

COMISIÓN INTERAMERICANA DEL ATÚN TROPICAL

COMITÉ CIENTÍFICO ASESOR

16ª REUNIÓN

La Jolla, California (EE. UU.)

02-06 de junio de 2025

DOCUMENTO SAC-16 INF-D

DESARROLLO EN CURSO DEL MODELO ESPACIOTEMPORAL DE MARCADO

Tobias K. Mildenberger, Anders Nielsen, Mark Maunder

RESUMEN

En un proyecto de colaboración entre la CIAT y DTU Aqua, se desarrolló un modelo espaciotemporal de marcado para estimar las tasas de desplazamiento ([SAC-13-08](#)) y las tasas de mortalidad natural y por pesca basadas en talla ([SAC-14 INF-E](#)) utilizando el enfoque de exponencial de la matriz o el filtro de Kalman clásico. A partir de estas estimaciones de desplazamiento, se diseñó un segundo modelo espaciotemporal para estimar la biomasa total utilizando un marco tipo Petersen ([SAC-15 INF-G](#)). Estos modelos se aplicaron al atún barrilete en el Océano Pacífico oriental (OPO), y proporcionaron estimaciones significativas de la biomasa tanto relativa como absoluta, que posteriormente se incorporaron a una evaluación de referencia ([SAC-15-04 REV](#)). El desarrollo en curso del modelo espaciotemporal de marcado tiene como objetivo mejorar la usabilidad, la flexibilidad y las capacidades analíticas. Entre los avances clave se incluyen el desarrollo de un paquete de software fácil de usar y bien documentado para facilitar su aplicación a otras poblaciones de peces, la incorporación de pruebas de diagnóstico y estimaciones de residuales formales para mejorar la validación de modelos, y la inclusión de funciones de preferencia de hábitat por talla variables con en el tiempo para reflejar mejor las influencias ambientales en los desplazamientos. Estas mejoras refinarán aún más las evaluaciones de poblaciones y respaldarán estrategias de ordenación pesquera más robustas.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, la evaluación del atún barrilete (SKJ, *Katsuwonus pelamis*) en el Océano Pacífico oriental (OPO) ha sido problemática debido a la falta de un índice fiable de abundancia relativa, a la posibilidad de una selectividad en forma de domo y a la falta de datos de composición por edad, provocando así que su ordenación sostenible se vea afectada. Se desarrolló un modelo espaciotemporal de espacios de estados para estimar las tasas de desplazamiento, las tasas de mortalidad y la biomasa con base en datos de marcado (marcas convencionales y/o marcas archivadoras) ([SAC-13-08](#), [SAC-14 INF-E](#), [SAC-15 INF-G](#)). El modelo describe el desplazamiento con base en la ecuación de advección-difusión y utiliza funciones de preferencia de hábitat para informar las tasas de advección y difusión. Las funciones de preferencia de hábitat son funciones suaves de campos ambientales (por ejemplo, la temperatura superficial del mar) (Thorson *et al.* 2021). El modelo permite estimar parámetros separados para la advección activa (taxia), informada por el gradiente de cualquier número de campos ambientales, y la advección pasiva (advección), informada por los campos de tasas. Mientras que la temperatura superficial del mar se estimó como un predictor importante del componente de preferencia de hábitat y taxis para el SJK en el OPO, se estimó que las corrientes oceánicas son importantes para el componente de advección pasiva ([SAC-13-08](#), [SAC-14 INF-E](#)). Una combinación de la temperatura superficial del mar y la energía cinética del agua, que se calcula en función de las corrientes oceánicas, arrojó los resultados más robustos con ambos o cualquiera de los dos tipos de datos de marcado en una amplia gama de escenarios probados ([SAC-15 INF-G](#)). Se pueden

utilizar dos enfoques para estimar los parámetros: la exponencial de la matriz o el filtro de Kalman clásico. La incorporación de información espacial sobre el esfuerzo en el modelo permite estimar las probabilidades de recaptura que varían espacialmente, así como las tasas de mortalidad natural y por pesca que dependen de la talla. Si bien el uso de datos de esfuerzo influye en las preferencias de hábitat y las tasas de desplazamiento estimadas ([SAC-14 INF-E](#)), la forma en la que se incluye el esfuerzo parece tener un impacto limitado en las estimaciones generales de desplazamiento ([SAC-15 INF-G](#)). Particularmente, informar al modelo solo sobre áreas con ($E > 0$) y sin esfuerzo ($E = 0$), es decir, suponiendo una distribución uniforme dentro de las áreas de pesca, produjo resultados similares a aquéllos basados en supuestos alternativos, como el esfuerzo escalado proporcionalmente a la mortalidad por pesca o modelado usando funciones suaves. Esto sugiere que las estimaciones de desplazamiento son más sensibles a la presencia o ausencia espacial de esfuerzo que a su magnitud o distribución estadística precisa. Las tasas de mortalidad estimadas para el SJK coinciden con los valores notificados ([SAC-14 INF-E](#)).

