

ANEXO III

Implementación de un Modelo con dinámica en edad e información en talla (modelo alternativo) para sardina austral de la Región de Los Lagos

Índice

1. ANTECEDENTES	2
2. METODOLOGÍA	2
2.1. Matriz de transición de crecimiento talla-talla (Modelo base)	3
2.2. Clave talla-edad simulada en modelo alternativo	6
3. RESULTADOS	8
3.1.1. Comparación del ajuste y residuales del modelo base y alternativo a los datos	8
3.1.2. Comparación del análisis retrospectivo del modelo base y alternativo	8
3.1.3. Comparación de los perfiles de verosimilitud del modelo base y alternativo	8
3.1.4. Comparación de las tendencias poblacionales del modelo base y alternativo	17
3.1.5. Comparación del Estado de explotación estimado por el modelo base y alternativo	19
3.1.6. Comparación con asesorías previas	24
3.1.7. Comparación de la proyección de la Captura Biológicamente Aceptable (CBA inicial - Hito 1)	25
3.1.8. Comparación de CBA calculado para el mismo año (Revisión de CBA - Hito 2)	25
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	32
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35



1. ANTECEDENTES

Uno de los objetivos del Proyecto “Estatus y Posibilidades de Explotación Biológicamente Sustentables de los Principales Recursos Pesqueros Nacionales” se refiere al Programa de Mejoramiento Continuo de la Calidad de Asesoría Científica (PMCCAC,) el cual se enfoca en sintetizar las brechas de datos, información y conocimiento en relación con la situación general de una pesquería y de esta forma una sistematización para el desarrollo continuo de la asesoría científica.

Una importante fuente de información, que aporta al mejoramiento, lo constituye la revisión por pares, la cual realiza una revisión de todo el proceso de evaluación de un recurso por parte de expertos externos e independientes quienes reportan una serie de observaciones y recomendaciones de corto y mediano plazo. La evaluación de stock de sardina austral (*Sprattus fuegensis*) de aguas interiores de la Isla de Chiloé, fue objeto de este proceso de revisión, cuyos detalles están contenidos en el reporte técnico Ernst *et al.* (2015). Una de las recomendaciones de dicho reporte, fue considerar un modelo de evaluación alternativo al actualmente en uso.

El enfoque de modelación utilizado hasta ahora, corresponde a un modelo talla estructurado (Sullivan *et al.* 1990), quien modela la abundancia poblacional en función de la probabilidad de los individuos de crecer de una talla a la siguiente.

Como parte de las tareas de largo plazo y con el objetivo de dar respuesta a la recomendación de la revisión por pares, IFOP ha estado trabajando en la implementación de un modelo con observaciones en tallas y dinámica en edades (Deriso *et al.* 1985), coherente con los procesos biológico-pesqueros. Lo anterior con la finalidad de generar un modelo base que pueda ser contrastado con el actual modelo en uso. Para poder realizar el contraste entre el actual modelo y el modelo alternativo se ha estado desarrollando un modelo anual con información en tallas y dinámica en edad en año calendario (MAET) para el período 2002-2021. El actual reporte resume los resultados de los talleres internos realizado por IFOP durante los años 2020 y 2021 y algunas recomendaciones del Comité científico.

2. METODOLOGÍA

El modelo alternativo propuesto, se basa en el análisis estadístico de la dinámica de estructuras de tallas anual de la flota (período 2002- 2020) y de los cruceros acústicos. Se utilizan también como índices, los desembarques totales (período 2006 - 2020), biomasa estimada por el crucero y la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) estandarizada. Se utilizan las mismas fuentes de información en ambos enfoques de modelación.

El modelamiento de la dinámica de la sardina austral en aguas interiores de la Región de Los Lagos, es en año calendario, vale decir que el cumpleaños ocurre a inicios de año (inicios de enero), por lo cual el desove (dt) al ser establecido a mediados de año, corresponde a un valor de 0,58. De igual manera, el crucero de evaluación directa, representa a la población en el período del año en que se realiza (dt variable). Por otra parte, el peso medio es empleado para generar las estimaciones de biomasa acústica, desembarques y biomasa total. Se mantienen los principales supuestos en ambos enfoques de modelación (modelo base con dinámica en tallas y modelo alternativo con dinámica en edad).

El método alternativo es empleado bajo un enfoque estructurado en edades que utiliza información en tallas agrupada en año calendario y que incorpora los siguientes elementos:

- Modelo de dinámica poblacional estructurada por edad.
- Modelos de las observaciones y penalizaciones a priori que permiten relacionar el modelo de dinámica con las observaciones.
- Identificación de la estructura del error a través de funciones de log-verosimilitud negativas.
- Proceso de estimación de los parámetros desconocidos del modelo de dinámica a través de un algoritmo que minimiza la función objetivo total, contrastando las observaciones con las estimaciones deducidas del modelo de dinámica.

Adicionalmente, la **Tabla 1** muestra la comparación de estructura, datos, parámetros y supuestos entre el modelo base actual y alternativo.

**Tabla 1.** Comparación de estructura, datos, parámetros y supuestos entre el modelo base actual (dinámica a la talla) y modelo alternativo (dinámica a la edad) de sardina austral Región de Los Lagos.

Estructura del modelo	Modelo base actual	Modelo alternativo
Temporalidad	Año calendario	Año calendario
Dinámica poblacional	Tallas	Edad
Composición de las capturas	Tallas	Tallas
Número de años	20	20
Años	2002 - 2021	2002 - 2021
Número de edades	-	5
Número de tallas	30	30
Rango de tallas	5,5 - 20 cm	5,5 - 20 cm
Datos y parámetros de entrada		
Desembarques	2002 - 2020	2002 - 2020
Biomasa acústica	2006,2008,2011,2013-2021	2006,2008,2011,2013-2021
Composición de tallas flota	2005 - 2020	2005 - 2020
Composición de tallas crucero	2006, 2008, 2011, 2013 - 2021	2006, 2008, 2011, 2013 - 2021
Madurez sexual	Talla	Talla
Peso medio	Talla (constante entre años)	Talla (constante entre años)
Parámetros de crecimiento	Matriz de probabilidad talla-talla	Matriz de probabilidad edad-talla
Loo	17,7 cm	17,7 cm
k	0,78 año-1	0,78 año-1
Lo	8	8
Mortalidad natural (año-1)	0,83	0,83
Supuestos del modelo		
Reclutamiento	Ro más desvíos	Ro más desvíos
Selectividad	Logística y en bloques	Logística y un bloque
Capturabilidad	Prior (0,65 y cv 0,15)	Prior (0,65 y cv 0,15)
Coefficientes de variación (CV)	Variable entre años	Variable entre años
CV desembarque	0,2 - 0,1	0,2 - 0,1
CV biomasa acústica	0,26 - 0,22	0,26 - 0,22
nm Flota	25	25
nm crucero	15	15

2.1. Matriz de transición de crecimiento talla-talla (Modelo base)

El crecimiento medio es descrito por el modelo von Bertalanffy (VB) puede ser expresado según:

$$\bar{\Delta}_l = (L\infty - l^*)(1 - e^{-k}) \quad (1)$$

Donde, $L\infty$ y k son parámetros de la función VB, l^* corresponde al punto medio del intervalo de talla l .

La distribución gamma es utilizada para representar la variación en el crecimiento, ya que permite describir de mejor forma los patrones de crecimiento para peces de tallas muy pequeñas y muy grandes. La distribución gamma puede ser expresada en términos de dos parámetros α_l y β_p , los cuales se relacionan entre si según:

$$\alpha_l = \frac{\bar{\Delta}_l}{\beta_p}, \quad (2)$$

Donde, α_l corresponde a la varianza (es función de $L\infty$ y k) proporcional a la media, β_p corresponde al coeficiente de variación el que permite incorporar la variabilidad de los individuos en la población. Con ello la proporción de ejemplares que crecen o se mueven de un intervalo a otro queda descrito por:

$$T_{ll'} = \int_l^{l'} \frac{(l' - l)^a \exp(-(l' - l)/\beta_p)}{\beta_p} dl \quad (3)$$

Donde, $T_{ll'}$ corresponde a la matriz de transición que modela el crecimiento entre l y l' (Sullivan *et al.*, 1990). La **Figura 1** muestra la matriz de transición estimada por el modelo base de sardina austral de la Región de Los Lagos.

El reclutamiento se plantea separable en un componente anual y uno talla-específico. Pr_l es el vector de distribución de reclutamiento (ecuación 4). La **Figura 2** muestra el patrón de reclutamiento estimado por el modelo base.

$$Pr_l = R \int_l^{l+1} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(l-\mu)^2}{\sigma^2}\right] dl, \quad (4)$$

Donde, μ y σ corresponden a la media y desviación de una distribución normal constante entre años.

La abundancia $N_{l,t}$ de los ejemplares de talla l , a comienzos del año t , queda entonces representada por:

$$N_{l,t} = T_{ll'} N_{l',t-1} \exp(-Z_{l,t-1}) + Pr_l R_t, \quad (5)$$

$$\hat{C}_{l,t} = \frac{F_{l,t}}{Z_{l,t}} N_{l,t} (1 - S_{l,t}) \quad (6)$$

Donde, $N_{l,t-1}$ corresponde al número de peces de talla l , en el año $t-1$, es mortalidad total para peces de talla l en el año $t-1$; $T_{ll'}$ es la matriz de transición de crecimiento entre la talla l y l' , Pr_l es el vector de distribución de reclutamiento y R_t corresponde al reclutamiento anual. \hat{C} corresponde a la captura en número estimada sobre la base de la estimación de abundancia del número de peces a la talla. La **Figura 3** muestra la estimación de captura en número a la talla estimada por el modelo base, en la cual se evidencia un truncamiento en las tallas sobre los 18 cm, lo cual genera unos picos de abundancia en las tallas de 16 y 17 cm. Y se observa una talla media principal en torno a los 13,5 cm LT.

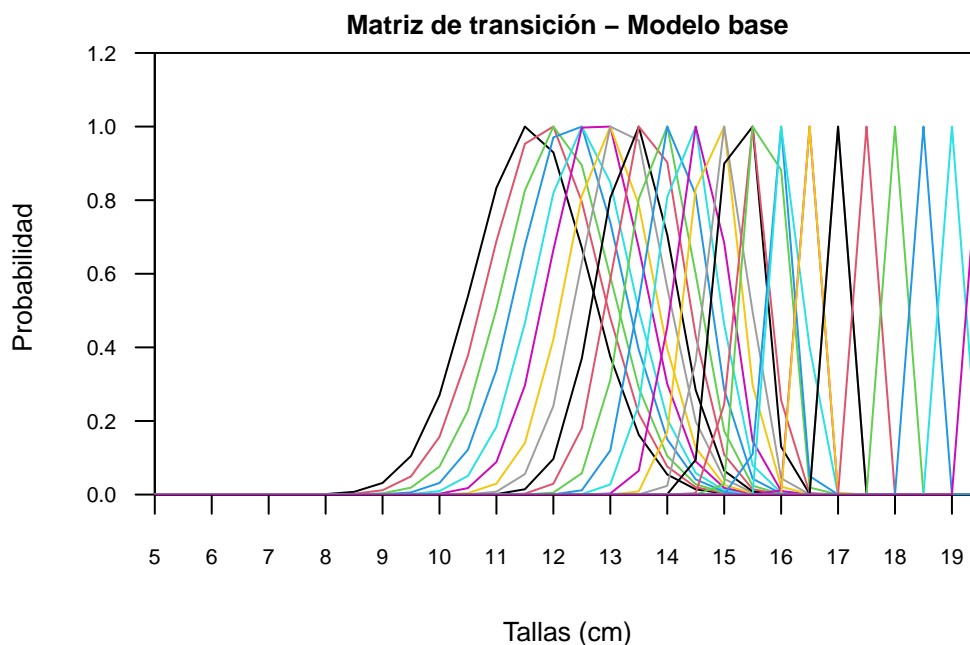


Figura 1. Matriz de transición de crecimiento talla a talla.

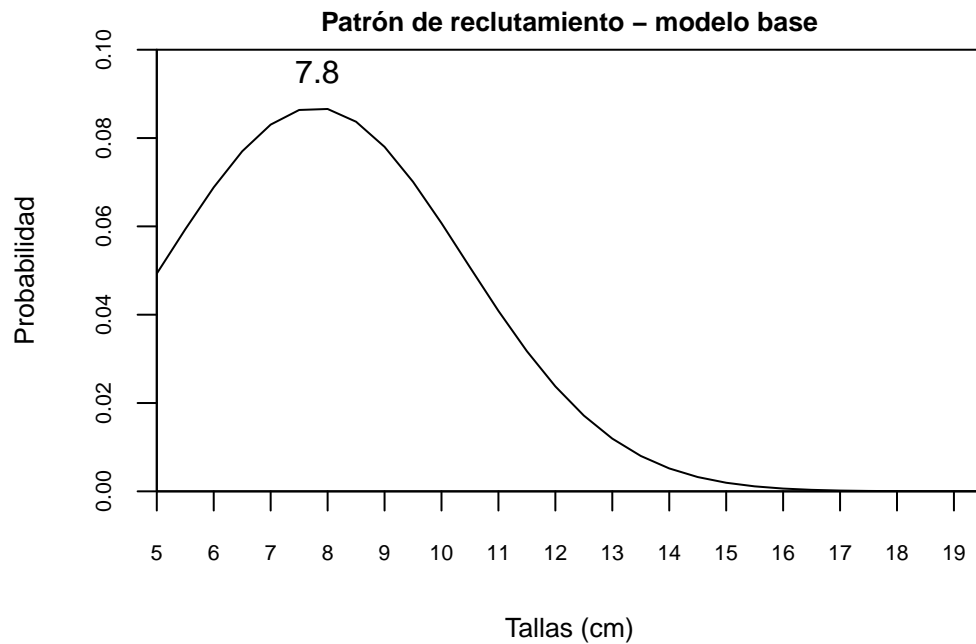


Figura 2. Distribución de probabilidad del reclutamiento.

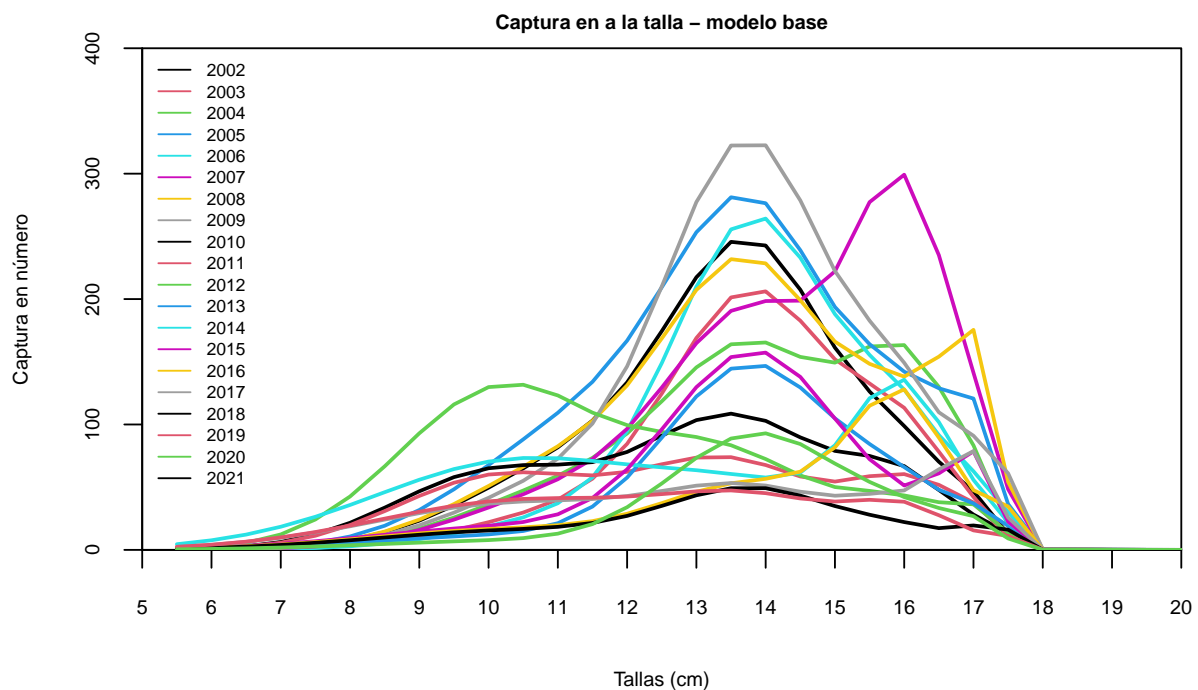


Figura 3. Captura en número estimada por el modelo a la talla utilizando la matriz de transición.



