

Aplicações de Inteligência Artificial em Cidades Inteligentes: Uma Revisão Sistemática com Ênfase no Desenvolvimento Sustentável

Thiago N. E. Rodrigues¹

¹Programa de Pós-Graduação em Informática – Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

thiagoneye@gmail.com

Resumo. *O presente trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre o uso de Inteligência Artificial (IA) em Cidades Inteligentes, com ênfase em como a tecnologia pode promover o desenvolvimento urbano sustentável. O estudo destaca que o conceito de cidade inteligente evoluiu da simples digitalização para uma integração complexa de IA e Internet das Coisas (IoT), aplicadas principalmente na gestão energética. Apesar do potencial da IA para criar cidades mais eficientes e resilientes, a pesquisa identifica desafios significativos, incluindo barreiras técnicas como a cibersegurança e questões sociais como o risco de agravar desigualdades. A análise conclui que a transição bem-sucedida para cidades inteligentes e sustentáveis exige a combinação da inovação tecnológica e planejamento estratégico de longo prazo, a fim de garantir um desenvolvimento equitativo e ambientalmente responsável.*

Abstract. *This paper presents a systematic literature review on the use of Artificial Intelligence (AI) in Smart Cities, with an emphasis on how the technology can promote sustainable urban development. The study highlights that the smart city concept has evolved from simple digitalization to a complex integration of AI and the Internet of Things (IoT), primarily applied in energy management. Despite the potential of AI to create more efficient and resilient cities, the research identifies significant challenges, including technical barriers such as cybersecurity and social issues like the risk of exacerbating inequalities. The analysis concludes that the successful transition to smart and sustainable cities requires the combination of technological innovation and long-term strategic planning to ensure equitable and environmentally responsible development.*

1. Introdução

O conceito de Cidades Inteligentes teve origem na década de 1990, inicialmente associado ao uso da internet e de ferramentas digitais na gestão urbana. Nesse primeiro momento, o foco estava na digitalização de serviços e na conectividade, através das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs), como meios de aumentar a eficiência dos sistemas.

De acordo com [Almashhour and Shaqour 2025], com o passar do tempo, o conceito de Cidades Inteligentes evoluiu. Atualmente, está fortemente associado à integração de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), a Computação em Nuvem e a Inteligência Artificial (IA), aplicadas ao planejamento, gestão e manutenção de sistemas urbanos. Essa integração possibilita maior automação, personalização de serviços e tomada de decisões

baseadas em dados em tempo real, contribuindo para o desenvolvimento econômico, social e ambiental das cidades.

Entretanto, essa transformação digital traz consigo novos desafios. A crescente dependência da IoT para operar serviços essenciais expõe as cidades a vulnerabilidades (que podem resultar na interrupção do fornecimento de água e energia) e em graves violações de privacidade [Alamer et al. 2021], [Kim et al. 2023] e [Ma 2021]. A tecnologia blockchain se destaca como uma solução potencial para endereçar esses problemas.

Além disso, um dos grandes desafios consiste em conciliar o avanço tecnológico com práticas sustentáveis reconhecidas globalmente, já que inovação e sustentabilidade nem sempre caminham lado a lado. Segundo [Bibri and Krogstie 2017] e [Ahvenniemi et al. 2017], as cidades são responsáveis por uma parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE), impulsionadas pela alta densidade populacional e pela intensidade das atividades urbanas.

Nesse contexto, surge o conceito de cidades inteligentes e sustentáveis (*smart sustainable cities*), que propõe uma visão unificada para enfrentar os desafios ambientais, sociais e tecnológicos das áreas urbanas.

Entre os principais compromissos globais nesse sentido, destaca-se a meta de Emissão Líquida Zero (*Net-Zero*), que visa equilibrar a quantidade de GEE emitida com a quantidade removida da atmosfera. Segundo [Li et al. 2024b], alcançar a neutralidade de carbono até 2050 é um objetivo amplamente adotado por diversos países, exigindo transformações profundas nas dinâmicas urbanas e produtivas.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sistemática com foco na aplicação de técnicas de Inteligência Artificial (IA) no contexto de Cidades Inteligentes, analisando de que forma essas tecnologias têm contribuído para promover o desenvolvimento urbano sustentável por meio de estratégias de descarbonização. A proposta é identificar abordagens, modelos e práticas que integrem IA ao desenvolvimento sustentável, destacando seu potencial para transformar sistemas urbanos em estruturas mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Cidades Inteligentes: Conceito e Dimensões

