

SOLICITUD PARA PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN PLURIANUALES

CONVOCATORIA 2022-2024

1. Título del proyecto

¿Cuáles son los efectos de los cambios ambientales antropogénicos en las interacciones tróficas de las comunidades de los ecosistemas marinos en el gradiente latitudinal Atlántico Sudoccidental - Antártida?

2. Nombre del investigador titular

Tomás I. Marina (titular), Leonardo A. Saravia (co-titular)

3. Resumen del proyecto

Los efectos ocasionados por los cambios ambientales antropogénicos en las comunidades de los ecosistemas marinos han sido y siguen siendo motivo de diversas líneas de investigaciones. En los últimos años, se ha evidenciado la importancia de considerar las interacciones tróficas para comprender mejor los efectos de dichos cambios en los ecosistemas marinos. El plan de trabajo aquí propuesto tiene como objetivo general estudiar los efectos de los cambios ambientales antropogénicos, aumento de la temperatura y sobrepesca, en las interacciones tróficas de las comunidades en ecosistemas marinos del gradiente latitudinal Atlántico Sudoccidental - Antártida: Golfo San Jorge, AMP Namuncurá-Banco Burdwood, Canal Beagle y Caleta Potter (Antártida). Se utilizará un enfoque de redes complejas para incorporar la mayor parte de las especies del ecosistema y las relaciones presa-depredador que ocurren entre las mismas. Las tareas de investigación propuestas responden al desarrollo de las siguientes líneas de estudio: a) caracterizar la complejidad, estructura y estabilidad de las redes tróficas considerando la mayor resolución taxonómica posible para las especies; b) simular escenarios realistas de cambios ambientales (aumento de temperatura) y antropogénicos (sobrepesca) para cada área de estudio; c) analizar el efecto de dichos cambios en la estructura y estabilidad de las redes tróficas; y d) estudiar cómo los posibles cambios de régimen ocasionados por los cambios ambientales antropogénicos en una determinada área de estudio pueden influir sobre las demás áreas del gradiente latitudinal elegido. El grupo de trabajo está conformado por investigadores nacionales e internacionales y tesisistas que vienen interactuando en cooperación con el objetivo de estudiar la ecología trófica de los ecosistemas marinos de altas latitudes con un enfoque de sistemas complejos. Las instituciones que albergan a los integrantes del proyecto están abocadas a investigaciones relacionadas al Mar Argentino: CADIC-CONICET, CESIMAR-CONICET, INIDEP. Los resultados del proyecto generarán conocimiento de base sobre la complejidad, estructura y estabilidad de las redes tróficas de diversas áreas geográficas prioritarias del Mar Argentino y la Península Antártica. Se pretende evidenciar la importancia de considerar la complejidad del entramado de interacciones tróficas en las comunidades marinas para capturar los fenómenos emergentes de los ecosistemas sometidos a cambios ambientales antropogénicos.

4. Plan de trabajo

4.1. Objetivo general o marco de referencia

El objetivo general es estudiar los efectos de cambios ambientales antropogénicos en las interacciones tróficas de las comunidades de los ecosistemas marinos en el gradiente latitudinal Atlántico Sudoccidental - Antártida. Los cambios a estudiar son el aumento de la temperatura media del mar y la sobrepesca. Los efectos en los que se hará énfasis son: incremento en la demanda metabólica de las especies, extinción/invasión de especies y disminución de la biomasa de especies de interés pesquero. El gradiente comprende: Golfo San Jorge, Área Marina Protegida Namuncurá - Banco Burdwood, Canal Beagle y Caleta Potter (Antártida).

Se utilizará una aproximación de redes ecológicas, que permite analizar las relaciones entre las especies de una comunidad en un marco general de teoría de redes. Se focalizará en la interacción más frecuente que ocurre en un ecosistema: relación trófica presa-depredador. A partir de aquí se estudiarán los efectos mencionados sobre las redes tróficas de las áreas del gradiente latitudinal elegido. Los resultados de este proyecto contribuirán a “desarrollar capacidades para modelar y simular escenarios futuros en el contexto del cambio climático”, y “aportar fundamentos científicos para la administración y manejo de áreas marinas protegidas”, acciones de la iniciativa Pampa Azul.

4.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos se irán desarrollando en el siguiente orden para cada una de las áreas de estudio mencionadas:

- A. Analizar la red trófica considerando solo presencia/ausencia de interacciones (red trófica cualitativa) a tres escalas diferentes: especies, grupos de especies (subredes), red trófica total. Analizar las propiedades de complejidad y estructura de la red trófica total.
- B. Estimar la intensidad de interacción para cada una de las relaciones presa-depredador utilizando la teoría metabólica de la ecología, obteniendo una red trófica cuantitativa.
- C. Analizar la estabilidad de la red trófica y evaluar la relación complejidad-estructura y estabilidad teniendo en cuenta las intensidades de las interacciones (red trófica cuantitativa).
- D. Modelar los efectos de cambios ambientales antropogénicos en la red trófica cuantitativa mediante: incremento de la demanda metabólica de las especies, extinción/invasión de especies, y disminución en la biomasa de especies de interés pesquero, dependiendo del área de estudio. Evaluar los efectos de estos cambios sobre la complejidad, estructura y estabilidad de la red.
- E. Analizar comparativamente los resultados de los objetivos anteriores considerando las áreas que comprenden el gradiente latitudinal Atlántico Sudoccidental - Antártica.
- F. Evaluar la posibilidad de que los cambios de estructura o cambios de régimen en las redes tróficas de las áreas del gradiente elegido estén integrados regionalmente: distintos cambios de régimen en una región pueden estar conectados y producir un efecto en cascada. Para esto se generará un modelo integrado espacialmente simplificando las redes tróficas de cada área.

4.3. Introducción, conocimientos existentes y resultados previos

4.3.1. Introducción al tema

Las redes ecológicas están compuestas por un conjunto de especies y/o grupos funcionales y conexiones que representan las interacciones y los flujos de energía y/o materia en un sistema. Particularmente, una red ecológica describe las interacciones entre especies en una comunidad y un hábitat determinados. En los ecosistemas ocurren interacciones de diferentes tipos: tróficas (de alimentación), mutualistas (de provisión de alimento y refugio), competitivas (de interferencia en la utilización de los recursos comunes), entre otras. Esta aproximación al estudio de las comunidades como un entramado de múltiples interacciones es una herramienta de análisis que ayuda a revelar no sólo la estructura y estabilidad sino las propiedades dinámicas y energéticas de un ecosistema (Belgrano et al. 2005). Los modelos tróficos de redes complejas pueden ser usados para evitar el reduccionismo de trabajar solo con las especies que se suponen importantes y/o con las interacciones de mayor flujo relativo, lo que trae como consecuencia una descripción sesgada e incompleta del sistema bajo estudio. Al incorporar la mayor parte de las interacciones se pueden llegar a capturar fenómenos emergentes imposibles de predecir cuando se utilizan modelos de pocas especies (Hagstrom & Levin 2017). Esto proporciona una perspectiva de sistemas complejos para investigar los fenómenos ecológicos y para analizar los impactos del cambio climático global y las perturbaciones antropogénicas en los ecosistemas marinos (Dunne 2006, Landi et al. 2018).

El estudio de la complejidad, estructura y estabilidad de las redes tróficas utilizando la teoría de redes comenzó en la década de 1970 con el análisis de comunidades terrestres y dulceacuícolas (May 1973, Cohen 1978, Pimm 1980, Briand & Cohen 1987). Durante esta época, R.M. May sugirió, de manera teórica, una relación entre complejidad, analizada mediante la conectividad ($C = L/S^2$ donde L es el número de interacciones y S el número de especies), y estabilidad en las redes tróficas: a mayor conectividad, menor estabilidad (May 1973). Con el advenimiento de redes tróficas empíricas de mayor resolución (i.e. mayor representación de especies biológicas que de grupos funcionales agregados) y complejidad, la hipótesis sobre la relación entre complejidad-estructura y estabilidad comenzó a ser refutada (Martinez 1993, Hall & Raffaelli 1997, Jacquet et al. 2016). Actualmente, los estudios de redes tróficas se centran en el estudio de la estructura y su influencia en el funcionamiento y estabilidad de los ecosistemas (e.g. Stouffer & Bascompte 2011, Marina et al. 2018a, b, Landi et al. 2018). Las propiedades estructurales de las redes tróficas pueden ser analizadas a tres niveles diferentes: 1) red trófica total, considerando la totalidad de las especies e interacciones, y usando métricas como conectividad, nivel trófico medio, coherencia trófica, modularidad; 2) grupos de especies (subredes), teniendo en cuenta sólo especies que interactúen de manera directa, analizando por ejemplo la frecuencia de motivos tróficos; y 3) especies, describiendo el rol topológico de cada especie en los módulos de la red. En este sentido, existe evidencia de correlación entre ciertas propiedades estructurales (coherencia trófica, modularidad y frecuencia de motivos tróficos), y la respuesta de las redes tróficas a cambios de diverso origen (Stouffer & Bascompte 2011, Johnson et al. 2014, Borrelli et al. 2015).

En las últimas décadas se ha puesto énfasis en el rol que cumple la intensidad de interacción como un aspecto fundamental para mejorar la comprensión de la estructura de las redes tróficas y su influencia en la estabilidad en ecosistemas sometidos a perturbaciones de diverso origen (Neutel et al. 2007, Shurin et al. 2012, Nilsson & McCann 2016, Kortsch et al. 2021). Sin embargo, la mayoría de los estudios de simulación de efectos de cambios ambientales antropogénicos realizados sobre redes tróficas empíricas de alta resolución utilizan redes cualitativas, es decir que solo tienen en cuenta la presencia/ausencia de las interacciones y no su intensidad (Dunne et al. 2002, Byrnes et al. 2007, Eklöf et al. 2013, Cordone et al. 2018). Por otro lado, aquellos estudios que estiman la intensidad de interacción entre las especies,

obteniendo redes tróficas cuantitativas, sugieren que el rol de las interacciones débiles o de menor intensidad relativa es esencial para proveer estabilidad a la red (Emmerson & Yearsley 2004, Bascompte et al. 2005, van Altena et al. 2016). Entre los diversos métodos para estimar la intensidad de interacción en redes tróficas (Berlow et al. 2004), el que se basa en la teoría metabólica de la ecología (Brown et al. 2004), que será utilizado en este proyecto, posee la ventaja de estimar la intensidad como el flujo de energía entre la presa y el depredador considerando aspectos de tamaño corporal, efecto de la temperatura ambiental y taxonomía de las especies (Reuman & Cohen 2005, Barnes et al. 2018, Jochum et al. 2021).

Uno de los cambios ambientales más importantes en los ecosistemas marinos de altas latitudes es el aumento de la temperatura superficial media del agua (Bulgin et al. 2020, Gutt et al. 2021), registrándose aumentos de hasta 1°C en los últimos 50 años (Meredith & King 2005). Uno de los principales efectos directos sobre las especies marinas es el aumento de la demanda metabólica (Brown et al. 2004) y el cambio de distribución de las especies, que trae como consecuencia extinciones e invasiones locales particularmente en los ecosistemas de aguas templado-frías (e.g. Kortsch et al. 2015, McCarthy et al. 2019). Por otro lado, uno de los cambios antropogénicos históricamente determinantes para la estructura y funcionamiento de los ecosistemas marinos ha sido y es la actividad pesquera (Halpern et al. 2007). Además del efecto directo en la biomasa de la especie objetivo, se ha evidenciado que las pesquerías alteran la dieta y preferencia de los depredadores mediante la captura incidental y/o el descarte, como es el caso del Golfo San Jorge en el Mar Argentino (Funes et al. 2019).

