EVENTO ON-LINE
III CIGELUBRA
Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro
02 a 04 de dezembro de 2026
Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

Cidades Inteligentes e Mensuração Ambiental: uma Crítica aos Modelos de Competitividade Municipal

Vitória Ceccato
Engenharia de Produção – UTFPR
Regina Negri Pagani
Engenharia de Produção – UTFPR
Natália do Amaral Rutcoski
Engenharia de Produção – UTFPR

Resumo: A transformação digital consolidou-se como estratégia de competitividade territorial, na medida em que municípios adotam tecnologias de informação e estruturas de mensuração para orientar decisões de gestão e disputar investimento e reputação. Rankings e normas internacionais de cidades inteligentes, como o Connected Smart Cities, o IESE Cities in Motion Index e a família ISO 37120, consolidaram-se como instrumentos centrais dessa disputa, ao padronizar indicadores urbanos e viabilizar comparações entre territórios. Esses modelos apresentam limitações estruturais recorrentes: ausência de mecanismo de síntese; viés de escala; pressupostos de infraestrutura consolidada; e desbalanceamento entre indicadores tecnológicos e indicadores de resultado ambiental. Apesar de amplamente adotados para orientar decisões públicas, esses modelos raramente são submetidos a uma verificação crítica de sua estrutura interna. Essas limitações são evidenciadas tanto nas estruturas técnicas quanto em estudos de governança digital, correlação entre digitalização e resultado ambiental, e capacidade administrativa municipal. Diante desse diagnóstico, este artigo tem como objetivo realizar uma análise crítica dos principais modelos de mensuração de cidades inteligentes e propor critérios metodológicos para a construção de indicadores ambientais municipais mais robustos. Adota-se pesquisa bibliográfica de natureza teórico-crítica, com levantamento sistemático de literatura via Methodi Ordinatio 2.0. Como resultado, propõem-se quatro critérios metodológicos: ancoragem normativa própria; desagregação obrigatória por dimensão ambiental; uso de dados primários verificáveis; e captura de efeito líquido. Esses critérios são derivados diretamente das limitações identificadas na literatura analisada. Conclui-se que a transformação digital municipal, para constituir-se em estratégia competitiva efetiva, depende da superação das limitações de mensuração ambiental identificadas nos modelos vigentes.

Palavras-chave: Cidades inteligentes, Mensuração ambiental, Indicadores ambientais municipais.

Smart Cities and Environmental Measurement: a Critique of Municipal Competitiveness Frameworks

Abstract: Digital transformation has consolidated itself as a strategy of territorial competitiveness, as municipalities adopt information technologies and measurement frameworks to guide management decisions and compete for investment and reputation. International smart city rankings and standards, such as Connected Smart Cities, the IESE Cities in Motion Index, and the ISO 37120 family, have become central instruments in this competition by standardizing urban indicators and enabling comparisons between territories. These frameworks present recurring structural limitations:

absence of a synthesis mechanism; scale bias; assumptions of consolidated infrastructure; and an imbalance between technological indicators and indicators of actual environmental outcomes. Despite being widely adopted to guide public decisions, these frameworks are rarely subjected to a critical examination of their internal structure. These limitations are evidenced both in technical frameworks and in studies of digital governance, the correlation between digitalization and environmental outcomes, and municipal administrative capacity. Considering this diagnosis, this article aims to critically analyze the main frameworks used to measure smart cities and to propose methodological criteria for constructing more robust municipal environmental indicators. A bibliographic study of a theoretical-critical nature is adopted, with a systematic literature review conducted through Methodi Ordinatio 2.0. As a result, four methodological criteria are proposed: independent normative anchoring; mandatory disaggregation by environmental dimension; use of verifiable primary data; and capture of net effect. These criteria are derived directly from the limitations identified in the literature analyzed. It is concluded that municipal digital transformation, to constitute an effective competitive strategy, depends on overcoming the environmental measurement limitations identified in current frameworks.

Keywords: Smart cities, Environmental measurement, Municipal environmental indicators.

1 Introdução

A transformação digital urbana ocupa grande destaque nas agendas de desenvolvimento globais, materializando nos municípios o conceito de cidade inteligente. Essa mesma lógica de competitividade por meio da transformação digital, discutida com frequência no âmbito das organizações privadas, orienta também a gestão pública municipal, sob estruturas de mensuração cujo rigor metodológico dificilmente é questionado. Embora Florianópolis-SC lidere o Ranking de Competitividade dos Municípios (CLP, 2025), tal posicionamento parte de uma suposição raramente verificada. Avançar de posição não necessariamente reflete uma transformação territorial efetiva, podendo indicar apenas um bom desempenho em indicadores isolados.

O conceito de cidade inteligente carrega ambiguidade desde sua origem, tratado tanto como resultado de infraestrutura tecnológica, quanto como convergência entre tecnologia, pessoas e instituições (Nam e Pardo, 2011). Essa mesma ambiguidade se replica nos modelos de mensuração, que costumam separar indicadores de sustentabilidade daqueles voltados à *smartness* em si (Huovila, Bosch e Airaksinen, 2019), e nos modelos de governança digital, que variam entre abordagens tecnocêntricas e centradas no cidadão (Almulhim e Yigitcanlar, 2025). A seção 2 detalha esses conceitos.

