Integrated LCA and GIS in the energy sector: a bibliographic approach

Sistema integrado ACV e SIG no setor energético: uma abordagem bibliográfica

Sandra Milena Vélez Echeverry[1]
Adriana Marques[2]

[1]**Universidade de Brasília**
saveze@gmail.com

[2]**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo**
Adrimarks2015@gmail.com

Abstract: Several methods determined the type of renewable energy resource to be used in power generation, among them, Life Cycle Assessment (LCA) and Geographic Information Systems (GIS). This paper analyses the use of these two tools in the energy sector for the period from 2000 to 2017. The methodology includes the search for scientific papers in the Science Direct database and their subsequent analysis using VOSviewer software version 1.6.5. Survey results indicate that the journals with the highest number of publications are Journal of Cleaner Production with 17%, Renewable and Sustainable Energy Reviews with 14% and Biomass and Bioenergy with 12%. The author with the largest research network is Huijbregts, the largest paper production was in 2017, 2015 and 2013. The trend in 2020 is for biofuels. The factors analysed with LCA and GIS are energy demand, site selection, power generation potential, land use, plant design, operation and logistics, carbon footprint and environmental impacts.

Keywords: Environmental and spatial assessment, resource use, LCA, GIS, biofuels, VOSviewer.

Resumo: São utilizados diversos métodos para determinar o tipo de recurso energético renovável a ser usado na geração de energia, dentre eles, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Este artigo analisa o uso dessas duas ferramentas no setor energético para o período de 2000 a 2017. A metodologia inclui a busca de artigos científicos na base *Science Direct* e sua posterior análise mediante o software VOSviewer versão 1.6.5. Os resultados da pesquisa indicam que os periódicos com maior número de publicações são *Journal of Cleaner Production* com 17%, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* com 14% e *Biomass and Bioenergy* com 12%. O autor com a maior rede de pesquisa é Huijbregts, e a maior produção de artigos se deu nos anos de 2017, 2015 e 2013. A tendência em 2020 é para os biocombustíveis. Os fatores analisados com o uso de ACV e SIG são demanda de energia, seleção de local, potencialidade de geração energética, uso do solo, desenho de usinas, operação e logística, pegada de carbono e impactos ambientais.

Palavras-chave: Avaliação ambiental e espacial, uso de recursos, LCA, GIS, biocombustíveis, VOSviewer.

1 Introdução

O aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera e seu resultado nas mudanças climáticas têm impulsionado os países a usar fontes energéticas renováveis para a geração de energia elétrica.

Desse modo, surgiram métodos e ferramentas para determinar a energia potencial e explorável de fontes como a solar, a eólica, a biomassa, energia geotérmica, ondas, marés e hídrica [1].

A sustentabilidade de um projeto energético depende de uma avaliação precisa dos recursos que utiliza, do planejamento da logística e avaliação de possíveis impactos ambientais. Sendo assim, é necessário o uso de ferramentas que possibilitem a tomada de decisão de forma eficiente e eficaz. Nesse contexto, vêm sendo utilizadas em conjunto a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ou *Life Cycle Analysis* (LCA) e o Sistema de Informação Geográfica (SIG), ou *Geographical Information System* (GIS). Esses dois métodos são importantes para avaliar as consequências ambientais da geração de energia e os recursos distribuídos geograficamente. A combinação de SIG com ACV é denominada por vários autores como LCA espacial. Ela permite analisar e visualizar fluxos, processos de materiais e realizar o cálculo de equilíbrios ecológicos em escala espacial [2].

O objetivo deste estudo é apresentar uma análise bibliométrica de artigos em inglês que tratam sobre ACV e SIG no contexto da energia para o período de 2000 a 2017. Os artigos foram pesquisados na base de dados Science Direct da Elsevier e posteriormente analisados no software VOSviewer versão 1.6.5.

