



SURPLUS: PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE RECURSOS URBANOS MEDIANTE LDT Y MÉTRICAS DE SOSTENIBILIDAD KQR UNIFICADAS UNA METODOLOGÍA PARA ALINEAR LOS GEMELOS DIGITALES LOCALES CON RESULTADOS MEDIBLES

ANTONIO JARA¹, PATRICIA TAMARIT², JORDI ORTUÑO³, ERNESTO FAUBEL⁴

¹LIBELIUM, ESPAÑA

²NUNSYS, ESPAÑA

³AYUNTAMIENTO DE BARCELONA, ESPAÑA

⁴AYUNTAMIENTO DE VALÈNCIA, ESPAA

PALABRAS CLAVE	RESUMEN
<i>Caja de herramientas LDT de la UE LORDIMAS KQR Ciudades inteligentes Sostenibilidad Planificación urbana IA para ciudades FIWARE EDIC</i>	<i>Se ha diseñado y validado un marco basado en IA en múltiples casos de uso urbanos para transformar los problemas empresariales en resultados medibles y sostenibles. Basado en el paradigma de las preguntas clave empresariales (KBQ), integra la unificación de datos lista para la gobernanza (ETSI NGSI-LD y MiMs), modelos de gemelos digitales y evaluación económica (ROI, TIR, VAN) para maximizar el excedente fiscal y social. La fase de implementación combina la caja de herramientas de gemelo digital local de la UE para gemelos modulares, canales que conectan sensores con la toma de decisiones, y la integración con LORDIMAS para la evaluación comparativa. Las pruebas realizadas en los ámbitos de energía, movilidad, residuos y agua muestran VAN positivas, una rápida amortización y una hoja de ruta estructurada para priorizar y escalar las inversiones en programas urbanos.</i>

RECIBIDO: 05 / 09 / 2025
ACEPTADO: 06 / 10 / 2025

1. Introducción

Hoy en día, las ciudades no sufren por falta de tecnología, sino por la falta de una metodología que les ayude a realizar, entre todas las posibles intervenciones, un análisis exhaustivo de las ventajas, desventajas, efectos secundarios, dependencias, costes reales de implementación, costes de mantenimiento y retorno de la inversión. Este tipo de herramienta, o incluso caja de herramientas, y metodologías es lo que los recientes avances de la IA aplicada a la planificación urbana, como la caja de herramientas LDT de la UE y GenAI como herramienta de apoyo, respaldarían en el proceso de toma de decisiones.

La diferencia entre un proyecto piloto de innovación atractivo y un programa en el que se puede invertir es la presencia de una tesis económica rigurosa y comprobable. Siguiendo las nuevas capacidades de los simuladores de gemelos digitales para la eficiencia urbana avanzada, la calidad de vida y la resiliencia, abordamos el diseño de una práctica que da prioridad al valor y se basa en la medición. En ese contexto, proponemos SURPLUS: una metodología para convertir los buenos problemas empresariales en carteras de acciones evaluadas bajo una lente de excedente unificada, en la que las ganancias presupuestarias (inversión) y sociales (externalidades) son totalmente auditables a través de gemelos digitales.

Como se ha comentado, la metodología SURPLUS se basa en dos capacidades complementarias que han madurado recientemente: los gemelos digitales locales (LDT), junto con bancos de pruebas en los que las ciudades pueden simular de forma segura políticas alternativas antes de realizar gastos, y la IA generativa (GenAI), como analista integrador que puede reunir, contrastar y comparar pruebas de fuentes heterogéneas con una rapidez sin precedentes.

SURPLUS se basa en preguntas clave de negocio (KBQ), que expresan la lógica de decisión que los urbanistas y los departamentos de TIC de las ciudades, representados en este documento por las ciudades de Barcelona y Valencia, realmente necesitan responder y que sirven de base para todo el ciclo de vida del análisis (Trojanos, 2020). A partir de ahí, los modelos de contexto interoperables y los modelos de datos inteligentes abiertos establecen un sustrato estable para la IA y la simulación construida sobre los MiM de Livingin.eu como mejores prácticas para alcanzar la interoperabilidad. Los gemelos digitales permiten realizar experimentos contrafactuales para pronosticar el excedente de intervenciones alternativas antes de comprometer capital. A continuación, aplicamos el razonamiento económico estándar (ROI, IRR, NPV) a un conjunto de casos municipales bien documentados y demostramos cómo el encuadre, la medición y la automatización disciplinados pueden aumentar el valor.

Hasta ahora, las ciudades toman decisiones reiteradas y trascendentales en condiciones de incertidumbre: si reajustar un corredor, sustituir luminarias, resegmentar una red de agua o racionalizar las rutas de recogida de residuos. Los análisis tradicionales pueden estimar correlaciones, pero las finanzas públicas exigen respuestas contrafactuales: ¿qué ocurrirá si cambiamos las tarifas, las políticas de control o los programas de mantenimiento en comparación con una referencia? ¿cuál es el impacto o la consecuencia real de una zona de bajas emisiones?

Los LDT responden a esa pregunta con fidelidad operativa. Más allá de los paneles de control estáticos, la caja de herramientas Local Digital Twin Toolbox de la Unión Europea proporciona bloques de construcción modulares que abarcan desde la adquisición de conjuntos de datos y bases de datos muy relevantes a los que se accede a través de Data Spaces, e iniciativas como Destination Earth, la base de datos europea de edificios, con una base de conocimientos muy relevante que se integra a la perfección gracias a la interoperabilidad semántica, la simulación basada en modelos de IA validados, la visualización y la coordinación entre diferentes casos de uso y escenarios. Estas capacidades permiten a las administraciones componer gemelos a escala de ciudad capaces de realizar experimentos hipotéticos relevantes para las políticas y proyectar las consecuencias fiscales y de bienestar antes de comprometer capital. La caja de herramientas está diseñada explícitamente en torno a la apertura y la interoperabilidad, de modo que los modelos, los datos y los resultados sigan siendo portátiles entre distritos y proveedores, tal y como define la ambición de Interoperable Europe.

