANEXO I: PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS). Durante la primera fase de la simulación (1965 a 1984) se consideró una mortalidad por pesca igual a cero, y a partir de 1985 hasta el presente se utilizaron los valores de mortalidad por pesca estimados durante las evaluaciones del recurso realizadas por el INIDEP (Giussi 2012; Giussi *et al.* 2022). Se prolongó el horizonte de la simulación 10 años en el futuro, en el período 2022-2031 considerando una mortalidad por pesca fija e igual al promedio de los valores estimados durante los últimos 5 años de la pesquería ($F = 0.14$).

Se consideran distintos escenarios de mortalidad natural y reclutamiento. Para modelar la variación de la mortalidad natural se utilizaron dos perfiles distintos. La mortalidad natural se consideró constante en un valor fijo para todas las edades ($M = 0.35$) o variable como una función de la edad en forma de “U”, con la mortalidad más alta para las clases de edad inicial (juveniles) y finales (adultos senescentes), siendo el promedio igual al valor fijo mencionado anteriormente; ver Fig. 1.

Para la obtención de las capturas se utilizó la ecuación de Baranov (Eq. 5), en función de los valores de mortalidad natural y mortalidad por pesca en cada período. La mortalidad por pesca estimada durante las evaluaciones realizadas por el INIDEP en cada período, F , se traslada a cada clase de edad a partir de una función logística de la edad, en la que el 50% de la selectividad se produce a lo diferentes edades según la variación de las mallas de las redes utilizadas en distintos períodos de la historia de la pesquería (Fig. 2).

La renovación de la población a través de la reproducción y el posterior reclutamiento fue implementado utilizando distintas alternativas. En primer término se utilizaron las estimaciones del número de reclutas realizadas por Zavatteri y Giussi (2022), tomando valores aleatorios de las mismas en cada período. También se utilizó este muestreo pero considerando solo los últimos

15 años en los que el reclutamiento fue menor. Además, se modeló el número de reclutas al año t (R_t) a partir de la biomasa reproductiva (B_R) en el año $t-1$ utilizando la reparametrización del modelo de Beverton & Holt realizada por Francis (ver Haddon 2020)

$$R_t = \frac{4hR_0B_{Rt-1}}{B_0(1-h) + B_{Rt-1}(5h-1)} \quad (1)$$

Donde R_0 es el número de reclutas que resultan en una biomasa de equilibrio B_0 bajo un determinado nivel de mortalidad natural M . Se incorporó variabilidad en el reclutamiento multiplicando el número de reclutas obtenidos de la ecuación 1 por una variable aleatorio con distribución log-normal con media uno y coeficiente de variación del 28% y un coeficiente de autocorrelación serial $\rho_1 = 0.15$ (Fig. 4); que genera una variabilidad en el reclutamiento como la estimada en las evaluaciones de abundancia (Giussi 2012; Zavatteri y Giussi 2022).

Para la conversión del valor del número de individuos a biomasa se utilizó la función de crecimiento de von Bertalanffy, en su conversión a peso. La longitud L se modela como una función típica de von Bertalanffy, y el peso W es una función isométrica (cúbica) de la longitud (Fig. 3).

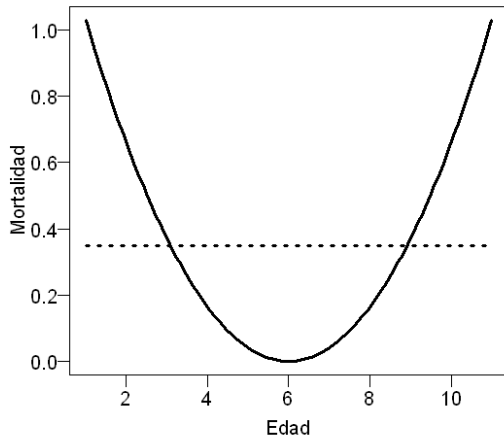


Fig. 1. Funciones de mortalidad utilizadas en las simulaciones

El peso promedio para cada edad a esta dado por la ecuación de von Bertalanffy ($W_\infty = 1800$, $k=0,24$, y $t_0=1,75$, Fig. 3).

$$W_a = W_\infty \cdot (1 - \exp(-k \cdot (a - t_0))) \quad (2)$$

La Biomasa total en toneladas, B , para cada año se obtiene por la suma del producto del número de individuos de cada edad y el peso promedio de cada edad.

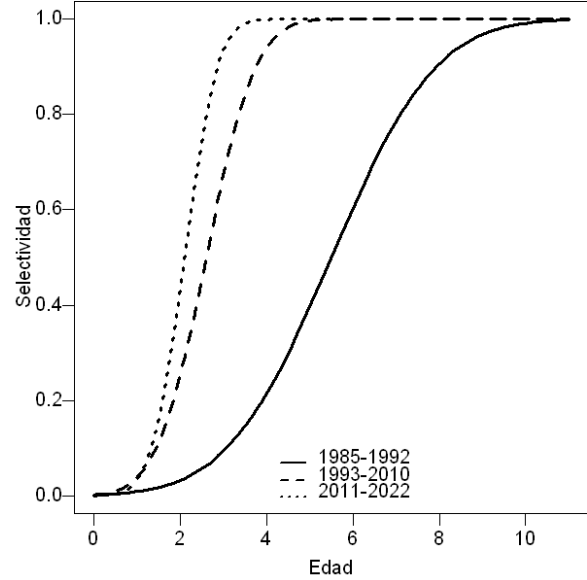


Fig. 2. Funciones de selectividad. Mortalidad por pesca en función de la edad utilizada en las simulaciones.