2 Sistema de Informação Geográfica

O uso de recursos energéticos é um dos principais fatores que afetam o ambiente. Exemplo disso é o impacto causado pelo uso de combustíveis fósseis desde o início da era industrial, os quais influenciaram na quantidade de gases de efeito estufa presentes na atmosfera. Desde a crise do petróleo, em 1973, têm sido procuradas mundialmente outras fontes energéticas para ser utilizadas como alternativa ao petróleo e seus derivados [3].

Todas essas fontes de energia compartilham a característica de serem distribuídas sobre o território e de serem mensuráveis apenas em locais específicos. Isso significa que

é preciso ter ferramentas geoestatísticas, informações espaciais de sensoriamento remoto e o uso de SIG, tanto para processar dados quanto para demonstrar seus impactos locais [4] [1].

São diversos os métodos de avaliação de impacto ambiental que podem ser utilizados na relação energia e ambiente. Incluem *checklist*, matrizes, sobreposição de *layers* e modelos matemáticos, entre outros. Nessa lista vêm sendo incluídas a ACV convencional e atualmente uma combinação de ACV e SIG.

A ACV é uma ferramenta para avaliação de impacto ambiental de produtos ou serviços. O princípio básico é quantificar as matérias primas, emissões e a energia no processo de elaboração de um produto desde a extração de recursos até sua disposição final [5]. A definição das normas ISO (*International Organization for standarization*) indica que o ACV é a compilação e avaliação de entradas, saídas e potenciais impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto [6]. Esse método é amplamente utilizado na indústria desde a década de 1990 para a otimização de impactos ambientais e foi normatizada na década de 2000 mediante uma série de normas da ISO: da 14.040 até 14.049.

A ACV facilita a compreensão abrangente de um problema, e as possíveis soluções, e nunca dá uma única resposta [2].

A ACV é usada de forma individual e em conjunto com outras ferramentas de gestão ambiental e de planejamento tais como: *Economic-Environmental Input-Output* (EEIO), *Geographic Information Systems* (GIS), *Multi-objective Linear Fractional Programing* (MOLFP), *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), modelos matemáticos, *Strategic Environmental Assessments* (SEA), entre outras, sendo que, na área de planejamento energético, a dupla mais utilizada é a de ACV e SIG para determinar locais de instalação de empreendimentos energéticos, mudanças no uso do solo, custos operacionais e logísticos e impactos ambientais [7] [8] [9] [1] [5].

Um SIG é composto por dados geográficos (mapas digitais e tabelas de atributos ligados a identidades de mapa). São necessários hardware e software para manipular e exibir dados em um formato mapeado [10]. É considerada uma tecnologia integradora que permite mapear, modelar, consultar e analisar grandes quantidades de dados todos contidos em um único banco de dados. Permite abordar questões geográficas, sociais, econômicas e ambientais necessárias para avaliar, analisar e tomar decisões em diversos contextos [11].

O potencial de energia teórica e explorável deve ser diferenciada e investigada para os recursos renováveis, pois todas as fontes de energia estão distribuídas sobre o território [1].

O SIG é uma importante ferramenta de tomada de decisões que ajuda a avaliar com precisão a distribuição de recursos de energia renovável. Vem sendo utilizada, principalmente, para compreender o contexto geográfico de uma ampla gama de questões pertinentes à bioenergia [2].

A integração entre ACV e SIG permite uma avaliação holística dos benefícios e preocupações ambientais, incluindo questões sociais e econômicas. Essa metodologia gera informações e resultados suficientes para determinar uma estratégia para reduzir o consumo de energia e emissões de CO_2, como também a concordância entre a oferta e demanda de energia elétrica em áreas urbanas e rurais [10].

Não obstante, existem algumas dificuldades do uso conjunto das duas ferramentas. Não existe software público que integre bancos de dados no SIG em cálculos de ACV. Não existe uma escala espacial perfeita nem definida nos métodos de avaliação de impacto, pelo qual devem testadas, ajustadas e justificadas [11].

A bibliometria é percebida como um método de agregação de leis e princípios estatísticos para mapear a produtividade científica que abrange periódicos e autores [12]. Esse método usa as seguintes leis: Lei de *Bradfor* para relacionar a produtividade de periódicos; a Lei de *Lotka* para conhecer a produtividade de autores no âmbito científico; a Lei de *Zipf* para estabelecer a frequência de palavras-chave escolhidas pelos pesquisadores [13].