Para viabilizar a comparação entre municípios, emergiram instrumentos de mensuração capazes de sintetizar dimensões como mobilidade, governança e infraestrutura em indicadores únicos. Governos apoiam-se nesses modelos sem questioná-los o suficiente. Rankings e diretrizes ISO passam a orientar políticas públicas sob uma falsa neutralidade, sem garantir que as métricas meçam, de fato, o que dizem medir.

Nos desdobramentos da família ISO 37120, 37122 e 37123, Marsal-Llacuna, Colomer-Llinàs e Meléndez-Frigola (2015) já apontavam a falta de um mecanismo de síntese capaz de tornar os indicadores comparáveis entre cidades. Aparentando rigor técnico, tais indicadores acabam por comparar fenômenos estruturalmente diferentes.

Essas limitações da literatura internacional replicam-se, de forma concreta, nos instrumentos aplicados às cidades brasileiras. O Connected Smart Cities, o Cities in Motion Index e a mesma família ISO acumulam ampla legitimidade metodológica, apesar de raramente serem submetidos a uma verificação crítica de sua estrutura interna.

Na literatura, essas limitações assumem, ao menos, quatro formas recorrentes. A primeira é a ausência de um mecanismo de síntese que agregue indicadores dispersos em uma medida comparável. A segunda é o viés de escala que calibra os modelos para grandes centros urbanos, tornando-os inadequados a municípios de menor porte. A terceira são os

pressupostos implícitos de infraestrutura consolidada, que ignoram contextos onde essa base ainda não existe. A quarta é o desbalanceamento entre indicadores de implementação tecnológica e de resultado ambiental efetivo, reunidos sob o mesmo rótulo de *smartness*.

Diante desse cenário, este artigo parte da seguinte questão. Em que medida os modelos vigentes de cidades inteligentes capturam o desempenho ambiental municipal, e que alternativa metodológica poderia mitigar as lacunas identificadas? Para respondê-la, o objetivo geral é avaliar criticamente os principais modelos de cidades inteligentes no debate público e acadêmico brasileiro, e propor, a partir desse diagnóstico, critérios metodológicos para indicadores ambientais municipais mais robustos.

O artigo está organizado em seis seções além desta introdução. A seção 2 apresenta o referencial teórico que sustenta a análise crítica. A seção 3 apresenta a metodologia adotada. A seção 4 reúne os resultados da análise crítica aos modelos de cidades inteligentes e da lacuna entre digitalização e desempenho ambiental, sob as óticas de governança digital, correlação empírica e capacidade administrativa municipal. A seção 5 formula os critérios metodológicos propostos. A seção 6 traz as considerações finais.

2 Referencial Teórico

Caragliu, Del Bo e Nijkamp (2011) conceituam smart cities como cidades em que investimentos em capital humano e social, aliados à infraestrutura de transporte tradicional e de tecnologia da informação, sustentam crescimento econômico e qualidade de vida, por meio de gestão criteriosa dos recursos naturais e governança participativa. Essa definição reúne, portanto, componentes humano, de infraestrutura e de governança, que atravessam a discussão deste artigo.

Nam e Pardo (2011) situam essa mesma ideia em três dimensões centrais, tecnologia, pessoas e instituições, reforçando que a infraestrutura por si só não caracteriza uma cidade como inteligente sem a convergência desses fatores. Essa imprecisão conceitual se estende ao termo *smartness*. No campo do marketing, o termo volta-se à perspectiva do usuário, enquanto no planejamento urbano, é tratado como discurso político, empregado por governos para orientar políticas de desenvolvimento sustentável e crescimento econômico.

Estruturas de mensuração de cidades inteligentes costumam operar sob uma separação funcional que reflete essa mesma ambiguidade conceitual. Normas focadas em sustentabilidade, como a ISO 37120, reúnem indicadores de impacto real, enquanto a ISO 37122, norma específica para indicadores de cidades inteligentes, limita-se ao esforço de implementação tecnológica e negligencia a medição do impacto final (Huovila, Bosch e Airaksinen, 2019).

Entre os instrumentos privados que também disputam esse espaço, o Connected Smart Cities é um ranking brasileiro conduzido pela Urban Systems desde 2015, com edições anuais, que organiza seus indicadores em eixos temáticos como mobilidade, meio ambiente, economia, governança, tecnologia e segurança. A edição de 2025 ampliou a metodologia para treze eixos temáticos e 75 indicadores, incorporando as normas ISO ABNT 37120, 37122, 37123 e 37125, e passou a cobrir a totalidade dos municípios brasileiros.

O IESE Cities in Motion Index, por sua vez, é um estudo publicado anualmente pela IESE Business School, da Universidade de Navarra, que avalia cidades em nove dimensões, entre elas, economia, governança e meio ambiente. Ele é construído a partir da agregação ponderada de escores por dimensão, e cobre atualmente cerca de 183 cidades em mais de noventa países.