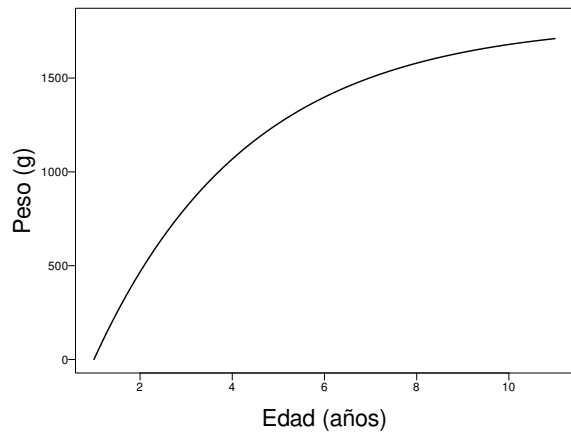


Fig. 3. Variación del peso en función de la edad según la función de von Bertalanffy con parámetros $W_\infty = 1800$, $k=0,24$, y $t_0=1,75$.

$$B = \frac{\sum_{a=1}^{a=11} N_a \cdot W_a}{1\,000\,000} \quad (3)$$

La Biomasa Reproductiva en toneladas, BR , para cada año se obtiene por la suma del producto del número de individuos de cada edad reproductiva y el peso promedio de cada edad.

$$BR = \frac{\sum_{a=4}^{a=11} N_a \cdot W_a}{1\,000\,000} \quad (4)$$

La proporción de cada edad capturada esta dada por la ecuación de Baranov, donde

$$p_a = F_a \cdot (1 - \exp(-M_a - F_a)) / (M_a + F_a) \quad (5)$$

La captura en toneladas, C , obtenida en cada año se obtiene por la suma del producto del número de individuos de cada edad, el peso promedio de cada edad, y la proporción capturada.

$$C = \frac{\sum_{a=1}^{a=11} p_a \cdot N_a \cdot W_a}{1\,000\,000} \quad (6)$$

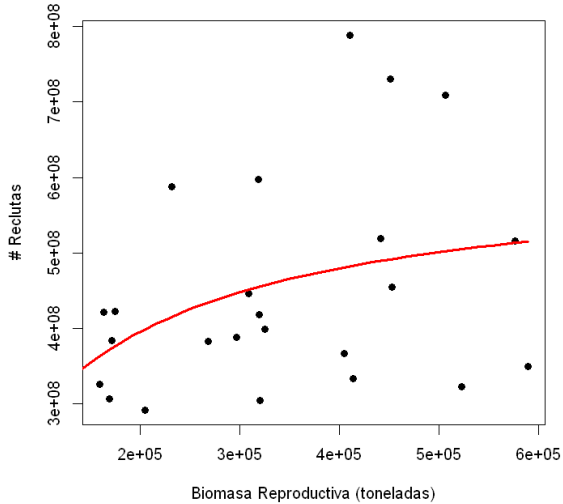


Fig. 4. Función de Beverton & Holt ajustada a los datos de número de Reclutas y biomasa reproductiva de estimados en Zavatteri y Giussi (2022).

Los parámetros utilizados para las distintas funciones utilizadas en la simulación del prototipo se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Parámetros utilizados en una población de hoki estructurada por edades para las simulaciones del prototipo.

Tipo	Relación	Parámetro	Valor
LVB	talla-edad	L_∞	90
		k	0.24
		t_0	-1.3
Isométrica	talla-peso	α	0.0106
		β	2.7025
Beverton & Holt	stock-reclutamiento	S_0	500 000
		R_0	450 000 000
		h	0.60
logística	selectividad-edad	k	5.5-2.1
		γ	1.00

RESULTADOS

En la Fig. 5 se puede ver un ejemplo de una única simulación de la evolución temporal de la biomasa total, la biomasa reproductiva y las capturas simuladas y observadas en la pesquería desde el año 1965 hasta el año 2031. El período inicial (sin pesca o con muy baja intensidad de pesca) abarca desde 1964 a 1984. A partir de 1985 hasta la actualidad se utilizaron los valores de mortalidad por pesca estimados en Zavatteri y Giussi (2022); y durante 10 años (desde 2022 a 2031) se utilizó un valor de mortalidad por pesca igual al estimado en años recientes ($F = 0.14$).

