

**MÉTODOS QUANTITATIVOS PARA AVALIAÇÃO WEF NEXUS NA
AGRICULTURA: UMA REVISÃO DA LITERATURA**
**QUANTITATIVE METHODS FOR ASSESSING WEF NEXUS IN AGRICULTURE: A
LITERATURE REVIEW**

**Maria Clara Batista Santos¹, Arthur Leandro Guerra Pires², Sandra Naomi Morioka³,
Mário Otávio Batalha⁴**

**^{1,4}Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), ²Universidade Federal de Itajubá
(UNIFEI), ³Universidade Federal da Paraíba (UFPB)**

**E-mail: mcbsantos@estudante.ufscar.br¹, a.guerrapires@hotmail.com²,
sandra.morioka@academico.ufpb.br³, dmob@ufscar.br⁴**

Grupo de Trabalho (GT): GT04. Questão ambiental, agroecologia e sustentabilidade

Resumo

Uma possível lente para visualizar o desenvolvimento sustentável e a segurança de recursos é a abordagem *Water-Energy-Food Nexus* (WEF Nexus). Ao colocar a água, energia e a segurança alimentar no centro dos debates, esta abordagem internaliza os impactos sociais e ambientais e orienta políticas setoriais. Na agricultura, exemplo chave das interações WEF Nexus, diferentes níveis de disponibilidade desses recursos podem afetar o crescimento das culturas, produtividade, eficiência, os nutrientes e a erosão do solo. À luz da natureza complexa e dinâmica do WEF Nexus, torna-se necessário medir e avaliar o impacto de mudanças em diferentes componentes. No entanto, os pesquisadores acreditam que há uma limitação na implementação de modelos WEF Nexus, e necessidade de mais investigação. Nesse contexto, este trabalho apresenta os resultados de uma Revisão Sistemática da Literatura realizada com 36 artigos encontrados nas bases de dados Web of Science e Scopus. Como resultados, foi possível constatar que as publicações sobre o tema são recentes e apresentam crescimento a partir do ano de 2018. Nos artigos revisados, também foi possível verificar os principais *journals*, autores mais importantes que estudam a temática, síntese dos principais estudos, elementos interligados, técnicas quantitativas e palavras-chave. Dentre as palavras-chave usadas ao longo dos anos, as mais atuais revelam interesse dos investigadores por “system dynamics modeling”, “water footprint” e “integrated modeling”, tais assuntos poderão ser melhor explorados em avaliações WEF Nexus futuras a fim de contribuir para a sustentabilidade na agricultura.

Palavras-chave: Water-Energy-Food Nexus; segurança; sustentabilidade; métodos quantitativos; agricultura.

Abstract

One possible lens for viewing sustainable development and resource security is the Water-Energy-Food Nexus (WEF Nexus) approach. By placing water, energy, and food security at the center of debates, this approach internalizes social and environmental impacts and guides sectoral policies. In agriculture, a key example of WEF Nexus interactions, different levels of availability of these resources can affect crop growth, productivity, efficiency, nutrients, and soil erosion. In light of the complex and dynamic nature of the WEF Nexus, it becomes necessary to measure and assess the impact of changes in different components. However, researchers believe that there is a limitation in the implementation of WEF Nexus models, and need for further research. In this context, this paper presents the results of a Systematic Literature Review conducted with 36 articles found in the Web of Science and Scopus databases. As results, it was possible to see that the publications on the theme are recent and show growth from the year 2018. In the reviewed articles, it was also possible to verify the main journals, most important authors who study the theme, synthesis of the main studies, interconnected elements, quantitative techniques and keywords. Among the keywords used over the years, the most current ones reveal researchers' interest in "system dynamics modeling", "water footprint" and "integrated modeling", such subjects could be better explored in future WEF Nexus assessments in order to contribute to sustainability in agriculture.

Key words: Water-Energy-Food Nexus; security; sustainability; quantitative methods; agriculture.



1. Introdução

Apesar dos desafios ligados ao desenvolvimento sustentável não serem uma chamada global recente (MEADOWS et al., 1972; MEADOWS; MEADOWS; RANDERS, 2004), ainda nos esforçamos para abordar essas questões adequadamente. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ou metas globais) das Nações Unidas para 2030 enquadram os principais desafios a serem enfrentados pela sociedade (UNITED NATIONS, 2015). Uma possível lente para visualizar o desenvolvimento sustentável, bem como sinergias e *trade-offs* associados é a abordagem *Water-Energy-Food Nexus* (WEF Nexus), proposto pela Conferência de Bonn 2011 (HOFF, 2011).

A necessidade de garantir a segurança hídrica, energética e alimentar decorre de tendências significativas, como o rápido aumento da demanda devido ao crescimento populacional, maior vulnerabilidade das pessoas e dos ecossistemas decorrentes das mudanças climáticas, novas infraestruturas e adaptações das cidades para lidar com altas taxas de urbanização e intensificação de externalidades para regiões mais vulneráveis com a globalização (HOFF, 2011; KURIAN, 2017).

O WEF Nexus foi abordado pela literatura acadêmica e pela formulação de políticas, como uma nova perspectiva para lidar com recursos complexos e desafios de desenvolvimento. Ao colocar a água, a energia e a segurança alimentar no centro dos debates, busca internalizar os impactos sociais e ambientais e orientar as políticas setoriais (ALBRECHT; CROOTOFF; SCOTT, 2018). É válido ressaltar que ao invés de modelos unidimensionais, que se concentram apenas em um subsistema, o WEF Nexus busca gerenciar recursos com interconexões complexas entre si.

Na agricultura, exemplo chave das interações WEF Nexus, diferentes níveis de disponibilidade de água podem afetar o crescimento das culturas, a eficiência da energia, nutrientes e a erosão do solo (TIAN et al., 2018). A disponibilidade de energia limita as práticas de manejo agrícola, como aplicação de fertilizantes, lavoura, colheita, drenagem, bombeamento de água e irrigação. Ao passo que, a produção agrícola consome água e energia (LI et al., 2019), contribui para a matéria-prima de biocombustíveis e o consumo de água agrícola compete com a demanda de água na geração de energia (SMITH et al., 2020).

À luz da natureza complexa e dinâmica do WEF Nexus, torna-se necessário medir diferentes cenários e avaliar o impacto das mudanças em diferentes componentes. As revisões disponíveis publicadas na literatura sobre sistemas WEF Nexus e gerenciamento de recursos são numerosas e multidimensionais (NAMANY; AL-ANSARI; GOVINDAN, 2019). Uma parte se concentrou em ferramentas analíticas e estatísticas para quantificar as interações do WEF Nexus (ALBRECHT; CROOTOFF; SCOTT, 2018), outras abrangeram conceitos, questões e métodos (ZHANG et al., 2018). Por outro lado, numerosos estudos tentaram implementar modelos WEF Nexus (DAS; SAHOO; PANDA, 2020; SMAJGL; WARD; PLUSCHKE, 2016; WICHELS, 2017). No entanto, os pesquisadores acreditam que há uma limitação na implementação de modelos WEF Nexus, e necessidade de mais investigação (MIDDLETON et al., 2015; SOLEIMANIAN; AFSHAR; MOLAJOU, 2022).