2.2. Clave talla-edad simulada en modelo alternativo

Dado que el modelo alternativo está basado en una dinámica edad-estructurada, es necesario transformar las estructuras de tallas a edades a través de una clave talla-edad simulada. Esta clave describe la probabilidad de que un individuo de talla l pertenece a una cierta edad a . De acuerdo a lo anterior, la proporción de ejemplares de edad a en un intervalo de longitud, $P_{l,a}$ es una función de la longitud promedio (l_a) a la edad (predicha por los parámetros de crecimiento) y la varianza (σ_a) de las longitudes a una edad determinada, según:

$$l_a = l_{\infty} (1 - e^{-k}) + e^{-k} l_{a-1} \quad (7)$$

$$\sigma_a = cv l_a \quad (8)$$

$$P_{l,a}(l_a, \sigma_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_a^2}} e^{-\frac{(l-l_a)^2}{2\sigma_a^2}} \quad (9)$$

donde $P_{l,a}$ representa la matriz de distribución de probabilidad por talla l a la edad a . Y σ_a corresponde a la desviación estándar de la talla media para la edad a . La **Figura 4** muestra la clave talla-edad simulada por el modelo alternativo para obtener las capturas en número estimadas a la talla "l" y año "t".

$$\hat{C}_{l,t} = P_{l,a} C_{a,t} \quad (10)$$

Donde $C_{a,t}$ corresponde a las capturas en número observadas a la talla provenientes de los monitoreos de la pesquería y cruceros acústicos. La **Figura 5** muestra las capturas estimadas a la talla utilizando la clave talla-edad antes descrita. Se observan dos modas principales, una en torno a los 9 cm correspondiente al grupo de edad 0 y una segunda moda en torno a los 14 cm. Se observa una bimodalidad más marcada que la captura a la talla estimada por el modelo base (**Figura 3**).

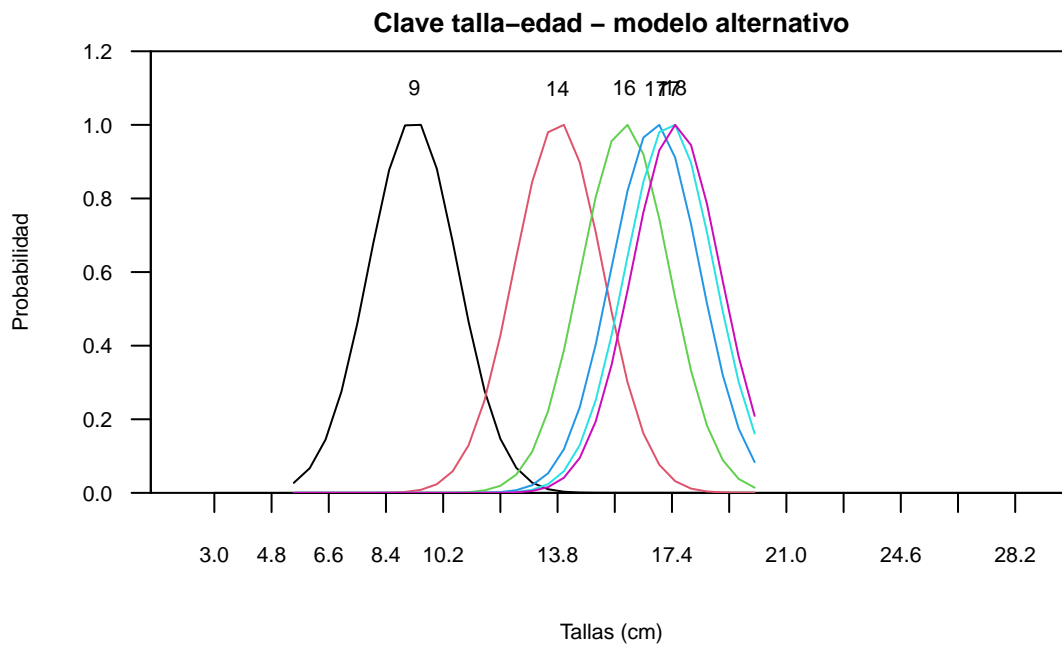


Figura 4. Probabilidad de que un individuo de talla "l" pertenece a una cierta edad "a" estimada en el modelo alternativo. Los números sobre cada curva corresponden a la longitud promedio de cada grupo de edad (edades de 0 a 5 años).

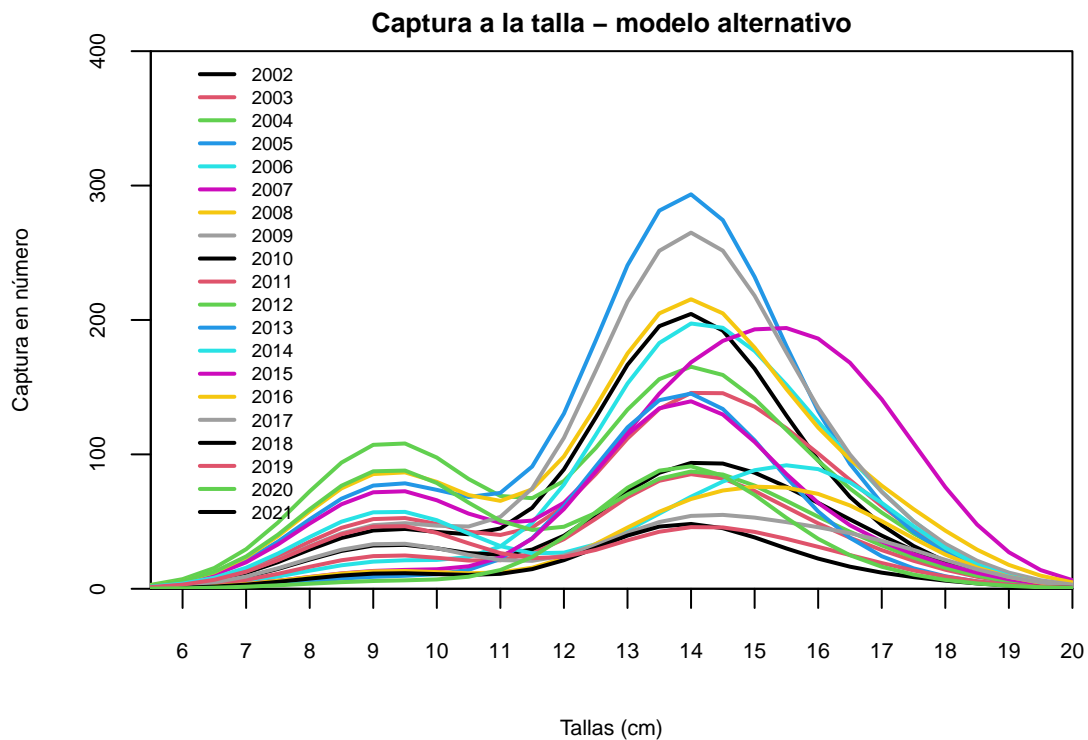


Figura 5. Captura en número estimada por el modelo alternativo utilizando clave talla-edad simulada.

3. RESULTADOS

3.1.1. Comparación del ajuste y residuales del modelo base y alternativo a los datos

Ambos modelos: Modelo base y Modelo alternativo, reproducen la tendencia general de los índices y no parecen mostrar diferencias importantes, excepto en la CPUE, donde el modelo alternativo, parece ajustar de mejor manera algunos años respecto del modelo base actual (**Figura 6**). Esto queda de manifiesto en el análisis de residuos (**Figura 7**). En relación al ajuste del modelo a la información de composiciones de tallas (**Figura 8 y 9**), se observa que el modelo alternativo es más eficiente en capturar la bimodalidad en la estructura de longitudes observada durante algunos años en la flota y las fuertes modas de los cruceros acústicos, representando de mejor manera los pulsos de reclutamiento. El ajuste del modelo base evidencia un truncamiento en las tallas sobre los 18 cm, lo cual genera unos picos de abundancia en las tallas de 16 y 17 cm en algunos años. Las **Figura 10 y Figura 11** evidencian un patrón similar en los residuales de las composiciones de tallas de ambos modelos.

3.1.2. Comparación del análisis retrospectivo del modelo base y alternativo

En las **Figura 12 y 13** se muestra los patrones retrospectivos estándar y relativo de los reclutamientos, biomasa desovante y mortalidad por pesca para el modelo base y alternativo. En el caso particular de la evaluación de stock de sardina austral de la Región de Los Lagos, la fuerte reducción (por debajo de los niveles promedio) en los índices que conducen el modelo, generó cambios hacia menores valores de R_0 (R_{med}) a partir del año 2018 (cambio de productividad). Según el actual enfoque de evaluación, el stock debería ser de un tamaño menor, en términos de biomasa y abundancia, que los niveles estimados previo al año 2018. Este cambio genera un conflicto en la estimación de parámetros del modelo base que impide generar estimaciones para los años previos al 2018 considerando los mismos supuestos del caso base actual. El modelo alternativo si permite generar estimaciones para los años previos al 2018 pero evidencia un cambio de productividad al parecer influenciado por la disminución abrupta registrada en los índices del modelo. Para realizar la comparación de ambos modelos, se consideran los mismos años retrospectivos para ambos modelos, este caso desde el año 2018 al 2021.

Para los cuatro últimos años, ambos modelos muestran una tendencia a subestimar los valores de reclutamientos y biomasa desovante y a sobreestimar los niveles de mortalidad por pesca. No obstante, el modelo alternativo tiene un mejor desempeño ($Rho = -0.07, -0.03$ y -0.03) que el modelo base actual ($Rho = -0.11, -0.06$ y -0.06).

Para comprobar la hipótesis de un cambio de productividad entre el 2017 al 2019 es necesario realizar un análisis de posibles cambios demográficos de la población en la zona. Otra hipótesis a evaluar es el efecto de cambios espaciales y/o temporales de la capturabilidad de la flota que se podría estar confundiendo con cambios de productividad de la población. Para corregir posibles errores de proceso del modelo es necesario evaluar estas hipótesis y de esta forma mejorar el patrón retrospectivo observado en ambos modelos de evaluación de stock de sardina austral de la Región de Los Lagos en años previos al 2018.

3.1.3. Comparación de los perfiles de verosimilitud del modelo base y alternativo

Las **Figura 14 y 15** muestran el perfil de verosimilitud de cada fuente de dato cuyo mínimo representa la estimación máxima a posteriori del reclutamiento medio (R_0) para cada fuente de error del modelo base y alternativo. El perfil de la verosimilitud total del modelo base muestra un mínimo en los 4100 aprox, con una tendencia a buscar tres mínimos bajo y sobre el R_0 estimado. Mientras que el modelo alternativo encuentra sólo un mínimo en torno a los 5000 millones de peces. Para el modelo base los datos cuyos perfiles estuvieron más próximos entre si y la diferencia del log verosimilitud respecto del mínimo se elevó por sobre el criterio estadístico $X^2=1,92$ fue la proporción de tallas del crucero (procru), al parecer la proporción de tallas de la flota indicaría un menor nivel de R_0 en ambos modelos. Si bien, el modelo alternativo muestra un mejor perfil de la verosimilitud total, ambos modelos muestran mucho ruido en los perfiles de verosimilitud de los datos de entrada, por lo tanto, es necesario revisar las hipótesis antes señaladas para corregir posibles errores de procesos producto de mala especificación de algunos supuestos empleados.

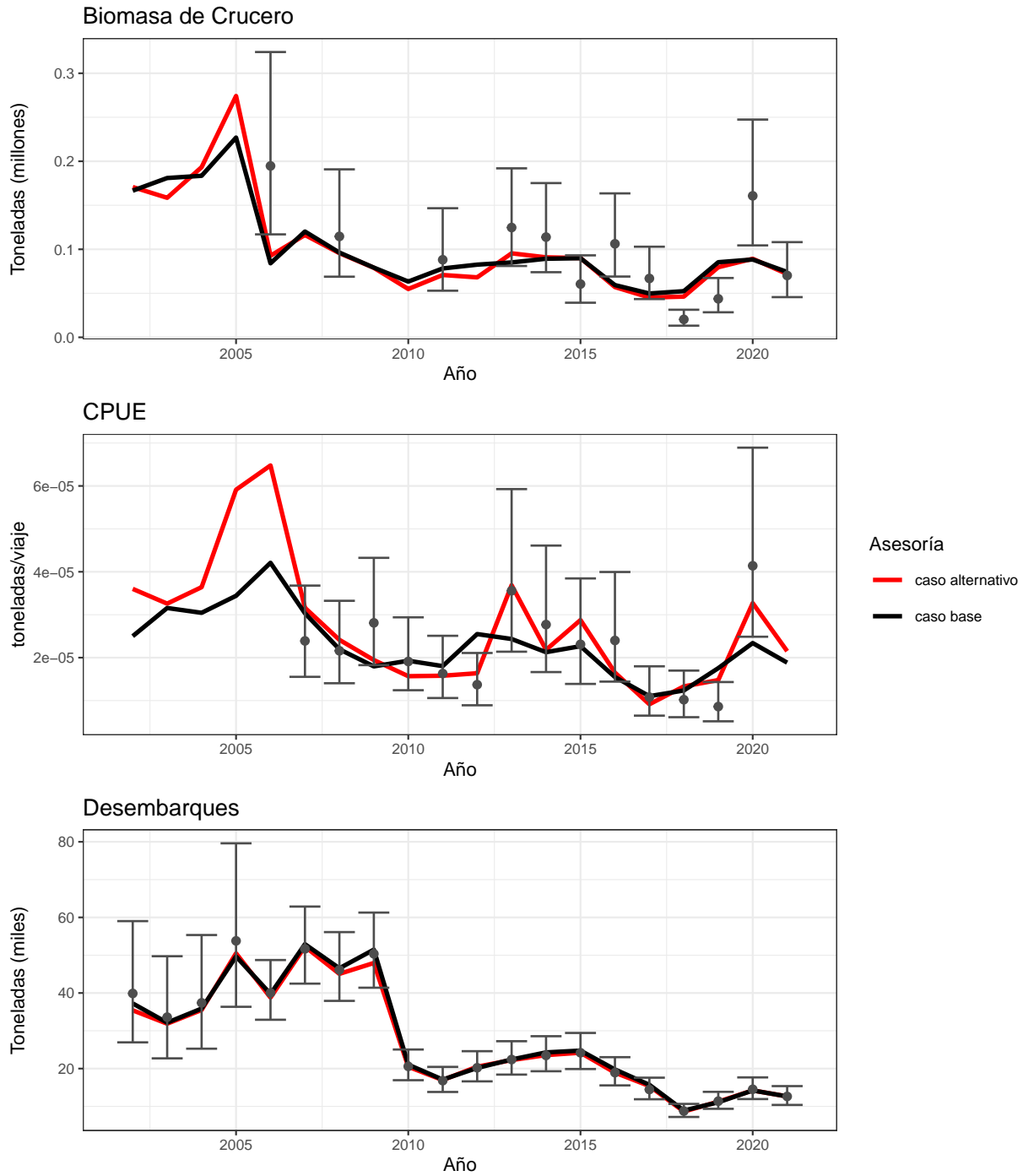


Figura 6. Ajuste del modelo base y alternativo a los valores de biomasa del crucero, CPUE y desembarques de sardina austral Región de Los Lagos. Las barras corresponden al intervalo de confianza asintótico y el círculo al valor del estimador central.