A mesma dualidade entre esforço de implementação tecnológica e resultado efetivo, já vista nos padrões técnicos, reaparece na esfera da gestão pública. Governança digital, no escopo deste artigo, refere-se a como o poder público usa tecnologias digitais para organizar suas decisões e prestar serviços à população. Almulhim e Yigitcanlar (2025) situam essa governança em um espectro que vai de modelos tecnocêntricos, centrados na eficiência da infraestrutura digital, como o de Singapura, a modelos centrados no cidadão, voltados à participação e à transparência, como os de Barcelona e Medellín.

Por fim, capacidade administrativa municipal, aqui sintetizada a partir do caso analisado por Bastidas et al. (2023), refere-se à habilidade de uma gestão pública local transformar dado não processado e infraestrutura tecnológica em indicadores efetivamente utilizáveis para tomada de decisão, distinta de mero investimento tecnológico.

3 Metodologia

A pesquisa é bibliográfica, de natureza teórico-crítica. O levantamento seguiu o Methodi Ordinatio 2.0 (Pagani et al., 2023), operacionalizado por meio da ferramenta FInder. As buscas foram realizadas no campo *Title-Abs-Key* da base Scopus, com três equações de busca organizadas por bloco temático, apresentado na Tabela 1. As três buscas aplicaram os mesmos filtros, tipo de documento *Article* e *Review* e ano de publicação entre 2016 e 2026.

Tabela 1 – Equações de busca e resultados por bloco temático

Equação de Busca	Foco temático	Resultados
S1	*Frameworks* e rankings de mensuração	24
S2	Competitividade e governança digital	37
S3	Dimensão ambiental e ESG	10
Total		71
Após remoção de duplicatas		70
Após filtro 1 (aderência temática)		56
Portfólio final		**23**

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Após a eliminação de uma duplicata identificada entre as bases, os 70 estudos únicos passaram por dois filtros sucessivos. O primeiro avaliou aderência temática pela leitura do resumo, mantendo apenas estudos enquadrados em ao menos uma das quatro categorias de análise deste artigo, permanecendo 56 estudos. O segundo aplicou o índice InOrdinatio aos 56 estudos, com pesos $\Delta=\lambda=\Omega=10$, e definiu a extensão do portfólio pela maior queda entre escores consecutivos, ocorrida entre o 23º e o 24º colocados. O portfólio final ficou em 23 estudos.

Esse critério de corte por ponto de quebra na distribuição de escores substitui um intervalo numérico fixo definido a priori e resulta em um portfólio compatível com a natureza teórico-crítica da revisão, que privilegia a discussão individual e aprofundada de cada estudo selecionado, em vez da tabulação de um volume maior de resultados.

Os estudos selecionados foram organizados em três blocos temáticos. O primeiro reúne a crítica direta aos modelos de mensuração de *smartness*, e sustenta as seções 4.1 a 4.4. O segundo reúne as convergências entre governança digital, competitividade territorial e

desempenho ambiental, e fundamenta as seções 4.5 a 4.7. O terceiro reúne a fundamentação teórica dos critérios metodológicos propostos, e ampara a seção 5.

4 Resultados

A leitura sistemática do portfólio revelou quatro limitações recorrentes nos modelos técnicos de *smartness* (seções 4.1 a 4.4), que se refletem também nos estudos de governança digital, correlação empírica e capacidade administrativa municipal (seções 4.5 a 4.7).

4.1 Ausência de síntese e segregação normativa

A primeira limitação recorrente é a ausência de um índice síntese capaz de agregar indicadores dispersos em uma medida comparável entre cidades, gargalo já identificado por Marsal-Llacuna, Colomer-Llinàs e Meléndez-Frigola (2015) no enfraquecimento da Agenda 21 Local frente a rankings privados como Mercer e Economist Intelligence Unit. O caso de Barcelona, relatado por Marsal-Llacuna, Colomer-Llinàs e Meléndez-Frigola (2015), ilustra essa lacuna. Com cerca de 30 indicadores de sustentabilidade, a cidade carecia de um índice agregador para comparações diretas. Anos depois, essa mesma dificuldade seguia apenas parcialmente resolvida.

Huovila, Bosch e Airaksinen (2019) examinaram 413 indicadores distribuídos por sete referências internacionais e identificaram uma separação prática entre normas voltadas à sustentabilidade e critérios voltados à *smartness* urbana, sem que nenhum dos dois conjuntos resolva essa lacuna. Ao criar uma norma exclusiva para o desempenho ambiental, a métrica de *smartness* fica isenta de avaliar sustentabilidade, limitando-se ao esforço de infraestrutura digital. O resultado é um novo dilema prático. Antes de comparar dois municípios, é preciso decidir se o foco recai sobre impacto real ou apenas implementação tecnológica, já que as duas abordagens recebem um mesmo rótulo de indicador de *smartness*.