Segundo [Albino et al. 2015], não há uma definição única, consistente ou universalmente aceita para o termo *cidade inteligente*, uma vez que o conceito é multifacetado e fortemente influenciado pelo contexto em que é aplicado. O autor ressalta ainda que a ideia de cidade inteligente evoluiu de uma abordagem predominantemente tecnológica para uma **perspectiva centrada nas necessidades humanas e comunitárias**, buscando promover um desenvolvimento urbano sustentável e integrado, no qual a tecnologia atua como facilitadora da melhoria da qualidade de vida nas cidades.

Já [Giffinger et al. 2007] classifica as cidades inteligentes com base em **seis dimensões fundamentais** que abrangem suas múltiplas aplicações no contexto urbano:

- **Economia inteligente:** Presença de indústrias no campo das TICs ou que empregam TICs em seus processos produtivos.

- **Mobilidade inteligente:** Uso de TICs em tecnologias de transporte modernas para melhorar o tráfego urbano.
- **Ambiente inteligente:** Preservação do ambiente natural.
- **Pessoas inteligentes:** Inclui afinidade com a aprendizagem ao longo da vida, pluralidade social e étnica, flexibilidade, criatividade e participação na vida pública.
- **Vida inteligente:** Relacionado à qualidade de vida, segurança e aspectos culturais.
- **Governança inteligente:** Envolvimento de diversas partes interessadas na tomada de decisões e nos serviços públicos, com transparência e foco no cidadão.

2.2. Estratégias de Desenvolvimento Sustentável

O conceito de Desenvolvimento Sustentável é fundamental para a forma como as cidades e a sociedade em geral abordam o futuro, buscando um equilíbrio entre as necessidades presentes e as futuras gerações [Bibri and Krogstie 2017]. De acordo com [Bibri and Krogstie 2017], [Ahvenniemi et al. 2017] e [Albino et al. 2015], pode ser compreendido como um conjunto das seguintes estratégias:

- Um processo de mudança e uma abordagem estratégica para alcançar os objetivos de longo prazo da sustentabilidade.
- Um compromisso internacional para combater as mudanças climáticas.
- O equilíbrio entre o desenvolvimento de áreas urbanas e a proteção ambiental, com foco na equidade de renda e condições sociais.
- A conciliação entre crescimento econômico e prosperidade com proteção e integridade ambiental, e equidade e justiça social.

Ou seja, é uma estratégia global de transformação que busca equilibrar o desenvolvimento urbano e econômico com a preservação ambiental e a promoção da justiça social, com foco na sustentabilidade de longo prazo.

2.3. Uso de IA para Promoção do Desenvolvimento Sustentável em Cidades Inteligentes

De acordo com [Mahamuni et al. 2022], as técnicas de Inteligência Artificial (incluindo subáreas como Aprendizado de Máquina e Aprendizado Profundo) emergem como ferramentas fundamentais para analisar grandes volumes de dados e impulsionar o desenvolvimento sustentável dos centros urbanos:

- Na qualidade do ar, esses métodos melhoram o monitoramento da poluição;
- No setor de água e saneamento, ajudam a prever demanda e monitorar a qualidade da água;
- Na previsão do tempo, contribuem com sistemas de alerta precoce para desastres;
- Na agricultura inteligente, auxiliam no gerenciamento de culturas;
- No transporte, aumentam a eficiência e segurança, enquanto na infraestrutura inteligente possibilitam desde a detecção de anomalias até a gestão energética;
- Na área da saúde, apoiam diagnósticos e previsões médicas, como detecção de doenças;
- Por fim, na governança inteligente, são aplicados à análise de dados públicos e sentimentos sociais para apoiar decisões políticas mais transparentes e centradas nas pessoas.

Dentre as técnicas apresentadas na literatura, destacam-se:

2.3.1. Modelos baseados em Aprendizagem de Máquinas

Modelos estatísticos, mais estabelecidos e tradicionais, que continuam relevantes.

