ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE UM MODELO BIOECONÔMICO APLICADO A SISTEMA SOCIOECOLÓGICO

Chiara Ascencio Brancalion, Eric Zettermann Dias de Azevedo

INTRODUÇÃO

A Análise de Sensibilidade (AS) na avaliação de modelos matemáticos quantifica como a incerteza nos parâmetros de entrada se propaga nos resultados do sistema (SALTELLI et al., 2008). Ao identificar as variáveis de maior impacto, a AS pode direcionar a coleta de dados e a auxiliar na validação do modelo (RAZAVI et al., 2021). Na gestão de recursos naturais, a modelagem é utilizada para representar a dinâmica das espécies e simular cenários de exploração (CLARK, 2007). Os modelos bioeconômicos integram os aspectos ecológicos e socioeconômicos da atividade, avaliando impactos sistêmicos e apoiando decisões de manejo sustentável (HARYANTO et al., 2025), o que os destaca como ferramentas valiosas frente à complexidade do setor (KNOWLER, 2002).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo principal analisar a sensibilidade das variáveis em um modelo bioeconômico de um sistema socioecológico. Para alcançar esse propósito, foram estabelecidos como objetivos específicos: revisar a literatura pertinente sobre a análise de sensibilidade nesse tipo de modelagem, selecionar um método de análise e conduzir a avaliação de sensibilidade do modelo aplicado ao sistema em questão.

DESENVOLVIMENTO

A revisão bibliográfica foi realizada na base de dados Elsevier (Science Direct), no período de 2022 a 2024, utilizando a palavra-chave "sensitivity analysis methods". A triagem considerou: dificuldade de implementação, abrangência do método e esforço computacional resultando em 18 métodos pré-selecionados. O método de Morris (1991) foi escolhido por atender de forma otimizada às condições operacionais exigidas.

Em seguida, procedeu-se com uma pesquisa bibliográfica focada na formulação matemática e estruturação do método de Moris aplicado no modelo bioeconômico de Gordon-Schaefer, com base na estruturação desenvolvida por Barros e Azevedo (2025). O modelo em questão relaciona parâmetros biológicos, pesqueiros e econômicos, operando sob seis parâmetros principais: taxa de crescimento (r), capacidade de suporte (K), capturabilidade (q), preço do pescado (p), esforço de pesca (e) e custo por unidade de esforço (c). A partir dessas entradas, o modelo simula a evolução da biomassa do estoque, da captura e do lucro para um horizonte de 30 anos. A análise de sensibilidade foi feita considerando três saídas diferentes: (a) a biomassa final, (b) a captura final e (c) o lucro final após 30 anos de simulação.

As simulações e a avaliação de sensibilidade foram executadas no ambiente RStudio (POSIT, 2025). Para cada perturbação no espaço paramétrico, foi calculado o Efeito Elementar associado ao fator i , representado por $d(\mathrm{x})$ conforme a formulação metodológica de Saltelli et al. (2008), expressa pela equação $d(\mathrm{x}) = \frac{[y(x) - y(\tilde{x})]}{\mathrm{y(x)}}$. Nesta formulação, o termo $y(x)$ representa o resultado da saída do modelo (seja biomassa, captura ou lucro) com o vetor de parâmetros localizado no ponto de amostragem original não perturbado. Por sua vez, $y(\tilde{x})$ corresponde ao resultado após o parâmetro sofrer a perturbação estipulada. Para cada parâmetro foi considerado um universo de $\pm 15\%$ de

variação a partir dos valores utilizados em Azevedo (2021) para o arrasto de praia. O universo de cada parâmetro foi divido em 6 níveis para a criação 38880 trajetórias independentes. Ao final das simulações, a média das magnitudes dos efeitos elementares absolutos (μ^*) e o desvio padrão (σ) dos efeitos elementares absolutos de cada trajetória foram calculados para avaliar o impacto global direto e as interações não-lineares de cada parâmetro na resposta do modelo.