A partir de las estimaciones de desplazamiento (y mortalidad), se desarrolló un segundo modelo espacio-temporal de espacios de estados para estimar la biomasa total utilizando un enfoque tipo Petersen. La integración de estos métodos proporcionó estimaciones significativas de la biomasa tanto relativa como absoluta. Las estimaciones de biomasa absoluta del SJK en el OPO entre 2000 y 2023 oscilaron entre 290 mil y 3.6 millones de toneladas, encontrándose las concentraciones más altas en longitudes variables alrededor de la línea ecuatorial ([SAC-15 INF-G](#)). La mayoría de las estimaciones se caracterizaron por una incertidumbre alta fuertemente correlacionada con el número de recapturas. Sin embargo, las estimaciones en cinco trimestres tuvieron niveles de incertidumbre aceptables ($0.3 < CV < 0.6$) y fueron relativamente robustas ante una serie de supuestos del modelo. Los análisis de sensibilidad indicaron que las estimaciones de biomasa estaban influenciadas por los supuestos sobre la mortalidad natural y la mortalidad relacionada con el mercado, así como por las probabilidades de no notificación y de desprendimiento inmediato y continuo. Al incluir información sobre el esfuerzo en la estimación de la biomasa se redujo la incertidumbre, pero las estimaciones de biomasa absoluta dependían entonces de la relación supuesta entre el esfuerzo y la mortalidad por pesca. No obstante, las tendencias temporales relativas de la biomasa fueron consistentes, independientemente de la relación supuesta o estimada entre el esfuerzo y la mortalidad por pesca.

Posteriormente, se incorporaron las estimaciones de biomasa absoluta y relativa en la evaluación de referencia del barrilete ([SAC-15-04 REV](#)). Esto representa un avance significativo en el uso de datos de mercado para la evaluación de poblaciones, ya que proporciona una comprensión más completa de la dinámica espacial y la estructura poblacional. Los desarrollos en curso del modelo espaciotemporal de mercado tienen como objetivo mejorar aún más su aplicabilidad, precisión y flexibilidad en las evaluaciones de poblaciones y se presentan con más detalle a continuación.

En este documento se describen las mejoras, que incluyen: 1) la creación de un paquete en R fácil de usar, 2) residuales y diagnósticos, y 3) preferencias de hábitat por talla variables con en el tiempo.

2. METODOLOGÍA

Un objetivo clave en el desarrollo del modelo espaciotemporal de mercado es el desarrollo de un paquete de software en R bien documentado y fácil de usar (R Core Team, 2020) que facilite la aplicación del modelo a una gama más amplia de poblaciones de peces, ampliando así su impacto en diferentes pesquerías. Mientras que las implementaciones anteriores del modelo de mercado se implementaron en TMB (Kristensen *et al.*, 2016), el paquete de software se implementa en RTMB (Kristensen, 2024). El paquete en R incluye viñetas y documentación detallada, lo que ayuda a los usuarios a aplicar el modelo de mercado a sus datos específicos. El paquete está alojado en GitHub y permite a los usuarios notificar problemas y contribuir al desarrollo del paquete

Una característica importante de una caja de herramientas de modelado robusta son las pruebas de diagnóstico y residuales formales, que garantizan que las incertidumbres en las estimaciones de

desplazamiento y mortalidad se tengan en cuenta y se entiendan mejor. Por ejemplo, los residuales para la ubicación de recaptura de marcas convencionales y marcas archivadoras utilizando el filtro de Kalman pueden estimarse de la siguiente manera:

$$\epsilon^{kf} = (\epsilon_x, \epsilon_y) = \left(\frac{x_{t_c} - \hat{x}_{t_c}}{\sqrt{2\mathbf{D}^*(\psi_{t_c}, t_c)\Delta t\mathbf{I}_{2 \times 2}}}, \frac{y_{t_c} - \hat{y}_{t_c}}{\sqrt{2\mathbf{D}^*(\psi_{t_c}, t_c)\Delta t\mathbf{I}_{2 \times 2}}} \right)$$

Donde ϵ son los residuales de la posición de recaptura, x_{t_c} es la ubicación x observada de una marca, \hat{x}_{t_c} es la ubicación x prevista de una marca, y_{t_c} es la ubicación y observada de una marca, \hat{y}_{t_c} es la ubicación y prevista de una marca, \mathbf{D}^* es la tasa de difusión e \mathbf{I} es la matriz identidad. Los residuales estimados en términos de posiciones x y y se investigan entonces en función del tiempo de recuperación, su posición y en términos de los supuestos de distribución (Figura 1).

