
Gêmeos Digitais Urbanos: da Representação do Território à Simulação de Políticas Públicas

O valor do gêmeo digital está em experimentar decisões antes de executá-las

Marcos Cordioli

Resumo

O gêmeo digital urbano vale pela capacidade de experimentar decisões sobre a cidade antes de executá-las, e não pela representação digital do território. A distinção entre modelo tridimensional, sistema de informação geográfica, simulação e gêmeo digital orienta a análise. Integrado a sensores de Internet das Coisas (IoT), a plataformas de Big Data e a modelos de inteligência artificial, o gêmeo digital apoia o planejamento urbano, a gestão de infraestrutura, a mobilidade e a resiliência climática. Custos, qualidade dos dados, interoperabilidade, segurança, privacidade e capacidade institucional limitam a adoção e condicionam a viabilidade em cidades brasileiras. Uma trajetória gradual, que parte de ortofotos e de sistemas de informação geográfica e se apoia na cooperação intermunicipal e na Lei 14.133/2021, torna o instrumento acessível a municípios de diferentes portes.

Palavras-chave: Gêmeos digitais. Planejamento urbano. Cidades inteligentes. Simulação de políticas públicas. Governança de dados. Resiliência climática.

Abstract

The urban digital twin is valuable for its capacity to test decisions about the city before carrying them out, rather than for the digital representation of the territory. The distinction between three-dimensional model, geographic information system, simulation and digital twin guides the analysis. Integrated with Internet of Things (IoT) sensors, Big Data platforms and artificial intelligence models, the digital twin supports urban planning, infrastructure management, mobility and climate resilience. Costs, data quality, interoperability, security, privacy and institutional capacity limit adoption and condition feasibility in Brazilian cities. A gradual path, starting from orthophotos and geographic information systems and relying on inter-municipal cooperation and Law No. 14,133/2021, makes the instrument accessible to municipalities of different sizes.

Keywords: Digital twins. Urban planning. Smart cities. Public policy simulation. Data governance. Climate resilience.

Introdução

O valor de um gêmeo digital urbano está em permitir que a cidade experimente decisões antes de executá-las. A representação digital do território, por mais detalhada que seja, é o ponto de partida. A diferença entre uma maquete tridimensional e um gêmeo digital está na capacidade de testar hipóteses, comparar cenários e medir os efeitos prováveis de uma política antes que o concreto, o asfalto ou o orçamento sejam comprometidos.

O interesse pelo tema cresce com a difusão de sensores, de plataformas de dados e de inteligência artificial. A cidade-Estado de Singapura, com a plataforma Virtual Singapore desenvolvida em parceria com a Dassault Systèmes, tornou-se referência no uso de um modelo tridimensional do território como base de planejamento (ENGINEERING.COM, s.d.). O termo gêmeo digital, porém, designa produtos muito diferentes entre si, e a indistinção produz expectativas irreais e contratações malsucedidas.

O debate precisa partir de definições claras e chegar à viabilidade concreta para os municípios brasileiros, que operam com orçamentos limitados, dados dispersos e equipes técnicas reduzidas.

1 | Modelo, mapa, simulação e gêmeo digital

Modelo tridimensional, sistema de informação geográfica (SIG), modelagem da informação da construção (BIM), simulação e gêmeo digital designam instrumentos diferentes, que se complementam. O modelo tridimensional representa a forma da cidade, com edificações, vias e relevo, e serve à visualização e à comunicação de projetos. O SIG organiza camadas de informação georreferenciada, como uso do solo, redes técnicas e áreas de risco, e permite análises espaciais. O BIM descreve edificações e obras de infraestrutura em nível de detalhe construtivo. A simulação reproduz o comportamento de um sistema, como o escoamento de águas pluviais ou o fluxo de veículos, a partir de modelos matemáticos calibrados.

O gêmeo digital urbano reúne estas capacidades e acrescenta duas. A atualização contínua por dados de sensores e de sistemas operacionais da cidade é a primeira delas, e mantém o modelo próximo do estado real do território. O uso do modelo como instrumento de decisão é a segunda, ao permitir comparar cenários e acompanhar, depois da intervenção, se o efeito previsto se confirmou. Um modelo tridimensional sem atualização contínua é uma maquete, e um SIG sem capacidade de simulação é um mapa, ainda que ambos sejam úteis e constituam, com frequência, a etapa inicial de um gêmeo digital.