Si los LDT proporcionan el entorno controlado para las pruebas y la simulación, GenAI proporciona la capa integradora que los programas públicos carecen de forma crónica. La

investigación sobre modelos básicos muestra que los modelos grandes pueden generalizarse a través de modalidades y tareas; aplicados con cuidado, pueden actuar como analistas comparativos que reúnen el lienzo de decisión para cada elección, comprobando la procedencia, conciliando unidades y produciendo memorandos estandarizados con intervalos de confianza y bandas de sensibilidad. Nada de esto sustituye el juicio humano, los criterios humanos para la validación de las ideas propuestas y, sobre todo, la responsabilidad legal y civil de las personas. El interés de los LDT con GenAI es transformar los datos en pruebas y elevar el nivel de transparencia.

Como observa el informe de Stanford sobre los modelos básicos, estos sistemas son adaptables a todos los ámbitos, pero deben estar sujetos a controles en materia de sesgos, seguridad y auditabilidad, consideraciones que el uso municipal magnifica. (Stanford CRFM, Freeman Spogli Institute) En el sector público, las primeras encuestas informan de beneficios cuantificables cuando las barreras de seguridad son explícitas y los flujos de trabajo se rediseñan en lugar de simplemente automatizarse, pero también advierten que la calidad, la procedencia y la evaluación siguen siendo tareas difíciles (McKinsey & Company, ONE MP).

SURPLUS permite que este criterio de evaluación se base en las capacidades de las preguntas clave de negocio (KBQ), una disciplina de gestión que consiste en formular lo que debe ser cierto, en términos cuantitativos, antes de tomar una decisión (por ejemplo, «¿Cuál es el valor actual neto a 10 años del control adaptativo de señales en el corredor A con una tasa de descuento del 7%, bajo un valor medido del tiempo y la captura de los gastos operativos de los autobuses?»). Las KBQ no son eslóganes, sino preguntas vinculadas a la toma de decisiones que definen de antemano los contrafactuales, los umbrales de aceptación y los planes de medición. Este marco tiene profundas raíces en la gestión analítica y actúa como un antídoto práctico contra la desviación del alcance en los proyectos de datos.

Una vez que una KBQ es explícita, se puede configurar el gemelo para ejecutar los contrafactuales pertinentes, y los resultados se pueden evaluar con métricas estándar de finanzas públicas, como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de rendimiento (TIR) y el retorno de la inversión (ROI), conceptos que siguen siendo la lengua franca de las oficinas presupuestarias y los auditores. Es notable que, según el muy recomendable libro sobre por qué fracasan los proyectos de ciencias de datos (Gray and Shellshear. 2024), la principal razón por la que fracasan varios proyectos de datos es la falta de respuesta a las necesidades y los casos de negocio adecuados, ya que plataformas de dominio como Palantir (Palantir Technologies, 2025) han demostrado en el mercado cómo una solución centrada en encontrar los casos de negocio adecuados y crear soluciones centradas en el impacto han logrado un gran impacto y aceptación en el mercado.

Una vez que tenemos las KBQ adecuadas, es decir, una vez identificados correctamente el caso de negocio y la oportunidad adecuados, necesitamos datos para validarlos. Los mecanismos mínimos de interoperabilidad (MIM Plus) de Europa proporcionan los acuerdos mínimos que las ciudades necesitan para que los sistemas, los datos y los servicios interoperan entre departamentos y jurisdicciones. En la práctica, los MIM se ponen en marcha a través de la norma ETSI NGSI LD para la gestión de la información contextual para el MIM1, una API y un modelo de información basado en gráficos que permite describir de forma coherente los activos, los eventos y las relaciones, y a través de la iniciativa Smart Data Models (MIM2), que ofrece esquemas abiertos y verificados por la comunidad en todos los dominios. No se trata de normas abstractas, sino de lo que permite que «LampPost» o «Intersection» signifiquen lo mismo en toda una cartera, y que un agente GenAI pueda razonar de forma segura en todos los dominios con identidades, unidades y procedencias coherentes (living-in.eu MiMs Plus).

El intercambio de datos se ve catalizado por los Espacios de Datos Europeos, un marco político y técnico que permite a los participantes intercambiar datos bajo una gobernanza explícita, preservando al mismo tiempo la soberanía. El Centro de Apoyo a los Espacios de Datos (DSSC) proporciona un plan, los componentes básicos y la orientación que los programas municipales pueden reutilizar en lugar de reinventar, adoptado para las ciudades inteligentes en DS4SSCC.

Cuando un LDT consume datos a través de un espacio de datos, por ejemplo, tarifas energéticas, telemetría de tránsito o medidas medioambientales, la vinculación al propósito, la trazabilidad y

la revocación no son aspectos secundarios, sino propiedades inherentes al intercambio. Esto es importante cuando los resultados determinan los pagos, la aplicación o el análisis de equidad (Comisión Europea, Estrategia Digital, dssc.eu).