En primer término se utilizó el prototipo para simular la dinámica de la pesquería y registrar las capturas derivadas del modelo en el período 1985-2022 utilizando los tres tipos de reclutamiento, las dos formas de implementar la mortalidad y los valores de mortalidad por pesca estimados en Zavatteri y Giussi (2022). Las capturas registradas en las simulaciones se correspondieron con los reportes de capturas totales para la fase inicial (1985-1996) y final de la pesquería (2011-2021). En el período intermedio (1997-2010) los valores de capturas totales obtenidos en las simulaciones fueron menores a los observados.

Las características de las simulaciones en donde el reclutamiento se implementó a partir de valores aleatorios muestreados de los estimados por Zavatteri y Giussi (2022) se presentan en las Figs. 6A-F. La capturas obtenidas en las simulaciones realizadas con el prototipo estuvieron por encima de las registradas en los años iniciales (período 1985-1995), por debajo de las observadas 1996-2010 y nuevamente por encima de las observadas (2010-actual, Fig. 6A). El mismo patrón se observó para ambos tipos de implementación de la mortalidad natural (constante o variable).

Si restringimos la representación del reclutamiento a niveles menores correspondientes a los últimos 15 años de las estimaciones realizadas por Zavatteri y Giussi (2022) (Figs.6C y 6D), vemos que las discrepancias con los valores observados se acentúan durante los mismos períodos mencionados anteriormente. Las únicas diferencias en el modelado se relacionan con la implementación de la mortalidad natural y el reclutamiento, de modo

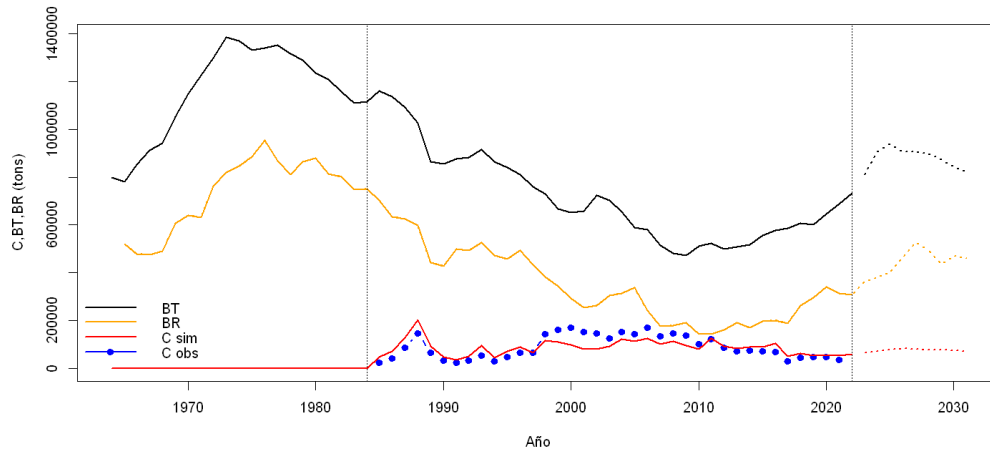


Fig. 5. Ejemplo de una simulación del prototipo utilizado para modelar la dinámica de la pesquería de merluza de cola (*Macruronus magellanicus*). Una fase inicial (1964-1984) sin pesca, es seguida por una serie anual (1985-actual) donde se ejerce una mortalidad por pesca igual a la estimada por Zavatteri y Giussi (2022). A partir del año 2022 y hasta el 2031 se ejerce una mortalidad por pesca como la estimada para los años recientes ($F = 0.14$). BT: biomasa total. BR: biomasa reproductiva. C sim: captura tota obtenida en la simulación. C obs: Captura registrada en la pesquería.