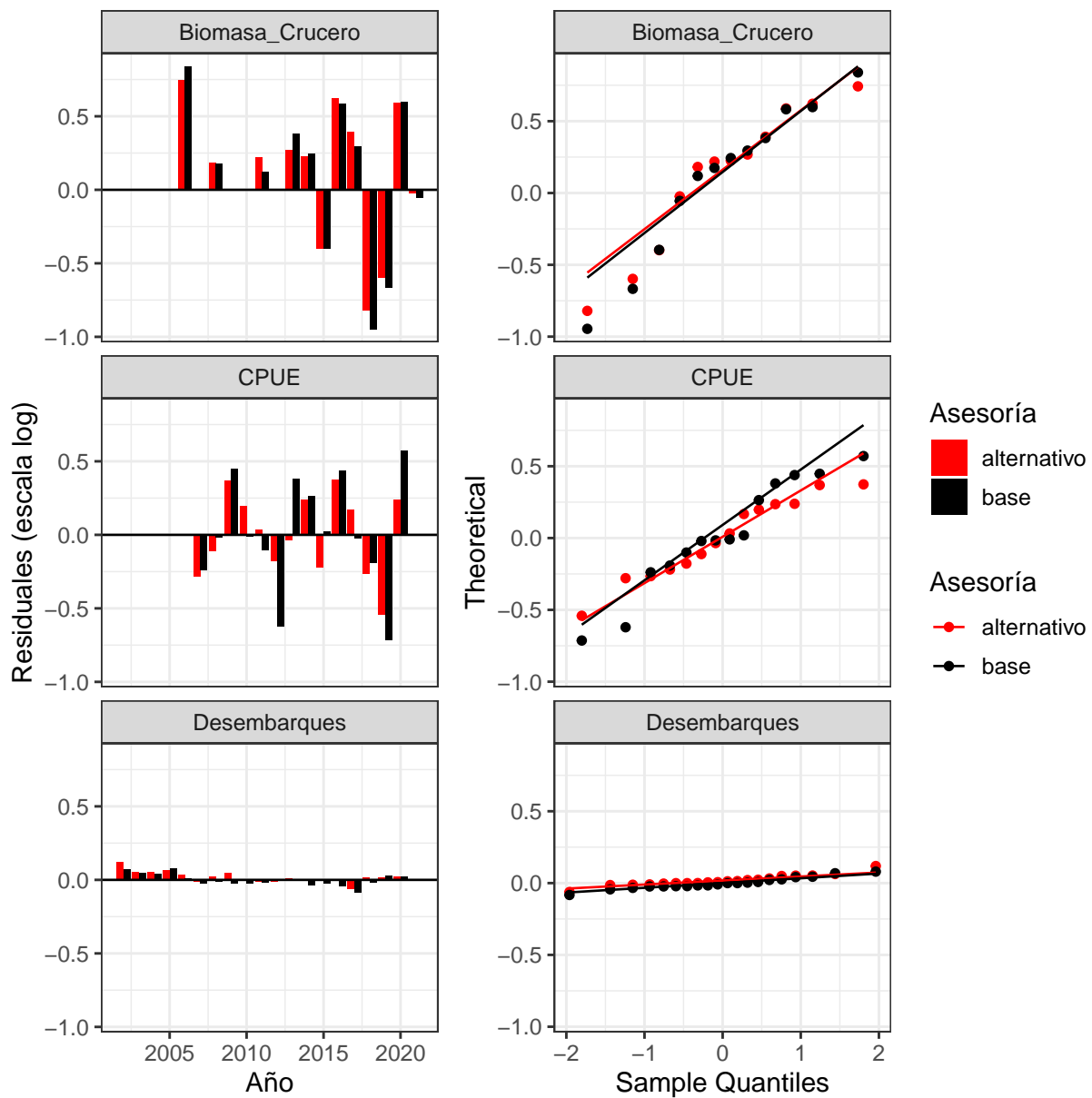


Figura 7. Análisis de los residuos para cada índice del modelo base y alternativo a los valores de biomasa del crucero, CPUE y desembarques de sardina austral Región de Los Lagos.

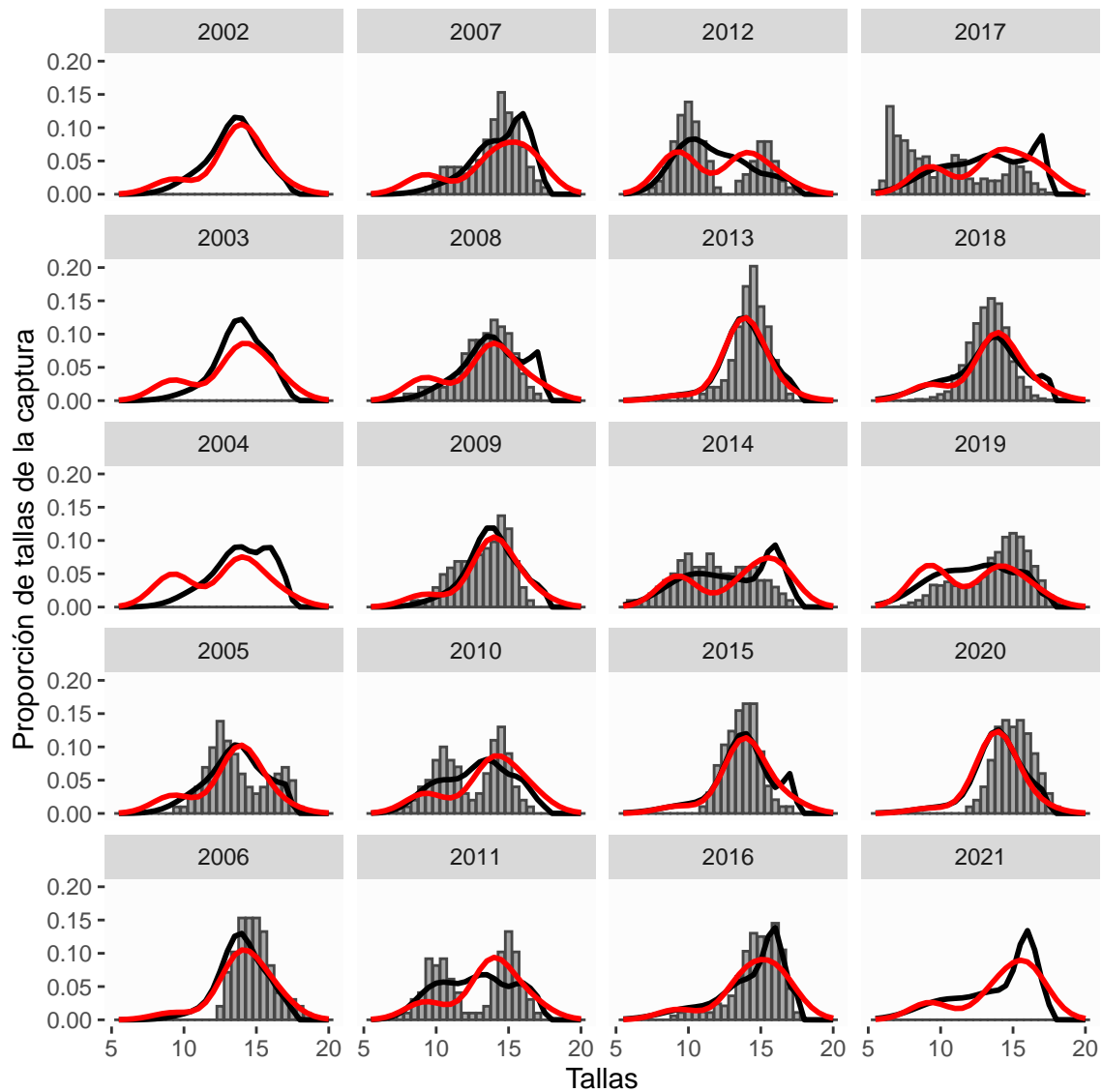


Figura 8. Ajuste del modelo base (línea negra) y alternativo (línea roja) a la estructura de longitud de la flota en la pesquería de sardina austral de la Región de Los Lagos, entre los años 2006 y 2020. Barras (datos observados), líneas negra y roja (modelo ajustado).

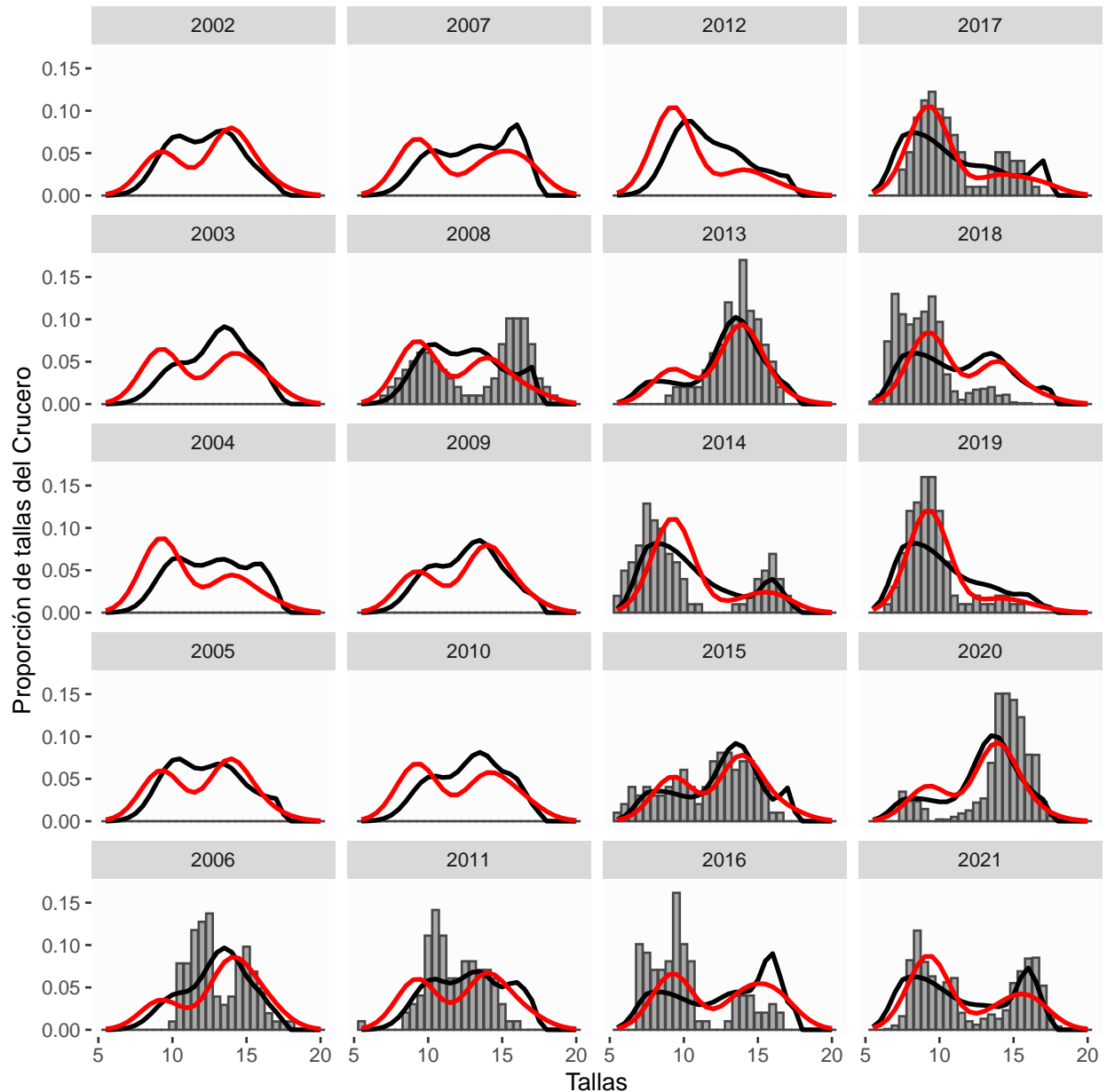


Figura 9. Ajuste del modelo base (línea negra) y alternativo (línea roja) a la estructura de longitud del crucero de evaluación hidroacústica de sardina austral de la Región de Los Lagos. Barras (datos observados), líneas negra y roja (modelo ajustado).

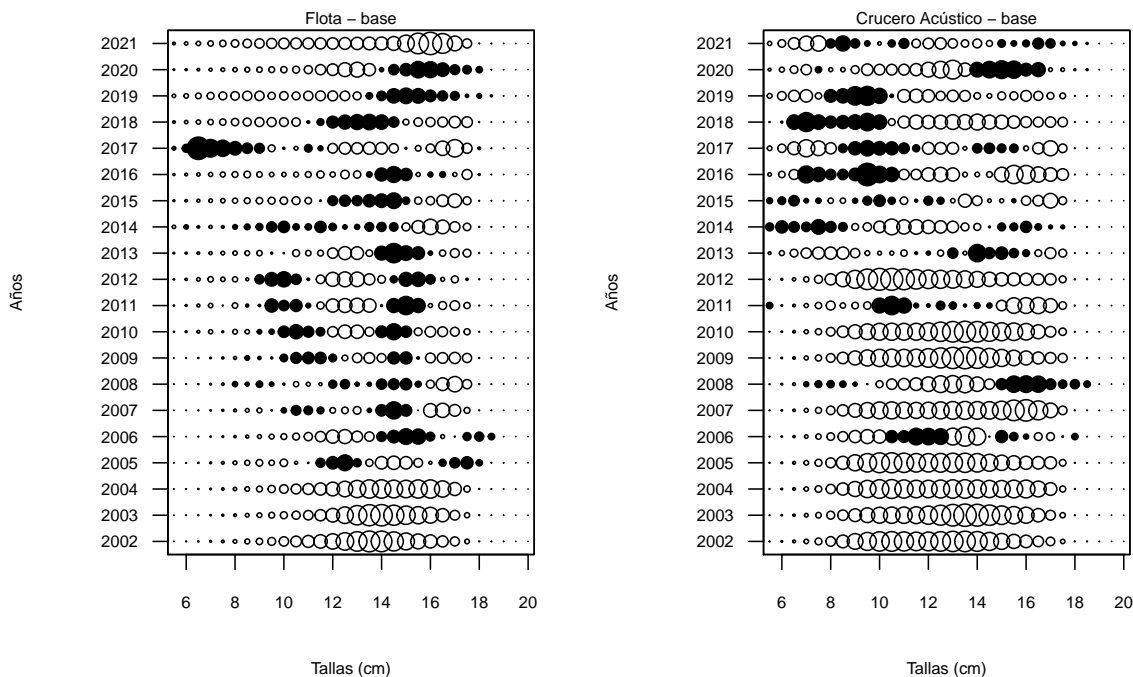


Figura 10. Residuales de las estructuras de tallas de la flota y cruceros. Subestimaciones (círculos negros) y sobreestimaciones (círculo blanco). El tamaño del globo indica la magnitud relativa del error por tallas. **Modelo base.**

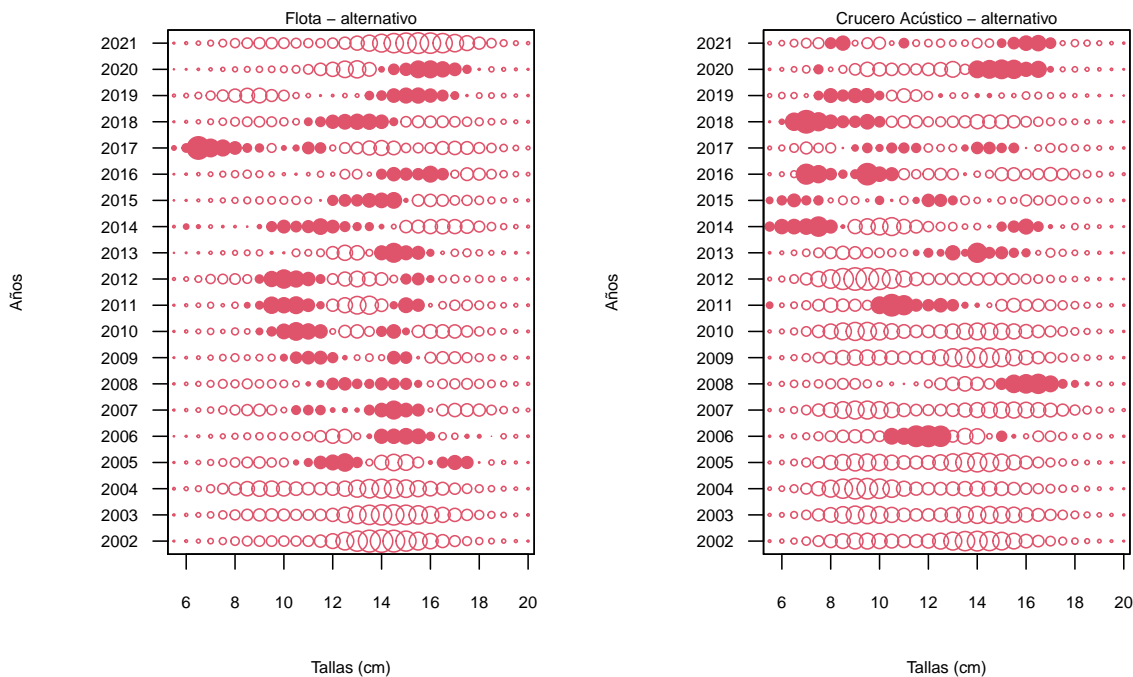


Figura 11. Residuales de las estructuras de tallas de la flota y cruceros. Subestimaciones (círculos rojos) y sobreestimaciones (círculo blanco). El tamaño del globo indica la magnitud relativa del error por tallas. **Modelo alternativo.**

