

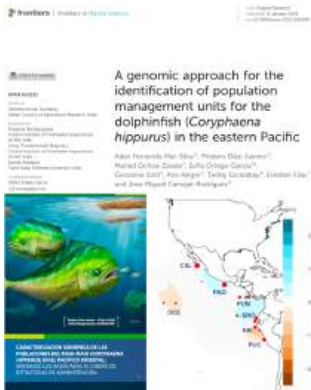
Evaluación del stock de mahi/perico/dorado (*Coryphaena hippurus*)
en el Pacífico este subecuatorial con modelos de depleción
generalizados multi-anales de 6 flotas, bajo dos hipótesis de
estructura espacial

March 9, 2026

Ruben H. Roa-Ureta (independiente), Pablo Marín Abanto (IMARPE), Edgar J. Torrejón (IMARPE), Ana Alegre Norza Sior (IMARPE), Manuel Peralta (IPIAP),
Esteban Elías (IPIAP)

Teddy Escarabay y Jonathan Pincay de Sustainable Fisheries Partnership
contribuyeron sustancialmente con información y coordinación.

(1) Estructura espacial de stocks de mahi en el Pacífico oriental



- 1 Un estudio genético reciente demostró barreras genéticas en la línea ecuatorial, separando stocks de mahi del Noreste y del Sureste.
- 2 Mahi en el Pacífico oriental puede tener una estructura espacial compleja, con meta-poblaciones, lo que sugiere que no se debe evaluar como unidad poblacional en la región entera.
- 3 Sin embargo, aún no está claro si las flotas ecuatorianas y peruanas operan sobre diferentes unidades poblacionales.
- 4 Los pescadores ecuatorianos aseguran que pescan el stock del sureste, que es común para las flotas peruanas y ecuatorianas.
- 5 Hemos evaluado el stock bajo ambas hipótesis, stocks separados en los caladeros ecuatorianos y peruanos, y stock común en ambos caladeros nacionales.

(2) Metodología de evaluación de stocks de mahi en el Pacífico Sureste

ICES Journal of Marine Science, 2022, 79, 1481–1496
DOI: 10.1093/icesjms/fsab072
Advance access published online first: 8 May 2022
Original Article



A multiannual five-fleet generalized depletion model for the stock assessment of the Mediterranean dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) fishery

Vicenç Molto^{1,2,*}, Ignacio A. Catalán², Andrés Ospina-Álvarez³, Pilar Hernández³ and Rubén H. Roa-Ureta⁴

¹Centre Oceanogràfic de Balears, Centro Nacional IEO-COIC, Moll de Ponent s/n, 07015 Palma de Mallorca, Spain

²IMEDEA, CSIC-UIB, Miquel Marqués, 21, 07190 Esporles, Balearic Islands, Spain

³Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), General Fisheries Commission for the Mediterranean, Technical Unit for Western Mediterranean, 29014 Málaga, Spain

⁴Independent consultant, Portugalete, 48303 Barakaldo, Spain

*Corresponding author: tel: +34988587540; e-mail: vicenc.molto@ieo.es

- El stock de mahi que se pesca en el Mediterraneo por parte de flotas de Italia, Malta, España, Tunisia, Algeria, Libya y Egipto ha sido regularmente evaluado con modelos de depleción generalizados que se desarrollaron bajo contrato con FAO-GFCM.
- FAO-GFCM ha formalmente designado estos modelos como adecuados para proporcionar **consejo de gestión cualitativo (estatus de explotación)** y están ahora mismo siendo considerados para **consejo de gestión cuantitativo (límites de captura)** en un taller referencial de trabajo en Roma.

(3) Metodología de evaluación de stocks de mahi en el Pacífico Sureste

Los modelos de depleción generalizados multi-anales y multi-flota funcionan con una base de datos de

- capturas totales mensuales por flota,
- esfuerzo de pesca totales mensuales por flota, y
- pese medio mensual de los peces por flota.

durante cualquier número de años.

En los casos de Ecuador y Perú tenemos

- **Ecuador:** cuatro flotas, barcos y fibras dirigidos a mahi, y barcos y fibras dirigidos a otros peces pelágicos grandes que capturan mahi incidentalmente;
- **Peru:** dos flotas, barcos y fibras dirigidos a mahi.

La base de datos se extiende desde Enero 2004 a Diciembre 2023.