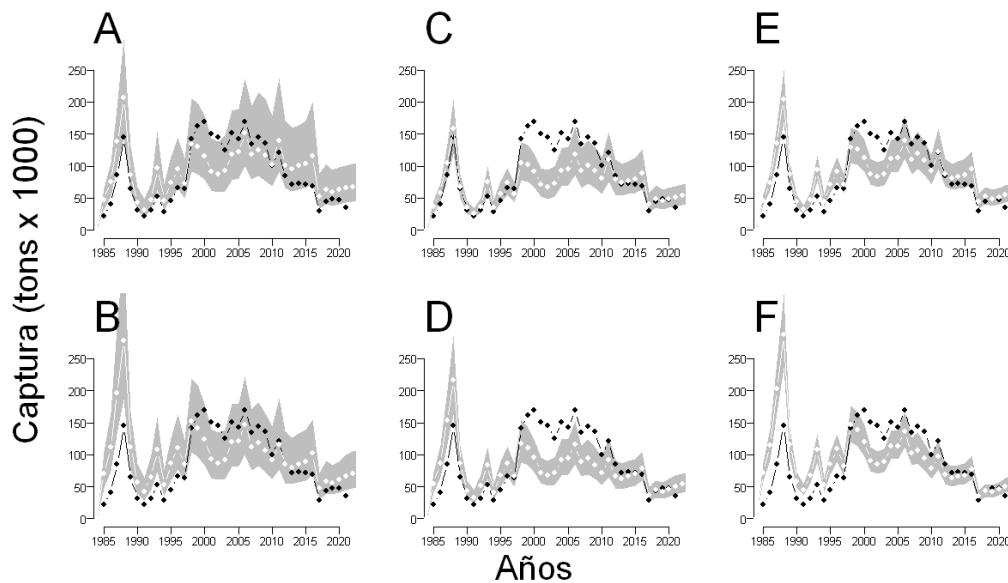


Fig. 6. Capturas totales de merluza de cola (período 1985-2021, líneas y puntos negros) registradas en la pesquería y capturas estimadas en las simulaciones (líneas y puntos blancos, en gris intervalo de confianza del 90%) utilizando los valores de mortalidad por pesca reportados por Zavatteri y Giussi (2022). Se realizaron 1000 simulaciones partiendo de una biomasa total inicial de 800 mil toneladas y considerando como reclutamiento valores tomados al azar de los estimados por Zavatteri y Giussi (2022) (A y B), o los últimos 15 años de dichos valores donde el reclutamiento fue menor (C y D), u obtenidos por el modelo de Beverton & Holt, con parámetros estimados de los datos reportados (E y F). La mortalidad natural (ver Fig. 1) se considero constante (A, C, y E) o variable (B, C, y D). El polígono gris representa la variación de las simulaciones delimitadas por el 90% de los valores en cada año. La línea blanca es la mediana de las 1000 simulaciones realizadas.

Tabla 2

Media y límites de confianza del 90% de Capturas (C, en toneladas), biomasa total (BT, en toneladas), biomasa reproductiva (BR, en toneladas), y cociente BR/BT obtenidas en 1000 repeticiones de la simulación del prototipo con distintos escenarios de reclutamiento y mortalidad Natural. Reclu 1: muestreo aleatorio de los valores totales del número de reclutas estimados en Zavatteri y Giussi (2022). Reclu 2: igual a Reclu 1 pero solo los últimos 15 años. Reclu 3: función de Beverton & Holt estimada a partir de los datos de Reclutas y BR estimados en Zavatteri y Giussi (2022). M constante ($M = 0.35$, para todas las edades. M variable (M mayor para las edades iniciales y finales); ver Fig.1.

			C (ton)	BT (ton)	BR (ton)	BR/BT
M constante	Reclu 1	Media	73021	861634	437932	0.509
		lim. Inferior	53080	632054	316557	0.506
		lim. Superior	97535	1144939	585158	0.512
	Reclu 2	Media	55415	652536	332966	0.510
		lim. Inferior	43791	517608	260320	0.503
		lim. Superior	67702	795493	407964	0.513
	Reclu 3	Media	64325	763423	381747	0.500
		lim. Inferior	53578	637847	316375	0.496
		lim. Superior	76189	901802	453703	0.503
M variable	Reclu 1	Media	77586	802489	524009	0.653
		lim. Inferior	56362	591533	377097	0.637
		lim. Superior	103762	1054811	699636	0.663
	Reclu 2	Media	58765	608430	397073	0.653
		lim. Inferior	47245	489956	316887	0.647
		lim. Superior	71590	735042	488088	0.664
	Reclu 3	Media	64777	678126	431229	0.636
		lim. Inferior	53767	568506	355605	0.626
		lim. Superior	76585	795710	511388	0.643

que las discrepancias posiblemente estén relacionadas con las estimaciones de mortalidad por pesca o las ojivas de selectividad utilizadas en las estimaciones realizadas para la evaluación de abundancia y manejo de la pesquería.

Por último si consideramos que el reclutamiento es modelado por una función de Beverton & Holt, con sus parámetros ajustados con los datos de biomasa reproductiva y niveles de reclutamiento presentados por Zavatteri y Giussi (2022) las diferencias descritas anteriormente se amplían levemente (Figs.6E y 6F). Si se modela la mortalidad natural variable entre las distintas edades (Fig. 1) se observan capturas levemente menores que considerando una mortalidad natural constante para todas las edades; pero las diferencias son mínimas.

Las capturas futuras obtenidas a partir de las simulaciones bajo las distintas combinaciones de escenarios de mortalidad natural y reclutamiento utilizando valores de mortalidad por pesca como los registrados durante los últimos 5 años evidencian que es posible mantener niveles sostenibles por encima de las 40 000 toneladas (Tabla 2). Los menores valores promedio de captura bajo una mortalidad por pesca $F = 0.14$ fueron registrados en 55 415 toneladas para el escenario de reclutamiento aleatorio sobre los valores estimados durante los últimos 5 años y mortalidad constante ($M = 0.35$); intervalo de 90% 43 791-67 702 toneladas. La biomasa total promedio correspondiente a esa combinación se registró en 652 536 toneladas (intervalo 90% 517 608-795 493 toneladas), mientras que la biomasa reproductiva media correspondiente en 332 966 toneladas (intervalo 90% 260 320-407 964 toneladas); con un cociente entre ambas biomasa muy próximo al 50%.

Las restantes combinaciones de escenarios de reclutamiento y variación en la mortalidad natural resultaron en niveles más altos tanto de capturas en los próximos 10

años, como de biomasa total y reproductiva (Tabla 2); con valores muy por encima del Punto Biológico de Referencia Objetivo (PBRO). Las simulaciones generadas por el prototipo sugieren claramente que el mantenimiento de niveles de mortalidad por pesca similares a los registrados durante los últimos años se asocian con niveles de capturas y de abundancia del recurso que se corresponden con una explotación sostenible.