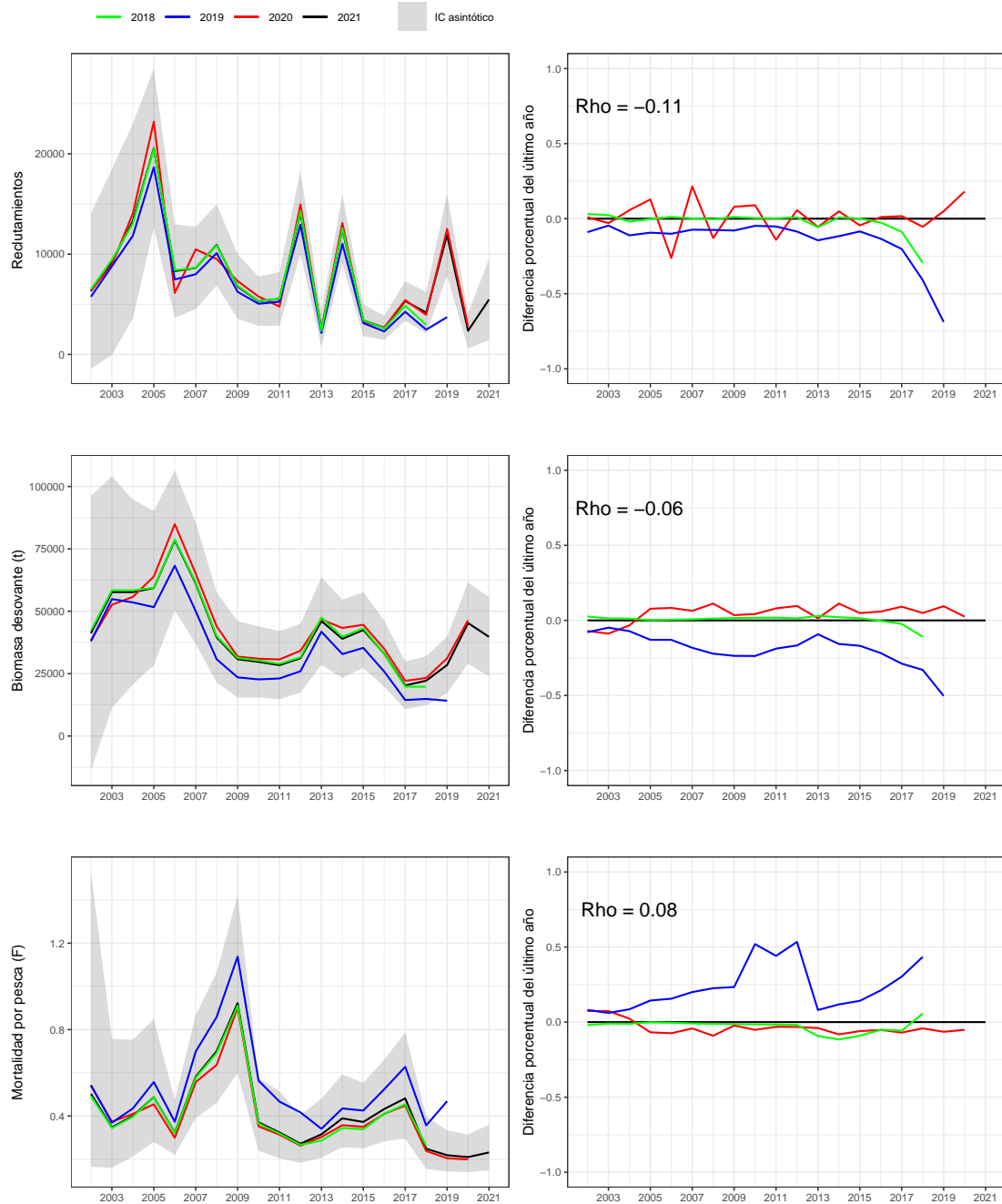


Figura 12. Patrón retrospectivo estándar (panel izquierdo) y relativo (panel derecho) de los reclutamientos, biomasa desovante y de la mortalidad por pesca de sardina austral de la Región de Los Lagos. **Modelo base.**

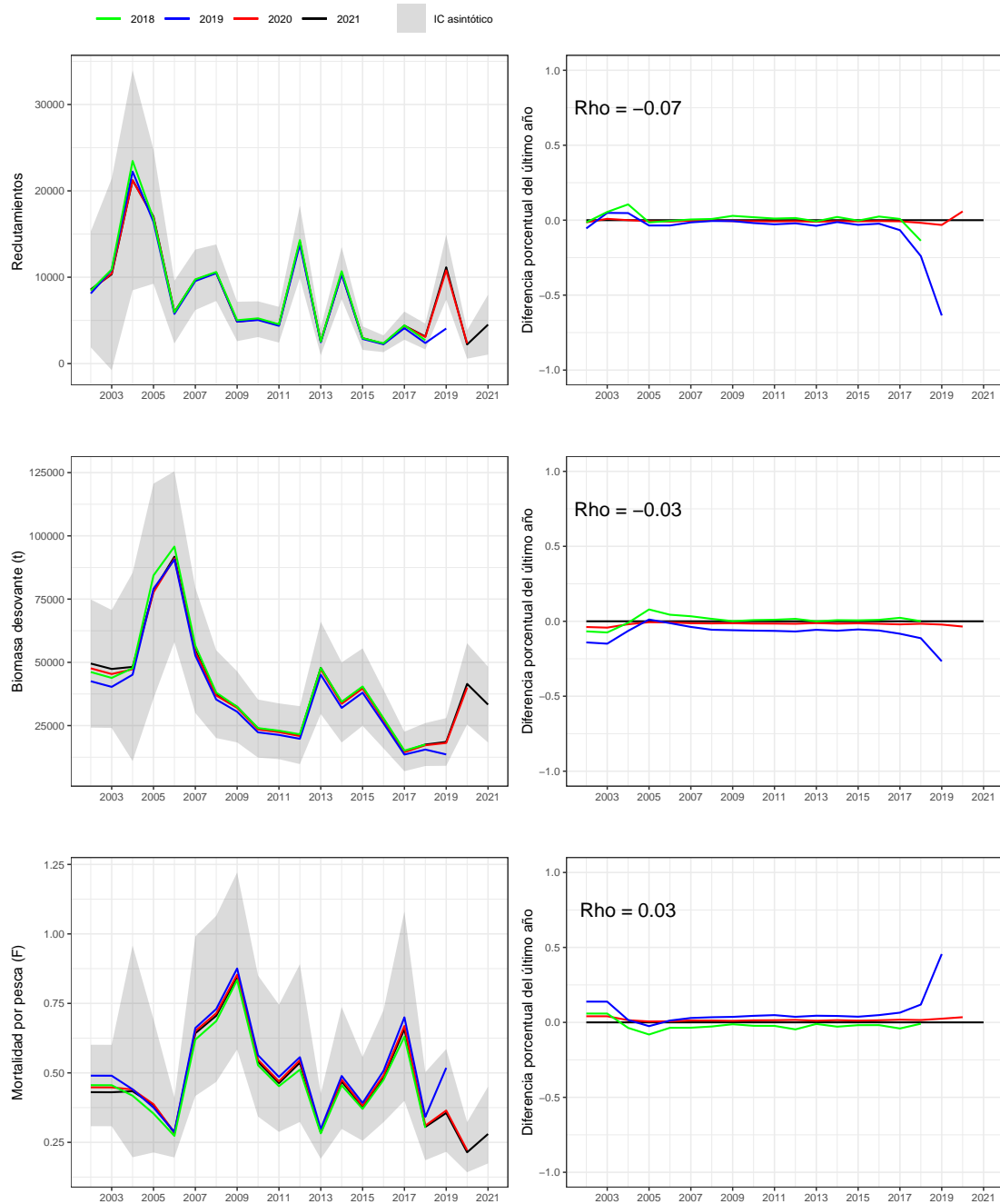


Figura 13. Patrón retrospectivo estándar (panel izquierdo) y relativo (panel derecho) de los reclutamientos, biomasa desovante y de la mortalidad por pesca de sardina austral de la Región de Los Lagos. **Modelo alternativo.**

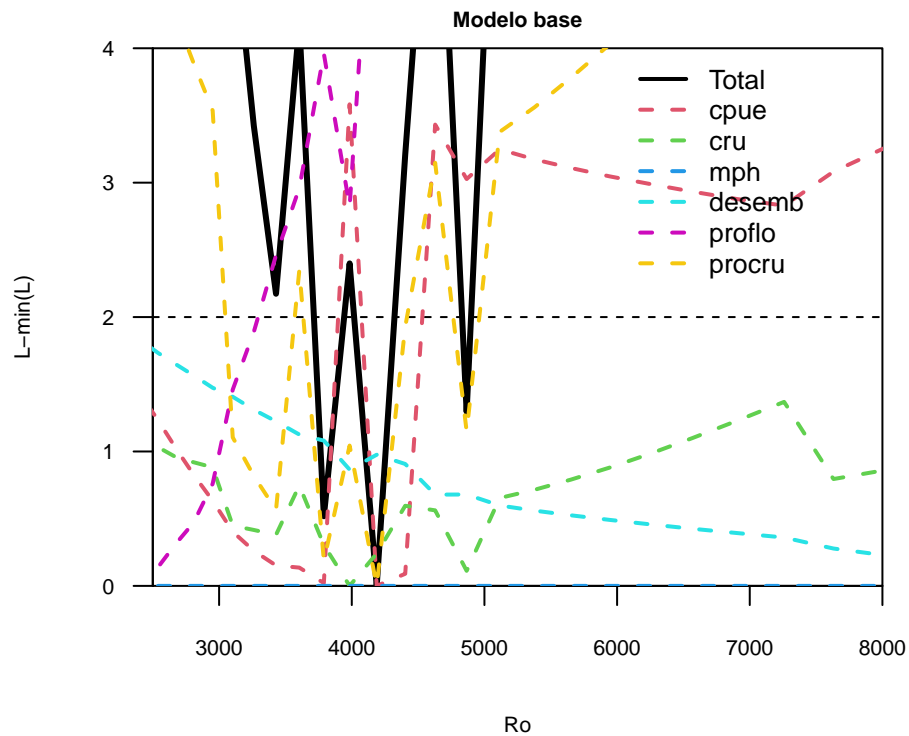


Figura 14. Perfil de verosimilitud donde la línea horizontal representa el nivel crítico para el test X^2 .
Modelo base.

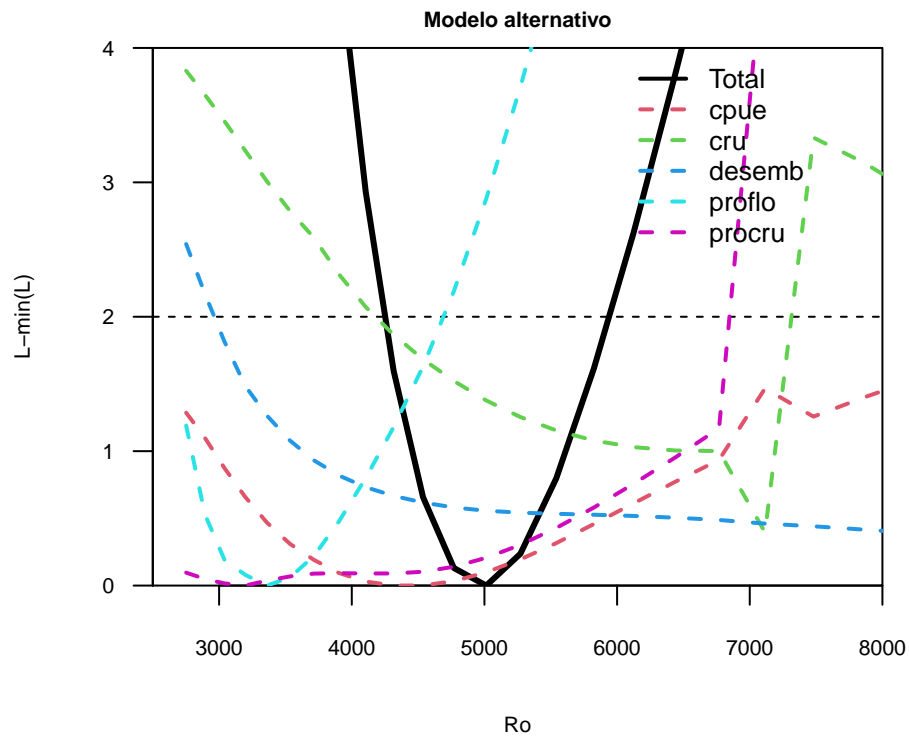


Figura 15. Perfil de verosimilitud donde la línea horizontal representa el nivel crítico para el test X^2 .
Modelo alternativo.

3.1.4. Comparación de las tendencias poblacionales del modelo base y alternativo

La **Figura 16** muestra las estimaciones de las variables poblacionales de biomasa, reclutamientos y mortalidad por pesca obtenidas por el modelo base y alternativo. No se observan diferencias significativas entre ambos modelos, generando las mismas tendencias y magnitudes poblacionales. Las principales diferencias se observan en la estimación de la mortalidad por pesca, donde el modelo alternativo presenta mayor variabilidad interanual que el modelo base. La **Figura 17** muestra el patrón de explotación estimado a la talla por el modelo base y estimado a la edad por el modelo alternativo. En el caso del modelo base se consideran tres bloques de selectividad cuyo objetivo fue predecir de mejor manera la variabilidad y bimodalidad en las estructuras de tallas, aunque sin mejoras importantes en los ajustes en las estructuras de longitudes de la flota y crucero. El modelo alternativo no reconoce cambios en la selectividad de la flota aunque se utilice el mismo supuesto de bloques del modelo base, por lo tanto, no se consideran bloques de selectividad para la flota. Mientras que la selectividad del crucero ambos modelos estiman cambios en la selectividad a partir del año 2013.