Presentaremos resultados bajo stock único (6-flotas) y bajo dos stocks (4-flotas Ecuador, 2-flotas Perú) aunque los aspectos técnicos serán descritos en el contexto de la hipótesis de 6 flotas y stock único.

(4) Metodología de evaluación de stocks de mahi en el Pacífico Sureste

El modelo de evaluación de stocks directamente predice las capturas a cada paso de tiempo para cada flota estimando 111 parámetros desde 2160 observaciones (1080 pares de capturas (en número) y esfuerzo).

$$C_t = k_1 E_{1,t}^{\alpha_1} N_t^{\beta_1} + k_2 E_{2,t}^{\alpha_2} N_t^{\beta_2} + k_3 E_{3,t}^{\alpha_3} N_t^{\beta_3} + k_4 E_{4,t}^{\alpha_4} N_t^{\beta_4} + k_5 E_{5,t}^{\alpha_5} N_t^{\beta_5} + k_6 E_{6,t}^{\alpha_6} N_t^{\beta_6}$$

$$\begin{aligned} C_t = & k_1 E_{1,t}^{\alpha_1} e^{M_P/2} \left(N_0 e^{-M_P t} - e^{M_P/2} \left[\sum_{i=1}^{i=t-1} C_{1,i} e^{-M_P(t-i-1)} \right] + \sum_{j=1}^{j=15} I_{1,j} R_{1,j} e^{-M_P(t-\tau_{1,j})} \right)^{\beta_1} + \\ & k_2 E_{2,t}^{\alpha_2} e^{M_P/2} \left(N_0 e^{-M_P t} - e^{M_P/2} \left[\sum_{i=1}^{i=t-1} C_{2,i} e^{-M_P(t-i-1)} \right] + \sum_{j=1}^{j=15} I_{2,j} R_{2,j} e^{-M_P(t-\tau_{2,j})} \right)^{\beta_2} + \\ & k_3 E_{3,t}^{\alpha_3} e^{M_E/2} \left(N_0 e^{-M_E t} - e^{M_E/2} \left[\sum_{i=1}^{i=t-1} C_{3,i} e^{-M_E(t-i-1)} \right] + \sum_{j=1}^{j=15} I_{3,j} R_{3,j} e^{-M_E(t-\tau_{3,j})} \right)^{\beta_3} + \\ & k_4 E_{4,t}^{\alpha_4} e^{M_E/2} \left(N_0 e^{-M_E t} - e^{M_E/2} \left[\sum_{i=1}^{i=t-1} C_{4,i} e^{-M_E(t-i-1)} \right] + \sum_{j=1}^{j=15} I_{4,j} R_{4,j} e^{-M_E(t-\tau_{4,j})} \right)^{\beta_4} + \\ & k_5 E_{5,t}^{\alpha_5} e^{M_E/2} \left(N_0 e^{-M_E t} - e^{M_E/2} \left[\sum_{i=1}^{i=t-1} C_{5,i} e^{-M_E(t-i-1)} \right] + \sum_{j=1}^{j=15} I_{5,j} R_{5,j} e^{-M_E(t-\tau_{5,j})} \right)^{\beta_4} + \\ & k_6 E_{6,t}^{\alpha_6} e^{M_E/2} \left(N_0 e^{-M_E t} - e^{M_E/2} \left[\sum_{i=1}^{i=t-1} C_{6,i} e^{-M_E(t-i-1)} \right] + \sum_{j=1}^{j=15} I_{6,j} R_{6,j} e^{-M_E(t-\tau_{6,j})} \right)^{\beta_6} \end{aligned}$$

(5) Metodología de evaluación de stocks de mahi en el Pacífico Sureste

- t es el paso de tiempo (mes), 1 a 180,
- C es la captura verdadera, que no es observada, en número,
- k es una constante de proporcionalidad, el escalamiento (similar a capturabilidad),
- E es el esfuerzo de pesca, que es observado exactamente,
- N es la abundancia del stock en números, una variable latente,
- α es un modulador adimensional del esfuerzo de pesca como predictor de la captura,
- β es un modulador adimensional de la abundancia del stock como predictor de la captura,
- M_P es la tasa de mortalidad natural del stock en Peru (month^{-1}),
- M_E es la tasa de mortalidad natural del stock en Ecuador (month^{-1}),
- N_0 es la abundancia inicial (Diciembre de 2008 en el modelo de stock único),
- R son las magnitudes de los pulsos anuales de reclutamiento (15 años \times 6 flotas),
- I es una variable indicadora que vale 0 antes de un pulso de reclutamiento y vale 1 durante y después,
- τ es el mes específico de cada año en que cada pulso de reclutamiento ocurre.