Existem dois tipos de mapas comumente utilizados na pesquisa bibliométrica, a saber, de distância e baseados em gráficos. Os mapas com base na distância são aqueles nos quais essa grandeza reflete a força da relação entre dois itens. Uma distância menor geralmente indica uma relação mais forte. Essa visualização facilita a identificação de clusters de itens relacionados, mas dificulta rotular todos os itens no mapa. Os mapas com base em gráficos usam linhas desenhadas entre os itens para indicar relações, mas não reflete a forma de relação entre eles [14].

O VOSviewer é uma ferramenta de software para construir e visualizar redes bibliométricas. Os mapas são criados usando a técnica de layout e de cluster do VOS. O programa oferece três visualizações: a de rede, a de sobreposição e a de densidade. No mapa de rede o tamanho do rótulo e o tamanho do círculo do item dependem do peso. No mapa de sobreposição a dinâmica é a mesma do mapa de rede, exceto que os itens são coloridos de forma diferente. O mapa de densidade apresenta os itens identificados por um rótulo, cada ponto tem uma cor que depende da densidade de itens, ou seja, do número de itens na vizinhança e da importância desses itens vizinhos [14].

Os mapas são construídos em três etapas: na primeira, uma matriz de similaridade é calculada com base na matriz de coocorrência. Na segunda, o mapa é construído aplicando a técnica de mapeamento VOS à matriz de similaridade. Na terceira, o mapa é traduzido (solução centrada na origem), rotado (análise de componentes principais) e refletido (reflexão no eixo vertical ou horizontal) [14].

A análise das relações espaciais de oferta e demanda do potencial energético de recursos como a biomassa é crucial, por esse motivo utilizam-se técnicas de mapeamento como SIG [15].

Os sistemas de informação geográfica são adequados para modelar o uso da terra de maneira espacialmente explícita,

enquanto a avaliação do ciclo de vida (ACV) não utiliza convencionalmente informações geoespaciais [16].

Por esse motivo a modelagem baseada no SIG do uso da terra permite refinamentos importantes na teoria e na prática da ACV [16].

A junção de SIG e ACV permite trabalhar com os subsistemas técnico, ambiental e social. Os sistemas técnicos e ambientais estão principalmente ligados a fluxos de energia e matéria, que são as causas dos impactos ambientais, que posteriormente são percebidos, avaliados e acionados pelo subsistema social. Nos três sistemas, diferenças importantes são atribuíveis a localizações geográficas. Assim, surge a possibilidade de aprimorar a ACV e alcançar resultados mais relevantes devido a uma maior especificidade do local [4].

A avaliação de impacto ambiental, o planejamento regional ou espacial e o equilíbrio ambiental vêm utilizando abordagens metodológicas como os sistemas de software baseados em SIG [17].

Nesta pesquisa, aplicou-se uma análise bibliométrica, para determinar o uso de ferramentas de avaliação ambiental no setor energético. Os artigos foram selecionados mediante o uso de palavras chave: *Life Cycle Assessment* (LCA), *Geographical Information System* (GIS), *spatial LCA* e *Energy*. Consultou-se o banco de dados da *Science Direct* com publicações em inglês. Usaram-se as quatro palavras na busca avançada para os campos: resumo do artigo, título e palavras chave. As fontes foram artigos técnicos e artigos técnicos de revisão, usando como filtro temporal o período de 2000 a 2017.

A busca encontrou 90 artigos dos quais foram selecionados 81 e exportados em formato ".ris". Posteriormente, o arquivo ".ris" foi incluído no software gerenciador de referências Mendeley versão 1.17.11, para padronizar os dados e ter maior confiabilidade na formação dos clusters (variadas formas de escrita para se referir ao mesmo termo) e excluir documentos duplicados.