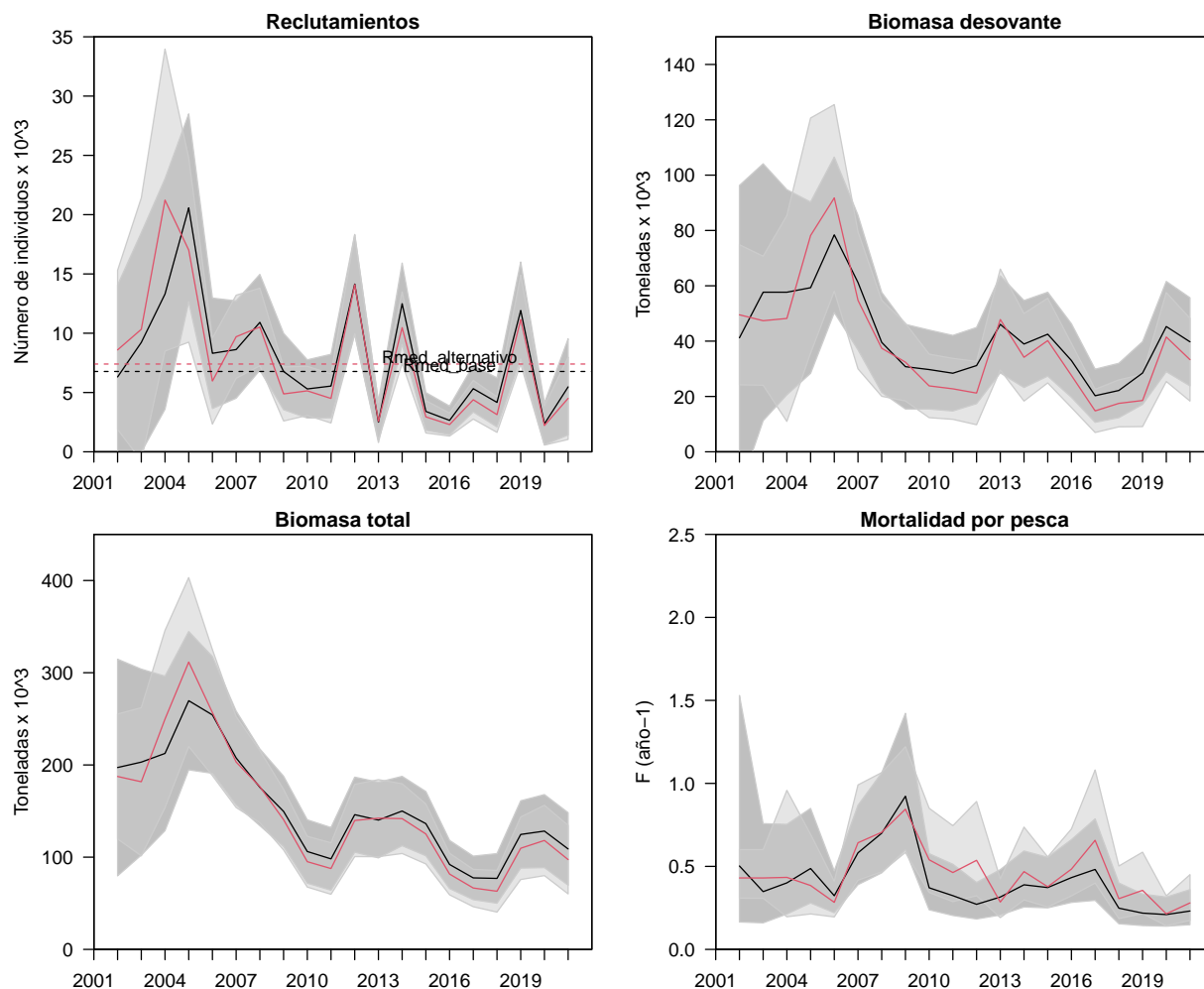


Figura 16. Comparación de los reclutamientos, mortalidad por pesca, biomasa total y desovante entre el modelo base y alternativo de sardina austral Región de Los Lagos. Línea negra (modelo base), línea roja (modelo alternativo), región sombreada corresponde al Intervalo de Confianza respectivo de cada modelo (IC).

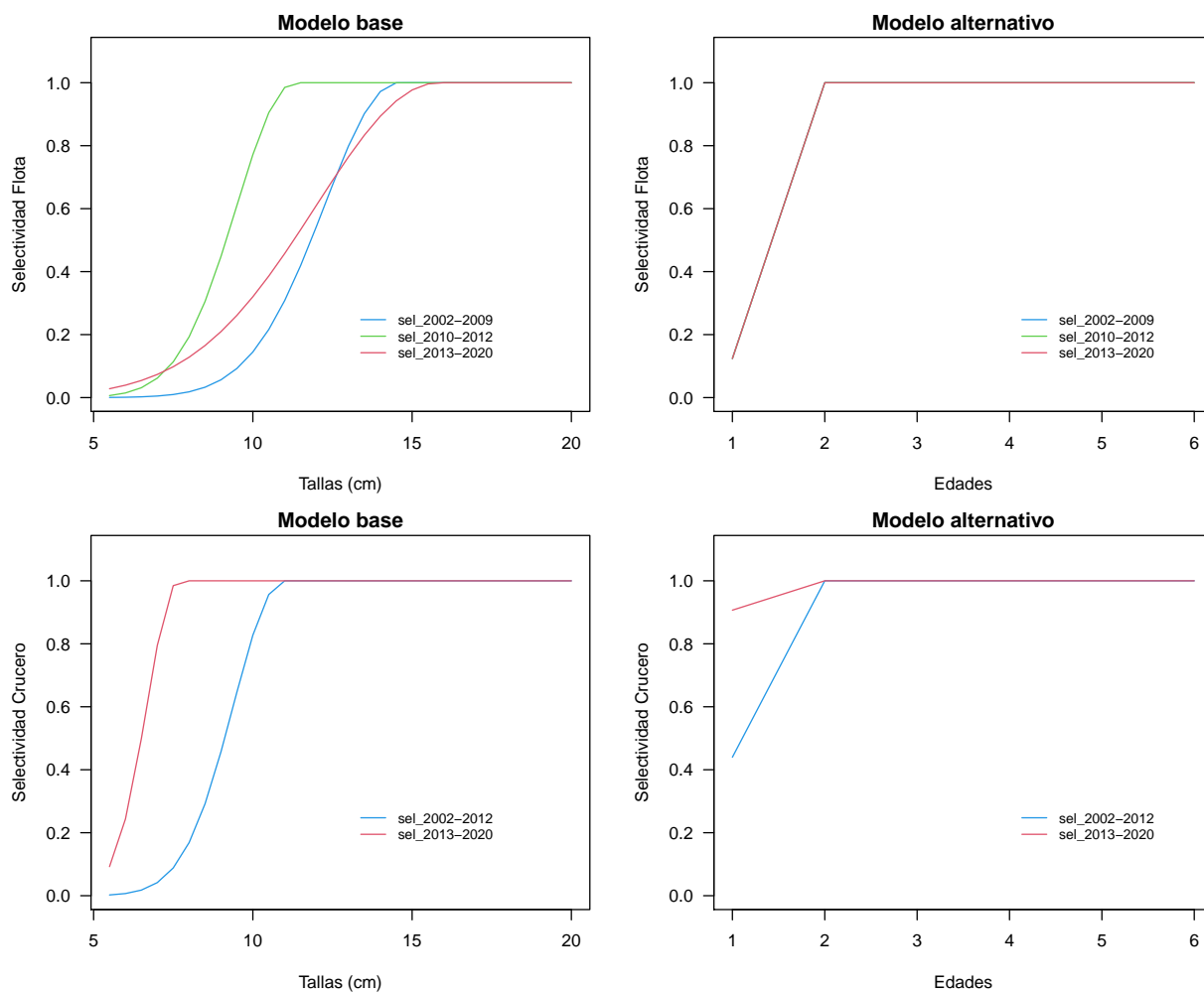


Figura 17. Patrón de explotación o selectividad de la flota (panel superior) y de los cruceros acústicos (panel inferior) estimados por el modelo base y alternativo de la sardina austral Región de Los Lagos.



3.1.5. Comparación del Estado de explotación estimado por el modelo base y alternativo

Los PBRs fueron estimados a partir de un análisis de rendimiento y biomasa por recluta, dado el patrón de selectividad de la flota, pesos medios y madurez sexual a la edad, se estima el nivel de mortalidad por pesca (F_{RMS}) asociado a la proporción de la Biomasa Desovante virginal (BD_0) considerada objetivo o un proxy basado en la literatura (Clark, 1993; Mace y Sissenwine, 1993). Cabe señalar que la biomasa desovante se calcula al mes de agosto y considera el efecto edad específico de la mortalidad (natural y por pesca). En este análisis se identifica el nivel de referencia biológico 60 %BDPR que se supone debería minimizar el impacto de la pesca sobre el stock, permitiendo el escape en torno al 55 % de BD_0 , valor que existiría en ausencia de explotación pesquera (**Tabla 2 y Figura 18**). El valor de BD_0 estimado por el modelo alternativo es un 10 % mayor al estimado por el modelo base, esto genera que los valores de referencia BD_{RMS} y BD_{LIM} también sean mayores en el modelo alternativo. Estas diferencias impactan levemente en los indicadores del estatus utilizados para definir la condición del recurso, principalmente en términos de BD/BD_{RMS} (**Figura 19**). No obstante, el nivel de F_{RMS} para los últimos años de la serie es similar entre ambos modelos (0,31 modelo base y 0,30 modelo alternativo), no obstante, la mayor variabilidad estimada por el modelo alternativo en la mortalidad por pesca también genera diferencias en la serie de F/F_{RMS} . (**Figura 19**).

Respecto a la condición del stock, ambos modelos posicionan al sardina austral de la Región de Los Lagos en una condición de plena-explotación para los años 2020 y 2021 (**Figura 20 y 21**), no obstante, el modelo alternativo muestra una mayor probabilidad de estar en una condición de sobreexplotación (26 %) que el modelo base actual (2 %) (ver **Tabla 2**).

Tabla 2. Puntos Biológicos de Referencia (PBRs) y probabilidades de estar bajo BD_{RMS} y sobre F_{RMS} y en sobreexplotación, colapsado o sobrepesca, calculados por el modelo base y alternativo.

	M. Base	M. Alternativo
BD_0	54.592	59.815
BD_{RMS}	30.026	32.898
BD_{LIM}	15.013	16.449
F_{RMS}	0,320	0,299
$p(BD_{2020} < BD_{RMS})$	0,050	0,470
$p(F_{2020} > F_{RMS})$	0,040	0,390
$p(sobreexplotación)$	0,020	0,260
$p(agotado/colapsado)$	0,000	0,000
$p(sobrepesca)$	0,010	0,240

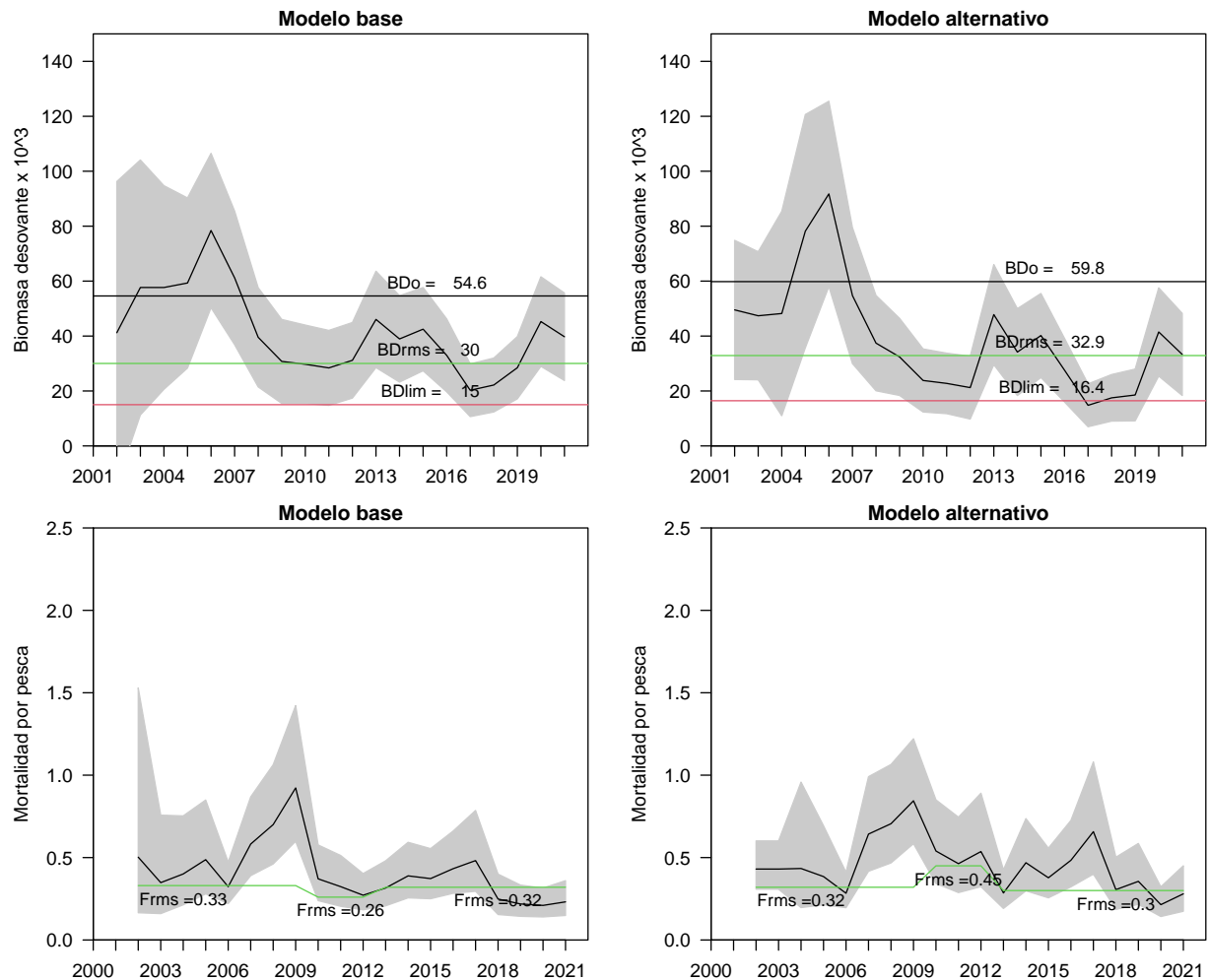
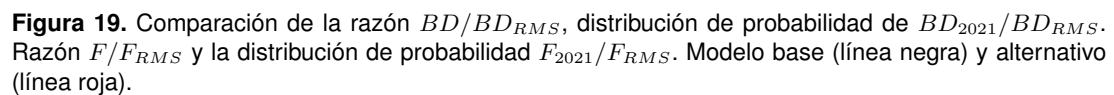


Figura 18. Serie de biomasa desovante y mortalidad por pesca junto a los PBRs correspondientes. las líneas horizontales corresponden a los siguientes PBRs: línea negra es BDo , línea verde es $BDrms$ y $Frms$ y línea roja es $BDlim$ calculados por el modelo base (panel izquierdo) y modelo alternativo (panel derecho).



