

# Un modelo de dinámica poblacional estructurado en tres estadios (3ENoR): aplicación para la vieira patagónica (*Zygochlamys patagonica*). Parte I: Diagnóstico. Conceptos

Aníbal Aubone

## Resumen

Se presenta un modelo de dinámica poblacional estructurado en tres estadios, sin función de reclutamiento media. Esto último se debe a que el reclutamiento se considera compuesto por una parte autónoma y otra aportada por otras poblaciones (y desconocido). Aunque el modelo matemático (3ENoR) fue pensado para realizar un diagnóstico de la vieira *Zygochlamys patagonica*, es un modelo que puede aplicarse para otras poblaciones biológicas. También puede extenderse el número de estadios. En este trabajo se indican los datos necesarios y se dan los procedimientos de cálculo para estimar todos los parámetros del modelo y realizar un diagnóstico del estado poblacional en un lapso de evaluación. Las estimaciones de abundancia obtenidas en las campañas de evaluación de abundancia se utilizan para estimar los estados poblacionales, considerando un efecto aleatorio debido a la agregación en parches de la vieira y un efecto de aleatoriedad de la eficiencia propia de captura del arte de pesca utilizado en dichas campañas. Se plantean los objetivos de mantener una abundancia mínima y una estructura poblacional adecuada para favorecer el reclutamiento autónomo. Además, se concluyen distintos Puntos de Referencia Biológicos Límites (PRBL), para la sostenibilidad biológica.





# Un modelo de dinámica poblacional estructurado en tres estadios (3ENoR): aplicación para la vieira patagónica (*Zygochlamys patagonica*). Parte I: Diagnóstico. Conceptos

Aníbal Aubone

Gabinete de Biomatemática, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero

CEMIM Centro Marplatense de Investigaciones Matemáticas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata

## Resumen

Se presenta un modelo de dinámica poblacional estructurado en tres estadios, sin función de reclutamiento media. Esto último se debe a que el reclutamiento se considera compuesto por una parte autónoma y otra aportada por otras poblaciones (y desconocido). Aunque el modelo matemático (3ENoR) fue pensado para realizar un diagnóstico de la vieira *Zygochlamys patagonica*, es un modelo que puede aplicarse para otras poblaciones biológicas. También puede extenderse el número de estadios. En este trabajo se indican los datos necesarios y se dan los procedimientos de cálculo para estimar todos los parámetros del modelo y realizar un diagnóstico del estado poblacional en un lapso de evaluación. Las estimaciones de abundancia obtenidas en las campañas de evaluación de abundancia se utilizan para estimar los estados poblacionales, considerando un efecto aleatorio debido a la agregación en parches de la vieira y un efecto de aleatoriedad de la eficiencia propia de captura del arte de pesca utilizado en dichas campañas. Se plantean los objetivos de mantener una abundancia mínima y una estructura poblacional adecuada para favorecer el reclutamiento autónomo. Además, se concluyen distintos Puntos de Referencia Biológicos Límites (PRBL), para la sostenibilidad biológica.

## Palabras Clave

Vieira patagónica, *Zygochlamys patagonica*, modelo de dinámica poblacional estructurado por estadios, Puntos de Referencia Biológicos Límites

## Introducción

Los modelos de dinámica poblacional para poblaciones biológicas explotables son necesarios para evaluar abundancia en el pasado, presente y obtener proyecciones ante diferentes escenarios de explotación. Los modelos estructurados por estadios son sencillos, especialmente cuando los estadios se definen a partir de rangos de longitud. La estimación de la captura por estadio de longitud puede realizarse mediante muestreos aleatorios y declaraciones de captura. Esto es mucho más sencillo que determinar la distribución de la captura por edad, donde la determinación de la edad de los individuos suele requerir de un laboratorio específico. Los modelos matriciales de dinámica de poblaciones (Caswell, 2001) son una opción para considerar estadios, pero para poblaciones marinas el tema de estimar el reclutamiento puede ser un problema. Así, la primera fila de la matriz de proyección, que define una función de reclutamiento lineal, con coeficientes constantes, presenta un caso que no es



válido para muchas poblaciones marinas, donde existen variaciones aleatorias de los coeficientes o directamente la función de reclutamiento es desconocida.

En este trabajo se presenta un modelo de dinámica poblacional estructurado en tres estadios de longitud (Aubone, 2019; 2020a, 2021), que se denomina 3ENoR (tres estadios, sin función de reclutamiento). Aunque fue desarrollado para la vieira patagónica, este modelo sencillo de dinámica poblacional puede ser aplicado para otras poblaciones biológicas, y fácilmente puede extenderse el número de estadios.

Sólo para el primer estadio, denominado G0 (reclutas), se considera que en una unidad de tiempo todos los individuos que sobreviven pasan al estadio siguiente G1. Los otros estadios, algunos individuos permanecen y otros pasan por crecimiento (si sobreviven).

La vieira patagónica (*Zygochlamys patagonica*) es una especie que se distribuye en diferentes bancos a lo largo de la isobata de los 100 metros, con proximidad al talud continental, desde 36°43' a 48°30'S, en el Océano Atlántico Sudoccidental. En el año 1996, se inició formalmente la pesquería nacional de vieira patagónica.

Se define como una población al conjunto de vieiras que habita en un área que contiene a un banco de vieiras (banco: área con densidades mayores o iguales a 1 t/km<sup>2</sup>). Una Unidad de Manejo (UM) se define como un área que contiene cierta cantidad de bancos (poblaciones) con características biológicas similares y adecuada proximidad espacial, para poder ser considerados en bloque, para una evaluación y manejo conjunto. Además, para definir las UM se tienen en cuenta aspectos oceanográficos y batimétricos. La Unidad de Manejo puede contener áreas no exploradas, pero todas las medidas de manejo deben respetarse en dicha UM. El manejo de la vieira patagónica se realiza por apertura a la pesca de áreas, dentro de la UM, que cumplen ciertas características de estructura de longitudes y abundancia consideradas adecuadas, definidas en ciertos Puntos de Referencia Biológicos (PRB). Se considera a los individuos de longitud mayor o igual a  $L_{min}$  mm de alto de valva (longitud), como individuos comerciales (potenciales individuos pescables).  $L_{min}$  es la longitud mínima de captura. Solo una fracción de los mismos estarán accesibles a la pesca, de acuerdo a las áreas que se habiliten para pescar. Por lo tanto, una fracción de los mismos quedará protegida. Estas áreas a habilitar a la pesca son variables por año.

