

A simple NPZD model for Llanquihue Lake

Carolina Rösner & Rodrigo Jaramillo Teufert

Ciclos Biogeoquímicos en Lagos del Sur de Chile

Un modelo biogeoquímico es una representación simplificada y matemática de los procesos biológicos, geológicos y químicos que ocurren en los ecosistemas. Estos modelos se utilizan para comprender y simular los flujos de energía, nutrientes y elementos químicos a través de los sistemas naturales, como los océanos, bosques, suelos y cuerpos de agua. Los modelos biogeoquímicos integran información sobre los ciclos biogeoquímicos, que incluyen procesos como la fotosíntesis, la descomposición, la respiración, la fijación de nitrógeno, la lixiviación de nutrientes y la deposición atmosférica.

Estos modelos tienen en cuenta las interacciones entre los diferentes componentes del sistema, como las plantas, los animales, los microorganismos, los suelos y la atmósfera. Los modelos biogeoquímicos son herramientas poderosas para predecir los efectos del cambio ambiental, como el cambio climático, la contaminación y la deforestación, en los ciclos biogeoquímicos y en la salud de los ecosistemas. También se utilizan para evaluar la eficacia de las estrategias de gestión y conservación, y para informar la toma de decisiones en la gestión de recursos naturales Roy et al. (2012a).

Los modelos biológicos han sido ampliamente utilizados para comprender la dinámica y las interacciones en los ecosistemas pelágicos. Entre ellos, los modelos de compartimentos han sido especialmente relevantes al agrupar poblaciones completas en compartimentos individuales que interactúan entre sí. La complejidad de estos modelos varía en función de las variables de estado incluidas y las reglas que gobiernan su interacción. Un modelo conocido en este contexto es el modelo propuesto por Fasham et al. (1990), el cual incluye siete compartimentos: fitoplancton, zooplancton, bacterias, nitrato, amonio, nitrógeno orgánico disuelto y detritos. Sin embargo, uno de los modelos biológicos más simples y ampliamente utilizado es el modelo NPZ desarrollado por Franks et al. (1986), que considera únicamente tres compartimentos: fitoplancton, zooplancton y nutrientes disueltos.

El modelo NPZ captura los procesos fundamentales que rigen el crecimiento y las interacciones entre estos compartimentos clave. Considera variables como la disponibilidad de nutrientes, la presión de pastoreo y las tasas de crecimiento del fitoplancton, brindando una representación simplificada pero valiosa de la dinámica de los ecosistemas pelágicos. Este modelo ha sido

adaptado y aplicado en diversos entornos marinos, proporcionando información crucial sobre el funcionamiento de las comunidades planctónicas y sus respuestas a los cambios ambientales.

En conclusión, los modelos biológicos, como el modelo NPZ, desempeñan un papel crucial en nuestra comprensión de la compleja dinámica y las interacciones en los ecosistemas pelágicos. Aunque existen modelos más complejos que abarcan múltiples compartimentos y variables, el modelo NPZ proporciona una representación efectiva y simplificada de los componentes esenciales en estos ecosistemas. Estos modelos son herramientas valiosas para avanzar en nuestro conocimiento y contribuir a la conservación y gestión de los hábitats marinos Roy et al. (2012a).

2. FORMULACIÓN DEL MODELO

Un modelo matemático (NPZD) basado en los cuatro compartimentos (Nutriente (N), Fitoplancton (P), Zooplancton (Z) y Detritus (D)) se propone para comprender la ecología de las zonas costeras poco profundas. lagunas. Las interacciones entre los compartimentos se describen en la Figura 1. Las flechas indican el flujo de materia entre diferentes compartimentos. Las ecuaciones del modelo son

$$dN/dt = -(a(t)NP)/(Kn + N) + rP + D + [m/H(t)]N1(t) + (Q/V)N2(t)$$

$$dP/dt =$$

$$dZ/dt =$$

$$dD/dt =$$

Todos los parámetros junto con sus unidades y rangos se dan en la Tabla 1. Las unidades de N, P, Z y D son en $\mu\text{g/l}$ y la unidad de tiempo es en días. La parametrización utilizada para elegir los términos en las ecuaciones (1) - (4) es explicado en las secciones

3. RESULTADOS

4. CONCLUSIONES

5. BIBLIOGRAFIA

(Roy et al. 2012a)