Para que todas estas herramientas sean accesibles, es necesario disponer de entornos de pruebas y de la infraestructura digital necesaria para crear un andamiaje legal y de financiación para los retos de los proyectos multinacionales. En ese contexto, el Consorcio Europeo de Infraestructura Digital (EDIC) para Ciudades Inteligentes se centró en los gemelos digitales locales, Citiverse y el nodo de ciudades inteligentes para espacios de datos, que hicieron accesibles a las ciudades todas las tecnologías descritas, simplificando la gobernanza, la adquisición y los artefactos de medición, al tiempo que se ampliaba lo que funciona a través de las fronteras. Por esa razón, en este contexto, la metodología SURPLUS es muy relevante para comparar el excedente entre iniciativas, ya que permite comparar capacidades, compartir experiencias, evaluar posibles intervenciones y, más allá de la tecnología, promover un aprendizaje institucional más rápido con métricas comunes y contrafactuales auditables (Comisión Europea, EuroAccess).

EDIC parte de la capacidad de que la IA que afecta a las calles y a los operadores debe validarse antes de su implementación, la red europea de instalaciones de ensayo y experimentación (TEF), en particular CitCom.ai para ciudades y comunidades inteligentes y sostenibles, que ofrece bancos de pruebas a gran escala donde se evalúan los sistemas de IA en cuanto a seguridad, rendimiento y cumplimiento.

2. Trabajos relacionados y marco teórico

La disciplina KBQ de Harvard Business Review reorienta el análisis hacia cuestiones críticas para la toma de decisiones, reduciendo el riesgo de modelar sin viabilidad (Trojanos, 2020). Paralelamente, las comunidades de investigación y políticas posicionan a los gemelos digitales locales (LDT) como instrumentos fundamentales para gobernar y optimizar las condiciones de vida en las zonas urbanas, periurbanas y rurales (European Commission, 2025). Los documentos de especificación y orientación NGSi-LD de ETSI describen cómo los modelos de contexto basados en grafos apoyan a los gemelos digitales como sistemas de sistemas que integran la semántica entre dominios (ETSI, 2024).

En la capa de plataforma, la caja de herramientas LDT de la UE describe el acceso regulado a múltiples modelos básicos, agentes impulsados por LLM, conjuntos de evaluación y automatizaciones empresariales que conectan la IA con las operaciones, lo que hace que las plataformas de datos actuales evolucionen hacia canalizaciones de IoT a gemelos, como las que permiten las plataformas basadas en FIWARE (por ejemplo, Iris360 en Cartagena, VLCi en la ciudad de Valencia). Las oportunidades clave que deben evolucionar con el beneficio de los espacios de datos son hacer hincapié en la calidad de los datos, el ciclo de vida de los datos y la alineación con la Ley de IA y la Ley de Datos en lo que respecta a la soberanía y la reutilización. Estos ingredientes motivan SURPLUS: una vía estructurada desde las KBQ hasta la captura de excedentes que es transparente, interoperable y replicable.

¿Cómo se traduce esto en la práctica? Los casos municipales representativos muestran que el enfoque no se limita a un único ámbito. Las remodelaciones del alumbrado público modeladas con tarifas conservadoras y tasas de fallo ofrecen un valor actual neto positivo incluso antes de contabilizar los beneficios colaterales en materia de seguridad; el control adaptativo de las señales produce fuertes rendimientos fiscales y sociales cuando se tiene en cuenta el valor del tiempo y los gastos operativos de los autobuses; la optimización de las rutas de recogida de residuos y la detección de fugas suelen amortizarse en el primer año cuando la telemetría es adecuada y se firman cartas de medición con las finanzas. Una visión global de estos casos diversifica el riesgo y aumenta el valor, con beneficios tempranos en un ámbito que financian la instrumentación en otro. Es fundamental que cada caso vaya acompañado de un acuerdo de medición que especifique fórmulas, linaje y umbrales de aceptación, de modo que los costes evitados y las ganancias en bienestar pasen de las diapositivas a los libros de contabilidad.

El libro mayor social es tan importante como el fiscal. Cuando los gemelos cuantifican la fiabilidad del tiempo de viaje, las mejoras en la calidad del aire o la reducción de las pérdidas de

agua, hacen visibles los beneficios que sienten los residentes, pero que los presupuestos no pueden captar en su totalidad. Marcos como los indicadores clave de rendimiento de U4SSC ayudan a alinear el seguimiento de los resultados locales con métricas de sostenibilidad reconocidas internacionalmente, mientras que las directrices de la OMS proporcionan umbrales con base científica para la salud ambiental.

El papel de GenAI en este discurso es pragmático, no teatral. Los agentes más útiles son aquellos que hacen menos, pero lo hacen de forma fiable: montan el lienzo de decisiones KBQ vinculando automáticamente las tarifas, los inventarios y el rendimiento histórico; comprueban la coherencia y la procedencia de las unidades con respecto a una carta de medición publicada; generan planes de experimentos de simulación y tarjetas de modelos con supuestos declarados; producen memorandos comparativos con intervalos de confianza y bandas de sensibilidad que los auditores reconocen. Los estudios sobre modelos fundamentales nos recuerdan que estos sistemas deben evaluarse y regularse, especialmente en lo que respecta al sesgo y la solidez, antes de influir en las operaciones. En los programas centrados en LDT, esa regulación es concreta: los agentes operan en entornos aislados, las acciones se registran con retroceso y el rendimiento se prueba en TEF.

3. Metodología

3.1. Metodología SURPLUS

La metodología SURPLUS traduce los buenos problemas empresariales en programas invertibles y auditables mediante el encadenamiento de siete pasos disciplinados —especificar, unificar, ejecutar, priorizar, aterrizar, mantener y sostener— sobre una pila interoperable de gemelos digitales locales (LDT). Cada paso tiene un resultado claro, un conjunto mínimo de controles de calidad y un traspaso al siguiente. El método es intencionadamente pragmático: privilegia las preguntas comprobables, la simulación contrafactual y la evaluación económica (NPV, IRR, ROI y recuperación de la inversión) por encima de las narrativas genéricas de «ciudad inteligente». La sección siguiente amplía cada paso con prácticas concretas, consideraciones sobre gemelos/IA y patrones de gobernanza que se pueden incorporar a licitaciones, cartas de medición y manuales de operaciones.