Con el advenimiento de ecosistemas marinos sometidos a múltiples perturbaciones simultáneamente (aumento de temperatura media, sobrepesca) (Dans et al. 2020, Gutt et al. 2021), es posible que se desencadenen cambios de régimen o de estructura en el entramado de múltiples interacciones tróficas. Un cambio de régimen en un ecosistema puede definirse como la ocurrencia de cambios relativamente abruptos entre estados persistentes que pueden presentarse en un sistema complejo (de Young et al. 2008). Generalmente estos cambios se producen a nivel local pero pueden propagarse espacialmente hasta comprender regiones extensas (Eklöf et al. 2020). La conexión entre los cambios de régimen entre diferentes áreas puede darse debido a que se comparte la misma variable externa como forzante así como debido a la dispersión de las especies. Si los organismos se dispersan entre áreas locales, el cambio debería comenzar en las áreas donde los sistemas están más cerca de los umbrales de transición, propagándose gradualmente hacia otras áreas como un efecto dominó (van de Leemput et al. 2015). La mayor interconexión entre cambios de régimen fue encontrada en ecosistemas marinos en estudios que involucran comunidades de macroalgas, fenómenos de eutroficación, o el colapso de pesquerías (Rocha et al. 2018). Esto subraya la importancia de analizar las conexiones entre los posibles cambios de régimen en el gradiente latitudinal Atlántico Sudoccidental - Antártida propuesto en el presente plan.

Los efectos de los cambios ambientales antropogénicos en los ecosistemas del Mar Argentino han sido estudiados con un foco en una única especie o en un grupo reducido de especies de interés (e.g. referencias en Dans et al. 2020 -Golfo San Jorge-; Almandoz et al. 2019 -Canal Beagle-; Fioramonti et al. 2021 -AMP Burdwood-; Sahade et al. 2015 -Caleta Potter-). Como fuera mencionado, existe cada vez más evidencia de la importancia de considerar el complejo entramado de múltiples interacciones tróficas para comprender los efectos de los cambios en los ecosistemas marinos, así como la variabilidad en la intensidad de las interacciones. En este sentido, los modelos tróficos de redes complejas, metodología propuesta en este proyecto, tienen la ventaja de proveer un marco robusto para estudiar fenómenos emergentes en ecosistemas marinos sometidos a cambios de diverso origen.

4.3.2. Principales contribuciones de otros al problema

A lo largo del gradiente Atlántico Sudoccidental - Antártida se han realizado diversas investigaciones que han abordado aspectos de la ecología trófica enfocándose en la descripción de ciertas relaciones presa-depredador de interés. Cabe citar algunos de los trabajos más relevantes en las áreas de estudio del presente proyecto: Golfo San Jorge (Sánchez et al. 2008, St-Onge & Ferreyra 2018), AMP Namuncurá - Banco Burdwood (Ricciardelli et al. 2020), Canal Beagle (Ricciardelli et al. 2017), y Caleta Potter (Pasotti et al. 2015, Barrera-Oro et al. 2019). La mayoría de estos estudios analizan las interacciones tróficas considerando especies de una comunidad en particular (aves y mamíferos marinos, peces, especies bentónicas, macroalgas), mientras que en aquellos casos en los que la totalidad de los niveles tróficos fue estudiada la resolución taxonómica fue baja (grupos a niveles de clase, orden, familia). En este contexto, los trabajos de ecología trófica que consideran la totalidad de las especies y sus relaciones presa-depredador en las áreas mencionadas fueron liderados por integrantes del grupo de investigación del presente proyecto. Sin embargo, el estudio de los efectos de cambios ambientales antropogénicos sobre la red compleja de interacciones tróficas en estos ecosistemas es casi nulo. Por su parte, las principales contribuciones de otros grupos con un enfoque de sistemas complejos se han llevado a cabo en ecosistemas marinos diferentes a los propuestos en este proyecto.

En particular, las contribuciones realizadas con respecto a la complejidad, estructura y estabilidad de las redes tróficas marinas utilizando el enfoque de redes complejas se concentran en algunos ecosistemas. Los ecosistemas marinos más estudiados en este sentido son: el Mar Báltico (Yletyinen et al. 2016, Kortsch et al. 2021, Tomczak et al. 2021), el Mar de Barents (Olivier & Planque 2017), el intermareal rocoso de Chile (Pérez-Matus et al. 2017) y ciertas regiones costeras antárticas y pelágicas del Océano Austral (Jacob et al. 2011, Ortiz et al. 2017, Rossi et al. 2019, McCormack et al. 2020). A modo de resumen, estos trabajos dan evidencia de la existencia de una compleja red de interacciones tróficas con características estructurales particulares en cada sistema estudiado. Sin embargo, se pueden destacar algunas generalidades para las redes tróficas marinas: 1) una distribución asimétrica de las interacciones, es decir, que la mayoría de las especies están poco conectadas mientras que una minoría concentra las interacciones; 2) un alto porcentaje de especies omnívoras (> 40%); 3) una organización en módulos, donde un subgrupo de especies está más conectado entre sí que con el resto de las especies de la red. En su mayoría, estos avances fundamentales en el conocimiento de la ecología trófica de los ecosistemas se han realizado utilizando redes tróficas cualitativas, donde solo la presencia/ausencia de la interacción fue tomada en cuenta para la construcción y análisis de la red. En la última década se ha acumulado evidencia que sugiere que estimar las intensidades de interacción (red trófica cuantitativa) resulta esencial para estudiar la dinámica y estabilidad de las redes tróficas y comprender los efectos de los cambios sobre los ecosistemas marinos (Shurin et al. 2012, Nilsson & McCann 2016). Es por esto que el presente proyecto propone como uno de los primeros objetivos específicos el de estimar la intensidad de interacción para cada una de las relaciones presa-depredador de las redes tróficas a estudiar.

Como fuera mencionado anteriormente, es escaso o casi nulo el conocimiento sobre los efectos de cambios de diversos orígenes en las redes tróficas marinas en las áreas de estudio propuestas. Es importante resaltar que ya existe evidencia sobre los impactos que los cambios ambientales antropogénicos están teniendo actualmente en algunas comunidades de las áreas de estudio propuestas (Sahade et al. 2015, Almandoz et al. 2019, Cossi et al. 2021, referencias en Dans et al. 2020), pero hasta el momento no existen investigaciones que analicen cómo se verán afectadas el resto de las comunidades del ecosistema. Una de las formas de estudiar estos efectos es mediante la simulación computacional de escenarios de cambios a partir de

extinciones/invasiones de especies en un contexto de red trófica (Byrnes et al. 2007). Es de destacar que uno de los pocos trabajos publicados en este sentido en una de las áreas de estudio propuestas en el presente proyecto (Caleta Potter, Antártida), fue realizado por integrantes del grupo (Cordone et al. 2018). Numerosas investigaciones similares llevadas a cabo en otros ecosistemas marinos dan cuenta de alteraciones en propiedades estructurales, tales como la conectividad de la red y la distribución de las interacciones entre las especies, y de funcionamiento, como la dominancia de determinados flujos de energía (e.g. Dunne et al. 2002, 2004, Estrada 2007, Ávila-Thieme et al. 2021). Recientemente, Ávila-Thieme et al. 2021 encontraron que para el intermareal rocoso de Chile, la red trófica fue robusta a la pérdida de especies de interés pesquero, pero frágil a la disminución de la productividad del plancton. Además, los autores encontraron que la pesca atenuó los impactos negativos de la disminución de la productividad del plancton en las especies no pescadas al reducir la presión de depredación, y que la disminución de la productividad del plancton aumentó la sensibilidad de las especies de interés pesquero al reducir la productividad total de la red. Los mismos autores asumen que uno de los aspectos a mejorar en su investigación es la consideración de los efectos de las especies invasoras, ya que podrían ocupar el nicho de las especies de interés pesquero si su población es sobreexplotada. Este interrogante se relaciona con el objetivo específico del proyecto que propone modelar escenarios de cambios mediante extinciones/invasiones de especies, y evaluar sus efectos en la estructura y estabilidad de la red trófica.

El estudio de cambios de régimen en redes tróficas marinas es escaso y, hasta la fecha, está circunscripto a ecosistemas del Hemisferio Norte (Yletyinen et al. 2016, Griffith et al. 2019). Cabe mencionar aquél realizado por Yletyinen et al. (2016) en el Mar Báltico, donde se estudiaron las propiedades estructurales de las redes antes y después de un cambio de régimen. Los autores construyeron redes cualitativas (presencia/ausencia de las interacciones) y utilizaron modelos de grafos aleatorios exponenciales para evaluar los patrones de ocurrencias de motivos tróficos (competencia aparente, competencia excluyente, omnivoría y cadena tri-trófica) en las interacciones de las especies. Sus resultados sugieren que el cambio de régimen no se tradujo en un cambio de estructura en la red trófica. Los autores de este trabajo advierten que el cambio de régimen pudo haber afectado la intensidad de las interacciones, aspecto que no fue abordado por haber analizado redes cualitativas y no cuantitativas. Como fuera mencionado anteriormente en esta sección, el presente proyecto propone estimar la intensidad de interacción para obtener redes cuantitativas que permitan comprender realmente los efectos de los cambios de régimen.

A modo de síntesis, el interrogante principal es común a todas las áreas de estudio del proyecto, y puede ser resumido tomando una de las perspectivas de investigación del Programa de Investigación y Monitoreo del GSJ (PIMGSJ, Dans et al. 2020): “proponer alternativas de modelos conceptuales y formales cuantitativos para evaluar respuestas del sistema ante posibles escenarios generados por explotación pesquera, introducción de especies o cambio climático”. Además, este proyecto propone analizar la posible conectividad de estos cambios entre las áreas que comprenden el gradiente latitudinal Atlántico Sudoccidental - Antártida siguiendo lo sugerido por Eklöf et al. (2020), que da evidencia de la importancia de considerar la heterogeneidad espacial y la dispersión para predecir, detectar y entender mejor los cambios de régimen dentro de los grandes sistemas marinos.

4.3.3. Principales contribuciones al tema por parte del grupo del proyecto

Las principales contribuciones al tema por parte del grupo se relacionan con el estudio de la complejidad, estructura y funcionamiento de las redes tróficas en las regiones del Atlántico Sudoccidental, subantártica y antártica. En los últimos años diferentes tesis doctorales, presentaciones a congresos nacionales e internacionales y publicaciones en revistas científicas han generado conocimiento de base sobre la importancia de las interacciones tróficas para la estructura y funcionamiento de los ecosistemas marinos de dichas regiones (Marina et al. 2018a, b, Saravia et al. 2019a, en rev., Cordone et al. 2020, Momo et al. 2020, Funes et al. en rev., Rodriguez et al. rev.). De manera análoga, la integrante extranjera del proyecto, Dra. Susanne Kortsch, ha realizado contribuciones fundamentales para comprender la estructura trófica de diversos ecosistemas marinos de altas latitudes en el Hemisferio Norte (Kortsch et al. 2019, 2021).