4.2 Viés de escala e pressupostos de infraestrutura

Uma segunda limitação recorrente é o descompasso de escala, mais visível quando os instrumentos saem do contexto metropolitano para o qual foram calibrados. Dall'O et al. (2017) precisaram desenvolver uma metodologia própria, com 70 métricas em sete áreas, porque instrumentos existentes, incluindo a ISO 37120, o ICity Rate e o Smart City Index, haviam sido calibrados a partir de bases de dados metropolitanas. Aplicada a três municípios do norte da Itália com menos de 37 mil habitantes, a proposta revelou que cidades com pontuação total semelhante podem apresentar perfis internos muito distintos por categoria, algo que um índice agregado sozinho não capturaria.

Essa mesma distorção aparece também sob outro ângulo, a suposição de que a infraestrutura já esteja consolidada. Maja, Meyer e Von Solms (2020) testaram a ISO 37122 em áreas rurais e encontraram métricas baseadas em redes formais de saneamento, malhas viárias pavimentadas e monitoramento digital contínuo, exigências inexistentes nesses territórios, de modo que a norma perde validade justamente onde seria mais necessária. Os dois estudos, lidos juntos, expõem um problema que vai além de qualquer modelo específico. Normas internacionais partem de suposições implícitas de escala urbana e nível de infraestrutura, que não se sustentam em países com municípios tão diversos em porte e capacidade de gestão quanto o Brasil.

4.3 Prioridades reveladas por métodos de decisão multicritério

Quando pesquisadores submetem esses indicadores a métodos de decisão multicritério, as prioridades reais dos modelos ficam mais difíceis de disfarçar. Hajduk (2022) aplicou o método TOPSIS, com pesos calculados por entropia, a sete indicadores de transporte urbano em 44 municípios certificados pela ISO 37120, e encontrou um peso desproporcional no índice de mortes no trânsito.

A escolha da norma de referência revela um viés equivalente, ainda antes de qualquer método de agregação ser aplicado. Aragão et al. (2023) optaram pela ISO 37120 em vez da norma voltada à *smartness*, ao desenvolver um modelo de maturidade de cidades inteligentes com TOPSIS modificado, justificando que esta última propõe foco tecnológico distante da realidade de países em desenvolvimento como o Brasil. A justificativa é coerente com a distorção de escala já discutida, mas expõe algo que os próprios autores não discutem. Essa decisão prévia, diferentemente do modelo aplicado, é o que mais influencia o desfecho da análise.

Esse mesmo risco se confirma em Hajduk e Jelonek (2021), que aplicaram o método a 21 cidades certificadas pela ISO 37120 em energia urbana e encontraram maior peso nos indicadores de estabilidade de fornecimento energético convencional, em detrimento da transição energética, resultado que os próprios autores consideram preocupante para a descarbonização do setor. O mesmo método de ponderação produz essa distorção duas vezes, em domínios tão diferentes quanto transporte e energia, apontando para uma falha na lógica de ponderação.

4.4 Desalinhamento estrutural entre *smartness* e sustentabilidade

A quarta limitação recorrente retoma a separação entre indicadores de sustentabilidade e indicadores de *smartness* já discutida, agora medida diretamente entre os dois conjuntos. Pira (2021) cruzou 46 métricas do Smart City Index Master com 38 indicadores da OCDE por análise semântica e lexical, e encontrou correspondência em apenas 22 variáveis ambientais. Mais da metade dos indicadores de sustentabilidade não tem equivalente nos modelos convencionais de cidades inteligentes, enquanto a maioria dos indicadores tecnológicos de *smartness* opera isolados, sem qualquer convergência com metas de sustentabilidade.

Esse achado é mais grave do que uma lacuna pontual justamente pelo lugar onde aparece. Huovila et al. (2019) já haviam encontrado assimetria dentro das normas ISO. Pira (2021) mapeia o mesmo descompasso em referências acadêmicas de ampla circulação, como o próprio Smart City Index Master e o catálogo da OCDE. Uma falha que se repete nos padrões mais consolidados do debate público sinaliza uma fragilidade na própria construção do conceito de cidade sustentável e inteligente, e não um defeito isolado de mensuração. Portanto, a equivalência entre *smartness* e sustentabilidade ambiental se torna uma suposição ainda sem comprovação.

4.5 Governança inteligente sem métricas padronizadas

Se a seção anterior mapeou fragilidades estruturais nos modelos de cidades inteligentes, a governança digital revela um dilema complementar, relacionado ao modelo de gestão. O contraste entre abordagens tecnocêntricas e centradas no cidadão, já situado no referencial teórico, se reflete na prática. Cidades que priorizam projeção em rankings internacionais tendem a perseguir visibilidade midiática sem necessariamente converter investimento em resultados de gestão concretos (Almulhim e Yigitcanlar, 2025).

O problema de fundo, porém, é anterior à escolha entre modelos tecnocêntricos e centrados no cidadão. É a própria inexistência de padrões consolidados para medir o impacto real da governança inteligente. Sem métricas de resultado, um portal de participação pode registrar avanço formal enquanto apenas transfere para o ambiente digital as mesmas barreiras históricas de voz e poder político, impedindo que gestores locais separem democratização real de simples migração tecnológica da desigualdade já existente.