- Árvores de Decisão: Usados para classificação e regressão em diversas áreas como gestão de energia, previsão da procura de água, análise de tráfego e qualidade do ar.
- Máquinas de Vetores de Suporte (SVM): Aplicados em tarefas de classificação e regressão.
- Regressão Linear e Logística: Modelos básicos de previsão e classificação.
- Naive Bayes: Um classificador probabilístico.
- K-Vizinhos mais Próximos (KNN): Um algoritmo de classificação e agrupamento.
- *eXtreme Gradient Boosting* (XGBoost): Um algoritmo para classificação e regressão.
- *K-means*: Usados para identificar padrões e agrupar dados similares.

2.3.2. Modelos baseados em Redes Neurais

Esta é uma categoria proeminente, impulsionada pela capacidade de processar dados em larga escala.

- Redes Neurais Profundas (DNN): Arquiteturas multicamadas, utilizadas para diversas tarefas, incluindo previsão de energia e análise de desastres.
- Redes Neurais Convolucionais (CNN): Especialmente eficazes para análise de dados visuais (imagens) e espaciais, aplicadas em detecção de objetos, reconhecimento de padrões, análise de qualidade do ar e gestão de infraestrutura.
- Redes Neurais Recorrentes (RNN), Memória de Longo e Curto Prazo (LSTM) e Unidade Controlada por Portas (GNU): Adequadas para dados sequenciais e séries temporais, amplamente usadas em previsão de carga de energia, previsão de tráfego, previsão da qualidade do ar e análise de mobilidade.
- Redes Adversariais Generativas (GAN): Mencionadas em aplicações de segurança e modelagem.
- Autocodificadores (AE): Usados para redução de dimensionalidade e aprendizado de atributos.
- Redes de Crença Profundas (DBN): Arquiteturas profundas compostas por várias camadas de Máquinas de Boltzmann Restritas, usadas em diversas aplicações de aprendizado profundo.

2.3.3. Modelos baseados no Aprendizado por Reforço

Para otimizar decisões sequenciais e controle automatizado. Aplicado em gerenciamento de energia, controle de edifícios inteligentes e detecção de crimes.

2.3.4. Outros modelos

- Ontologias: Ferramenta para criar uma base de conhecimento estruturada e semântica. Ao fornecer uma estrutura semântica, as ontologias permitem a

integração de dados de fontes e formatos diferentes, superando barreiras de heterogeneidade de dados.

- Meta-heurísticas: Estratégias de otimização projetadas para encontrar rapidamente soluções de alta qualidade para problemas complexos.
- Aprendizado por Transferência e Aprendizado por Transferência Profunda: Permite o uso de modelos pré-treinados em novos domínios com dados limitados, importante para otimizar sistemas de energia em edifícios inteligentes.
- Aprendizado Colaborativo: Uma abordagem distribuída que permite treinar modelos em dispositivos locais sem compartilhar dados brutos, crucial para a privacidade em aplicações de cidades inteligentes como saúde, transporte e energia.
- Modelos Híbridos: Combinações de diferentes modelos para melhorar o desempenho e a robustez.

Vale salientar que os autores enfatizam que o sucesso da implementação de um modelo de IA depende criticamente da seleção adequada dos classificadores, do tamanho dos conjuntos de dados para treinamento e teste, e da escolha correta dos conjuntos de atributos para garantir resultados precisos e eficiência computacional.

3. Metodologia

Esta seção descreve o delineamento metodológico utilizado para conduzir a revisão sistemática da literatura sobre aplicações de Inteligência Artificial (IA) em cidades inteligentes, com ênfase em estratégias para promoção do Desenvolvimento Sustentável.

3.1. Questão de Pesquisa

A revisão foi orientada pela seguinte pergunta central:

“Como as técnicas de Inteligência Artificial têm sido aplicadas no contexto de cidades inteligentes para apoiar ou otimizar processos relacionados ao desenvolvimento sustentável?”

3.2. Base de Dados

Foram utilizadas as seguintes bases de dados científicas para garantir a abrangência da busca:

- Scopus
- ScienceDirect
- Web of Science
- IEEE Xplore

As buscas foram realizadas entre maio e junho de 2025.

3.3. Estratégia de Pesquisa

A seleção dos artigos foi realizada em duas etapas complementares.

Na primeira etapa, de forma mais exploratória, realizou-se um levantamento inicial sobre o conceito de Cidades Inteligentes e de Descarbonização, buscando alguns artigos de revisão mais influentes e referenciados na literatura, tais como [Albino et al. 2015], [Bibri and Krogstie 2017] e [Osman et al. 2020]. Essa etapa teve como objetivo construir uma base conceitual sólida para a pesquisa.