DISCUSIÓN

La evaluación realizada a partir de simulaciones incorporando distintas formas e intensidades de mortalidad natural y reclutamiento; considerando inclusive la serie temporal que incluye los niveles más desfavorables para la renovación de la población, indican una muy alta probabilidad de mantener capturas por encima de las 40 000 toneladas con niveles de mortalidad por pesca como que han tenido lugar durante los últimos 5 años.

La simulación y análisis de modelos de dinámica de poblaciones sometidas a explotación es una herramienta de utilización frecuente en las evaluaciones realizadas en pesquerías, manejo de vida silvestre y ciencias forestales (Hilborn y Walters 1992; Quinn y Deriso 1999; Haddon 2020; Getz y Haight 2020). Los modelos de evaluación de “stocks” pesqueros son una herramienta muy valiosa para proporcionar asesoramiento científico sobre el estado de los “stocks”, la productividad histórica y los cambios en la composición de los “stocks”, así como para evaluar el impacto de acciones de manejo alternativas en los recursos pesqueros (Anderson *et al.* 2014).

En las evaluaciones realizadas en este informe la implementación de dos tipos de escenarios para la mortalidad natural no ha mostrado tener un impacto importante en la evolución de las variables de interés, la biomasa total

y reproductiva y las capturas. La práctica estándar para asignar la mortalidad natural en un modelo de evaluación de stock es utilizar una estimación externa de la mortalidad natural como un valor fijo al ajustar el modelo. El valor utilizado ($M = 0.35$) ya sea único y fijo para todas las edades o variable entre edades, siempre fue constante a lo largo del tiempo. Este valor es tomado de las evaluaciones realizadas en las estimaciones de abundancia del recurso realizadas por el INIDEP (Giussi 2012; Wöhler y Giussi 2001; Zatterri *et al.* 2021; Zatterri y Giussi 2022). El análisis de sensibilidad es un enfoque común para reflejar la influencia de la mortalidad natural en el tamaño del stock y las variables asociadas al manejo; el impacto de distintos niveles de mortalidad natural y formas de variación con la edad de los individuos y variables ambientales puede llevar a interpretaciones que permitan alcanzar un mejor entendimiento del funcionamiento de la pesquería (Punt y Hilborn 1997).

La incorporación de nuevos individuos a la población a partir de la reproducción y el posterior crecimiento y supervivencia de las larvas hasta su incorporación como individuos juveniles a la pesquería es un proceso complejo del que se ignora gran parte de sus detalles y variaciones en el espacio y en el tiempo. Una línea de investigación que posiblemente proporcione información importante para comprender el proceso de renovación de la población de merluza de cola argentina consiste en establecer la relación entre la variación espacial y temporal de variables biológicas y físicas en la determinación de la magnitud de la reproducción, el crecimiento y supervivencia hasta la incorporación de juveniles; y determinar además si existen migraciones reproductivas y posteriores movimientos de juveniles como así también la magnitud y ubicación geográfica de los mismos. Tomando como ejemplo los estudios sobre la variación espacial y temporal de la abundancia de zooplancton (alimento principal durante los primera fase en la vida de la merluza de cola), en la plataforma patagónica austral (Viñas *et al.* 2013; Cepeda *et al.* 2018, 2022), se debería buscar integrar toda la información disponible para lograr una mejor comprensión de las complejas relaciones que pudieran estar afectando el reclutamiento. Las variaciones de los parámetros oceanográficos asociados a leves incrementos de la temperatura superficial del mar en distintos períodos, podrían afectar el transporte de masas de agua a escala regional que resultan en una menor disponibilidad de agua fría (y nutrientes) sobre la plataforma patagónica austral. Investigaciones de carácter similar y la integración de sus resultados en la evaluación de la abundancia tendrán un impacto importante para la explotación sostenible del recurso.

Las evaluaciones directas del reclutamiento efectivo son dificultosas y en general la abundancia de los reclutas es estimada a partir de los modelos de evaluación (ver Giussi 2012; Zatterri *et al.* 2021; Zatterri y Giussi 2022). Aquí consideramos tres distintas alternativas en el modelado de esta variable; observando un impacto importante en los niveles de biomasa y capturas registrados en las distintas alternativas. La representación del número de reclutas a partir de una muestra aleatoria de los niveles estimados durante los últimos 15 años (en los que se ha evidenciado una disminución sostenida de esta variable) ha estado

asociada a los menores valores de biomasa y capturas registrados en las simulaciones. No obstante, considerando que esta opción para modelar el reclutamiento constituye la menos favorable para la renovación de la población de merluza de cola, los valores de biomasa y de capturas registrados están, no obstante, por encima de los valores mínimos considerados como puntos de referencias deseables para la explotación sostenible del recurso.