Los estadios se denominan G0, G1 y G2, y los rangos de longitudes se definen para la población en cada Unidad de Manejo. Para la Unidad de Manejo B (UM B), se utiliza una función de crecimiento de von Bertalanffy (Lomovasky *et al.*, 2008) estimada para dicha UM (banco reclutas):  $L_{\infty} = 55,43$ ;  $k = 0,39$ ;  $t_0 = -0,0092$ . Se asume que la longitud máxima de un individuo recluta a la población es de 15 mm (Mauna, 2013) (correspondiente a una edad de 0,8 utilizando los parámetros de crecimiento anteriores).

Los individuos menores o iguales a 15 mm de longitud (alto de valva) no pueden ser observados en su totalidad, por lo que no se consideran en la modelización. El estadio G0 lo integran los reclutas a la pesquería con longitudes mayores a 15 mm y menores o iguales a 28 mm. Los individuos del estadio G1 son juveniles y adultos jóvenes, con longitudes mayores a 28 mm y menores o iguales a 47 mm. Los individuos del estadio G2 son adultos, con longitudes mayores a 47 mm.

**G0:  $L: 15 < L \leq 28$  ; G1:  $L: 28 < L \leq 47$  ; G2:  $L: 47 < L$**

**Tabla 1.** Estadios de longitud (AT). Vieira patagónica. UM B

<i>L</i> (mm)	15,00	28,00	37,00	42,88	47,00	49,68
	<i>L</i> 1	<i>L</i> 2	<i>L</i> 3	<i>L</i> 4	<i>L</i> 5	<i>L</i> 6
edad (año)	0,8	1,8	2,8	3,8	4,8	5,8
sub-estadio		PG0: $L 2 < L \leq L 3$	G11: $L 4 < L \leq L 5$		PG1: $L 5 < L \leq L 6$	
estadio		G0: $L 1 < L \leq L 2$	G1: $L 2 < L \leq L 5$		G2: $L > L 5$	

En la Tabla 1 puede verse el sub-estadio PG0 (del estadio G1), al cual pertenecen los individuos del estadio G1 una unidad de tiempo después, si sobreviven. En el sub-estadio PG1 del estadio G2, estarán los individuos sobrevivientes del sub-estadio G11 (de G1) una unidad de tiempo después. AT es el alto de valva (longitud). Los estadios y sub-estadios se construyeron utilizando la función de crecimiento de von Bertalanffy (Lomovasky *et al.*, 2008).

Para este modelo matemático se considera al reclutamiento como no predecible. Esto ocurre para muchas poblaciones marinas, especialmente cuando el ciclo de vida es corto y existe gran dependencia del reclutamiento de condiciones ambientales o de factores desconocidos, o hay flujo de larvas o pequeños individuos entre poblaciones. Para el caso de la vieira patagónica, el reclutamiento se compone en parte por un reclutamiento autónomo (autogenerado por la población) y en parte por un reclutamiento producto de aportes larvales de otras poblaciones de vieira (reclutamiento no autónomo). Debido a la posible deriva larval (de sur a norte por las corrientes marinas) y el desconocimiento actual sobre ese flujo, el reclutamiento no puede predecirse. En general, la estructura poblacional de la vieira patagónica es de meta-población, donde cada banco (agregación) contribuye con larvas, por deriva larval, a otros bancos.

## Materiales y Métodos

Anualmente se realiza una campaña dirigida a evaluar la abundancia de vieira en cada UM. La campaña para la UM B se lleva a cabo en agosto de cada año, y se utiliza una rastra desde el año 2013. A mediados de agosto se asigna la estimación de abundancia, a partir de datos de cada campaña. En el año 2018 se realizó una experiencia de decrecimiento de biomasa con una rastra, para poder estimar la eficiencia de captura de la misma (Campodónico *et al.*, 2018). Las estimaciones obtenidas (Aubone *et al.*, 2019a; Aubone *et al.*, 2021) indican valores notablemente mayores a 0,5 valor utilizado provisoriamente desde 2013, existiendo bastante incertidumbre en la estimación. La eficiencia de captura de la rastra es necesaria para pasar los datos de captura de la campaña a datos de abundancia (Aubone, 2020). La incertidumbre en la eficiencia debe ser considerada para obtener las estimaciones de abundancia con la incorporación de la misma. Una eficiencia de captura grande produce estimaciones menores de abundancias, que si la eficiencia fuera menor, para las mismas capturas por lance de pesca. Los estudios realizados (Aubone *et al.*, 2021) indican un valor central (mediana) próximo a 0,56855 para la eficiencia propia de captura de la rastra utilizada en evaluación de abundancia de vieira patagónica. Cabe destacar que la agregación de la vieira patagónica influye en la incertidumbre estimada en el valor de eficiencia de captura.



La Unidad de Manejo no es prospectada en su totalidad en la campaña de evaluación. Sólo un área considerada de mayor relevancia pesquera se prospecta. Para la UM B, hay evidencia de presencia de vieira fuera del área de prospección de la campaña. Esto produce que la estimación de abundancia de la campaña de investigación sea una sub-estimación de la abundancia total en la UM B. Ocasionalmente la flota pesquera de vieira es autorizada a pescar en la UM B, fuera del área de prospección de la campaña de evaluación de abundancia. La captura permitida en esta área es definida precautoriamente y se considera esta pesca como exploratoria en busca de concentraciones comerciales. Los datos que surgen de esta exploración sirven para eventualmente redefinir el área de prospección de la campaña.

