

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de **20/03/2021**.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Biociências
Campus Litoral Paulista



**MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE MEXILHÕES *Perna*
perna NA REGIÃO COSTEIRA DA PLATAFORMA
CONTINENTAL SUDESTE DO BRASIL**

Tan Tjui-Yeuw

**São Vicente - SP
2020**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Biociências
Campus Litoral Paulista



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Biociências
Campus Litoral Paulista

MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE MEXILHÕES *Perna perna*
NA REGIÃO COSTEIRA DA PLATAFORMA CONTINENTAL
SUDESTE DO BRASIL

Candidato: Tan Tjui-Yeuw

Orientador: Prof. Dr. Roberto Fioravanti Carelli Fontes

Co-orientador: Prof. Dr. Fabio Stucchi Vannucchi

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências,
Campus do Litoral Paulista, UNESP, para obtenção
do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação
em Biodiversidade de Ambientes Costeiros.

São Vicente - SP

Março 2020

T161m

Tan, Tjui Yeuw

MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE MEXILHÕES Perna perna NA
REGIÃO COSTEIRA DA PLATAFORMA CONTINENTAL SUDESTE DO
BRASIL / Tjui Yeuw Tan. -- São Vicente, 2020

59 p. : il., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto
de Biociências, São Vicente

Orientador: Roberto Fioravanti Carelli Fontes

Coorientador: Fabio Stucchi Vannucchi

1. Bioenergética. 2. Metabolismo. 3. Mexilhão. 4. Sensoriamento remoto. 5.
Maricultura. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências, São
Vicente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ABSTRACT: The Dynamic Energy Budget theory (DEB) provides a systemic framework for understanding metabolic processes, represented by energy dynamics throughout an organism's growth and development. We divide this work into three chapters, where the first one explains the mathematical processes involved in growth within the DEB model. The second chapter details an application of the DEB model to assess growth potential, identifying optimum regions for the brown mussel *Perna perna*'s development throughout the coastal Southeastern Brazilian Shelf. This region has specific oceanographic and geomorphologic conditions, and its coast is influenced by local continental water and organic matter output. We gathered ecophysiological parameters in the literature relevant to our model and performed a parameter exploration to understand how these parameters interact with different environmental conditions. The DEB model is then applied using regional environmental parameters. Our results highlight regions where the organism's metabolism performs in a consistent optimum along the coast. We discuss the social-ecological implications from our simulations and recommend the method to obtain a spatial perspective for the mussel farming efficiency, allowing us to emphasize the ecosystem services provided by this organism. The third and last chapter is a general conclusion from this theme, where we point out the importance of spatializing metabolic data to understand ecological systems and project scenarios that strengthens resource management in a dynamic environment.

Keywords: ecophysiology, metabolism, dynamic energy budget, *Perna perna*, sustainable aquaculture

RESUMO: A teoria do Balanço Energético Dinâmico (DEB, do inglês “*Dynamic Energy Budget*”) proporciona uma forma sistêmica de compreender processos metabólicos por meio da dinâmica energética envolvida no desenvolvimento e crescimento de organismos. Dividimos este trabalho em três capítulos, na qual a base teórica do modelo é o primeiro capítulo, descrevendo os processos matemáticos envolvidos no crescimento de organismos dentro da teoria DEB. O segundo capítulo é uma aplicação do modelo DEB para avaliar o potencial de crescimento através de regiões ótimas para o metabolismo de mexilhões *Perna perna* na costa da Plataforma Continental Sudeste do Brasil. Essa região possui condições geomorfológicas e oceanográficas específicas e a região costeira é influenciada pela água continental e material orgânico proveniente da região. Levantamos parâmetros ecofisiológicos relevantes ao modelo disponíveis na literatura e fizemos simulações controladas para compreender a dinâmica dos parâmetros estudados em condições ambientais distintas. Aplicamos um modelo de DEB com os as variáveis ambientais regionais, evidenciando regiões onde o metabolismo do organismo tem uma performance ótima e consistente ao longo da costa. Discutimos as implicações socioecológicas dessas simulações, e recomendamos o método para obter uma perspectiva espacial da eficácia do cultivo de mexilhões para fins de ressaltar os serviços ecossistêmicos prestados por esses organismos. O terceiro e último capítulo é uma conclusão geral sobre este tema, no qual ressaltamos a importância da espacialização de dados metabólicos para entender os sistemas ecológicos e projetar cenários que fortaleçam o manejo de recursos em um futuro dentro de um ambiente dinâmico.