A informação obtida no VosViewer é representada por clusters e seus links ilustram a relação entre autores e palavras chave. Cada cluster tem uma cor e agrupa todos os itens considerados similares.

3 Resultados e Discussões

A busca encontrou artigos em 32 jornais. na Figura 1, são apresentados os mais importantes. Os jornais que mais publicaram artigos nos temas pesquisados foram: *Journal of Cleaner Production* (17%), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (14%), *Biomass and Bioenergy* (12%), *Environmental Modelling & Software* e *Journal of Environmental Management* com 8% cada, *Bioresource Tecnhology* e *International Journal of Life Cycle Assessment* com 4% cada. Jornais com menos de três publicações foram agrupados no item "outros jornais", representando 33% das publicações.

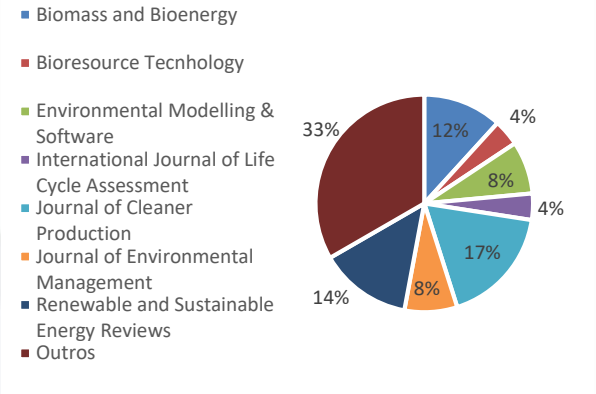

Figura 1: Gráfico de distribuição dos artigos por periódico.

No VOSviewer, analisaram-se 333 autores, determinando-se dois clusters, um com doze autores e outro com cinco. Definiram-se 88 links que representam relações de coautorias. Na Figura 2 aparecem os principais autores. A visualização de densidade indica a estrutura geral para os principais autores, indicando a existência de três grupos.

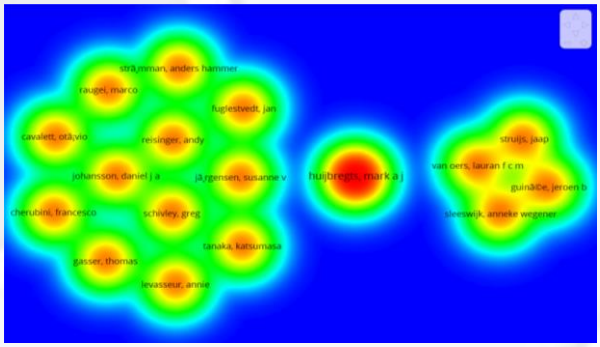

Figura 2: Gráfico de distribuição dos artigos por periódico.

Na Figura 3 estão os clusters e suas redes: no cluster 1 (em vermelho) estão os que possuem 12 links de coautoria (Stramman, Raugei, Fluglesvedt, Reisinger, Cavalett, Johansson, Já, Schivley, Cherubini, Tanaka, Gasser e Levasseur). No cluster 2 (verde) os que possuem 4 links de coautoria (Struisjs, Van Oers, Guinãe e Sleeswijk), com exceção Huijbregts que tem 16. Por tanto esse mapa permite ter uma noção da contribuição dos autores no tema e a rede de pesquisa.

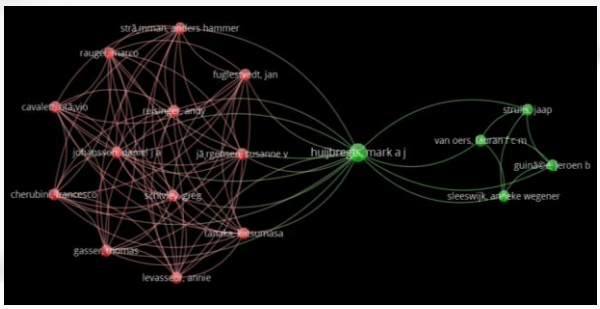

Figura 3: Visualização em rede de autores e coautores.