Se realizaron investigaciones sobre la mortalidad residual a la pesquería de vieira patagónica (Aubone *et al.*, 2018), UM B, año 2014. Esto es, la mortalidad natural más la mortalidad que ejercen otras pesquerías sobre las vieiras, descartando la pesca dirigida a vieira. Esta mortalidad es importante para separar los efectos de la pesca dirigida, que es la que interesa regular, en principio. Por supuesto, la pesca no dirigida debería estar limitada también, de lo contrario las estimaciones en las proyecciones podrían no ser correctas. Solo se tienen estimaciones de la mortalidad residual para el año 2014. Se espera que la mortalidad residual pueda variar por cambios en el comportamiento de las otras flotas que operan sobre los bancos de vieira y por cambios en la mortalidad natural de la propia vieira.

En cada campaña de evaluación de abundancia se proceden a realizar lances de pesca, y luego en un muestreo aleatorio se registran las longitudes de las vieiras. Se registra la captura total de vieira y de fauna acompañante, área barrida, etc., por lance de pesca. Cada campaña de investigación permite delimitar los bancos dentro de cada UM y la estimación del número de individuos en cada estadio de longitud sobre dichos bancos, utilizando un valor de eficiencia de captura de la rastra (esto en forma tradicional; Hernández *et al.*, 2016).

También, se cuenta con la distribución de frecuencias relativas de longitudes de la captura total (pesca dirigida) en número de individuos (Campodónico, 2021). Las distribuciones de frecuencias relativas de la captura provienen de datos tomados por observadores a bordo de los buques pesqueros. La captura total se estima a partir de la declaración de capturas de callos de vieira (de individuos comerciales), expandidos a captura de vieira entera con el uso de factores de expansión.

Las capturas de vieira se obtienen en áreas habilitadas a la pesca, dentro del área de prospección de la campaña de investigación. Ocasionalmente, puede haber capturas permitidas en el área de presencia de vieira fuera del área de prospección de la campaña.

## Modelo matemático. Procedimiento de cálculo. Diagnóstico

Las fórmulas básicas de la dinámica poblacional que se plantean son:

$$N_{1,t+1} = N_{1,t} p_{1,t} (1 - p_t) + N_{0,t} p_{0,t}$$

$$N_{2,t+1} = N_{1,t} p_{1,t} p_t + N_{2,t} p_{2,t}$$

Donde  $N_{i,t}$ ,  $i = 0,1,2$  es la abundancia en número de individuos del estadio  $Gi$  en el tiempo  $t$ . Y  $p_{i,t}$ ,  $i = 0,1,2$  son las probabilidades de supervivencia de una individuo en cada estadio. Finalmente,



$p_t$  es la probabilidad de que un individuo del estadio G1 pase al estadio G2 en la unidad de tiempo  $t$ , por crecimiento.

La unidad de tiempo es un año desde el momento asignado de cada campaña (UM B: 15/08 del tiempo  $t$  al 14/08 del tiempo  $t + 1$ ).

### Proyección de abundancia

Las abundancias de cada estadio, transcurrido una fracción  $h$  de la unidad de tiempo biológica, se estiman por:

$$\begin{aligned} N_{0,t+h} &= N_{0,t} p_{0,t}^h (1 - p_{G0,h}) \\ N_{1,t+h} &= N_{1,t} p_{1,t}^h (1 - p_{G1,h}) + N_{0,t} p_{0,t}^h p_{G0,h} \\ N_{2,t+h} &= N_{2,t} p_{2,t}^h + N_{1,t} p_{1,t}^h p_{G1,h} \end{aligned}$$

Donde  $p_{G0,h}$  es la fracción de individuos que pasan del estadio G0 al estadio G1, si sobreviven, por crecimiento en un intervalo de tiempo de amplitud  $h$ . Se estima considerando la distribución de frecuencias relativas de longitudes observada en el estadio G0 al momento de la campaña de evaluación, y determinando la fracción de individuos de longitudes entre  $L_{1,8-h}$  y 28 mm respecto de los individuos en el estadio G0. Análogo para determinar  $p_{G1,h}$ . Aquí se considera la fracción de individuos del estadio G1 con longitudes entre  $L_{4,8-h}$  y 47 mm, al momento de la campaña de evaluación.

Si  $h = 0$ , es  $p_{G0,h} = p_{G1,h} = 0$ .

Con la fracción  $h$ , se avanza del momento de la campaña (fracción del año biológico  $h$ ) al 01/01 del año siguiente o a cualquier momento que se desee. Para la UM B,  $h = \frac{3}{8}$ , para avanzar del 15/08 al 01/01 del año siguiente. Las  $p_{i,t}$ ,  $i = 0,1,2$  son las probabilidades de supervivencia por estadio del tiempo  $t$ . Si ya se efectuó la campaña de estimación de abundancia en el tiempo  $t$ , se contarían con estimaciones de probabilidades de supervivencia efectivas del tiempo  $t - 1$  (no propuestas). Cualquier proyección a enero del año siguiente, o propuesta de captura para el año calendario siguiente, requiere de postular probabilidades de supervivencia por estadio que permitan completar la dinámica del año calendario, y así evaluar el impacto de dichas probabilidades de supervivencia sobre la dinámica poblacional.

Dada la simplicidad del modelo de dinámica poblacional, sincronizado con el momento de la campaña de evaluación de abundancia, que define una unidad de tiempo biológica, es que se recomienda asignar una captura máxima permisible para la unidad de tiempo biológica. En la UM B sería del 15/08 al 14/08 del año siguiente. De cualquier manera, habrá que proponer unas probabilidades de supervivencia por estadio para realizar dicha proyección, y evaluar el impacto sobre el estado poblacional de acuerdo a los Puntos de Referencia Biológicos.