Es de destacar que cada uno de los integrantes del grupo del proyecto ha tenido un rol protagónico en las investigaciones concernientes a analizar las redes tróficas de las diferentes áreas del gradiente latitudinal que se propone estudiar (Marina et al. 2018a, Cordone et al. 2018, 2020, Funes et al. en rev., Rodriguez et al. en rev.).

La región más boreal en el mencionado gradiente es el Golfo San Jorge (GSJ, entre latitudes 45° y 47° S y longitudes 65° y 68° O). El conocimiento de este ecosistema ha crecido en los últimos años gracias a los diversos estudios del Grupo de Trabajo Golfo San Jorge (GT-GSJ) (Dans et al. 2020). El co-titular del proyecto, Dr. Leonardo A. Saravia, está colaborando activamente en la publicación de la primera descripción acabada y de alta resolución taxonómica de las interacciones tróficas del GSJ (Funes et al. en rev.). La red trófica comprende más de 160 especies interactuando en cinco niveles tróficos. Las especies que se destacan como importantes en la estructura de la red y aumentan la eficiencia energética del ecosistema conectando los niveles tróficos basales (productores primarios) y tope (depredadores) son los crustáceos *Pleoticus muelleri* y *Munida gregaria*, de posiciones tróficas medias. La inclusión del efecto de la pesca sugiere cambios esenciales en las interacciones entre las especies, donde *Merluccius hubbsi* (merluza común) adquiere relevancia como especie clave. Además, el efecto de la pesca trae cambios en la estructura y funcionamiento del ecosistema: mayor proporción de especies omnívoras, disminución en el nivel trófico medio y menor estabilidad del sistema (Funes et al. en rev.). En este contexto, algunos de los principales interrogantes abiertos para el GSJ radican en estudiar de qué manera los cambios registrados en la estructura y funcionamiento de la red trófica afectan el flujo de energía en el sistema, y evaluar los posibles cambios de régimen que se han evidenciado recientemente en la comunidad de peces como consecuencia de cambios en la distribución (Belleggia et al. 2019, Galván et al. 2021).

Otra de las áreas de estudio del proyecto es el Área Marina Protegida (AMP) Namuncurá - Banco Burdwood (centrada en 54° S y 59° O). El conocimiento sobre la estructura trófica y la dinámica de las comunidades bentónicas y pelágicas del ecosistema del AMP está siendo evaluado mediante diferentes enfoques por el Grupo de Trabajo Banco Burdwood (GT-BB). En este contexto se vincula el plan de trabajo del titular del proyecto Dr. Tomás I. Marina, que tiene por objetivo modelar la estructura trófica de las comunidades pelágicas y bentónicas que habitan el AMP, así como su funcionamiento y estabilidad ante perturbaciones antropogénicas y de cambio climático. En este sentido se ha avanzado en la construcción de la red trófica del AMP, cuyos resultados preliminares muestran una red trófica compuesta de 387 especies tróficas y 1373 interacciones. En términos de cantidad de interacciones se destacan: *Dissostichus eleginoides* (pez bento-pelágico), *Patagonotothen guntheri* (pez bento-pelágico) y *Themisto gaudichaudii* (anfípodo) (Marina et al. 2021). Aquí los interrogantes que permanecen abiertos son varios, pero cabe señalar: cómo se verían afectadas las especies vulnerables del AMP

(cnidarios, poríferos) a los cambios ambientales antropogénicos (aumento de la temperatura del agua, sobrepesca) (Falabella et al. 2013, Tamini 2021), y qué impacto tendría esto en la estructura y estabilidad de la red trófica.

Para el caso de las áreas Canal Beagle y Caleta Potter (Antártida), los integrantes del proyecto han publicado varios estudios acerca de las redes tróficas de dichos ecosistemas (Marina et al. 2018a, Cordone et al. 2018, 2020, Rodríguez et al. en rev.). Es de destacar uno de los trabajos liderados por la Biól. Georgina Cordone, que mediante simulaciones computacionales de extinciones sugiere que la red trófica de Caleta Potter es robusta a los cambios en las especies de macroalgas causados por el cambio climático hasta un alto umbral de estrés, a partir del cual se espera que los efectos negativos se propaguen por toda la red provocando su colapso (Cordone et al. 2018). Recientemente, la Biól. Iara D. Rodríguez ha liderado una investigación donde se describe, analiza y compara la estructura y estabilidad de las redes tróficas del Canal Beagle y Caleta Potter. Los resultados indican que la red del Canal Beagle es más compleja, pero menos estable que la de Caleta Potter, haciendo hincapié en la importancia de monitorear estos ecosistemas, dado el contexto del cambio climático global y el aumento de los disturbios antropogénicos (Rodríguez et al. en rev.).

Sumado a lo mencionado anteriormente, el Dr. Luciano Chiaverano (INIDEP-CONICET) cuenta con experiencia en modelos ecosistémicos de balance de masas (ECOPATH) y simulaciones de cambios ambientales (ECOTRAN), particularmente evaluando el rol del plancton gelatinoso y los peces de forrajeo en el flujo de energía dentro de ecosistemas productivos marinos (Corriente de Humboldt) y la relación entre estos dos grupos funcionales y las pesquerías (Chiaverano et al. 2018).

Existen escasos estudios que investiguen los cambios estructurales y de funcionamiento en redes tróficas marinas en un gradiente latitudinal (López-López et al. 2021). Entre ellos se destacan los liderados por la integrante extranjera Dra. Susanne Kortsch en ecosistemas marinos de altas latitudes del Hemisferio Norte, que resaltan la importancia de estimar la intensidad de interacción de las redes para comprender la dinámica de los sistemas y los procesos ecológicos que podrían verse afectados en escenarios de cambios de diverso origen (Kortsch et al. 2015, 2019, 2021).

En conclusión, las áreas de estudio propuestas para este proyecto comprenden ecosistemas complejos en términos de la cantidad de especies e interacciones tróficas. En todos los casos el principal interrogante aún abierto es cómo se verá afectada la estructura, el funcionamiento y la estabilidad de la red trófica frente a los efectos de los cambios ambientales antropogénicos que están sucediendo actualmente en las diferentes áreas. En este contexto, y dada la conectividad entre las áreas (Matano et al. 2010, Franco et al. 2018), es de interés realizar un análisis regional sobre la posible presencia de cambios de régimen locales y su conexión en el gradiente latitudinal Atlántico Sudoccidental - Antártida. Esto se vincula directamente con el plan de trabajo del co-titular del proyecto Dr. Leonardo A. Saravia, que tiene por objetivo estudiar los cambios de régimen que se pueden producir en redes ecológicas en ecosistemas antárticos y sub-antárticos que integran el Mar Argentino.

4.3.4. Resultados preliminares no publicados

Actualmente existen varios trabajos que se encuentran en desarrollo y que corresponden a las diferentes áreas de estudio propuestas en este proyecto. Algunos de ellos ya fueron enviados para su publicación a revistas científicas y están en etapas avanzadas del proceso editorial (segunda ronda de revisión), hecho por el cual sus resultados fueron incluidos en la sección anterior (Funes et al. en rev., Rodríguez et al. en rev.).

Una de las futuras publicaciones del grupo corresponde a uno de los capítulos de la tesis doctoral de la integrante Biól. Georgina Cordone. En este trabajo se continuó con la línea planteada en el artículo de Cordone et al. (2020), considerando el tipo de hábitat (sustrato duro vs. blando) en la descripción de la red trófica de Caleta Potter (Antártida). De esta manera, se evaluó el efecto del aumento de la temperatura sobre las redes tróficas de sustrato duro y blando a través de simulaciones de extinciones de especies. Se simuló la extinción de especies vulnerables al aumento de la temperatura: macroalgas en la red de sustrato duro y filtradores bentónicos en la red de sustrato blando; registrándose cambios en la estructura y estabilidad. Ambas redes muestran un patrón similar en la robustez, evidenciando un punto de inflexión que indicaría un posible colapso del sistema. Sin embargo, en cuanto a otras propiedades relacionadas a la estabilidad, se observó que la respuesta de las redes es distinta. En la red de fondo blando los resultados muestran una disminución de la modularidad y la omnivoría, mientras que en la red de fondo duro la omnivoría aumentó y la estabilidad disminuyó. En este sentido, la capacidad de la red de fondo blando de contener disturbios se vería disminuida y la estabilidad local de la red de fondo duro también se vería afectada. En síntesis, ambas redes muestran una disminución de su estabilidad ante perturbaciones que simulan los efectos del aumento de la temperatura en Caleta Potter, pero lo hacen en dimensiones distintas de la estabilidad.

La mayoría de los resultados preliminares no publicados se relacionan con la búsqueda, recopilación y tratamiento de los datos biológicos de las especies necesarios para la estimación de la intensidad de interacción de las redes tróficas. De acuerdo a la metodología que se propone utilizar, detallada en la siguiente sección, los datos básicos necesarios son: masa corporal, preferencia de alimentación, y biomasa o densidad para las especies de la red trófica. Para la red trófica del Golfo San Jorge, ya se cuenta con dichos datos que son producto de la tesis doctoral de la Dra. Manuela Funes (Funes 2020) con quien integrantes del grupo de trabajo del proyecto están trabajando en colaboración (Funes et al. en rev.). Para el caso de Caleta Potter, se han recopilado todos los datos de masa corporal y alrededor del 70% de los datos de biomasa/densidad de las especies; en este proceso se han revisado más de 50 trabajos científicos (e.g. Barrera-Oro et al. 2019, Brose et al. 2005, Quartino & Boraso De Zaixso 2008, Quartino et al. 2001, Raymond et al. 2011). Para los casos de Canal Beagle y AMP Namuncurá - Banco Burdwood, el estado de recopilación de datos biológicos es más incipiente. Para el primero, actualmente contamos con el 30% de los datos de biomasa de las especies, obtenidos de Almandoz et al. 2011, Castilla 1985, Diez et al. 2009, Ojeda & Santelices 1984 y Tapella et al. 2002. Para el segundo, se han recopilado datos de tamaño y masa corporal para 196 especies, que corresponden al 50% de las especies de la red trófica; habiendo revisado más de 40 publicaciones científicas e informes de campaña (e.g. Schejter et al. 2016, Delpiani et al. 2020, Riccialdelli & Lovrich 2018, Spinelli et al. 2020). En el caso de que los datos de las especies no estén disponibles para el área de estudio en cuestión se recurrirá a ecosistemas similares considerando latitud, funcionamiento general del sistema y hábitos tróficos de la especie.

4.4. Actividades, cronograma y metodología

Hipótesis relacionada al objetivo A: La complejidad y estructura de las redes tróficas son similares, aunque difieren en el subconjunto de especies clave que determinan la dinámica y estabilidad.