3.1.1. S: Especificar las KBQ y la lógica del valor

Comience por expresar la decisión como una pregunta clave de negocio (KBQ) comprobable con una ecuación de valor explícita. Una KBQ bien formulada establece (i) la decisión y el horizonte, (ii) los beneficiarios y los canales de valor (presupuestarios frente a sociales), (iii) el contrafactual, (iv) los umbrales de aceptación (por ejemplo, VAN > 0 al 7% y amortización < 5 años), y (v) cómo se producirán y registrarán las pruebas en el libro mayor.

Dos libros de contabilidad paralelos evitan la confusión: el libro de contabilidad fiscal (flujos directos que afectan al presupuesto de la ciudad: energía, mantenimiento, horas de personal, tarifas, servicios contratados) y el libro de contabilidad social (externalidades monetizadas: tiempo ahorrado, salud, seguridad, emisiones). Las KBQ deben especificar qué libro(s) de contabilidad están incluidos en el ámbito de aplicación y con qué parámetros de valoración (por ejemplo, valor del tiempo, VSL, coste de las emisiones). Al redactar KBQ emparejadas —una fiscal y otra social— se resiste la tentación de exagerar los beneficios económicos y se sigue reflejando el valor público de forma exhaustiva.

Concretar las KBQ con la economía unitaria de los activos o las ubicaciones donde se lleva a cabo la intervención (por luminaria, por intersección, por estación de bombeo, por patio escolar). Esto obliga a aclarar las variables que importan (potencia, tiempo de funcionamiento, código tarifario; variación de la distancia entre vehículos y SPaT; kWh/m³ y períodos tarifarios; m² sombreados y exposición). Cada KBQ concluye con un lienzo de decisión: el límite de la decisión,

las aportaciones y los supuestos, el plan de medición y el gemelo mínimo viable que se construirá para probarlo. Vincular el KBQ a una línea presupuestaria (quién paga, quién ahorra, cuándo) evita el «purgatorio piloto».

Institucionalice las puertas de aceptación con financiación por adelantado. Anote la tasa de descuento (real frente a nominal), los parámetros de valoración y lo que se considera prueba (por ejemplo, kWh normalizados por el clima; diferencia en diferencias para el tiempo de viaje; modelo de exceso de mortalidad para la salud por calor). Esto hace que el éxito o el fracaso sean reconocibles y, por lo tanto, gobernables.

3.1.2. U: Unificar datos y contexto con MiMs

Armonizar los datos mediante NGSi-LD/Smart Data Models y establecer un espacio de datos fiable. Definir el linaje, las licencias y la privacidad. La credibilidad de un gemelo depende de su modelo de contexto. Armonizar los datos en entidades NGSi-LD y Smart Data Models para que los activos, los eventos y las relaciones se describan de forma coherente en todos los departamentos y proveedores. En la práctica, esto significa: definir el catálogo de entidades (por ejemplo, poste de luz, intersección, grupo de señales, EBAR/bomba, árbol, estructura de sombra, admisión hospitalaria), mapear identidades entre sistemas y adjuntar la procedencia y las unidades como atributos de primera clase. La semántica gráfica de NGSi-LD facilita el razonamiento entre dominios (por ejemplo, «esta intersección contiene estos grupos de señales y linda con estas paradas de autobús»).

La caja de herramientas LDT de la UE proporciona las herramientas combinables (ingestión, mediación semántica, simulación, visualización), por lo que la unificación no es un proyecto de integración a medida cada vez. La disciplina MIMs Plus y los catálogos de modelos abiertos mantienen los artefactos portátiles entre distritos y proveedores.

3.1.3. R: Ejecute simulaciones en su gemelo digital local

Ejecute modelos causales y simulaciones. Cree una IA interpretable con gemelos digitales para pronosticar contrafactuales, incluidos el riesgo y la incertidumbre. Una vez fijadas la pregunta y el contexto, cree el gemelo mínimo que pueda ejecutar contrafactuales de forma creíble. Prefiera la estructura causal a la correlación bruta: modelos de energía/flujo que tengan en cuenta la física; tráfico mesoscópico con dispersión de pelotones; exposición al microclima con superposiciones de vulnerabilidad social. Cuando sea posible, ancle la identificación con experimentos de e o natural (implementaciones por fases, umbrales) y evalúe con diferencias en diferencias o control sintético para corroborar los efectos simulados.

Cuantifique la incertidumbre: propague el error de medición y la incertidumbre de los parámetros a través de conjuntos de escenarios o Monte Carlo; informe de los intervalos de confianza y las bandas de sensibilidad en los memorandos de evaluación. Para GenAI, mantenga el papel pragmático y controlado: utilícelo para reunir lienzos de decisión de fuentes heterogéneas, compruebe la coherencia y la procedencia de las unidades, genere automáticamente tarjetas de modelo y planes de experimentación, y redacte memorandos comparativos. No permita que agentes opacos cambien los estados operativos sin la intervención humana y sin un registro de auditoría. Valide primero la automatización en un entorno de pruebas (por ejemplo, TEF/CitCom.ai) antes de aplicarla a las calles o las plantas.

El resultado de este paso no es solo un gráfico, sino una previsión contrafactual lista para la política con supuestos, condiciones límite y factores interpretables que pueden leer los financieros y los auditores. Ese es el listón para el modelado «de grado decisorio» en la administración pública.

3.1.4. P: Priorizar diferentes opciones e iniciativas

Clasifique las iniciativas por VAN, TIR, recuperación de la inversión, tiempo de amortización y riesgo. Optimice el presupuesto entre inversiones interdependientes.

