

## IMPACTO AMBIENTAL NO CLOUD COMPUTING: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

**WILLIAM JOSÉ DOS REIS**

UFSCAR - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

**IVETE DELAI**

UFSCAR - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

### **Introdução**

Buscar a sustentabilidade não implica renunciar ao pensamento econômico, como destacado por Watson et al. (2010). Nessa mesma linha, a Cloud Computing surge como um inovador modelo de computação para atender à crescente demanda por recursos computacionais. Torna-se claro que adotar essas tecnologias de maneira responsável e eficiente é crucial para enfrentar os desafios ambientais. Nesse cenário, o objetivo deste artigo é identificar modelos e indicadores para avaliar os impactos ambientais da utilização da Cloud Computing e da TI Verde.

### **Problema de Pesquisa e Objetivo**

Este estudo visa aprofundar a compreensão dos impactos da Cloud Computing no contexto da sustentabilidade na área de tecnologia da informação. Ele busca analisar as causas subjacentes dos impactos ambientais e identificar estratégias acionáveis para abordar os desafios da sustentabilidade. Para atingir esse objetivo, foi realizada uma revisão sistemática da literatura com análise de conteúdo abrangendo o período de 2015 a 2023.

### **Fundamentação Teórica**

Nesta seção, são introduzidos os conceitos fundamentais de Cloud Computing (Computação em Nuvem), Sustentabilidade, Impacto Ambiental e TI Verde (Green IT). De acordo com Zheng (2014), a TI Verde abrange a gestão eficiente dos recursos de TI com o intuito de minimizar o impacto ambiental.

### **Metodologia**

Neste artigo, empregamos o método da Revisão Sistemática de Literatura (RSL) para identificar indicadores e abordagens de medição do impacto do Cloud Computing. A seleção desse método se justifica pela sua capacidade de construir conhecimento relacionado ao nosso objetivo de pesquisa, ao mesmo tempo em que minimiza a influência de vieses, como apontado por Tranfield et al. (2003).

### **Análise dos Resultados**

Através da Revisão Sistemática de Literatura (RSL), examinamos uma variedade de artigos relacionados ao impacto da Tecnologia da Informação (TI) no meio ambiente e na sociedade. Os resultados abrangem uma gama de aspectos, revelando vantagens, como melhorias na eficiência, bem como preocupações significativas, incluindo o aumento do consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>.

### **Conclusão**

Nas conclusões deste estudo de revisão de literatura, exploramos a medição do impacto ambiental da Cloud Computing. Ao analisar 20 artigos, identificamos cinco grupos de indicadores frequentemente empregados na literatura. Esses grupos incluem eficiência energética, emissões de CO<sub>2</sub>, eficiência energética e emissões de CO<sub>2</sub>, reciclagem e estudos qualitativos.

### **Referências Bibliográficas**

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge. *British Journal of Management*, v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003. WATSON; BOUDREAU; CHEN. Information Systems and Environmentally Sustainable Development: Energy Informatics and New Directions for the IS Community. *MIS Quarterly*, v. 34, n. 1, p. 23, 2010. ZHENG, D. Q. The Discussion on Mechanism and Research Framework of Green Information Technology and Information Systems Adoption. *Advanced Materials Research*, v. 694–697, p. 2286–2290, 2013.

### **Palavras Chave**

cloud computing, impacto ambiental, indicadores

# IMPACTO AMBIENTAL NO CLOUD COMPUTING: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

## 1. INTRODUÇÃO

A Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) desempenha um papel crucial na economia e na sociedade, com uma ampla adoção em diversos setores, incluindo educação, saúde, setor público e privado, indústria, agrícola, entretenimento e lazer. Nessa perspectiva, a Cloud Computing (Computação em Nuvem) emerge como um novo modelo de computação para suprir a crescente demanda por recursos computacionais, oferecendo serviços como Software as a Service (SaaS), Infrastructure as a Service (IaaS) e outros, garantindo a operação ininterrupta das aplicações. A Cloud Computing tornou-se um paradigma importante porque oferece recursos dinâmicos e alta capacidade computacional, incluindo acesso a aplicativos complexos e arquivamento de dados, sem requerer recursos computacionais adicionais (RASHEED, 2014).

No entanto, à medida que a Cloud Computing, os serviços de Streaming e a Inteligência Artificial (IA) avançam, a demanda urgente por Data Centers (DCs) capazes de atender prontamente aos clientes intensifica-se. Essas instalações ocupam espaços vastos para acomodar a infraestrutura de servidores, resultando em uma considerável necessidade de energia para manter sua eficiência operacional, incluindo o fornecimento de energia para alimentar processadores, dispositivos periféricos, infraestrutura de rede, sistemas de iluminação e climatização.

Quando se considera a relação entre Cloud Computing e a sustentabilidade, torna-se evidente que a adoção responsável e eficiente dessas tecnologias é essencial para abordar os desafios ambientais. Por meio da consolidação de servidores em data centers altamente eficientes, a Cloud Computing pode reduzir significativamente o consumo de energia e os custos associados, contribuindo assim para a redução das emissões de carbono e a preservação dos recursos naturais.

No entanto, para que o Cloud Computing atinja seu potencial máximo em termos de sustentabilidade, é fundamental adotar práticas responsáveis, como a escolha de Data Centers alimentados por energias renováveis e a otimização do uso de recursos. Dessa forma, a tecnologia da informação e a sustentabilidade podem caminhar de mãos dadas, contribuindo para um futuro mais verde e sustentável. Como Watson, Boudreau e Chen (2010) destacam, buscar a sustentabilidade não significa abandonar o pensamento econômico. Até mesmo porque a economia é direcionada para o problema de alocar recursos escassos, e recursos como as energias livres de emissão de gases e os componentes eletroeletrônicos são particularmente escassos.