Metodología y actividades: Las diferentes propiedades de complejidad y estructura que se utilizarán para caracterizar la red trófica en las escalas planteadas se describen en la Tabla 1. La complejidad de la red trófica será analizada teniendo en cuenta el número de especies, el número de interacciones totales y la conectividad; la estructura se estudiará considerando todas las demás propiedades descritas en la Tabla 1. La estabilidad será analizada a partir de aquellas propiedades estructurales que tienen implicancia en la misma: conectividad, coherencia trófica, modularidad y motivos tróficos. La relación entre estas propiedades y la estabilidad se describe brevemente en la Tabla 1 y en las referencias allí presentadas. También se aplicará el método de controlabilidad estructural cuyo enfoque permite determinar el rol que desempeñan las especies en la modificación de otras especies y, en última instancia, en el estado de la red trófica. A partir de aquí se identificará el subconjunto de especies clave que determinan la dinámica y estabilidad de la red (Cagua et al. 2019). Para el cálculo de las propiedades de complejidad y estructura se utilizará el paquete 'multiweb' de R creado por integrantes del grupo de trabajo del proyecto (Saravia et al. 2019b).

Resultados esperados: Obtener una descripción detallada de las características de complejidad y estructura para cada una de las redes tróficas, así como determinar el subconjunto de especies clave para comprender el funcionamiento general de los ecosistemas estudiados.

Tabla 1. Definición e implicancia en la estabilidad de las propiedades de complejidad (S, L y C) y estructura (el resto) que se utilizarán para caracterizar las redes tróficas en los niveles: red total, grupos de especies (subredes) y especies.

Propiedad	Abreviatura	Definición e implicancia en estabilidad	Referencia
<i>Nivel: red total</i>			
Número de especies	S	Número de especies de la red trófica. Medida de la riqueza del ecosistema.	May 1973
Número de interacciones	L	Número de interacciones tróficas o presa-depredador de la red. Está relacionada con la complejidad de la red y con los flujos de energía del ecosistema.	Dunne et al. 2002
Conectividad	C	Relación entre la cantidad de interacciones reales e interacciones posibles, $C = L / S^2$. Estimador de la sensibilidad de la red trófica a perturbaciones.	Martinez 1993, Dunne et al. 2002
Distribución de grado	DistGrado	Histograma de la frecuencia de interacciones por especie (grado). Indica el comportamiento de la red trófica ante extinciones de especies.	Dunne et al. 2002, Estrada 2007
Proporción de especies basales, intermedias y tope	B, I, T	Proporción de especies sin presas (base, B), con presas y depredadores (intermedias, I) y sin depredadores (tope, T). Alta proporción de B indica un sistema autotrófico; la proporción de I se relaciona positivamente con la omnivoría; alta proporción de T indica control <i>top-down</i> del sistema.	Briand & Cohen 1987
Nivel trófico medio	NT	Promedio de las posiciones tróficas de las especies de la red. Valores bajos indican transferencia de energía eficiente entre las especies basales y las tope.	Borrelli & Ginzburg 2014
Coherencia trófica	CT	Medida de distancia de las posiciones tróficas de las especies que indica cuánto se desvían de niveles tróficos discretos (1, 2, 3, 4, etc). Redes relativamente más discretas son más estables.	Johnson et al. 2014
Modularidad	Mod	Medida que indica cuán fuerte es la cohesión entre	Krause et al.

		especies de un mismo módulo (subgrupos dentro de la red) con respecto a otros módulos. Altos valores previenen la dispersión de perturbaciones.	2003, Grilli et al. 2016
<i>Nivel: grupo de especies (subred)</i>			
Motivos tróficos	MoTro	Conjunto de 3 especies que interaccionan describiendo: competencia aparente, competencia excluyente, omnivoría y cadena tri-trófica. Su frecuencia relativa con modelos nulos se relaciona con la estabilidad de la red.	Milo et al. 2002, Borrelli et al. 2015
<i>Nivel: especie</i>			
Roles topológicos	RoITop	Rol de las especies en los módulos dependiendo de las interacciones inter- e intra-módulo. Hay 4 roles: conector de red, conector de módulo, concentrador de módulo, especialista de módulo.	Guimerà & Amaral 2005, Kortsch et al. 2015

Hipótesis relacionada al objetivo B: La distribución de las intensidades de las interacciones tróficas para todas las áreas de estudio presenta una mayor parte de interacciones débiles, es decir está sesgada a la izquierda.

Metodología y actividades: Para estimar la intensidad de interacción para cada una de las relaciones presa-depredador de la red trófica se utilizará un enfoque energético basado en la teoría metabólica de la ecología, que utiliza constantes alométricas sobre la relación entre la masa corporal media en depredadores y presas (Brown et al. 2004, Berlow et al. 2009). La ventaja de utilizar un enfoque energético para estimar la intensidad de interacción es que dicha intensidad representa el flujo de energía entre las especies del ecosistema.

En resumidas palabras, para calcular el flujo de energía en una red trófica, se comienza desde los depredadores tope y se evalúa cuánta energía necesita cada depredador. Dada la conservación en el flujo de materia y energía (Moore & de Ruiter 2012), esta energía debe proceder de las presas de las que dicho depredador se alimenta. Como tal, la demanda de energía de los organismos a un nivel trófico dado debe acercarse a la ingesta energética de ese nivel. Sin embargo, debido a las eficiencias ecológicas, para satisfacer sus demandas de energía las especies necesitan consumir más energía de sus presas. Así, la energía consumida de las presas es considerada como la pérdida de energía de las mismas. A esta pérdida por consumo se le suma la demanda de energía de las propias presas, que representa la pérdida de energía conjunta que a su vez necesita ser compensada por las presas de esas presas; y así sucesivamente para todas las relaciones presa-depredador de la red trófica (Jochum et al. 2021). En definitiva, los depredadores tope solo tienen pérdidas metabólicas (X), mientras que las presas tienen tanto pérdidas metabólicas y por consumo (L). La ecuación para el cálculo de la intensidad de interacción o flujo de energía a utilizar es la siguiente (Barnes et al. 2014):

$$F = \frac{1}{e_a} * (x + L)$$

donde F es el flujo de salida desde una especie presa, e_a es la eficiencia de asimilación, X es la demanda metabólica y L es la pérdida por consumo de un depredador. Para esto se requiere de la combinación de los siguientes datos: 1) identidad de la presa y el depredador, 2) masa corporal media de los mismos, 3) demanda metabólica de las especies, 4) preferencias de alimentación de los depredadores, y 5) eficiencia trófica (Jochum et al. 2021). Estos datos serán obtenidos a partir de búsqueda bibliográfica y consulta con expertos para cada una de las redes tróficas de las áreas de estudio. Se hará uso del paquete 'fluxweb' de R para la estimación de las intensidades de interacción (Gauzens et al. 2019).

Resultados esperados: En el transcurso del primer año del proyecto se espera recolectar los datos de las especies necesarios para realizar la estimación de las interacciones tróficas.

Registro de datos: En este proceso se consolidará el almacenamiento y la gestión de bases de datos relativos a las características de las especies consideradas, así como su taxonomía.

Hipótesis relacionada al objetivo C: No existe relación entre complejidad-estructura y estabilidad en las redes tróficas.

Metodología y actividades: Utilizando las intensidades de las interacciones estimadas en el objetivo específico anterior, se analizará la estabilidad de la red trófica mediante el cálculo del máximo autovalor del Jacobiano de la matriz de la comunidad que representa la capacidad del sistema de volver a su punto de equilibrio o no ante una perturbación (James et al. 2015). El máximo autovalor es el promedio de la parte real máxima de los autovalores de la matriz randomizada manteniendo la estructura de la red, que indica la respuesta del sistema a perturbaciones locales. Valores bajos negativos sugieren redes relativamente más estables (Grilli et al. 2016). A partir de las redes tróficas cuantitativas se re-calcularán las siguientes propiedades de complejidad y estructura: conectividad, nivel trófico medio y modularidad; siguiendo la metodología de Bersier et al. (2002). Finalmente se analizará si existe una relación entre la complejidad y estructura de las redes tróficas y su estabilidad estimada mediante el ajuste por máxima verosimilitud de modelos de regresión simple (tanto lineal como no-lineal) y una selección de modelos basada en el índice de información de Akaike (Burnham & Anderson 2004).

Resultados esperados: Analizar la complejidad, estructura y estabilidad de las redes tróficas teniendo en cuenta la intensidad de interacción. Estos resultados servirán de base y se compararán con los del objetivo siguiente.

Hipótesis relacionada al objetivo D: Los efectos de cambios ambientales antropogénicos alterarán la distribución de las intensidades de interacción en la red trófica y disminuirán su estabilidad.

Metodología y actividades: Para modelar los efectos de cambios ambientales antropogénicos planteados se realizarán simulaciones computacionales considerando la red trófica cuantitativa de cada área de estudio. El efecto del aumento de la temperatura se modelará mediante incrementos en la demanda metabólica de las especies (Brown et al. 2004), simulando escenarios de incrementos de 10, 25 y 50% de la demanda para las especies más vulnerables. Con el objetivo de simular escenarios de extinciones e invasiones de especies se crearán, por un lado, listas de especies más vulnerables al aumento de la temperatura del agua las cuales serán extinguidas de la red trófica y, por el otro, listas de especies potencialmente invasoras o recientemente reportadas como invasoras que serán añadidas a la red. Esto se llevará a cabo de manera particular para cada área de estudio, mediante la búsqueda bibliográfica (e.g. Fernández et al. 2010, Yorio et al. 2020, Lager et al. 2021) y consulta con expertos, con el objetivo de que las simulaciones representen los cambios más factibles para cada ecosistema. En el contexto de las simulaciones de extinción se analizarán las extinciones secundarias, es decir aquellas originadas como consecuencia de extinguir una especie, a partir de umbrales mínimos de energía necesarios para la supervivencia de la especie. Luego de cada extinción y hasta haber extinguido el 50% de las especies de la red se calcularán las propiedades de complejidad, estructura y estabilidad mencionadas en el obj. C, siguiendo la metodología de Cordone et al. (2018). En el contexto de las simulaciones de invasión se recolectará información sobre los hábitos tróficos (presas y depredadores) y características biológicas (masa corporal y biomasa o densidad) de la especie invasora para construir redes tróficas “invadidas”. Finalmente, se modelarán escenarios de disminución en la biomasa de especies de interés pesquero en las redes tróficas del Golfo San Jorge (GSJ) y el AMP Namuncurá - Banco Burdwood (Funes et al. 2009, Falabella et al. 2013, Dans et al. 2020). Mediante búsqueda bibliográfica, consulta con expertos y conocimiento de los integrantes del proyecto (principalmente del Dr. Luciano Chiaverano) se confeccionarán listas de especies de interés pesquero para los mencionados ecosistemas (por ejemplo, *Merluccius hubbsi* y *Pleoticus muelleri* para el GSJ). Las biomásas de dichas especies serán disminuidas de acuerdo a la información de las fichas de campañas de los

diversos programas de pesquerías del INIDEP para el GSJ y las zonas aledañas al AMP (e.g. Cordo 2005, Moriondo Danovaro & de la Garza 2019). A partir de aquí se construirán redes tróficas que consideren el efecto de la pesca.

Luego de cada escenario de simulación se calcularán las propiedades de complejidad, estructura y estabilidad de la red trófica y se compararán los resultados con las del obj. C.

Resultados esperados: Caracterizar los principales efectos en la complejidad, estructura y estabilidad de la red trófica como consecuencia de simulación de escenarios de cambios ambientales antropogénicos para cada área de estudio.

