

Contribución a las Políticas Públicas N°10: Propuesta metodológica para optimizar el uso de la macrofauna bentónica como bio-indicador en la evaluación de perturbaciones antropogénicas.



AGRADECIMIENTOS

La investigación que sustenta este Policy Brief ha sido financiado por: INCAR (FONDAP-ANID N°15110027), Programa PIMEX (Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción), Programa PREGA (Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción), y FONDECYT-ANID.

Agradecemos a todos los co-investigadores que han colaborado en esta serie de estudios, así como a los tripulantes, técnicos, profesionales y estudiantes que han participado en la obtención y análisis de las muestras.

Se recomienda citar este Policy Brief de la siguiente manera:

Hernández-Miranda E., y R. A. Quiñones. 2021. Propuesta metodológica para optimizar el uso de la macrofauna bentónica como bio-indicador en la evaluación de perturbaciones antropogénicas. Contribución a las Políticas Públicas N°10. Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuícola (INCAR), FONDAP-ANID, Chile. 10 pp.

Autores: Eduardo Hernández-Miranda & Renato A. Quiñones.

E-mail: ehernandez@ucsc.cl

Noviembre de 2021

• Recomendaciones desde la ciencia para las políticas públicas

Actualmente se utiliza la caracterización de la macrofauna que habita los fondos sedimentarios de ambientes marinos para evaluar impactos de la acuicultura. Sin embargo, una gran proporción de estos organismos es de muy pequeño tamaño y su cuantificación adecuada dependerá en primer lugar del tipo de tamiz que se utilice para obtener e identificar las especies presentes y sus abundancias.

- Se recomienda el uso de un tamiz de 500 μm de abertura, en vez del tamiz de 1000 μm requerido por la regulación actual, para evaluar impactos antropogénicos en el ambiente marino, especialmente en Líneas de Base, Caracterizaciones Preliminares de Sitio y Monitoreos INFA para la Acuicultura y, Programas de Seguimiento y Vigilancia Ambiental enmarcados en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

- Esta información, debiera ser integrada mediante herramientas estadísticas multivariadas, capaces de incorporar en conjunto todos los antecedentes biológicos y ambientales recopilados en la zona de estudio seleccionada y a diferentes escalas espaciales y temporales.

- Se sugiere una replicación suficiente (mínimo 3-5 muestras de macrofauna bentónica independientes por sitio) estructuradas en gradientes de muestreo desde la Zona de Impacto Directo, hasta zonas de referencia, entendidas estas como sitios sin el impacto de la actividad antropogénica bajo estudio. El nivel de perturbación ambiental debiera ser explícitamente identificado a diferentes escalas espaciales, desde la escala de muestra hasta la de ecosistema.

- Para llevar a cabo una robusta evaluación del impacto en el ambiente al usar la macrofauna bentónica como bio-indicador, es fundamental, una correcta identificación taxonómica de los organismos presentes, la cual debe ser realizada por especialistas calificados.

• Antecedentes, alcances y objetivo.

El presente *Policy Brief* busca llamar la atención sobre la necesidad de optimizar la metodología que actualmente se utiliza para evaluar los impactos en el ambiente marino producidos por la industria de la acuicultura. En este contexto, se expone en forma resumida y esquemática, los resultados de una serie de artículos científicos orientados a resaltar el uso de la macrofauna bentónica como una herramienta cuantitativa para evaluar

el impacto de perturbaciones naturales y antropogénicas sobre los ecosistemas marinos de fondos sedimentarios^(1, 2, 3, 4, 5). Se presentan antecedentes metodológicos que sustentan las recomendaciones propuestas para realizar modificaciones a la normativa chilena actual, de tal manera de optimizar el uso de la macrofauna bentónica como una herramienta cuantitativa que contribuya a la toma de decisiones en la evaluación

del efecto de perturbaciones de origen antropogénico, en especial aquellas vinculadas a la industria de la acuicultura.