Nesse contexto, o propósito deste artigo é identificar quais modelos e indicadores existem para a avaliação dos impactos ambientais da utilização da Cloud Computing e da TI Verde. Para atingir esse objetivo, foi realizada uma revisão sistemática da literatura com análise de conteúdo abrangendo o período de 2015 a 2023. Este estudo se destina a contribuir para um entendimento abrangente dos impactos associados ao contexto da Cloud Computing e a sustentabilidade na área de tecnologia da informação proporcionando informações para mapear as causas subjacentes dos impactos ambientais e identificar ações a serem implementadas ou promovidas, visando resolver os desafios relacionados à sustentabilidade.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: na primeira seção, apresentaremos os conceitos centrais da pesquisa. Na segunda seção, detalharemos o método de desenvolvimento, e na terceira, compartilharemos os resultados e conduziremos a discussão. Por fim, encerraremos o artigo destacando as principais conclusões e oferecendo sugestões para futuras pesquisas.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção inicia com a apresentação dos conceitos de Cloud Computing (Computação em Nuvem), Sustentabilidade, Impacto Ambiental e TI Verde (Green IT). Esses fundamentos são essenciais para a compreensão dos tópicos subsequentes, que exploram os impactos ambientais da Cloud Computing. Estabelecer uma base sólida nesses conceitos desempenha um papel fundamental na contextualização abrangente do tema deste artigo e na análise crítica dos impactos ambientais relacionados ao Cloud Computing.

### 2.1 Cloud Computing

A Cloud Computing, também conhecida como Computação em Nuvem, representa um paradigma que foram amplamente adotados por empresas de todos os setores por causa de tais benefícios como flexibilidade, escalabilidade, disponibilidade sempre ativa e seguindo o modelo de pagamento conforme o uso, ou seja, pay-per-use (MARSTON et al. 2011). Para JOY et al. (2016), o principal propósito é fornecer serviços de computação sob demanda que sejam altamente escaláveis, confiáveis e abertos em ambientes distribuídos.

Os serviços disponíveis na Cloud Computing abrangem uma ampla gama de funcionalidades, desde acesso e compartilhamento de serviços até armazenamento e gerenciamento de recursos. A arquitetura orientada a serviços da Cloud Computing é comumente categorizada em três principais modelos: Software-as-a-Service (SaaS, exemplos incluem Google Workspace, Microsoft Office 365), Platform-as-a-Service (PaaS, como AWS Elastic Beanstalk) e Infrastructure-as-a-Service (IaaS, exemplificado por Amazon Web Service, Google Compute Engine), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Modelos de Serviços na Nuvem



Fonte: TecnoMega <<https://tecnomega.com.br/blog/conheca-os-modelos-iaas-paas-saas/>>

Um data center em nuvem típico consiste em dezenas de milhares de servidores heterogêneos que podem ser particionados em diferentes clusters para lidar com diferentes cargas de trabalho (MISHRA et al., 2010). Além disso, a infraestrutura do data center é projetada com sistemas de refrigeração e energia robustos e redundantes, configurados para garantir operações e gerenciamento ininterruptos.

### 2.2 Sustentabilidade, Impacto Ambiental e TI Verde

A crescente interdependência entre a TI e os desafios ambientais globais tem gerado uma necessidade urgente de repensar a forma como as organizações e a sociedade como um

todo abordam a sustentabilidade. A relação entre sustentabilidade, impacto ambiental e TI, muitas vezes encapsulada sob o termo "TI Verde" ou "Green IT," desenha um panorama crucial na busca por um futuro mais sustentável.

A sustentabilidade está diretamente relacionada ao desenvolvimento econômico e material sem agredir o meio ambiente, utilizando os recursos naturais de forma inteligente para preservar o futuro (HELM, 1990). Uma definição abrangente do conceito de sustentabilidade seria a capacidade de conservação que um sistema ou projeto possui a longo prazo, integrando e equilibrando os princípios de viabilidade econômica, prudência ambiental e justiça social (ALMEIDA, 2002). O Impacto Ambiental é a medida dos efeitos adversos que as atividades humanas têm sobre o meio ambiente.

No contexto da TI, o impacto ambiental abrange o consumo de recursos naturais, emissões de carbono e outros poluentes, bem como o descarte de equipamentos eletrônicos obsoletos. A crescente demanda por serviços de TI, juntamente com a rápida obsolescência de dispositivos, contribui significativamente para o impacto ambiental global. No entanto, em um mundo cada vez mais impulsionado pela tecnologia, essa definição se estende naturalmente à forma como a TI é planejada, implementada e usada. Sustentabilidade na TI não se limita apenas à redução de resíduos ou eficiência energética, mas também inclui a consideração de aspectos sociais e éticos, como a equidade no acesso à tecnologia. Mytton (2020) destaca o desafio em avaliar os impactos ambientais da Cloud Computing, uma vez que pode alterar a dinâmica do consumo de energia entre usuários e provedor de serviços.

Nesse contexto, emerge o conceito de TI verde, que envolve a gestão eficiente dos recursos de TI para reduzir o impacto no meio ambiente (ZHENG, 2014). Isso inclui a busca pela eficiência energética em data centers, a redução do desperdício de recursos, a promoção de práticas de reciclagem e a implementação de políticas que garantam a responsabilidade ambiental na cadeia de suprimentos de tecnologia. Isto envolve implementação de práticas e tecnologias que reduzam o consumo de energia, pegada de carbono e impacto ambiental impacto das operações de Cloud Computing (COLMAN et al., 2016).

### 3. METODOLOGIA

Nesse artigo, foi utilizado o método da Revisão Sistemática de Literatura (RSL) para identificar os indicadores e abordagens de mensuração do impacto do Cloud Computing. A escolha desse método decorre do fato de este possibilita a construção do conhecimento sobre o objetivo proposto com a minimização de vieses (TRANFIELD et al., 2003). O protocolo da RSL é detalhado no Quadro 1 para dar transparência ao processo e robustez ao processo seguindo os passos propostos por Trandfield et al., (2003).