Hipótesis relacionada al objetivo E: Las redes tróficas de latitudes menores son más complejas y estables que las de latitudes mayores.

Metodología y actividades: Se tomarán variables ambientales para caracterizar cada región tales como: temperatura media de la superficie, varianza anual de la temperatura, profundidad, varianza en la profundidad, cercanía a zonas de surgimiento (upwelling) (Kortsch et al. 2018). Luego se compararán las redes tróficas usando las propiedades mencionadas en el obj. C, mediante técnicas multivariadas como análisis de la redundancia (RDA) (Legendre & Legendre 2012). Se estudiará la existencia de gradientes ecogeográficos como el gradiente latitudinal y su influencia en las propiedades de la red trófica. También se investigará la posible relación de la ley de Bergmann, que plantea que a mayores temperaturas las especies tienen tamaños corporales mayores, con la existencia de cambios en la relación biomasa corporal del depredador y la presa (Baiser et al. 2019).

Resultados esperados: Describir la variación de las características de complejidad, estructura y estabilidad de las redes tróficas cuantitativas en los ecosistemas marinos del gradiente latitudinal Atlántico Sudoccidental - Antártida.

Hipótesis relacionada al objetivo F: La conexión entre los posibles cambios de régimen es relativamente mayor entre los ecosistemas AMP Namuncurá - Banco Burdwood y Canal Beagle como consecuencia de la corriente dominante oeste-este.

Metodología y actividades: Para evaluar la posible integración regional entre los cambios de régimen de las diferentes áreas de estudio del gradiente latitudinal, se utilizará una aproximación basada en diagramas de bucles causales (Rocha et al. 2018), que se basa en información cualitativa pero solo puede proporcionar la posibilidad de existencia de estos acoples. Las propiedades reales de estabilidad y los efectos netos a lo largo de las conexiones causales dependen fundamentalmente de la fuerza relativa de los diferentes mecanismos implicados (Scheffer & van Nes 2018). Una posible aproximación que tiene en cuenta cuantitativamente la fuerza de acople entre cambios de régimen consiste en simplificar cada sistema a las relaciones utilizando el subconjunto de especies clave (obj. A, controlabilidad estructural). De esta manera se cuantificarán las retroalimentaciones múltiples entre los componentes de cada ecosistema y los factores estresantes (van de Leemput et al. 2015) más las conexiones entre ellos teniendo en cuenta la distancia y la posibilidad de la dispersión entre cada uno de ellos. Reduciendo la complejidad de cada red trófica y cuantificando las conexiones globales por factores estresantes comunes y locales por dispersión de las perturbaciones debidas a los cambios de régimen locales, se integrará la dinámica de las áreas de estudio.

Resultados esperados: Comparar las posibilidades de cambios de régimen para cada área de estudio y describir de qué manera éstos podrían conectarse entre los ecosistemas del gradiente latitudinal.

4.5. Resultados esperados

A partir de los principales resultados del proyecto se espera generar conocimiento de base sobre la complejidad, estructura y estabilidad de las redes tróficas de diversas áreas geográficas prioritarias del Mar Argentino y la Península Antártica. En este sentido, se espera evidenciar la importancia de considerar la complejidad del entramado de interacciones tróficas en las comunidades marinas para capturar los fenómenos emergentes de los ecosistemas. De esta manera, es decir a través de una perspectiva de sistemas complejos, los objetivos específicos del proyecto pretenden sumar conocimiento para comprender mejor los efectos de los principales cambios ambientales antropogénicos que están ocurriendo actualmente en las áreas de estudio del gradiente latitudinal elegido.

4.6. Difusión de los resultados

Se estima que el conocimiento generado mediante el cumplimiento de los objetivos específicos del proyecto será valorado por investigadores nacionales e internacionales no solo especialistas en la temática (ecología trófica y modelado ecológico), sino también por aquellos interesados en los efectos de los cambios ambientales antropogénicos a nivel ecosistémico. En este sentido, el proyecto será reconocido además por ser uno de los pioneros en estudiar la influencia del gradiente latitudinal Atlántico Sudoccidental - Antártida en las interacciones tróficas de las comunidades marinas impactadas por cambios de diverso origen.

Se prevé la publicación de artículos en revistas de alto impacto y amplia difusión, y la presentación de los resultados en reuniones nacionales e internacionales. Se espera continuar con la formación de recursos humanos, mediante el desarrollo de distintos trabajos de tesis doctorales y posdoctorales en temáticas incluidas en este proyecto.

4.7. Protección de los resultados

Todos los desarrollos computacionales se realizarán en lenguajes de programación de acceso abierto y gratuito. El software resultante se publicará en repositorios digitales abiertos para asegurar la reproducibilidad de los resultados y la disponibilidad del mismo para otros investigadores.

4.8. Actividades de transferencia

-

5. Conformación del grupo de investigación

El Grupo de Investigación presenta 5 investigadores y 3 estudiantes de doctorado y pos-doctorado (una de ellas extranjera). Entre los investigadores están: Tomás I. Marina (CADIC-CONICET), Leonardo A. Saravia (CADIC-CONICET), Luciano Chiaverano (INIDEP-CONICET), Santiago R. Doyle (UNGS, UNLu) y Fernando R. Momo (UNGS). Las estudiantes doctorales son: Georgina Cordone (CESIMAR-CONICET) y Iara D. Rodriguez (UNGS, CONICET). La estudiante posdoctoral extranjera es: Susanne Kortsch (Universidad de Helsinki, Finlandia).

La mayoría de los integrantes del proyecto forman parte del grupo de trabajo de sistemas complejos del Programa Interinstituto Interdisciplinario de Sistemas Complejos (PIISCO) de la Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS), liderado por los Dres. Leonardo A. Saravia y Santiago R. Doyle. En este contexto se desarrollaron las tesis doctorales de Tomás I. Marina,

Georgina Cordone e Iara D. Rodríguez, bajo la dirección de los Dres. Fernando R. Momo y Leonardo A. Saravia, enfocadas en estudiar las redes tróficas de Caleta Potter y Canal Beagle. El Dr. Saravia está colaborando activamente con el Grupo de Trabajo Golfo San Jorge en la primera publicación sobre la red trófica del Golfo San Jorge y el efecto de la pesca. El estudio de la ecología trófica del AMP Namuncurá - Banco Burdwood, está siendo liderada por el Dr. Tomás I. Marina. De esta manera, el grupo de trabajo se compone de integrantes que son líderes en el modelado trófico de redes complejas en cada una de las áreas de estudio propuestas.

La asociación con el Dr. Chiaverano se fundamenta en su experiencia en modelos tróficos y los efectos de las pesquerías en diversos grupos funcionales (zooplankton y peces), actividad antropogénica que se propone estudiar en este proyecto. Finalmente, la Dra. Susanne Kortsch es una de las líderes en el estudio de las redes tróficas marinas de altas latitudes en el Hemisferio Norte y ha sido pionera en analizar la dinámica espacial y temporal en redes tróficas cuantitativas.

Las interacciones más significativas de integrantes del grupo de trabajo que contribuyen a la ejecución del proyecto son las establecidas con investigadores del: 1) Grupo de Trabajo Golfo San Jorge (particularmente con Dra. Manuela Funes y Dr. David E. Galván); 2) Grupo de Trabajo Banco Burdwood (diversos investigadores/as); 3) Centro Austral de Investigaciones Científicas, CADIC-CONICET (particularmente con Dra. Luciana Riccialdelli); 4) Instituto Antártico Argentino (ver co-autores en Marina et al. 2018); y 5) Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero, INIDEP (diversos investigadores/as).

Los antecedentes de cooperación entre los participantes del proyecto se han plasmado en varias publicaciones referidas al estudio de la complejidad, estructura y estabilidad de las redes tróficas de regiones subantárticas y antárticas: Marina et al. 2018a, b, Cordone et al. 2018, 2020, Saravia et al. 2019a, b, Momo et al. 2020, Rodríguez et al. en rev., Saravia et al. en rev. En particular, los Dres. Marina, Saravia y la Dra. Kortsch están trabajando actualmente en la escritura de un manuscrito sobre la caracterización de la red trófica cuantitativa del Mar de Weddell (Antártida), que formará parte de un número especial acerca de dicha región (https://os.copernicus.org/articles/special_issue1161.html).

El presente proyecto pretende ser el puntapié inicial para la cooperación con investigadores del INIDEP, en este caso representados por el Dr. Chiaverano, que estén interesados en incorporar el enfoque de redes complejas como marco de investigación para el estudio de los efectos de la pesca en los ecosistemas del Mar Argentino.

6. Viabilidad y factibilidad técnica

Las diferentes instituciones en las que se desempeñan los integrantes del grupo (CADIC-CONICET, CESIMAR-CONICET, UNGS, INIDEP) cuentan con la infraestructura necesaria para el trabajo a realizar, espacio de oficina, conexión a internet y acceso a Biblioteca Electrónica de Ciencia y Tecnología (BECyT) del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Por otro lado, se cuenta con gran parte de la información de base necesaria para construir las redes tróficas de las áreas a estudiar y que comprenden el gradiente latitudinal Atlántico Sudoccidental - Antártida propuesto. En este sentido es importante resaltar los diversos estudios publicados en esta temática por integrantes del grupo para los ecosistemas del Canal Beagle y Caleta Potter (Marina et al. 2018a, Cordone et al. 2018, 2020, Rodríguez et al. en rev., Saravia et al. en rev.). Para el caso del Golfo San Jorge, el co-titular del proyecto, Leonardo A. Saravia, está colaborando activamente en la publicación de la primera descripción acabada y de alta resolución taxonómica de la red trófica de este ecosistema (Funes et al. en rev.). En cuanto al AMP Namuncurá - Banco Burdwood, la base de datos para construir la red trófica está siendo

confeccionada por el investigador Tomás I. Marina como uno de los objetivos de su plan de trabajo de CIC. Los resultados preliminares fueron presentados en el Taller Científico Namuncurá - Banco Burdwood realizado en agosto del 2021.

Debido a la participación de la mayoría de los integrantes en el grupo de trabajo de redes complejas perteneciente al Programa Interinstituto Interdisciplinario de Sistemas Complejos (PIISCO) de la Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) se tendrá acceso al servidor de alta capacidad de procesamiento (48 cores, 512 Gb de RAM, 3 Tb de almacenamiento en disco) que se encuentra instalado en el laboratorio de dicho grupo.