### Capturas anuales

Las capturas anuales (del año calendario) por estadio  $C_{i,t}$  en número de individuos, que son datos, mantienen una relación con la abundancia a principio de año (o al momento de la campaña):

$C_{i,t} = \delta_{i,t} N_{i,t+h}$ ,  $i = 0,1,2$ . Por lo tanto  $\delta_{i,t} = C_{i,t}/N_{i,t+h}$ ,  $i = 0,1,2$ . Si las capturas fueran de la unidad de tiempo biológica, simplemente se plantea  $C_{i,t} = \delta_{i,t} N_{i,t}$ ,  $i = 0,1,2$ . En este caso cada uno

Un modelo de dinámica poblacional estructurado en tres estadios (3ENoR): aplicación a la vieira patagónica (*Zygochlamys patagonica*)



de los  $\delta_{i,t} = \gamma_{i,t} (1 - p_{i,t})$ , y puede calcularse cada  $\gamma_{i,t}$ ,  $i = 0,1,2$ . Además en este caso el número de individuos muertos por estadio es  $N_{i,t}(1 - p_{i,t}) = C_{i,t} + MR_{i,t}$ ,  $i = 0,1,2$ , donde  $MR_{i,t}$  es la mortalidad residual a la pesca dirigida de vieira patagónica. La mortalidad residual en principio no es regulable de manera sencilla, ya que involucra a otras pesquerías.

### Procedimiento de cálculo

Se necesitan dos campañas de investigación consecutivas en el tiempo  $t$  y  $t + 1$ , para estimar cada una de las probabilidades de supervivencia  $p_{0,t}$ ,  $p_{1,t}$ ,  $p_{2,t}$  y  $p_t$ .

Con la distribución de frecuencias relativas en el estadio G1 en el tiempo  $t$ , y la distribución de frecuencias relativas de longitudes en el estadio G2 en el tiempo  $t + 1$ , y considerando la función de crecimiento en longitud, puede estimarse  $p_t$  (Aubone, 2021). Esto es, considerando la abundancia en el sub-estadio G11 en  $t$  y en el sub-estadio PG1 en  $t + 1$ . Ver Tabla 1.

Supongamos que se cuentan con los valores  $N_{0,t}$ ;  $N_{0,t+1}$ ;  $N_{1,t}$ ;  $N_{1,t+1}$ ;  $N_{2,t}$ ;  $N_{2,t+1}$  y  $p_t$  calculados con datos de dos campañas consecutivas. También puede calcularse  $p_{0,t}$  pues todos los individuos del estadio G0 que sobreviven en el tiempo  $t$ , pasan al estadio G1 en el tiempo  $t + 1$ , por crecimiento. También para ello se requiere la función de crecimiento en longitud. Los sobrevivientes pertenecen al sub-estadio PG0 de G1 (Ver Tabla 1).

Entonces,  $(N_{1,t+1} - N_{0,t} p_{0,t}) / (N_{1,t}(1 - p_t)) = p_{1,t}$  y

$$(N_{2,t+1} - N_{1,t} p_{1,t} p_t) / N_{2,t} = p_{2,t}.$$

Notar que si la eficiencia propia de captura es la misma en el tiempo  $t$  y en el  $t + 1$ , las probabilidades de supervivencia no dependen de ella. Análogo si el área del banco no varía.

### Abundancia por estadio al momento de la campaña y su distribución de probabilidades

Dado que en la campaña de investigación se realizan lances de pesca, y existen agregaciones de vieira, espacialmente discretas, con distinta estructura de longitudes y densidades, esto genera incertidumbre en la estimación de abundancia por estadios. Esta incertidumbre nace principalmente de estas agregaciones y se traslada también al valor de eficiencia propia de captura, que podría variar especialmente ante densidades muy diferentes. Es posible que en la práctica sea difícil o imposible refinar más la ejecución de lances de pesca en la campaña de investigación, lo que podría reducir la incertidumbre.

A su vez, percibir correctamente las diferencias en las estructuras de longitudes entre lances de pesca requiere de tamaños de muestra grandes (Aubone *et al.*, 2014). Esto también tiene un límite práctico. El muestreo de longitudes de vieira, que se realiza en cada lance de pesca, debe ser suficientemente intensivo para describir correctamente la distribución de frecuencias relativas de longitudes (Aubone *et al.*, 2014), especialmente a frecuencias relativas pequeñas, pero de cualquier manera la densidad de lances de pesca puede ser insuficiente. La variabilidad que surge, produce en muchos casos inconsistencia de abundancias cuando se comparan estimaciones de abundancias de sobrevivientes que pasaron de un estadio al siguiente al pasar una unidad de tiempo.

Para estimar la distribución de probabilidades de cada abundancia estimada se realiza una Simulación de Monte Carlo, generando muestras a partir de las distribuciones de frecuencia relativas

Un modelo de dinámica poblacional estructurado en tres estadios (3ENoR): aplicación a la vieira patagónica (*Zygochlamys patagonica*)



de las longitudes de cada lance de pesca (con el mismo tamaño de muestra de la campaña de investigación). De esta manera se simulan las estructuras de longitudes de cada lance efectuado en cada campaña, y luego con la campaña simulada, se estiman las abundancias en número de individuos por estadio, sorteando un valor de eficiencia propia de captura por lance. Para cada par de tiempos consecutivos se estiman las probabilidades de supervivencia por estadio y se evalúa que sean valores adecuados. Cuando se detecta que alguna probabilidad de supervivencia es menor que cero o mayor que uno, se descarta la simulación y se generan otros lances para toda la secuencia de campañas, hasta que se logre la compatibilidad. Este procedimiento se repite *nsim* veces, obteniéndose así *nsim* posibles resultados de estimaciones secuenciales de abundancia por estadio.

### Estimación de la abundancia por estadio en un tiempo

Para estimar la abundancia por estadio de longitud, se considera la frecuencia absoluta de individuos de cada lance de pesca de cada tiempo, y se expande multiplicando por la captura en peso de vieira del lance dividida por el peso de la muestra, y a su vez multiplicado por el área total del banco y dividiendo por el área barrida del lance de pesca. A su vez este resultado final se divide por la eficiencia propia de captura. Esta eficiencia propia se simula por lance de pesca, teniendo en cuenta la distribución de probabilidades estimada (Aubone *et al.*, 2021). Luego, considerando la distribución de estos valores por lance de pesca para cada tiempo, se considera la mediana de los mismos, por estadio. Se obtiene así una estimación de la abundancia en número de individuos por estadio, por tiempo, para cada simulación obtenida en cada tiempo, identificada por la mediana de las estimaciones de abundancia por lance de pesca.