Palavras-chave: ecofisiologia, metabolismo, balanço energético dinâmico, *Perna perna*, aquicultura sustentável

Sumário

INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 – CRESCIMENTO NA TEORIA DEB	3
1. O Balanço Energético Dinâmico.....	4
2. Base teórica do modelo DEB.....	6
3. Descrição matemática do crescimento no DEB.....	8
3.1 Ingestão e assimilação.....	9
3.2 Dinâmica da reserva	10
3.3 Regulação Kappa e manutenção somática.....	12
3.4 Expressão matemática do crescimento no DEB	12
3.5 Crescimento de von Bertalanffy	13
3.6 Correções de temperatura	16
4. Ecofisiologia de bivalves do contexto do DEB.....	17
CAPÍTULO 2 – “ <i>Spatialized Metabolism: Combining remote sensing and bioenergetics to assess physiological performance potential in mussels</i> ”	21
Abstract	23
Introduction.....	24
Methods	26
Dynamic Energy Budget	26
Local parameter	30
Parameter exploration for <i>P. perna</i>	31
Study region.....	31
Regional mussel growth performance.....	33
Results and discussion.....	34
Local parameter	34

Parameter exploration for <i>P. perna</i>	36
Regional mussel growth performance.....	38
Conclusion.....	46
CAPÍTULO 3 - CONCLUSÕES GERAIS.....	47
REFERÊNCIAS.....	49

INTRODUÇÃO

Os relatórios do painel intergovernamental da biodiversidade e serviços ecossistêmicos (IPBES, do inglês “*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*”) vêm apontando a relevância de cenários modelados para compreender a complexidade envolvida nos processos ecossistêmicos e projetar possíveis cenários para o futuro (Hof et al., 2016). Com o avanço e disseminação da capacidade de processamento de dados em grande volume e aumento da disponibilidade aberta desses dados, criou-se uma grande demanda para teorias capazes de processar essa informação no intuito transformá-la em conhecimento sobre o funcionamento de nossos sistemas ecológicos em larga escala (Marquet et al., 2014).

Modelos biológicos que integram conceitos termodinâmicos demonstram que a eficiência energética pode ser incorporada de modo a elucidar como a energia presente em ecossistemas influencia fenômenos que variam desde especiação, até comportamentos migratórios de aves (Harte et al., 2009; Somveille et al., 2018). Parece lógico sob o ponto de vista evolutivo afirmar que organismos que se desenvolvem em um ambiente complexo e competitivo, dentro de uma dinâmica constante, tendem a se estruturar de forma a otimizar o uso de sua energia.

Além de fenômenos evolutivos, muitos desses modelos também abordam o metabolismo de organismos individuais. De um ponto de vista de organização de sistemas, a modelagem matemática de um indivíduo apresenta uma vantagem estratégica, pois conecta os mecanismos fisiológicos aos sistemas ecológicos, possibilitando o estudo de balanço de massa e energia em um sistema com sentido biológico. Um indivíduo também é um componente afetado diretamente pelas pressões de seleção natural, que interage com o seu ambiente e com outros indivíduos através de seu comportamento (Kooijman, 2009).

Neste trabalho, adotamos o modelo de Balanço Energético Dinâmico, que representa a dinâmica energética de um organismo enquanto indivíduo, para uma aplicação no crescimento do mexilhão *Perna perna*. Diferente de outros modelos fisiológicos como o “Escopo para Crescimento” (do inglês, “*Scope for Growth*”) (Smaal and Widdows, 1994), que também é comumente aplicado em bivalves e avalia a energia

disponível para o crescimento do organismo, o modelo que usamos, desenvolvido por Kooijman (2009, 1986), integra o metabolismo do indivíduo em diferentes ciclos de vida através da quantificação teórica da massa ou fluxos de energia direcionadas para reserva, reprodução, amadurecimento, crescimento e manutenção. Esses fluxos de energia ou massa dependem basicamente de parâmetros específicos de cada espécie, e variações do modelo podem ser implementadas para representar especificidades do ciclo de vida de determinado grupo, ingestão de alimento, e o efeito da temperatura no metabolismo do indivíduo.