7. Aspectos éticos

-

8. Aspectos de seguridad laboral ambiental

-

9. Autorizaciones correspondientes

-

10. Recursos financieros

De acuerdo con la cantidad de investigadores del CONICET participantes en el presente proyecto (3), el monto máximo de financiamiento total a otorgar será de \$1600000 (un millón seiscientos mil pesos). En la siguiente planilla se muestra el detalle acerca de cómo se planea hacer uso de los recursos financieros:

	Año 1	Año 2	Año 3	TOTAL
GASTOS DE CAPITAL				
Equipamiento	\$320000,00	\$100000,00	\$140000,00	\$560000,00
Subtotal	\$320000,00	\$100000,00	\$140000,00	\$560000,00
GASTOS CORRIENTES				
Bienes de consumo	\$20000,00	-	-	\$20000,00
Gastos de viajes	\$100000,00	\$220000,00	-	\$320000,00
Difusión de resultados	-	\$200000,00	\$240000,00	\$440000,00
Otros gastos	-	-	\$260000,00	\$260000,00
Subtotal	\$120000,00	\$420000,00	\$500000,00	\$1040000,00
TOTAL	\$440000,00	\$520000,00	\$640000,00	\$1600000,00

A través del rubro Equipamiento de Gastos de Capital se pretende adquirir componentes para el armado de un servidor de alta capacidad de procesamiento. De esta manera, se asignará el monto del año 1 para la compra de un procesador Intel Xeon 48 cores, el monto del año 2 para la adquisición de una memoria 32 Gb RAM, y el monto del año 3 para la compra de un disco rígido 10 Tb. Este equipamiento será utilizado para unificar la recopilación y tratamiento de los datos necesarios para cumplimentar los objetivos específicos, principalmente los obj. B-F. El equipamiento será instalado en el Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC-CONICET), donde el titular y co-titular del proyecto tienen su lugar de trabajo. El CADIC cuenta con un Área de Informática propia que asesorará en la parte técnica e instalación del equipamiento adquirido.

En cuanto a los Gastos Corrientes, los correspondientes a los rubros Bienes de consumo y Gastos de viaje del año 1 y 2 serán utilizados para cubrir parcialmente gastos correspondientes a la organización y desarrollo de dos talleres de trabajo que serán realizados en la ciudad de Ushuaia, en el CADIC-CONICET. Se pretende cubrir parcialmente gastos de viaje desde las ciudades de Buenos Aires (UNGS), Mar del Plata (INIDEP) y Puerto Madryn (CESIMAR-CONICET), lugares de trabajo de los integrantes del grupo no radicados en Ushuaia. Detalle de gastos: \$320 mil (Gastos de viajes Año 1 y 2) / 5 (integrantes no CADIC) = \$64 mil / integrante. El CADIC cuenta con alojamiento accesible para este tipo de eventos.

Considerando la participación de la integrante extranjera radicada en la Universidad de Helsinki (Finlandia), el rubro Otros gastos del Año 3 planea cubrir el costo del pasaje a Argentina para la participación de un taller de trabajo integrador en el CADIC.

Mediante los Gastos Corrientes del rubro Difusión de resultados del Año 2 y 3 se pretenden cubrir los costos de cuatro publicaciones en revistas de alto impacto en formato de acceso abierto. Detalle de gastos: \$440 mil (Difusión de resultados Año 1 y 2) / 4 (publicaciones) = \$110 mil / publicación.

11. Dedicación al proyecto

Todos los integrantes del proyecto se han comprometido con un mínimo de dedicación del 50%.

12. Referencias

- Almandoz, G.O., Cefarelli, A.O., Diodato, S., Montoya, N.G., Benavides, H.R., Carignan, M., ... & Ferrario, M.E. (2019). Harmful phytoplankton in the Beagle Channel (South America) as a potential threat to aquaculture activities. *Marine pollution bulletin* 145, 105-117. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.05.026>
- Almandoz, G.O., Hernando, M.P., Ferreyra, G.A., Schloss, I.R., & Ferrario, M.E. (2011). Seasonal phytoplankton dynamics in extreme southern South America (Beagle channel, Argentina). *Journal of Sea Research* 66, 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2011.03.005>
- Ávila-Thieme, M.I., Corcoran, D., Pérez-Matus, A., Wieters, E.A., Navarrete, S.A., Marquet, P.A., & Valdovinos, F.S. (2021). Alteration of coastal productivity and artisanal fisheries interact to affect a marine food web. *Scientific reports* 11, 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81392-4>
- Baiser, B., Gravel, D., Cirtwill, A.R., Dunne, J.A., Fahimipour, A.K., Gilarranz, L. J., ... & Yeakel, J.D. (2019). Ecogeographical rules and the macroecology of food webs. *Global Ecology and Biogeography* 28, 1204-1218. <https://doi.org/10.1111/geb.12925>
- Barrera-Oro, E., Moreira, E., Seefeldt, M.A., Valli Francione, M., & Quartino, M.L. (2019). The importance of macroalgae and associated amphipods in the selective benthic feeding of sister rockcod species *Notothenia rossii* and *N. coriiceps* (Nototheniidae) in West Antarctica. *Polar Biology* 42, 317–334. <https://doi.org/10.1007/s00300-018-2424-0>
- Bascompte, J., Melián, C.J., & Sala, E. (2005). Interaction strength combinations and the overfishing of a marine food web. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, 5443-5447. <https://doi.org/10.1073/pnas.0501562102>
- Barnes, A.D., Jochum, M., Lefcheck, J.S., Eisenhauer, N., Scherber, C., O'Connor, M.I., ... & Brose, U. (2018). Energy flux: the link between multitrophic biodiversity and ecosystem functioning. *Trends in ecology & evolution* 33, 186-197. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.12.007>
- Barnes, A.D., Jochum, M., Mumme, S., Haneda, N.F., Farajallah, A., Widarto, T.H., & Brose, U. (2014). Consequences of tropical land use for multitrophic biodiversity and ecosystem functioning. *Nature Communications* 5, 5351. <https://doi.org/10.1038/ncomms6351>
- Belgrano, A., Scharler, U.M., Dunne, J., & Ulanowicz, R.E. (Eds.) (2005). *Aquatic food webs: an ecosystem approach*. Oxford University Press.
- Belleggia, M., Alves, N.M., Leyton, M.M., Álvarez-Colombo, G., Temperoni, B., Giberto, D., & Bremec, C. (2019). Are hakes truly opportunistic feeders? A case of prey selection by the Argentine hake *Merluccius hubbsi* off southwestern Atlantic. *Fisheries Research* 214, 166-174. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2019.02.008>
- Berlow, E.L., Dunne, J.A., Martinez, N.D., Stark, P.B., Williams, R.J., & Brose, U. (2009). Simple prediction of interaction strengths in complex food webs. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 187-191. <https://doi.org/10.1073/pnas.0806823106>
- Berlow, E.L., Neutel, A.M., Cohen, J.E., de Ruiter, P.C., Ebenman, B.O., Emmerson, M., ... & Petchey, O. (2004). Interaction strengths in food webs: issues and opportunities. *Journal of animal ecology* 73, 585-598. <https://doi.org/10.1111/j.0021-8790.2004.00833.x>
- Bersier, L.F., Banašek-Richter, C., & Cattin, M.F. (2002). Quantitative descriptors of food-web matrices. *Ecology* 83, 2394-2407. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[2394:QDOFWM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[2394:QDOFWM]2.0.CO;2)
- Borrelli, J.J., Allesina, S., Amarasekare, P., Arditi, R., Chase, I., Damuth, J., ... & Ginzburg, L.R. (2015). Selection on stability across ecological scales. *Trends in Ecology & Evolution* 30, 417-425. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.05.001>
- Borrelli, J.J., & Ginzburg, L.R. (2014). Why there are so few trophic levels: Selection against instability explains the pattern. *Food Webs* 1, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2014.11.002>
- Briand, F., & Cohen, J.E. (1987). Environmental correlates of food chain length. *Science*

238, 956-960. <https://doi.org/10.1126/science.3672136>

Brose, U., Cushing, L., Berlow, E.L., Jonsson, T., Banasek-Richter, C., Bersier, L.-F., Blanchard, J.L., Brey, T., Carpenter, S.R., Blandenier, M.-F.C., Cohen, J.E., Dawah, H.A., Dell, T., Edwards, F., Harper-Smith, S., Jacob, U., Knapp, R. A., Ledger, M. E., Memmott, J., ... & Martinez, N.D. (2005). Body sizes of consumers and their resources. *Ecology* 86, 2545–2545. <https://doi.org/10.1890/05-0379>

Brown, J.H., Gillooly, J.F., Allen, A.P., Savage, V.M., & West, G.B. (2004). Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology* 85, 1771-1789. <https://doi.org/10.1890/03-9000>

Bulgin, C.E., Merchant, C.J., & Ferreira, D. (2020). Tendencies, variability and persistence of sea surface temperature anomalies. *Scientific reports* 10, 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64785-9>

Burnham, K.P., & Anderson, D.R. (2004). Multimodel inference: understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological methods & research* 33, 261-304. <https://doi.org/10.1177/0049124104268644>

Byrnes, J.E., Reynolds, P.L., & Stachowicz, J.J. (2007). Invasions and extinctions reshape coastal marine food webs. *PloS one* 2, e295. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000295>

Cagua, E.F., Wootton, K.L., & Stouffer, D.B. (2019). Keystone-ness, centrality, and the structural controllability of ecological networks. *Journal of Ecology* 107, 1779-1790. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13147>

Castilla, J.C. (1985). Food webs and functional aspects of the kelp, *Macrocystis pyrifera*, community in the Beagle Channel, Chile. *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-82275-9_57

Cohen, J.E. (1978). *Food webs and niche space*. Princeton, Princeton University Press.

Chiaverano, L.M., Robinson, K.L., Tam, J., Ruzicka, J.J., Quiñones, J., Aleksa, K.T., ... & Graham, W.M. (2018). Evaluating the role of large jellyfish and forage fishes as energy pathways, and their interplay with fisheries, in the Northern Humboldt Current System. *Progress in Oceanography* 164, 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.04.009>

Cordo, H. (2005). Evaluación del estado del efectivo sur de 41°S de la merluza (*Merluccius hubbsi*) y estimación de la captura biológicamente aceptable correspondiente al año 2005. INIDEP, Mar del Plata, Informe Técnico Interno 37, 29.

Cordone, G., Marina, T.I., Salinas, V., Doyle, S.R., Saravia, L.A., & Momo, F.R. (2018). Effects of macroalgae loss in an Antarctic marine food web: applying extinction thresholds to food web studies. *PeerJ*, 6:e5531. <https://doi.org/10.7717/peerj.5531>

Cordone, G., Salinas, V., Marina, T.I., Doyle, S.R., Pasotti, F., Saravia, L.A., & Momo, F.R. (2020). Green vs brown food web: Effects of habitat type on multidimensional stability proxies for a highly-resolved Antarctic food web. *Food Webs* 25, e00166. <https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2020.e00166>

Cossi, P.F., Ojeda, M., Chiesa, I.L., Rimondino, G.N., Frayse, C., Calcagno, J., & Pérez, A.F. (2021). First evidence of microplastics in the Marine Protected Area Namuncurá at Burdwood Bank, Argentina: a study on *Henricia obesa* and *Odontaster penicillatus* (Echinodermata: Asteroidea). *Polar Biology*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00300-021-02959-5>

Dans, S.L., Cefarelli, A.O., Galván, D.E., Góngora, M.E., Martos, P. & Varisco, M.A. (Eds.). (2020). Programa de Investigación y Monitoreo del Golfo San Jorge. Pampa Azul. Fundación de Historia Natural Félix de Azara. Buenos Aires. <https://www.fundacionazara.org.ar/img/libros/programa-de-investigacion-y-monitoreo-del-golfo-san-jorge-web.pdf>

de Young, B., Barange, M., Beaugrand, G., Harris, R., Perry, R.I., Scheffer, M., & Werner, F. (2008). Regime shifts in marine ecosystems: detection, prediction and management. *Trends in Ecology & Evolution* 23, 402–409. doi:10.1016/j.tree.2008.03.008.