### Captura de la flota comercial

Se cuenta con la captura estimada por estadio por año, de la flota comercial. Para ello, por buque se declara lo procesado y mediante el factor de conversión de 7,14 (Campodónico *et al.*, 2019) de peso de callo a peso de vieira entera, se estima la captura de individuos comerciales en peso. Un peso medio de 0,25 g para los individuos comerciales se utiliza para pasar de captura en peso a captura en número de individuos. La distribución de frecuencias relativas de longitudes de la captura (Campodónico, 2021) permite estimar la captura total por estadio, en número de individuos.

La captura retenida de vieira patagónica está dirigida a individuos grandes (históricamente a individuos mayores o iguales a  $L_{min} = 55$  mm de longitud (comerciales)), sin embargo, se pescan individuos de menor longitud también. Así, la captura comercial, debiera asignarse mayoritariamente a los estadios G1 y G2, sin desmedro de capturas en el estadio G0. Capturas sobre individuos del estadio G0 pueden darse pues algunos de estos individuos se hallan adheridos a la valva de individuos grandes, que pueden ser pescados. No existe un estudio sobre la cantidad de individuos pequeños que mueren por la pesca, por ser epibiontes, ni de la supervivencia de estos individuos cuando se descartan o escapan del arte de pesca. Sin embargo, debería asumirse alguna correlación entre la captura de individuos del estadio G2 y la captura de epibiontes del estadio G0.

### Observación





Si se considera solo un año, el diagnóstico se realizaría simulando los lances de pesca, y la eficiencia propia, para obtener percentiles de estimaciones de abundancia. En este caso, no se pueden estimar las probabilidades de supervivencia específicas de cada estadio de longitud.

Con las secuencias de campañas simuladas se calculan tablas de estadística descriptiva de las abundancias en número de individuos por estadio, y en peso si se cuenta con pesos medios de individuos por estadio y tiempo. También puede calcularse la biomasa desovante, y las estructuras poblacionales por estadio, con los datos necesarios para ello. Siempre pueden presentarse los resultados con bandas de confiabilidad.

Con el proceso de simulación los valores de eficiencia de captura para cada tiempo se van ajustando para contribuir, junto a las simuladas (posibles) distribuciones de longitudes por lance de pesca de cada campaña, a obtener la secuencia de abundancias temporales consistentes. Por lo tanto, las distribuciones finales de eficiencia por tiempo pueden variar, permitiendo un ajuste de la eficiencia, dentro de los posibles valores estimados originalmente. Como consecuencia se obtiene distribuciones de frecuencias relativas de la eficiencia propia de captura para cada tiempo. Este proceder es diferente de lo tradicional en evaluación de recursos pesqueros, cuando se considera un índice de abundancia. En la forma tradicional un índice de abundancia requiere del supuesto de eficiencia constante, que la metodología propuesta en este trabajo, considera libre. Otro índice de abundancia podría ser introducido, de la manera tradicional. Por ejemplo, de biomasa reproductiva o si se tuviera conocimiento del flujo de larvas, algún índice de ello (relación con el reclutamiento no autónomo).

Se debe recordar que la evaluación y la pesca comercial se realizan en una fracción de área de cada UM B, no abarcando necesariamente toda la población de vieira en dicha Unidad de Manejo. La pesca comercial, dirigida a individuos especialmente del estadio G2, no produce un índice de abundancia de toda la población. Tampoco la pesca comercial accede a todos los individuos del estadio G2, y ni siquiera a todos los individuos considerados comerciales. Por lo tanto, de la pesca comercial, con el sistema de manejo actual, es muy difícil que pueda obtenerse algún índice de abundancia poblacional.

## Puntos de Referencia Biológicos

En Aubone (2021) se realiza una discusión teórica para concluir sobre Puntos de Referencia Biológicos (PRB), en busca de la sostenibilidad biológica, para una población modelada con el modelo 3ENoR. Los PRB Límites (PRBL) se establecen como abundancias mínimas de cada estadio ( $N_{0,min}; N_{1,min}; N_{2,min}$ ), y una proporción mínima a nivel poblacional de la abundancia del estadio G1 relativo a las abundancias de los estadios G1 y G2 ( $r_0$ ).

La idea general es similar a lo propuesto en Hernández *et al.* (2016): mantener una cierta estructura de longitudes y una mínima abundancia de individuos grandes; pero en este caso, basado en la modelización de la dinámica poblacional. En realidad, el valor mínimo  $N_{2,min}$  que debe establecerse con algún criterio biológico histórico y de sostenibilidad biológica, permite definir valores mínimos de abundancia en número de individuos para los otros estadios. Los valores mínimos también dependen de  $p_0, p_1, p_2, p$  y es conveniente establecer valores para estas abundancias mínimas, considerando la incertidumbre subyacente en dichas probabilidades de



supervivencia por estadio, aun no pescando vieira por parte de la flota dirigida a la misma. Esto puede hacerse, por ejemplo, fijando percentiles grandes de  $p_0, p_1, p_2, p$  (máximas probabilidades de supervivencia).

### Resultados teóricos

Los siguientes resultados, pueden verse con sus demostraciones en Aubone (2021). Son indispensables para comprender la definición de los PRBL y la estrategia de explotación con sostenibilidad biológica.

#### Lema 1

- $\forall t: N_{0,t} = 0$ , entonces la población se extingue cuando el tiempo pasa.
- $\exists k: 0 < k < 1, \forall t: N_{0,t} p_0 < k N_{1,t} (1 - p_1 (1 - p))$ , entonces la población se extingue cuando el tiempo pasa.
- $\exists l: 0 < l < 1, \forall t: N_{1,t} p_1 p < l N_{2,t} (1 - p_2)$ , entonces la población se extingue cuando el tiempo pasa.