• Macrofauna bentónica de fondos sedimentarios como bio-indicador de perturbaciones

La biodiversidad de los ecosistemas marinos es abundante y diversa. Los ambientes bentónicos, que son aquellos ubicados en el fondo marino, están habitados por organismos de un amplio espectro de tamaños corporales, pertenecientes a diferentes estadios de sus ciclos de vida (ej. larvas, juveniles y adultos). En términos generales, los organismos pueden ser catalogados, respecto a su tamaño corporal como megafauna (cm a m), macrofauna (mm a cm) y meiofauna (mm), siendo los dos primeros los más estudiados. Las características ecológicas de la macrofauna bentónica de fondos sedimentarios, la han convertido en un bio-indicador ampliamente utilizado para evaluar los efectos de perturbaciones antropogénicas (ej. acuicultura, emisarios submarinos industriales, etc.). El conocimiento de la distribución y abundancia de la macrofauna en las costas de

Chile permite evaluar a través de su dinámica espacio-temporal, el efecto de perturbaciones naturales, como por ejemplo, terremotos-tsunamis⁴ o hipoxias estacionales⁵ en función de las especies presente y sus abundancias relativas. Bio-indicadores comunitarios, utilizando la macrofauna bentónica de fondos sedimentarios, pueden ser obtenidos a partir de la presencia y abundancia de las especies en un hábitat específico, dando cuenta, mediante índices, el grado de perturbación, contaminación o del *estatus ecológico* de ese ambiente. Los índices son estimados luego de asignar las especies identificadas en un área de estudio a categorías de tolerancia a una perturbación (ej. enriquecimiento orgánico) de acuerdo a diferentes niveles de sensibilidad, grupos tróficos o razones de abundancia de las especies. Un bio-indicador comunitario ideal, es aquel que

permite poner en evidencia la relación entre la tolerancia de los organismos y la fuente de perturbación, es decir, que dé cuenta mediante sus estimaciones de las alteraciones de los factores físicos y químicos del medio que habitan. Entre los bio-indicadores comunitarios más utilizados a partir de la macrofauna bentónica de fondos marinos sedimentarios están el AZTI Marine Biotic Index (AMBI), el índice ITI, y el BOPA, entre otros^(6, 7, 8).

• Estudios ambientales y evaluación de impactos en Chile

En Chile, de acuerdo a la Resolución Exenta N°3612/2009 ⁽⁹⁾, el análisis de la macrofauna marina bentónica con la finalidad de realizar una Caracterización Preliminar de Sitios (CPS) y la subsecuente Información Ambiental (INFA) en áreas destinadas a la acuicultura, considera el uso de un tamiz de 1 mm (1000 μm) de abertura de cernido para la separación, y posterior identificación y cuantificación de los organismos presentes en una muestra obtenida desde el fondo marino sedimentario. Si bien, el uso de un tamiz de 1000 μm facilita el análisis de muestras, disminuyendo los tiempos y costos asociados, el tamiz de 500 μm

entrega una cuantificación más detallada de la biodiversidad de la zona de estudio, criterio muy necesario al momento de utilizar bio-indicadores. Con el objetivo de evaluar la pérdida de información en composición, abundancia y biomasa de las especies de la macrofauna bentónica al utilizar un tamiz de 1000 μm respecto de uno de 500 μm , y su efecto en la estimación de bio-indicadores comunitarios hemos realizado una serie de estudios en la zona costera centro-sur de Chile ^(1, 2, 3). En este *Policy Brief* se presenta (i) un resumen esquemático de los resultados de las investigaciones que sustentan esta propuesta de modificar la normativa

vigente respecto del tamaño de la abertura del tamiz y (ii) se representa secuencialmente las metodologías, desde la toma de muestras hasta los análisis posteriores, orientadas a optimizar el uso de la macrofauna marina bentónica como un bio-indicador cuantitativo para evaluar el efecto de perturbaciones de origen antropogénico en los fondos marinos sedimentarios, en particular, aquellas vinculadas a la industria acuícola.