Quadro 1 - Protocolo da RSL

Macro Estágios	Etapas	Detalhes	Aplicação nessa pesquisa
Planejamento da Revisão	1) Pergunta de revisão; 2) Formulação; 3) Revise o protocolo para localização de estudos	1) Identificar os constructos e a pergunta de pesquisa; 2) Definir palavras-chave; 3) Desenvolver as strings de busca; 4) Definição das bases de dados; 5) Idioma: 6) Período:	1) Quais indicadores ou modelos são utilizados na avaliação do impacto ambiental e da sustentabilidade dos serviços de Cloud Computing e da TI Verde? 2) Environment; Impact; LCA; Cloud computing. 3) (TITLE-ABS-KEY("environm* impact") OR TITLE-ABS-KEY("LCA") AND TITLE-ABS-KEY("cloud computing")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) 4) Scopus; 5) Inglês; 6) Período 2015 até 2023.

Condução da Revisão	Seleção e avaliação de estudos Análise e síntese	1) Filtro 1º: leitura do título, resumo e palavras-chave; 2) Filtro 2º: leitura da introdução e conclusão; 3) Filtro 3º: leitura completa do artigo	1) Verificar se os artigos estão relacionados à proposta abordada; 2) Analisar os artigos com enfoque na dimensão literária;
Relatórios e divulgação	Apresentação de resultados	- Responder às questões da revisão; - Destacar pontos relevantes e lacunas na literatura analisada.	Analisar os indicadores: 1) Eficiência Energética; 2) Emissão de CO2

Fonte: Elaboração própria a partir de Trendfield et al., (2003).

Com o objetivo de identificar os indicadores ou modelos utilizados na avaliação do impacto ambiental e da sustentabilidade dos serviços de Cloud Computing e da TI Verde, formulou-se a seguinte pergunta de pesquisa: “Quais indicadores ou modelos são utilizados na avaliação do impacto ambiental e da sustentabilidade dos serviços de Cloud Computing e da TI Verde?” desdobrada em duas sub-perguntas:

Tabela 1 - Questão de Revisão da RSL

Nº	Questão de Revisão
RQ1	Quais são os diferentes indicadores utilizados para analisar o impacto da TI? E esses conjuntos de indicadores conseguem abranger todos os tipos de impactos ambientais e sociais decorrentes do uso da TI?
RQ2	Existe um cálculo padrão amplamente aceito para o indicador de eficiência energética e emissão de CO2 quando se trata da TI?

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Para a seleção e filtragem dos artigos científicos, optou-se por utilizar a base de dados Scopus, que é uma propriedade da editora Elsevier. Essa plataforma foi escolhida devido à sua abrangência e relevância no campo acadêmico, garantindo assim a qualidade e a abrangência da pesquisa realizada. Segundo Guz e Rushchitsky (2009), The Web of Science e Scopus são as bases de dados mais difundidas em diferentes áreas científicas que são frequentemente usadas para pesquisar a literatura. Na realização da pesquisa, além das strings estipuladas no Quadro 1, também foi aplicado o filtro relacionado ao idioma, em questão foi selecionado somente o idioma Inglês (English), no intuito de obter informações e conhecimento a partir do cenário global. Para esta pesquisa, foram analisadas apenas publicações de artigos a partir do ano de 2015, uma escolha deliberada que visa concentrar nossa análise em um período específico para uma investigação mais aprofundada. Para efetivar a busca, foram definidas strings compostas por uma série de palavras-chave relacionadas aos construtos da RQ. As strings de busca foram determinadas após a realização de testes para garantir uma busca confiável. Foi realizada a busca em título, resumo e palavras-chave, concentrando-se em artigos de periódicos e conferência. As strings de pesquisa foram ajustadas ligeiramente para atender às regras booleanas da base de dados Scopus.

Foram obtidos um total de 50 artigos usando as strings iniciais. No entanto, foi necessário aplicar critérios de exclusão, conforme apresentado no Quadro 2. Dois conjuntos de critérios de inclusão e exclusão foram empregados. Primeiramente, durante a fase de triagem,

buscou-se título, resumo e palavras-chave e incluiu artigos que tratavam sobre o assunto abordado nas strings definidas. Em seguida, no segundo filtro seria os artigos são correlatos a proposta abordada, através da leitura da introdução do artigo e conclusão, incluiu apenas artigos com conteúdo escrito em inglês, seu conteúdo acessível gratuitamente e publicados em periódicos científicos revisados. Ao final, um total de 20 artigos foram selecionados.

Quadro 2 - Critérios de exclusão e inclusão de RSL

Critérios	Inclusão	Exclusão	Fases
Foco do Estudo	Impacto do meio ambiente no Clouding Computing	1) Conteúdo fora do âmbito do estudo; 2) Artigos Sem acesso; 3) Artigos dedicados exclusivamente à prática;	Leitura do título, resumo e palavras-chave (Filtro 1); Leitura da introdução e conclusão (Filtro 2); Leitura completa (Filtro 3);
Acesso	Conteúdo em inglês (English)	Conteúdo não escrito em inglês (English)	

Fonte: Elaboração própria, 2023.

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, os resultados da pesquisa serão discutidos em cinco partes distintas. Primeiramente, apresenta-se o perfil dos estudos identificados para contextualizar os resultados (Seção 4.1). Em seguida, aborda-se a evolução dos estudos na área temática (Seção 4.2). Na sequência, explora-se os indicadores e modelos identificados destacando os principais indicadores (Seção 4.3) e, por fim, apresenta-se a discussão dos resultados (Seção 4.4).

### 4.1 Análise Descritiva

No Quadro 3, encontram-se listados os 20 artigos selecionados relacionados ao tema proposto. Esses artigos foram extraídos da base Scopus, que é conhecida por sua abrangência e relevância na área de pesquisa. Na análise da metodologia dos artigos científicos pesquisados, identifica-se que 3 artigos adotaram uma abordagem qualitativa, enquanto os outros 17 optaram pela abordagem quantitativa, como ilustrado na Figura 2. Quanto às áreas de atuação das fontes, pode-se classificá-las em Engenharia, Tecnologia, Sustentabilidade e Administração, conforme demonstrado na Figura 3.