[Chakraborty and Chattopadhyay (2008); Carlotti, Giske, and Werner (2000)](A. M. Edwards and Brindley 1996; Chakraborty and Chattopadhyay 2008; Rudnicki and Wieczorek 2008; Record, Pershing, and Maps 2014; Roy et al. 2012b; Priyadarshi et al. 2022; Olivieri and Chavez 2000; Montagnes and Fenton 2012; Mitra 2009; Mitra, Flynn, and Fasham 2007; Merico et al. 2014; Mandal, Ray, and Ghosh 2012; Lewis 2005; Leles, VaLEntin, and FiGuEirEdo 2016; Lai et al. 2010; Kloosterman, Campbell, and Poulin 2016; Jiang, Schofield, and Falkowski 2005; Giricheva 2019; Gentleman and Neuheimer 2008; Franks 2002; A. M. Edwards 2001; C. A. Edwards, Powell, and Batchelder 2000; Daewel et al. 2014; Carlotti, Giske, and Werner 2000; Qiu and Zhu 2016; Rani and Jayaraman 2010; Sanson and Provenza 2009; Serra-Pompei et al. 2020; Steele and Henderson 1992; Turner et al. 2014)

[1] 2

- Carlotti, Francois, J. Giske, and Felix Werner. 2000. "Modeling Zooplankton Dynamics." In, 571667. Elsevier.
- Chakraborty, Subhendu, and Joydev Chattopadhyay. 2008. "Nutrient-Phytoplankton-Zooplankton Dynamics in the Presence of Additional Food Source—a Mathematical Study." *Journal of Biological Systems* 16 (04): 547564.
- Daewel, Ute, Solfrid Sætre Hjøllø, Martin Huret, Rubao Ji, Marie Maar, Susa Niiranen, Morgane Travers-Trolet, Myron A. Peck, and Karen E. van de Wolfshaar. 2014. "Predation Control of Zooplankton Dynamics: A Review of Observations and Models." *ICES Journal of Marine Science* 71 (2): 254271.
- Edwards, Andrew M. 2001. "Adding Detritus to a Nutrient-phytoplankton-zooplankton Model: A Dynamical-Systems Approach." *Journal of Plankton Research* 23 (4): 389413.
- Edwards, Andrew M., and John Brindley. 1996. "Oscillatory Behaviour in a Three-Component Plankton Population Model." *Dynamics and Stability of Systems* 11 (4): 347370.
- Edwards, Christopher A., Thomas A. Powell, and Harold P. Batchelder. 2000. "The Stability of an NPZ Model Subject to Realistic Levels of Vertical Mixing." *Journal of Marine Research* 58 (1): 3760.
- Franks, Peter JS. 2002. "NPZ Models of Plankton Dynamics: Their Construction, Coupling to Physics, and Application." *Journal of Oceanography* 58: 379387.
- Gentleman, W. C., and A. B. Neuheimer. 2008. "Functional Responses and Ecosystem Dynamics: How Clearance Rates Explain the Influence of Satiation, Food-Limitation and Acclimation." *Journal of Plankton Research* 30 (11): 12151231.
- Giricheva, Evgeniya. 2019. "Spatiotemporal Dynamics of an NPZ Model with Prey-Taxis and Intratrophic Predation." *Nonlinear Dynamics* 95 (2): 875892.
- Jiang, Lin, Oscar ME Schofield, and Paul G. Falkowski. 2005. "Adaptive Evolution of Phytoplankton Cell Size." *The American Naturalist* 166 (4): 496505.
- Kloosterman, Matt, Sue Ann Campbell, and Francis J. Poulin. 2016. "An NPZ Model with State-Dependent Delay Due to Size-Structure in Juvenile Zooplankton." *SIAM Journal on Applied Mathematics* 76 (2): 551577.
- Lai, Zhigang, Changsheng Chen, Robert C. Beardsley, Brian Rothschild, and Rucheng Tian. 2010. "Impact of High-Frequency Nonlinear Internal Waves on Plankton Dynamics in Massachusetts Bay." *Journal of Marine Research* 68 (2): 259281.
- Leles, Suzana G., JEan L. VaLEntin, and GiSELa M. FiGuEirEdo. 2016. "Evaluation of the Complexity and Performance of Marine Planktonic Trophic Models." *Anais Da Academia Brasileira de Ciências* 88: 19711991.
- Lewis, D. M. 2005. "A Simple Model of Plankton Population Dynamics Coupled with a LES of the Surface Mixed Layer." *Journal of Theoretical Biology* 234 (4): 565591.
- Mandal, Sudipto, Santanu Ray, and Phani Bhusan Ghosh. 2012. "Modeling Nutrient (Dissolved Inorganic Nitrogen) and Plankton Dynamics at Sagar Island of Hooghly-matla Es-