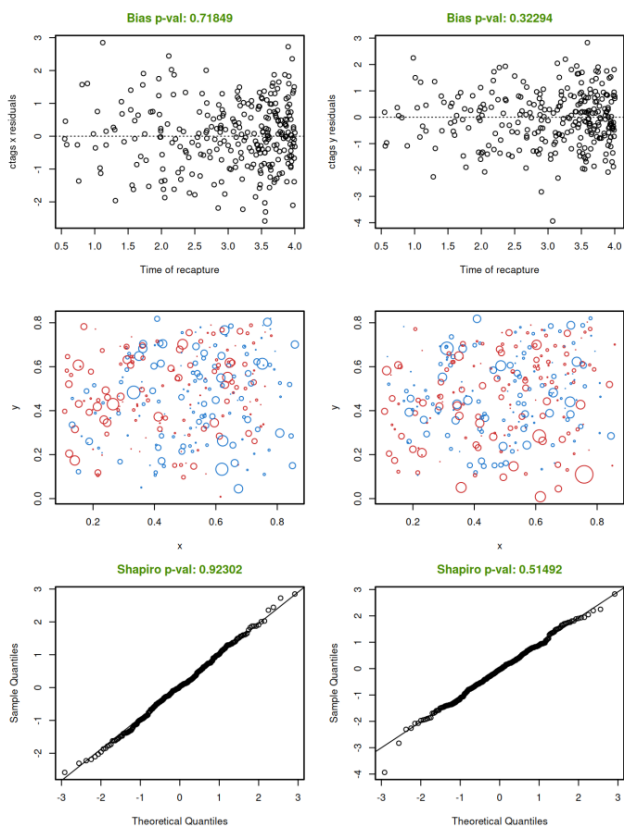


FIGURE 1. Example x and y residuals for Kalman filter for simulated data when the correct environmental fields are provided to the estimation model.

FIGURA 1. Ejemplo de residuales x y y para el filtro de Kalman para datos simulados cuando se proporcionan los campos ambientales correctos al modelo de estimación.

La figura muestra los residuales de la posición de recaptura con respecto a las coordenadas x y y (dos columnas) frente al tiempo de recaptura (primera fila), en el espacio (segunda fila), donde el tamaño de los círculos indica el valor absoluto de los residuales y el color indica si los residuales son positivos (azul) o negativos (rojo), así como gráficas QQ (tercera fila). Para el primer ejemplo simulado en el que se proporcionan los campos ambientales correctos al modelo de estimación, los residuales no indican ningún patrón significativo (Figura 1). Sin embargo, proporcionar campos ambientales incorrectos (como solo coordenadas y) al modelo de estimación basado en datos que se simularon mediante el uso de campos ambientales más complejos conduce a residuales sesgados que no se distribuyen normalmente y

muestran patrones espaciales en los residuales, especialmente en lo que respecta a las coordenadas x (Figura 2).

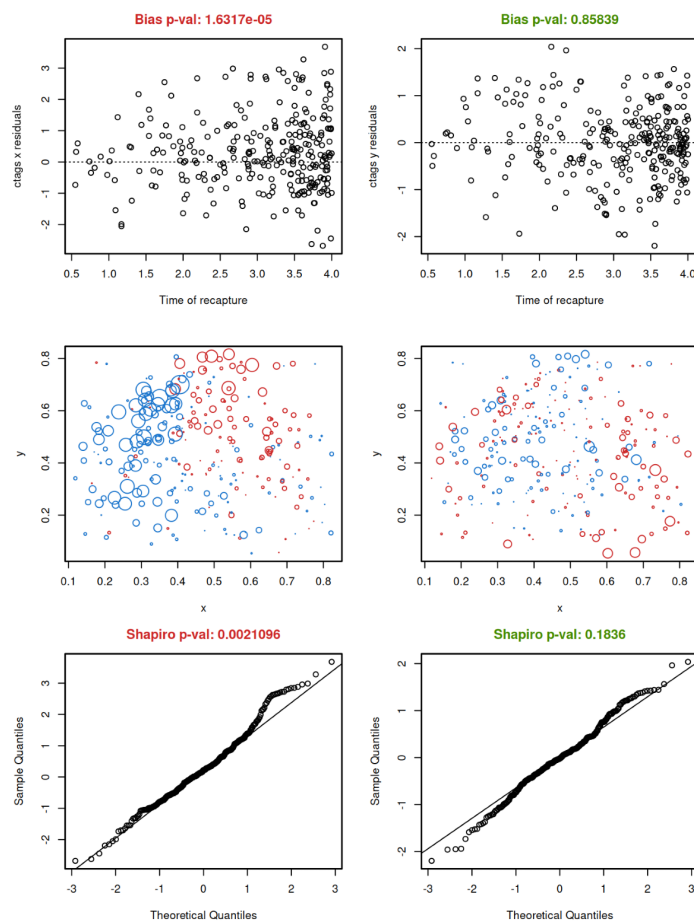


FIGURE 2. Example x and y residuals for Kalman filter for simulated data when a wrong environmental field is provided to the estimation model.