4.6 Evidência quantitativa de correlação fraca

Enquanto os estudos anteriores documentam ausência de padronização de forma qualitativa, Giraldi, Rossi e Olivieri (2026) apresentam a primeira análise estatística direta sobre a relação entre digitalização e desempenho ambiental. Os autores desenvolveram o Digital Circularity Index, testado em 14 cidades metropolitanas italianas por modelagem de equações estruturais, e encontraram que a adoção digital tem associação moderada com fatores socioeconômicos e correlação fraca com desempenho ambiental. Uma cidade pode ter um alto uso de plataformas de reuso e compartilhamento de bens e serviços sem que isso melhore sua gestão de resíduos, assim como uma cidade com baixa adoção dessas plataformas pode ter gestão de resíduos eficiente.

Esse achado, porém, não é um consenso. Wu, Xie e Lyu (2023), em painel de 286 cidades chinesas, encontram um efeito positivo, ainda que parcial, de cidade inteligente sobre redução de poluição. Giraldi, Rossi e Olivieri (2026) usam proxy indireto e corte transversal, observação única no tempo, em 14 cidades, enquanto Wu, Xie e Lyu (2023) empregam medidas diretas em painel longitudinal, com observações repetidas ao longo do tempo, em 286 cidades. A questão não está em nenhum dos dois estudos, mas em quem tenta construir um indicador a partir dessa literatura sem reconhecer que talvez não sejam a mesma pergunta de pesquisa. Se digitalização melhora ou não o resultado ambiental depende da escolha de proxy, de desenho e de escala da amostra, decisões que o indicador final raramente declara a quem consulta o ranking.

4.7 Gargalo institucional, não tecnológico

Uma terceira evidência desloca o debate da mensuração para a implementação. Bastidas et al. (2023) analisaram, em estudo de caso na cidade de Limerick, na Irlanda, a aplicação de um framework de integração de sistemas municipais a um serviço de contagem de fluxo de pedestres e ciclistas. Os sensores já estavam instalados e operantes, mas os dados coletados ficavam presos em duas plataformas de fornecedores diferentes, porque dois departamentos municipais haviam contratado o mesmo tipo de serviço em momentos distintos, sem coordenação entre si. Os autores atribuem essa fragmentação às próprias regras de licitação pública, que favorecem contratações isoladas por departamento em vez de soluções integradas.

Esse achado reorienta o argumento construído até aqui. A existência de infraestrutura tecnológica, ou mesmo a adequação técnica de um modelo de mensuração, não bastam quando a organização interna e os processos administrativos municipais impedem que os dados coletados virem indicadores úteis e comparáveis. Um município pode ter tecnologia de ponta e, ainda assim, ter um desempenho ruim em qualquer ranking de *smartness*. Transformar dado não processado em indicador comparável exige capacidade administrativa, visto que o investimento tecnológico isolado não é suficiente.

5 Critérios metodológicos para indicadores ambientais municipais

5.1 Fundamentação

Se a competitividade territorial depende de modelos confiáveis para orientar decisões públicas, o que foi discutido até aqui revela um padrão recorrente que compromete essa base. Modelos de *smartness* não oferecem mecanismo de síntese, apresentam viés de escala e pressupostos de infraestrutura, e mantêm a dimensão ambiental estruturalmente segregada da digitalização, mesmo quando testados estatisticamente ou aplicados via métodos de decisão multicritério. Diante desse diagnóstico, é preciso definir que características um indicador ambiental municipal precisaria ter para não repetir essas mesmas limitações.

Esta seção deriva quatro critérios metodológicos dos achados discutidos na seção 4, como resposta pontual a cada fragilidade já identificada.

5.2 Base teórica dos critérios propostos

D'Amico et al. (2020) analisam 534 indicadores distribuídos em oito padrões normativos internacionais e constatam que a dimensão ambiental está, em todos os casos, inteiramente classificada como parte do metabolismo urbano, conceito que trata o funcionamento da cidade como um sistema de fluxos de energia, água e materiais, comparável a um organismo biológico, sem qualquer vínculo com a *smartness*. O que chama atenção aqui é o caráter binário dessa classificação, que vai além da simples ausência do ambiente entre os indicadores de *smartness*.

Nenhum dos oito padrões trata ambiente e tecnologia como dimensões que podem coexistir no mesmo indicador, como se avanço tecnológico e resultado ambiental fossem, por definição, fenômenos separados, medidos por instrumentos distintos. Essa rigidez classificatória tem uma implicação direta para a proposta deste artigo. Um indicador ambiental municipal não pode se apoiar em modelos de *smartness* que, pela própria arquitetura, não foram desenhados para medir o ambiente como dimensão central.

Machado Junior et al. (2018) constatam que, entre 21 indicadores oficialmente publicados por 150 cidades brasileiras, nenhum aborda a dimensão ambiental. Esse achado retoma um ponto já discutido na seção 4.1, segundo o qual índices agregados podem mascarar heterogeneidade entre categorias.