Los métodos utilizados en la evaluación de la pesquería de merluza de cola argentina son implementados a partir de un complejo modelo de captura a la edad utilizando procedimientos de estimación que utilizan diferentes observaciones provenientes tanto de las campañas de evaluación del recurso como de la información de las capturas y los esfuerzos pesqueros relacionados con las mismas provenientes de la flota pesquera. En las distintas versiones anuales del proceso de evaluación se revisa la serie histórica de datos y se actualizan las estimaciones con los datos más recientes (Giussi y Wöhler 2006; Giussi 2012; Giussi *et al.* 2014; Zatterri y Giussi 2020; Zatterri *et al.* 2021; Zatterri y Giussi 2022). Estas evaluaciones se realizan utilizando procedimientos que constituyen el estado del arte en la disciplina, que proporcionan proyecciones de las capturas a futuro incorporando la incertidumbre asociada a estos métodos de estimación. La disponibilidad de una información claramente detallada en esos informes ha permitido caracterizar adecuadamente los distintos componentes del prototipo presentado en este informe.

La simulación de la dinámica de la pesquería, en síntesis, indica claramente que la biomasa total, biomasa reproductiva y capturas, se mantendrán estables durante los próximos 10 años si se establece una intensidad de explotación acorde a la captura biológicamente admisible recomendado en los últimos años.

AGRADECIMIENTOS

La evaluación presentada en este informe se esta desarrollando en el marco de un servicio tecnológico de alto nivel (STAN) convenido entre el CONICET y la empresa San Arawa S.A.U.

LITERATURA CITADA

- Anderson, S. C., Monnahan, C. C., Johnson, K. F., Ono, K., y Valero, J. L. (2014). ss3sim: an r package for fisheries stock assessment simulation with stock synthesis. *PLoS One*, 9(4):e92725.
- Cepeda, G. D., Jaureguizar, A. J., Fenco, H., Reta, R., y Sabatini, M. E. (2022). Long-term zooplankton variability in the southern patagonian shelf, argentina. *Journal of Marine Systems*, 235:103782.
- Cepeda, G. D., Temperoni, B., Sabatini, M. E., Viñas, M. D., Derisio, C. M., Santos, B. A., Antacli, J. C., y Padovani, L. N. (2018). Zooplankton communities of the argentine continental shelf (sw atlantic, ca. 34–55 s), an overview. *Plankton Ecology of the Southwestern Atlantic: From the Subtropical to the Subantarctic Realm*, pp. 171–199.

- Cousseau, M. B., Perrotta, R. G., y otros (2013). *Peces marinos de Argentina: biología, distribución, pesca*. Mar del Plata (Argentina) INIDEP.
- Getz, W. M. y Haight, R. G. (2020). *Population Harvesting (MPB-27), Volume 27: Demographic Models of Fish, Forest, and Animal Resources. (MPB-27)*, volumen 27. Princeton University Press.
- Giussi, A. R., Di Marco, E. J., Zavatteri, A., y Wöhler, O. C. (2014). Evaluación de abundancia de la merluza de cola (*Macruronus magellanicus*) del Atlántico Sudoccidental. Período 1985-2014. Informe científico, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP).
- Giussi, A. R., Prosdociami, L., Carozza, C. R., y Navarro, G. S. (2022). Estado de los recursos pesqueros bajo administración exclusiva de la república argentina. aportes para el informe sofia 2022. Informe científico, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP).
- Giussi, A. R. y Wöhler, O. C. (2006). Evaluación de abundancia de la merluza de cola (*Macruronus magellanicus*) del Atlántico Sudoccidental. Período 1985-2006. Informe científico, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP).
- Giussi, A. R., Zavatteri, A., Di Marco, E., Gorini, F. L., Bernardele, J. C., y Marí, N. R. (2016). Biology and fishery of long tail hake (*macruronus magellanicus*) in the southwest atlantic ocean.[biología y pesquería de la merluza de cola (*Macruronus magellanicus*) en el océano atlántico sudoccidental]. *Revista de Investigación y Desarrollo Pesquero*, 28:55–82.
- Giussi, A. R. et. al.. (2012). Evaluación de abundancia de la merluza de cola (*macruronus magellanicus*) del atlántico sudoccidental. períodos varios. Informe científico, Informe Técnico del INIDEP.
- Gorini, F., Zumpano, F., Ruocco, N., Giussi, A., y Avigliano, E. (2021). Spatial population structure of long tail hake from southwest atlantic and southeast pacific waters in young and adult stages. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 257:107419.
- Gorini, F. L. y Pájaro, M. (2014). Características reproductivas y longitud de primera madurez de la merluza de cola (*macruronus magellanicus*) en el atlántico sudoccidental. período 2003-2010. Informe científico, Informes Técnicos del INIDEP.
- Haddon, M. (2020). *Using R for modelling and quantitative methods in fisheries*. CRC Press.
- Hilborn, R. y Walters, C. J. (1992). *Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty*. Springer Science & Business Media.
- Inada, T. (1983). A review of the species composition, distribution and migration of the bottom fishes in the waters off argentina [south western atlantic]. jpn document 1. En *Ad Hoc Working Group on Fishery Resources of the Patagonian Shelf. Rome (Italy)*. 7 Feb 1983.
- Perier, M. (1999). La merluza de cola en la pesquería del golfo san matías: un recurso alternativo. *Avances en Metodos y Tecnologia Aplicados a la Investigacion Pesquera. Seminario Final del Proyecto INIDEP-JICA Sobre Evaluacion y Monitoreo de Recursos Pesqueros (1994-1999)*.
- Punt, A. E. y Hilborn, R. (1997). Fisheries stock assessment and decision analysis: the bayesian approach. *Reviews in fish biology and fisheries*, 7:35–63.
- Quinn, T. J. y Deriso, R. B. (1999). *Quantitative fish dynamics*. Oxford University Press.
- R Core Team (2020). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Viñas, M. D., Negri, R. M., Cepeda, G. D., Hernández, D., Silva, R., Daponte, M. C., y Capitanio, F. L. (2013). Seasonal succession of zooplankton in coastal waters of the argentine sea (southwest atlantic ocean): prevalence of classical or microbial food webs. *Marine Biology Research*, 9(4):371–382.
- Wöhler, O. C. y Giussi, A. R. (2001). La merluza de cola (*Macruronus magellanicus*) en el mar argentino. taller internacional; evaluacion de stock de merluza de cola y merluza de tres aletas. *Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), Argentina*.
- Zavatteri, A. y Giussi, A. R. (2020). Evaluación de abundancia de la merluza de cola (*Macruronus magellanicus*) del Atlántico Sudoccidental. Período 1985-2020. Informe científico, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP).
- Zavatteri, A. y Giussi, A. R. (2022). Evaluación de abundancia de la merluza de cola (*Macruronus magellanicus*) del Atlántico Sudoccidental. Período 1985-2021. Informe científico, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP).
- Zavatteri, A., Giussi, A. R., y Canales, C. (2021). Evaluación de estrategias de manejo en el análisis de la incertidumbre de las reglas de control de captura de la merluza de cola (*Macruronus magellanicus*) del atlántico sudoccidental. interacción con la pesquería del pacífico sur. Informe científico, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP).