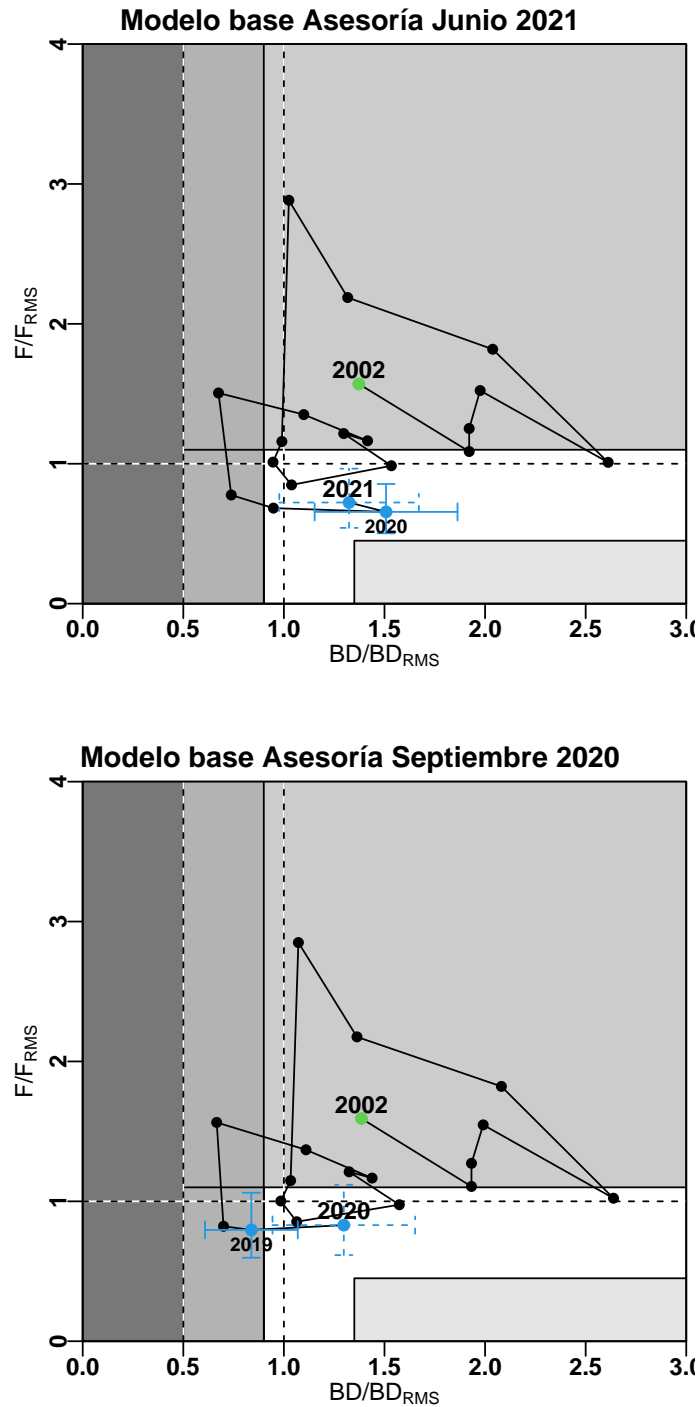


Figura 20. Diagrama de fases de explotación de la biomasa desovante respecto de la mortalidad por pesca de la evaluación del modelo base para la asesoría de junio 2021 (panel superior) y septiembre 2020 (panel inferior). Cruz azul corresponde a los intervalos de confianza de la razón BD/BD_{RMS} y F/F_{RMS} . El año con cruz continua corresponde a "*Estatus completo*" y la cruz con línea discontinua a "*Estatus preliminar*"

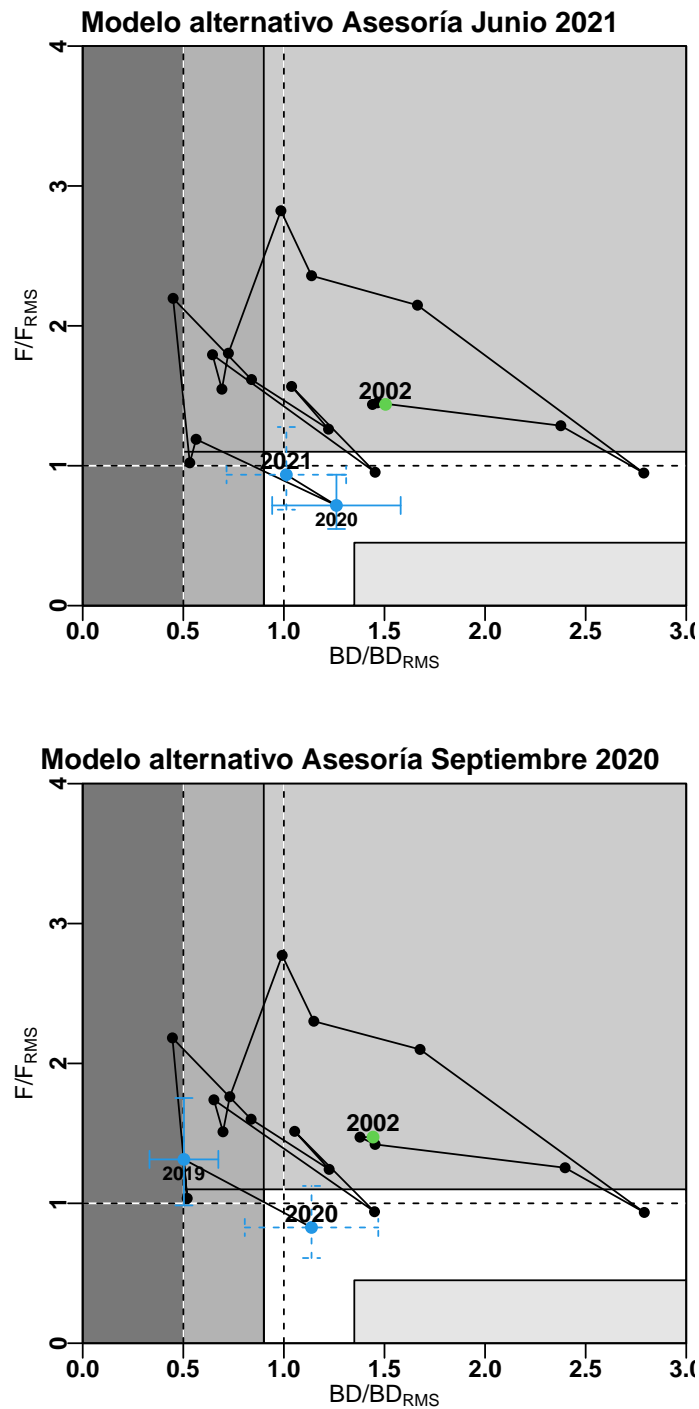


Figura 21. Diagrama de fases de explotación de la biomasa desovante respecto de la mortalidad por pesca de la evaluación del modelo alternativo para la asesoría de junio 2021 (panel superior) y septiembre 2020 (panel inferior). Cruz azul corresponde a los intervalos de confianza de la razón BD/BD_{RMS} y F/F_{RMS} . El año con cruz continua corresponde a "*Estatus_completo*" y la cruz con línea discontinua a "*Estatus_preliminar*"

3.1.6. Comparación con asesorías previas

Se comparan los resultados de los principales indicadores de estado para el modelo base y alternativo para asesorías previas (septiembre 2020, junio 2020, septiembre 2019, junio 2019) y actual (junio 2021) para evaluar la consistencia de cada modelo. El desempeño histórico se ilustra en la **Figura 22**, en las cuales se observa un adecuado nivel de convergencia histórica. Las diferencias ocurren en los tres últimos años (2018, 2019 y 2020), observándose una tendencia a subestimar los niveles de reclutamientos, biomasa desovante y sobreestimar las mortalidades por pesca, excepto para la asesoría de junio 2020, donde el supuesto de captura para el año 2020 menor al utilizado en asesorías posteriores. En general, el modelo alternativo genera menores diferencia entre asesorías que el modelo base actual.

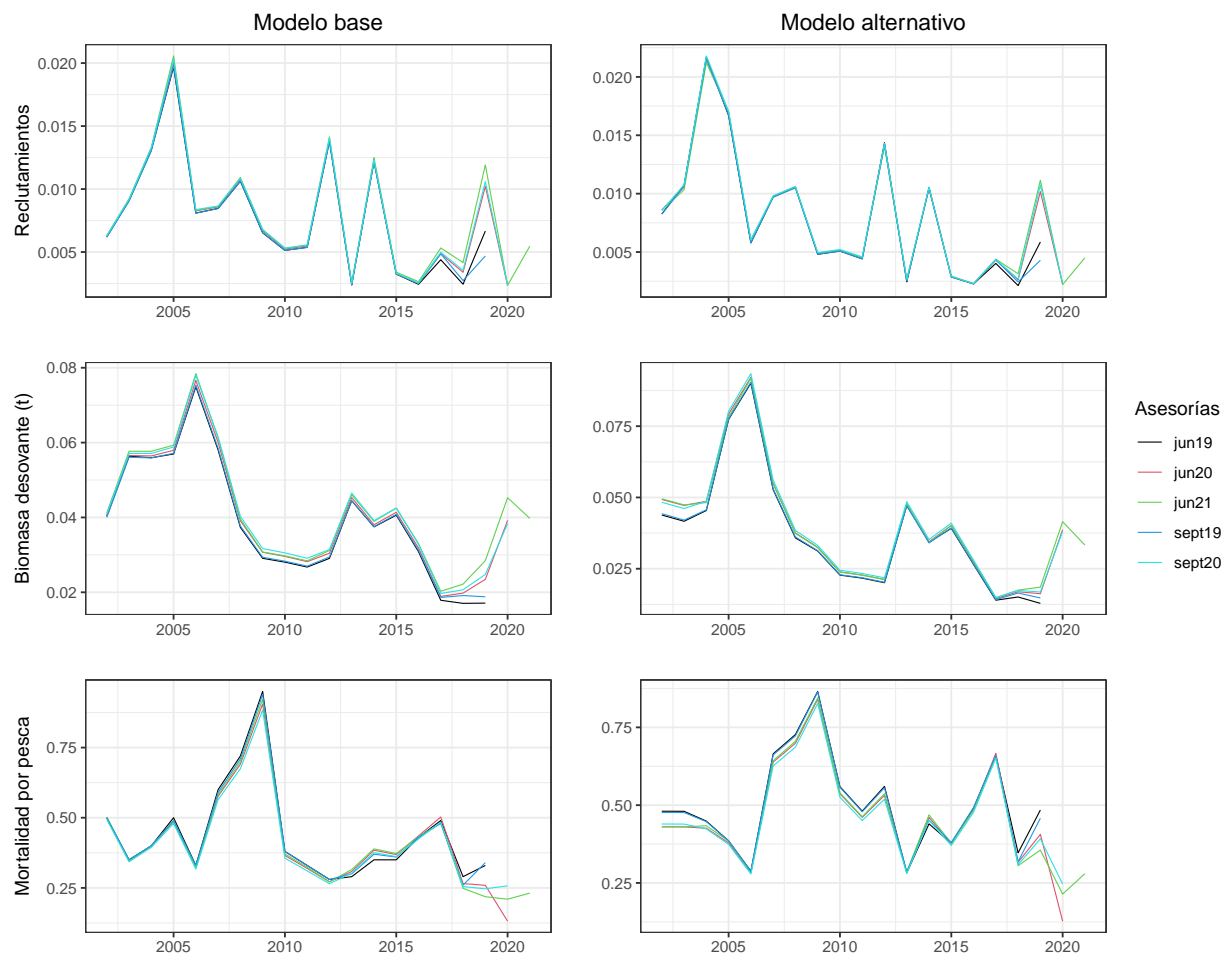


Figura 22. Comparación de los reclutamientos, biomasa desovante y mortalidad por pesca estimadas en asesorías anteriores por el modelo base (panel izquierdo) y modelo alternativo (panel derecho).



3.1.7. Comparación de la proyección de la Captura Biológicamente Aceptable (CBA inicial - Hito 1)

La CBA inicial es estimada bajo tres escenarios de posibles estados de la naturaleza (reclutamiento alto, medio y bajo) y para distinto percentiles de probabilidad en el primer hito de determinación de CBA (septiembre de cada año). La **Figura 23** muestra los escenarios de reclutamiento utilizados para el cálculo de CBA 2020 y 2021 estimada por el modelo base y alternativo. La **Tabla 3** muestran los valores de CBA proyectada para el año 2020 y 2021 por el modelo base y alternativo bajo los tres escenarios de reclutamiento y percentiles de probabilidad de captura entre el 10 % y 50 %. Al respecto, en ambos modelos el escenario de reclutamientos altos es el que genera los mayores niveles de captura, siendo el modelo base quien estima los mayores niveles. Al respecto. Las **Figura 24 y 25** muestra el efecto del escenario de reclutamiento sobre la estructura de tallas vulnerada, reflejando que los escenarios de reclutamiento impactan a un mayor rango de tallas en el modelo base, generando mayores niveles de captura en el escenario de reclutamiento alto. Este efecto tiene relación con el patrón de selectividad de la flota y en segundo lugar por la amplitud del patrón de reclutamiento estimada por el modelo base. Las **Figura 26 y 27** indican que la CBA proyectada por el modelo base es un 12 % mayor al estimado por el modelo alternativo, considerando el escenario de reclutamiento medio como referencia.

3.1.8. Comparación de CBA calculado para el mismo año (Revisión de CBA - Hito 2)

El valor de CBA actualizada para el año 2020 y 2021 resultante desde el modelo base y alternativo se muestra en la **Tabla 4**. En el caso de la CBA actualizada del año 2020, se aprecian mínimas diferencias entre ambas aproximaciones, siendo tales diferencias estadísticamente no significativas. La densidad de probabilidad de la CBA 2020 para el percentil del 50 % muestra coincidencia entre ambos enfoques de modelación (**Figura 28**). La diferencia gráfica para cada percentil de probabilidad es también mínima. No obstante, en el caso de la CBA actualizada para el año 2021 (**Tabla 4**), el modelo alternativo estima una CBA 21 % menor al modelo base actual, considerando el percentil del 50 % como referencia. Esta diferencia se debería principalmente a la menor abundancia de peces estimada por el modelo alternativo en el rango de tallas 14,5 cm a los 17,5 cm LT (**Figura 29**).

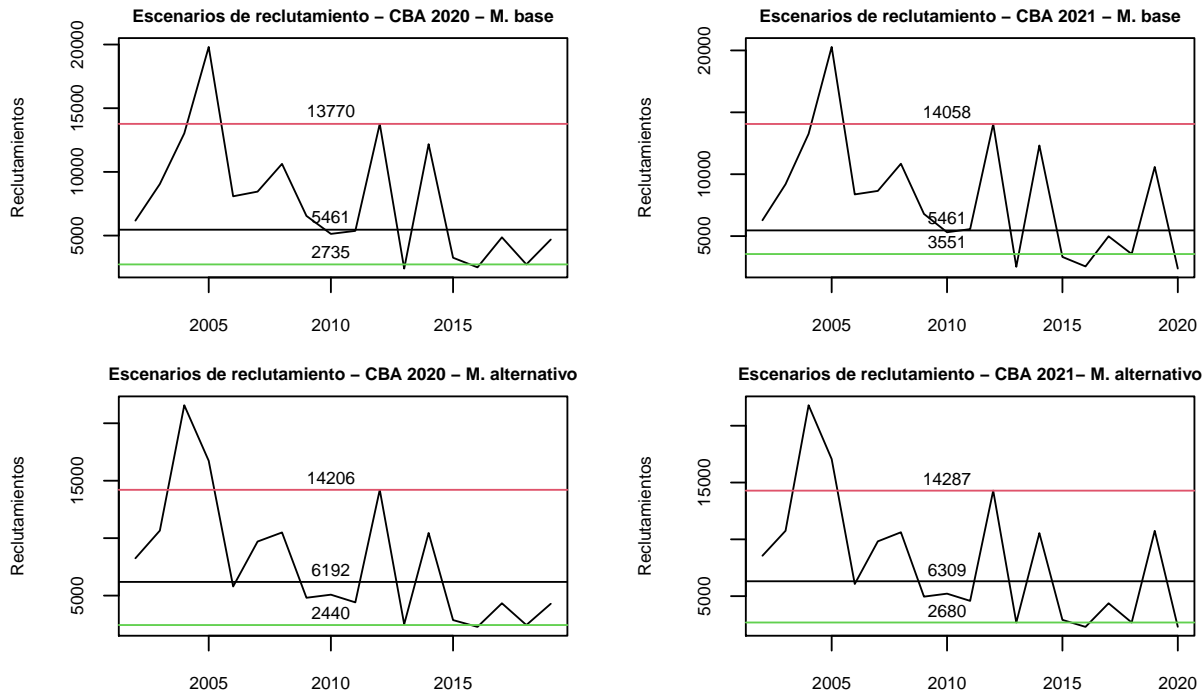


Figura 23. Comparación de los escenarios de reclutamientos utilizados para la proyección de CBA 2020 y 2021 calculada por el modelo base (panel superior) y alternativo (panel inferior). Línea roja es Ralto, línea negra es Rmed y línea verde es Rbajo.

Tabla 3. CBA proyectada para el año 2020 (Asesoría de septiembre 2019) y CBA proyectada para el año 2021 (asesoría septiembre 2020) para percentiles de probabilidad entre el 10 % y 50 % y bajo tres escenarios de reclutamiento, utilizando el modelo base y alternativo.

