

Nexus água-energia-alimento no Brasil: Uma análise quantitativa dos *trade-offs* e sinergias

Water-energy-food nexus in Brazil: A quantitative analysis of trade-offs and synergies

Autor(es): Heris Coutinho Vieira; Adriana Ferreira Silva

Filiação: Universidade de Brasília; Universidade Federal de Goiás

E-mail: vieira.heris@gmail.com; adsilva@ufg.br

GT04. Questão ambiental, agroecologia e sustentabilidade

Resumo

Esse estudo discute o tema do Nexus água-energia-alimento (FEW Nexus) no Brasil, em um contexto cuja demanda por recursos naturais está em crescente ascensão. De forma específica, o estudo tem como objetivo analisar as interações entre os eixos da água, energia e alimentos, identificando sinergias e *trade-offs* entre 42 indicadores nacionais. Utilizando o coeficiente de correlação de Spearman, foram exploradas as relações entre os eixos, com o intuito de promover políticas integradas e sustentáveis. Os resultados mostram que as interações são complexas, com predominância de sinergias no eixo de energia (76,36%) e no eixo de alimentos (59,46%), enquanto no eixo da água as sinergias (52,54%) e *trade-offs* (40,68%) estiveram mais equilibrados. No eixo da água, destacou-se a correlação positiva entre o volume de água tratada e a área de lagos e rios, mas também foram observados desafios relacionados à eficiência no uso da água e ao consumo em setores como irrigação e indústria. No eixo de energia, as fontes renováveis, como solar e eólica, mostraram-se fundamentais para reduzir emissões de CO₂ e melhorar a eficiência energética, embora a dependência de combustíveis fósseis ainda represente um desafio. No eixo de alimentos, a produção agrícola correlacionou-se positivamente com o uso eficiente de água e energia, mas *trade-offs* foram observados em relação à desnutrição e obesidade infantil, indicando que o aumento da produção nem sempre garante segurança alimentar para todos. O estudo conclui que a abordagem do FEW Nexus é essencial para a formulação de políticas públicas que promovam sinergias e mitiguem *trade-offs*, visando a segurança hídrica, energética e alimentar no Brasil. Apesar das limitações relacionadas à disponibilidade de dados e à complexidade das interações, entende-se que a análise oferece insights valiosos para a construção de sistemas agroalimentares mais sustentáveis e resilientes.

Palavras-chave: Nexus água-energia-alimentos; Sinergias; *Trade-offs*; Desenvolvimento Sustentável.

Abstract: This study discusses Brazil's Water-Energy-Food Nexus (FEW Nexus) in the context of increasing demand for natural resources. It analyzes the interactions among the water, energy, and food sectors, identifying synergies and trade-offs across 42 national indicators. By using Spearman's correlation coefficient, the study explores the relationships between these sectors with the aim of promoting integrated and sustainable policies. The findings indicate that these interactions are complex, with a predominance of synergies in the energy sector (76.36%) and the food sector (59.46%). In contrast, in the water sector, synergies (52.54%) and trade-offs (40.68%) were more balanced. In the water sector, a positive correlation was observed between the volume of treated water and the area of lakes and rivers. However, challenges related to water use efficiency and consumption in sectors such as irrigation and industry were also identified. In the energy sector, renewable sources, such as solar and wind energy, proved essential for reducing CO₂ emissions and improving energy efficiency, although dependence on fossil fuels remains challenging. In the food sector, agricultural production was positively correlated with efficient water and energy use; however, trade-offs were observed concerning malnutrition and childhood obesity, indicating that increased production does not necessarily ensure food security for all. The study concludes that the FEW Nexus approach is essential for formulating public policies that enhance synergies and mitigate trade-offs to ensure water, energy, and food security in Brazil. Despite data availability limitations and the interactions' complexity, the analysis provides valuable insights for developing more sustainable and resilient agri-food systems.

Key words: Water-Energy-Food Nexus, synergies; trade-offs, sustainable development

1. Introdução

O atual sistema de produção agroalimentar é caracterizado por elevado rendimento da produção agrícola, baseado no uso intensivo de agroquímicos e maquinários. Voltado à maximização do rendimento dos fatores de produção (capital trabalho e terra), a busca pelo aumento da produtividade agrícola passou a ser compreendido como essencial para sustentar o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico. Desde então, a métrica do rendimento tornou-se aspecto central da produção agrícola (Pingali, 2012; Depecker; Vatin, 2016; DeFries *et al.*, 2015).

Embora tenha favorecido o aumento da produção e redução dos preços dos alimentos, esse modelo também trouxe consigo efeitos adversos não desejáveis. Ao se concentrar no aumento da produtividade, foram desconsiderados aspectos relacionados à sociedade, meio ambiente e economia (Zurek *et al.*, 2022; Cassidy *et al.*, 2013). O uso intensivo de fertilizantes e defensivos levou à contaminação e degradação do solo e dos recursos hídricos. Sócio e economicamente registrou-se o deslocamento forçado de pequenos agricultores e aumento da desigualdade nas áreas rurais, culminando na perda da diversidade agrícola de cultivos locais e tradicionais em favor de variedades de alto rendimento (Pingali, 2012; Cassidy *et al.*, 2013).

Diante desses efeitos, modelos agrícolas mais sustentáveis passaram a ser propostos. Sloat *et al.* (2023) destacam que novos sistemas de produção têm buscado integrar os princípios ecológicos e sociais na produção de alimentos, baseados na preservação dos recursos naturais e na resiliência dos sistemas agrícolas, e centram-se em avanços que favorecem a mitigação dos efeitos adversos do atual modelo agroalimentar e das implicações associadas às mudanças climáticas.

À medida que tais modelos avançam, progridem também a importância de novas métricas da avaliação do rendimento agrícola, para além das medidas convencionais baseadas na maximização dos fatores de produção. Nicolétis *et al.* (2019) ao refletir sobre o tema, destaca a necessidade de avançar em medidas que incluem múltiplos indicadores, como a abordagem integrada da “*landscape scale*”, que contempla os *trade-offs* e sinergias entre a provisão de serviços ecossistêmicos. Com uma ampla discussão de estudos ao redor do mundo, Nicolétis *et al.* (2019), também destaca modelos que tratam da inclusão de serviços ecossistêmicos, como ciclos de energia e materiais, armazenamento de carbono, manutenção da fertilidade do solo e ciclagem de nutrientes, que são fundamentais para a produção sustentável e a saúde dos ecossistemas.