Quadro 3 - Relação de Artigos identificados e suas fontes

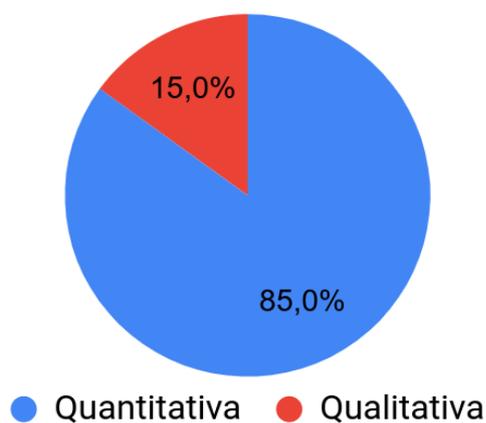
Ano	Autores	Título do Artigo	Fonte	Método	Local
2023	PARK et al., 2023	Green Cloud? An Empirical Analysis of Cloud Computing and Energy Efficiency	Management Science	Quantitativa	EUA
2022	Ullrich N. et al., 2022	Estimating the resource intensity of the Internet: A meta-model to account for cloud-based services in LCA	Procedia CIRP	Quantitativa	EUA
2022	Dodge J. et al., 2022	Measuring the Carbon Intensity of AI in Cloud Instances	ACM International Conference Proceeding Series	Quantitativa	Sem Informação

2022	Zhang X. et al., 2022	Servitization for the Environment? The Impact of Data-Centric Product-Service Models	Journal of Management Information Systems	Quantitativa	Sem Informação
2021	Valentim T., Callou G., 2021	A model-based strategy for quantifying the impact of availability on the energy flow of data centers	Journal of Supercomputing	Quantitativa	Sem Informação
2020	Itten R. et al., 2020	Digital transformation—life cycle assessment of digital services, multifunctional devices and cloud computing	International Journal of Life Cycle Assessment	Qualitativa	Sem Informação
2019	Ferreira J. et al., 2019	An artificial neural network approach to forecast the environmental impact of data centers	Information (Switzerland)	Quantitativa	Brasil
2019	Vatsal S., Agarwal S., 2019	Energy Efficiency Metrics for Safeguarding the Performance of Data Centre Communication Systems by Green Cloud Solutions	2019 International Conference on Cutting-Edge Technologies in Engineering, ICon-CuTE 2019	Quantitativa	Sem Informação
2018	Lykou G. et al., 2018	A new methodology toward effectively assessing data center sustainability	Computers and Security	Quantitativa	Sem Informação
2016	Joy N. et al., 2016	A study on energy efficient cloud computing	2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, ICCIC 2015	Quantitativa	Sem Informação
2016	Dandres T. et al., 2016	Applications and challenges of life cycle assessment in the context of a green sustainable telco cloud	Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST	Quantitativa	Sem Informação
2016	Kannan S., Rajendran S., 2016	Energy efficient cloud computing	Smart Innovation, Systems and Technologies	Quantitativa	Sem Informação
2016	More K., 2016	Environmental benefits of cloud computing	International Journal of Control Theory and Applications	Qualitativa	EUA
2016	Cappiello C. et al., 2016	Modeling CO2 emissions to reduce the environmental impact of cloud applications	Lecture Notes in Business Information Processing	Quantitativa	França e no Reino Unido
2016	Wajid U. et al., 2016	On Achieving Energy Efficiency and Reducing CO2 Footprint in Cloud Computing	IEEE Transactions on Cloud Computing	Quantitativa	Sem Informação

2016	Dumitrescu C., Plesca A., 2016	Overview on energy efficiency parameters in data centres	Proceedings of the 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, EPE 2016	Quantitativa	Sem Informação
2016	Thakur S., Chaurasia A., 2016	Towards Green Cloud Computing: Impact of carbon footprint on environment	Proceedings of the 2016 6th International Conference - Cloud System and Big Data Engineering, Confluence 2016	Quantitativa	Sem Informação
2015	Baidya R. et al., 2015	Analysis of parameters for green computing approach using the analytical hierarchy process	International Conference on Energy Economics and Environment - 1st IEEE Uttar Pradesh Section Conference, UPCON-ICEEE 2015	Qualitativa	Índia
2015	Chang Y.-C. et al., 2015	Green computing: An SLA-based energy-aware methodology for data centers	Frontiers in Artificial Intelligence and Applications	Quantitativa	Sem Informação
2015	Dou H., Qi Y., 2015	Greening data centers within cost budget	IEEE International Conference on Smart City, SC2 2015	Quantitativa	Sem Informação

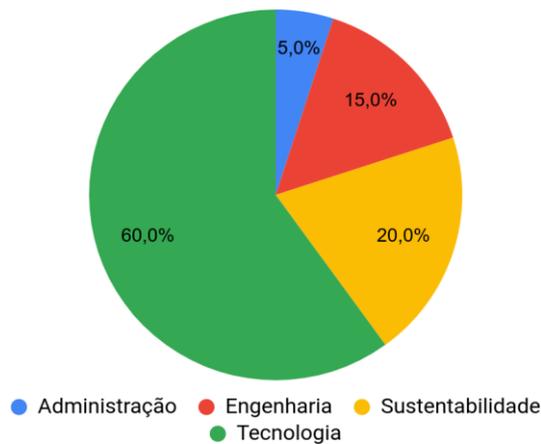
Fonte: Elaboração própria, 2023.