(6) Metodología de evaluación de stocks de mahi en el Pacífico Sureste

El modelo de capturas es el modelo del proceso, con $C_{f,t}$ como la verdadera pero no observada captura mensual, mientras que $\chi_{f,t}$ es la captura observada y registrada en la base de datos. El modelo estadístico se completa adoptando una de dos distribuciones de probabilidad para las capturas de cada flota, normal o lognormal

$$l_f(\boldsymbol{\theta}; \{\chi_{f,t}, E_{f,t}\}) = \begin{cases} \frac{T-2}{2} \log \left(\sum_{t=1}^T (\chi_{f,t} - C_{f,t})^2 \right) & \text{apn} \\ \frac{T-2}{2} \log \left(\sum_{t=1}^T (\log(\chi_{f,t}/C_{f,t}))^2 \right) & \text{apl} \end{cases}$$

Para facilitar la optimización sobre un volumen de log-verosimilitud de 111 dimensiones, implementamos la aproximación perfilada y ajustada de las verosimilitudes normal y lognormal, así eliminando seis parámetros que no tienen interés (las varianzas de cada distribución).

Puesto que las capturas de cada flota pueden tener distribución normal o lognormal, hay un total de $2^6 = 64$ opciones para la verosimilitud combinada.

(7) Metodología de evaluación de stocks de mahi en el Pacífico Sureste

Después de optimizar estadísticamente todas las 64 variantes posibles, examen de las propiedades de los gradientes numéricos, correlaciones entre estimados, errores estándar, y realismo biológicos, la mejor variante se obtuvo con

- distribución normal para Perú barcos
- distribución normal para Perú fibras
- distribución normal para Ecuador barcos mahi objetivo
- distribución lognormal para Ecuador fibras mahi objetivo
- distribución lognormal para Ecuador barcos bycatch
- distribución lognormal para Ecuador fibras bycatch

Todo el procesamiento de datos se hizo en R. Todas las optimizaciones estadísticas de los modelos se hicieron usando versiones adaptadas del paquete de R CatDyn. La adaptación involucró dos componentes:

- Extender el código a 6 flotas para la hipótesis de stock único y común y extender el código a 4 flotas para la hipótesis de stock único y común (de 2 flotas ya existe en CatDyn).
- Definir mortalidad natural diferente para Ecuador versus Peru en el modelos de 6 flotas.

(8) Metodología de evaluación de stocks de mahi en el Pacífico Sureste

En cada paso de tiempo (180 meses) el modelo conoce la captura por flota, la mortalidad natural, y la abundancia del stock, así que a cada paso de tiempo se puede calcular la mortalidad por pesca (F) resolviendo numéricamente para F desde la ecuación de captura de Baranov

$$\chi_{f,t} = \hat{N}_t \frac{F_{f,t}}{F_{f,t} + \hat{M}_f} (1 - e^{-\hat{M}_f - F_{f,t}})$$

Así también se puede calcular la tasa de explotación instantánea a cada paso de tiempo, ejercida por cada flota,

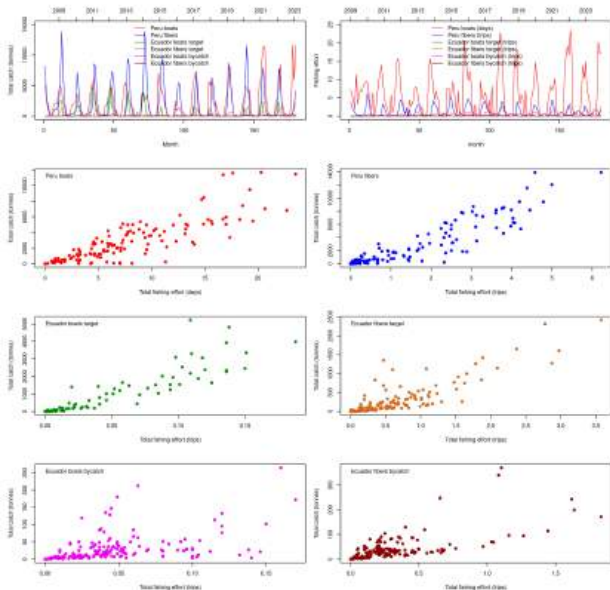
$$\hat{u}_t = \frac{F_{f,t}}{F_{f,t} + \hat{M}_{t,f}} \quad (1)$$