Haciendo cuentas, se puede ver que, en definitiva, para algunos tiempos deberá ocurrir:

$$N_{0,t} \geq N_{2,t} (1 - p_2) (1 - p_1 (1 - p)) / (p_0 p_1 p)$$

$$N_{1,t} \geq N_{2,t} (1 - p_2) / (p_1 p)$$

$$N_{1,t} / (N_{1,t} + N_{2,t}) \geq r_0$$

Y tomando un valor mínimo  $N_{2,min}$  se obtienen valores límites mínimos para las abundancias de los estadios G1 y G0 (PRBL):

$$N_{0,min} = N_{2,min} (1 - p_1 (1 - p)) (1 - p_2) / (p_0 p_1 p) \text{ y}$$

$$N_{1,min} = N_{2,min} (1 - p_2) / (p_1 p)$$

#### Lema 2

$N_{2,t} \rightarrow 0$ , cuando  $t \rightarrow \infty$ , entonces  $N_{1,t} \rightarrow 0$ , cuando  $t \rightarrow \infty$ , entonces  $N_{0,t} \rightarrow 0$ , cuando  $t \rightarrow \infty$

#### Lema 3

Si en un tiempo  $t$ , se cumple  $N_{0,t} \geq N_{0,min}; N_{1,t} \geq N_{1,min}; N_{2,t} \geq N_{2,min}$  entonces  $N_{1,t+1} \geq N_{1,min}; N_{2,t+1} \geq N_{2,min}$ . Sobre la relación entre  $N_{0,t+1}$  y  $N_{0,min}$  no puede asegurarse nada.

#### Lema 4

Supongamos que para todo  $t: N_{0,t+1} = \gamma N_{2,t}, \gamma > 0$ . Entonces,  $N_{i,t} \rightarrow N_i$ , cuando  $t \rightarrow \infty, i = 0, 1, 2$ ; si y sólo si  $\gamma = \gamma_0 = (1 - p_1 (1 - p)) (1 - p_2) / (p_0 p_1 p)$ .

**Corolario (Lema 4)**

Si  $\gamma = \gamma_0 - \varepsilon$ , con  $\varepsilon > 0$  suficientemente pequeño, entonces la población se extingue con el paso del tiempo. Si  $\gamma = \gamma_0 + \varepsilon$ , con  $\varepsilon > 0$  suficientemente pequeño, entonces la población aumenta sin límite, con el paso del tiempo.

El Lema 4 y su Corolario son importantes para comprender si el reclutamiento es suficiente para sostener la abundancia de los estadios mayores. Si  $\frac{N_{0,t+1}}{N_{2,t}} < \gamma_0$ , es de esperar que el reclutamiento no alcance para sostener la abundancia del estadio G2 y la población tienda al colapso con el paso del tiempo.

**Lema 5**

Si la densidad de individuos es  $\delta = \frac{N}{A}$ , donde  $N$  es el número de individuos en el área  $A$ , y  $\gamma = \frac{n}{a}$  es la densidad de individuos en un sub-área  $a$ :  $A > a > 0$ , entonces la densidad en el área restante es igual a  $\delta$  si  $\gamma = \delta$ .

Este Lema 5 es interesante pues permite comprender que, para mantener la densidad en un área, y dejar pescar en una sub-área, basta con que la densidad en la sub-área sea igual a la del área. Aquí se piensa que la sub-área será vaciada o eliminada del área total original. Esto es útil para mantener las densidades de un tiempo al siguiente.

Los siguientes indicadores deben tomar valores mayores o iguales a los PRB (que son valores Límites) (Tabla 2).

**Tabla 2.** Puntos de Referencia Biológicos (PRB)

Indicador	Punto de Referencia Biológico	Referencia
$N_{0,t}$	$N_{0,min} = N_{2,min} (1 - p_1(1 - p))(1 - p_2)/(p_0 p_1 p)$	Mínima abundancia
$N_{1,t}$	$N_{1,min} = N_{2,min} (1 - p_2)/(p_1 p)$	Mínima abundancia
$N_{2,t}$	$N_{2,min}$	Mínima abundancia
$N_{1,t}/(N_{1,t} + N_{2,t})$	$\gamma_0 = (1 - p_2)/(1 - p_2 + p_1 p)$	Estructura poblacional
$N_{0,t}/N_{2,t-1}$	$\gamma_0 = (1 - p_1(1 - p))(1 - p_2)/(p_0 p_1 p)$	Reclutamiento suficiente

Donde  $p_0, p_1, p_2, p$  son constantes en el tiempo de proyección.



Pasado algún valor límite, deberían generarse acciones de recuperación poblacional de manera urgente. Por supuesto, el contraste del indicador con el valor de referencia se realiza en el ambiente de incertidumbre, y es así que se obtienen probabilidades de pasar los valores límites de referencia (riesgo). Ese riesgo debe ser convenientemente acotado. Es recomendable un riesgo bien pequeño cuando se trata de PRBL.

La sostenibilidad biológica no puede asegurarse, pero debe obrarse para facilitarla. El proceso de sostenibilidad biológica tiene tres bases, donde cada una debe garantizar la continuidad del ciclo biológico (y además se pretende que sea exitoso para la pesca): reproducción, reclutamiento y supervivencia a lo largo de la historia de vida. El hombre afecta directamente la supervivencia, y es aquí donde habrá que evitar que la probabilidad de sobrevivir por estadio de longitud disminuya demasiado, especialmente por efecto de la pesca. Los PRBL planteados en este trabajo, sirven para poder tomar decisiones objetivas, basadas en información científica.

### Modelos con retardo deducidos para la dinámica de abundancia de G1 y G2

La idea es escribir la dinámica de la abundancia del estadio G2 en función de las abundancias pasadas del mismo estadio, basándose en la dinámica del modelo 3ENoR.

$$N_{2,t+1} = N_{1,t} p_{1,t} p_t + N_{2,t} p_{2,t} \quad (1)$$

Pero  $p_{2,t} = p_{2,t}^N (1 - \frac{C_{2,t}}{N_{2,t}})$ . Aquí  $p_{2,t}^N$  es la probabilidad de supervivencia residual a la pesquería de vieira. Notar que este término depende de la actividad pesquera de sobre otros recursos, que afectan a la vieira patagónica. Por lo tanto, en la práctica podría considerarse un término no controlable.