ANEXO I: PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS

Código de lenguaje R de la función utilizada para realizar la simulación de la dinámica de la pesquería de merluza de cola y obtener los resultados presentados en el informe MODELADO DE LA DINÁMICA Y PREDICCIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DE LAS CAPTURAS DE LA PESQUERÍA DE MERLUZA DE COLA ARGENTINA (*Macruronus magellanicus*).

```

1 Nedades=11
2 edad = 1:Nedades
3
4 pcatch <- function(Ma, Fa){Fa * (1-exp(-Ma-Fa))/(Ma
+Fa)}
5 psel <- function(edad, k=2.21, gamma=1){1/(1+exp((k
-gamma*edad)))}
6 vonBerta <- function(edad, Linf=90, k=0.24, to
=-1.3){Linf*(1-exp(-k*(edad-to)))}
7 pesotalla = function(talla, alpha=0.0106, beta
=2.7025){alpha*talla^beta}

```

```

8 bev_holt=function(Ro, So, h, S){return(4*Ro*h*S/(
9   So*(1-h)+S*(5*h-1))}
10 Fobservado=c(0.115, 0.205, 0.449, 0.957,
11   0.522, 0.260, 0.167, 0.224,
12   0.189, 0.090, 0.145, 0.195,
13   0.156, 0.306, 0.336, 0.332,
14   0.270, 0.256, 0.267, 0.355,
15   0.387, 0.537, 0.466, 0.541,
16   0.522, 0.448, 0.509, 0.377,
17   0.337, 0.335, 0.336, 0.378,
18   0.161, 0.169, 0.143, 0.139)
19
20 Mv= c(1.5, 1, 0.6, 0.35, 0.35, 0.2, 0.2, 0.5, 1, 2,
21   3)
22 DinamicaHoki=function(start=1964, end=2031, Fobs=
23   Fobservado, Ft=0.14, Bo=800000, So=150000, Ro
24   =350000000, h=0.375, Nedades=11, M=rep(0.35,
25   Nedades), sigma=0.285, phi=0.15, noCatch=20,
26   reclu='sa', plotit=FALSE){
27
28   edad=1:Nedades
29   talla = vonBerta(edad)
30   talla.peso = pesotalla(talla)
31
32   No=1000000*Bo/talla.peso/Nedades
33   names(No)=paste('Edad', 1:11, sep='')
34
35   Niters=length(start:end)-1
36
37   Poblacion = matrix(NA,Niters+1, 1+Nedades+3)
38
39   Poblacion[,1] = start:end
40   Poblacion[1, 2:12]=No
41   Poblacion[1, 13] = 0
42   Poblacion[1, 14] = sum(No*talla.peso/1000000)
43   colnames(Poblacion)=c('t', names(No), 'Catch', '
44     Biomasa', 'BRepro')
45
46   span=(nrow(Poblacion)-10+1):nrow(Poblacion)
47
48   acNoise=matrix(1, Niters, Nedades)
49
50   acNoise = exp(colorednoise::colored_noise(
51     timesteps=Niters, mean=0, sd=sigma, phi=phi)
52     -0.5*sigma^2)
53
54   SelAnio=matrix(0, nr=Niters+1, nc= 11, byrow = TRUE
55     )
56
57   indi=which(Poblacion['t'] %in% 1985:1992 ==TRUE)
58   for(k in indi) {SelAnio[k, ] = pnorm(edad, mean
59     =5.5, sd=1.9, lower.tail = T)}
60
61   indi=which(Poblacion['t'] %in% 1993:2010 ==TRUE)
62   for(k in indi) {SelAnio[k, ] = pnorm(edad, mean
63     =2.6, sd=0.9, lower.tail = T)}
64
65   indi=which(Poblacion['t'] %in% 2011:2031 ==TRUE)
66   for(k in indi) {SelAnio[k, ] = pnorm(edad, mean
67     =2.1, sd=0.6, lower.tail = T)}
68
69   Fsim=c(rep(0, noCatch+1), Fobs, rep(Ft,11))
70   Fa=matrix(0, Niters+1, 11)
71   Ma=matrix(0, Niters+1, 11)