A segunda etapa, mais abrangente e aprofundada, concentrou-se na análise das aplicações de Inteligência Artificial em Cidades Inteligentes. Dada a ampla diversidade de abordagens dentro dessas áreas, optou-se por delimitar o foco à subárea relacionada ao desenvolvimento urbano sustentável. Nesse contexto, foram selecionados artigos publicados nos últimos cinco anos (a partir de 2020), com ênfase em estudos que exploram o uso de técnicas de IA para apoiar iniciativas ligadas ao desenvolvimento sustentável em cidades inteligentes.

3.4. Palavras-chave

A string de busca foi construída a partir das seguintes combinações de palavras-chave (em inglês) e operadores booleanos:

“smart cities” AND (“artificial intelligence” OR “machine learning” OR “deep learning” OR “neural networks”) AND (“net zero” OR “carbon management” OR “CO2 mitigation” OR “carbon reduction” OR “carbon capture” OR “carbon utilization” OR “carbon storage” OR “CCUS”)

3.5. Extração e Síntese dos Dados

As seguintes informações foram extraídas de cada trabalho incluído:

- Autor e Ano
- Modelo de IA utilizado e aplicação
- Contexto urbano (ex: gestão energética, tráfego, monitoramento ambiental)
- Desafios e Oportunidades

4. Síntese da Revisão

A literatura recente tem abordado as Cidades Inteligentes como ecossistemas dinâmicos e interdependentes, compostos por múltiplos subsistemas (como saúde, transporte, energia, segurança e governança), conforme a perspectiva de cidade como Sistema de Sistemas. Essa visão amplia a compreensão tradicional, destacando que a integração tecnológica entre esses subsistemas é essencial para o desenvolvimento de ambientes urbanos mais sustentáveis, eficientes e resilientes. O uso de IA em conjunto com tecnologias como IoT, gêmeos digitais e 5G possibilita essa sinergia, permitindo o monitoramento em tempo real, a simulação de cenários e a otimização de recursos, elementos cruciais para a promoção da qualidade de vida urbana.

Contudo, a implementação dessas tecnologias enfrenta desafios significativos, sobretudo relacionados à compatibilidade de sistemas, à escalabilidade de soluções e à cibersegurança de infraestruturas críticas. A heterogeneidade dos dados urbanos (muitas vezes inconsistentes, fragmentados ou inacessíveis) compromete a construção de modelos preditivos robustos. Ontologias surgem como ferramentas importantes para superar tais barreiras, ao oferecerem uma estrutura semântica que facilita a integração e interpretação de diferentes fontes de dados. Ainda assim, o alto custo computacional, a natureza “caixa-preta” de modelos de IA e os problemas *NP-Completo*s impõem limites à adoção plena dessas soluções em contextos que exigem respostas rápidas e de alta granularidade.

Além dos desafios técnicos, há questões sociais e estruturais que precisam ser consideradas. A complexidade dos sistemas urbanos dificulta a modelagem precisa do

comportamento real, e a eficiência promovida por soluções inteligentes pode resultar em efeitos colaterais, como o efeito **rebote energético**. A substituição de mão de obra por automação e a fragmentação de políticas climáticas agravam as desigualdades urbanas e dificultam a criação de soluções integradas entre setores como transporte, energia e ocupação do solo. Nesse cenário, é fundamental que políticas públicas sejam desenhadas de forma sistêmica, priorizando inclusão social, sustentabilidade e governança digital.

Apesar dos desafios, as oportunidades trazidas pela digitalização urbana são significativas. Modelos substitutos e técnicas de metamodelagem permitem realizar simulações complexas com menor custo computacional, ampliando o acesso ao uso de Inteligência Artificial em cidades de menor porte. Os modelos híbridos, por sua vez, têm demonstrado maior capacidade de generalização, sendo particularmente eficazes em contextos energéticos e climáticos. Além disso, a IA oferece potencial para reforçar a segurança digital de infraestruturas críticas e apoiar decisões orientadas por dados, desde que sejam adotadas estratégias de explicabilidade e transparência algorítmica. A Tabela 1 apresenta um panorama de modelos de IA aplicados ao contexto urbano.