A teoria do Balanço Energético Dinâmico auxilia a compreensão das dinâmicas energéticas em sistemas ecológicos, pois possibilita integrar conhecimento do metabolismo de organismos a aspectos ecológicos associados. Além disso, conta com mais de 1000 espécies com parâmetros catalogados que variam desde fósseis a organismos abissais raramente vistos (Augustine and Kooijman, 2019; Baas et al., 2018). Também conta com uma base de dados chamada de “*Add my Pet*”, de livre acesso para extrair os parâmetros de animais catalogados no modelo DEB (Marques et al., 2018).

No primeiro capítulo dessa dissertação, abordamos um desenvolvimento básico da teoria, contextualizando as ideias fundamentais, descrevendo matematicamente o crescimento de organismos em função das variações de temperatura. Também abordamos sobre alguns processos ecofisiológicos regulatórios associados às variações nas condições ambientais de bivalves.

O Capítulo II é escrito em forma de manuscrito para artigo científico submetido no periódico científico *Remote Sensing of Environment*, intitulado “*Spatialized Metabolism: Combining remote sensing and bioenergetics to assess physiological performance potential in mussels*”.

E por fim, no Capítulo III apontamos as conclusões gerais relacionadas às aplicações práticas dos métodos empregados e os resultados obtidos nessa dissertação.

CAPÍTULO 3 - CONCLUSÕES GERAIS

Ao simular o modelo, é necessário compreender as particularidades específicas da teoria DEB para correção de temperatura, taxas de crescimento e comprimento final. Os valores obtidos na simulação do modelo dentro das condições regionais retornaram resultados otimistas para o uso do DEB na previsão de taxas de crescimento.

O modelo em questão avalia condições fisiológicas de organismos intrinsecamente complexos. É natural que a construção de um modelo genérico não capture todos os processos fisiológicos e comportamentos específicos de um organismo em particular, porém nossos resultados demonstram que essa ferramenta pode servir como uma poderosa simulação generalizada do metabolismo do indivíduo.

Nossos resultados possibilitam a visualização de uma camada espacial que representa o metabolismo de um indivíduo se desenvolvendo em uma determinada circunstância. Isso pode ser usado futuramente para relacionar com outras camadas que representam interações em níveis ecológicos superiores como competição, predação e até zonação em costões rochosos. A utilidade de uma camada em nível de metabolismo do indivíduo, sem a presença dessas interações pode ser valiosa quando estudamos os mecanismos por trás dessas interações.

Nosso trabalho evidencia que o uso de modelagem matemática integrado à capacidade de processamento computacional e sensoriamento remoto fornece uma boa perspectiva para transformar um grande volume de dados em conhecimento biológico utilizável para gestão. Oferecemos um novo ponto de vista sobre o potencial da espacialização de dados metabólicos em grande escala.

Dentro de um contexto de incerteza em relação aos fenômenos climáticos, e os contínuos impactos da ação antrópica sobre os ecossistemas, recorrer a tecnologia fornece um caminho interessante para visualizar o mundo em um ponto de vista diferente. Essas ferramentas tornam possível um olhar sistêmico e integrado, auxiliando na compreensão das dinâmicas naturais do presente e do passado, e projetando possíveis situações para nos precaver a cenários futuros.