Modelo	Año proyección	Percentil de probabilidad de captura	Reclutamiento medio	Reclutamiento alto	Reclutamiento bajo
M. base	CBA 2020	10 %	7415	10716	6142
		20 %	8432	11952	7154
		30 %	9166	12842	7883
		40 %	9793	13604	8506
		50 %	10379	14315	9089
M. alternativo	CBA 2020	10 %	6107	7415	5425
		20 %	7149	8526	6459
		30 %	7901	9328	7204
		40 %	8543	10012	7841
		50 %	9143	10652	8436
M. base	CBA 2021	10 %	10899	14253	10005
		20 %	12213	15766	11300
		30 %	13161	16857	12234
		40 %	13971	17789	13032
		50 %	14728	18660	13778
M. alternativo	CBA 2021	10 %	8932	9961	8451
		20 %	10294	11364	9799
		30 %	11277	12377	10771
		40 %	12116	13242	11601
		50 %	12900	14050	12377

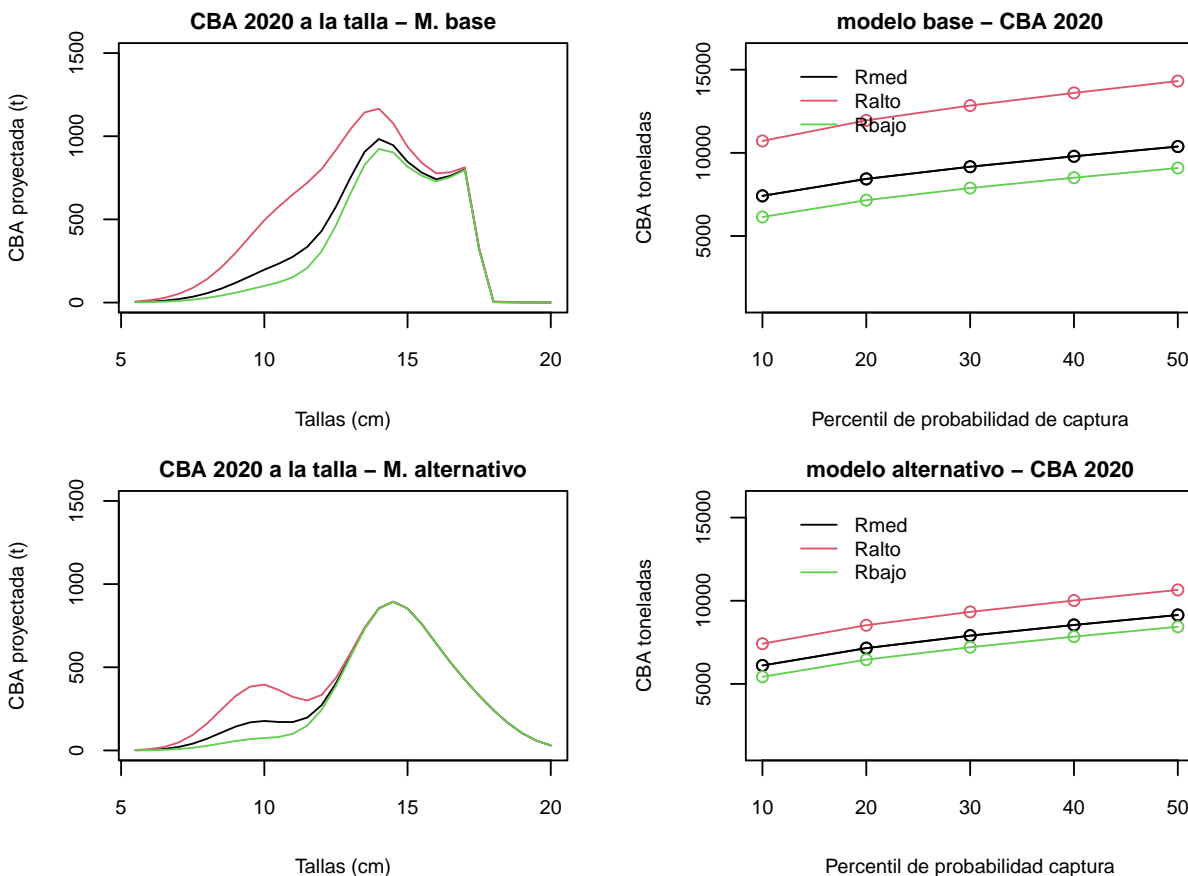


Figura 24. CBA proyectada al 2020 estimada a la talla (panel izquierdo) y para cada percentil de captura (panel derecho). Estimaciones realizadas bajo los tres escenarios de reclutamiento por el modelo base y alternativo.

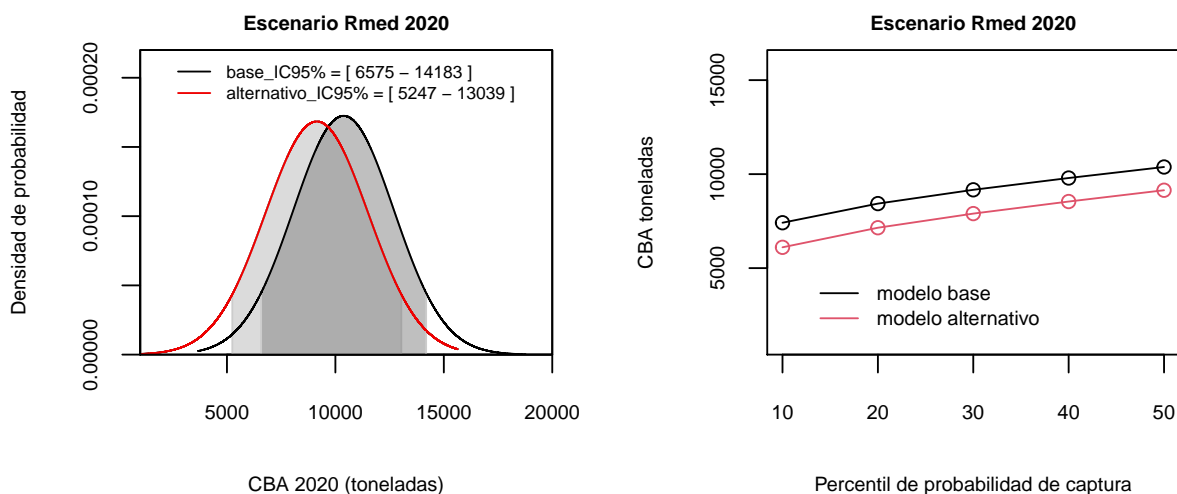


Figura 25. Distribución de probabilidad de la CBA proyectada para el año 2020 (panel izquierdo) y la CBA estimada para cada percentil de probabilidad de captura (10% - 50%) estimada con el modelo base y alternativo.

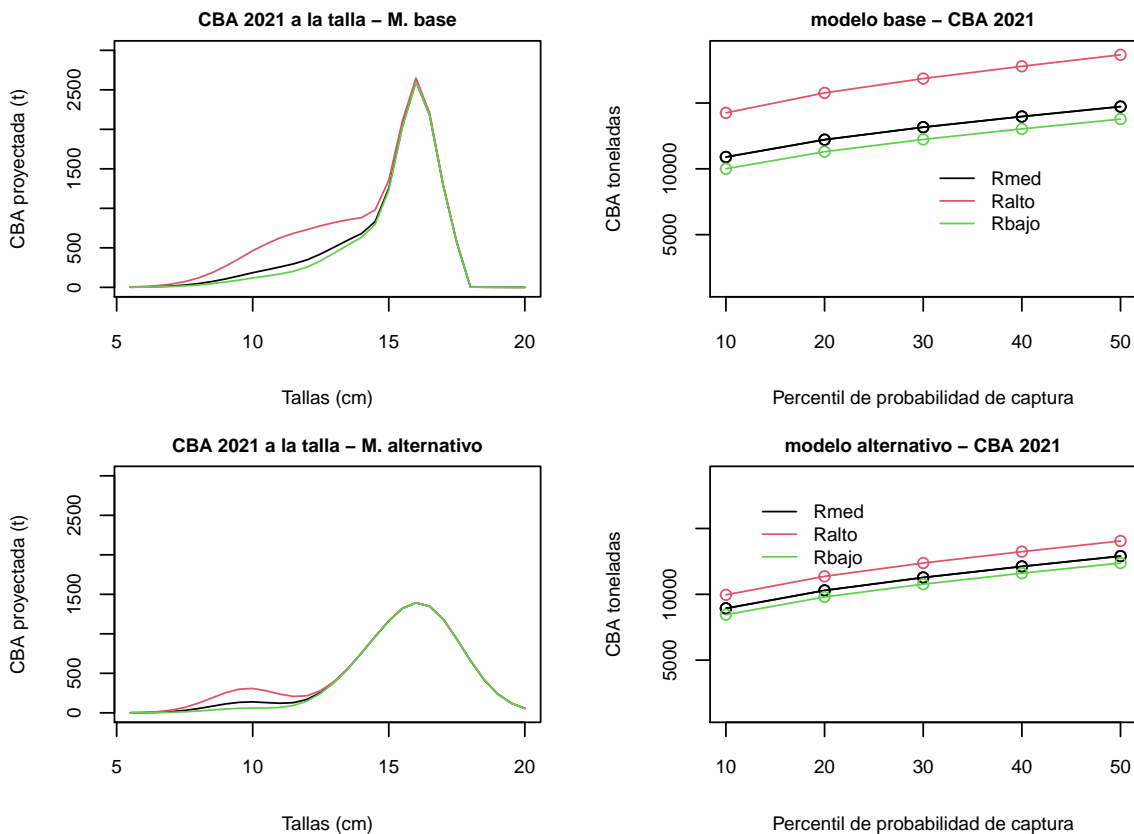


Figura 26. CBA proyectada al 2021 estimada a la talla (panel izquierdo) y para cada percentil de captura (panel derecho). Estimaciones realizadas bajo los tres escenarios de reclutamiento por el modelo base y alternativo.

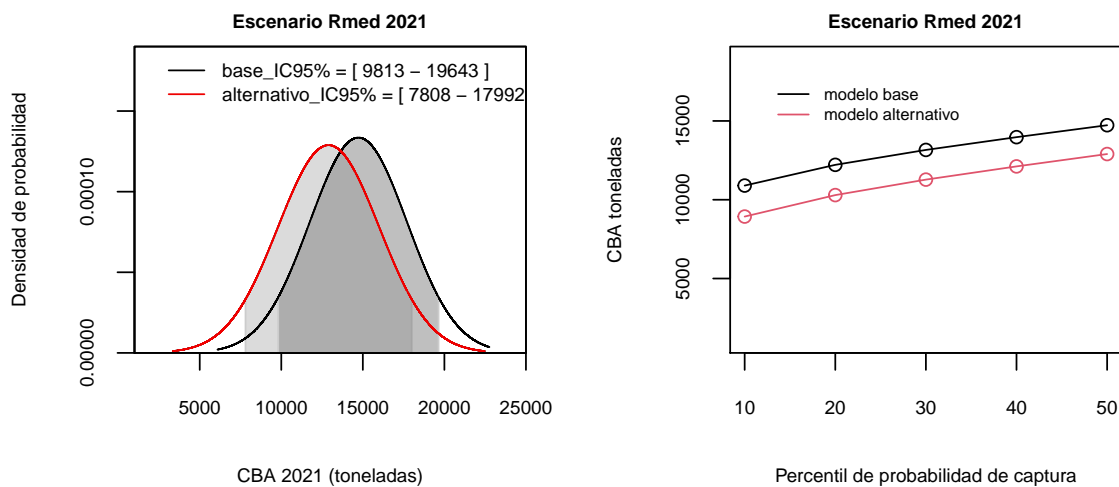


Figura 27. Distribución de probabilidad de la CBA proyectada para el año 2021 (panel izquierdo) y la CBA estimada para cada percentil de probabilidad de captura (10% - 50%) estimada con el modelo base y alternativo.



Tabla 4. Actualización de la CBA 2020 (Asesoría de junio 2020) y la CBA 2021 (Asesoría de junio 2021) para percentiles de probabilidad entre el 10 % y 50 % y niveles de resguardo respectivo, utilizando el modelo base y alternativo.

Modelo	Año	Percentil de probabilidad	CBA	Resguardo
M. base	CBA 2020	10 %	12.898	0,25
		20 %	14.393	0,17
		30 %	15.471	0,10
		40 %	16.391	0,05
		50 %	17.252	0,00
M. alternativo	CBA 2020	10 %	12.391	0,28
		20 %	14.011	0,18
		30 %	15.179	0,11
		40 %	16.178	0,05
		50 %	17.111	0,00
M. base	CBA 2021	10 %	12.987	0,23
		20 %	14.334	0,15
		30 %	15.306	0,09
		40 %	16.136	0,05
		50 %	16.912	0,00
M. alternativo	CBA 2021	10 %	9.922	0,26
		20 %	11.117	0,17
		30 %	11.980	0,11
		40 %	12.716	0,05
		50 %	13.405	0,00

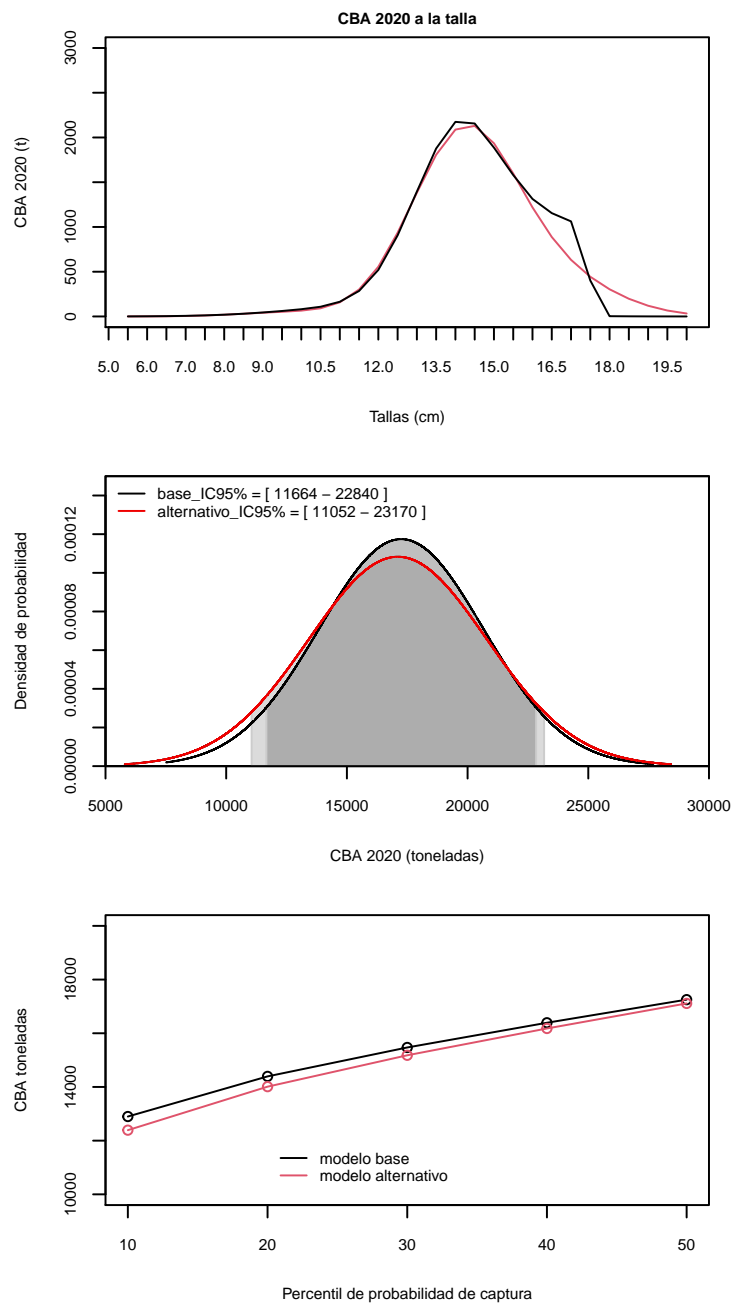


Figura 28. Actualización de CBA 2020 estimada a la talla (panel superior). Distribución de probabilidad de la actualización de CBA 2020 (panel central) y la CBA estimada para cada percentil de probabilidad (10 % - 50 %) estimada con el modelo base y alternativo.