Tabela 1. Modelos de IA e suas Aplicações Urbanas

Artigo	Modelo de IA Utilizado	Aplicação Urbana
[Cao et al. 2023]	Ontologias e Máquinas de Vetores de Suporte (SVM)	Digitalização de Sistemas de Energia, Planejamento de Infraestrutura, Otimização de Transporte e Integração de Recursos
[Chen et al. 2024]	Unidade Recorrente Fechada (GRU) e Otimização por Colônia de Formigas (ACO)	Gestão e Otimização de Energia
[Himeur et al. 2022]	Aprendizagem por Transferência	Gestão Energética
[Hsieh 2025]	Algoritmos de Evolução Diferencial	Mobilidade Urbana
[Liu and Zhang 2024]	Rede Neural de Unidade Recorrente Bidirecional Gated de Múltiplas Escalas (BiGRU), Algoritmo de Polinização de Flores Modificado e Informação Mútua	Gestão Energética
[Jiao et al. 2024]	Aprendizagem por Reforço e Otimização Baseada em Ensino-Aprendizagem (TLBO)	Gestão Energética
[Li et al. 2024a]	Redes Adversariais Gerativas (GANs) e Otimização por Acasalamento de Abelhas (HBMO)	Gestão Energética e Gestão de Transporte Urbano

Continua na próxima página

Tabela 1 – <i>Continuação</i>		
Artigo	Modelo de IA Utilizado	Aplicação Urbana
[Li et al. 2025]	Descoberta Causal Escalável (SCD), Redes Neurais de Grafos Hiperbólicos (HGNNs) e Descoberta Causal com Injeção de Conhecimento (KICD)	Governança Colaborativa e Planejamento Urbano
[Mekouar et al. 2024]	Modelo Híbrido CNN-LSTM	Monitoramento Ambiental e Gestão de Tráfego
[Munoz et al. 2023]	<i>SARIMAX</i> , Fatores de Fourier e Decomposição de Tendência Sazonal com Loess (STL)	Monitoramento Ambiental e Gestão de Tráfego
[Ulpiani et al. 2025]	<i>XGBoost</i>	Planejamento Urbano
[Wang et al. 2022]	Rede Neural de Autômatos Celulares (CA-ANN), Memória de Curto e Longo Prazo (LSTM) e Algoritmo de Otimização de Baleias (WOA)	Planejamento Urbano e Monitoramento Ambiental
[Yoon et al. 2022]	<i>K-Means</i> e Redes Neurais Recorrentes (RNN)	Gestão Energética e Monitoramento de Carbono

Por fim, tecnologias digitais, quando integradas a soluções sustentáveis e estratégias de baixo custo, oferecem ganhos substanciais para a sustentabilidade urbana. Monitoramento de emissões de CO2 em tempo real, análise condicional de políticas e economia circular do carbono representam caminhos promissores para alcançar metas climáticas globais. A alfabetização digital e energética, juntamente com a incorporação de co-benefícios sociais (como a redução de mortes por poluição), fortalece o argumento em favor da transformação digital como vetor de equidade e bem-estar. A transição para cidades inteligentes sustentáveis dependerá, portanto, da capacidade de aliar inovação tecnológica à justiça social e planejamento estratégico de longo prazo.

5. Conclusões

A interseção entre Inteligência Artificial, Cidades Inteligentes e Sustentabilidade representa uma oportunidade estratégica para enfrentar os desafios urbanos contemporâneos, promovendo eficiência, resiliência e alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. A literatura evidencia o avanço do conceito de cidade inteligente por meio da integração de IA, com aplicações promissoras em energia, mobilidade e monitoramento ambiental. No entanto, obstáculos técnicos como a heterogeneidade dos dados, os altos custos computacionais e a cibersegurança, além de desafios sociais como a automação do trabalho e a fragmentação de políticas públicas, ainda limitam sua implementação plena. Superar esses entraves requer políticas integradas, promoção da alfabetização digital e estratégias que aliem inovação tecnológica à justiça social, garantindo que a IA atue como um vetor de equidade e qualidade de vida nas cidades.