No Brasil, a abordagem do FEW Nexus ainda tem sido pouco explorada, sendo tal abordagem empregada em contextos específicos, como na gestão de recursos hídricos em regiões semiáridas, na busca por alternativas energéticas sustentáveis para a produção agrícola e na promoção de práticas agroecológicas que visam a segurança alimentar e o manejo adequado dos recursos naturais (Giatti *et al.*, 2016; Silva; Vianna, 2022; Albrecht *et al.*, 2018).

Concomitantemente, as análises quantitativas sobre a inter-relação dos eixos do FEW Nexus são limitadas em âmbito brasileiro. Sobretudo, conforme destacado por Newell *et al.* (2019), nas pesquisas qualitativas voltadas para a exploração do FEW Nexus, a abordagem das ciências ambientais predomina, enquanto a das ciências sociais permanece negligenciado. No

entanto, este estudo busca preencher essa lacuna, através da seguinte delimitação do problema de pesquisa: Qual o melhor método paramétrico para a abordagem FEW Nexus, a fim de materializar os cálculos para o Brasil?

Apesar dos esforços ainda limitados, a compreensão dos benefícios de adotar a abordagem está crescendo entre pesquisadores, formuladores de políticas e atores do setor agroalimentar no Brasil. A necessidade de enfrentar os desafios da segurança hídrica, energética e alimentar de forma integrada tem impulsionado um maior interesse em explorar e aplicar os princípios do FEW Nexus em diversas escalas, desde propriedades rurais até iniciativas de desenvolvimento regional.

O presente estudo se insere nesse contexto buscando compreender como a abordagem FEW Nexus pode auxiliar na construção dos sistemas agroalimentares sustentáveis. Para atingir tal objetivo, o estudo será realizado por meio de uma análise quantitativa das sinergias e *trade-offs* presentes entre 42 indicadores nacionais relacionados ao FEW Nexus. De forma específica, tem por objetivos:

- i. Estimar por meio de coeficientes de correlação e diagramas de dispersão, a relação entre os indicadores nacionais relacionados ao FEW Nexus, ou Nexus água-energia-alimento.
- ii. Identificar as sinergias e *trade-offs* existentes entre os indicadores para promover a integração de políticas sustentáveis.

Tais análises buscam contribuir com análises quantitativas sobre a avaliação do FEW Nexus, de forma a avançar em análises de interações, enfatizando a natureza interconectada entre água-energia-alimento. Entende-se que tal análise oferece informações valiosas para priorizar políticas que visem estabelecer sistemas sustentáveis de gerenciamento de recursos.

2. Revisão da Literatura

A abordagem FEW Nexus foi proposta pelo Instituto Ambiental de Estocolmo em 2011, no relatório "Water, Energy, and Food Security FEW Nexus: Solutions for the Green Economy." Esta abordagem destaca a importância de considerar as interconexões entre água, energia e alimentos para atender às necessidades sociais, ambientais e econômicas do país. De acordo com (Kaddoura; El Khatib, 2017), a abordagem FEW Nexus tem se destacado por sua capacidade de integrar aspectos sociais, ambientais e econômicos do país, possibilitando a identificação de possíveis compensações. Quando comparada aos modelos convencionais

relacionados a indicadores de produtividade por área, a capacidade de integração presentes no FEW Nexus se destaca por sua capacidade de integrar de forma holística os aspectos fundamentais da produção agroalimentar, destacando oportunidades para melhorar a eficiência e reduzir os impactos negativos sobre o meio ambiente.

No que diz respeito à métrica, os estudos que fazem uso abordagem do FEW Nexus tem buscado combinar métodos de avaliação quantitativos e qualitativos, realizando ajustes conforme o foco, disponibilidade de dados e as prioridades da sociedade. Essa flexibilidade apresenta vantagens significativas, pois permite a adaptação da avaliação às especificidades de cada contexto e a consideração de aspectos qualitativos que podem ser difíceis de capturar apenas por meio de métricas quantitativas.

Além disso, a abordagem oferece a vantagem de promover a integração de diferentes disciplinas e setores, incentivando a colaboração entre especialistas em água, energia, alimentos, sustentabilidade e outros campos relevantes. Isso contribui para uma compreensão mais holística dos sistemas agroalimentares e para o desenvolvimento de soluções mais abrangentes e efetivas.

Apesar das vantagens, a abordagem FEW Nexus também apresenta desafios, especialmente no que diz respeito à coleta de dados abrangentes e à análise integrada das inter-relações entre água, energia e alimentos. A integração de diferentes fontes de dados e a consideração de variáveis complexas requerem esforços significativos para garantir a precisão e relevância das análises realizadas dentro desse enfoque. A dificuldade de emprego de métricas padronizadas e à coleta de dados abrangentes para captar a complexidade das inter-relações entre água, energia e alimentos estão entre as principais críticas à abordagem (Liu *et al.*, 2018; Dargin *et al.*, 2019; Endo *et al.*, 2015a, 2015b)

Paralelamente, a abordagem FEW Nexus, proposta originalmente, teve seu foco voltado a contextos globais e, portanto, abrangente. Nesse sentido, sua aplicabilidade em análises mais específicas e de menor dimensão geográfica precisa ser adaptada, destacando que as soluções que podem promover um uso mais eficiente e sustentável dos recursos naturais em diferentes regiões (Zhang *et al.*, 2019). No caso do Brasil, caracterizados por heterogeneidades regionais e sociogeográficas, ainda são necessários estudos e adaptações para compreender a viabilidade e eficácia da abordagem em um contexto tão diversificado quanto o agrícola brasileiro.

Conforme a Conferência de Bonn, em 2011, o tema “Nexus água-energia-alimentos e Segurança Alimentar: Soluções para uma Economia Verde”, se tornou um importante fator a ser explorado e debatido entre os países, devido aos riscos futuros para a humanidade. O

governo Alemão organizou tal debate juntamente com The World Economic Forum (WEF) para que no Rio+20, na Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, em 2012, o assunto fosse mais debatido e compreendido, como por exemplo, a meta global do clima e a minimização de danos das mudanças ambientais (Justino, 2023).

Como resultado de tal debate corroborou para a criação do programa de recursos Nexus que é o principal centro de conhecimento global para gestão do Nexus água, energia, alimentos e segurança alimentar, além disso, o programa oferece cursos educacionais, livros e publicações, ferramentas e bancos de dados e treinamentos sobre o Nexus.