RESULTADOS

A aplicação do método de Morris quantificou a influência global (μ^*) e as interações não-lineares (σ) dos parâmetros sob as diretrizes de Saltelli et al. (2008). Na biomassa acumulada, a capacidade de suporte (K) dominou o sistema operando de forma linear como o controlador primário do estoque. O esforço (e), a capturabilidade (q) e o crescimento (r) exerceram baixa influência direta e interações mínimas, enquanto o preço (p) e o custo (c) registraram impacto irrelevante (Figura 1). Sob foco da captura, a capacidade de suporte (K) manteve seu protagonismo sem efeitos não lineares ou de interação com as demais variáveis. Paralelamente, o esforço (e) e a capturabilidade (q) atuaram como impulsionadores secundários de expressivo impacto e baixa interação, ao passo que o crescimento (r) limitou-se a efeitos interativos de baixo impacto, assim como o preço (p) e o custo (c).

A análise do lucro acumulado ilustrou uma mudança na sensibilidade do sistema socioecológico: o preço do pescado (p) e a capacidade de suporte (K) atuaram como as variáveis de maior impacto global. Em contrapartida, a capturabilidade (q) e o esforço (e) mantiveram elevada influência condicionados a uma baixa não-linearidade. Diferentemente de cenários anteriores, o crescimento biológico (r) manifestou baixo impacto direto no lucro. Por fim, os custos operacionais (c) apresentaram a menor sensibilidade geral, consolidando-se como o fator de menor influência para as oscilações econômicas do modelo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de sensibilidade do modelo bioeconômico comprova que a dinâmica do estoque e o lucro da pescaria são impactados por parâmetros biológicos e econômicos, com destaque para a capacidade de suporte (K) e o preço (p). A triagem pelo método de Morris evidenciou satisfatoriamente o comportamento do sistema, comprovando que o esforço de pesca e a capturabilidade, impactam o modelo com intensidade moderada e com previsibilidade, mostrando a robustez do sistema estudado. Esse diagnóstico mostra, do ponto de vista prático e metodológico, que estratégias de gestão voltadas para a alteração tecnológica ou para o controle restrito de esforço tenderão a gerar respostas sistêmicas proporcionais. Conclui-se que o rigor quantitativo fornecido pela análise de sensibilidade global é imprescindível para direcionar a formulação de políticas públicas calibradas, fortalecendo a segurança na tomada de decisão frente à complexidade da gestão pesqueira.

Palavras-chave: análise de sensibilidade; modelagem bioeconômica; método de Morris; modelo Gordon-Schaefer; gestão pesqueira.