Neste sentido, o objetivo deste estudo é identificar e avaliar os métodos de pesquisa empregados na aplicação da modelagem, otimização, programação e simulação do WEF Nexus na agricultura. Além disso, o estudo abordou a seguinte questão de pesquisa: Quais os métodos de pesquisa mais utilizados para abordar o WEF Nexus em tal contexto? Desta forma, busca-se contribuir com limitações e potencialidades que podem apoiar o processo de operacionalização dos métodos utilizados nesta área. Por fim, o estudo foi dividido em uma seção introdutória, seguida de uma seção de revisão bibliográfica dos principais conceitos



relacionados, logo após as seções de método, resultados e discussão, e por fim as seções de conclusão, agradecimentos e referências bibliográficas.

2. Revisão bibliográfica

2.1 A abordagem WEF Nexus

O conceito WEF Nexus ganhou destaque como uma forma contemporânea de entender e abordar o desenvolvimento sustentável (PANDEY; SHRESTHA, 2017). Esta abordagem visa identificar compensações e sinergias entre água, energia e sistemas alimentares, internalizar impactos sociais e ambientais e orientar o desenvolvimento de políticas intersetoriais (ALBRECHT; CROOTOF; SCOTT, 2018).

A literatura sobre WEF Nexus tem se preocupado constantemente em investigar novas e melhores formas de mensurar as variáveis associadas para subsidiar a tomada de decisão (ALBRECHT; CROOTOF; SCOTT, 2018). Nesse sentido, muitos estudos nessa temática convergem para otimizar tecnologias agrícolas e reduzir o desperdício de alimentos a fim de minimizar o consumo de energia, água, e finalmente, encargos ambientais associados ao fornecimento de produtos e serviços (HALTAS et al., 2017; LIJÓ et al., 2017).

Demais estudos nessa área têm se concentrado principalmente na modelagem e otimização de sistemas de irrigação como parte da relação água-alimento (ROSEGRANT; RINGLER; ZHU, 2009). A abordagem tem incorporado outros elementos, como água-energia-terra, que oferece uma janela de oportunidade para modelar, entender e, em alguns casos, prevenir trade-offs e suas interdependências com as partes interessadas, setores e sistemas antropogênicos e naturais e, assim, ajuda a fornecer insights e ferramentas que melhorem a formulação de políticas (CREMADES et al., 2019).

Assim, destaca-se um interesse importante relacionado à avaliação do WEF Nexus. Várias revisões sobre esta questão têm mostrado a importância deste tópico de pesquisa (ALBRECHT; CROOTOF; SCOTT, 2018; ENDO et al., 2020; ZHANG et al., 2019). Alguns deles têm um foco mais específico, como o nível domiciliar (ITAYI; MOHAN; SAITO, 2021), o contexto brasileiro (DALLA FONTANA et al., 2020) e ferramentas de modelagem (KADDOURA; EL KHATIB, 2017). Este grande interesse está associado à complexidade intrínseca para medir o WEF Nexus, tentando integrar diferentes disciplinas, com suas respectivas perspectivas, motivações e metodologias analíticas (PROCTOR; TABATABAIE; MURTHY, 2021).

3. Método de pesquisa

Esta pesquisa consiste em uma revisão sistemática da literatura (RSL) sobre modelagem, otimização e simulação do WEF Nexus para a agricultura. A RSL é baseada em uma estratégia de busca estruturada, transparente e reproduzível que visa identificar e avaliar criticamente pesquisas relevantes, bem como coletar e analisar dados de tais pesquisas, identificando sua contribuição ao seu respectivo tema (SNYDER, 2019). Com essa finalidade, serão utilizadas as etapas propostas por Tranfield; Denyer; Smart (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003): (i) planejamento da revisão; (ii) condução da revisão; e (iii) relatórios e disseminação.

A **etapa de Planejamento** da revisão consistiu na análise preliminar e exploratória sobre os conceitos, métodos e ferramentas relacionados ao WEF Nexus e possíveis oportunidades de pesquisa apontadas na literatura. Esta análise deu suporte para a percepção inicial sobre o tema, definição do objetivo de pesquisa, bem como teste e identificação das



strings utilizadas na coleta de dados. Dessa forma, os seguintes termos de buscas foram inseridos nas bases de pesquisa:

Quadro 1 - Campos de pesquisa e *strings* utilizadas

Campos de Pesquisa	Strings de busca	Campo da Busca
(1) Contexto de agricultura	agr* OR farm* OR livestock* or crop* or grow* or irrigat*	Title, abstract or keyword
(2) Avaliação	assess* OR model* OR eval* OR indicator* OR performance	Title
(3) Interação <i>Water-Energy-Food Nexus</i>	"WEF nexus" OR "FEW nexus" OR ((water AND energy AND food) AND Nexus)	Title, abstract or keyword

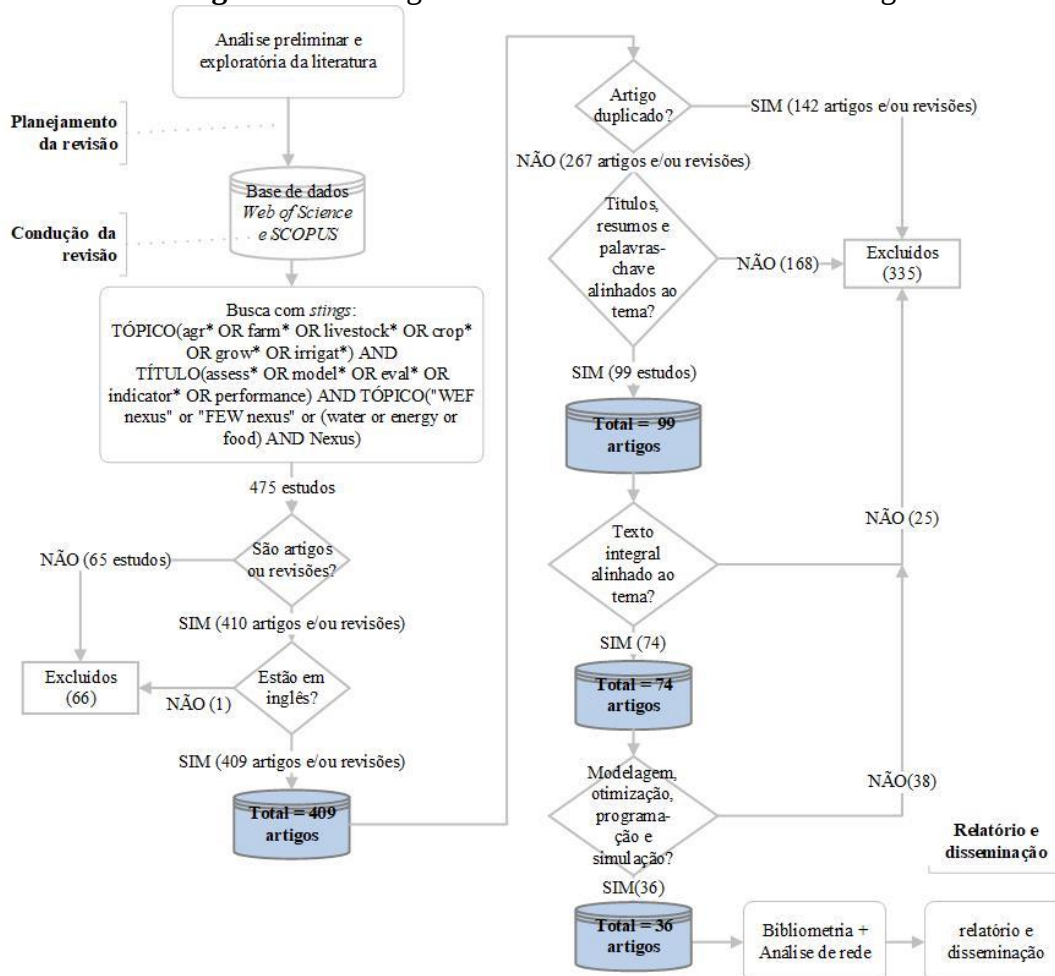
Fonte: Autores (2022).