Atualmente, a ideia principal do conceito de FEW Nexus é entender as relações e colaborações entre diferentes elementos, buscando minimizar as interdependências e compensações entre as cadeias de produção e fornecimento de recursos escassos. Isso é crucial para diminuir a fragilidade e suscetibilidade de grupos populacionais no mundo (Hoff, 2011).

Tais discussões a respeito do conceito e abordagem atual do FEW Nexus partem de interações complexas, o que exige avaliações integradas e colaborativas entre os diversos campos de estudos e setores, promovendo a eficiência no uso de recursos e a sustentabilidade ambiental. O fato é que essa abordagem integrada não apenas facilita a identificação de oportunidades para otimização, mas também fortalece a resiliência das sociedades frente aos desafios socioeconômicos relacionados à tríade água-energia-alimento. Esse estudo se insere nesse contexto, buscando avançar na compreensão das dinâmicas do FEW Nexus, propondo um quadro que permita a análise e implementação de estratégias mais eficazes para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos, energéticos e alimentares.

3. Metodologia e Dados

Nesse estudo o foco é identificar matematicamente as sinergias e *trade-offs* entre os eixos do FEW Nexus, seguindo a abordagem metodológica sugerida por Pradhan *et al.* (2017), que analisaram as interações entre os objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), utilizando um conjunto abrangente de indicadores oficiais. Para isso, os dados de 227 países foram avaliados por meio da correlação de Spearman.

Além disso, esta abordagem também foi utilizada por Putra *et al.* (2020), que conduziu uma análise sistemática da segurança do FEW Nexus no sul da Ásia, onde encontraram uma parcela maior de *trade-offs* que sinergias nos eixos de água e energia, além de uma parcela maior de sinergias que *trade-offs* entre os eixos do FEW Nexus. Quanto a pesquisa de An (2022), os resultados mostraram que na Coreia do Sul, as interações que envolvem energia

foram mais expressivas, em particular, no tocante as energias renováveis que sinalizaram uma melhoria da estrutura FEW Nexus. Por fim, Hao *et al.* (2022), propôs uma nova estrutura analítica para avaliação da segurança do FEW Nexus em cinco países da Ásia central, além de políticas públicas voltadas para mitigar os efeitos da escassez de recursos, como priorizar a alocação e fornecimentos de alimentos para os países analisados.

No presente estudo, a metodologia adotada seguiu a abordagem proposta por Pradhan *et al.* (2017) para identificar matematicamente as interações entre 42 indicadores de segurança do FEW Nexu, classificando tais interações como sinergias (positivas) e *trade-offs* (negativas). Para isso, foi aplicada a correlação de Spearman, uma técnica estatística não paramétrica que permite avaliar relações monotônicas entre variáveis, sendo menos sensível a outliers e adequada para detectar tantas sinergias (correlações positivas) quanto *trade-offs* (correlações negativas).

A seleção das variáveis seguiu as experiências anteriores de An (2022) e Hao et al. (2022), mas foram adaptados à realidade brasileira referente aos eixos da água energia e alimentos, de forma a evitar interpretações equivocadas e minimizar o risco de identificar falsas correlações, permitindo uma análise mais precisa das interdependências entre os eixos do FEW Nexus.

Nessa abordagem metodológica, um sinal positivo foi atribuído aos indicadores que melhoraram o cenário agroalimentar do FEW Nexus, neste caso, quando o valor do indicador escolhido aumentar. Enquanto, um sinal negativo foi atribuído aos indicadores que reduziram a segurança da eficiência de um dos setores do FEW Nexus.

O coeficiente de correlação de postos de Spearman, desenvolvido pelo estatístico Charles Spearman, em 1904, é uma medida não paramétrica que avalia a força e a direção da associação monotônica entre duas variáveis. Essa técnica exige que as variáveis X e Y, cuja relação se deseja analisar, sejam mensuradas, no mínimo, em uma escala ordinal, permitindo a ordenação dos dados sem pressupor distribuições específicas. Em situações em que as variáveis quantitativas não seguem uma distribuição conjunta normal bivariada, o coeficiente de Spearman apresenta-se como uma alternativa robusta ao coeficiente de correlação de Pearson, pois não depende da suposição de linearidade e é menos sensível à presença de outliers (Siegel, 1975). No presente estudo, o coeficiente de correlação de Spearman foi calculado usando a seguinte equação:

$$r_s = 1 - \frac{6\sum d^2}{n(n^2-1)} \quad (1)$$

onde a sigla (r_s) é o coeficiente de correlação de classificação de Spearman, (d) é a diferença nas classificações entre os itens e (n) é o número de pares de observações.

O coeficiente de correlação varia de -1 a 1, com um valor de 1 indicando uma forte correlação positiva, -1 indicando uma correlação negativa e 0 indicando nenhuma correlação (Myers *et al.*, 2013). No entanto, ao contrário da análise de correlação de Pearson, a correlação de classificação de Spearman pode identificar as correlações para relações não lineares e pode ser aplicada a dados discretos e ordenados, se os dados puderem ser classificados.

Em contrapartida, Miot (2018) destaca que a limitação do uso de correlação de postos de Spearman são de natureza inferencial, ou seja, as análises de especulação baseiam-se na incapacidade de extrapolação das conclusões para outros tópicos de dados ou para paisagens diferentes dos estudados.

Outra limitação do método, conforme Miot (2018), é que as análises de correlação não foram originalmente desenvolvidas para prever valores ou inferir a contribuição de diversas variáveis na explicação de um determinado aspecto. Para esses propósitos, existem técnicas específicas, como a regressão e as análises multivariadas.

3.1 Dados e Fontes

As informações de base de dados utilizadas no presente estudo e suas respectivas fontes são apresentadas no Tabela 1. Na identificação das variáveis de cada eixo é atribuída iniciais, sendo *W* para relacionar os indicadores ligados ao eixo da “Água”, a inicial *E* para Energia e *F* para relacionar a Alimentação. Cada um dos três eixos foi composto por 14 indicadores descritos, totalizando 42 indicadores a serem analisados conforme suas correlações e avaliações quanto a sinergia e *trade-offs*.