• Caracterización de la biodiversidad de la macrofauna de fondos sedimentarios

Una buena caracterización de la biodiversidad de la macrofauna bentónica de ambientes marinos sedimentarios involucra una serie de etapas y decisiones metodológicas que deben ser correctamente desarrolladas para obtener datos confiables y que sus resultados sean robustos. La Figura 1 representa visualmente cada una de estas etapas. Una vez seleccionadas la(s) zona(s) que será(n) caracterizada(s) (Fig. 1a,b), es necesario para la obtención de muestras identificar la presencia de sustratos de fondo marino de tipo sedimentario (i.e., fondos blandos; Fig. 1c). Para la obtención de las muestras biológicas y físico-químicas desde los sedimentos, es posible utilizar

diferentes técnicas de muestreo, entre ellas el uso de "corer" mediante buceo, draga y "hops corer" desde una embarcación (Fig. 1d,e,f), siendo la profundidad del sitio de muestreo y su accesibilidad la que determinará la técnica más apropiada a utilizar. Una vez obtenida la muestra de sedimentos, ésta deberá ser caracterizada *in situ* mediante sensores electrónicos (entre las mediciones estándar se sugiere, al menos, registrar: pH, potencial redox, temperatura; Fig. 1g). Posteriormente a estas mediciones, las muestras de sedimentos deberán ser cernidas, en terreno o laboratorio, en tamices para retener los organismos de la macrofauna presente (Fig. 1h, i). Si el objetivo

del estudio es evaluar el efecto de perturbaciones antropogénicas y en particular originadas por la actividad acuícola debería utilizarse, de acuerdo a los resultados científicos que hemos obtenido ^(1, 2, 3, 4, 5) un tamiz de 500 μm de abertura. Una vez cernidas las muestras, estas deberán ser almacenadas con un preservante que permita su buena mantención. Considerando los tiempos involucrados en los análisis posteriores de las muestras, el tipo de organismos a estudiar, o el tipo particular de sedimento obtenido, se puede optar por el uso de formalina o etanol (Fig. 1j). En laboratorio las muestras deberán ser analizadas por técnicos especialistas, utilizando equipamiento óptico adecuado