REFERÊNCIAS

- Alfredini, P., Arasaki, E., do Amaral, R.F., 2008. Mean sea-level rise impacts on Santos Bay, Southeastern Brazil – physical modelling study. *Environ. Monit. Assess.* 144, 377–387. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-0001-z>
- Angilletta Jr., M.J., 2009. *Thermal Adaptation. A theoretical and Empirical Synthesis*, Oxford University Press.
- Augustine, S., Kooijman, S.A.L.M., 2019. A new phase in DEB research. *J. Sea Res.* 143, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2018.06.003>
- Baas, J., Augustine, S., Marques, G.M., Dorne, J.-L., 2018. Dynamic energy budget models in ecological risk assessment: From principles to applications. *Sci. Total Environ.* 628–629, 249–260. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.058>
- Bertalanffy, L. von, 1938. A quantitative theory of organic growth (inquiries on growth laws. II). *Hum. Biol.* 10, 181–213.
- Blanchard, J.L., Watson, R.A., Fulton, E.A., Cottrell, R.S., Nash, K.L., Bryndum-Buchholz, A., Büchner, M., Carozza, D.A., Cheung, W.W.L., Elliott, J., Davidson, L.N.K., Dulvy, N.K., Dunne, J.P., Eddy, T.D., Galbraith, E., Lotze, H.K., Maury, O., Müller, C., Tittensor, D.P., Jennings, S., 2017. Linked sustainability challenges and trade-offs among fisheries, aquaculture and agriculture. *Nat. Ecol. Evol.* 1, 1240–1249. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0258-8>
- Borthagaray, A.I., Carranza, A., 2007. Mussels as ecosystem engineers: Their contribution to species richness in a rocky littoral community. *Acta Oecologica* 31, 243–250. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2006.10.008>
- Burlakova, L.E., Karatayev, A.Y., Karatayev, V.A., 2012. Invasive mussels induce community changes by increasing habitat complexity. *Hydrobiologia* 685, 121–134. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0791-4>
- Carranza, A., Defeo, O., Beck, M., Castilla, J.C., 2009. Linking fisheries management and

- conservation in bioengineering species: The case of South American mussels (Mytilidae). *Rev. Fish Biol. Fish.* 19, 349–366. <https://doi.org/10.1007/s11160-009-9108-3>
- Carvalho, M., Ciotti, A.M., Giancesella, S.M.F., Corrêa, F.M.P.S., Perinotto, R.R.C., 2014. Bio-Optical Properties of the Inner Continental Shelf off Santos Estuarine System, Southeastern Brazil, and their Implications for Ocean Color Algorithm Performance. *Brazilian J. Oceanogr.* 62, 71–87. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592014044506202>
- Castro, B.M. de, Miranda, L.B. de, Miyao, S.Y., 1987. Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo de Ubatuba: variações sazonais e em média escala. *Bol. do Inst. Ocean.* 35, 135–151.
- Cheng, M.C.F., Tan, A.L.S., Rinaldi, A., Giacoletti, A., Sarà, G., Williams, G.A., 2018. Predicting effective aquaculture in subtropical waters: A dynamic energy budget model for the green lipped mussel, *Perna viridis*. *Aquaculture* 495, 749–756. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.04.008>
- Comeau, L.A., Pernet, F., Tremblay, R., Bates, S.S., Leblanc, A., 2008. Comparison of eastern oyster (*Crassostrea virginica*) and blue mussel (*Mytilus edulis*) filtration rates at low temperatures. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2810 1, 11.
- Conti, L.A., Furtado, V.V., 2006. Geomorfologia da Plataforma Continental do Estado de São Paulo. *Rev. Bras. Geociências* 36, 305–312. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2006362305312>
- Cranford, P.J., Ward, J.E., Shumway, S.E., 2011. Bivalve Filter Feeding: Variability and Limits of the Aquaculture Biofilter, in: *Shellfish Aquaculture and the Environment*. pp. 81–124. <https://doi.org/10.1002/9780470960967.ch4>
- Crowder, L., Norse, E., 2008. Essential ecological insights for marine ecosystem-based management and marine spatial planning. *Mar. Policy* 32, 772–778. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2008.03.012>