Figura 2 - Método dos artigos revisados



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Figura 3 - Áreas de atuação das fontes

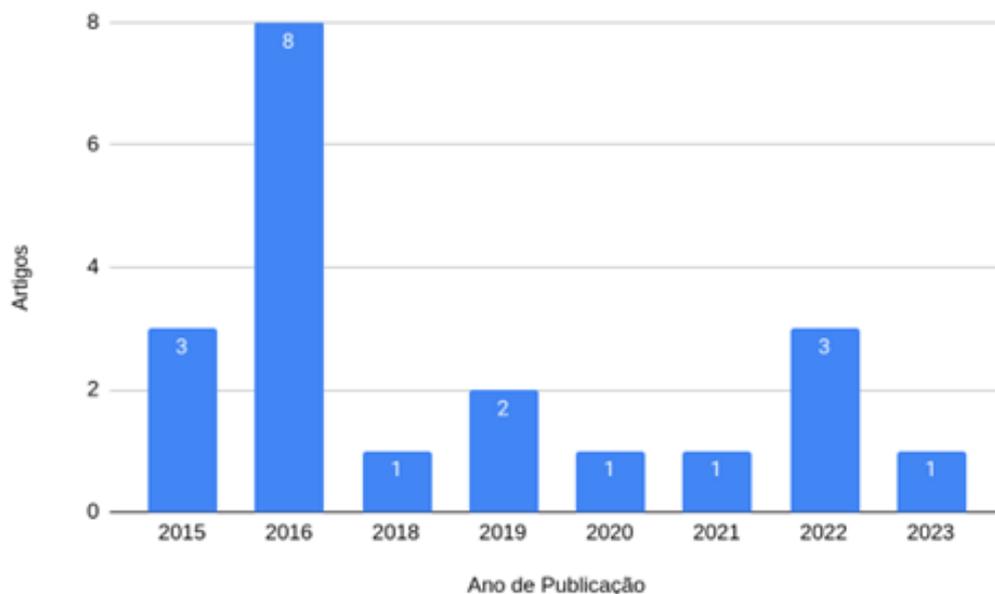


Fonte: Elaboração própria, 2023.

#### 4.2 Evolução dos estudos na área temática

Os artigos selecionados começaram a surgir a partir de 2015, com apenas três artigos neste ano. No entanto, no ano seguinte, em 2016, houve um aumento significativo no número de artigos relacionados ao tema, atingindo seu pico com 8 artigos. Além disso, a relevância dessa temática persiste até o presente ano, 2023. A análise das características dos 20 artigos identificados nesta revisão valida a premissa inicial de que este tema está em constante desenvolvimento, como evidenciado na Figura 3. Destacando-se o ano de 2016 com o pico de publicações, notamos que essas publicações estão concentradas em um número limitado de periódicos (Figura 4).

Figura 4 - Número de citações por ano dos artigos selecionados



Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 4.3 Indicadores e Modelos

No Quadro 4, é possível realizar uma análise detalhada dos indicadores e das fórmulas que os artigos selecionados utilizam para mensurar o impacto ambiental e a sustentabilidade do Cloud Computing.

Quadro 4 – Indicadores e métricas utilizados pelos artigos selecionados

<b>Autor</b>	<b>Indicador</b>	<b>Métrica</b>
PARK et al. (2023)	Eficiência Energética	Sem informação
Ullrich N. et al. (2022)	Eficiência Energética / Emissão de CO2	Sem informação
Dodge J. et al. (2022)	Emissão de CO2	Software Carbon Intensity (SCI)
Zhang X. et al. (2022)	Abordagem Qualitativa: Modelo de negócios de servitização digital	Sem informação
Valentim T., Callou G. (2021)	Eficiência Energética	Sem informação
Itten R. et al. (2020)	Abordagem Qualitativa: Transformação Digital - Impacto ao Ambiente	Sem informação
Ferreira J. et al. (2019)	Eficiência Energética / Emissão de CO2	Energy Flow Model (EFM)
Vatsal S., Agarwal S., (2019)	Eficiência Energética	Communication Network Energy Efficiency (CNEE); Network Power Usage Effectiveness (NPUE); Energy Proportionality Coefficient (EPC)
Lykou G. et al. (2018)	Eficiência Energética	Power Usage Effectiveness (PUE); Data Center Infrastructure Efficiency (DCiE); Energy Reuse Factor (ERF); Carbon Usage Effectiveness (CUE); Green Energy Coefficient (GEC)
Joy N. et al. (2016)	Eficiência Energética	Power Usage Effectiveness (PUE)
Dandres T. et al. (2016)	Eficiência Energética	Sem informação
Kannan S., Rajendran S. (2016)	Eficiência Energética	Sem informação
More K. (2016)	Reciclagem	Sem informação
Cappiello C. et al. (2016)	Abordagem Qualitativa: Benefícios	Sem informação
Wajid U. et al. (2016)	Eficiência Energética / Emissão de CO2	Application PUE (A-PUE)
Dumitrescu C., Plesca A. (2016)	Eficiência Energética /Emissão de CO2	Power Usage Effectiveness (PUE); Data Center Infrastructure Efficiency (DCiE); Energy Reuse Factor (ERF); Carbon Usage Effectiveness (CUE); Water Usage Effectiveness (WUE)

Thakur S., Chaurasia A. (2016)	Eficiência Energética	Power Usage Effectiveness (PUE); Carbon Usage Effectiveness (CUE); Water Usage Effectiveness (WUE)
Chang Y.-C. et al. (2015)	Eficiência Energética /Emissão de CO2	Sem informação
Dou H., Qi Y. (2015)	Eficiência Energética	Sem informação
Baidya R. et al. (2015)	Eficiência Energética	Sem informação

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Foram identificados cinco grupos de indicadores relacionados ao tema em questão: eficiência energética, emissão de CO<sub>2</sub>, relação entre eficiência energética e emissão de CO<sub>2</sub>, reciclagem e abordagens qualitativas. Esses indicadores representam diferentes perspectivas na pesquisa sobre o tópico, refletindo a diversidade de abordagens, visto na Tabela 2:

- a) Eficiência Energética: Um total de 10 artigos abordaram a eficiência energética em vários contextos, demonstrando a importância desse fator na discussão;
- b) Emissão de CO<sub>2</sub>: Um artigo específico se concentrou na análise das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e seu impacto, destacando a preocupação com a pegada de carbono em determinados cenários;
- c) Eficiência Energética e Emissão de CO<sub>2</sub>: Cinco artigos abordaram tanto a eficiência energética quanto a emissão de CO<sub>2</sub>, evidenciando a conexão entre esses dois fatores e a necessidade de considerá-los em conjunto para avaliar o desempenho ambiental;
- d) Reciclagem: Um artigo menciona a reciclagem e sua relevância no contexto geral, enfatizando a importância das práticas sustentáveis;
- e) Abordagem Qualitativa: Três artigos adotaram uma abordagem qualitativa em suas análises, explorando aspectos subjetivos e nuances relacionados ao tema.