TABELA 1: Seleção de indicadores para investigação do Nexus água-energia-alimento (FEW Nexus) no Brasil

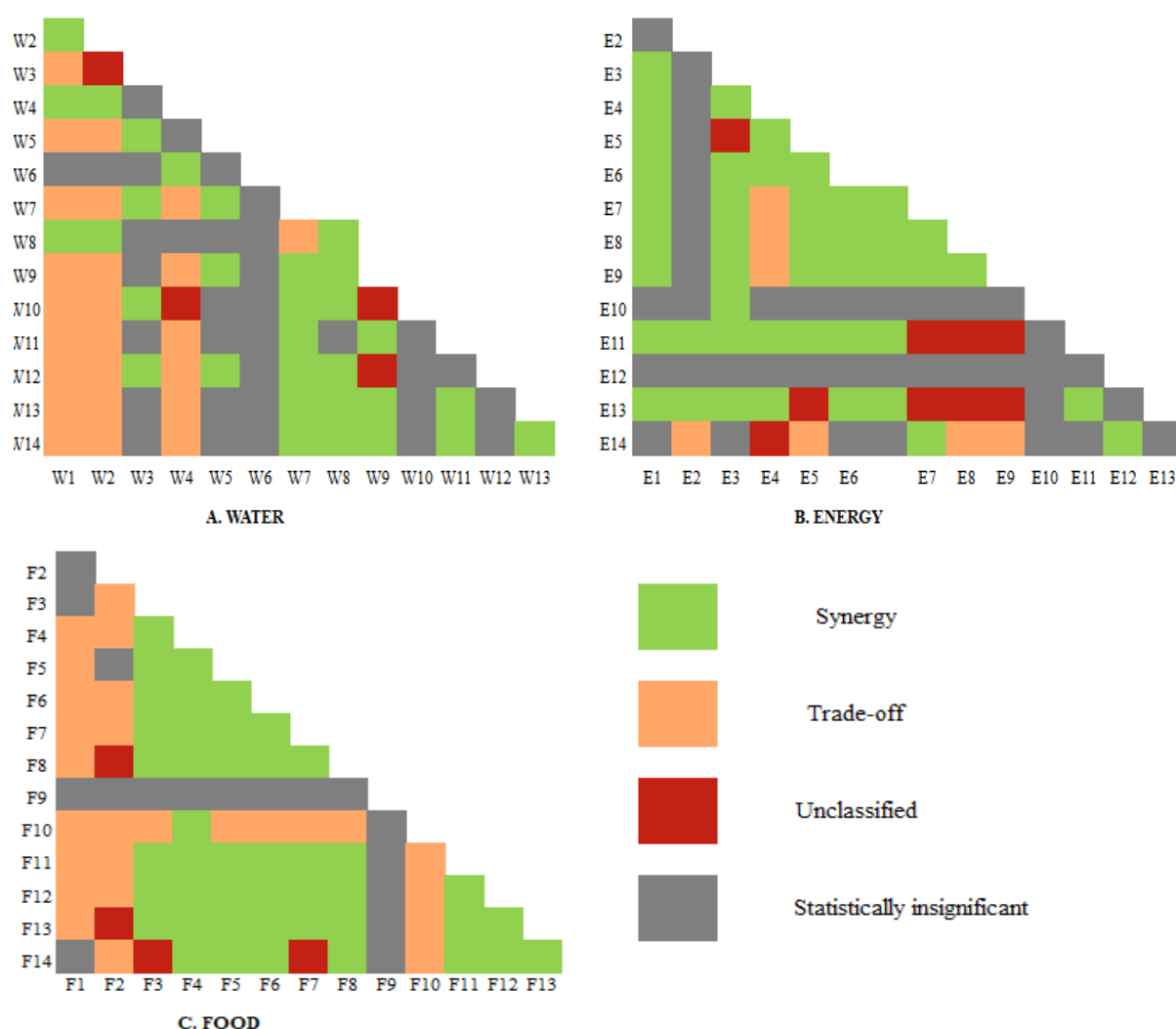
ID	Descrição	Fonte	ID	Descrição	Fonte	ID	Descrição	Fonte
W1	Volume de água produzido	MC ¹	E1	Consumo de gás de cozinha	IBGE ⁷	F1	Desnutrição infantil	MS ⁹
W2	Volume tratada em ETA	MC	E2	Energia renovável no consumo final de energia	IEA ⁸	F2	Obesidade infantil	MS
W3	Eficiência no uso da água	FAOSTAT ²	E3	Intensidade energética	IEA	F3	Emissões de CO2 na agricultura	IEA
W4	Área de lagos e rios	MAPBIOMAS ⁴	E4	Emissões de CO2 na geração de eletricidade	IEA	F4	Índice de produção alimentar da agricultura	FAOSTAT
W5	Consumo de água na irrigação	ANA ⁵	E5	Uso de energia na agricultura	IEA	F5	Índice de prod. alimentar de cereais primários	IBGE
W6	Consumo de água na indústria	ANA	E6	Consumo de eletricidade per capita	IEA	F6	Terra agricultável	MAPBIOMAS
W7	Consumo de água no abastecimento urbano	ANA	E7	Geração de eletricidade por energia solar	IEA	F7	Produção de cereais, leguminosas e oleaginosas	IBGE
W8	Consumo de água no abastecimento rural	ANA	E8	Geração de eletricidade eólica	IEA	F8	Uso de fertilizantes	FAOSTAT
W9	Consumo de água na mineração	ANA	E9	Geração de eletricidade por biocombustíveis	IEA	F9	Importação de produtos agropecuários	MAPA ¹⁰
W10	Consumo de água em termelétricas	ANA	E10	Geração por eletricidade por hidroelétricas	IEA	F10	Terra não agricultável	MAPBIOMAS
W11	População com acesso de água	MC	E11	Geração de eletricidade por carvão	IEA	F11	PTF	IPEA ¹¹
W12	Retiradas de água	OCDE ⁶	E12	Geração de eletricidade por petróleo	IEA	F12	Consumo de carne	OCDE
W13	População com acesso a esgoto	MC	E13	Geração de eletricidade por gás natural	IEA	F13	Fornecimento de comida	IBGE
W14	Volume tratado de esgoto	MC	E14	Importações de energia	IEA	F14	Movimentação ferroviária	ANTF ¹²

Fonte: Adaptado pelo autor, a partir de An, 2022. Nota: 1) Ministério das Cidades - SNIS; 2) Banco de Dados Estatísticos Corporativos da Organização para a Alimentação e Agricultura; 3) World Resources Institute; 4) Observatório do Clima; 5) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico; 6) Organização de Cooperação e o Desenvolvimento Econômico; 7) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; 8) International Energy Agency; 9) Ministério da Saúde; 10) Ministério da Agricultura e Pec.