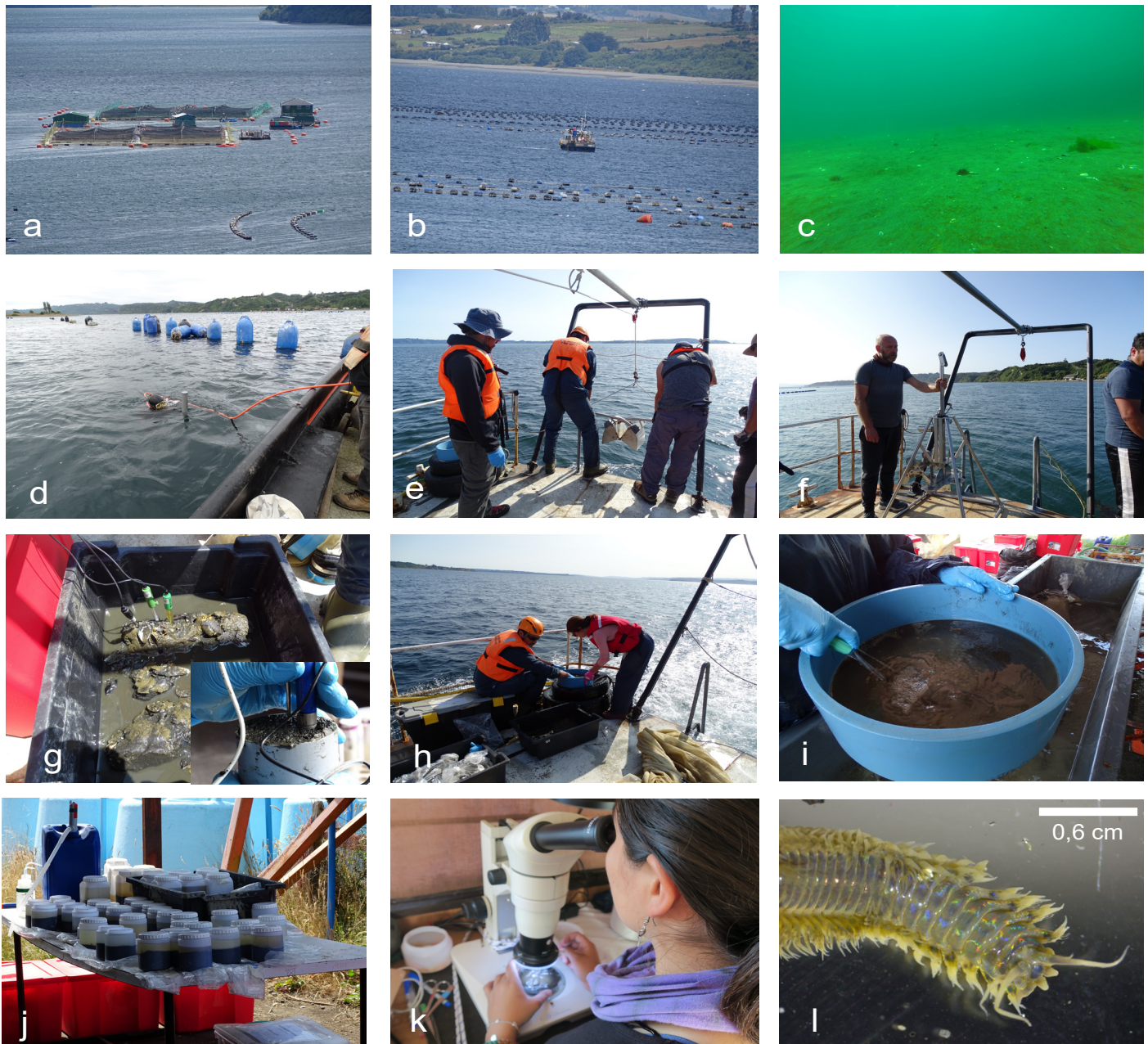


Figura 1. Etapas del proceso de caracterización de los fondos marinos aledaños y lejanos a centros de cultivos de salmónidos (a) y mitílidos (b). El proceso se inicia con la elección de los sitios de muestreo con fondos sedimentarios (c) (*i.e.*, áreas de impacto directo, indirecto y de referencia), continúa con la elección de la técnica e instrumentos de muestreo (d, e, f), realización de mediciones *in situ* en los sedimentos (g), lavado, cernido y almacenaje de las muestras (h, i, j) y termina con la identificación taxonómica de la macrofauna bentónica asociada a la zona de estudio (k, l). Además, se sugiere realizar una caracterización de las condiciones físico-químicas del fondo marino (g) y de la columna de agua con variables ad-hoc a la fuente de perturbación antropogénica bajo estudio. Observación: Imágenes propias de INCAR, enmarcadas en el estudio de Caracterización de la Macrofauna Bentónica como bio-indicador del *estatus* ecológico de los fondos marinos en torno a la Isla de Quinchao, en Chiloé. Inv. Resp. Dr. Eduardo Hernández Miranda. En (l) se señala la escala referencial del tamaño (cm) del organismo. Aumento de la fotografía corresponde a 1,6X.

(Fig. 1k), permitiendo identificar y cuantificar cada uno de los taxa presentes, hasta el mayor nivel de resolución taxonómico posible, idealmente género o especie (Fig. 1l). Complementariamente, es altamente recomendable

caracterizar otras variables en los sedimentos marinos muestreados (ej. granulometría, materia orgánica total, elementos/compuestos químicos potencialmente bioacumulables) y de la columna de agua (ej. oxígeno disuelto, ácido sulfhídrico/sulfuros,

salinidad, temperatura) que permitan posteriormente realizar un análisis en profundidad de los resultados obtenidos a partir de la diversidad de la macrofauna bentónica.