Finalmente, la biomasa mensual del stock fue calculada como el producto de la abundancia mensual y el peso medio mensual (w) con los datos de peso medio de cada flota, ponderados por la captura total de cada flota,

$$\hat{B}_t = \hat{N}_t \frac{\sum_1^6 w_{f,t} \chi_{f,t}}{\sum_1^6 \chi_{f,t}} \quad (2)$$

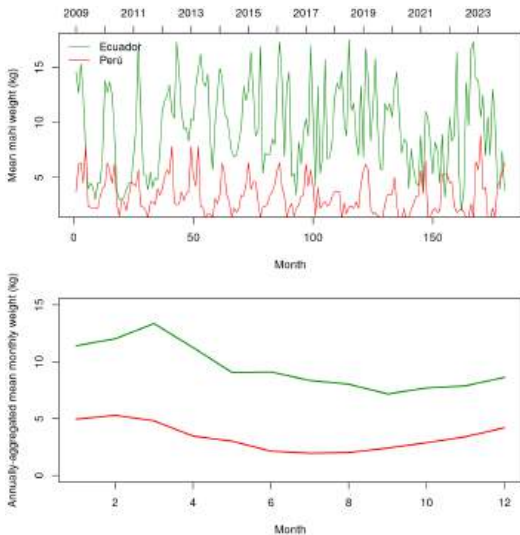
(9) Datos para la evaluación de stocks

Datos crudos de capturas y esfuerzos de pesca totales mensuales



(10) Datos para la evaluación de stocks

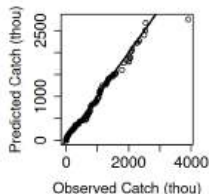
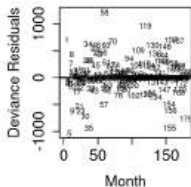
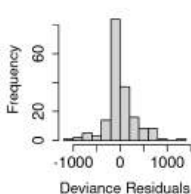
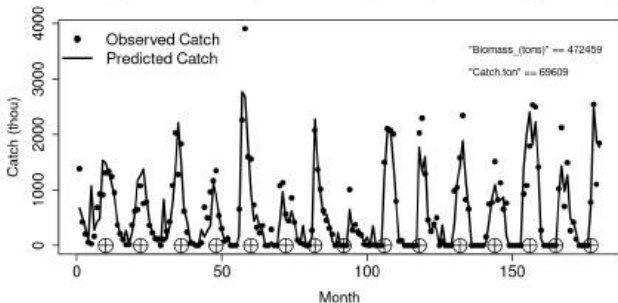
Datos crudos y agregados de peso medio de mahi en las capturas



(11) Resultados de la evaluación de stocks - 1-stock 6-flotas

Ajuste del modelos a los datos - Peru barcos

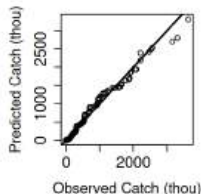
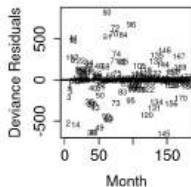
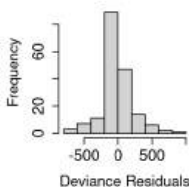
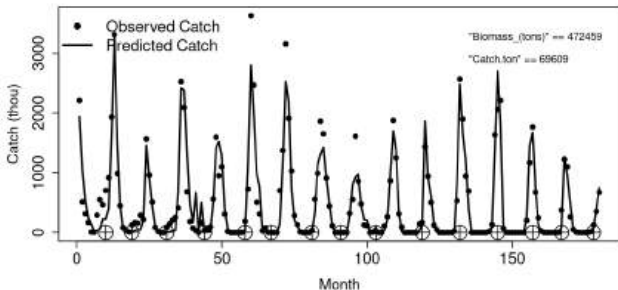
Fleet = PeruB, Perturbations = 15, Distribution = Anormal, Numerical algorithm = spg