Batty (2018) discutiu o conceito de gêmeo digital aplicado às cidades. A origem do conceito na engenharia de produtos e de sistemas industriais, em que o objeto físico tem fronteiras claras e comportamento relativamente previsível, recomenda cautela na transposição para sistemas urbanos, que envolvem pessoas, conflitos de interesse e incerteza.

2 | Aplicações no planejamento e na gestão urbana

2.1 | Planejamento urbano

No planejamento urbano, o gêmeo digital permite testar virtualmente o efeito de novos empreendimentos, alterações de zoneamento, mudanças na ocupação do solo e intervenções no sistema viário antes que essas decisões sejam executadas fisicamente. A representação integrada do território permite analisar impactos sobre tráfego, circulação de pedestres, insolação, ventilação, densidade construtiva, disponibilidade de áreas verdes e utilização dos equipamentos públicos. Dessa forma, projetos urbanos podem ser avaliados não apenas pela sua configuração física, mas também pelas consequências que produzem sobre o funcionamento da cidade.

O Plano Diretor e os projetos urbanísticos podem ser refinados virtualmente a partir da comparação entre diferentes cenários de ocupação. Uma nova área residencial, por exemplo, pode ser simulada considerando o aumento da demanda por transporte, escolas, unidades de saúde, abastecimento de água, energia e coleta de resíduos. A comparação entre cenários oferece aos gestores informações para avaliar alternativas antes da realização dos investimentos e permite identificar antecipadamente conflitos ou deficiências que poderiam aparecer somente depois da implantação. O gêmeo digital também pode ampliar a qualidade das audiências públicas, ao oferecer uma representação visual e quantitativa dos efeitos de diferentes propostas e facilitar a compreensão da população sobre as transformações previstas para o território.

2.2 | Infraestrutura e serviços urbanos

Na infraestrutura urbana, o gêmeo digital permite integrar informações provenientes de sensores, sistemas de manutenção e bases de dados operacionais a uma representação dinâmica dos ativos existentes no território. Sensores de vibração em pontes, de pressão em tubulações, de temperatura e carga em redes elétricas, entre outros dispositivos, podem alimentar continuamente o modelo e indicar alterações no comportamento esperado das estruturas. A identificação antecipada de anomalias permite que equipes técnicas intervenham antes que pequenos problemas evoluam para falhas de maior impacto, aumentando a disponibilidade dos serviços e reduzindo custos de manutenção.

Essa capacidade desloca parte da gestão urbana de uma lógica predominantemente reativa para uma abordagem preventiva e preditiva. Em vez de atuar somente depois da ocorrência de uma falha, o município pode estabelecer prioridades de manutenção a partir das condições efetivamente observadas nos ativos. O modelo também pode apoiar a gestão integrada de serviços urbanos, permitindo simular rotas de coleta de resíduos, consumo energético, utilização de equipamentos públicos e necessidade de intervenções em redes de infraestrutura. A combinação entre dados históricos e informações em tempo real amplia a capacidade de identificar padrões, antecipar demandas e utilizar de forma mais eficiente os recursos disponíveis. Para municípios com estruturas técnicas limitadas, essa capacidade pode ser especialmente relevante quando associada a plataformas compartilhadas e sistemas de gestão integrados.

2.3 | Mobilidade

Na mobilidade urbana, o gêmeo digital permite integrar dados de tráfego, transporte coletivo, bilhetagem, circulação de veículos, deslocamento de pedestres e informações provenientes de aplicativos de navegação. A partir desses dados, diferentes intervenções podem ser simuladas antes de sua implantação, permitindo avaliar seus efeitos sobre o conjunto do sistema. O fechamento de uma rua, a implantação de uma faixa exclusiva de ônibus, a criação de uma ciclovia, a alteração de um sentido de circulação ou a modificação de um cruzamento podem ser testados em diferentes condições de demanda.