- tuarine System, West Bengal, India.” *Natural Resource Modeling* 25 (4): 629652.
- Merico, Agostino, Gunnar Brandt, S. Lan Smith, and Marcel Oliver. 2014. “Sustaining Diversity in Trait-Based Models of Phytoplankton Communities.” *Frontiers in Ecology and Evolution* 2: 59.
- Mitra, Aditee. 2009. “Are Closure Terms Appropriate or Necessary Descriptors of Zooplankton Loss in Nutrient–phytoplankton–zooplankton Type Models?” *Ecological Modelling* 220 (5): 611620.
- Mitra, Aditee, Kevin J. Flynn, and Michael JR Fasham. 2007. “Accounting for Grazing Dynamics in Nitrogen-Phytoplankton-Zooplankton (NPZ) Models.” *Limnology and Oceanography* 52 (2): 649661.
- Montagnes, David JS, and Andy Fenton. 2012. “Prey-Abundance Affects Zooplankton Assimilation Efficiency and the Outcome of Biogeochemical Models.” *Ecological Modelling* 243: 17.
- Olivieri, Rafael A., and Francisco P. Chavez. 2000. “A Model of Plankton Dynamics for the Coastal Upwelling System of Monterey Bay, California.” *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 47 (5-6): 10771106.
- Priyadarshi, Anupam, Ram Chandra, Michio J. Kishi, S. Lan Smith, and Hidekatsu Yamazaki. 2022. “Understanding Plankton Ecosystem Dynamics Under Realistic Micro-Scale Variability Requires Modeling at Least Three Trophic Levels.” *Ecological Modelling* 467: 109936.
- Qiu, Zhipeng, and Huaiping Zhu. 2016. “Complex Dynamics of a Nutrient-Plankton System with Nonlinear Phytoplankton Mortality and Allelopathy.” *Discrete and Continuous Dynamical Systems—Series B* 21 (8): 27032728.
- Rani, Raj, and Girija Jayaraman. 2010. “A Minimal Model for Plankton Dynamics in Shallow Coastal Lagoons-Chilika Lagoon, a Case Study.” *International Journal of Emerging Multidisciplinary Fluid Sciences* 2.
- Record, Nicholas R., Andrew J. Pershing, and Frédéric Maps. 2014. “The Paradox of the ‘Paradox of the Plankton’.” *ICES Journal of Marine Science* 71 (2): 236240.
- Roy, Shovonlal, David S. Broomhead, Trevor Platt, Shubha Sathyendranath, and Stefano Ciavatta. 2012a. “Sequential Variations of Phytoplankton Growth and Mortality in an NPZ Model: A Remote-Sensing-Based Assessment.” *Journal of Marine Systems* 92 (1): 1629.
- . 2012b. “Sequential Variations of Phytoplankton Growth and Mortality in an NPZ Model: A Remote-Sensing-Based Assessment.” *Journal of Marine Systems* 92 (1): 1629.
- Rudnicki, Ryszard, and Radosław Wiczorek. 2008. “Mathematical Models of Phytoplankton Dynamics.” *Dynamic Biochemistry, Process Biotechnology and Molecular Biology* 2 (1): 5563.
- Sanson, L. Zavala, and A. Provenzale. 2009. “The Effects of Abrupt Topography on Plankton Dynamics.” *Theoretical Population Biology* 76 (4): 258267.
- Serra-Pompei, Camila, Floor Soudijn, André W. Visser, Thomas Kiørboe, and Ken H. Andersen. 2020. “A General Size-and Trait-Based Model of Plankton Communities.” *Progress in Oceanography* 189: 102473.
- Steele, John H., and Eric W. Henderson. 1992. “The Role of Predation in Plankton Models.” *Journal of Plankton Research* 14 (1): 157172.

Turner, Evan L., Denise A. Bruesewitz, Rae F. Mooney, Paul A. Montagna, James W. McClelland, Alexey Sadvoski, and Edward J. Buskey. 2014. “Comparing Performance of Five Nutrient Phytoplankton Zooplankton (NPZ) Models in Coastal Lagoons.” *Ecological Modelling* 277: 1326.