ANEXOS

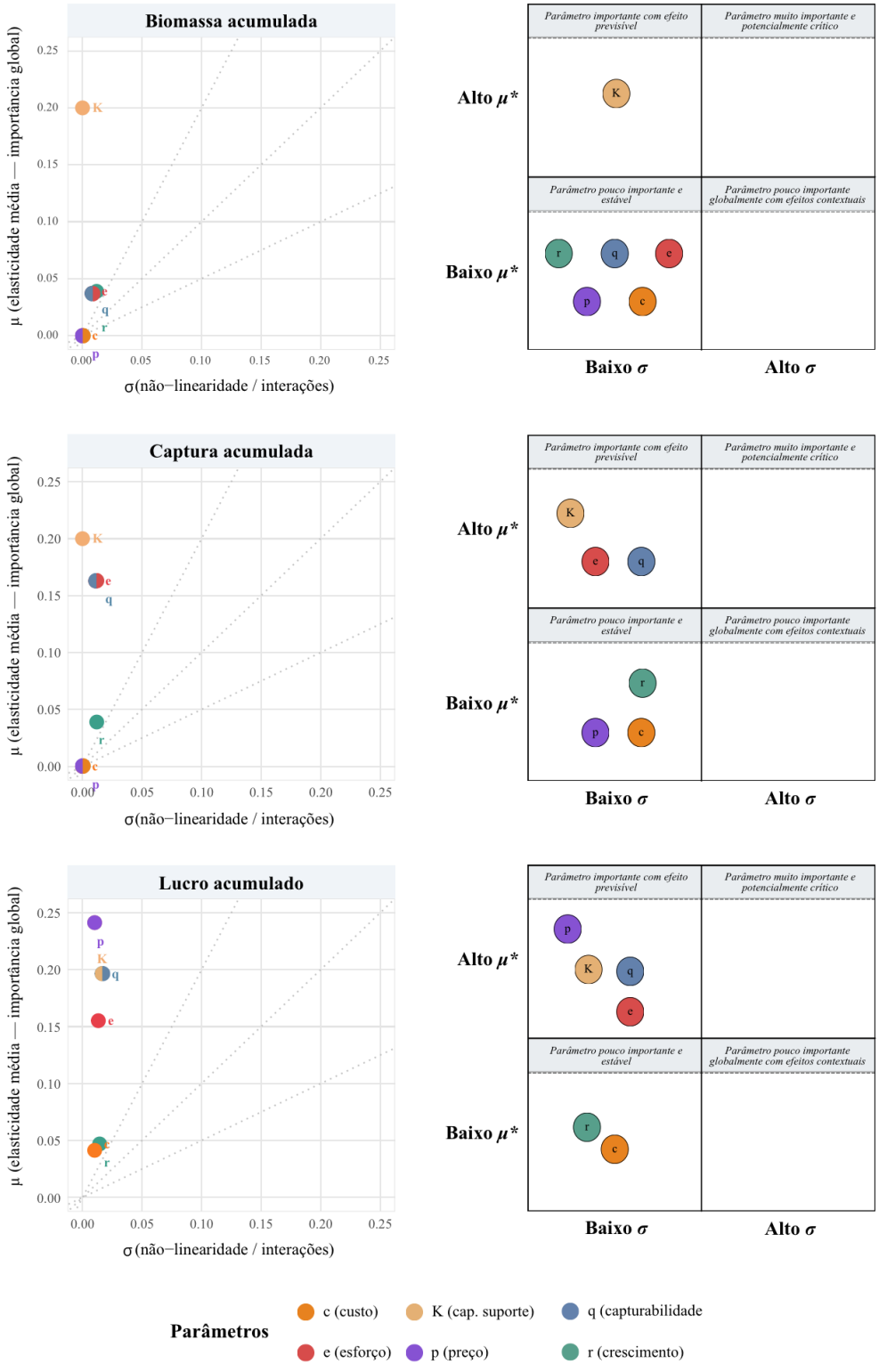


Figura 1. Análise de sensibilidade global de Morris aplicada às saídas do modelo bioeconômico de Gordon-Schaefer; junto da avaliação de impacto dos parâmetros nas respectivas saídas.
Fonte: Desenvolvido pela autora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HARYANTO, T. et al. Balancing economic returns and conservation: A bioeconomic assessment of Sardinella lemuru fisheries management in Muncar, Banyuwangi, Indonesia. **Social Sciences & Humanities Open**, v. 11, p. 101277. https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.101277.

KNOWLER, D. A review of selected bioeconomic models with environmental quality effects. **Environmental and Resource Economics**, v. 22, n. 1, p. 51-81, 2002. DOI: 10.1023/A:1021151809501. https://doi.org/10.1023/A:1021151809501.

MORRIS, M. D. Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. **Technometrics**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 161–174, 1991. DOI: https://doi.org/10.1080/00401706.1991.10484804.

POSIT. **RStudio**: Integrated Development Environment for R. Boston, MA: Posit Software, PBC, 2025. Disponível em: http://www.posit.co/.

RAZAVI, S. *et al*. The Future of Sensitivity Analysis: An essential discipline for systems modeling and policy support. **Environmental Modelling and Software**, [S. l.], v. 137, p. 104954, mar. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104954.

SALTELLI, A. *et al*. **Global Sensitivity Analysis**: The Primer. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2008. Disponível em: https://www.andreasaltelli.eu/file/repository/Primer_Corrected_2022.pdf.

SCHAEFER, M. Some Considerations of Population Dynamics and Economics in Relation to the Management of the Commercial Marine Fisheries. **Journal of the Fisheries Research Board of Canada**, [S. l.], v. 14, n. 5, p. 669–681, 1957. DOI: https://doi.org/10.1139/f57-025.