A principal contribuição está na possibilidade de observar como o fluxo se redistribui diante de cada intervenção. Uma medida que aparentemente resolve um congestionamento em determinado ponto pode deslocar o problema para outra região, enquanto uma alteração relativamente pequena pode produzir efeitos positivos em diferentes partes da rede. A simulação permite identificar essas consequências antes da execução física e comparar alternativas com base em indicadores objetivos. Depois da implantação, os dados reais podem ser incorporados ao modelo para verificar os resultados alcançados e comparar o comportamento observado com aquele previsto na simulação. O gêmeo digital estabelece, assim, um ciclo contínuo entre planejamento, experimentação, implantação, monitoramento e correção das políticas de mobilidade.

2.4 | Resiliência climática

Na resiliência climática, o gêmeo digital amplia a capacidade de simular diferentes cenários de eventos extremos e avaliar seus impactos sobre o território. A simulação de enchentes pode combinar informações de topografia, intensidade e distribuição das chuvas, capacidade de escoamento, condições da drenagem, impermeabilização do solo e ocupação urbana para identificar as áreas potencialmente atingidas em diferentes cenários de tempestade. A partir dessas informações, o município pode avaliar quais infraestruturas apresentam maior vulnerabilidade, quais áreas demandam intervenções prioritárias e quais medidas podem reduzir os impactos.

A mesma lógica pode ser aplicada às ondas de calor e às estratégias de adaptação climática. Dados sobre uso do solo, densidade construída, cobertura vegetal, materiais utilizados nas edificações e circulação de ar podem alimentar modelos capazes de identificar áreas com maior exposição ao calor. A simulação permite avaliar onde medidas como arborização, criação de áreas permeáveis, implantação de parques, telhados verdes e outras soluções de adaptação poderiam produzir maior efeito. O modelo também pode apoiar planos de emergência, indicando áreas de risco, equipamentos públicos vulneráveis, rotas de evacuação e estruturas que precisam permanecer operacionais durante eventos extremos.

Lisboa integrou sistemas de informação geográfica e modelagem da informação da construção no planejamento do seu Plano Geral de Drenagem, que prevê túneis de desvio, como o de Monsanto a Santa Apolónia, com cerca de 5 km, depois de uma enchente em 2022 cujas perdas somaram quase 50 milhões de euros (ESRI, s.d.). O caso ilustra como diferentes tecnologias podem ser integradas para apoiar decisões de infraestrutura e gestão de riscos. Entretanto, SIG e BIM, isoladamente ou combinados,

não constituem necessariamente um gêmeo digital. O conceito pressupõe uma integração mais ampla entre a representação digital do território, os dados atualizados sobre seu funcionamento, os sistemas de monitoramento e a capacidade de utilizar essas informações para simular cenários e apoiar decisões. A distinção é importante porque evita reduzir o gêmeo digital a uma representação tridimensional da cidade e o situa como instrumento permanente de análise, planejamento e gestão territorial.

3 | **Sensoriamento, Big Data e inteligência artificial**

O gêmeo digital de um território urbano é composto por quatro camadas. A camada de percepção reúne sensores de IoT, imagens de satélite, drones e registros administrativos. A camada de conectividade transporta os dados até as plataformas. A camada de armazenamento e processamento, em geral baseada em computação em nuvem, organiza volumes que crescem continuamente. A camada analítica aplica aprendizado de máquina e modelos físicos para prever, alertar e comparar cenários.

A qualidade dos dados determina a qualidade do gêmeo. Sensores mal calibrados, séries históricas curtas, cadastros desatualizados e bases sem identificadores comuns produzem simulações precisas na aparência e frágeis na substância. A interoperabilidade entre sistemas legados e a adoção de padrões abertos de dados urbanos pesam, por isso, tanto quanto a escolha da plataforma.

A inteligência artificial amplia a capacidade de identificar padrões e de prever eventos, como a probabilidade de alagamento em função da chuva prevista ou a formação de ilhas de calor em determinados bairros. A previsão herda, entretanto, os vieses e as lacunas dos dados de treinamento, e a transparência sobre pressupostos e margens de erro é condição para que gestores e cidadãos confiem nos resultados.

4 | **Da simulação à política pública**

O gêmeo digital serve à política pública quando integrado a um ciclo de decisão. O ciclo começa com a formulação de uma hipótese de intervenção, como a mudança de sentido de uma via ou a criação de uma bacia de retenção. O modelo simula os efeitos em diferentes cenários, e a comparação dos resultados fundamenta a escolha. A intervenção executada passa a ser monitorada pelos mesmos sensores, e a diferença entre o efeito previsto e o observado recalibra o modelo e alimenta a decisão seguinte.