A dimensão ambiental precisa permanecer visível e desagregada mesmo quando compõe um índice síntese mais amplo, sob risco de ser apagada por completo, como ocorreu nos dados brasileiros analisados pelos autores.

Gu et al. (2024) mostram que as emissões de CO2 calculadas a partir de dados originais de mobilidade em Nova York correspondem a quase o triplo do valor oficialmente divulgado pela prefeitura, chamando a atenção a magnitude do erro. Mais grave, porém, é a verificação ter partido de um esforço pontual de pesquisa, em vez de uma rotina institucional de checagem.

Protocolos como o GPC (Global Protocol for Community-Scale GHG Inventories) padronizam como cidades devem elaborar seus inventários de emissões. A adesão ocorre por meio de compromissos voluntários, como o Global Covenant of Mayors for Climate & Energy, sob os quais cada cidade compila e reporta seu próprio inventário (WRI; C40; ICLEI, 2014).

Essa diferença sustenta a exigência de que indicadores ambientais municipais se apoiem em dados primários, verificáveis por fontes externas às prefeituras. Isso também reduz a dependência da capacidade administrativa municipal de consolidar seus próprios sistemas de dados, o gargalo institucional discutido na seção 4.7.

Wu, Xie e Lyu (2023) identificam dois mecanismos pelos quais a construção de cidades inteligentes reduz a poluição, já discutida na seção 4.6, mas esse ganho é parcialmente neutralizado por um efeito rebote de consumo energético, fenômeno em que parte da eficiência obtida por uma intervenção é anulada por um aumento de consumo em outra frente. Como praticamente qualquer intervenção urbana produz consequências colaterais, o efeito rebote em si não é a questão central.

Um indicador ambiental que reporta apenas a redução de poluição registra só parte do efeito, mas o apresenta como se fosse o resultado completo. Essa lacuna reforça a exigência de que um indicador ambiental robusto capture o efeito líquido de uma política ou iniciativa. Nesse contexto, efeito líquido é a diferença entre o ganho reportado e o custo que o acompanha, não o resultado isolado de um dos mecanismos envolvidos.

5.3 Critérios propostos

Juntas, as quatro evidências discutidas na seção 5.2 revelam uma sequência de dependências. Reconhecer o ambiental como categoria distinta de *smartness*, confirmar sua presença na prática de reporte municipal, garantir que o dado reportado seja verificável, e isolar o efeito líquido de mecanismos concorrentes formam etapas sucessivas da mesma pergunta. Cada etapa testa se um indicador realmente mede o desempenho ambiental de uma cidade, o que torna os quatro critérios complementares entre si, já que a ausência de um compromete a validade dos demais.

A partir desses quatro achados, propõem-se os seguintes critérios metodológicos para a construção de indicadores ambientais municipais. Primeiro, a ancoragem normativa própria à dimensão ambiental, independente de modelos originalmente desenhados para medir *smartness*. Segundo, a desagregação obrigatória por dimensão ambiental, preservada mesmo quando o indicador compõe um índice síntese mais amplo. Terceiro, o uso de dados primários e verificáveis externamente, sem depender da autodeclaração das prefeituras. Quarto, a captura de efeito líquido, além do resultado isolado de uma única frente de ação.

A proposta de ancoragem normativa própria traz um risco que precisa ser reconhecido. Se a escolha da base normativa ambiental ficar a cargo de quem constrói o indicador, esse critério pode acabar reproduzindo a mesma arbitrariedade identificada por D'Amico et al. (2020) nos padrões de *smartness*.

Esse risco é mitigado quando a base normativa ambiental deriva de fontes já validadas por instituições científicas ou regulatórias do campo ambiental, como o GHG Protocol para emissões de gases-estufa, em vez de ser definida de forma arbitrária pelo pesquisador ou gestor responsável pelo indicador.

O caso de Hajduk e Jelonek (2021), já discutido na seção 4.3, ilustra a diferença prática desse critério. Entre cidades certificadas pela ISO 37120, o indicador de energia prioriza estabilidade de fornecimento porque é mais fácil de conectar a sistemas de monitoramento digital. Ancorado numa base normativa ambiental própria, como o GHG Protocol, esse mesmo indicador deixaria de priorizar estabilidade e passaria a medir a participação de fontes renováveis na matriz energética do município.

O critério de desagregação obrigatória pode ser ilustrado pelo caso do Connected Smart Cities. O ranking calcula um eixo específico de meio ambiente, mas o número que circula publicamente, tanto na imprensa quanto entre gestores municipais, é a posição no ranking geral, que agrega esse eixo a mobilidade, governança, economia e outras dimensões.

Uma cidade pode perder posições no eixo ambiental e ainda assim subir no ranking geral, caso compense o desempenho em outra dimensão, sem que essa queda apareça para quem acompanha apenas o resultado agregado.

O critério propõe manter o eixo ambiental visível e acessível separadamente, mesmo quando o agregado também é publicado, sem abolir o ranking geral, que cumpre a função de sintetizar o desempenho municipal para comparações rápidas.