Tabela 2 - Grupos de indicadores identificados

Indicadores	Total
Eficiência Energética	10
Emissão de CO <sub>2</sub>	01
Eficiência Energética e Emissão de CO <sub>2</sub>	05
Reciclagem	01
Abordagem Qualitativa	03

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Observa-se que, entre os artigos selecionados, destaca-se uma notável ênfase nos estudos de Eficiência Energética, com um total de 10 artigos dedicados a essa área de pesquisa, além de outros 5 que a analisam em conjunto com a Emissão de CO<sub>2</sub>. Isso ressalta a importância e o interesse substancial na otimização do uso de energia dentro do contexto abordado. A seguir são apresentadas as métricas utilizadas para mensurar a eficiência energética e a emissão de CO<sub>2</sub> utilizadas pelos artigos selecionados.

### 4.3.1 Indicadores de eficiência energética

Ao todo foram identificados 12 métricas diferentes utilizadas pelos artigos para a mensuração da eficiência energética. Os mais utilizados foram PUE (4 artigos), WUE (2 artigos), ERF (2 artigos). Os demais foram citados somente por um único trabalho: DCiE, CNEE, NPUE, EPC e A-PUE. O Quadro 5 apresenta as fórmulas de cálculo dessas métricas.

Quadro 5 - Indicadores de eficiência energética identificados

Indicador	Métrica	Fórmula	Função
Eficiência Energética	Power Usage Effectiveness (PUE)	$PUE = \frac{\text{Energia Consumida pelos Equipamentos de TI}}{\text{Energia Total Consumida pelo Data Center}}$	Comparar o consumo de energia dos equipamentos de TI com o consumo de energia de toda a infraestrutura do Data Center.
	Data Center infrastructure Efficiency (DCiE)	$DCiE = \frac{\text{Energia dos Equipamentos de TI}}{\text{Energia Total da Instalação}}$	Calcular a proporção do consumo de energia do data center.
	Energy Reuse Factor (ERF)	<b>ERF = Energia Reutilizada / Energia Total da Instalação</b>	Identificar a porção de energia recuperada e enviada para uso externo ao data center
	Green Energy Coefficient (GEC)	<b>GEC = Energia Verde / Energia total da Instalação</b>	Quantificar a proporção de energia em uma instalação proveniente de fontes sustentáveis e renováveis.
	Application PUE (A-PUE)	$A - PUE_i = \frac{\sum_k P_{ik}}{\sum_{jk} P_{ijk}}$	A eficácia energética do aplicativo (PUE) é a relação entre a energia total (P) necessária para todas as VMs de uma aplicação i e a potência usada para executar a tarefa j do aplicativo
	EFM	$G = (N, A, w, f_d, f_c, f_p, f_\eta)$	Representa como a energia flui entre os componentes de uma arquitetura de resfriamento ou energia, considerando sua eficiência e capacidade.

Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 4.3.2 Indicadores de emissão de CO2

Seis artigos apresentaram indicadores relacionados à emissão de CO2, sendo cinco em conjunto com os de eficiência e um sozinho. Este é Dodge et al. (2022) que emprega a fórmula desenvolvida pela Green Software Foundation para determinar Software Carbon Intensity (SCI), onde está métrica representa a taxa de emissões de carbono por unidade funcional. Além disso, outros 3 artigos empregam a combinação com a métrica CUE.

Quadro 6 - Indicadores de emissão de CO2 identificados

Indicador	Métrica	Fórmula	Função
Emissão de CO2	Consumo de Unidades Energéticas (CUE)	$CUE = \frac{\text{Total de Emissão de Gás Estufa}}{\text{Energia dos Equipamentos de TI}}$	Avaliar as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) do data center e o consumo de energia nos equipamentos de TI.
	Software Carbon Intensity (SCI)	$SCI = ((E * I) + M) \text{ per } R$	Avaliar a taxa de emissões de carbono por unidade funcional. <i>E</i> (Energia); <i>I</i> (Emissões de Carbono Marginais); <i>M</i> (Carbono Incorporado); <i>R</i> (Unidade Funcional)

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Já Ferreira et al. (2019) aplica métricas do modelo de fluxo de energia (EFM) que considera a quantidade de emissões de CO2 fornecida por cada fonte de energia, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Fontes de Energias

Fonte de Energia	CO2 (g/kWh)
Vento	10
Carvão	950
Hidrelétrica	20
Nuclear	150
Óleo	510

Fonte: Ferreira J. et al. (2019)

#### 4.4 Discussão dos Resultados

Por meio de uma RSL, este estudo analisou vários artigos sobre o impacto da Tecnologia da Informação (TI) no meio ambiente e na sociedade. Os resultados variaram, destacando benefícios como eficiência e preocupações como aumento do consumo de energia e emissões de CO2. No que diz respeito ao RQ1, observa-se que pouca diversidade de indicadores foi utilizada para avaliar os impactos da TI. Esses indicadores englobam basicamente o consumo de energia e a emissão de CO2 relacionada a ela, uma vez que 16 dos 20 estudos selecionados têm esses focos. Questões como geração de resíduos pela obsolescência dos equipamentos ou mesmo questões sociais não são apontadas. Alguns dos indicadores mais frequentemente utilizados compreendem:

- a) Eficiência Energética: Esses indicadores medem o consumo de energia relacionado à TI, como o consumo de eletricidade dos dispositivos e data centers;
- b) Emissões de Carbono: Eles avaliam as emissões de gases de efeito estufa associadas às operações de TI, como as provenientes do uso de eletricidade e da fabricação de dispositivos.