4. Resultados e Discursões

A Figura 1 demonstra os resultados da interação entre os indicadores do FEW Nexus, dentro de cada eixo, utilizando as análises de correlação de postos de Spearman. As cores representam sinergia (verde), *trade-offs* (laranja) e não classificado (vermelho). A cor cinza indica valores estatisticamente insignificantes com p-valor acima de 0,05, que foram, por isso, excluídos da análise.

Figura 1: Interações dos indicadores de segurança hídrica, energética e alimentar no Brasil



Fonte: Resultados da pesquisa.

De maneira geral, os achados aqui apresentados indicam que a melhoria de um indicador em seu respectivo eixo pode melhorar o outro indicador e vice-versa. Como destacado por Waughray (2011) e Lankford *et al.* (2013) à medida que a demanda por água aumenta, o estresse

hídrico tende a se agravar, o que pode afetar negativamente a segurança hídrica em nível global. Isso reforça a necessidade de uma abordagem integrada que considere as interdependências entre os eixos do FEW Nexus, a fim de garantir a sustentabilidade a longo prazo dos sistemas agroalimentares

Uma análise mais detalhada da Figura 1 demonstra que os indicadores volume de água tratada (W2) e a área de lagos e rios (W4), foram positivamente correlacionados com o volume de água produzido (W1). Esse resultado corrobora para que a irrigação seja a maior consumidora de água derivada de rios, lagos e aquíferos subterrâneos (Dantas *et al.*, 2014). Todavia, o indicador de eficiência do uso da água (W3) correlacionou-se negativamente tanto com o volume de água produzido (W1) quanto de água tratada (W2).

Já o indicador de consumo de água na irrigação (W5), obteve correlação positiva com retiradas de água de bacias hidrográficas (W12). Sendo assim, a disponibilidade de água está diretamente relacionada com o aumento da produtividade nas áreas agrícolas (Falloon; Betts, 2010). Para Carmo; Dagnino e Johansen (2014), o Brasil vive uma transição de consumo, devido a melhoria da situação econômica e o aumento no consumo de água, impulsionado tanto pela ampliação do sistema de abastecimento em zonas urbanas quanto pela propensão do aumento da despesa per capita. Tendo em vista isso, o consumo de água no abastecimento rural (W8) foi correlacionado positivamente em relação ao volume de água produzido (W1), diferentemente do consumo de água no abastecimento urbano (W7) que estava relacionado negativamente com (W1).

Por sua vez, entre o consumo de água em termelétricas (W10) e retirada de água (W12) apresentam sinergias com eficiência do uso da água (W3) pela geração de energia renovável. A correlação dos indicadores de população com acesso a água (W11) e população com acesso a esgoto (W13) demonstraram sinergia com consumo de água no abastecimento urbano (W7). No Brasil, em 2022, o acesso e uso da água no abastecimento urbano foi equivalente a 23,9%, enquanto em termelétricas foram de 5% (ANA, 2024). Nesse sentido, ocorre o *trade-off* entre retirada de água (W12) em relação a área de lagos e rios (W4), cujo aumento de um indicador proporciona a redução do outro.

De forma geral, no Eixo da Água, constata-se que as correlações positivas entre os pares de variáveis, que se sobressaem em relação aos *trade-offs* novamente evidenciam sinergias e, portanto, oportunidades de melhorias no uso integrado e eficiente da água, por meio da implementação de práticas que maximizem sua disponibilidade e minimizem perdas e desperdícios (Marques *et al.*, 2020; Huckleberry; Potts, 2018).

No Eixo de energia, os indicadores relacionados às fontes de energia renovável são benéficos para o meio ambiente, pois o uso de combustíveis e as emissões de carbono liberadas na atmosfera são muito menores em comparação com as fontes não renováveis. No Brasil, as fontes de energias renováveis correspondem a mais de 40% do suprimento total de energia primária (Esparta; Lucon; Uhlig, 2004).

Sendo assim, o indicador de consumo de energia renovável (E2) em relação a importação de energia (E14) foi negativa, ou seja, quanto mais energia renovável for utilizada no Brasil, menor será a necessidade de importar energia de países vizinhos. Além disso, os indicadores (E8 e E9) demonstram o *trade-off*, onde a geração de energias eólicas e por biocombustíveis resultaram na diminuição de importação de energia (E14).

Quanto aos indicadores de energias não renováveis, carvão (E11) e gás natural (E13), constatou-se que os mesmos foram positivamente correlacionados com emissões de carbono (E4), onde o aumento da produção dessas energias emite mais carbono no meio ambiente. O consumo de energia não renovável tem efeito positivo no crescimento econômico e nas emissões de CO₂, e efeito negativo comparado ao uso de energia renovável e emissões de carbono (Amarante *et. al.*, 2021). Consoante a isso, no Brasil, houve *trade-off* na correlação entre as energias renováveis, solar (E7), eólica (E8) e biocombustíveis (E9) em relação ao indicador de emissões de CO₂ (E4).

Todavia, é consenso que a produção de energia renovável é uma das principais alternativas para a redução na geração de energias poluidoras, como carvão e petróleo. As energias renováveis são aliadas da eficiência energética, assim, as energias solares, eólica, biocombustíveis e hidroelétricas (E7-E8-E9-E10) que se correlacionaram positivamente com a intensidade energética (E3). No Brasil, a predominância das energias renováveis na matriz energética corresponde a 43% de participação. Além disso, a energia eólica e a biomassa já desempenham um papel importante como fontes renováveis, somando aproximadamente 15% da participação na matriz (Santos, 2020).

Em contrapartida, a produção de eletricidade a partir do petróleo (E12) apresentou correlação sinérgica com o indicador de importação de energia (E14), ao contrário de outros indicadores de energias não renováveis, como carvão e gás natural. Portanto, os resultados dessas interações para o Brasil foram consistentes com os encontrados em pesquisas anteriores, que indicaram que as energias renováveis têm o potencial de melhorar a segurança energética, ao passo que a queima de combustíveis fósseis impacta negativamente o meio ambiente (Gökgöz; Güvercin, 2018; An, 2022).

Em relação aos indicadores do eixo de Alimento, o aumento da movimentação de linha ferroviária (F14) e o índice de produtividade total de fatores (F11) foram positivamente correlacionados. Entretanto, foi identificada uma correlação negativa entre terras não agricultáveis (F10) e a movimentação ferroviária (F14). Nessa conjuntura, Armendariz *et al.* (2015) salienta que uma rede estruturada de abastecimento de alimentos corrobora para a redução de preços desses alimentos proporcionando às pessoas uma forma de satisfazer as necessidades alimentares.