- Delpiani, S.M., Bruno, D.O., Vazquez, D.M., Llompарт, F., Delpiani, G.E., Fernández, D.A., ... & de Astarloa, J.D. (2020). Structure and distribution of fish assemblages at Burdwood Bank, the first Sub-Antarctic Marine Protected Area "Namuncurá" in Argentina (Southwestern Atlantic Ocean). *Polar Biology* 43, 1783-1793. <https://doi.org/10.1007/s00300-020-02744-w>
- Diez, M.J., Romero, M.C., Obenat, S., Albano, M.J., & Tapella, F. (2009). Distribution of Benthic Invertebrates in the Beagle Channel, Argentina. *Anales Del Instituto de La Patagonia* 37, 29-40. <https://doi.org/10.4067/S0718-686X2009000200003>
- Dunne, J.A. (2006). The network structure of food webs. In: M. Pascual & J.A. Dunne (Eds.), *Ecological networks: linking structure to dynamics in food webs* (pp.27-86). New York, Oxford University Press.
- Dunne, J.A., Williams, R.J., & Martinez, N.D. (2002). Network structure and biodiversity loss in food webs: robustness increases with connectance. *Ecology Letters* 5, 558-567. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2002.00354.x>
- Dunne, J.A., Williams, R.J., & Martinez, N.D. (2004). Network structure and robustness of marine food webs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 273, 291-302. <https://doi.org/10.3354/meps273291>
- Eklöf, A., Tang, S., & Allesina, S. (2013). Secondary extinctions in food webs: a Bayesian network approach. *Methods in Ecology and Evolution* 4, 760-770. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12062>
- Eklöf, J. S., Sundblad, G., Erlandsson, M., Donadi, S., Hansen, J.P., Eriksson, B.K., & Bergström, U. (2020). A spatial regime shift from predator to prey dominance in a large coastal ecosystem. *Communications biology* 3, 1-9. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-01180-0>
- Emmerson, M., & Yearsley, J.M. (2004). Weak interactions, omnivory and emergent food-web properties. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 271, 397-405. <https://doi.org/10.1098/rspb.2003.2592>
- Estrada, E. (2007). Food webs robustness to biodiversity loss: The roles of connectance, expansibility and degree distribution. *Journal of Theoretical Biology* 244, 296-307. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2006.08.002>
- Falabella, V., Campagna, C., Caille, G., Krapovickas, S., Moreno, D., Michelson, A., Piola, A., Schejter, L., & Zelaya, D. (2013). Banco Burdwood: Contribuciones para el establecimiento de una línea de base y plan de manejo de la futura Área Marina Protegida. Preliminar report, 51 pp.
- Fernández, D.A., Ciancio, J., Ceballos, S.G., Riva-Rossi, C., & Pascual, M.A. (2010). Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*, Walbaum 1792) in the Beagle Channel, Tierra del Fuego: the onset of an invasion. *Biological Invasions* 12, 2991-2997. <https://doi.org/10.1007/s10530-010-9731-x>
- Fioramonti, N.E., ... & Riccialdelli, L. (2021). Biomagnificación de contaminantes en tramas tróficas del AMP N-BB: el caso del Mercurio. Taller Científico AMP Namuncurá - Banco Burdwood. Agosto 2021.
- Franco, B.C., Palma, E.D., Combes, V., Acha, E.M., & Saraceno, M. (2018). Modeling the offshore export of Subantarctic Shelf Waters from the Patagonian shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 123, 4491-4502. <https://doi.org/10.1029/2018JC013824>
- Funes, M. (2020). Efectos de la pesca de arrastre sobre la estructura trófica del norte del Golfo San Jorge. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Funes, M., Marinao, C., & Galván, D.E. (2019). Does trawl fisheries affect the diet of fishes? A stable isotope analysis approach. *Isotopes in environmental and health studies* 55, 327-343. <https://doi.org/10.1080/10256016.2019.1626381>
- Funes, M., Saravia, L.A., Cordone, G., Iribarne, O. & Galván, D.E. (en rev.). Bottom trawl fishery in Patagonia does not alter the structure but can change the stability of the food web. *Marine Environmental Research*.
- Galván, D.E., Bovcon, N.D., Cochia, P.D., González, R.A., Lattuca, M.E., Ocampo Reinaldo, M., Rincón-Díaz, M.P., Romero, M.A., Vanella, F.A., Venerus, L.A., Svendsen, G.M.

(2021). Changes in the specific and biogeographic composition of coastal fish assemblages in Patagonia, driven by climate change, fishing, and invasion by alien species. In: Helbling, W.E., Narvarte, M., González, R., Villafañe, V.E. (Eds.), *Global Change in Atlantic Coastal Patagonian Ecosystems*. ISBN:978-3-030-86676-1. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-86676-1>

Gauzens, B., Barnes, A., Giling, D.P., Hines, J., Jochum, M., Lefcheck, J.S., Rosenbaum, B., Wang, S., & Brose, U. (2019). fluxweb: An R package to easily estimate energy fluxes in food webs. *Methods in Ecology and Evolution* 10, 270–279. <http://dx.doi.org/10.1111/2041-210x.13109>

Griffith, G.P., Hop, H., Vihtakari, M., Wold, A., Kalhagen, K., & Gabrielsen, G.W. (2019). Ecological resilience of Arctic marine food webs to climate change. *Nature Climate Change* 9, 868–872. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0601-y>

Grilli, J., Rogers, T., & Allesina, S. (2016). Modularity and stability in ecological communities. *Nature Communications* 7, 12031. <https://doi.org/10.1038/ncomms12031>

Guimera, R., & Amaral, L. A. N. (2005). Cartography of complex networks: modules and universal roles. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2005, P02001. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/ab6099>

Gutt, J., Isla, E., Xavier, J.C., Adams, B.J., Ahn, I.Y., Cheng, C.H.C., ... & Wall, D.H. (2021). Antarctic ecosystems in transition—life between stresses and opportunities. *Biological Reviews* 96, 798–821. <https://doi.org/10.1111/brv.12679>

Hagstrom, G.I., & Levin, S.A. (2017). Marine ecosystems as complex adaptive systems: Emergent patterns, critical transitions, and public goods. *Ecosystems* 20, 458–476. doi:10.1007/s10021-017-0114-3.

Hall, S.J., & Raffaelli, D.G. (1997). Food web patterns: what do we really know? In: A.C. Gange & V.K. Brown (Eds.), *Multitrophic interactions in terrestrial systems* (pp.395–417). Oxford, Black-well Science.

Halpern, B.S., Selkoe, K.A., Micheli, F., & Kappel, C.V. (2007). Evaluating and ranking the vulnerability of global marine ecosystems to anthropogenic threats. *Conservation Biology* 21, 1301–1315. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00752.x>

Jacquet, C., Moritz, C., Morissette, L., Legagneux, P., Massol, F., Archambault, P., & Gravel, D. (2016). No complexity–stability relationship in empirical ecosystems. *Nature communications* 7, 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms12573>

Jacob, U., Thierry, A., Brose, U., Arntz, W.E., Berg, S., Brey, T., ... & Dunne, J.A. (2011). The role of body size in complex food webs: A cold case. *Advances in ecological research* 45, 181–223. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386475-8.00005-8>

James, A., Plank, M.J., Rossberg, A.G., Beecham, J., Emmerson, M., & Pitchford, J.W. (2015). Constructing random matrices to represent real ecosystems. *The American Naturalist* 185, 680–692. <https://doi.org/10.1086/680496>

Jochum, M., Barnes, A.D., Brose, U., Gauzens, B., Sünnemann, M., Amyntas, A., & Eisenhauer, N. (2021). For flux's sake: General considerations for energy-flux calculations in ecological communities. *Ecology and evolution* 11, 12948–12969. <https://doi.org/10.1002/ece3.8060>

Johnson, S., Domínguez-García, V., Donetti, L., & Munoz, M.A. (2014). Trophic coherence determines food-web stability. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 17923–17928. <https://doi.org/10.1073/pnas.1409077111>

Kortsch, S., Frelat, R., Pecuchet, L., Olivier, P., Putnis, I., Bonsdorff, E., ... & Nordström, M.C. (2021). Disentangling temporal food web dynamics facilitates understanding of ecosystem functioning. *Journal of Animal Ecology* 90, 1205–1216. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13447>

Kortsch, S., Primicerio, R., Aschan, M., Lind, S., Dolgov, A.V., & Planque, B. (2019). Food-web structure varies along environmental gradients in a high-latitude marine ecosystem. *Ecography* 42, 295–308. <https://doi.org/10.1111/ecog.03443>

Kortsch, S., Primicerio, R., Fossheim, M., Dolgov, A.V., & Aschan, M. (2015). Climate

change alters the structure of arctic marine food webs due to poleward shifts of boreal generalists. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 282. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1546>

Krause, A.E., Frank, K.A., Mason, D.M., Ulanowicz, R.E., & Taylor, W.W. (2003). Compartments revealed in food-web structure. *Nature* 426, 282-285. <https://doi.org/10.1038/nature02115>

Lagger, C., Neder, C., Merlo, P., Servetto, N., Jerosch, K., & Sahade, R. (2021). Tidewater glacier retreat in Antarctica: The table is set for fast-growing opportunistic species, is it?. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 260, 107447. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107447>

Landi, P., Minoarivelo, H.O., Brännström, Å., Hui, C., & Dieckmann, U. (2018). Complexity and stability of ecological networks: a review of the theory. *Popul. Ecol.* <https://doi.org/10.1007/s10144-018-0628-3>

Legendre, P., & Legendre, L. (2012). *Numerical Ecology*. 3rd ed. Amsterdam, Elsevier.

López-López, L., Genner, M. J., Tarling, G.A., Saunders, R.A., & O’Gorman, E.J. (2021). Ecological networks in the Scotia Sea: Structural changes across latitude and depth. *Ecosystems* 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00665-1>

Marina, T.I., Salinas, V., Cordone, G., Campana, G., Moreira, E., Deregibus, D., ... Saravia, L.A. & Momo, F.R. (2018a). The food web of Potter Cove (Antarctica): complexity, structure and function. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 200, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.10.015>

Marina, T.I., Saravia, L.A., Cordone, G., Salinas, V., Doyle, S.R., & Momo, F.R. (2018). Architecture of marine food webs: To be or not be a ‘small-world’. *PLoS One* 13, e0198217. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198217>

Marina, T.I., Schloss, I.R. & Riccialdelli, L. (2021). La red trófica del AMP: base de datos y resultados preliminares. Taller Científico AMP Namuncurá - Banco Burdwood. Agosto 2021.

Martinez, N.D. (1993). Effects of resolution on food web structure. *Oikos* 66, 403–412. <https://doi.org/10.2307/3544934>

Matano, R.P., Palma, E.D., & Piola, A.R. (2010). The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the Southwestern Atlantic Shelf circulation. *Ocean Science* 6, 983-995. <https://doi.org/10.5194/os-6-983-2010>, 2010.

May, R.M. (1973). *Complexity and stability in model ecosystems*. Princeton Univ. Press, Princeton.

