

## DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA

---

Evaluado y acreditado por la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU).  
*Resolución N° 1178/11. Calificación "B".*

---

*Estructura, dinámica y estabilidad de redes tróficas marinas antárticas: estudio  
mediante modelos matemáticos*

---

Trabajo de tesis para optar por el título de Doctor en Ciencia y Tecnología de la Universidad  
Nacional de General Sarmiento

Autor: **Tomás Ignacio Marina**

Director: Fernando R. Momo  
Directora: Irene R. Schloss

Fecha: marzo 2020

## DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA

Evaluado y acreditado por la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU).  
*Resolución N° 1178/11. Calificación "B".*

### FORMULARIO "E" TESIS DE POSGRADO

Niveles de acceso al documento autorizados por el autor

**El autor de la tesis puede elegir entre las siguientes posibilidades para autorizar a la UNGS a difundir el contenido de la tesis: a)**

- a) *Liberar el contenido de la tesis para acceso público.*
  - b) *Liberar el contenido de la tesis solamente a la comunidad universitaria de la UNGS:*
  - c) *Retener el contenido de la tesis por motivos de patentes, publicación y/o derechos de autor por un lapso de cinco años.*
- a. Título completo del trabajo de Tesis: Estructura, dinámica y estabilidad de redes tróficas marinas antárticas: estudio mediante modelos matemáticos.
  - b. Presentado por: Marina, Tomás Ignacio.
  - c. E-mail del autor: tomasimarina@gmail.com
  - d. Estudiante del Posgrado: Doctorado en Ciencia y Tecnología.
  - e. Institución o Instituciones que dictaron el Posgrado: Universidad Nacional de General Sarmiento.
  - f. Para recibir el título de:
    - a) Grado académico que se obtiene: Doctor.
    - b) Nombre del grado académico: Doctor en Ciencia y Tecnología.
  - g. Fecha de la defensa:    /    /
  - h. Directores de la Tesis: Momo, Fernando R. y Schloss, Irene R.
  - i. Tutor de la Tesis: Saravia, Leonardo A.
  - j. Colaboradores con el trabajo de Tesis:
  - k. Descripción física del trabajo de Tesis: 147 páginas (no incluye formulario E), 41 figuras, 11 tablas.
  - l. Alcance geográfico y/o temporal de la Tesis: Antártida.
  - m. Temas tratados en la Tesis: redes tróficas, estructura, dinámica, estabilidad, Antártida.

## DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA

Evaluado y acreditado por la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU).  
*Resolución N° 1178/11. Calificación "B".*

n. Resumen en español:

Las redes tróficas son modelos que representan las interacciones presa-depredador que ocurren en un ecosistema. El estudio de su estructura, dinámica y estabilidad utilizando herramientas matemáticas surge como una perspectiva de investigación precisa para comprender las respuestas de las comunidades al cambio climático en la Península Antártica. En este estudio se aplicaron modelos matemáticos estáticos y dinámicos con el objetivo de estudiar las propiedades de las redes tróficas marinas antárticas en un contexto de cambio climático. Se usaron herramientas de la teoría de grafos (modelos estáticos) y sistemas de ecuaciones diferenciales (modelos dinámicos). Se tomó como caso de estudio Caleta Potter (Islas Shetland del Sur, Antártida), un fiordo antártico sometido al impacto del derretimiento del Glaciar Fourcade. En la sección I de la presente investigación se utiliza la teoría de grafos para caracterizar la red trófica del ecosistema de Caleta Potter, haciendo énfasis en las propiedades de complejidad, estructura y funcionamiento de la red. En la sección II se aplicaron sistemas de ecuaciones diferenciales para evaluar uno de los principales efectos del cambio climático, el derretimiento glaciar, en los niveles tróficos inferiores de la red trófica de Caleta Potter. Se representó matemáticamente la variación de salinidad como un factor de mortalidad para las poblaciones de fitoplancton. En conclusión, se demostró que la utilización de diferentes modelos matemáticos complementarios es una estrategia precisa para comprender cómo las significativas variaciones ambientales pueden impactar en la estructura, dinámica y estabilidad de las redes tróficas marinas antárticas.

o. Resumen en portugués:

Redes tróficas são modelos que representam interações predadoras de presas que ocorrem em um ecossistema. O estudo de sua estrutura, dinâmica e estabilidade usando ferramentas matemáticas surge como uma perspectiva de pesquisa precisa para entender as respostas das comunidades às mudanças climáticas na Península Antártica. Neste estudo, modelos matemáticos estáticos e dinâmicos foram aplicados para estudar as propriedades das redes tróficas marinhas da Antártica em um contexto de mudanças climáticas. Foram utilizadas ferramentas da teoria dos grafos (modelos estáticos) e sistemas de equações diferenciais (modelos dinâmicos). O estudo de caso foi o Caleta Potter (Ilhas Shetland do Sul, Antártica), um fiorde antártico sujeito ao impacto do derretimento da geleira Fourcade. Na seção I da

## DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA

Evaluado y acreditado por la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU).  
*Resolución N° 1178/11. Calificación "B".*

presente investigação, a teoria dos grafos é usada para caracterizar a rede trófica do ecossistema Caleta Potter, enfatizando a complexidade, estrutura e propriedades funcionais da rede. Na seção II, sistemas de equações diferenciais foram aplicados para avaliar um dos principais efeitos das mudanças climáticas, o derretimento glacial, nos níveis tróficos mais baixos da rede trófica de Caleta Potter. A variação da salinidade foi representada matematicamente como fator de mortalidade para populações fitoplanctônicas. Em conclusão, foi demonstrado que o uso de diferentes modelos matemáticos complementares é uma estratégia precisa para entender como variações ambientais significativas podem impactar a estrutura, dinâmica e estabilidade das redes tróficas marinhas da Antártica.