Fundamento económico. Sea CF_t el flujo de caja neto en el año t y r la tasa de descuento. Calculamos el $VAN = \sum CF_t / (1+r)^t$, la TIR de tal manera que el $VAN = 0$, el $ROI = (\sum \text{beneficios} - \sum \text{costes}) / \sum \text{costes}$, y la recuperación de la inversión como el primer año en el que el CF acumulado ≥ 0 (interpolado dentro del año). Evaluamos en un horizonte de 10 años al 7%, a menos que se indique lo contrario.

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad IRR: \text{solve } NPV = 0, \quad ROI = \frac{\sum \text{benefits} - \sum \text{costs}}{\sum \text{costs}}.$$

Tratamos las acciones candidatas como una cartera sujeta a restricciones (capital, personal, atención política, disponibilidad de datos). Las clasificamos por VAN, TIR, recuperación de la inversión, tiempo de amortización y riesgo, pero no nos detenemos en una lista ordenada, sino que optimizamos la selección en función de las restricciones presupuestarias y políticas (por ejemplo, equidad: limitar la varianza de retrasos por distrito; resiliencia: garantizar la cobertura en zonas propensas a inundaciones). Las interdependencias son importantes: las mejoras en el alumbrado liberan postes y personal para los sensores; la programación de las bombas reduce los picos que, de otro modo, aumentan los gastos operativos de las aguas residuales; las redes de sombra interactúan con las operaciones de salud y calor.

$$\max_{x_i \in \{0,1\}} \sum_i x_i NPV_i \quad \text{s.t.} \quad \sum_i x_i CAPEX_{i,y} \leq \text{Budget}_y \quad \forall y, \quad \text{and policy constraints.}$$

3.1.5. L: Implementarlo en las operaciones

Traduzca las recomendaciones del modelo en procedimientos operativos estándar, automatizaciones y ajustes presupuestarios. «Aterrizar» significa que las dos paradas son un deslizamiento y comienzan a cambiar el trabajo del lunes por la mañana. Traduzca las recomendaciones del modelo en procedimientos operativos estándar (SOP), automatizaciones y ajustes presupuestarios que los equipos existentes reconozcan. Ejemplos: políticas de atenuación gestionadas a distancia con control de cambios; gobernanza de la sincronización de señales con modos degradados cuando el estado del detector disminuye; programas de bombeo vinculados a calendarios tarifarios y excepciones por clima húmedo; manuales de salud térmica vinculados a niveles de alerta y horas de refugio. Conéctese a los sistemas de órdenes de trabajo/ERP y a la mecánica de tarifas/contratos para que los ahorros aparezcan en el libro mayor (por ejemplo, actualizaciones de clases tarifarias; reducción de partidas en los contratos de mantenimiento).

Codifique RACI (quién decide, quién ejecuta), el control de cambios y la reversión, y la revisión semanal de las operaciones digitales en la que los operadores, analistas y financieros inspeccionan los KPI, discuten las anomalías y aprueban los ajustes de las políticas. Cuando los agentes de IA propongan acciones, insista en los ámbitos, la atribución y la reversión impuestos por las políticas. El aterrizaje es donde se captura el valor o se pierde por la fricción institucional.

3.1.6. U: Mantener la medición y comprobar los KPI, y verificar los rendimientos

Instrumentar los KPI y las reglas de verificación; implementar pagos basados en resultados cuando sea apropiado, sin una medición que supere la auditoría, no hay excedentes, solo reclamaciones. La Carta de Medición es el contrato entre operaciones y finanzas: nombra los KPI canónicos, las fórmulas, el linaje y los diseños de evaluación; establece la cadencia de publicación; y define las funciones para la resolución de disputas. Calcular los KPI a partir de la telemetría

bruta, no de cifras introducidas manualmente. Para la evaluación causal, dar preferencia a los diseños que se puedan defender en público (implementaciones escalonadas, controles emparejados, control sintético). Publicar memorandos de evaluación con métodos, supuestos y bandas de confianza; exponer los agregados brutos para su escrutinio externo cuando esté permitido.

Cuando se paga a los proveedores en función de los resultados, el estatuto es también la vía de pago: todo el mundo sabe cómo se calcula el éxito antes de la primera factura. Mantenga un registro de riesgos para la deriva de datos, los cambios de precios/tarifas, el bloqueo y las reacciones adversas en materia de equidad, con medidas de mitigación (monitores de deriva y reciclaje profesional; cláusulas de portabilidad; restricciones de equidad en el gemelo; canales de reclamación). La medición no es un cuadro de mando, sino un acto institucional que vincula las pruebas al dinero.

3.1.7. S: Mantener y ampliar

Convierta los activos gemelos, las API y las plantillas en productos para que puedan reutilizarse en todos los distritos y ciudades; supervise las desviaciones y replíquelos a través de mercados como el EDIC Marketplace.

Hacer que el programa sea duradero convirtiendo los artefactos en productos: los esquemas, las definiciones de entidades, los manuales, los evaluadores, las funciones de coste y los contratos API se convierten en un kit de reutilización. Supervisar la deriva del modelo y las regresiones de la calidad de los datos; programar la recapitación; definir políticas de obsolescencia. Utilizar estándares abiertos (NGSI-LD, modelos de datos inteligentes) y cláusulas de portabilidad para que las ciudades conserven su soberanía y eviten los costes de cambio de plataforma en cada ciclo contractual. Empaquetar los activos para su replicación en todos los distritos y ciudades vecinas, idealmente a través de vías europeas como LDT Toolbox y los mercados EDIC, de modo que la ampliación se convierta en parametrización, y no en código personalizado.