Por otro lado,  $N_{1,t} p_{1,t} p_t = \gamma_t N_{2,t+1}$ , con  $0 \leq \gamma_t < 1$ , luego:

$$N_{2,t+1} = p_{2,t}^N / (1 - \gamma_t) (N_{2,t} - C_{2,t}) ; \quad 0 \leq p_{2,t}^N < 1; \quad 0 \leq \gamma_t < 1; \quad N_{2,t_n} > 0 \text{ dato}$$

Sea  $\theta_t = p_{2,t}^N / (1 - \gamma_t)$ . Este puede ser considerado el parámetro del modelo de dinámica de abundancia de individuos comerciales. Esta sencilla ecuación en diferencias describe la dinámica buscada. Resulta un modelo con un retardo del tiempo (de orden uno). Los coeficientes son variables. El modelo está planteado para abundancia en número de individuos. El valor de  $N_{2,t_n} > 0$  es dato inicial, y se obtiene del conocimiento de la eficiencia propia de captura del arte de pesca utilizado en las campañas de evaluación de abundancia de vieira patagónica.

### Observación 1

Se puede observar que si  $\theta_t < 1$  en todo tiempo, la abundancia tiende a cero con el paso del tiempo aun no pescando individuos comerciales. Para mejorar la abundancia de dichos individuos, una opción es disminuir la captura, pero si  $\theta_t < 1$  siempre, no podrá lograrse este objetivo. La estrategia debiera centrarse en aumentar el valor de este parámetro para que el mismo tome un valor  $\theta_t > 1$  en algunos tiempos. Para ello se podría aumentar  $p_{2,t}^N$  que es la supervivencia residual a la pesquería de vieira dirigida. Esto es, disminuir el efecto de mortalidad de otras pesquerías. Otra opción (y no son opciones excluyentes) es aumentar  $\gamma_t$ . Como  $\gamma_t$  es la proporción que representan de  $N_{2,t+1}$  los individuos que ingresan desde el estadio G1, por crecimiento (si sobreviven), aumentar  $\gamma_t$



significa básicamente aumentar la supervivencia en el estadio G1 o aumentar la abundancia en el estadio G1. Ambos hechos afectarían para aumentar  $\gamma_t$ . El hombre no puede afectar el crecimiento de manera directa e instantánea. Así que las opciones descritas, son las posibles para que las acciones del hombre afecten positivamente a la dinámica de individuos comerciales.

Si  $\theta_t > 1$ , una captura de  $C_{2,t} = \frac{\theta_t - 1}{\theta_t} N_{2,t}$ , hace que  $N_{2,t+1} = N_{2,t}$ . Y si  $C_{2,t} < \frac{\theta_t - 1}{\theta_t} N_{2,t}$ , la abundancia en el tiempo  $t + 1$  aumentará respecto de la del tiempo  $t$ . Por supuesto, esto en forma determinista. Como puede observarse, si  $\theta_t > 1$ , existe libertad para fijar objetivos de conservación y de recuperación.

## Observación 2

Análogo al modelo deducido para la dinámica de abundancia del estadio G2, puede plantearse un modelo de dinámica similar para la abundancia del estadio G1.

$N_{1,t+1} = p_{1,t}^N \frac{1-p_t}{1-\delta_t} (N_{1,t} - C_{1,t})$ , con  $p_{1,t} = p_{1,t}^N (1 - \frac{C_{1,t}}{N_{1,t}})$ , y  $N_{0,t} p_{0,t} = \delta_t N_{1,t+1}$ , por lo que  $0 \leq \delta_t < 1; 0 \leq p_{1,t}^N < 1$ . Puede considerarse a  $\vartheta_t = p_{1,t}^N \frac{1-p_t}{1-\delta_t}$ . La interpretación para este parámetro respecto de la dinámica de abundancia del estadio G1 es similar a la hecha para el caso anterior de G2.

## Discusión final

El manejo actual de la vieira patagónica (Hernández *et al.*, 2016), con apertura de áreas con un criterio de densidad mínima local y estructura local adecuada, sin conexión con el todo poblacional, no tiene en cuenta la dinámica poblacional. Esta estrategia de manejo puede incentivar la disgregación del banco al permitir una pesca en áreas puntuales hasta reducir la abundancia de individuos grandes tal vez en demasía. Este efecto puede generar que al tiempo siguiente no pueda mantenerse abierta dicha área a la pesca. Por otro lado, los valores de los parámetros tenidos en cuenta fueron fijados de manera arbitraria. En su momento cuando fueron establecidos se buscó precaución. Pero actualmente, el modelo 3ENoR, y los resultados obtenidos a partir del mismo, facilitan la estimación de valores de referencia con sentido de sostenibilidad biológica. Incluso, la idea de conservar una abundancia mínima y mantener una estructura de abundancias por clases de longitudes, se ha mantenido para definir los PRBL. Los valores de referencia pueden estimarse del conocimiento histórico, dejando de ser arbitrarios. La idea de apertura de áreas con un criterio de densidad mínima local y estructura de estadios adecuada, se mantiene en la propuesta de los PRBL. Incluso el Lema 5 brinda información sobre cómo debe elegirse el área de apertura para mantener la densidad promedio en todo el resto del área de extensión de la población. La captura máxima permisible que pueda definirse en el área de apertura, debería estar acorde al logro de objetivos y consideraciones de los PRBL. Este proceder favorecerá una explotación biológicamente sostenible.

En la Biología Pesquera tradicional suele preguntarse sobre la menor biomasa desovante que mantiene un reclutamiento considerado adecuado. Pero el ciclo debe cerrarse, como propone Aubone (2015), preguntándose cuál es el reclutamiento mínimo que a través de su historia de vida mantenga la biomasa desovante en niveles que faciliten la estabilidad poblacional. En este trabajo se fijan

Un modelo de dinámica poblacional estructurado en tres estadios (3ENoR): aplicación a la vieira patagónica (*Zygochlamys patagonica*)



abundancias mínimas y también se discute sobre un reclutamiento mínimo para sostener las abundancias de los estadios de individuos grandes (fijando  $\gamma_0$ ).