(12) Resultados de la evaluación de stocks - 1-stock 6-flotas

Ajuste del modelos a los datos - Perú fibras

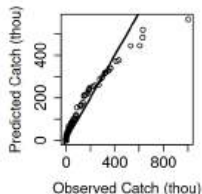
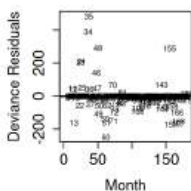
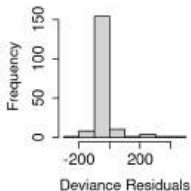
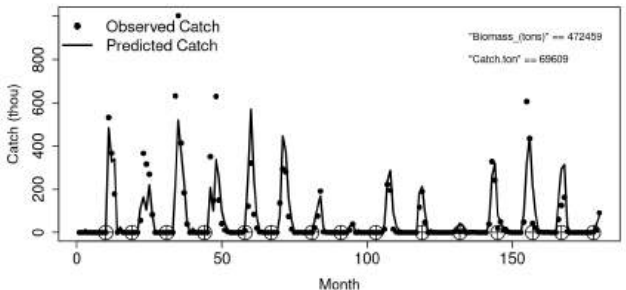
Fleet = PeruF, Perturbations = 15, Distribution = Apnormal, Numerical algorithm = spg



(13) Resultados de la evaluación de stocks - 1-stock 6-flotas

Ajuste del modelos a los datos - Ecuador barcos mahi objetivo

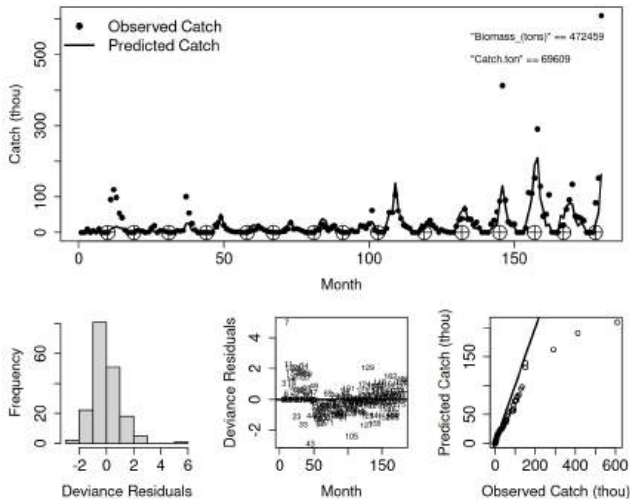
Fleet = EcuBT, Perturbations = 15, Distribution = Apsnormal, Numerical algorithm = spg



(14) Resultados de la evaluación de stocks - 1-stock 6-flotas

Ajuste del modelos a los datos - Ecuador fibras mahi objetivo

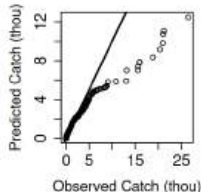
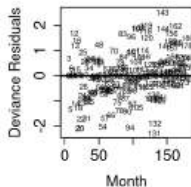
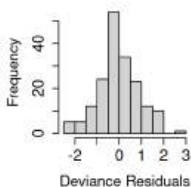
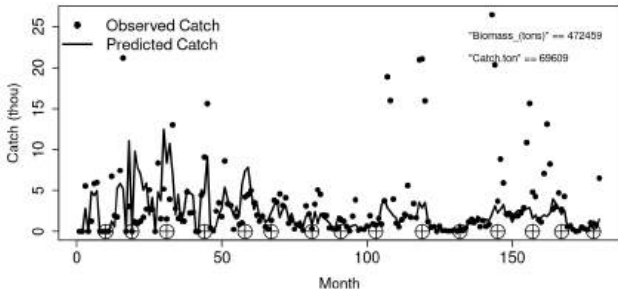
Fleet = EcuFT, Perturbations = 15, Distribution = Apnormal, Numerical algorithm = spg