La sostenibilidad también se refiere a las personas: invierta en la formación de los operadores, celebre los logros visibles (cruces más seguros, menos fugas, plazas más tranquilas en verano) y presupueste el mantenimiento del gemelo como cualquier otro activo. Informe del superávit obtenido anualmente, tanto fiscal como social, para que el público pueda inspeccionar de dónde proviene el valor, dónde se ha quedado corto y qué se va a intentar a continuación. Una cartera pequeña y honesta que se acumula es mejor que una extensa que no se puede medir.

3.2. Metodología de investigación

En esta sección se especifican los procedimientos técnico-científicos utilizados para (i) seleccionar los casos municipales, (ii) recopilar y preparar los datos, (iii) estimar los impactos contrafactuales y traducirlos en métricas económicas, y (iv) validar, reproducir y auditar los resultados.

Adoptamos un diseño cuasi-experimental de múltiples casos. Cada intervención (por ejemplo, señales adaptativas, programa de sombreado, LEZ, optimización de rutas, controles de plantas de edificios, alumbrado público) se trata como un estudio independiente siguiendo un plan de análisis previo (PAP) compartido que establece:

1. Decisión y KBQ. Límite de decisión, horizonte, beneficiarios y umbrales de aceptación (por ejemplo, $VAN > 0$ al 7 % real; *recuperación de la inversión* < 5 años).
2. Resultados y unidades. Resultados primarios/secundarios, unidad de análisis (activo, corredor, zona) y reglas de agregación.
3. Estrategia de identificación. *Diferencia en diferencias* (DiD) con efectos fijos bidireccionales y diagnósticos de estudio de eventos; *adopción escalonada*; *control sintético* para resultados a nivel de zona; *discontinuidad de regresión* (RD) para políticas de umbral; o *variables instrumentales* (IV) cuando existen instrumentos válidos.

4. Datos y linaje. Fuentes, acceso, licencias, restricciones de privacidad, controles de calidad y versiones.
5. Incertidumbre y solidez. Bootstraps planificados, escenarios de Monte Carlo, pruebas de falsificación.
6. Economía. Libro mayor dual (fiscal frente a social), parámetros de valoración (valor del tiempo, VSL, costes de emisión) y convenciones de horizonte/descuento.

Cuando se utilizan gemelos digitales locales (LDT), el PAP requiere una calibración previa al período, una validación de retención y una conciliación de los deltas simulados con estimadores empíricos antes de la evaluación económica.

3.2.1. Selección de casos: criterios de inclusión/exclusión y rúbrica de puntuación

Para garantizar la máxima variación (dominios, gobernanza, madurez) y preservar al mismo tiempo la viabilidad de la medición y la pertinencia de las políticas, se sigue un procedimiento basado en: (i) la convocatoria de casos candidatos con una ficha KBQ del paso anterior; (ii) la selección de documentos (datos, permisos, riesgos); (iii) la puntuación según la rúbrica; (iv) la revisión ética/de gobernanza; (v) la aprobación del comité metodológico.

Tabla 1. Rúbrica de selección de casos (escala de 0 a 5; la suma de las ponderaciones es 1,00)

Criterio (ponderación)	Señal de inclusión (4-5)	Señal de exclusión (0-1)
Claridad de la KBQ (0,15)	Límite de decisión, horizonte y umbrales de aceptación definidos ex ante	Objetivos vagos; sin umbrales medibles
Suficiencia de datos (0,20)	≥12 meses de referencia; ≥6 meses posteriores; identificaciones y unidades estables	<3 meses de referencia; registros fragmentados
Viabilidad de la medición (0,10)	KPI contratables; linaje auditable	Solo proxy; no verificable
Preparación de LDT/banco de pruebas (0,15)	NGSI-LD/Modelos de datos inteligentes; acceso a la caja de herramientas	Sin modelo semántico; CSV ad hoc
Estrategia de identificación (0,10)	Experimento natural, implementación o control válido	Sin contrafactual plausible
Relevancia política (0,10)	OPEX/CAPEX material o intereses sociales	Trivial o simbólico
Representatividad (0,15)	Añade diversidad de ámbitos/geografía	Duplica un caso existente
Ética y cumplimiento (0,05)	DPIA completa; conforme al RGPD	Restricciones de gobernanza no cumplidas

Fuente(s): Elaboración propia, 2025.

Estas subsecciones transforman SURPLUS de un marco de gestión en una metodología de investigación replicable: los casos se seleccionan de manera transparente, los datos se unifican con un linaje auditable, los efectos se identifican mediante diseños explícitos, la economía se calcula siguiendo una disciplina de doble contabilidad, y todos los resultados se empaquetan para su verificación y reutilización. Las secciones siguientes muestran cómo implementarlo utilizando la caja de herramientas LDT de la UE.

4. Caja de herramientas LDT de la UE para implementar la metodología SURPLUS

SURPLUS requiere la caja de herramientas LDT de la UE para obtener (i) un canal de datos a modelos regulado e interoperable; y (ii) una forma repetible de empaquetar modelos, experimentos y pruebas para que los equipos financieros y operativos puedan actuar con

confianza. La caja de herramientas European Local Digital Twin (LDT) se diseñó precisamente para esto: agrega bloques de construcción modulares para la adquisición, el modelado, la simulación, la visualización, las pruebas de interoperabilidad y la orientación para la adopción/evaluación, con el objetivo explícito de democratizar las capacidades gemelas en todas las comunidades y niveles de madurez. Esta alineación significa que la caja de herramientas no es solo «otra plataforma», sino una implementación de referencia para convertir SURPLUS de método en maquinaria.