O ranking agregado e o eixo ambiental isolado podem coexistir. O agregado atende a quem busca uma comparação geral entre cidades, enquanto o eixo isolado, por sua vez, deveria ser exposto de forma destacada, em vez de disponível apenas em planilhas completas que exigem conhecimento prévio de onde procurar.

O critério de dados primários verificáveis pode ser ilustrado pela mesma situação identificada por Gu et al. (2024) em Nova York. Rankings de *smartness* que utilizam indicador ambiental autodeclarado pela prefeitura estão sujeitos a esse risco de forma direta. Sem acesso aos dados originais que sustentam o número, não há como verificar se o valor reportado reflete o impacto real ou apenas o que a gestão municipal optou por divulgar.

Uma fonte como o Climate TRACE, coalizão internacional que estima emissões de gases-estufa por satélite e sensoriamento remoto, de forma independente de qualquer prefeitura ou governo, atenderia ao critério. Assim como Gu et al. (2024) recorreram a dados originais de mobilidade em vez de autodeclaração municipal, uma base como essa permite auditar o número reportado, em vez de depender exclusivamente da capacidade e da disposição de cada gestão local em divulgar dados fiéis.

O critério de captura de efeito líquido é o mais abstrato dos quatro, e por isso exige mais explicação de como operacionalizá-lo na prática, retomando o efeito rebote de consumo energético já discutido a partir de Wu, Xie e Lyu (2023). Reportar apenas o resultado favorável, sem os efeitos colaterais que o acompanham, não costuma ser intencional. Essa omissão reflete um indicador que não foi desenhado para capturar mais de uma frente de efeito ao mesmo tempo.

Operacionalizar esse critério significa que um indicador ambiental municipal não pode se limitar a reportar um único resultado favorável de forma isolada. Ele precisa identificar, já na fase de planejamento, quais efeitos colaterais plausíveis podem acompanhar o resultado principal, reportar as duas medidas lado a lado, e calcular o saldo entre elas, em vez de divulgar apenas a medida mais favorável.

6 Considerações finais

Este artigo partiu da constatação de que a competitividade territorial baseada em transformação digital se apoia em modelos de mensuração pouco questionados quanto ao seu rigor metodológico. A análise de vinte e três estudos, distribuídos entre a crítica direta aos modelos técnicos, a discussão de governança digital e correlação entre digitalização e resultado ambiental, e a fundamentação de critérios para mensuração ambiental, revelou um padrão consistente.

Rankings e normas internacionais de *smartness* não oferecem mecanismo de síntese, calibram-se para escalas urbanas específicas, pressupõem infraestrutura nem sempre disponível, e tratam a dimensão ambiental como estruturalmente segregada da tecnologia, mesmo quando essa relação é testada estatisticamente.

A partir desse diagnóstico, propuseram-se quatro critérios metodológicos para a construção de indicadores ambientais municipais mais robustos. São eles a ancoragem normativa própria, a desagregação obrigatória por dimensão ambiental, o uso de dados primários verificáveis e a captura de efeito líquido.

Este artigo oferece duas contribuições distintas para o debate sobre mensuração de *smartness* urbana. A primeira contribuição é a diagnóstica, em que a análise conjunta de vinte e três estudos permitiu identificar que as quatro limitações mapeadas são um padrão que atravessa normas internacionais, rankings privados e modelos acadêmicos. A segunda contribuição é a propositiva, em que os quatro critérios metodológicos derivados dessa análise oferecem um ponto de partida concreto para pesquisadores e gestores que queiram construir indicadores ambientais sem repetir as mesmas limitações.

Esses critérios, no entanto, não pretendem esgotar o problema. Trata-se de uma proposta teórico-crítica, apoiada em levantamento bibliográfico direcionado, sem validação empírica própria. O artigo não testa os quatro critérios em nenhum município ou conjunto de municípios, nem avalia como eles se comportariam quando aplicados simultaneamente a um mesmo caso. Também não discute os custos operacionais e institucionais que a coleta de dados primários verificáveis exigiria de administrações municipais com capacidade técnica limitada.

Pesquisas futuras poderiam aplicar os quatro critérios a um estudo de caso municipal, testando sua viabilidade prática e os obstáculos de implementação que a proposta teórica não antecipa.

Espera-se que os critérios aqui propostos, e sua futura aplicação, contribuam para que a transformação digital municipal se afirme como estratégia competitiva genuína, capaz de produzir ganho ambiental mensurável, em vez de apenas posicionamento em rankings tecnológicos desacoplados de resultado real.

Referências

ALMULHIM, Abdulaziz I.; YIGITCANLAR, Tan. Understanding Smart Governance of Sustainable Cities: A Review and Multidimensional Framework. **Smart Cities**, v. 8, n. 4, art. 113, 2025.

ARAGÃO, Franciely Velozo; CHIROLI, Daiane Maria de Genaro; ZOLA, Fernanda Cavicchioli; ARAGÃO, Emanuely Velozo; MARINHO, Luis Henrique Nogueira; CORREA, Ana Lidia Cascales; COLMENERO, João Carlos. Smart Cities Maturity Model - A Multicriteria Approach. **Sustainability**, v. 15, n. 8, art. 6695, 2023.