(15) Resultados de la evaluación de stocks - 1-stock 6-flotas

Ajuste del modelos a los datos - Ecuador barcos mahi bycatch

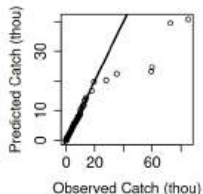
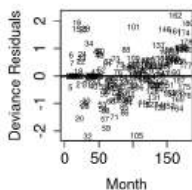
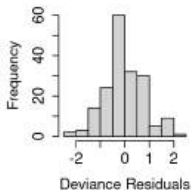
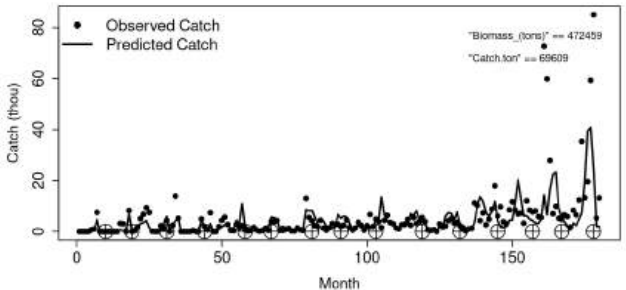
Fleet = EcuBB, Perturbations = 15, Distribution = Apnormal, Numerical algorithm = spg



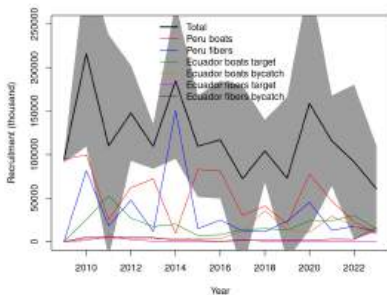
(16) Resultados de la evaluación de stocks - 1-stock 6-flotas

Ajuste del modelos a los datos - Ecuador fibras mahi bycatch

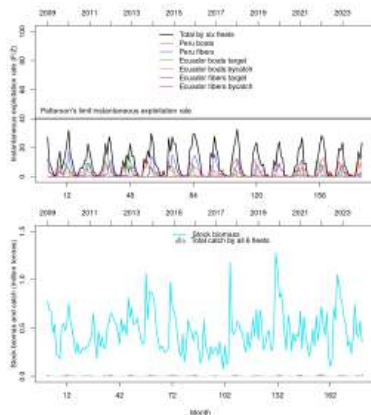
Fleet = EcuFB, Perturbations = 15, Distribution = Apnormal, Numerical algorithm = spg



(17) Resultados de la evaluación de stocks - 1-stock 6-flotas

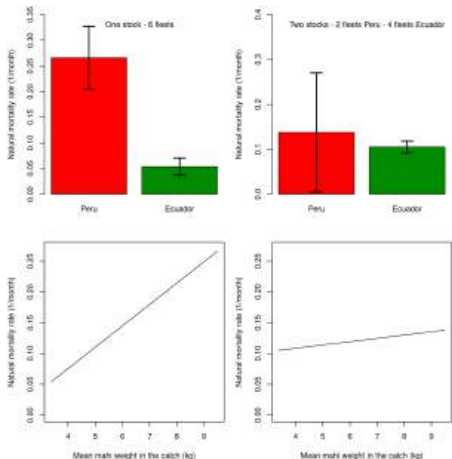


- El reclutamiento total ha disminuido ligeramente desde 2009 pero se ha mantenido bastante estable desde 2015, en cerca de 90 millones de peces por año.
- La tasa de explotación instantánea no llega al 40% en ningún mes de la serie de tiempo.



- La biomasa mensual ha sido estable en el largo plazo, en cerca de 0,5 millones de toneladas.

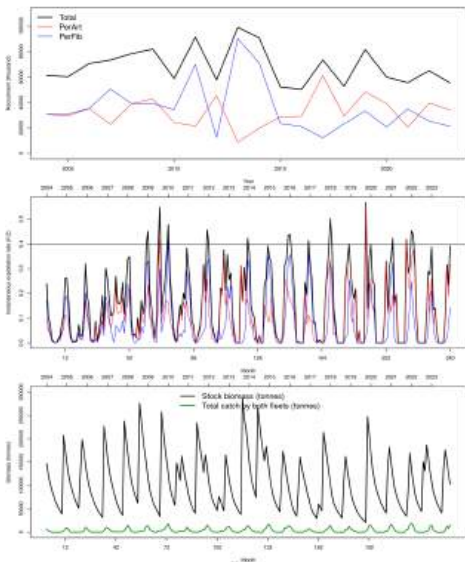
(18) Resultados de la evaluación de stocks - Tasas de mortality natural



La estimación de las dos tasas de mortalidad natural fue más precisa bajo la hipótesis de stock único y común y 6 flotas.