• Efecto del tamaño de abertura del tamiz utilizado para caracterizar la macrofauna de fondos sedimentarios: 500 μm versus 1000 μm de abertura

Un aspecto central en el estudio de la macrofauna marina bentónica de fondos sedimentarios como bio-indicador, tiene relación con la cantidad y calidad de la información requerida para realizar una buena caracterización de la condición ambiental de una zona de estudio impactada por una perturbación de origen antropogénico. Como se describe más arriba, una vez obtenidas las muestras de macrofauna desde el fondo marino de la zona de estudio (Fig. 1), esta debe ser cernida utilizando un tamiz especializado (Fig. 1h, l). El ejemplo esquemático y cuantitativo presentado en la Figura 2, compara la pérdida de información que se obtiene al utilizar un tamiz de 1000 μm de abertura respecto de uno de 500 μm . Una vez cernida la muestra y posteriormente preservada, comienza en el laboratorio la etapa de separación, identificación y cuantificación de los individuos de las especies presentes (Fig. 2a, b, c), la cual puede llegar a contener cientos o miles de ellos, como los taxa ejemplificados en la Figura 2c. A partir de su identificación y cuantificación, y dependiendo del bio-indicador comunitario a utilizar (ej. ITI, AMBI, BOPA, etc.) se realiza la asignación de la abundancia relativa de cada especie o taxa a los diferentes grupos ecológicos, de

acuerdo al nivel de tolerancia que presenta cada uno de ellos respecto a una perturbación particular, en este caso en relación al incremento de la materia orgánica y nivel de eutroficación del fondo marino (Fig. 2a, b, c). Como una forma de simplificar esta esquematización, en la Figura 2 los organismos son asignados a tres categorías de sensibilidad: sensibles (verde), tolerantes (amarillo) y muy tolerantes (rojo) al enriquecimiento por materia orgánica de los sedimentos. Como se observa en la Figura 2b, en el tamiz de 500 μm se representa mejor a los organismos muy tolerantes y tolerantes, de menores tamaños corporales, y que en general, son los mejores centinelas para la construcción de un bio-indicador que utiliza a la macrofauna bentónica como modelo de estudio (*i.e.*, mayor abundancia de círculos rojos y amarillos en el tamiz de 500 μm , respecto del de 1000 μm). Los resultados y análisis estadísticos comparativos a partir de la información que se obtiene de un tamiz de 500 μm respecto de uno de 1000 μm , para las mismas muestras, se presentan en la Figura 2 d-i. Gráficamente se observa que **la utilización de un tamiz de 1000 μm : i) identifica una comunidad de la macrofauna bentónica estadísticamente disímil ($p < 0,01$)**

de una cuantificada mediante un tamiz de 500 μm , tanto en sus abundancias como biomasa (Fig. d-g), ii) subestima las abundancias totales (Fig. 2h) y relativas (Fig. 2i) de los organismos de menor tamaño corporal, en especial de aquellas taxa definidas como muy tolerantes (Fig. 2 c, i). Debido a esta subestimación de las abundancias, **un sitio perturbado (*i.e.*, mayor abundancia y proporción de círculos rojos) puede ser erróneamente definido como no perturbado (*i.e.*, mayor abundancia y proporción de círculos verdes) (Fig. 2 i).** Por ejemplo, al estimar el índice AMBI utilizando el tamiz de 1000 μm se podría obtener un valor $< 3,3$ (*i.e.*, valor considerado como límite por este índice para determinar si un sitio se encuentra perturbado⁽⁸⁾), siendo que el valor es $> 3,3$ cuando se utiliza el tamiz de 500 μm (Fig. 2 i). En consecuencia, el uso del tamiz de 1000 μm resultará en una subestimación del nivel de impacto en una zona de estudio particular al utilizar este u otro bio-indicador comunitario de la macrofauna bentónica como criterio de categorización. Detalles metodológicos y estadísticos que sustentan estos resultados pueden ser revisados en los artículos Hernández-Miranda et al. (2021a, b, c)^(1,2,3)