- Dame, R.F., 2012. Ecology of marine bivalves: an ecosystem approach, 2nd Editio. ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Davies, J.L., 1964. A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift fur Geomorphol.* 8, 127–44.
- de Mahiques, M.M., Hanebuth, T.J.J., Martins, C.C., Montoya-Montes, I., Alcántara-Carrió, J., Figueira, R.C.L., Bícego, M.C., 2016. Mud depocentres on the continental shelf: a neglected sink for anthropogenic contaminants from the coastal zone. *Environ. Earth Sci.* 75, 44. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4782-z>
- Dittmar, T., Lara, R.J., Kattner, G., 2001. River or mangrove? Tracing major organic matter sources in tropical Brazilian coastal waters. *Mar. Chem.* 73, 253–271. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(00\)00110-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(00)00110-9)
- FAO, 2016. The state of world fisheries and aquaculture, Contributing to food security and nutrition for all. Food and Agriculture Organization.
- Fidelman, P., Van Tuyen, T., Nong, K., Nursey-Bray, M., 2017. The institutions-adaptive capacity nexus: Insights from coastal resources co-management in Cambodia and Vietnam. *Environ. Sci. Policy* 76, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.06.018>
- Filgueira, R., Guyondet, T., Comeau, L.A., Grant, J., 2014. A fully-spatial ecosystem-DEB model of oyster (*Crassostrea virginica*) carrying capacity in the Richibucto Estuary, Eastern Canada. *J. Mar. Syst.* 136, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.03.015>
- Fontes, R.F.C., Castro, B.M. de, 2017. Currents on the continental shelf adjacent to the Laje de Santos (SP, Brazil). *Brazilian J. Oceanogr.* 65, 595–604. <https://doi.org/10.1590/s1679-87592017130206504>
- Foster-Smith, R.L., 1975. The effect of concentration of suspension on the filtration rates and pseudofaecal production for *Mytilus edulis* L., *Cerastoderma edule* (L.) and *Venerupis pullastra* (Montagu). *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 17, 1–22.

[https://doi.org/10.1016/0022-0981\(75\)90075-1](https://doi.org/10.1016/0022-0981(75)90075-1)

Goedegebuure, M., Melbourne-Thomas, J., Corney, S.P., Hindell, M.A., Constable, A.J., 2017. Beyond big fish: The case for more detailed representations of top predators in marine ecosystem models. *Ecol. Modell.* 359, 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.04.004>

Harley, C.D.G., Randall Hughes, A., Hultgren, K.M., Miner, B.G., Sorte, C.J.B., Thornber, C.S., Rodriguez, L.F., Tomanek, L., Williams, S.L., 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecol. Lett.* 9, 228–241. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00871.x>

Harte, J., Smith, A.B., Storch, D., 2009. Biodiversity scales from plots to biomes with a universal species-area curve. *Ecol. Lett.* 12, 789–797. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01328.x>

Hof, C., Dehling, D.M., Bonn, A., Burgess, N.D., Eigenbrod, F., Harfoot, M.B.J., Hickler, T., Jetz, W., Marquard, E., Pereira, H.M., Böhning-Gaese, K., 2016. Macroecology meets IPBES. *Front. Biogeogr.* 7, 155–167. <https://doi.org/10.21425/F5FBG28888>

Hughes, R.N., 1993. Reefs, in: Barnes, R.S.K., Mann, K.H. (Eds.), *Fundamentals of Aquatic Ecology*. Blackwell Scientific, Oxford, UK, pp. 213–29.

James, M.R., Weatherhead, M.A., Ross, A.H., 2001. Size-specific clearance, excretion, and respiration rates, and phytoplankton selectivity for the mussel *Perna canaliculus* at low levels of natural food. *New Zeal. J. Mar. Freshw. Res.* 35, 73–86. <https://doi.org/10.1080/00288330.2001.9516979>

Jennerjahn, T.C., Ittekkot, V., 2002. Relevance of mangroves for the production and deposition of organic matter along tropical continental margins. *Naturwissenschaften*. <https://doi.org/10.1007/s00114-001-0283-x>

Jones, C.G., Lawton, J.H., Shachak, M., 1994. Organisms as Ecosystem Engineers, in: *Ecosystem Management*. Springer New York, New York, NY, pp. 130–147. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4018-1_14