Además, como se espera de la teoría ecológica, los mahi más grandes sufren menos mortalidad natural bajo ambas hipótesis, pero el efecto de la diferencia de tamaño es mucho más pronunciado bajo la hipótesis de stock único y común y 6 flotas.

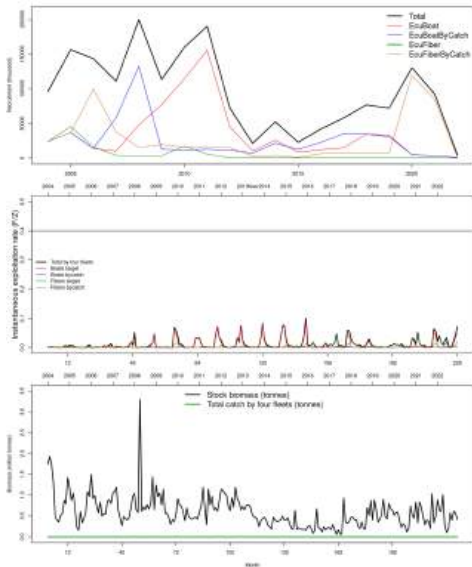
(19) Resultados de la evaluación de stocks - Stock peruano - 2-fleets



Bajo la hipótesis de un stock separado pescado por las dos flotas peruanas

- El reclutamiento ha sido estable en cerca de 60 millones de mahi.
- La tasa de explotación instantánea se acerca y excede el 40% in muchos meses.
- La biomasa es estable y salta hacia arriba y hacia abajo con máximos de 250-300 miles de toneladas y mínimos de 50 mil toneladas, mientras que las capturas en el último año fue de 61 mil toneladas.

(20) Resultados de la evaluación de stocks - Stock ecuatoriano - 4-flotas



Bajo la hipótesis de un stock separado pescado por las dos flotas ecuatorianas

- El reclutamiento fluctúa entre máximos de 200 millones de mahi y mínimos de cerca de cero reclutas.
- La tasa de explotación es despreciable.
- La biomasa es estable y actualmente alrededor de 500 mil toneladas con capturas en el último año de 16 mil toneladas.

(21) Evaluación de stocks - Observaciones finales preliminares

- El modelo bajo la hipótesis de un stock único y común y 6 flotas parece mas apoyado por los resultados de la evaluación de stocks, incluyendo:
 - Mas razonable conexión entre tasas de mortalidad natural y el tamaño de los mahi
 - Consistencia con una idea previa de migración desde sur a norte a lo largo de la costa peruana ¹; bajo esta hipótesis, el mahi crece a medida que avanza hacia el norte así que los que sobreviven alcanzan los caladeros ecuatorianos con su tamaño máximo
 - En concordancia, el modelo de stock único y común y 6 flotas encuentra que el reclutamiento a las flotas peruanas de fibras, que operan más al sur y hacia la costa, ocurre antes cada año que el reclutamiento a la flota de barcos peruanos. En este modelo de depleción, una mucho más debil señal de reclutamiento llega a los caladeros ecuatorianos después de uno o dos años de crecimiento somático.
 - Aspectos numéricos y estadísticos del modelo de stock único y común y 6 flotas son mejores que los mismos en los modelos de dos stocks.
- Bajo ambas hipótesis el stock está estable y la explotación es sustentable, aunque bajo la hipótesis de dos stocks el stock peruano está cerca de los límites mientras que el stock ecuatoriano prácticamente no sufre ningún efecto de la pesca.

¹Matinez-Ortiz and Zuñiga-Flores, 2012, Current state of knowledge of the resource (Coryphaena hippurus) Linnaeus, 1758 in Southeast Pacific Ocean (2008-2011)

(22) Por hacer

- Alcanzar una decisión respecto del modelo conceptual de cómo el(los) stock(s) es(están) estructurados en el espacio, si adoptar el concepto de stock único y común y 6 flotas, o el concepto alternativo de 2 stocks.
- Implementar un modelo Pella-Tomlinson de dinámica de biomasa a paso de tiempo mensual, con la serie de tiempo de biomasa mensual predicha por el modelo de depleción, y con parámetros que dependen de índices mensuales de el ciclo El Niño - La Niña.
- Calcular puntos biológicos de referencia desde el modelo Pella-Tomlinson para regímenes específicos del ciclo ambiental.

Gracias por vuestra atención