BASTIDAS, Viviana; BEZBRADICA, Marija; BILAUCA, Mihai; HEALY, Michael; HELFERT, Markus. Enterprise Architecture in Smart Cities: Developing an Empirical Grounded Research Agenda. **Journal of Urban Technology**, v. 30, n. 1, p. 47-70, 2023.

CARAGLIU, Andrea; DEL BO, Chiara; NIJKAMP, Peter. Smart Cities in Europe. **Journal of Urban Technology**, v. 18, n. 2, p. 65-82, 2011.

CENTRO DE LIDERANÇA PÚBLICA. **Ranking de Competitividade dos Municípios 2025**. São Paulo: CLP, 2025. Disponível em: https://rankingdecompetitividade.org.br/municipios/. Acesso em: 25 ago. 2026.

D'AMICO, Gaspare; TADDEO, Raffaella; SHI, Lei; YIGITCANLAR, Tan; IOPPOLO, Giuseppe. Ecological indicators of smart urban metabolism: a review of the literature on international standards. **Ecological Indicators**, v. 118, art. 106808, 2020.

DALL'O', Giuliano; BRUNI, Elisa; PANZA, Angela; SARTO, Luca; KAYATHIAN, Fazel. Evaluation of cities' *smartness* by means of indicators for small and medium cities and communities: a methodology for Northern Italy. **Sustainable Cities and Society**, v. 34, p. 193-202, 2017.

GIRALDI, Luca; ROSSI, Luca; OLIVIERI, Mirko. Digital platforms and composite measurement of an urban circular economy: developing the digital circularity index. **Technology in Society**, v. 86, art. 103322, 2026.

GU, Yu; KATZ, Steven; WANG, Xinxin; VASARHELYI, Miklos; DAI, Jun. Government ESG reporting in smart cities. **International Journal of Accounting Information Systems**, v. 54, art. 100701, 2024.

HAJDUK, Sławomira; JELONEK, Dorota. A Decision-Making Approach Based on TOPSIS Method for Ranking Smart Cities in the Context of Urban Energy. **Energies**, v. 14, n. 9, art. 2691, 2021.

HAJDUK, Sławomira. Multi-Criteria Analysis in the Decision-Making Approach for the Linear Ordering of Urban Transport Based on TOPSIS Technique. **Energies**, v. 15, n. 1, art. 274, 2022.

HUOVILA, Aapo; BOSCH, Peter; AIRAKSINEN, Miimu. Comparative analysis of standardized indicators for smart sustainable cities: what indicators and standards to use and when? **Cities**, v. 89, p. 141-153, 2019.

MACHADO JUNIOR, Celso; RIBEIRO, Daielly Melina Nassif Mantovani; PEREIRA, Raquel da Silva; BAZANINI, Roberto. Do Brazilian cities want to become smart or sustainable? **Journal of Cleaner Production**, v. 199, p. 214-221, 2018.

MAJA, Pontsho William; MEYER, Johan; VON SOLMS, Suné. Development of Smart Rural Village Indicators in Line With Industry 4.0. **IEEE Access**, v. 8, p. 152017-152033, 2020.

MARSAL-LLACUNA, Maria-Lluïsa; COLOMER-LLINÀS, Joan; MELÉNDEZ-FRIGOLA, Joaquim. Lessons in urban monitoring taken from sustainable and livable cities to better address the Smart Cities initiative. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 90, p. 611-622, 2015.

NAM, Taewoo; PARDO, Theresa A. Conceptualizing Smart City with Dimensions of Technology, People, and Institutions. In: **PROCEEDINGS OF THE 12TH ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL GOVERNMENT RESEARCH**, 2011, College Park. Anais [...]. Nova York: ACM, 2011. p. 282-291.

PAGANI, Regina Negri; KOVALESKI, João Luiz; RESENDE, Luis Mauricio Martins de. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109-2135, 2015.

PAGANI, Regina Negri; PEDROSO, Bruno; SANTOS, Celso Bilynkievycz; PICININ, Claudia Tania; KOVALESKI, João Luiz. Methodi Ordinatio 2.0: revisited under statistical estimation, and presenting FInder and RankIn. **Quality & Quantity**, v. 57, n. 5, p. 4563-4602, 2023.

PIRA, Milad. A novel taxonomy of smart sustainable city indicators. **Humanities and Social Sciences Communications**, v. 8, art. 197, 2021.

WRI; C40; ICLEI. **Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC)**. Washington, D.C.: World Resources Institute, 2014. Disponível em: https://www.wri.org/research/global-protocol-community-scale-greenhouse-gas-emission-inventories. Acesso em: 20 set. 2026.

WU, Desheng; XIE, Yu; LYU, Shoujun. Disentangling the complex impacts of urban digital transformation and environmental pollution: evidence from smart cities pilots in China. **Sustainable Cities and Society**, v. 88, art. 104266, 2023.