A Figura 4 ilustra a análise das autorias e coautorias em relação aos anos de publicação. Assim a maior rede de coautorias foi no período de 2015 a 2017.

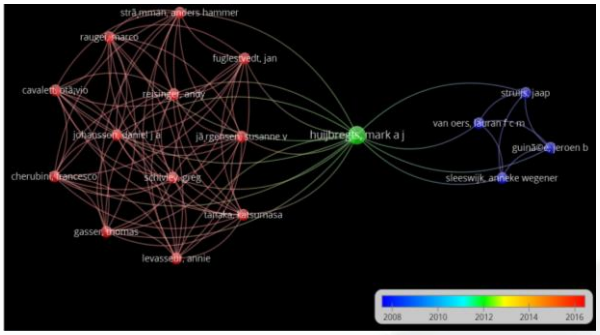

Figura 4: Visualização de sobreposição de autores e coautores.

A Figura 5 complementa essa informação com o número anual de publicações. Destaca-se o ano 2017, seguido por 2015, 2013 e 2016 respectivamente.

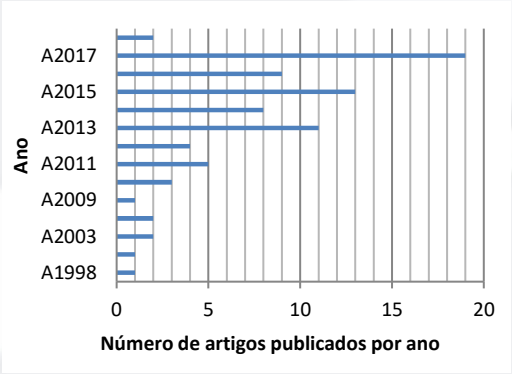

Figura 5: Gráfico de distribuição anual dos artigos.

O mapeamento das palavras chave e termos mais utilizados, ajuda os pesquisadores nas suas buscas e estudos. Dessa forma, foram escolhidas as palavras com mais de duas ocorrências entre o total de 308 palavras chave, tendo como resultado 30 palavras selecionadas e agrupadas em oito clusters que estabeleceram 53 links.

A visualização de densidade indica que o peso (ocorrência) da palavra-chave LCA é a maior (azul) junto com as palavras na vizinhança do ponto, como ilustra a Figura 6.

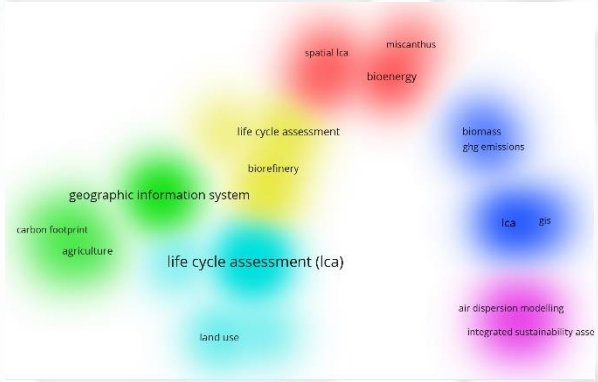

Figura 6: Visualização de densidade de palavras chave.

Na Figura 7, analisam-se os clusters: o primeiro (amarelo) agrupa os termos relacionados ao uso de biomassa e seu impacto ambiental (gases de efeito estufa). O segundo (verde) trata sobre o uso das tecnologias geoespaciais na agricultura.

O terceiro cluster (azul) é formado por palavras relacionadas à produção de biodiesel em terras marginais. O quarto (vermelho) faz referência à bioenergia e a sustentabilidade. O quinto (roxa) aglomera termos sobre o uso de SIG no consumo de energia. O sexto (verde água-marinha) refere-se ao uso do ACV na avaliação ambiental. O sétimo e oitavo clusters abordam o investimento econômico e energético na produção de energia.