72
73   for(k in 1:nrow(Fa)){
74     Fa[k,]=Fsim[k]*SelAnio[k,]
75     Ma[k,]= M
76   }
77
78   Za=Ma+Fa
79
80   prop.catch = matrix(NA, Niters+1, 11, byrow=TRUE)
81   for(k in 1:(nrow(prop.catch))){
82     prop.catch[k,] = pcatch(Ma[k,], Fa[k,])
83   }
84
85   for(anio in 1:Niters){
86     S = sum(Poblacion[anio, 4:12]*talla.peso[3:11]/
87       1000000)
88     Poblacion[anio+1, 2] = switch(reclu, sa = sample(
89       Reclu, size=1), st = sample(tail(Reclu,15),
90       size=1), bh = bev_holt(Ro=Ro, h=h, So=So, S=
91       S)*acNoise[anio])
92     Poblacion[anio+1, 3:12] = Poblacion[anio, 2:11] *
93       exp(-Za[anio, 1:10])
94     Poblacion[anio+1, 12] = Poblacion[anio+1, 12] +
95       Poblacion[anio, 12] * exp(-Za[anio, 11])
96     Poblacion[anio+1, 3:12] = Poblacion[anio+1, 3:12]
97
98     Poblacion[anio+1, 'Catch'] = sum(Poblacion[anio
99     +1, names(No)]*prop.catch[anio+1,]*talla.peso
100     /(1000000))
101     Poblacion[anio+1, 'Biomasa'] = sum(Poblacion[anio
102     +1, names(No)]*talla.peso/(1000000))
103     Poblacion[anio+1, 'BRepro'] = sum(Poblacion[anio
104     +1, names(No)[4:11]]*talla.peso[4:11]/
105     (1000000))
106   }
107
108   indiz=which(Poblacion['t'] %in% 1985:2020 == TRUE)
109
110   if (plotit == TRUE){
111     par(mfrow=c(2,2), mar=c(3,3,1,1), mgp=c(1.5,0.5,0))
112
113     Sg=seq(0, 2*Bo, length=100)
114     R=bev_holt(Ro=Ro, h=h, So=So, S=Sg)
115
116     plot(Sg/So, R/Ro, type='l', xlim=c(0,2), ylim=c
117       (0,2), lwd=2)
118     abline(0,1, col='red', lwd=2)
119
120     S1=apply(Poblacion[,4:12], 1, function(x){sum(x*
121       talla.peso[3:11])/1000000})
122     R1=Poblacion['Edad1']
123     points(S1/So,R1/Ro, pch=19)
124
125     plot(Biomasa ~ t, data=Poblacion, type='b', ylim=c
126       (0, max(Poblacion['Biomasa'], na.rm=TRUE)))
127     points(Biomasa ~ t, data=Poblacion[span,], pch=19,
128       cex=0.8, col='red')
129     points(BRepro ~ t, data=Poblacion, type='b', pch
130       =19)
131     points(BRepro ~ t, data=Poblacion[span,], type='b',
132       pch=19, col='red')
133     abline(v=Poblacion[noCatch, 't'], h=Bo, lty=2)
134     plot(Catch ~ t, data=Poblacion, type='b', ylim=c(0,
135       max(Poblacion['Catch'], na.rm=TRUE)))
136     points(Catch ~ t, data=Poblacion[span,], pch=19,
137       cex=0.8, col='red')
138     abline(v=Poblacion[noCatch, 't'], h=40000, lty=2)
139
140     z = Poblacion[indiz,2:12]
141     rownames(z) = Poblacion[indiz, 't']
142
143     PBSmodelling::plotBubbles(z=t(z), xval=Poblacion[
144       indiz,'t'], yval=1:11, ylab='Edades',
145       size=0.05, powr=0.5, bg=1, las=1, cex.
146       axis=0.8)
147     abline(v=c(1992.5,2010,5), lty=3)
148   }
149
150   return(data.table(Poblacion[, c('t', 'Catch', '
151     Biomasa', 'BRepro')]))
152 }

```