- Jones, H.D., Richards, O.G., Southern, T.A., 1992. Gill dimensions, water pumping rate and body size in the mussel *Mytilus edulis* L. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 155, 213–237. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(92\)90064-H](https://doi.org/10.1016/0022-0981(92)90064-H)
- Kearney, M., 2012. Metabolic theory, life history and the distribution of a terrestrial ectotherm. *Funct. Ecol.* 26, 167–179. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01917.x>
- Kearney, M.R., Matzelle, A., Helmuth, B., 2012. Biomechanics meets the ecological niche: the importance of temporal data resolution. *J. Exp. Biol.* 215, 1422–1424. <https://doi.org/10.1242/jeb.072249>
- Kittner, C., Riisgård, H.U., 2005. Effect of temperature on filtration rate in the mussel *Mytilus edulis*: No evidence for temperature compensation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 305, 147–152. <https://doi.org/10.3354/meps305147>
- Kooijman, B., 2009. Dynamic Energy Budget Theory for Metabolic Organisation, 3rd Editio. ed, Dynamic Energy Budget Theory for Metabolic Organisation, Third Edition. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511805400>
- Kooijman, S.A.L.M., 2014. Metabolic acceleration in animal ontogeny: An evolutionary perspective. *J. Sea Res.* 94, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2014.06.005>
- Kooijman, S.A.L.M., 2006. Pseudo-faeces production in bivalves. *J. Sea Res.* 56, 103–106. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2006.03.003>
- Kooijman, S.A.L.M., 1986. Energy budgets can explain body size relations. *J. Theor. Biol.* 121, 269–282. [https://doi.org/10.1016/S0022-5193\(86\)80107-2](https://doi.org/10.1016/S0022-5193(86)80107-2)
- Kotta, J., Futter, M., Kaasik, A., Liversage, K., Rätsep, M., Barboza, F.R., Bergström, L., Bergström, P., Bobsien, I., Díaz, E., Herkül, K., Jonsson, P.R., Korpinen, S., Kraufvelin, P., Krost, P., Lindahl, O., Lindegarth, M., Lyngsgaard, M.M., Mühl, M., Sandman, A.N., Orav-Kotta, H., Orlova, M., Skov, H., Rissanen, J., Šiaulyš, A., Vidakovic, A., Virtanen, E., 2020. Cleaning up seas using blue growth initiatives:

- Mussel farming for eutrophication control in the Baltic Sea. *Sci. Total Environ.* 709. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136144>
- Larsen, P.S., Riisgård, H.U., 2009. Viscosity and not biological mechanisms often controls the effects of temperature on ciliary activity and swimming velocity of small aquatic organisms. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 381, 67–73. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2009.09.021>
- Lebel, L., Anderies, J.M., Campbell, B., Folke, C., Hatfield-Dodds, S., Hughes, T.P., Wilson, J., 2006. Governance and the capacity to manage resilience in regional social-ecological systems. *Ecol. Soc.* 1.
- Lika, K., Augustine, S., Kooijman, S.A.L.M., 2019. Body size as emergent property of metabolism. *J. Sea Res.* 143, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2018.04.005>
- Lopes, S.G.B.C., Fonseca, M.L., 2008. O mexilhão *Perna perna* - taxonomia, morfologia e anatomia funcional, in: Resgalla Jr, C., Weber, L.I., Conceição, M.B. (Eds.), *O Mexilhão Perna Perna*(L.): Biologia, Ecologia e Aplicações. Editora Interciência, Rio de Janeiro, RJ, pp. 1–23.
- Mangano, M.C., Giacoletti, A., Sarà, G., 2019. Dynamic Energy Budget provides mechanistic derived quantities to implement the ecosystem based management approach. *J. Sea Res.* 143, 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2018.05.009>
- Marques, G.M., Augustine, S., Lika, K., Pecquerie, L., Domingos, T., Kooijman, S.A.L.M., 2018. The AmP project: Comparing species on the basis of dynamic energy budget parameters. *PLOS Comput. Biol.* 14, e1006100. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006100>
- Marques, H.L. de A., Pereira, R.T.L., Correa, B.C., 1991. Crescimento de mexilhões *Perna perna* (Linnaeus, 1758) em populações naturais no litoral norte de Ubatuba (SP), Brasil. *Bol. do Inst. Pesca* 18, 61–72.
- Marquet, P.A., Allen, A.P., Brown, J.H., Dunne, J.A., Enquist, B.J., Gillooly, J.F., Gwaty, P.A., Green, J.L., Harte, J., Hubbell, S.P., O'Dwyer, J., Okie, J.G., Ostling, A., Ritchie,