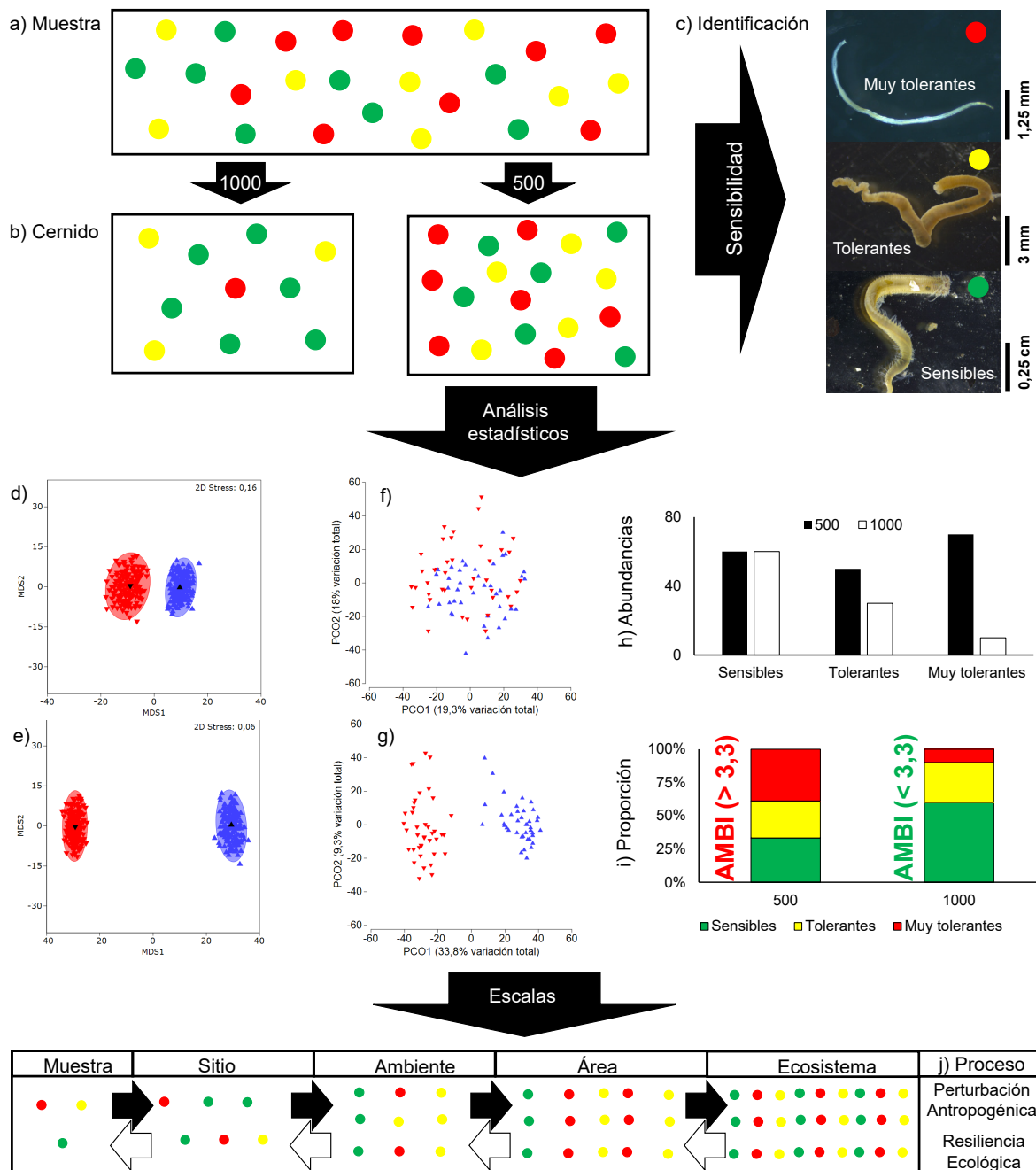


Figura 2. Etapas del proceso de revisión de muestras, asignación de especies a grupos de tolerancia y análisis estadísticos orientados a determinar el *estatus* ecológico de una zona particular de estudio en un ecosistema bentónico (a-i). Círculos verdes corresponden a especies sensibles (*ej.* Onuphidae), amarillos a especies tolerantes (*ej.* *Mediomastus* sp.) y rojos a especies o grupos muy tolerantes (*ej.* Capitellidae y Nematoda) al enriquecimiento orgánico de los sedimentos marinos. En (b), el número de círculos representa la abundancia total de organismos para especies pertenecientes a cada una de las tres categorías de tolerancia consideradas en este ejemplo simplificado. En (d y e) se presentan Análisis de Escalamiento Métrico Multidimensional (*m*MDS) obtenidos para la abundancia y biomasa de la macrofauna en un tamiz de 500 μ m (azul) y 1000 μ m (rojo) y, en (f y g) análisis de Ordenación de Coordenadas Principales (PCO) para similar comparación de abertura de tamices en abundancia y biomasa (Ver detalles metodológicos de estos análisis estadísticos en ^(2, 3); Figuras 2d-g modificadas de ⁽²⁾). En (j) se desarrolla esquemáticamente, a partir del uso de un bio-indicador en los sedimentos marinos, el proceso de conexión y avance temporal de una perturbación antropogénica desde la escala espacial de muestra hasta la de ecosistema y los mecanismos de resiliencia ecológica que también estarían actuando. Ver texto para una explicación detallada de este proceso. En (c) se señala la escala referencial del tamaño (cm, mm) de los organismos. Aumento de las fotografías corresponde a 1,6X.