A **etapa de Condução** da revisão foi composta pela coleta e análise dos dados. A coleta dos dados foi realizada por meio das bases *Web of Science* e *Scopus* em novembro de 2021, delimitando uma amostra inicial de trabalhos relacionados ao tema da pesquisa. Após inserir os termos de busca, a pesquisa resultou em uma amostra inicial de 475 artigos. Em seguida, foram incluídos apenas artigos ou revisões, em inglês, aplicados três critérios de exclusão para refinar a amostra de acordo com o objetivo de pesquisa: (a) artigo que não trata explicitamente o WEF Nexus como papel central na discussão; (b) artigo que não inclui significativamente os três setores dos recursos: água, energia e alimento; (c) artigo que não descreve, testa, propõe ou revisa métodos para avaliar o WEF Nexus na agricultura.

Com a aplicação dos filtros durante a leitura de títulos e resumos, a amostra resultou em 99 artigos. Posteriormente, esta amostra foi filtrada ainda mais focalizando métodos de pesquisa empregados na aplicação da modelagem, otimização, programação e simulação do WEF Nexus na agricultura, resultando na amostra final de 36 artigos. Assim, foi possível a análise dos dados bibliométricos e análise de rede das palavras-chaves dos autores da amostra. A análise bibliométrica incluiu a evolução dos estudos ao longo dos anos, periódicos mais citados, resumo dos estudos mais citados e principais interligações de recursos. Na sequência, com o uso do software *VOSviewer* foi possível identificar possíveis temas do corpo de conhecimento estudado através da análise de rede de palavras-chaves dos autores da amostra. Por fim, os métodos foram analisados quanto a sua importância identificados nas aplicações com apoio do software Excel®.

Portanto, na etapa de **Relatórios e disseminação** são, então, apresentados os resultados e a discussão dos principais achados da revisão. A lista com os artigos presentes na amostra final da RSL está no Apêndice A. A figura 1 apresenta o fluxograma metodológico desta pesquisa.

Figura 1 – Fluxograma de desenvolvimento metodológico

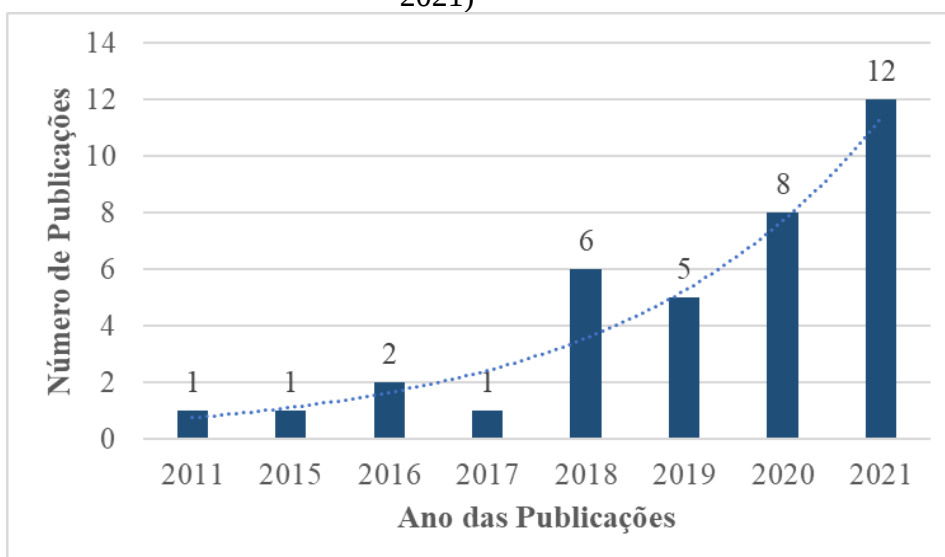


Fonte: Autores (2022).

4. Resultado e Discussão

Foi verificado que as publicações sobre o tema são recentes e apresentam crescimento a partir do ano de 2018 e que mais de 50% dos artigos acadêmicos selecionados foram publicados em 2020 e 2021 (Figura 2). De fato, alguns autores, como Albrecht; Crootof; Scott (2018) destacam a crescente atenção dada ao tema devido à utilidade do WEF Nexus como abordagem para tomada de decisão, criação de políticas e integração da gestão de recursos (ROSALES-ASENSIO et al., 2020; TIAN et al., 2018). O primeiro documento aceito foi publicado em 2011, por Bazilian et al., (2011). Neste estudo, os autores reconhecem os trade-offs refletidos no amplo sistema CLEW (clima, terra, energia e água) e propõem modelagem das principais interações entre os setores de energia, água, clima e uso da terra. A priorização de políticas e programas de gestão de recursos integrados ao invés de isolados, a partir da abordagem WEF Nexus, envolve uma discussão atual e deve continuar crescente em estudos futuros com uso de abordagem quantitativa.

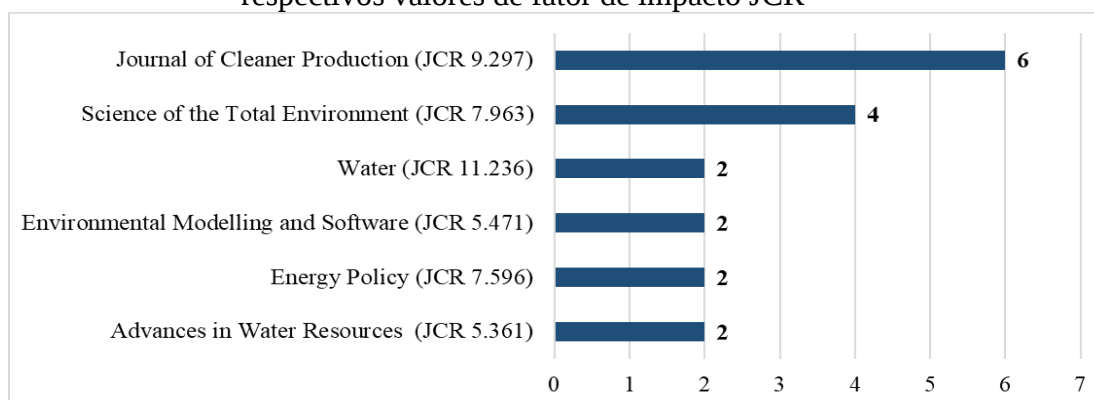
Figura 2 - Distribuição anual das publicações da amostra (2021* Até outubro de 2021)



Fonte: Autores (2022).

Entre os principais periódicos, a Figura 3 apresenta os seis principais com pelo menos 2 artigos publicados da amostra total. É possível verificar a significativa variedade temática entre *journals*, destacando-se o “Journal of Cleaner Production” (fator de impacto JCR 9.297) que apresentou o maior número de artigos na amostra analisada (6 artigos publicados) seguido de “Science of the Total Environment” (4 artigos publicados) (fator de impacto JCR 7.963). Como é possível notar, os periódicos abordam em seu escopo aspectos de sustentabilidade, em alguns casos focam em recursos hídricos, em outros, energéticos. Vale ressaltar que os seis principais periódicos possuem fator de impacto – *Journal Citation Report* © (JCR).

Figura 3 - Principais periódicos com artigos relacionados às *strings* definidas com respectivos valores de fator de impacto JCR



Fonte: Autores (2022).