Referências

- Ahvenniemi, H., Huovila, A., Pinto-Seppä, I., and Airaksinen, M. (2017). What are the differences between sustainable and smart cities? *Cities*, 60:234–245.
- Alamer, M., Almaiah, M., and Almaiah, M. (2021). Cybersecurity in smart city: A systematic mapping study. pages 719–724.
- Albino, V., Berardi, U., and Dangelico, R. (2015). Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. *Journal of Urban Technology*, 22:2015.
- Almashhour, R. and Shaqour, E. (2025). The intelligent cities conversion process based on ai and technologies integration: a systematic literature review. *Budownictwo i Architektura*, 24:113–132.
- Bibri, S. E. and Krogstie, J. (2017). Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*, 31:183–212.
- Cao, L., Hu, P., Li, X., Sun, H., Zhang, J., and Zhang, C. (2023). Digital technologies for net-zero energy transition: a preliminary study. *Carbon Neutrality*, 2(1).
- Chen, L., Li, X., and Zhu, J. (2024). Carbon peak control for achieving net-zero renewable-based smart cities: Digital twin modeling and simulation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 65:103792.
- Giffinger, R., Fertner, C., Kramar, H., Kalasek, R., Milanović, N., and Meijers, E. (2007). *Smart cities - Ranking of European medium-sized cities*.
- Himeur, Y., Elnour, M., Fadli, F., Meskin, N., Petri, I., Rezgui, Y., Bensaali, F., and Amira, A. (2022). Next-generation energy systems for sustainable smart cities: Roles of transfer learning. *Sustainable Cities and Society*, 85:104059.
- Hsieh, F.-S. (2025). Creating effective self-adaptive differential evolution algorithms to solve the discount-guaranteed ridesharing problem based on a saying. *Applied Sciences*, 15(6).
- Jiao, Y., Kang, H., and Sun, H. (2024). An intelligent landscaping framework for net-zero energy smart cities: A green infrastructure approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 64:103665.
- Kim, K., M., I., Ramachandran, S., Kim, J., Zia, T., and Almorjan, A. (2023). Cybersecurity and cyber forensics for smart cities: A comprehensive literature review and survey. *Sensors*, 23:3681.
- Li, B., Yang, X., and Wu, X. (2024a). Role of net-zero renewable-based transportation systems in smart cities toward enhancing cultural diversity: Realistic model in digital twin. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 65:103715.
- Li, J., Shirowzhan, S., Pignatta, G., and Sepasgozar, S. M. E. (2024b). Data-driven net-zero carbon monitoring: Applications of geographic information systems, building information modelling, remote sensing, and artificial intelligence for sustainable and resilient cities. *Sustainability*, 16(15).
- Li, X., Zhan, W., Deng, F., Liang, X., and Luo, P. (2025). Causal discovery and analysis of global city carbon emissions based on data-driven and hybrid intelligence. *Computers, Environment and Urban Systems*, 115:102206.

- Liu, M. and Zhang, K. (2024). Smart city landscape design for achieving net-zero emissions: Digital twin modeling. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 63:103659.
- Ma, C. (2021). Smart city and cyber-security; technologies used, leading challenges and future recommendations. *Energy Reports*, 7:7999–8012.
- Mahamuni, C., Sayyed, Z., and Mishra, A. (2022). Machine learning for smart cities: A survey. pages 1–8.
- Mekouar, Y., Saleh, I., and Karim, M. (2024). Integration of data acquisition and modeling for ecological simulation of co2 emissions in urban traffic: The case of the city of paris. In *2024 International Conference on Computer and Applications (ICCA)*, pages 01–07.
- Munoz, M. P., Makariou, S. G., and Kobayashi, S. (2023). At scale short-term forecasting and anomaly detection for ghg emissions with digital twins. In *2023 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, pages 1–7.
- Osman, A., Hefny, M., Maksoud, M., Elgarahy, A., and Rooney, D. (2020). Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19.
- Ulpiani, G., Pisoni, E., Bastos, J., Monforti-Ferrario, F., and Vetter, N. (2025). Are cities ready to synergise climate neutrality and air quality efforts? *Sustainable Cities and Society*, 118:106059.
- Wang, A., Zhang, M., Kafy, A. A., Tong, B., Hao, D., and Feng, Y. (2022). Predicting the impacts of urban land change on lst and carbon storage using invest, ca-ann and woa-lstm models in guangzhou, china. *Earth Science Informatics*, 16:1–18.
- Yoon, G., Shin, H., Jung, H., Keonhee, C., Lee, S., and Park, S. (2022). Prediction model for energy sharing and carbon emission management based on distributed solar power simulation in smart city. pages 1–7.