- M., Storch, D., West, G.B., 2014. On theory in ecology. *Bioscience* 64, 701–710. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu098>
- Mayer-Pinto, M., Ignacio, B.L., Széchy, M.T.M., Viana, M.S., Curbelo-Fernandez, M.P., Lavrado, H.P., Junqueira, A.O.R., Vilanova, E., Silva, S.H.G., 2012. How Much Is Too Little to Detect Impacts? A Case Study of a Nuclear Power Plant. *PLoS One* 7, e47871. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047871>
- Miyashita, L.K., de Melo Junior, M., Lopes, R.M., 2009. Estuarine and oceanic influences on copepod abundance and production of a subtropical coastal area. *J. Plankton Res.* 31, 815–826. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbp039>
- Monaco, C.J., McQuaid, C.D., 2018. Applicability of Dynamic Energy Budget (DEB) models across steep environmental gradients. *Sci. Rep.* 8, 16384. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34786-w>
- Montalto, V., Rinaldi, A., Sarà, G., 2015. Life history traits to predict biogeographic species distributions in bivalves. *Sci. Nat.* 102, 61. <https://doi.org/10.1007/s00114-015-1313-4>
- Muto, E., Soares, L., Sarkis, J., Hortellani, M., Petti, M., Corbisier, T., 2014. Biomagnification of mercury through the food web of the Santos continental shelf, subtropical Brazil. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 512, 55–69. <https://doi.org/10.3354/meps10892>
- Muxugata, E., Montú, M.A., 1999. Os cladocera da Plataforma Continental Sudeste brasileira: distribuição, densidade e biomassa (Inverno de 1995). *Nauplius* 7, 151–172.
- Odum, E.P., 1968. Energy flow: A historical review. *Am. Zool.* 8, 11–18.
- Pecquerie, L., 2008. Bioenergetic modelling of growth, development and reproduction of small pelagic fish: the Bay of Biscay anchovy. *Agrocampus Rennes & Vrije Universiteit*.

- Pouvreau, S., Bourles, Y., Lefebvre, S., Gangnery, A., Alunno-Bruscia, M., 2006. Application of a dynamic energy budget model to the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, reared under various environmental conditions. *J. Sea Res.* 56, 156–167. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2006.03.007>
- Resgalla, C., Brasil, E.D.S., Salomão, L.C., 2007. The effect of temperature and salinity on the physiological rates of the mussel *Perna perna* (Linnaeus 1758). *Brazilian Arch. Biol. Technol.* 50, 543–556.
- Resgalla Jr, C., Weber, L.I., Conceição, M.B., 2008. O mexilhão *Perna perna* (L.): biologia, ecologia e aplicações. Editora Interciência, Rio de Janeiro, RJ.
- Rinaldi, A., Montalto, V., Manganaro, A., Mazzola, A., Mirto, S., Sanfilippo, M., Sarà, G., 2014. Predictive mechanistic bioenergetics to model habitat suitability of shellfish culture in coastal lakes. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 144, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.04.013>
- Sàrà, G., Palmeri, V., Montalto, V., Rinaldi, A., Widdows, J., 2013. Parameterisation of bivalve functional traits for mechanistic eco-physiological dynamic energy budget (DEB) models. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 480, 99–117. <https://doi.org/10.3354/meps10195>
- Sàrà, G., Rinaldi, A., Montalto, V., 2014. Thinking beyond organism energy use: a trait-based bioenergetic mechanistic approach for predictions of life history traits in marine organisms. *Mar. Ecol.* 35, 506–515. <https://doi.org/10.1111/maec.12106>
- Saraiva, S., van der Meer, J., Kooijman, S.A.L.M., Sousa, T., 2011. Modelling feeding processes in bivalves: A mechanistic approach. *Ecol. Modell.* 222, 514–523. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.09.031>
- Schoolfield, R.M., Sharpe, P.J.H., Magnuson, C.E., 1981. Non-linear regression of biological temperature-dependent rate models based on absolute reaction-rate theory. *J. Theor. Biol.* 88, 719–731. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(81\)90246-0](https://doi.org/10.1016/0022-5193(81)90246-0)
- Smaal, A.C., Widdows, J., 1994. The scope for growth of bivalves as an integrated