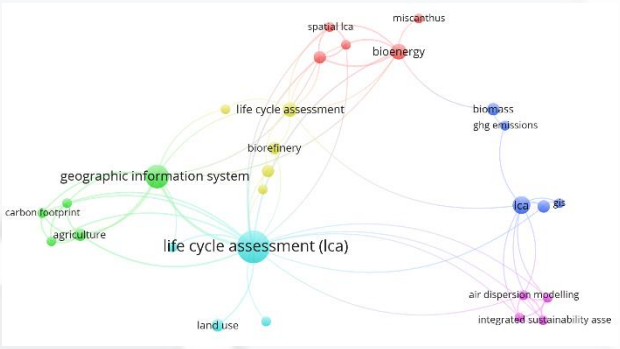

Figura 7: Visualização em rede de palavras chave.

Como aparece na Figura 8, as publicações encontram-se no período de 1998 a 2018, sendo a maioria do ano 2017 (23%).

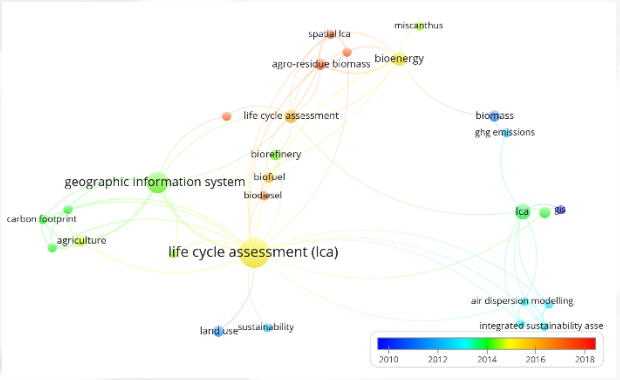

Figura 8: Visualização de sobreposição de palavras chave.

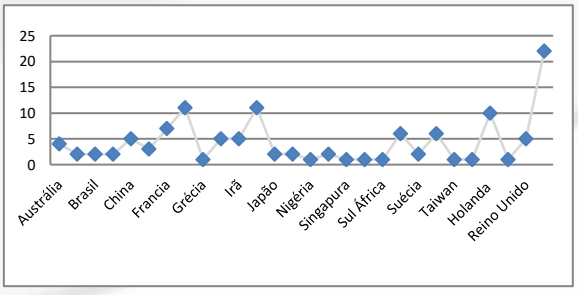

Figura 9: Gráfico de Instituições que pesquisam sobre ACV, SIG e energia

Na Figura 9, encontram-se os países (eixo horizontal) e o número de instituições (eixo vertical) que pesquisam sobre ACV e energia, SIG e energia e ACV e SIG em conjunto no setor de energia. Os Estados Unidos lideram esse tipo de pesquisa junto com Alemanha, Itália e Holanda. São no total 122

instituições entre universidades, institutos de pesquisa e órgãos governamentais.

4 Conclusões

Os principais autores que estão tratando sobre o uso de ACV e SIG no setor energético são: Huijbregts, que tem a maior rede de coautorias. Stramman, Raugei, Fluglesvedt, Reisinger, Cavalett, Johansson, Já, Schivley, Cherubini, Tanaka, Gasser, Levasseur, e finalmente Struijs, van Oers, Guinãe, Sleeswijk.

Os países que lideram as pesquisas sobre ACV e SIG no setor energético são os Estados Unidos, Alemanha, Itália e Holanda.

Os jornais com destaque, conforme o número de publicações são: *Biomass and Bioenergy, Journal of Cleaner Production, Renewable and Sustainable Energy Reviews* e *Journal of Environmental Management*. Sendo que os anos com maior número de publicações são 2017, 2015 e 2013.

Os termos mais trabalhados, de acordo com os clusters identificados nesta pesquisa são: biogás, biomassa, emissões de gases de efeito estufa, análise espacial, agricultura, pegada de carbono, integração, tecnologia espacial, sensoriamento remoto, biodiesel, biocombustivéis, biorrefinarias, terras marginais, bioenergia, miscanthus (espécie de graminea), sustentabilidade, consumo de energia, SIG, uso do solo, ACV, avaliação da sustentabilidade, incerteza, ERoEI (*energy return on investment*) e produção de eletricidade.