Cómo se relaciona la caja de herramientas con SURPLUS (de extremo a extremo):

1. S — Especificar KBQ y lógica de valor.

La herramienta *Casos de uso y escenarios* proporciona el formalismo para codificar las preguntas clave de negocio como «recibos» configurables y versionados que vinculan una necesidad operativa (por ejemplo, diseño de LEZ, reducción de fugas) con las entradas necesarias, los umbrales de decisión y los criterios de aceptación. Estos recibos coordinan los parámetros que se van a variar (escenarios) y los experimentos que se van a realizar (hipótesis), preparando un lienzo de decisión limpio antes de comprometer cualquier capital. El *planificador de innovación de la ciudad* complementa esto registrando los objetivos estratégicos y las evaluaciones de madurez, de modo que cada KBQ se vincula a objetivos de resultados explícitos y a la capacidad básica de la ciudad para cumplirlos.

2. U — Unificar datos y semántica.

La *plataforma de datos* armoniza fuentes heterogéneas (sensores, bases de datos, sistemas externos) en gráficos de contexto NGSI-LD y modelos de datos inteligentes, implementando MIM1/MIM2 para que los activos, eventos y relaciones tengan el mismo significado en todos los departamentos y proveedores. Aquí es donde la telemetría sin procesar y los registros de referencia se normalizan, se almacenan históricamente y se exponen a través de API coherentes. Cuando los datos deben compartirse o adquirirse según la política, la herramienta *Data Space Ready* expone y consume interfaces reguladas, lo que permite un intercambio consciente de la identidad, los contratos y las políticas, en consonancia con los patrones europeos del espacio de datos. En conjunto, estas herramientas satisfacen el requisito de SURPLUS de que todos los experimentos se basen en un sustrato semántico estable y auditable.

3. R — Ejecutar contrafactuales (simulación + IA).

El *AI Notebook* empaqueta modelos (simuladores deterministas, ML, estimadores causales) detrás de contratos de E/S estándar; *Federated Learning* permite a los socios entrenar donde residen los datos; y el *Data Modeller* genera series sintéticas para llenar huecos o proteger la privacidad. Estos se conectan en tiempo de ejecución mediante *Use Cases & Scenarios*, que coordina experimentos multimodelo (por ejemplo, tráfico ↔ contaminación ↔ clima), registra la procedencia y produce resultados estructurados para su análisis y auditoría. Esto hace realidad la petición de SURPLUS de una inferencia interpretable y basada en escenarios, en lugar de predicciones puntuales desvinculadas del contexto de la decisión.

4. P — Priorizar las opciones como una cartera.

Los resultados se envían al *planificador de innovación de la ciudad* para que los clasifique a nivel de cartera por VAN/TIR/amortización y los compare con los KPI de las políticas (por ejemplo, U4SSC), mientras que *los casos de uso y escenarios* conservan los linajes de los experimentos necesarios para el análisis de sensibilidad y el riesgo. Esto hace explícito el «doble libro mayor» financiero y social, una condición esencial para pasar de proyectos piloto atractivos a programas en los que se puede invertir.

5. L — Poner en marcha las operaciones.

Play & Visualise vincula los resultados del modelo a contextos geospaciales 2D/3D y paneles de control empresariales para que los operadores puedan incorporar recomendaciones en los procedimientos operativos estándar y, cuando sea apropiado, semiautomatizar la actuación (por ejemplo, planes de señalización, programas de bombeo) bajo la aprobación humana. La identidad y el acceso se gestionan de forma centralizada mediante *la gestión de identidades*. La postura de integración de Toolbox (API, buses de mensajes y cargas útiles estándar) mantiene el cableado de «última milla» a los sistemas de control de forma pragmática y auditable.

6. U — Mantener la medición y la verificación.

Las series temporales de la *plataforma de datos* sirven como sistema de registro para la verificación posterior a la implementación; *Participate* incorpora los comentarios de los ciudadanos en el ciclo de pruebas y documenta cómo se utilizó la IA, lo que respalda los requisitos de IA justa y del RGPD. Esto cierra el ciclo exigido por SURPLUS: se miden los resultados, se revisan los contrafactuales y se adaptan las políticas.

7. S — Mantener y escalar.

Marketplace y *Data Space Ready* hacen que los modelos y los conjuntos de datos sean localizables y contratables en todas las ciudades; esto acelera la replicación y transfiere las pruebas junto con los activos. El mismo paquete de «recibo + modelos + KPI» que permitió la primera implementación se convierte en una plantilla compatible para la siguiente, en línea con la ampliación transfronteriza al estilo EDIC.

4.1. Arquitectura de referencia y alineación de estándares.

La caja de herramientas implementa una arquitectura de referencia de siete capas que amplía las conocidas pilas de cinco capas de las ciudades inteligentes (fuentes → adquisición → conocimiento/análisis → interoperabilidad → servicios) con dos metacapas específicas de LDT: Smart Orchestration (para componer recibos entre dominios y escenarios hipotéticos) y Visualization & Applications (para contextualizar estados en tiempo real y simulados en un gemelo). Esta ampliación es lo que convierte una plataforma de datos en una plataforma de decisión y experimentación, que es precisamente lo que requiere la operatividad de SURPLUS. La arquitectura está explícitamente alineada con MIM, ETSI NGSI-LD, formatos OGC, OAuth/OpenID y bloques de construcción del espacio de datos de la UE, lo que garantiza que las ciudades puedan adoptarla de forma incremental e interconectarla con las plataformas existentes.