Observou-se *trade-offs* entre produção de cereais, leguminosas e oleaginosas (F7) e índice de produção de cereais primários (F5) em relação a desnutrição infantil (F1). A produção de cereais, leguminosas e oleaginosas (F7) em proporção a obesidade infantil foi correlacionada de forma negativa, pois a redução desses grãos intensifica o consumo de produtos não saudáveis por crianças. A má-alimentação tem impacto significativo no crescimento da prevalência da obesidade e diabetes no Brasil (Coutinho; Gentil; Toral, 2008).

As terras agricultáveis (F6) e o índice de produção alimentar da agricultura (F4) no Brasil possuem sinergia. Haja visto que os agricultores familiares representam 77% de quase 5 milhões de propriedades rurais no Brasil e produzem a maior parte de alimentos consumidos diariamente (World Bank, 2024).

Conforme o World Bank (2024), os agricultores familiares brasileiros são responsáveis pela produção de 87% do cultivo de mandioca, 70% do feijão, 34% do arroz e 21% da produção de trigo. Assim, um maior apoio à agricultura familiar brasileira é fundamental para sustentar a segurança alimentar e nutricional do Brasil, nos quais a diminuição de cargas tributárias, incentivos fiscais e a logística de transporte são fatores que poderiam resolver parte do problema da fome.

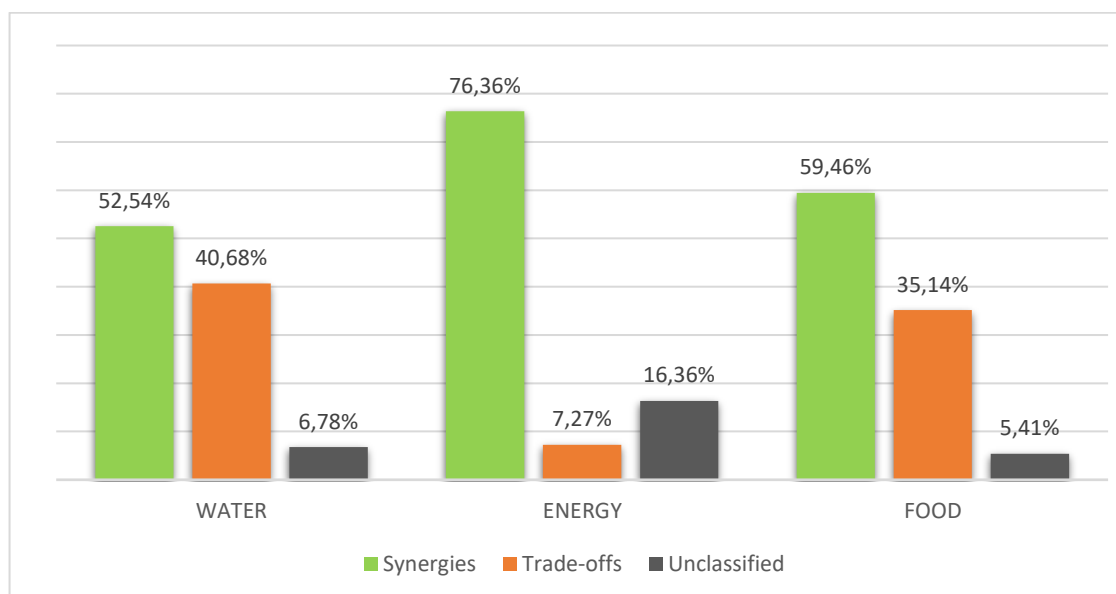
Consoante com o estudo de Sandström *et al.* (2018), o baixo incentivo nacional de um país acarreta a diminuição da produção interna de alimentos, que por sua vez, pode proporcionar o aumento de importações de alimentos equivalentes. Todavia, o estudo demonstrou que os indicadores que detêm índices de produção de alimentos, (F4-F5-F7-F11) estavam positivamente correlacionados com o fornecimento de alimentos (F13), ou seja, quanto mais produção alimentar houver nacionalmente, maior será a disponibilidade de alimento no Brasil.

O uso de fertilizantes (F8) em relação a terra agricultável (F6) foram positivamente correlacionados, no qual demonstra-se que em terras férteis para a agricultura, a utilização de produtos químicos auxilia na grande produção de alimentos. O volume de importações de fertilizantes no Brasil equivale a 76% da demanda nacional, e aproximadamente 8% do

consumo global (COMEXSTAT, 2021) Em contrapartida, em terras não agricultáveis (F10) foi negativamente correlacionado com o uso de fertilizantes (F8).

A Figura 2 mostra que a proporção de sinergias entre os indicadores do eixo da água foi de 52,54%, enquanto de *trade-offs* foram cerca de 40,68%, e a não classificação apresentou um percentual de 6,787%. Já de energia evidencia que 76,36% são sinergias, enquanto 7,27% são *trade-offs* e 16,36% são itens não classificados. Além disso, no eixo de alimentos, 59,46% retratam as sinergias, enquanto 35,14% de *trade-offs*, e 5,41% para não classificados. Esses percentuais indicam que a maior parte das interações analisadas no eixo da água favorece sinergias, sugerindo uma relação positiva entre os indicadores do FEW Nexus, e, portanto, a gestão integrada dos recursos hídricos.

Figura 2: Proporções de sinergias, *trade-offs* e itens não classificados



Fonte: Elaborado pelos autores

As interações analisadas demonstram que sinergias predominam em grande parte dos eixos, reforçando a necessidade de estratégias que ampliem a cooperação entre setores e minimizem os impactos negativos dos *trade-offs* identificados. Ao mesmo tempo, a interdependência entre os indicadores revela a importância de políticas públicas que promovam eficiência no uso dos recursos naturais e incentivem tecnologias sustentáveis, garantindo maior resiliência dos sistemas agroalimentares diante das crescentes pressões ambientais e socioeconômicas. Assim, ao reconhecer e potencializar essas interações, torna-se possível avançar na construção de um modelo de desenvolvimento sustentável, capaz de equilibrar

demanda e preservação dos recursos essenciais para a segurança hídrica, energética e alimentar do país. Diante dos resultados acima, entende-se que uma abordagem integrada permite a identificação de oportunidades de melhorias na gestão dos recursos hídricos, energéticos e alimentares no Brasil.