• Escalas espacio-temporales de los estudios, perturbación y resiliencia ecológica

Por otro lado, la asignación o determinación del *estatus* ecológico de una zona estudiada debe considerarse como parte de un proceso espacial en un contexto temporal. La caracterización de una muestra individual de macrofauna bentónica puede arrojar en términos cualitativos que, de acuerdo a la abundancia total y relativa de las especies registradas, el fondo marino se encuentra perturbado, medianamente perturbado o no perturbado (ej. $< 3,3$ utilizando AMBI como bio-indicador), lo que fue representado esquemáticamente con colores rojo, amarillo ($> 3,3$) o verde ($< 3,3$), en este estudio comparativo entre tamices (ver Fig. 2). Al incrementar el número de muestras de la macrofauna (i.e., réplicas espaciales independientes), el *estatus* ecológico de un sitio de muestreo quedará definido por el aporte de las abundancias relativas de las especies/*taxa* de cada una de las muestras obtenidas, proyectándose a una escala espacial mayor (i.e., de sitio) la condición de perturbación o no perturbación del fondo marino. Así, progresivamente, al incrementar la escala espacial de observación (i.e., ambiente, área, ecosistema), será posible caracterizar el *estatus* ecológico desde un ambiente (ej. aledaño o lejano a un centro de cultivos), de un área geográfica (ej. barrio) o finalmente del ecosistema (ver detalles metodológicos, estadísticos y teóricos de esta conexión jerárquica

de escalas espaciales en ⁽¹⁾).