Em termos de publicações mais relevantes e citadas, o Quadro 2 descreve um resumo dos dez artigos mais citados na amostra analisada. Além disso, a referida tabela apresenta o número total de citações e sua média de citações por ano a fim de complementar tais informações. Uma característica comum aos estudos mais importantes é que os autores realizam a proposição de modelos de avaliação e gestão para WEF Nexus, que ora incorpora mais elementos (tais como terra, clima, ecossistema) às avaliações, ora evidenciam os aspectos de segurança, escassez de recursos e gestão integrada. Nesse sentido, tornam-se interessantes mais



estudos de caso reais, testando e investigando ferramentas e métodos já propostos anteriormente.

Quadro 2 - Resumo dos artigos mais citados na amostra analisada

Autor (Ano)	Citações (Cit./Ano)	Resumo
(BAZILIAN et al., 2011b)	606 (55,1)	Os autores descrevem os atributos da estrutura de modelagem integrada CLEW (Clima, Terra, Energia e Água) usada para avaliar uma política nacional de segurança energética e mitigação de GEE por meio da substituição de gasolina importada por etanol nacional produzido a partir da cana-de-açúcar.
(AL-ANSARI et al., 2015)	99 (14,1)	Este estudo desenvolve uma ferramenta de avaliação do ciclo de vida capaz de fornecer uma avaliação ambiental para sistemas de produção de alimentos (ferramenta WEF nexus) que foi posteriormente aplicada a um estudo de caso realista no Catar.
(LI et al., 2019a)	94 (31,3)	Os autores apresentam propõem um modelo de otimização sob incerteza (modelo AWEFSM) adequado para quaisquer regiões ou bacias dominadas pela agricultura, especialmente para áreas com escassez de recursos. Este modelo proposto é aplicado em um estudo de caso real na China.
(ZHANG; VESSELINOV, 2017a)	90 (18)	Este artigo apresenta uma nova abordagem para gerenciar água-energia-alimento agrícola de forma sustentável a partir de uma perspectiva holística, propondo um modelo de otimização sob incerteza (modelo AWEFSM) adequado para quaisquer regiões ou bacias dominadas pela agricultura, especialmente para áreas com escassez de recursos. Este modelo proposto é aplicado em um estudo de caso real na China.
(KARABULUT et al., 2018a)	68 (17)	Os autores propuseram um sistema de matriz de síntese que descreve a relação complexa e intimamente ligada entre o uso de recursos naturais para alimentação (especificamente água, terra), energia (definida como fluxos de serviços ecossistêmicos em nosso sistema de matriz) e ecossistemas. No estudo, é proposta a integração da matriz na avaliação do ciclo de vida (ACV) da produção agrícola de biodiesel dentro de um sistema em competição com a produção agrícola de alimentos.
(LI et al., 2019c)	59 (19,7)	Um modelo de otimização para a alocação de recursos para a gestão sustentável do nexus agrícola, alimento e energia sob incerteza (modelo WFEO-SIA) é proposto e aplicado em um distrito de irrigação na China. O modelo evidencia a sensibilidade da produção de alimentos e da poluição ambiental à utilização dos recursos hídricos, energéticos e terrestres.
(TIAN et al., 2018)	41 (10,3)	Este estudo avalia quantitativamente os trade-offs entre o benefício WEF e o custo econômico no uso excessivo de

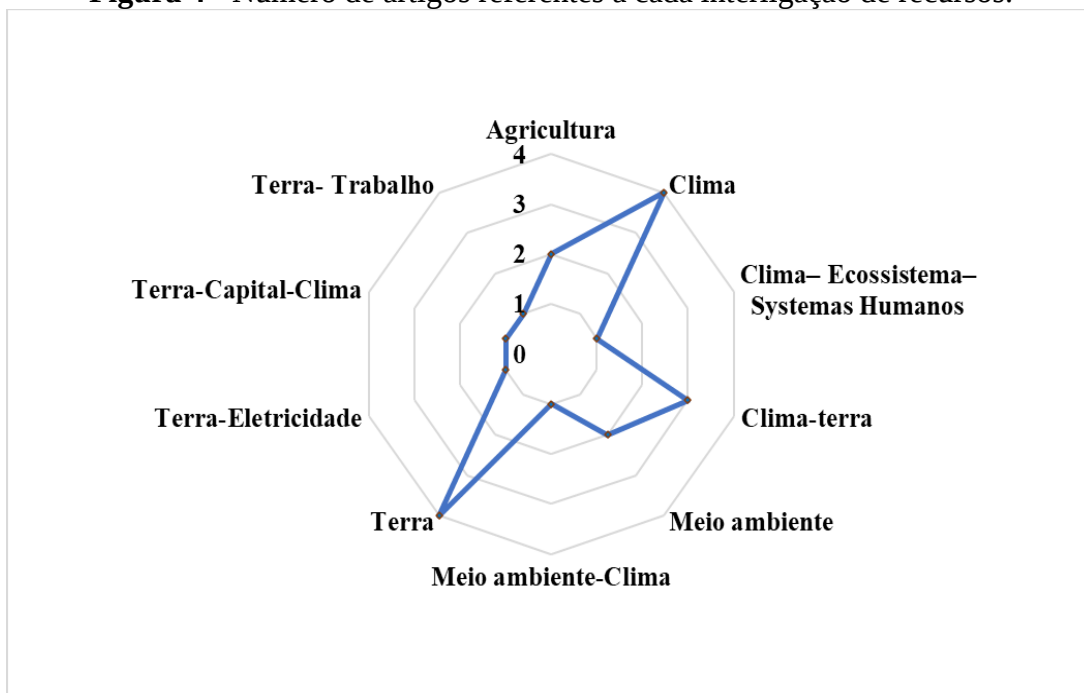


Autor (Ano)	Citações (Cit./Ano)	Resumo
		recursos, degradação ambiental e consequências climáticas para os sistemas agrícolas.
(YANG et al., 2016).	40 (6,7)	Este artigo aplicou modelagem de sistemas para avaliar os impactos da mudança climática, bem como investimentos alternativos em barragens e políticas de alocação de água no uso de energia e água para produção agrícola e geração de energia hidrelétrica.
(RAVAR et al., 2020)	36 (18)	Um modelo de simulação desagregado espaço-temporal foi desenvolvido com base na abordagem WEF Nexus para avaliar a segurança do abastecimento de água e alimentos, considerando os serviços de abastecimento de ecossistemas na bacia de Gavkhuni, no centro do Irã. O modelo SD-WFE é uma ferramenta útil para coordenação e planejamento intersetorial.
(GAO et al., 2018)	31 (7,8)	Este estudo desenvolve um modelo de minimização de custos espacialmente detalhado para carvão e produção agrícola em uma região sob restrições de disponibilidade de terra e água. Este modelo é aplicado na China considerando, entre outros parâmetros, a escolha dos locais de produção de carvão e agricultura, juntamente com as tecnologias utilizadas na mineração, processamento e conversão de carvão, bem como as culturas a serem cultivadas.

Fonte: Autores (2022).