Este ciclo dialoga com o planejamento por cenários de Matus (1993), que distinguiu o planejamento estratégico situacional do planejamento normativo por reconhecer a incerteza, a pluralidade de atores e a necessidade de adaptação. O gêmeo digital não elimina a incerteza, mas a torna visível e discutível, e esta visibilidade qualifica a deliberação em conselhos, audiências e câmaras municipais.

A experimentação virtual protege também os recursos públicos. Uma decisão testada no modelo e corrigida antes da obra custa menos do que a mesma correção feita sobre o concreto já executado. O ganho depende de metas mensuráveis, de linhas de base e de responsáveis pelo acompanhamento, e não da tecnologia isolada.

5 | Limites, custos e governança

Os custos incluem levantamento de dados, plataforma, sensores, integração, licenças, manutenção, atualização e capacitação, e o retorno costuma ser difuso no tempo, enquanto as despesas são imediatas. A avaliação pelo custo total de propriedade, ao longo do ciclo de vida, reduz o risco de soluções abandonadas depois da implantação.

Os dados de mobilidade e de uso de espaços públicos podem identificar pessoas. A Lei Geral de Proteção de Dados (Lei n.º 13.709/2018) exige base legal, finalidade, minimização e segurança, e a anonimização é a regra sempre que possível. O projeto Quayside, de Toronto, conduzido pela Sidewalk Labs, foi encerrado em 2020. A empresa atribuiu o encerramento à incerteza econômica provocada pela pandemia, mas os debates públicos que acompanharam o projeto incluíram a governança dos dados coletados (STATESCOOP, 2020). O episódio mostra que a aceitação pública depende de regras claras de governança, e não apenas da tecnologia.

A segurança cibernética exige protocolos de proteção das plataformas, controle de acesso e planos de contingência, porque o gêmeo digital concentra informações estratégicas sobre redes críticas. A capacidade institucional condiciona tudo isso. Dados dispersos em silos administrativos, equipes sem formação em análise de dados e ausência de padrões técnicos comuns dificultam a integração, e a constituição de um comitê gestor de dados, a capacitação de servidores e a definição de responsabilidades entre secretarias antecedem a escolha da plataforma.

O modelo precisa ser validado e calibrado com dados observados, e os resultados devem ser apresentados com margens de incerteza. A falsa precisão, em que uma simulação bem apresentada ganha mais autoridade do que os seus dados comportam, é o risco mais frequente de uso inadequado.

6 | Viabilidade para cidades brasileiras

A viabilidade em cidades brasileiras passa por uma trajetória gradual. O ponto de partida são ortofotos e um SIG com cadastro atualizado, que já sustentam diagnósticos e análises espaciais. A integração progressiva de sensores em domínios prioritários, como drenagem e monitoramento de chuvas, e a adição de simulação em problemas delimitados formam as etapas seguintes. O gêmeo digital abrangente, que cobre toda a cidade, é a etapa final, e muitos municípios obterão a maior parte do benefício antes de alcançá-la.

A escala é o limite principal dos municípios menores. Os consórcios intermunicipais, regulados pela Lei n.º 11.107/2005, permitem compartilhar plataforma, equipe e contratação, e as parcerias com universidades e institutos de pesquisa ampliam a capacidade técnica. A Lei n.º 14.133/2021 oferece o diálogo competitivo para os casos em que a administração ainda não consegue especificar a solução, e a contratação orientada a desempenho, e não a equipamento, protege o município da obsolescência.

A inscrição do projeto no Plano Plurianual, na Lei de Diretrizes Orçamentárias e na Lei Orçamentária Anual garante continuidade, e a publicação de dados abertos e de painéis de acompanhamento sustenta o controle social.

Considerações finais

O gêmeo digital urbano vale pelo que permite fazer, e não pelo que mostra. Distinguir modelo, mapa, simulação e gêmeo digital protege o gestor de contratar uma maquete pelo preço de uma ferramenta de decisão.

A tecnologia amplia a capacidade de experimentar políticas antes de executá-las, e a experimentação só produz valor com dados de qualidade, governança transparente, proteção de direitos e instituições capazes de aprender com os resultados.