En términos espacio-temporales, se puede observar este proceso jerárquico de perturbación de los sedimentos marinos como un *continuum* temporal, pudiendo proyectarse los efectos del enriquecimiento orgánico, originado a una escala espacial muy local (ej. aledaña a un centro de cultivo), hacia escalas espaciales mayores del fondo marino (ej. barrios de acuicultura) (Fig. 2j; flechas negras) si las fuentes o *input* de materia orgánica/nutrientes se sostienen en el tiempo. Por el contrario, la presencia de zonas no-perturbadas en un ecosistema (ej. áreas sin la presencia de centros de cultivo u otras fuentes de perturbación antropogénica) actuarían como un factor ecológico antagónico al proceso de perturbación (i.e., resiliencia ecológica). La resiliencia ecológica actuaría jerárquicamente desde escalas espaciales mayores hacia escalas espaciales menores, principalmente mediante mecanismos de dispersión larval y colonización de las diferentes especies que componen la comunidad, desde zonas no perturbadas (Fig. 2j; flechas blancas). Una buena caracterización del fondo marino sedimentario, utilizando bio-indicadores a partir de la macrofauna bentónica, permitiría asignar selectivamente zonas para la acuicultura inmersas en otras espacialmente mayores. Esto

favorecería, a nivel ecosistémico, la presencia de mecanismos biológicos y ecológicos de dispersión de los organismos incrementando la resiliencia. El uso de un tamiz de 500 μm para la caracterización de la macrofauna es necesario para optimizar esta asignación.

• Referencias

- ¹ Hernández-Miranda E, Estrada R, Strange P, Veas R, Krautz MC, Quiñones RA. 2021a. Macrofauna community patterns in a Chiloe Island channel used intensely for aquaculture: the ecological status of its benthic environment. *Revista Chilena de Historia Natural* 94:1-19. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40693-021-00098-z>
- ² Hernández-Miranda E, Veas R, Krautz MC, Hidalgo N, San Martín F, Quiñones RA. 2021b. Efecto del tamaño de tamiz en la caracterización de la macrofauna marina bentónica: Implicancias para su uso en líneas de base, caracterizaciones preliminares de sitios para la acuicultura y monitoreos ambientales en Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. 56(1):22-41. DOI: <https://doi.org/10.22370/rbmo.2021.56.1.2796>.
- ³ Hernández-Miranda E, Veas R, Krautz MC, Hidalgo N, San Martín F, Quiñones RA. 2021c. Bio-indicadores de contaminación marina costera y filtros de exclusión de organismos en sistemas de captación de agua de mar. En *Programas de Monitoreo del Medio Marino Costero: Diseños Experimentales, Muestreos, Métodos de Análisis y Estadística Asociada*. Capítulo 14 (269-288 pp). Ediciones Universidad Católica. 320 pp. ISBN digital 978-956-14-2791-4
- ⁴ Cárcamo PJ, Hernández-Miranda E, Veas R, Quiñones RA. 2017. Macrofaunal community structure in Bahía Concepción (Chile) before and after the 8.8 Mw Maule mega-earthquake and tsunami. *Marine Environmental Research* 130:233-247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.07.022>
- ⁵ Veas R, Hernández-Miranda E, Quiñones RA, Carrasco F. 2012. Spatio-temporal biodiversity of soft bottom macrofaunal assemblages in shallow coastal waters exposed to episodic hypoxic events. *Marine Environmental Research* 78:1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.02.008>
- ⁶ Word JQ. 1979. The infaunal trophic index. In: *Annual Report 1978 Southern California Coastal Water Research Project*, Los Angeles, pp. 19-41.
- ⁷ Dauvin JC, Ruellet T. 2007. Polychaete/amphipod ratio revisited. *Marine Pollution Bulletin* 55:215-224.
- ⁸ Borja A, Franco J, Pérez V. 2000. A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments. *Marine Pollution Bulletin* 40:1100-1114.
- ⁹ Res. Ex. 3612/2009. Resolución que fija las metodologías para elaborar la caracterización preliminar de sitio (CPS) y la información ambiental (INFA). Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción; Subsecretaría de Pesca (modificada 06.04.2020 Res. Ex. 905).



www.centroincarc.cl