A fim de entender as interconexões e interdependências entre os recursos hídricos, energéticos e alimentares, é necessário considerar os três elementos integrados igualmente, ao invés de otimizar o uso de um recurso em detrimento de outro (ALBRECHT; CROOTOFF; SCOTT, 2018a; SHANNAK; MABREY; VITTORIO, 2018). Por isso, este estudo destaca apenas aplicações que avaliam significativamente todos os três setores de recursos: água, energia e alimentos. Todavia, o WEF Nexus tem sido ampliado para incluir outras dimensões. Dos 36 estudos, 16 focaram na interação *water-energy-food* e 20 incluíram dimensões extras na análise. As dimensões mais proeminentes são Clima e Terra (uso da terra). A Figura 4 apresenta as interligações de recursos mapeados que vão além de apenas água, energia e alimentos.

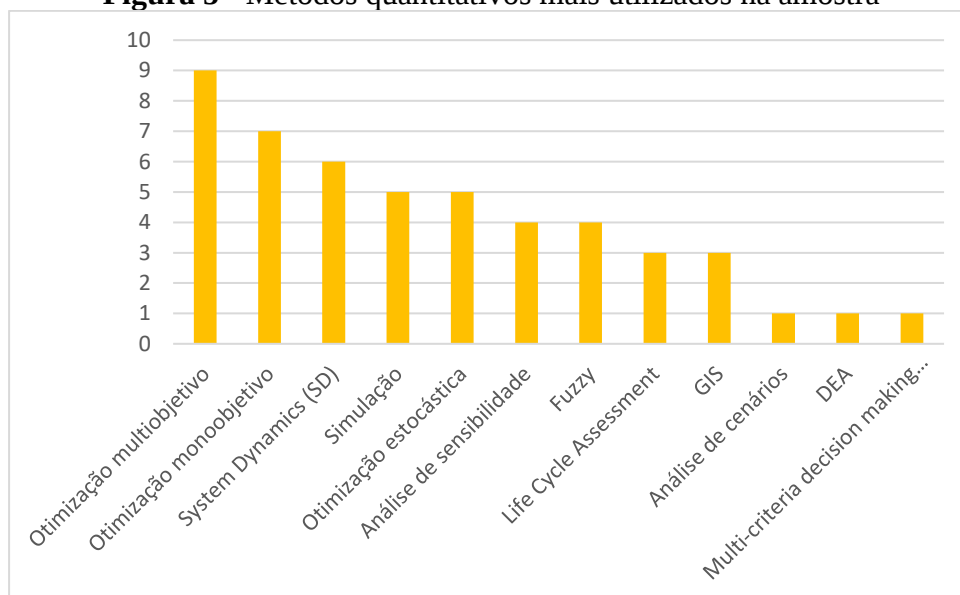
Figura 4 - Número de artigos referentes a cada interligação de recursos.



Fonte: Autores (2022).

A partir da figura 5, foram identificados os métodos quantitativos mais utilizados nessa amostra. É possível verificar também que, a maior parte dos documentos selecionados, 18,36% empregaram o otimização multiobjetivo como método de pesquisa, seguidos por estudos de otimização monoobjetivo, *system dynamics*, simulação e otimização estocástica.

Figura 5 - Métodos quantitativos mais utilizados na amostra

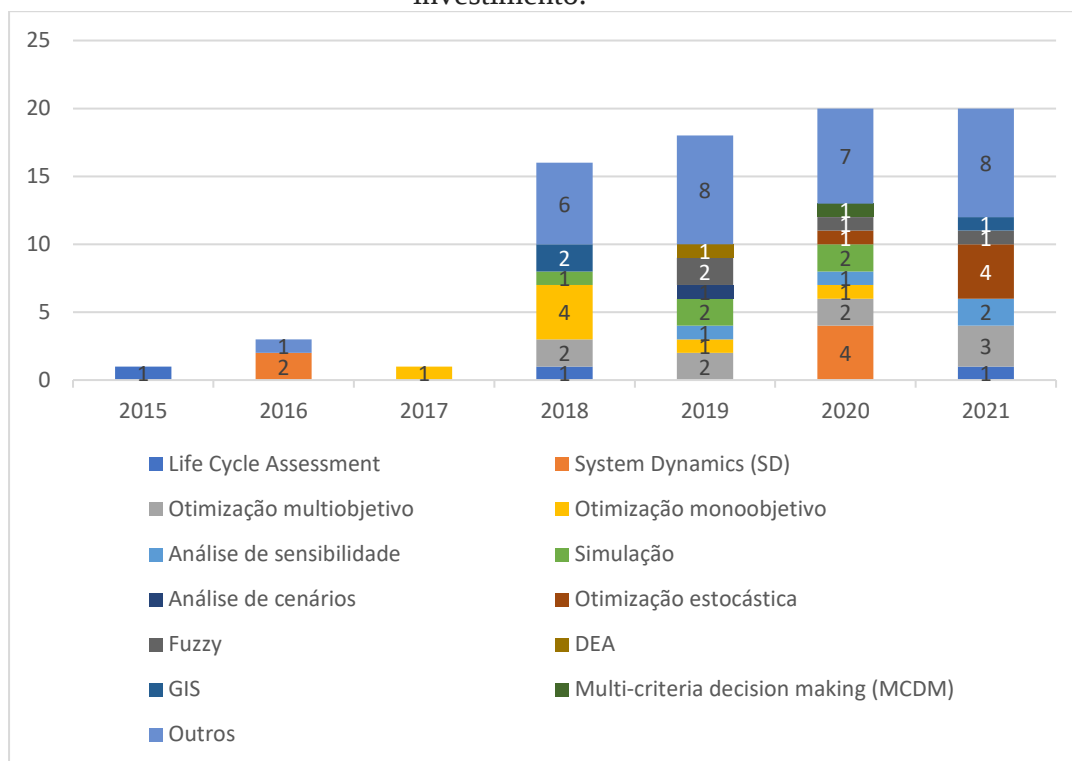


Fonte: Autores (2022).

A Figura 6 mostra os métodos mapeados em cada artigo analisado, embora os estudos possam ter utilizado uma ou mais abordagens ou métodos para suas análises. Esse valor foi criado a partir do ano de publicação dos estudos, a fim de identificar uma tendência na utilização

dos métodos. Os próximos parágrafos do texto apresentarão uma breve discussão dos cinco métodos que apareceram com maior destaque, em relação ao número de utilizações

Figura 6 - Distribuição por ano dos critérios e métodos de auxílio à decisão de investimento.



Fonte: Autores (2022).

(i) Otimização multiobjetivo e Otimização mono-objetivos

A otimização é um método essencial nas tomadas de decisão, por permitir a seleção de alternativas que consigam otimizar os objetivos de um determinado indivíduo ou tomador de decisão, dado uma série de restrições que aquele objetivo venha a apresentar (CHONG e ZAK, 2013).

Os dois métodos que mais destacaram foram as otimizações, tanto com um único objetivo (mono-objetivo), como, com múltiplos objetivos (multiobjective). A partir dos resultados da amostra do presente estudo foi possível evidenciar que as otimizações monas-objetivos selecionadas, normalmente utilizam perspectivas financeiras, como por exemplo visando maximizar os lucros ou minimizar os custos de um determinado processo.

Apesar disso, muitas vezes é necessário tomar decisões considerando múltiplas perspectivas, como por exemplo, considerando questões ambientais, se tornando uma boa opção adotar métodos de otimização multiobjetivo (KHAN; YU; WASEEM, 2022). Esse tipo de método fornece como resultado, um conjunto de soluções (KHEZRI; MAHMOUDI, 2020), pois é quase impossível uma solução perfeita que otimize simultaneamente cada função objetivo considerada (KONAK, COIT e SMITH, 2006). É observado através da Figura 6, que vários autores começaram a adotar esse método recentemente, em estudos de WEF Nexus. Isso pode representar uma tendência na aplicação desse método, que indica que os pesquisadores estão interessados em considerar diferentes perspectivas.