5. Considerações Finais

O presente estudo teve como principal objetivo analisar as interações água, energia e alimentos no Brasil, utilizando a abordagem do FEW Nexus (Nexus Água-Energia-Alimento), de forma a identificar sinergias e *trade-offs*. A metodologia empregada partiu do cálculo do coeficiente de correlação de Spearman, entre 42 indicadores nacionais relacionados ao FEW Nexus de forma a ampliar a compreensão detalhada das interconexões entre os três eixos.

Os resultados evidenciaram que as interações entre os setores são complexas e multifacetadas, com predominância de sinergias em alguns casos e *trade-offs* em outros, o que reforça a necessidade de uma abordagem holística e integrada para a gestão desses recursos. No eixo da água, observou-se que 52,54% das interações entre os indicadores foram classificadas como sinergias, enquanto 40,68% foram *trade-offs*. Isso indica que, embora haja uma relação positiva predominante entre os indicadores de água, ainda existem desafios significativos relacionados à gestão integrada dos recursos hídricos, especialmente em contextos de escassez e competição por uso.

No eixo de energia, os resultados revelaram que 76,36% das interações foram sinérgicas, destacando a importância das fontes renováveis de energia, como solar, eólica e biocombustíveis, para a redução das emissões de CO₂ e a melhoria da eficiência energética. A correlação positiva entre a geração de energia renovável e a eficiência no uso da água sugere que a expansão das fontes renováveis pode contribuir para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos. No entanto, *trade-offs* foram identificados em relação à dependência de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo, que impactam negativamente a segurança energética e ambiental.

No eixo de alimentos, 59,46% das interações foram de sinergias, com destaque para a correlação positiva entre a produção agrícola e o uso eficiente de água e energia. A correlação positiva entre o consumo de água na irrigação e a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas sugere que a disponibilidade de água é fundamental para a segurança alimentar. No entanto, *trade-offs* foram observados em relação à desnutrição e obesidade infantil, indicando

que o aumento da produção de alimentos nem sempre se traduz em melhoria da segurança alimentar e nutricional para população. Esses resultados destacam a importância de políticas que promovam não apenas o aumento da produção agrícola, mas também a distribuição equitativa dos alimentos e o acesso a dietas nutritivas e saudáveis.

O estudo apresenta limitações que devem ser consideradas. Em primeiro lugar, a disponibilidade de dados consistentes e atualizados para todos os indicadores foi uma limitação, uma vez que diferentes períodos foram empregados a depender do acesso das informações. Em segundo lugar, as interações entre os eixos da água, energia e alimentos são altamente complexas e dinâmicas, variando significativamente em diferentes contextos regionais e temporais, o que a análise quantitativa, embora útil, não captura em sua totalidade. Por fim, o uso do coeficiente de correlação de Spearman, embora robusto para identificar relações monotônicas, não permite inferir causalidade entre as variáveis, e a presença de outliers ou relações não lineares pode afetar os resultados.

Entende-se que apesar das limitações apontadas, a abordagem do FEW Nexus constitui uma ferramenta valiosa na obtenção insights para a construção de sistemas agroalimentares mais resilientes e sustentáveis. Ademais, a análise quantitativa realizada oferece uma base sólida para futuras pesquisas e formulação de políticas mais eficazes no contexto brasileiro. Por fim, considerando que o presente estudo focou em uma análise nacional, sugere-se que pesquisas futuras explorem análises mais detalhadas e novas técnicas em nível estadual ou municipal para capturar melhor as especificidades

Referências

ALBRECHT, Tamee R.; CROOTOF, Arica; SCOTT, Christopher A. The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 4, p. 043002, 2018.

ALLOUCHE, Jeremy; MIDDLETON, Carl; GYAWALI, Dipak. **The water–food–energy nexus: power, politics, and justice**. Routledge, 2019. Chapter 4 - The Knowledge Nexus and Transdisciplinarity. p. 55-79. Doi: <https://doi.org/10.4337/9781839100550.00009>. Acesso em 21 mai. 2024.

AMARANTE, José Carlos Araujo et al. A relação entre crescimento econômico, consumo de energias renovável e não renovável e emissões de CO₂: evidências empíricas para o Brasil. **Greenhouse Gases: Science and Technology**, 2021.

AN, Daehan (2022). Interactions in water-energy-food security nexus: A case study of South Korea. **Frontiers in Water**. 4. 943053. 10.3389/frwa.2022.943053.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023: informe anual** / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – Brasília-DF, 2024. Disponível em <https://www.snirh.gov.br/porta/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>

ARMENDARIZ, V; ARMENIA, S.and ATZORI, A. S. (2015) “Understanding the dynamics of food supply and distribution systems (FSDS),” in **Proceedings of the 33rd International Conference of the System Dynamics Society** (Cambridge, MA).

CARMO, Roberto Luiz do; DAGNINO, Ricardo de Sampaio; JOHANSEN, Igor Cavallini. Transição demográfica e transição do consumo urbano de água no Brasil. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 31, p. 169-190, 2014.

CASSIDY, Emily S. et al. Redefining agricultural yields: from tonnes to people nourished per hectare. **Environmental research letters**, v. 8, n. 3, p. 034015, 2013.

COMEXSTAT – Estatísticas de Comércio Exterior do Brasil. (2021). Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home> Acesso em: fev. 2022.

COUTINHO, Janine Giuberti; GENTIL, Patrícia Chaves; TORAL, Natacha. A desnutrição e obesidade no Brasil: o enfrentamento com base na agenda única da nutrição. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 24, p. s332-s340, 2008.

DARGIN, Jennifer; DAHER, Bassel; MOHTAR, Rabi H. Complexity versus simplicity in water energy food nexus (WEF) assessment tools. **Science of the Total Environment**, v. 650, p. 1566-1575, 2019.

DEFRIES, Ruth et al. Synergies and trade-offs for sustainable agriculture: Nutritional yields and climate-resilience for cereal crops in Central India. **Global Food Security**, v. 11, p. 44-53, 2015.

DEPECKER, T., and F. VATIN. 2016. “Taking Stock and Yielding a Return: Agricultural Accounting, Agronomy and Chemical Statics in the Early-Nineteenth Century.” **Accounting History Review**. 2016, v. 26, edição 2, 107–129.

ENDO, Aiko; BURNETT, Kimberly; ORENCIO, Pedcris; KUMAZAW, Terukazu; WADA, Christopher; ISHII, Akira; TSURITA, Izumi; RANIGUCHI, Makoto. (2015). Methods of the Water-Energy-Food Nexus. **Water**. 7. 10.3390/w7105806.