FIGURA 2. Ejemplo de residuales x y para el filtro de Kalman para datos simulados cuando se proporcionan los campos ambientales incorrectos al modelo de estimación.

La inclusión de funciones de preferencia de hábitat por talla variables con el tiempo es otro paso crucial, ya que permite una representación más realista desde el punto de vista ecológico del comportamiento de los peces, reflejando cómo las condiciones ambientales y los cambios ontogenéticos influyen en los patrones de desplazamiento y distribución. Anteriormente, los modelos suponían que las funciones de preferencia de hábitat —que definen el desplazamiento como una respuesta suave a los campos ambientales— eran constantes a lo largo del tiempo (tanto dentro como entre años) e idénticas en todas las clases de edad o talla. Sin embargo, en realidad, es probable que las preferencias por características ambientales como la temperatura o la profundidad (por ejemplo, áreas costeras vs. áreas en alta mar) varíen estacionalmente y difieran según las etapas de vida. Es posible que estas preferencias estén relacionadas con las migraciones de desove, la tolerancia térmica o el uso del hábitat asociado a la madurez. Para reflejar mejor esta complejidad ecológica, se amplió el marco del modelo para permitir la estimación de las funciones de preferencia de hábitat que varían estacionalmente.

3. CONCLUSIÓN

El desarrollo del modelo espaciotemporal de marcado supone un avance significativo en las ciencias pesqueras, especialmente para la evaluación de especies altamente migratorias como el barrilete en el Océano Pacífico oriental. Al integrar la dinámica de los desplazamientos, las tasas de mortalidad natural y por pesca, y la estimación de la biomasa total mediante enfoques de modelado innovadores, este marco proporciona un método exhaustivo y basado en datos para mejorar las evaluaciones de poblaciones. La capacidad de estimar las tasas de desplazamiento utilizando el enfoque de exponencial de la matriz o el filtro de Kalman, combinado con un modelo tipo Petersen para la estimación de la biomasa, representa un gran avance en la utilización de datos de marcado para realizar evaluaciones robustas de poblaciones. La incorporación de estos resultados en las evaluaciones de referencia resalta la pertinencia práctica y la credibilidad del modelo en las aplicaciones de ordenación pesquera del mundo real. La colaboración entre la CIAT y DTU Aqua ha iniciado este trabajo en curso, que ha inspirado a otras regiones a iniciar proyectos similares para el análisis e incorporación de los datos de marcado disponibles. En conjunto, los avances presentados aquí garantizarán que el modelo de marcado siga evolucionando como una poderosa herramienta para las ciencias pesqueras, mejorando la precisión de las evaluaciones de poblaciones e informando la ordenación sostenible de la pesca en un ambiente oceánico que cambia rápidamente. A medida que la ordenación pesquera se basa cada vez más en enfoques basados en datos para garantizar la sostenibilidad de los recursos marinos, este modelo supone un avance esencial en la incorporación de datos de marcado subutilizados en el modelado y la ordenación de la pesca.

4. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la CIAT y la Unión Europea a través del acuerdo de subvención SI2.804586. Agradecemos los comentarios sobre la metodología y el procesamiento de datos de Kurt Schaefer, Dan Fuller, Mitchell Lovell, Michael Opiekun, Kasper Kristensen y Jon Lopez. Agradecemos el trabajo realizado por COPERNICUS (<https://www.copernicus.eu/en>) y a todos los que han participado en el marcado y la recuperación de marcas de SJK en el OPO.

5. REFERENCIAS

- Kristensen, K., Nielsen, A., Berg, C.W., Skaug, H., Bradley M. and Bell, B.M. 2016. TMB: Automatic Differentiation and Laplace Approximation. *Journal of Statistical Software*, 70(5), 1-21. doi:10.18637/jss.v070.i05
- Kristensen, K. 2024. RTMB: 'R' bindings for 'TMB'. R package version 1.6. <https://github.com/kaskr/RTMB>
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Thorson, J.T., Barbeaux, S.J., Goethel, D.R., Kearney, K.A., Laman, E.A., Nielsen, J.K., Siskey, M.R., Siwicke, K. and Thompson, G.G., 2021. Estimating fine-scale movement rates and habitat preferences using multiple data sources. *Fish and Fisheries*, 22(6), pp.1359-1376. <https://doi.org/10.1111/faf.12592>