(ii) System Dynamics (SD)

System Dynamics (SD) é um método para analisar e gerir sistemas complexos que apresentam feedback, tendo sido desenvolvida especialmente para lidar com sistemas de grande



escala e alta complexidade (Yuan et al., 2012). É um método que vem sendo utilizado para analisar diferentes sistemas, como por exemplo, em sistemas econômicos, sociais e agrícolas, sendo capaz de lidar com os loops de feedback internos e atrasos de tempo que podem impactar o funcionamento do sistema, além de ter a capacidade de entender a relação entre o comportamento do sistema ao longo do tempo e suas regras de decisão (MARZOUK e AZAB, 2014).

(iii) Simulação

A simulação é um método essencial nas práticas da ciência contemporânea, podendo ser um modelo descritivo de um processo ou sistema. A simulação possibilita a experimentação com um modelo de um sistema real, permitindo identificar problemas, gargalos e deficiências em processos ou projetos, sem precisar realizar grandes interrupções nos sistemas reais (CARSON, 2005). Além disso, é possível comparar tecnicamente e economicamente alternativas, antes das tomadas de decisão, evitando comprometer recursos e investimentos (CARSON, 2005).

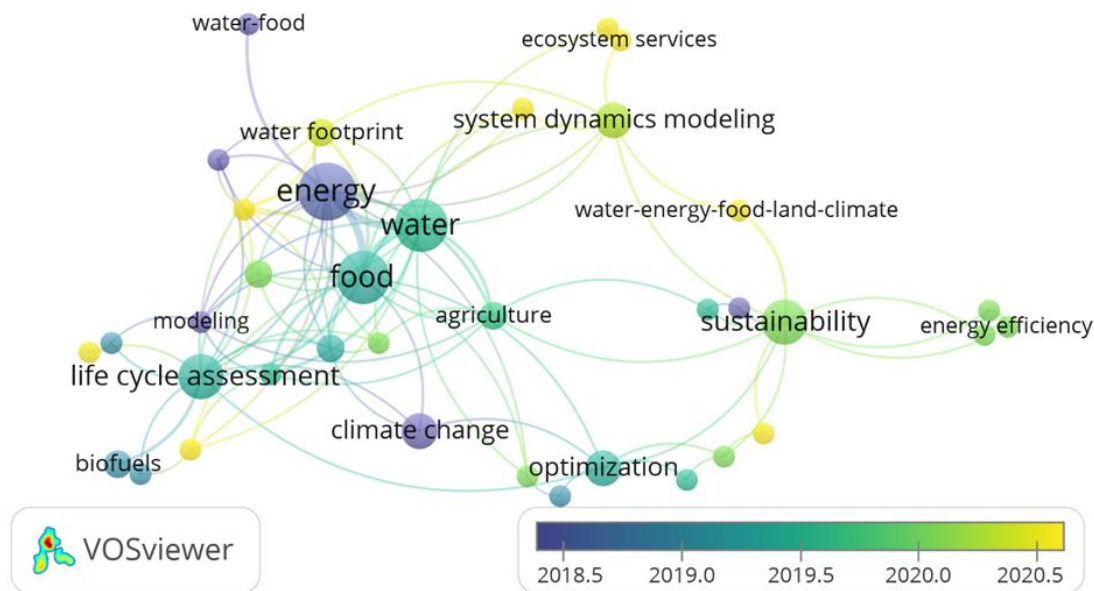
(iv) Otimização estocástica

Outro método muito utilizado na amostra foi a otimização estocástica. Diferente de otimizações determinísticas, em otimizações estocásticas são considerados as incertezas que as variáveis podem vir a apresentar, inserindo variáveis aleatórias ou variáveis que seguem alguma distribuição de probabilidade (RENARD; ALCOLEA; GINSBOURGER, 2013).

Em sistemas WEF Nexus, existe uma série de variáveis que tem características estocásticas, como por exemplo nas características de sistemas de energia, que dado a aleatoriedade, se torna relevante considerar. Diferente de abordagens determinísticas onde se assume que possui o conhecimento perfeito de variáveis como a velocidade do vento ou irradiação solar, são utilizadas distribuições aleatórias nessas variáveis, visando reproduzir as características probabilísticas de por exemplo, um sistema renovável (ZAKARIA et al. 2020).

A fim de complementar a análise de tendências, foi elaborada uma rede de co-ocorrência de palavras-chave ao longo dos anos, criada por meio do *software Vosviewer*, que possibilitou identificar temas mais atuais e propor uma agenda de pesquisa para estudos futuros. Na rede de palavras-chave originada (Figura 7), os critérios de filtro foram definidos em um mínimo de duas ocorrências para cada palavra-chave, resultando em 37 palavras-chave, isto é, utilizadas pelo menos duas vezes simultaneamente por dois artigos da amostra. Vale ressaltar que esta pesquisa utilizou um arquivo texto Thesaurus inserido no software VOSviewer para geração de redes, pois algumas palavras-chave tinham o mesmo significado, no entanto se diferenciavam na escrita, visando padronizar as palavras.

Figura 7 - Rede de co-ocorrência de palavras-chave da amostra ao longo dos anos (baseado nas palavras-chave dos autores).



Fonte: Autores (2022).

Com base na Figura 7, foi possível identificar as palavras-chave que estiveram em maior evidência nos últimos anos e consequentemente alguns dos temas tendências da literatura de avaliação do WEF Nexus no contexto da agricultura. Dentre as palavras destacadas em amarelo (incidência maior a partir de 2020), as que tiveram maior evidência foram: “system dynamics modeling” com 5 co-ocorrências, “water footprint” com 3 co-ocorrências e “integrated modeling”, “ecosystem services”, “water-energy-food-land-climate”, “sustainable development goals”, “cassava”, “vegetable supply chain”, “semiarid climates” com 2 co-ocorrências cada. No geral, essas palavras se relacionam a temas que têm oportunidade para novas pesquisas e podem contribuir com a ampliação dos estudos e operacionalização do WEF Nexus na prática.

5. Conclusão

Este estudo teve como objetivo identificar e avaliar os métodos de pesquisa empregados na aplicação da modelagem, otimização, programação e simulação do WEF Nexus na agricultura. A pesquisa apresentou a evolução dos estudos ao longo dos anos, principais autores pesquisadores sobre o tema, o resumo dos estudos mais citados, os periódicos mais citados, as técnicas quantitativas mais usadas bem como a análise crítica delas. Além disso, foi realizada uma análise de rede de co-ocorrência de palavras-chave ao longo dos anos sobre avaliação WEF Nexus na agricultura. Os estudos deram ênfase na integração de impactos econômicos durante as avaliações, mas os impactos ambientais e sociais necessitam ser mais bem explorados.

Esta pesquisa visa contribuir com a comunidade acadêmica possibilitando que tenham uma visão geral da literatura temática e as técnicas quantitativas mais representativas no contexto das avaliações WEF Nexus na agricultura, auxiliando-as na implementação e futuras avaliações. Foi possível apresentar uma visão geral dos principais autores, palavras-chave e



periódicos mais citados. Apesar dos esforços em manter o rigor do método de pesquisa, este estudo apresenta limitações. Na coleta de dados na análise não foram avaliadas minuciosamente os benefícios e barreiras das técnicas aplicadas. Essas lacunas emergem como possibilidades de pesquisas futuras, além da possibilidade de ampliar o escopo das buscas dos documentos para mais periódicos e áreas de pesquisas. Além disso, pode-se investigar quais fatores determinam a efetiva operacionalização do WEF Nexus em contextos reais de aplicação.