A variedade de métricas utilizadas para analisar o impacto da TI dificulta a comparação entre fornecedores dos serviços, pois se transforma em uma análise fragmentada e inconsistente. Sem uma combinação uniforme de indicadores, é difícil determinar de forma justa qual fornecedor é mais sustentável ou eficiente, uma vez que diferentes métricas podem favorecer

diferentes aspectos de TI ambiental e social, tornado uma comparação menos precisa e propósito.

É importante enfatizar a importância de se ter um conjunto padrão de métricas para poder comparar o desempenho entre diferentes provedores de serviços de TI. A variedade de medidas pode, na verdade, dificultar esta comparação porque torna a avaliação menos consistente e objetiva. Embora reconheçamos diferenças no impacto das TI por contexto e aplicação, é essencial estabelecer um conjunto mínimo de indicadores comuns para permitir uma avaliação comparativa mais consistente. Isto garantirá que a seleção dos fornecedores se baseie em critérios claros e apropriados, facilitando assim a seleção dos serviços que melhor se alinham com os objetivos ambientais e sociais.

Em relação à RQ2, observamos que não existe um único cálculo padrão universal para os indicadores de eficiência energética e emissão de CO<sub>2</sub> no contexto de TI. Ao contrário, foram 12 métricas diferentes. No entanto, existem abordagens comuns que foram aplicadas por mais artigos para calcular esses indicadores:

1. Eficiência Energética: A eficiência energética em TI geralmente é calculada usando a relação entre a energia total consumida e o desempenho ou trabalho realizado. Um cálculo comum (4 artigos) é o PUE (Power Usage Effectiveness) para data centers. Um PUE ideal é 1,0, o que significa que toda a energia consumida é usada diretamente pelos equipamentos de TI. Valores acima de 1,0 indicam perdas de energia devido a sistemas de resfriamento, iluminação e outros equipamentos de suporte.

2. Emissão de CO<sub>2</sub>: O cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à TI depende de vários fatores, incluindo a fonte de energia utilizada e a quantidade de energia consumida. O processo geral envolve:

- a) Determinar a quantidade de energia elétrica consumida (em kWh) pelos sistemas de TI.
- b) Identificar a matriz de emissões de CO<sub>2</sub> associada à geração de eletricidade na região onde a TI está operando. Isso pode envolver informações sobre a emissão de CO<sub>2</sub> por kWh de eletricidade.
- c) Multiplicar a quantidade de energia elétrica consumida pelo fator de emissão de CO<sub>2</sub> para calcular as emissões de CO<sub>2</sub>.

Por exemplo, o cálculo pode ser expresso como:

$$\text{Emissões de CO}_2 \text{ (t)} = \text{Energia Consumida (kWh)} \times \text{Fator de Emissões de CO}_2 \text{ (kg CO}_2\text{/kWh)} \times \frac{1}{1000}$$

É importante lembrar que o fator de emissão de CO<sub>2</sub> pode variar significativamente dependendo da fonte de eletricidade (por exemplo, carvão, energia renovável, nuclear) e da região geográfica. Esses são cálculos simplificados para ilustrar os princípios gerais. A precisão dos cálculos dependerá da disponibilidade de dados detalhados sobre o consumo de energia e a matriz de emissões de CO<sub>2</sub> específicas. Empresas e data centers podem implementar sistemas de monitoramento avançados para obter dados mais precisos e calcular esses indicadores de forma mais personalizada.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta revisão de literatura, explorou-se a mensuração do impacto ambiental do Cloud Computing. Através da análise de 20 artigos, identificou-se cinco grupos de indicadores utilizados na literatura, incluindo eficiência energética, emissão de CO<sub>2</sub>, eficiência energética e emissão de CO<sub>2</sub>, reciclagem e estudos qualitativos. Esses indicadores fornecem uma visão restrita das implicações ambientais associadas à crescente adoção da tecnologia de Cloud Computing. Isso porque outros impactos como os sociais e a geração de resíduos não foram considerados.

Os estudos revisados revelaram que o Cloud Computing, apesar de oferecer inúmeras vantagens em termos de escalabilidade e eficiência operacional, não está isento de impactos ambientais significativos. A eficiência energética em data centers de cloud é uma área crítica, e os modelos de mensuração desempenham um papel fundamental na avaliação e melhoria desse aspecto. A emissão de CO<sub>2</sub> associada ao uso de recursos de cloud também representa uma preocupação importante, exigindo a implementação de práticas sustentáveis. Além disso, a combinação de eficiência energética e emissão de CO<sub>2</sub> em modelos de mensuração pode oferecer uma visão mais holística do impacto ambiental do Cloud Computing. Práticas de reciclagem e reutilização de hardware em data centers também emergem como uma estratégia promissora para mitigar o impacto ambiental. É importante ressaltar que a abordagem qualitativa, discutida em alguns dos artigos revisados, permite considerar aspectos sociais, éticos e políticos relacionados ao impacto ambiental no Cloud Computing. Essa perspectiva ampliada pode ser fundamental para a formulação de políticas e práticas sustentáveis no setor de TI.

Em resumo, esta revisão de literatura demonstra que a mensuração do impacto do Cloud Computing ainda é incipiente. Ainda há muito trabalho a ser feito para definir indicadores e mensurar efetivamente esse impacto e promover a adoção de abordagens mais ecológicas na indústria de TI. Futuras pesquisas devem se concentrar na criação e aprimoramento de modelos de mensuração precisos e que mensurem todas as categorias de impacto ambiental e social na avaliação contínua das práticas ambientalmente conscientes no campo do Cloud Computing. Ao fazê-lo, pode-se avançar em direção a um futuro em que a tecnologia da informação e a sustentabilidade coexistem de maneira harmoniosa, beneficiando tanto as empresas quanto o meio ambiente.

## 6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. **O bom negócio da sustentabilidade**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Editora Nova Fronteira, 2002.