- response parameter in biological monitoring., in: Kramer KJM (Ed.), *Biomonitoring of Coastal Waters*.
- Somveille, M., Rodrigues, A.S.L., Manica, A., 2018. Energy efficiency drives the global seasonal distribution of birds. *Nat. Ecol. Evol.* 2, 962–969. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0556-9>
- Sousa, T., Domingos, T., Poggiale, J.-C., Kooijman, S.A.L.M., 2010. Dynamic energy budget theory restores coherence in biology. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 365, 3413–3428. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0166>
- Strohmeier, T., Strand, Ø., Cranford, P., 2009. Clearance rates of the great scallop (*Pecten maximus*) and blue mussel (*Mytilus edulis*) at low natural seston concentrations. *Mar. Biol.* 156, 1781–1795. <https://doi.org/10.1007/s00227-009-1212-3>
- Suplicy, F.M., 2018. A review of the multiple benefits of mussel farming. *Rev. Aquac.* <https://doi.org/10.1111/raq.12313>
- Széchy, M.T.M. de, Koutsoukos, V. de S., Barboza, C.A. de M., 2017. Long-term decline of brown algal assemblages from southern Brazil under the influence of a nuclear power plant. *Ecol. Indic.* 80, 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.019>
- Tagliarolo, M., Montalto, V., Sarà, G., Lathlean, J., McQuaid, C., 2016. Low temperature trumps high food availability to determine the distribution of intertidal mussels *Perna perna* in South Africa. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 558, 51–63. <https://doi.org/10.3354/meps11876>
- Teal, L.R., van Hal, R., van Kooten, T., Ruardij, P., Rijnsdorp, A.D., 2012. Bio-energetics underpins the spatial response of North Sea plaice (*Pleuronectes platessa* L.) and sole (*Solea solea* L.) to climate change. *Glob. Chang. Biol.* 18, 3291–3305. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02795.x>
- Teixeira, C., Gaeta, S.A., 1991. Variação nictemeral de clorofila-a, produção primária do fitoplâncton e fatores ambientais da região de Ubatuba. *Bol. do Inst. Ocean.* 39, 15–

24.

- Teixeira, T.P., Neves, L.M., Araújo, F.G., 2009. Effects of a nuclear power plant thermal discharge on habitat complexity and fish community structure in Ilha Grande Bay, Brazil. *Mar. Environ. Res.* 68, 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2009.06.004>
- Thomas, Y., Mazurié, J., Alunno-Bruscia, M., Bacher, C., Bouget, J.-F., Gohin, F., Pouvreau, S., Struski, C., 2011. Modelling spatio-temporal variability of *Mytilus edulis* (L.) growth by forcing a dynamic energy budget model with satellite-derived environmental data. *J. Sea Res.* 66, 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2011.04.015>
- Timmermann, K., Dinesen, G.E., Markager, S., Ravn-Jensen, L., Bassompierre, M., Roth, E., Støttrup, J.G., 2014. Development and Use of a Bioeconomic Model for Management of Mussel Fisheries under Different Nutrient Regimes in the Temperate Estuary of the Limfjord, Denmark. *Ecol. Soc.* 19, art14. <https://doi.org/10.5751/ES-06041-190114>
- Turner, W., Rondinini, C., Pettorelli, N., Mora, B., Leidner, A.K., Szantoi, Z., Buchanan, G., Dech, S., Dwyer, J., Herold, M., Koh, L.P., Leimgruber, P., Taubenboeck, H., Wegmann, M., Wikelski, M., Woodcock, C., 2015. Free and open-access satellite data are key to biodiversity conservation. *Biol. Conserv.* 182, 173–176. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.11.048>
- van der Schatte Olivier, A., Jones, L., Vay, L. Le, Christie, M., Wilson, J., Malham, S.K., 2018. A global review of the ecosystem services provided by bivalve aquaculture. *Rev. Aquac.* <https://doi.org/10.1111/raq.12301>
- Vihervaara, P., Franzese, P.P., Buonocore, E., 2019. Information, energy, and eco-exergy as indicators of ecosystem complexity. *Ecol. Modell.* 395, 23–27. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.01.010>
- Vilanova, E., 2004. The impact of a nuclear power plant discharge on the sponge

community of a tropical bay (SE Brazil). BMIB - Boll. dei Musei e degli Ist. Biol. 68.

Widdows, J., Fieth, P., Worrall, C.M., 1979. Relationships between seston, available food and feeding activity in the common mussel *Mytilus edulis*. Mar. Biol. 50, 195–207. <https://doi.org/10.1007/BF00394201>