6. Agradecimentos

Agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pelo apoio e financiamento da pesquisa.

Referências Bibliográficas

- ALBRECHT, T. R.; CROOTOFF, A.; SCOTT, C. A. The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 4, p. 043002, abr. 2018.
- CARSON, John S. Introduction to modeling and simulation. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005. IEEE, 2005. p. 8 pp.
- CREMADES, R. et al. Ten principles to integrate the water-energy-land nexus with climate services for co-producing local and regional integrated assessments. **Science of the Total Environment**, v. 693, 25 nov. 2019.
- CHONG, Edwin KP; ZAK, Stanislaw H. **An introduction to optimization**. John Wiley & Sons, 2013
- DALLA FONTANA, M. et al. The water-energy-food nexus research in the Brazilian context: What are we missing? **Environmental Science & Policy**, v. 112, n. June 2019, p. 172–180, out. 20. **Environmental Science & Policy**, v. 112, n. June 2019, p. 172–180, out. 2020.
- DAS, A.; SAHOO, B.; PANDA, S. N. Evaluation of Nexus-Sustainability and Conventional Approaches for Optimal Water-Energy-Land-Crop Planning in an Irrigated Canal Command. **Water Resources Management**, v. 34, n. 8, p. 2329–2351, jun. 2020.
- ENDO, A. et al. Dynamics of water–energy–food nexus methodology, methods, and tools. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 13, p. 46–60, fev. 2020.
- HALTAS, I. et al. Anaerobic digestion: a prime solution for water, energy and food nexus challenges. **Energy Procedia**, v. 123, p. 22–29, 1 set. 2017.
- HOFF, H. **Understanding the Nexus: Background Paper**. Em **Proceedings of the Bonn2011 Nexus Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus**. Bonn, Alemanha: 2011.
- ITAYI, C. L.; MOHAN, G.; SAITO, O. Understanding the conceptual frameworks and methods of the food–energy–water nexus at the household level for development-oriented policy support: a systematic review. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 3, p. 033006, 2 mar. 2021.



KADDOURA, S.; EL KHATIB, S. 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, 1 nov. 2017.

KHEZRI, R.; MAHMOUDI, A. Review on the state-of-the-art multi-objective optimisation of hybrid standalone/grid-connected energy systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 14, n. 20, p. 4285–4300, 3 out. 2020.

KHAN, T.; YU, M.; WASEEM, M. Review on recent optimization strategies for hybrid renewable energy system with hydrogen technologies: State of the art, trends and future directions. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 60, p. 25155–25201, jul. 2022

KONAK, Abdullah; COIT, David W.; SMITH, Alice E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability engineering & system safety*, v. 91, n. 9, p. 992–1007, 2006. doi:10.1016/j.res.2005.11.018

KURIAN, M. The water-energy-food nexus. **Environmental Science & Policy**, v. 68, p. 97–106, fev. 2017.

LI, M. et al. An optimal modelling approach for managing agricultural water-energy-food nexus under uncertainty. **Science of The Total Environment**, v. 651, n. Pt 1, p. 1416–1434, fev. 2019.

LIJÓ, L. et al. The environmental effect of substituting energy crops for food waste as feedstock for biogas production. **Energy**, v. 137, p. 1130–1143, 15 out. 2017.

MARZOUK, Mohamed; AZAB, Shimaa. Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. *Resources, conservation and recycling*, v. 82, p. 41–49, 2014. 10.1016/j.resconrec.2013.10.015

MEADOWS, D. H. et al. **The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind**. 5th ed. ed. Universe Books, 1972.

MEADOWS, D.; MEADOWS, D.; RANDERS, J. **Limits to Growth: The 30-Year Updated**. Chelsea Green Publishing, 2004.

MIDDLETON, C. et al. The Rise and Implications of the Water-Energy-Food Nexus in Southeast Asia through an Environmental Justice Lens. **Water Alternatives**, v. 8, n. 1, p. 627–654, 2015.

NAMANY, S.; AL-ANSARI, T.; GOVINDAN, R. Sustainable energy, water and food nexus systems: A focused review of decision-making tools for efficient resource management and governance. **Journal of Cleaner Production**, v. 225, p. 610–626, 10 jul. 2019.

PANDEY, V. P.; SHRESTHA, S. **Evolution of the nexus as a policy and development discourse**. Water-Ener ed. Washington: John Wiley and Sons, Inc, 2017.

PROCTOR, K.; TABATABAIE, S. M. H.; MURTHY, G. S. Gateway to the perspectives of the Food-Energy-Water nexus. **Science of The Total Environment**, v. 764, p. 142852, abr. 2021.

ROSEGRANT, M. W.; RINGLER, C.; ZHU, T. Water for agriculture: Maintaining food security under growing scarcity. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, p. 205–222, 2009.



SMAJGL, A.; WARD, J.; PLUSCHKE, L. The water–food–energy Nexus – Realising a new paradigm. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 533–540, fev. 2016.

SMITH, G. et al. Trade-offs across the water-energy-food nexus: A triple bottom line sustainability assessment of desalination for agriculture in the San Quintín Valley, Mexico. **Environmental Science & Policy**, v. 114, p. 445–452, dez. 2020.

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 104, p. 333–339, nov. 2019.

SOLEIMANIAN, E.; AFSHAR, A.; MOLAJOU, A. A review on water simulation models for the WEF Nexus: development perspective. **Environmental Science and Pollution Research** 2022 29:53, v. 29, n. 53, p. 79769–79785, 30 mar. 2022.

TIAN, H. et al. Optimizing resource use efficiencies in the food–energy–water nexus for sustainable agriculture: from conceptual model to decision support system. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 33, p. 104–113, ago. 2018.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207–222, set. 2003.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015.**

VALLVERDÚ, Jordi. What are simulations? An epistemological approach. *Procedia Technology*, v. 13, p. 6-15, 2014. 10.1016/j.protcy.2014.02.003

WICHELNS, D. The water-energy-food nexus: Is the increasing attention warranted, from either a research or policy perspective? **Environmental Science & Policy**, v. 69, p. 113–123, mar. 2017.

Yuan H, Chini AR, Lu Y, Shen L. A dynamic model for assessing the effect of management strategies on the reduction of construction and demolition waste. *Waste Management* 2012;32(3):521–31.

ZAKARIA, A. et al. Uncertainty models for stochastic optimization in renewable energy applications. **Renewable Energy**, v. 145, p. 1543-1571, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.081>

ZHANG, C. et al. Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 625–639, set. 2018.

ZHANG, P. et al. Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 142, p. 215–224, mar. 2019.

Apêndice A. Artigos selecionados na amostra final da RSL

1	AL-ANSARI, T. et al. Development of a life cycle assessment tool for the assessment of food production systems within the energy, water and food nexus. Sustainable Production and Consumption , v. 2, p. 52–66, 1 abr. 2015.
2	AMJATH-BABU, T. S. et al. Integrated modelling of the impacts of hydropower projects on the water-food-energy nexus in a transboundary Himalayan river basin. Applied Energy , v. 239, p. 494–503, 1 abr. 2019.
3	ANDERSON, R. et al. An integrated modeling framework for crop and biofuel systems using the DSSAT and GREET models. Environmental Modelling & Software , v. 108, p. 40–50, 1 out. 2018.
4	ARAUJO, H. F. P. DE et al. A sustainable agricultural landscape model for tropical drylands. Land Use Policy , v. 100, p. 104913, 1 jan. 2021.