p. Resumen en inglés:

Food webs are models that represent prey-predator interactions that occur in an ecosystem. The study of its structure, dynamics and stability using mathematical tools emerges as a precise research perspective to understand the responses of communities to climate change in the Antarctic Peninsula. In this study, static and dynamic mathematical models were applied in order to study the properties of Antarctic marine food webs in a context of climate change. Graph theory tools (static models) and systems of differential equations (dynamic models) were used. The case study was Potter Cove (South Shetland Islands, Antarctica), an Antarctic fjord subjected to the impact of the melting of the Fourcade glacier. In section I of the present investigation, graph theory was used to characterize the food web of Potter Cove ecosystem, emphasizing on the complexity, structure and functioning properties of the network. In section II, systems of differential equations were applied to evaluate one of the main effects of climate change, glacial melting, at the lower trophic levels of Potter Cove food web. Salinity variation was represented mathematically as a mortality factor for phytoplankton populations. In conclusion, this thesis demonstrates that the use of different complementary mathematical models is a precise strategy to understand how significant environmental variations can impact the structure, dynamics and stability of Antarctic marine food webs.

q. Aprobado por: Aparicio, Juan Pablo; Flombaum, Pedro; Giorgi, Adonis

## **DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA**

---

Evaluado y acreditado por la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU).  
*Resolución N° 1178/11. Calificación "B".*

Firma y aclaración de la firma del Presidente del Jurado:

Firma del autor de la tesis:

## DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA

Evaluado y acreditado por la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU).  
*Resolución N° 1178/11. Calificación "B".*

---

### *Estructura, dinámica y estabilidad de redes tróficas marinas antárticas: estudio mediante modelos matemáticos*

---

#### Publicaciones:

Marina, T.I., Salinas, V., Cordone, G., Campana, G., Moreira, E., Deregibus, D., Torre, L., Sahade, R., Tatián, M., Barrera Oro, E., De Troch, M., Doyle, S., Quartino, M.L., Saravia, L.A., Momo, F.R., 2018. The Food Web of Potter Cove (Antarctica): complexity, structure and function. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 200, 141–151.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.10.01>

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., Hernando, M., Momo, F.R. Glacier melting impact on a coastal plankton community in the Antarctic Peninsula: A modelling approach. *Ecological Modelling* *en revisión*.

#### Aportes Originales:

El presente trabajo de investigación aporta conocimiento sobre diversas redes tróficas marinas antárticas, con énfasis en el ecosistema de Caleta Potter (Islas Shetland del Sur, Antártida). Las propiedades de estructura y funcionamiento de la red de Caleta Potter sugieren fragilidad y posibles efectos en cascada, aunque las múltiples vías de energía podrían disminuir dichos efectos. Las especies que participan en un gran número de interacciones, como el pez

## DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA

Evaluado y acreditado por la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU).  
*Resolución N° 1178/11. Calificación "B".*

demersal *Notothenia corriceps*, el ofiuro *Ophionotus victoriae* y el anfípodo *Gondogeneia antarctica*, podrían considerarse especies clave para la robustez del ecosistema.

Además, se estudió en detalle el patrón estructural conocido como “mundo pequeño”, que se asocia a redes en las cuales existen distancias mínimas cortas entre sus nodos y altos coeficientes de compartimentación. En este caso el trabajo se llevó a cabo teniendo en cuenta redes tróficas marinas de diversas latitudes, no solo redes antárticas. Se concluye que el fenómeno de mundo pequeño no es frecuente ni se maximiza en las redes tróficas marinas; por lo tanto, probablemente no sea un modelo eficaz para estudiar la robustez, la estabilidad y la viabilidad de los ecosistemas marinos.

La estabilidad de las redes tróficas marinas antárticas se analizó estudiando la respuesta a una perturbación ambiental. Para esto se tomó como caso la comunidad de plancton y la influencia del derretimiento glaciar como fuente de variación de salinidad en las relaciones tróficas de dicha comunidad. Se construyó un modelo dinámico considerando como variables de estado: nutrientes, dos clases de talla de fitoplancton y zooplancton. Los aportes originales de este estudio son: 1) La estabilidad evaluada en un amplio rango de valores de tasa de crecimiento ( $0,10 - 1,50 \text{ día}^{-1}$ ) muestra que el fitoplancton pequeño ( $< 20 \mu\text{m}$ ) alcanza el estado de equilibrio con valores más bajos con respecto al fitoplancton de mayor tamaño (20-200  $\mu\text{m}$ ). 3) El punto de equilibrio del modelo evaluado analíticamente sugiere que un incremento en la biomasa de fitoplancton no se traduce en un incremento de su propia biomasa, sino que contribuye a la biomasa del zooplancton. Además, altas tasas de pastoreo tienen un efecto negativo en el equilibrio del zooplancton sugiriendo una estrategia de depredador moderado.

Este trabajo de investigación realiza aportes utilizando un modelo que considera los principales procesos físicos que ocurren en la columna de agua (1D) y las relaciones tróficas en los niveles tróficos bajos. Los resultados indican que los cambios de salinidad y la velocidad del viento surgen como factores determinantes de la profundidad de la capa de mezcla turbulenta, incidiendo sobre la comunidad de plancton. Esto sugiere que la entrada de agua dulce afecta negativamente a determinados grupos del fitoplancton y estratifica la columna de agua favoreciendo el crecimiento del fitoplancton. Sin embargo, la turbulencia ocasionada por el estrés del viento genera condiciones menos favorables para su desarrollo y compensa el daño ocasionado al fitoplancton bajo el efecto de la salinidad reducida.