A cidade que experimenta virtualmente, decide com evidências e corrige o rumo com os dados do próprio território faz da simulação um instrumento de planejamento democrático. O gêmeo digital, quando bem governado, entrega esta promessa.

Declaração sobre o uso de inteligência artificial

A inteligência artificial generativa foi utilizada como ferramenta de apoio à organização das informações fornecidas para este artigo. O uso ocorreu como auxílio ao trabalho intelectual, sem substituir a análise dos documentos e das fontes. A seleção e a interpretação das informações, assim como a revisão e a responsabilidade pela versão final do texto, cabem ao autor. Ao final, a IA foi utilizada para a correção ortográfica e semântica do texto e também para gerar o resumo e as palavras-chave.

Referências

BATTY, M. Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, v. 45, n. 5, p. 817-820, 2018.

BRASIL. Lei Federal n.º 11.107, de 6 de abril de 2005. Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Lei Federal n.º 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2018.

BRASIL. Lei Federal n.º 14.133, de 1.º de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2021.

ENGINEERING.COM. *Dassault Systèmes and Singapore team up to create 3D model of an entire country*. Disponível em: <<https://www.engineering.com/dassault-systemes-and-singapore-team-up-to-create-3d-model-of-an-entire-country/>>. Acesso em: 4 out. 2026.

ESRI. *Lisbon's drainage master plan is transforming flood resilience with GIS, BIM*. Disponível em: <<https://www.esri.com/en-us/industries/blog/articles/transforming-flood-resilience-with-gis-bim>>. Acesso em: 4 out. 2026.

MATUS, C. *Política, Planejamento e Governo*. Brasília: IPEA, 1993. (Série IPEA, n. 143).

STATESCOOP. *Sidewalk Labs pulls out of Toronto Quayside project*. 2020. Disponível em: <<https://statescoop.com/sidewalk-labs-pulls-out-of-toronto-quayside-project/>>. Acesso em: 4 out. 2026.

Sobre o autor

Marcos Cordioli é consultor, empresário, pesquisador e palestrante brasileiro, mestre em Educação pela PUC-SP, com atuação nas áreas de educação, transformação digital, inovação, cidades inteligentes, economia de dados e inteligência artificial.

Foi Secretário de Inovação, Aceleração Econômica, Turismo e Comunicação de Maringá e Secretário de Cultura de Curitiba, além de Presidente da Fundação Cultural de Curitiba. Desde 2015, atua na modelagem de ecossistemas de inovação e startups, aproximando tecnologia, conhecimento, negócios e transformação institucional.

É cofounder da Apolus.ai, startup dedicada a transformar conhecimentos dispersos em ecossistemas de inteligência artificial, ampliando a capacidade de empresas e instituições de organizar, compartilhar e utilizar conhecimento como inteligência coletiva. É também vice-presidente da ACIM-Maringá.

Na área de tecnologia, pesquisa os processos econômicos e tecnológicos associados à economia de dados, estudando dados, conhecimento e inteligência artificial como elementos estruturantes da nova economia. Dedicar-se também ao estudo da transformação digital de cidades, com atenção ao uso sistêmico de IoT, dados, inteligência artificial, conectividade e plataformas digitais na construção de cidades inteligentes.

No campo da inteligência artificial, desenvolve duas frentes complementares. Na educação, conduz o projeto “Tecnologias de IA na Sala de Aula”, dedicado às possibilidades de utilização da inteligência artificial nos processos de ensino e aprendizagem, na formação de educadores e na gestão educacional. Nas empresas e instituições, atua na área de educação corporativa, pesquisando a gestão de conteúdos e conhecimentos como base para a construção de inteligência coletiva e para o desenvolvimento de novas soluções apoiadas por IA.

Marcos Cordioli também possui trajetória acadêmica na área de educação, tendo atuado como professor em cursos de graduação, especialização e mestrado, além de pesquisador, palestrante e consultor. Participou de eventos, pesquisas e projetos educacionais em todos os estados brasileiros e em diferentes países.

Contato: marcos.cordioli@gmail.com | (41) 99682 9123 | LinkedIn:
[linkedin.com/in/marcos-cordioli](https://www.linkedin.com/in/marcos-cordioli) | Instagram @marcoscordioli |
<https://linktr.ee/marcos.cordioli>