5	BAKHSHIANLAMOUKI, E. et al. A system dynamics model to quantify the impacts of restoration measures on the water-energy-food nexus in the Urmia lake Basin, Iran. Science of The Total Environment , v. 708, p. 134874, 15 mar. 2020.
6	BAZILIAN, M. et al. Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. Energy Policy , v. 39, n. 12, p. 7896–7906, 1 dez. 2011.
7	CAMPANA, P. E. et al. Managing agricultural drought in Sweden using a novel spatially-explicit model from the perspective of water-food-energy nexus. Journal of Cleaner Production , v. 197, p. 1382–1393, 1 out. 2018.
8	CANSINO-LOEZA, B.; PONCE-ORTEGA, J. M. Sustainable assessment of Water-Energy-Food Nexus at regional level through a multi-stakeholder optimization approach. Journal of Cleaner Production , v. 290, p. 125194, 25 mar. 2021.
9	DAS, A.; SAHOO, B.; PANDA, S. N. Evaluation of Nexus-Sustainability and Conventional Approaches for Optimal Water-Energy-Land-Crop Planning in an Irrigated Canal Command. Water Resources Management , v. 34, n. 8, p. 2329–2351, 3 jun. 2020.
10	DEGIRMENCIOGLU, A. et al. ASSESSING THE SUSTAINABILITY OF CROP PRODUCTION IN THE GEDIZ BASIN, TURKEY: A WATER, ENERGY, AND FOOD NEXUS APPROACH. Fresenius Environmental Bulletin , v. 28, p. 2511–2522, 2019.
11	DO, P. et al. Exploring synergies in the water-food-energy nexus by using an integrated hydro-economic optimization model for the Lancang-Mekong River basin. Science of The Total Environment , v. 728, p. 137996, 1 ago. 2020.
12	GAO, J. et al. Optimizing Regional Food and Energy Production under Limited Water Availability through Integrated Modeling. Sustainability , v. 10, n. 6, p. 1689, 23 maio 2018.
13	GAO, J. et al. Strategic decision-support modeling for robust management of the food–energy–water nexus under uncertainty. Journal of Cleaner Production , v. 292, p. 125995, 10 abr. 2021.
14	GERESSU, R. et al. Assessing River Basin Development Given Water-Energy-Food-Environment Interdependencies. Earth's Future , v. 8, n. 8, p. e2019EF001464, 7 ago. 2020.
15	GONZÁLEZ-ROSELL, A.; BLANCO, M.; ARFA, I. Integrating Stakeholder Views and System Dynamics to Assess the Water–Energy–Food Nexus in Andalusia. Water , v. 12, n. 11, p. 3172, 13 nov. 2020.
16	LASPIDOU, C. S. et al. Systems thinking on the resource nexus: Modeling and visualisation tools to identify critical interlinkages for resilient and sustainable societies and institutions. Science of The Total Environment , v. 717, p. 137264, 15 maio 2020.
17	LAZARO, L. L. B. et al. Policy and governance dynamics in the water-energy-food-land nexus of biofuels: Proposing a qualitative analysis model. Renewable and Sustainable Energy Reviews , v. 149, p. 111384, 1 out. 2021.
18	LI, M. et al. An optimal modelling approach for managing agricultural water-energy-food nexus under uncertainty. Science of The Total Environment , v. 651, n. Pt 1, p. 1416–1434, 15 fev. 2019a.
19	LI, M. et al. Stochastic multi-objective modeling for optimization of water-food-energy nexus of irrigated agriculture. Advances in Water Resources , v. 127, p. 209–224, 1 maio 2019b.
20	LI, M. et al. Optimization of agricultural water–food–energy nexus in a random environment: an integrated modelling approach. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment , v. 35, n. 1, p. 3–19, 6 jan. 2021a.
21	LI, S. et al. Developing an integrated technology-environment-economics model to simulate food-energy-water systems in Corn Belt watersheds. Environmental Modelling & Software , v. 143, p. 105083, 1 set. 2021b.
22	LIN, H. et al. Life cycle assessment of a biogas system for cassava processing in Brazil to close the loop in the water-waste-energy-food nexus. Journal of Cleaner Production , v. 299, p. 126861, 25 maio 2021.
23	MA, Y. et al. Mathematical modeling for planning water-food-ecology-energy nexus system under uncertainty: A case study of the Aral Sea Basin. Journal of Cleaner Production , v. 308, p. 127368, 25 jul. 2021.
24	PITTOCK, J.; DUMARESQ, D.; BASSI, A. Modeling the Hydropower–Food Nexus in Large River Basins: A Mekong Case Study. Water , v. 8, n. 10, p. 425, 28 set. 2016.
25	RAMIREZ, C.; ALMULLA, Y.; FUSO NERINI, F. Reusing wastewater for agricultural irrigation: a water-energy-food Nexus assessment in the North Western Sahara Aquifer System. Environmental Research Letters , v. 16, n. 4, p. 044052, 1 abr. 2021.
26	RAVAR, Z. et al. System dynamics modeling for assessment of water–food–energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran. Ecological Indicators , v. 108, p. 105682, 1 jan. 2020.



27	SOBROSA NETO, R. DE C. et al. An integrative approach for the water-energy-food nexus in beef cattle production: A simulation of the proposed model to Brazil. Journal of Cleaner Production , v. 204, p. 1108–1123, 10 dez. 2018.
28	SUN, J. et al. Development of an uncertain water-food-energy nexus model for pursuing sustainable agricultural and electric productions. Agricultural Water Management , v. 241, p. 106384, 1 nov. 2020.
29	TABATABAIE, S. M. H.; MURTHY, G. S. Development of an input-output model for food-energy-water nexus in the pacific northwest, USA. Resources, Conservation and Recycling , v. 168, p. 105267, 1 maio 2021.
30	THOMPSON, J. et al. Iowa Urban FEWS: Integrating Social and Biophysical Models for Exploration of Urban Food, Energy, and Water Systems. Frontiers in Big Data , v. 4, p. 26, 5 maio 2021.
31	TIAN, H. et al. Optimizing resource use efficiencies in the food–energy–water nexus for sustainable agriculture: from conceptual model to decision support system. Current Opinion in Environmental Sustainability , v. 33, p. 104–113, 1 ago. 2018.
32	YANG, Y. C. E. et al. Modeling the Agricultural Water–Energy–Food Nexus in the Indus River Basin, Pakistan. Journal of Water Resources Planning and Management , v. 142, n. 12, p. 04016062, 22 dez. 2016.
33	YUAN, K.-Y. et al. Spatial optimization of the food, energy, and water nexus: A life cycle assessment-based approach. Energy Policy , v. 119, p. 502–514, 1 ago. 2018.
34	YUE, Q. et al. Fuzzy multi-objective modelling for managing water-food-energy-climate change-land nexus towards sustainability. Journal of Hydrology , v. 596, p. 125704, 1 maio 2021.
35	ZHANG, X.; VESSELINOV, V. V. Integrated modeling approach for optimal management of water, energy and food security nexus. Advances in Water Resources , v. 101, p. 1–10, 1 mar. 2017.
36	ZHENG, J. et al. Exploring the water–energy–food nexus from a perspective of agricultural production efficiency using a three-stage data envelopment analysis modelling evaluation method: a case study of the middle and lower reaches of the Yangtze River, China. Water Policy , v. 21, n. 1, p. 49–72, 1 fev. 2019.