ENDO, Aiko; TSURITA, Izumi; BURNETT, Kimberly; ORENCIO, Pedcris. (2015). A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. **Journal of Hydrology: Regional Studies**. 11. 10.1016/j.ejrh.2015.11.010.

ESPARTA, A. Ricardo J.; LUCON, Oswaldo S.; UHLIG, Alexandre. Energia renovável no Brasil. In: **X Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro**. 2004.

FALLOON, Pete; BETTS, Richard. Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation—the importance of an integrated approach. **Science of the total environment**, v. 408, n. 23, p. 5667-5687, 2010.

GIATTI, Leandro; JACOBI, Pedro Roberto; FAVARO, Ana; EMPINOTTI, Vanessa. (2016). O nexo água, energia e alimentos no contexto da Metrópole Paulista. **Estudos Avançados**. 30. 43-61. 10.1590/s0103-40142016.30880005.

GOKGOZ, F. and GUVERCIN, M. T. (2018). Energy security and renewable energy efficiency in EU. **Renew. Sustain. Energy Rev.** 96, 226–239. doi: 10.1016/j.rser.2018.07.046

HAO, L., WANG, P., YU, J.; RUAN, H. (2022). An integrative analytical framework of water-energy-food security for sustainable development at the country scale: A case study of five Central Asian countries. **J. Hydrol.** 607:127530. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127530.

HOFF, H. (2011). Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. **Stockholm Environment Institute**, Stockholm. Disponível em: <https://www.water-energy-food.org/resources/bonn2011-nexus-conference-background-paper-understanding-the-nexus-by-sei>. Acesso em 11 mai. 2024.

HUCKLEBERR, J. K., & POTTS, M. D. (2018). Constraints to implementing the food-energy-water nexus concept: Governance in the Lower Colorado River Basin. In **Environmental Science & Policy** (Vol. 92, p. 289). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.11.027>

JUSTINO, Guilherme. **Conferência de Bonn sobre Mudanças Climáticas quer preparar terreno para avanços na COP28**. São Paulo: Um só Planeta - Clima, 5 de junho. 2023. Disponível em: < <https://umsoplaneta.globo.com/clima/noticia/2023/06/05/conferencia-de-bonn-sobre-mudancas-climaticas-quer-preparar-terreno-para-avancos-na-cop28.ghtml> > Acesso em: 1 de abr. 2024.

KADDOURA, Saeed; EL KHATIB, Sameh. Review of water-energy-food Nexus tools to improve the Nexus modelling approach for integrated policy making. **Environmental Science & Policy**, v. 77, p. 114-121, 2017.

LANKFORD, B., BAKKER, K., ZEITOUN, M.; CONWAY, D. (2013). Water Security: Principles, Perspectives and Practices. New York, NY: **Earthscan; Routledge**. doi: 10.4324/9780203113202

LIU, J., Hull, V., Godfray, H. C. J., Tilman, D., Gleick, P., Hoff, H., *et al.* (2018). Nexus approaches to global sustainable development. **Nature Sustainability** 1, 466–476. doi: 10.1038/s41893-018-0135-8

MARQUES, D. V., BARCELOS, R. L., & MAGNAGO, R. F. (2020). Alternativas para demanda de água e energia elétrica para o município de Governador Celso Ramos. In Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental (Vol. 9, p. 70). Universidade do Sul de Santa Catarina. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e0202070-90>

MIOT, Hélio Amante. Análise de correlação em estudos clínicos e experimentais. **Jornal Vascular Brasileiro**, v. 17, n. 4, p. 275-279, 2018.

NEWELL, Joshua P.; GOLDSTEIN, Benjamin; FOSTER, Alec. A 40-year review of food–energy–water nexus literature and its application to the urban scale. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 7, p. 073003, 2019.

NICOLÉTIS, Évariste et al. Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. 2019. Disponível em <https://agritrop.cirad.fr/604473/1/604473.pdf>.

PINGALI, Prabhu L. Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. **The Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 31, p. 1-7, ano. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109>.

PRADHAN, Prajal; COSTA, Luís; RYBSKI, Diego; LUCHT, Wolfgang; KROPP, Jürgen. (2017). A Systematic Study of Sustainable Development Goal (SDG) Interactions. *Earth's Future*. 5. 10.1002/2017ef000632.

PUTRA, M. P. I. F., PRADHAN, P., and Kropp, J. P. (2020). **A systematic analysis of water-energy-food security nexus: a South Asian case study**. *Sci. Total Environ.* 728:138451. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138451

SANDSTROM, V., LEHIKONEN, E.; PELTONEN-SAINIO, P. (2018). Replacing imports of crop based commodities by domestic production in Finland: potential to reduce virtual water imports. **Front. Sustain. Food Syst.** 2:67. doi: 10.3389/fsufs.2018.00067

SANTOS, Edson Pereira dos. **Mercado no Brasil para uso de energias renováveis e ações de eficiência energética**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85133/tde-02102020-154629/>. Acesso em: 10 jun. 2024

SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil; 1975.

SILVA, Paulo Renato; VIANNA, João Nildo Souza. A Região de MATOPIBA (Brasil) e o Nexus Água-Energia-Alimentos. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 59, 2022. DOI: 10.5380/dma.v59i0.78325. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/78325>. Acesso em: 10 fev. 2024.

SLOAT, Lindsey; RAY, Deepak; GARCIA, Andrea; CASSIDY, Emily; HANSON, Craig. World Resources Institute Brasil. O mundo está cultivando mais alimentos, mas não para alimentação. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/o-mundo-esta-cultivando-mais-alimentos-mas-nao-para-alimentacao>. Acesso em: 1 jul. 2024.

WAUGHRAY, D. (2011). Water Security: The Water-Food-Energy-Climate Nexus. **The World Economic Forum Water Initiative**. Washington, DC: Island Press.

WORLD BANK (2024). World Bank and Federal and State Governments Join Forces to Support Family Farmers in Brazil. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/11/07/brazil-world-bank-federal-state-governments-support-family-farmers>

ZHANG, P., ZHOU, Y., XIE, Y., WANG, Y., LI, B., LI, B., JIA, Q., YANG, Z., CAI, Y. (2021). Assessment of the water-energy-food nexus under spatial and social complexities: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao. **Journal of environmental management**, 299, 113664. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113664>

ZUREK, Monika; HEBINCK, Aniek; SELOMANE, Odirilwe. Climate change and the urgency to transform food systems. **Science**, v. 376, n. 6600, p. 1416-1421, 2022.