A tendência no uso integrado de ACV e SIG em 2020, é para os biocombustíveis. Aparentemente, é escassa a aplicação desses métodos para outras fontes energéticas (solar, eólica, geotérmica e hídrica), sendo que não aparecem nas palavras chave.

Há também uma tendência para o planejamento energético e o uso conjunto de ferramentas que permitam avaliar aspectos ambientais, econômicos e técnicos. Os fatores analisados com o uso de ACV e SIG, conforme os artigos encontrados são: demanda de energia, seleção de local, potencialidade de geração energética, uso do solo, desenho de usinas, operação e logística, pegada de carbono e impactos ambientais.

Referências

[1] A. Angelis-Dimakis *et al.*, "Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 2, pp. 1182–1200, 2011.

[2] M. Hiloidhari *et al.*, "Emerging role of Geographical Information System (GIS), Life Cycle Assessment (LCA) and spatial LCA (GIS-LCA) in sustainable bioenergy planning," *Bioresour. Technol.*, vol. 242, pp. 218–226, Oct. 2017.

[3] R. A. Hinrichs, M. Kleinbach, and L. B. dos Reis, *Energia e Meio Ambiente*, 4th ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

[4] M. Bengtsson, R. Carlson, S. Molander, and B. Steen, "An approach for handling geographical information in life cycle assessment using a relational database," *J. Hazard. Mater.*, vol. 61, no. 1–3, pp. 67–75, 1998.

[5] M. Bidstrup, M. Pizzol, and J. H. Schmidt, "Life Cycle Assessment in spatial planning - A procedure for addressing systemic impacts," *J. Clean. Prod.*, vol. 91, pp. 136–144, 2015.

[6] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT., "Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações - ABNT NBR ISO 14044:2009." ABNT, 2009.

[7] R.-G. G. Cong *et al.*, "Where to implement local biotech innovations? A framework for multi-scale socio-economic and environmental impact assessment of Green Bio-Refineries," *Land use policy*, vol. 68, no. May, pp. 141–151, Nov. 2017.

[8] Z. Liu, T. Qiu, and B. Chen, "A LCA based biofuel supply chain analysis framework," *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 22, no. 6, pp. 669–681, 2014.

[9] L. Čuček, M. Martín, I. E. Grossmann, and Z. Kravanja, "Multi-period synthesis of optimally integrated biomass and bioenergy supply network," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 66, pp. 57–70, Jul. 2014.

[10] carles M. Gasol *et al.*, "Environmental assessment: (LCA) and spatial modelling (GIS) of energy crop implementation on local scale," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 7, pp. 2975–2985, Jul. 2011.

[11] C. L. Mutel, S. Pfister, and S. Hellweg, "GIS-based regionalized life cycle assessment: How Big is small enough? Methodology and case study of electricity generation," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 1096–1103, 2012.

[12] L. Café and M. Bräscher, "Organização da informação e bibliometria," *Encontros Bibli Rev. eletrônica Bibliotecon. e ciência da informação*, vol. 13, pp. 54–75, 2008.

[13] C. A. Araújo, "Bibliometria: evolução histórica e questões atuais," *Em Questão*, vol. 12, no. 1, pp. 11–32, 2006.

[14] N. J. van Eck and L. Waltman, "Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping," *Scientometrics*, vol. 84, no. 2, pp. 523–538, 2010.

[15] A. Thomas, A. Bond, and K. Hiscock, "A GIS based assessment of bioenergy potential in England within existing energy systems," *Biomass and Bioenergy*, vol. 55, pp. 107–121, Aug. 2013.

[16] R. Geyer, J. P. Lindner, D. M. Stoms, F. W. Davis, and B. Wittstock, "Coupling GIS and LCA for biodiversity assessments of land use," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 15, no. 7, pp. 692–703, 2010.

[17] R. J. M. M. Lenz and A. Beuttler, "Experiences with GIS-based planning tool for spatial eco-balances," *Environ. Model. Softw.*, vol. 18, no. 6, pp. 581–585, 2003.