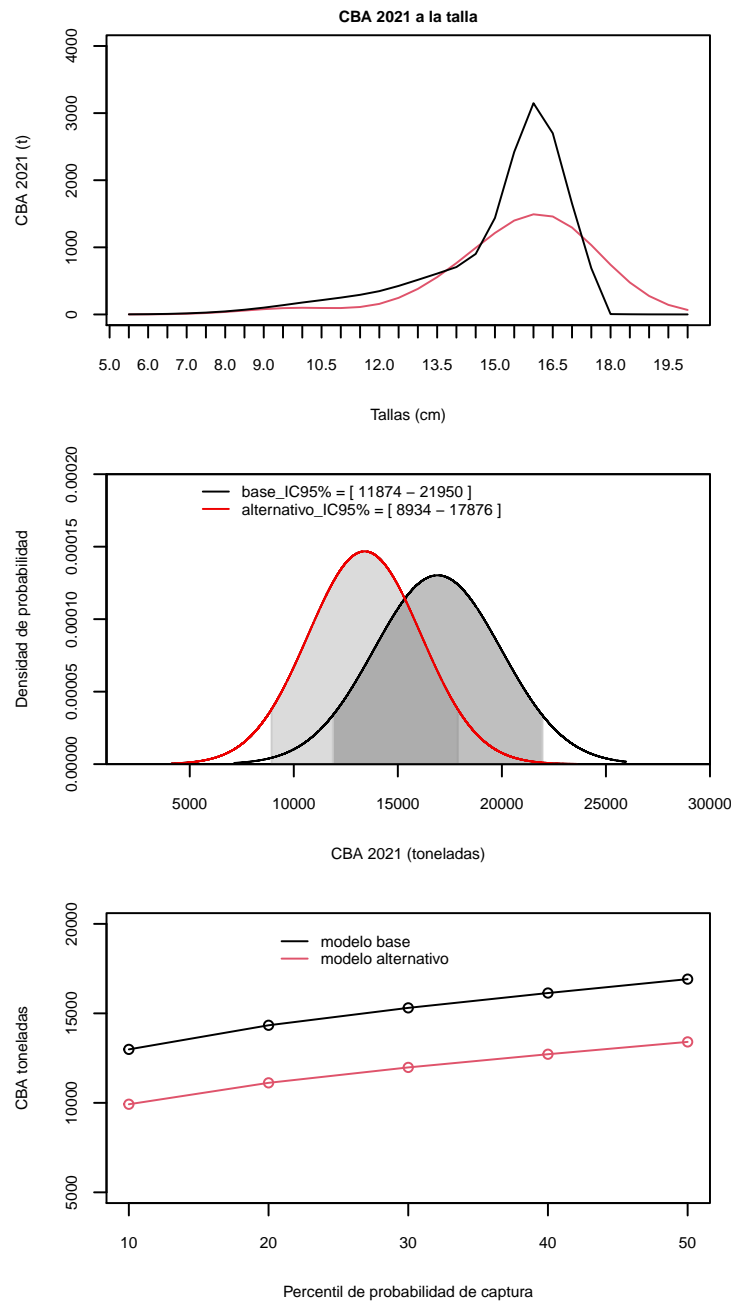


Figura 29. Actualización de CBA 2021 estimada a la talla (panel superior). Distribución de probabilidad de la actualización de CBA 2021 (panel central) y la CBA estimada para cada percentil de probabilidad (10 % - 50 %) estimada con el modelo base y alternativo.



4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el contexto del Programa de Mejoramiento Continuo de la Calidad de la Asesoría Científica (PMCCAC), se establece como tarea prioritaria el desarrollo de un modelo alternativo que describa la dinámica de la sardina austral de la Región de Los Lagos en edades. La implementación de un modelo en edad cumple con el objetivo de estandarizar las metodologías utilizadas en las especies pelágicas que hoy presentan diferentes estructuras, dificultando la interpretación de los procesos que describen la dinámica de estas especies y la comparación de sus resultados. También, permite soslayar algunas de las desventajas que podría presentar un modelo con dinámica en tallas, como por ejemplo, la confusión en la estimación de parámetros debido a la dificultad para discernir entre cohortes (Punt *et al.*, 2013).

Se desarrolló un plan de actividades que incluyó la presentación al CCT-PP, de estados de avance y resultados comparativos entre el modelo base en tallas y el modelo en edad, estos avances fueron reportados en Leal & Zúñiga (2020) y Zúñiga *et al.*, (2021). En este documento se presentan las similitudes tanto en el desempeño del modelo como en las tendencias, magnitudes de las principales variables de estado, determinación de estatus, efecto de los escenarios de reclutamiento en la proyección de CBA (Hito 1 de manejo) y en la revisión de CBA (Hito 2 de manejo). Ambos modelos utilizaron la misma información de entrada y configuración.

Al respecto, ambos modelos reproducen la tendencia general de los índices y no parecen mostrar diferencias importantes, excepto en la CPUE, donde el modelo alternativo, ajusta de mejor manera algunos años respecto del modelo base actual. El modelo alternativo es más eficiente en capturar la bimodalidad en la estructura de longitudes observada durante algunos años en la flota y las fuertes modas de los cruceros acústicos, principalmente asociado a los pulsos de reclutamientos. El ajuste del modelo base evidencia un truncamiento en las tallas sobre los 18 cm, lo cual genera unos picos de abundancia en las tallas de 16 y 17 cm en algunos años. No obstante, ambos modelos evidencian un patrón similar en los residuales de las composiciones de tallas de ambos modelos.

A partir del año 2017, los desembarques y la CPUE se redujeron fuertemente. Los rendimientos de pesca (CPUE) también mostraron una importante reducción, disminuyendo desde 24,1 toneladas por viaje (t/v) el año 2016 hasta valores en torno a las 10 t/v a partir del año 2017. La misma situación se observó en el índice acústico a partir del año 2016. Esta reducción en el índice acústico fue mayor en los años 2018 y 2019, provocando un cambio de escala en los niveles de biomasa del stock respecto de evaluaciones previas al año 2018. La biomasa acústica disminuyó desde 106 mil t el año 2016 hasta 20,3 mil t en el 2018. Este último valor fue el más bajo de toda la serie. No obstante, en el estudio de abril de 2019, la biomasa mostró una recuperación hasta 43,7 mil t y el año 2020, un incremento significativo hasta las 160 mil t. alcanzando el segundo valor más alto desde el año 2006. Los años 2017 y 2018, las cifras de desembarques oficiales de sardina austral en la Región de Los Lagos no alcanzaron a completar la cuota asignada. En el 2017 el desembarque oficial alcanzó 14 mil t para una cuota de 20 mil t. El año 2018 en tanto, el desembarque oficial fue de 8,35 mil t para una cuota de 17,2 mil t y el año 2019 se completó la cuota de 11,2 mil t, y el 2020 se registraron 14,2 mil t de 15,5 mil t de cuota. Durante el año 2017 se informó sobre la escasa presencia de certificadores en esta pesquería. Esto se viene presentando de manera creciente desde el 2012 e implica una mayor incertidumbre sobre el valor real del desembarque. Este aspecto es importante debido a que dicho índice representa una fuente de información relevante dentro del modelo de evaluación de stock.

Ambos modelos de evaluación realizan un balance de todas las piezas de información para modelar la dinámica del stock. La reducción de los índices los años 2017 y 2019 producen un cambio de escala en los estimados poblacionales. El año 2020, tanto la información de la flota como del crucero sugieren escasos reclutamientos de individuos a la población. Así, en términos de ajuste, los modelos reconocen medianamente el incremento en la biomasa del stock estimado en la última evaluación directa.

De este modo, el análisis retrospectivo indica que la fuerte reducción (por debajo de los niveles promedio) en los índices que conducen a ambos modelos (base y alternativo), generó cambios hacia menores valores de R_0 (Rmed) a partir del año 2018 (posible cambio de productividad). Para ambos enfoques de evaluación, el stock debería ser de un tamaño menor, en términos de biomasa y abundancia, que los niveles estimados previo al año 2018. Este cambio de escala genera un conflicto en la estimación de parámetros del modelo



base que impide generar estimaciones para los años previos al 2018 considerando los mismos supuestos del caso base actual. El modelo alternativo si permite generar estimaciones para los años previos al 2018 pero evidencia un cambio de productividad influenciado por la disminución abrupta registrada en los índices del modelo (Zúñiga *et al.*, 2021).

Para realizar la comparación de ambos modelos, se consideran los mismos años retrospectivos para ambos modelos, este caso desde el año 2018 al 2021. Al respecto, para los cuatro últimos años, ambos modelos muestran una tendencia a subestimar los valores de reclutamientos y biomasa desovante y a sobreestimar los niveles de mortalidad por pesca. No obstante, el modelo alternativo tiene un mejor desempeño ($Rho = -0.07$, -0.03 y -0.03) respecto al modelo base actual ($Rho = -0.11$, -0.06 y -0.06). No se descarta que un posible incremento en los índices (biomasa en acústica y CPUE) en estudios futuros, junto con un incremento en los desembarques, reescalen nuevamente la biomasa que estima el modelo hacia valores más altos.

Por lo tanto, es necesario realizar un estudio que permita comprobar la hipótesis de un cambio de productividad generado por posibles cambios demográficos de la población en la zona. Otra hipótesis a evaluar es el efecto de cambios espaciales y/o temporales de la capturabilidad de la flota que se podría estar confundiendo con cambios de productividad de la población. Para corregir posibles errores de proceso del modelo es necesario evaluar estas hipótesis y de esta forma mejorar el patrón retrospectivo observado en ambos modelos de evaluación de stock de sardina austral de la Región de Los Lagos.

El perfil de la verosimilitud total del modelo base muestra un mínimo en los 4100 aprox, con una tendencia a buscar tres mínimos bajo y sobre el R_0 estimado. Mientras que el modelo alternativo encuentra sólo un mínimo en torno a los 5000 millones de peces. Para el modelo base los datos cuyos perfiles estuvieron más próximos entre si y la diferencia del log verosimilitud respecto del mínimo se elevó por sobre el criterio estadístico $X^2=1,92$ fue la proporción de tallas del crucero (procr), al parecer la proporción de tallas de la flota indicaría un menor nivel de R_0 en ambos modelos. Si bien, el modelo alternativo muestra un mejor perfil de la verosimilitud total, ambos modelos muestran mucho ruido en los perfiles de verosimilitud de los datos de entrada, por lo tanto, es necesario revisar las hipótesis antes señaladas para corregir posibles errores de procesos producto de mala especificación de algunos supuestos empleados. Por lo tanto, es necesario revisar las hipótesis relacionadas a un posible cambio de productividad de la población o cambios en la operación de pesca. Identificar la causa de la reducción de los índices a partir del 2018 permitirá corregir posibles errores de procesos producto de mala especificación de algunos supuestos empleados. Al respecto, se recomienda utilizar el modelo de evaluación con dinámica en edad (modelo alternativo) que facilita el análisis de posibles cambios demográficos asociados a disminución o aumento de la talla/peso a una misma edad y que muestra un mejor desempeño en la estimación de la verosimilitud total.

Las variables poblacionales de biomasa, reclutamientos y mortalidad por pesca obtenidas por el modelo base y alternativo no mostraron diferencias significativas, generando las mismas tendencias y magnitudes poblacionales. Las principales diferencias se observan en la estimación de la mortalidad por pesca, donde el modelo alternativo presenta mayor variabilidad interanual que el modelo base. El patrón de explotación estimado a la talla por el modelo base considera tres bloques de selectividad cuyo objetivo fue predecir de mejor manera la variabilidad y bimodalidad en las estructuras de tallas, aunque sin mejoras importantes en los ajustes en las estructuras de longitudes de la flota y crucero. El modelo alternativo no reconoce cambios en la selectividad de la flota aunque se utilice el mismo supuesto de bloques del modelo base, por lo tanto, el modelo base actualizado no considera los bloques de selectividad para la flota. Mientras que la selectividad del crucero ambos modelos estiman cambios en la selectividad a partir del año 2013.

Respecto a la estimación de los puntos biológicos de referencia, el valor de BD_0 estimado por el modelo alternativo es un 10% mayor al estimado por el modelo base, esto genera que los valores de referencia BD_{RMS} y BD_{LIM} también sean mayores en el modelo alternativo. Estas diferencias impactan levemente en los indicadores del estatus utilizados para definir la condición del recurso, principalmente en términos de BD/BD_{RMS} . Sin embargo, el nivel de F_{RMS} para los últimos años de la serie es similar entre ambos modelos (0.31 modelo base y 0.30 modelo alternativo), no obstante, la mayor variabilidad estimada por el modelo alternativo en la mortalidad por pesca también genera diferencias en la serie de F/F_{RMS} . Respecto a la condición del stock, ambos modelos posicionan a sardina austral de la Región de Los Lagos en una condición de plena-explotación para los años 2020 y 2021, no obstante, el modelo alternativo muestra una



mayor probabilidad de estar en una condición de sobreexplotación (26 %) que el modelo base actual (2 %).

En relación a la comparación con asesorías previas, las principales diferencias entre hitos ocurren en los tres últimos años (2018, 2019 y 2020) observándose una tendencia a subestimar los niveles de reclutamientos, biomasa desovante y sobreestimar las mortalidades por pesca, excepto para la asesoría de junio 2020, donde el supuesto de captura para el año 2020 menor al utilizado en asesorías posteriores. En general, el modelo alternativo genera menores diferencia entre asesorías que el modelo base actual.

La proyección de CBA, en ambos modelos el escenario de reclutamientos altos es el que genera los mayores niveles de captura. En general, los escenarios de reclutamiento impactan a un mayor rango de tallas en el modelo base, generando mayores niveles de captura en el escenario de reclutamiento alto. Este efecto tiene relación con el patrón de selectividad de la flota y por la amplitud del patrón de reclutamiento estimada por el modelo base. De este modo, la CBA proyectada por el modelo base es un 12 % mayor al estimado por el modelo alternativo, considerando el escenario de reclutamiento medio como referencia.

En el caso de la CBA actualizada del año 2020 (Hito 2), se aprecian mínimas diferencias entre ambas aproximaciones, siendo tales diferencias estadísticamente no significativas. La densidad de probabilidad de la CBA 2020 para el percentil del 50 % muestra coincidencia entre ambos enfoques de modelación. No obstante, en el caso de la CBA actualizada para el año 2021, el modelo alternativo estima una CBA 21 % menor al modelo base actual, considerando el percentil del 50 % como referencia. Esta diferencia se debería principalmente a la menor abundancia de peces estimada por el modelo alternativo en el rango de tallas 14,5 cm a los 17,5 cm LT.



5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Clark, W. G. 1993. The effect of recruitment variability on the choice of a target level of spawning biomass per recruit. Pages 233-246 in G. Kruse, R. J. Marasco, C. Pautzke, and T. J. Quinn II, editors. Proceedings of the international symposium on management strategies for exploited fish populations. University of Alaska, Alaska Sea Grant College Program Report 93-02, Fairbanks.

Deriso, R., T. Quinn & P. Heal, 1985. Catch-age analysis with auxiliary information. Can. Fish. Aq. Sci. 42: 815-824.

Ernst B, J Valero & O Hamel. 2015. Programa anual de revisión experta a la asesoría científica de las principales pesquerías nacionales, año 2013: sardina austral (*Sprattus fuegensis*). Informe Final. Proyecto N° 2013-125-FAP-20. 176 pp.

Leal E. & M.J. Zúñiga. 2020. PRIMER INFORME. Estatus y posibilidades de explotación biológicamente sustentables de sardina austral, Región de Los Lagos, año 2021. Subsecretaría de Economía y EMT. Instituto de Fomento Pesquero (IFOP), Valparaíso, Chile. 80 p + Anexos.

Mace, P. M. & Sissenwine, M.P. 1993. How much spawning per recruit is enough? Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, 120, 110-118.

Punt, Andre E. and Huang, TzuChuan and Maunder & Mark N. 2013. Review of integrated size-structured models for stock assessment of hard-to-age crustacean and mollusc species. ICES Journal of Marine Science, Volume 70, Issue 1, January 2013, Pages 16-23, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss185>.

Sullivan P. J., H.L. Lai & V.F. Gallucci. 1990. A catch-at-length analysis that incorporates a stochastic model of growth. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 47: 184-198.

Zúñiga M.J., D. Bucarey & J.C. Quiroz. 2021. DOCUMENTO TÉCNICO. Estatus y posibilidades de explotación biológicamente sustentables de sardina austral, Región de Los Lagos, año 2022. Subsecretaría de Economía y EMT. Instituto de Fomento Pesquero (IFOP), Valparaíso, Chile. 72 p + Anexos.