BAIDYA, R.; GHOSH, S. K.; DEBNATH, B. **Analysis of parameters for green computing approach using the analytical hierarchy process**. International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE). Índia: IEEE, 2015.

BARBIERI, C. **Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos**. São Paulo: Editora Saraiva, 2004.

CAPPIELLO, C.; MELIÀ, P.; PLEBANI, P. **Modeling CO<sub>2</sub> Emissions to Reduce the Environmental Impact of Cloud Applications**. Advanced Information Systems Engineering Workshops. Alemanha: Springer International Publishing, 2016. v. 249p. 155–166.

CHANG, Y.-C. et al. Green Computing: An SLA-based Energy-aware Methodology for Data Centers. **Intelligent Systems and Applications**. [s.l.] IOS Press, 2015. p. 1345–1354.

COLMAN-MEIXNER, C. et al. **A Survey on Resiliency Techniques in Cloud Computing Infrastructures and Applications**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 18, n. 3, p. 2244–2281, 2016.

DANDRES, T. et al. **Applications and Challenges of Life Cycle Assessment in the Context of a Green Sustainable Telco Cloud**. Alemanha: Springer International Publishing, 2016. v. 166p. 227–238.

- DODGE, J. et al. **Measuring the Carbon Intensity of AI in Cloud Instances**. ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency. Seoul Republic of Korea: ACM, 2022.
- DOU, H.; QI, Y. **Greening Data Centers within Cost Budget**. International Conference on Smart City/SocialCom/SustainCom (SmartCity). China: IEEE, 2015.
- DUMITRESCU, C.; PLESCA, A. **Overview on energy efficiency parameters in data centres**. International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE). Romania: IEEE, 2016.
- ELKINGTON, J. **Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development**. California Management Review, v. 36, n. 2, p. 90–100, 1994.
- ELTAYEB, T. K.; ZAILANI, S. **Going Green through Green Supply Chain Initiatives Toward Environmental Sustainability**. Operations and Supply Chain Management: An International Journal, p. 93–110, 2014.
- FERREIRA, J. et al. **An Artificial Neural Network Approach to Forecast the Environmental Impact of Data Centers**. Information, v. 10, n. 3, p. 113, 2019.
- GUZ, A. N.; RUSHCHITSKY, J. J. **Scopus: A system for the evaluation of scientific journals**. International Applied Mechanics, v. 45, n. 4, p. 351–362, 2009.
- HELM, J. L.; NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING (EDS.). **Energy: production, consumption, and consequences**. Washington, D.C: National Academy Press, 1990.
- ITTEN, R. et al. **Digital transformation—life cycle assessment of digital services, multifunctional devices and cloud computing**. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 25, n. 10, p. 2093–2098, 2020.
- JOY, N.; CHANDRASEKARAN, K.; BINU, A. **A study on energy efficient cloud computing**. International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIIC). India: IEEE, 2015.
- KANNAN, S.; RAJENDRAN, S. **Energy Efficient Cloud Computing**. Proceedings of the 3rd International Symposium on Big Data and Cloud Computing Challenges (ISBCC – 16<sup>3</sup>). Alemanha: Springer International Publishing, 2016.
- LYKOU, G.; MENTZELIOTI, D.; GRITZALIS, D. **A new methodology toward effectively assessing data center sustainability**. Computers & Security, v. 76, p. 327–340, 2018.
- MARSTON, S. et al. **Cloud computing — The business perspective**. Decision Support Systems, v. 51, n. 1, p. 176–189, 2011.
- MISHRA, A. K. et al. **Towards characterizing cloud backend workloads: insights from Google compute clusters**. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, v. 37, n. 4, p. 34–41, 2010.
- MORE, K. **Environmental benefits of cloud computing**. International Journal of Control Theory and Applications, v. 9, p. 113–118, 2016.

MYTTON, D. **Hiding greenhouse gas emissions in the cloud**. *Nature Climate Change*, v. 10, n. 8, p. 701–701, ago. 2020.

PARK, J.; HAN, K.; LEE, B. **Green Cloud? An Empirical Analysis of Cloud Computing and Energy Efficiency**. *Management Science*, v. 69, n. 3, p. 1639–1664, 2023.

RASHEED, H. **Data and infrastructure security auditing in cloud computing environments**. *International Journal of Information Management*, v. 34, n. 3, p. 364–368, 2014.

THAKUR, S.; CHAURASIA, A. **Towards Green Cloud Computing: Impact of carbon footprint on environment**. 6th International Conference - Cloud System and Big Data Engineering (Confluence). Índia: IEEE, 2016.

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

ULLRICH, N. et al. **Estimating the resource intensity of the Internet: A meta-model to account for cloud-based services in LCA**. *Procedia CIRP*, v. 105, p. 80–85, 2022.

VALENTIM, T.; CALLOU, G. **A model-based strategy for quantifying the impact of availability on the energy flow of data centers**. *The Journal of Supercomputing*, v. 77, n. 3, p. 2566–2589, 2021.

VATSAL, S.; AGARWAL, S. **Energy Efficiency Metrics for Safeguarding the Performance of Data Centre Communication Systems by Green Cloud Solutions**. *International Conference on Cutting-edge Technologies in Engineering (ICon-CuTE)*. Índia: IEEE, 2019.

WAJID, U. et al. **On Achieving Energy Efficiency and Reducing CO2 Footprint in Cloud Computing**. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, v. 4, n. 2, p. 138–151, 2016.

WATSON; BOUDREAU; CHEN. **Information Systems and Environmentally Sustainable Development: Energy Informatics and New Directions for the IS Community**. *MIS Quarterly*, v. 34, n. 1, p. 23, 2010.

ZHANG, X. et al. **Servitization for the Environment? The Impact of Data-Centric Product-Service Models**. *Journal of Management Information Systems*, v. 39, n. 4, p. 1146–1183, 2022.

ZHENG, D. Q. **The Discussion on Mechanism and Research Framework of Green Information Technology and Information Systems Adoption**. *Advanced Materials Research*, v. 694–697, p. 2286–2290, 2013.