McCarthy, A.H., Peck, L.S., Hughes, K.A., & Aldridge, D.C. (2019). Antarctica: the final frontier for marine biological invasions. *Global Change Biology* 25, 2221-2241. <https://doi.org/10.1111/gcb.14600>

McCormack, S.A., Melbourne-Thomas, J., Trebilco, R., Blanchard, J.L., & Constable, A. (2020). Alternative energy pathways in Southern Ocean food webs: Insights from a balanced model of Prydz Bay, Antarctica. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 174, 104613. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.07.001>

Meredith, M.P., & King, J.C. (2005). Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century. *Geophysical Research Letters* 32, . <https://doi.org/10.1029/2005GL024042>

Milo, R., Shen-Orr, S., Itzkovitz, S., Kashtan, N., Chklovskii, D., & Alon, U. (2002). Network motifs: simple building blocks of complex networks. *Science* 298, 824-827. <https://doi.org/10.1126/science.298.5594.824>

Momo, F.R., Cordone, G., Marina, T.I., Salinas, V., Campana, G., Valli, M., & Saravia, L.A. (2020). Seaweeds in the Antarctic marine coastal food web. In: I. Gómez & P. Huovinen (Eds.) *Antarctic Seaweeds*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39448-6_15

Moore, J.C., & de Ruiter, P.C. (2012). *Energetic food webs: an analysis of real and model ecosystems*. Oxford, Oxford University Press.

Moriondo Danovaro, J.P. & de la Garza, J. (2019). Pesquería de langostino (*Pleoticus*

muelleri). Resumen de la información biológica-pesquera reportada por los observadores a bordo en aguas de jurisdicción nacional. INIDEP, Mar del Plata, Informe Técnico Interno 9, 19.

Neutel, A.M., Heesterbeek, J.A., van de Koppel, J., Hoenderboom, G., Vos, A., Kaldeway, C., ... & de Ruiter, P.C. (2007). Reconciling complexity with stability in naturally assembling food webs. *Nature* 449, 599-602. <https://doi.org/10.1038/nature06154>

Nilsson, K.A., & McCann, K.S. (2016). Interaction strength revisited—clarifying the role of energy flux for food web stability. *Theoretical Ecology* 9, 59-71. <https://doi.org/10.1007/s12080-015-0282-8>

Olivier, P., & Planque, B. (2017). Complexity and structural properties of food webs in the Barents Sea. *Oikos* 126, 1339-1346. <https://doi.org/10.1111/oik.04138>

Ortiz, M., Hermosillo-Núñez, B., González, J., Rodríguez-Zaragoza, F., Gómez, I., & Jordán, F. (2017). Quantifying keystone species complexes: Ecosystem-based conservation management in the King George Island (Antarctic Peninsula). *Ecological Indicators* 81, 453-460. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.016>

Pasotti, F., Saravia, L.A., De Troch, M., Tarantelli, M.S., Sahade, R., & Vanreusel, A. (2015). Benthic trophic interactions in an Antarctic shallow water ecosystem affected by recent glacier retreat. *PloS one* 10, e0141742. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141742>

Ojeda, F.P., & Santelices, B. (1984). Invertebrate communities of the kelp *Macrocystis pyrifera* from southern Chile. *Marine Ecology Progress Series* 16, 65–73.

Pérez-Matus, A., Ospina-alvarez, A., Camus, P.A., Carrasco, S.A., Fernandez, M., Gelcich, S., Godoy, N., Ojeda, F.P., Pardo, L.M., Rozbaczylo, N., Subida, M.D., Thiel, M., Wieters, E.A., & Navarrete, S.A. (2017). Temperate rocky subtidal reef community reveals human impacts across the entire food web. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 567, 1–16. <https://doi.org/10.3354/meps12057>

Pimm, S.L. (1980). Properties of food webs. *Ecology* 61, 219-225.

Quartino, M.L., & Boraso De Zaixso, A.L. (2008). Summer macroalgal biomass in Potter Cove, South Shetland Islands, Antarctica: Its production and flux to the ecosystem. *Polar Biology* 31, 281–294. <https://doi.org/10.1007/s00300-007-0356-1>

Quartino, M.L., Klöser, H., Schloss, I.R., & Wiencke, C. (2001). Biomass and associations of benthic marine macroalgae from the inner Potter Cove (King George Island, Antarctica) related to depth and substrate. *Polar Biology* 24, 349–355. <https://doi.org/10.1007/s0030000000218>

Raymond, B., Marshall, M., Nevitt, G., Gillies, C.L., van den Hoff, J., Stark, J.S., Losekoot, M., Woehler, E.J., & Constable, A.J. (2011). A Southern Ocean dietary database. *Ecology* 92, 1188. <https://doi.org/10.1890/10-1907.1>

Reuman, D.C. & Cohen, J.E. (2005). Estimating relative energy fluxes using the food web, species abundance, and body size. *Advances in Ecological Research* 36, 137-182.

Riccialdelli, L., Becker, Y.A., Fioramonti, N.E., Torres, M., Bruno, D.O., Rey, A.R., & Fernández, D.A. (2020). Trophic structure of southern marine ecosystems: a comparative isotopic analysis from the Beagle Channel to the oceanic Burdwood Bank area under a wasp-waist assumption. *Marine Ecology Progress Series* 655, 1-27. <https://doi.org/10.3354/meps13524>

Riccialdelli, L., & Lovrich, G.A. (comp). (2018). Informe de Campaña AMP Namuncurá - Banco Burdwood: Ingenieros Ecosistémicos. BOPDAGO2017. CONICET, AMPN-BB. 20 Ago – 3 Sept.

Riccialdelli, L., Newsome, S.D., Fogel, M.L., & Fernández, D.A. (2017). Trophic interactions and food web structure of a subantarctic marine food web in the Beagle Channel: Bahía Lapataia, Argentina. *Polar Biology* 40, 807-821. <https://doi.org/10.1007/s00300-016-2007-x>

Rocha, J.C., Peterson, G., Bodin, Ö. & Levin, S. (2018). Cascading regime shifts within and across scales. *Science* 362, 1379-1383. <https://doi.org/10.1126/science.aat7850>

- Rodriguez, I.D., Marina, T.I., Schloss, I.R. & Saravia, L.A. (en rev). Marine food webs are more complex but less stable in sub-Antarctic (Beagle Channel, Argentina) than in Antarctic (Potter Cove, Antarctic Peninsula) regions. *Marine Environmental Research*.
- Rossi, L., Caputi, S.S., Calizza, E., Careddu, G., Oliverio, M., Schiaparelli, S., & Costantini, M.L. (2019). Antarctic food web architecture under varying dynamics of sea ice cover. *Scientific reports* 9, 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48245-7>
- Sahade, R., Lager, C., Torre, L., Momo, F., Monien, P., Schloss, I., ... & Abele, D. (2015). Climate change and glacier retreat drive shifts in an Antarctic benthic ecosystem. *Science Advances* 1, e1500050. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500050>
- Saravia, L.A., Marina, T.I., Kristensen, N., De Troch, M., & Momo, F.R. (en rev). Ecological network assembly: how the regional metaweb influences local food webs. *Journal of Animal Ecology*.
- Saravia, L.A., Marina, T.I., Rodriguez, I.D., Salinas, V., Doyle, S.R., & Momo, F.R. (2019a) ¿Qué factores determinan la estructura de las redes tróficas marinas antárticas? XVIII Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar, Buenos Aires.
- Saravia, L.A. Kortsch, S., Marina, T.I., & Rodriguez, I.D. (2019b). Multiweb: Ecological Analysis Including Multiplex Networks. (R Package version 0.2.9.9).
- Sánchez F., Marí N., Milessi A.C., Roux A., Viñas M.D., & Gorini F. (2008) Caracterización ecológica del Golfo San Jorge (Argentina) mediante modelación ecotrófica multiespecífica. Mar del Plata, Argentina: INIDEP.
- Scheffer, M., & van Nes, E.H. (2018). Seeing a global web of connected systems. *Science* 362:1357–1357. <https://doi.org/10.1126/science.aav8478>
- Schejter, L., Rimondino, C., Chiesa, I., Díaz de Astarloa, J.M., Doti, B., Elías, R., Escolar, M., Genzano, G., López-Gappa, J., Tatián, M., Zelaya, D.G., Cristobo, J., Pérez, C.D., Cordeiro, R.T., & Bremec, C.S. (2016). Namuncurá Marine Protected Area: an oceanic hot spot of benthic biodiversity at Burdwood Bank, Argentina. *Polar Biology* 39, 2373-2386. <https://doi.org/10.1007/s00300-016-1913-2>
- Shurin, J.B., Clasen, J.L., Greig, H.S., Kratina, P., & Thompson, P.L. (2012). Warming shifts top-down and bottom-up control of pond food web structure and function. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 367, 3008-3017. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0243>
- Spinelli, M.L., Malits, A., García Alonso, V.A., Martín, J., & Capitanio, F.L. (2020). Spatial gradients of spring zooplankton assemblages at the open ocean sub-Antarctic Namuncurá Marine Protected Area/Burdwood Bank, SW Atlantic Ocean. *Journal of Marine Systems* 210, 103398. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103398>
- St-Onge, G. & Ferreyra, G.A. (2018). Introduction to the special issue on the Gulf of San Jorge (Patagonia, Argentina). *Oceanography* 31, 14-15. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.406>.
- Stouffer, D.B., & Bascompte, J. (2011). Compartmentalization increases food-web persistence. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, 3648-3652. <https://doi.org/10.1073/pnas.1014353108>
- Tamini, L. (2021). Interacciones entre aves marinas y la flota congeladora austral. Taller Científico AMP Namuncurá - Banco Burdwood. Agosto 2021.
- Tapella, F., Romero, M.C., Lovrich, G.A., & Chizzini, A. (2002). Life history of the galatheid crab *Munida subrugosa* in subantarctic waters of the Beagle Channel, Argentina. In: *Crabs in Cold Water Regions: Biology, Management, and Economics* (pp. 115–134). <https://doi.org/10.4027/ccwrme.2002.11>
- Tomczak, M.T., Müller-Karulis, B., Blenckner, T., ... & Humborg, C. (2021). Reference state, structure, regime shifts, and regulatory drivers in a coastal sea over the last century: The Central Baltic Sea case. *Limnology and Oceanography*. <https://doi.org/10.1002/lno.11975>

- van Altena, C., Hemerik, L., & de Ruiter, P.C. (2016). Food web stability and weighted connectance: the complexity-stability debate revisited. *Theoretical Ecology* 9, 49-58. <https://doi.org/10.1007/s12080-015-0291-7>
- van de Leemput, I.A., van Nes, E.H., & Scheffer, M. (2015). Resilience of alternative states in spatially extended ecosystems. *PloS one* 10, e0116859. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116859>
- Yletyinen, J., Bodin, Ö., Weigel, B., Nordström, M.C., Bonsdorff, E., & Blenckner, T. (2016). Regime shifts in marine communities: a complex systems perspective on food web dynamics. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 283, 20152569. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.2569>
- Yorio, P.M., Suárez, N.M., Kasinsky Aguilera, L.T., Pollicelli, M., Ibarra, C., & Gatto, A.J. (2020). The introduced green crab (*Carcinus maenas*) as a novel food resource for the opportunistic kelp gull (*Larus dominicanus*) in Argentine Patagonia. *Aquatic Invasions* 15, 140-159. <https://doi.org/10.3391/ai.2020.15.1.10>