Además, modelos sencillos de dinámica de abundancia de los estadios G1 y G2, con retardos de orden uno, pueden plantearse para cada estadio de manera independiente. Aunque se pierde la integración que brinda el modelo 3ENoR, a veces es más sencillo plantear este tipo de modelos, debido a que sólo requieren de un índice de abundancia y de capturas, para estimar los parámetros.

Se puede resaltar, que para el modelo 3ENoR, y como se plantea el cálculo, no se requiere de índices de abundancia para estimar los parámetros. Un índice de abundancia requiere de asumir constante la capturabilidad (equivalente a que sea constante la eficiencia propia de captura). La liberación de este condicionamiento permite una mejor adaptación de los resultados teniendo en cuenta las características propias del recurso vieira (especialmente la agregación espacial). Para este modelo, así planteado, tampoco existe estimación de parámetros que requiera una metodología particular para ello. Los parámetros se obtienen directamente de cálculos. La incertidumbre sobre los mismos y sobre todos los resultados del modelo matemático, se evalúa por Simulación de Monte Carlo, donde las fuentes de incertidumbre más importantes son consideradas: (estructura de agregación) y eficiencia propia de captura (conversión de capturas a abundancia absoluta en el área barrida).

Este modelo matemático 3ENoR puede plantearse considerando un índice de abundancia por estadio, provenientes de las campañas de evaluación. Como se dijo, esto asume una eficiencia propia constante para todos los tiempos. En este caso, las probabilidades de supervivencia por estadio serán parámetros del modelo, debiendo tener el conocimiento adicional de la mortalidad residual a la pesquería de vieira, para poder realizar los cálculos de manera secuencial. Este conocimiento no está totalmente disponible actualmente. El contexto bayesiano puede utilizarse para la estimación de parámetros. En este trabajo se prefirió realizar la propuesta de manera más general, ajustado a los datos disponibles y conocimiento actual.

## Agradecimientos

Agradezco a la Lic. Silvana Campodónico, responsable del Programa de Investigación de Moluscos Bentónicos del INIDEP, y a la Dra. Mariana Escolar y al Esp. Julio García, integrantes del grupo de investigación, por sus enseñanzas y valiosos comentarios, en largas reuniones de discusión. La modelización de la dinámica de poblaciones solo tendrá posibilidad de ser útil para proyectar con éxito, si contempla el conocimiento sobre el recurso, y está condicionada y ajustada a los datos disponibles.

## Bibliografía

- Aubone, A., 2015. Análisis ergódico de sostenibilidad biológica para poblaciones de peces: estructura de edades. ISBN 978 987 33 7884 3. PDF Versión 1.0, 16/06/2015, 221 p. <http://hdl.handle.net/1834/6885>
- Aubone, A.; Campodónico, S. y Escolar, M., 2018. Estimación de la mortalidad residual a la pesquería de vieira patagónica, Unidad de Manejo B, año 2014. Informe de Investigación INIDEP N° 69/2018.



- Aubone, A. 2019. ¿Ha sido suficiente el reclutamiento de los últimos años para mantener una abundancia mínima de adultos de *Zygochlamys patagonica* en la UM B?. Informe de Investigación INIDEP N°47/2019.
- Aubone, A.; Campodónico, S.; Escolar, M. y García, J., 2019a. Estimaciones de la eficiencia de captura de la rastra usada en evaluación de biomasa de vieira patagónica (*Zygochlamys patagonica*). Informe Técnico Oficial INIDEP N°16/2019.
- Aubone, A.; Campodónico, S.; Escolar, M. y García, J., 2019b. *Zygochlamys patagonica* en la Unidad de Manejo B. Diagnóstico del estado poblacional 2013-2018, y valores mínimos de referencia biológica. Informe de Investigación INIDEP N°51/2019.
- Aubone, A. 2020. La eficiencia de captura del arte de pesca utilizado en campañas de investigación y la estimación de la abundancia total. Informe de Asesoramiento y Transferencia INIDEP N°74/2020.
- Aubone, A. 2021. Notas de Matemática Pesquera, e-book, (*en revisión final*), 420 pp.
- Aubone, A.; Campodónico, S.; Escolar, M. y García J. 2021. Revisión del área de trabajo y re-estimación de la eficiencia de captura de la rastra utilizada en evaluación de vieira patagónica (*Zygochlamys patagonica*). Informe Técnico Oficial INIDEP N°19/2021.
- Campodónico, S. 2021. Algoritmo para la estimación de la captura de la flota comercial de vieira patagónica. Informe de Investigación INIDEP N° /2021. *En revisión*
- Campodónico, S., Escolar, M., García, J. y Aubone, A., 2018. La pesquería de vieira patagónica (*Zygochlamys patagonica*) en Argentina. Inf. Ases. Transf. INIDEP N°77/2018, 32 pp.
- Caswell, H. 2001. Matrix Population Models. Second Edition. Sinauer.
- García, J. y Aubone, A., 2018. Selectividad de los cilindros cribados (rolos) en la pesquería de vieira patagónica (*Zygochlamys patagonica*). Informe de Asesoramiento y Transferencia INIDEP N°120/2018, 10pp.
- Hernández, D.; Campodónico, S. y Escolar, M., 2016. Metodología de evaluación de la biomasa de vieira patagónica a partir de datos de campañas de investigación. Informe de Investigación INIDEP N°04/16, 14pp.
- Lomovasky, B.J.; Lasta, M.; Valiñas, M.; Bruschetti, M.; Ribeiro, P.; Campodónico, S. and Iribarne, O. 2008. Difference in shell morphology and internal growth pattern of the Patagonian scallop *Zygochlamys patagonica* in the four main beds across their SW Atlantic distribution range. Fisheries Research 89 (2008) 266-285.
- Mauna, A.C. 2013. Reclutamiento de la vieira patagonica, *Zygochlamys patagonica* (Bivalvia: Pectinidae), en el Sector Norte de Manejo, Océano Atlántico Sudoccidental. Rev. Invest. Desarr. Pesq. 22: 43-57.