La caja de herramientas ofrece herramientas implementables que se asignan claramente a capas y MIM: *Plataforma de datos* (MIM1/2 para contexto + modelos), *Espacio de datos listo* (MIM3 para transacciones; MIM7 para geoespacial), *Cuaderno de IA / Aprendizaje federado / Modelador de datos* (MIM5 para documentación de IA justa), *Casos de uso y escenarios* (MIM5/7/9 para explicabilidad de la IA, estado geoespacial e intercambio de análisis), *Reproducir y visualizar* (MIM7/9), *gestión de identidades* (MIM4/6 para privacidad y seguridad), *planificador de innovación urbana* (MIM8/10 para gestión de KPI e impacto/ROI), *participación* (MIM4/6 para privacidad/seguridad en la participación) y *mercado* (MIM3/5/6 para transacciones, IA justa e incorporación segura). Esta asignación explícita minimiza la ambigüedad durante la adquisición, la integración y la auditoría.

5. Validación del EXCEDENTE en diferentes casos de uso y ámbitos

Examinamos cinco implementaciones que abarcan la energía, la movilidad, los residuos sólidos y el agua. Para cada una de ellas, documentamos el contexto, las hipótesis, los datos y los aspectos

económicos. Cuando las fuentes proporcionan rangos (por ejemplo, para la valoración del tiempo público), informamos de los intervalos de sensibilidad y mantenemos la claridad sobre lo que es económico frente a lo que es social.

Evaluamos tres intervenciones en España: el «Programa de Sombras» (sombra para la salud y el calor) de Barcelona, la optimización de la energía del distrito de Valencia en la Ciudad de las Artes y las Ciencias y la Zona de Bajas Emisiones de Cartagena utilizando SURPLUS, y también lo validaremos con otras tres intervenciones globales en Estados Unidos y Australia.

En SURPLUS, las KBQ definen la decisión que se debe tomar, el contrafactual, la economía unitaria y los umbrales de aceptación de la inversión. A continuación, los gemelos digitales simulan los resultados contrafactuales en el marco de políticas alternativas, de modo que se puede prever el valor *antes* de comprometer el capital; las cartas de medición garantizan que el valor se *refleje* posteriormente en el libro mayor. Adoptamos un horizonte de diez años y una tasa de descuento real del 7%. Las métricas económicas se calculan como: valor actual neto (VAN) utilizando flujos de caja descontados; tasa interna de rendimiento (TIR) como la tasa a la que VAN = 0; y rendimiento de la inversión (ROI) como la ganancia neta no descontada a 10 años dividida por el CAPEX inicial (informamos del ROI como una ratio simple, no descontada). Este procedimiento sigue el modelo matemático SURPLUS y la disciplina del doble libro mayor (económico frente a social), de modo que los ahorros presupuestarios y las externalidades se informan de forma clara y pueden ser auditados.

Construimos cada caso de uso sobre un modelo de contexto interoperable con la caja de herramientas Local Digital Twin Toolbox de la UE y entornos de pruebas como bloques componibles para la adquisición, la semántica, la simulación y la visualización, al tiempo que preservamos la procedencia de los datos. Las hipótesis económicas son conservadoras y, cuando procede, se basan en fuentes oficiales españolas o de la UE (tarifas, costes hospitalarios y valor de la vida estadística).

5.1. Barcelona (Barcelona, España): Programa de sombra para la salud y el calor.

La ciudad ha puesto en marcha un programa de sombra para adaptar el espacio público al aumento del calor, con casi 200 zonas de sombra previstas para 2027 y más de 50 000 m² de nuevas superficies de sombra. Evaluamos si la instalación de estructuras tensadas y pérgolas, priorizando los patios de colegios y parques infantiles, genera un excedente fiscal y social positivo, una vez monetizados los beneficios para la salud y considerado el modesto coste de mantenimiento. Modelamos los beneficios como la mortalidad y las hospitalizaciones relacionadas con el calor que se evitan gracias a la mejora de la cobertura de sombra en micrositijs de alta exposición, con la atribución y las bases de referencia documentadas en la carta de medición. La telemetría vincula los activos de sombra con las lecturas del microclima (temperatura del aire y del globo terráqueo), la ocupación de las escuelas y los parques infantiles y los resultados sanitarios a nivel de barrio; los gastos y los gastos operativos se registran en el libro mayor fiscal. Las fuentes públicas confirman la escala y el presupuesto (≈13 millones de euros para 2027; ≈194 nuevos espacios de sombra; ≈50 000 m²). Monetizamos la reducción de la mortalidad utilizando las actualizaciones oficiales de España del valor por vida estadística (VSL) y los costes hospitalarios utilizando la base de costes del SNS 2022; ambos se utilizan únicamente para el libro mayor *social*, con una clara separación de los flujos fiscales.

Para Barcelona, consideramos un CAPEX de 13,0 millones de euros (t=0) con un OPEX de 0,26 millones de euros/año, y, bajo una elasticidad modesta de la cobertura con respecto a la reducción del riesgo, 2 vidas/año evitadas y 50 hospitalizaciones/año evitadas, monetizadas a un VSL≈1,6 millones de euros y un coste medio de cuidados intensivos ≈5,4 mil euros por alta (horizonte de 10 años; descuento del 7 %).

5.2. Valencia (Valencia, España): Energía de distrito en la Ciudad de las Artes y las Ciencias

La Ciudad de las Artes y las Ciencias está mejorando la refrigeración con una nueva planta geotérmica y la modernización de los controles. Evaluamos la economía incremental de dos palancas de control que un gemelo puede probar de forma segura y luego automatizar: aumentar la temperatura de suministro de agua refrigerada (CHWST) cuando las condiciones lo permiten y recuperar el ΔT «perdido» para reducir el bombeo excesivo. La literatura técnica indica que la energía del enfriador puede reducirse entre un 1,5% y un 2,5% por cada aumento de 1 °C en la CHWST (dadas cargas estables), y que las soluciones *de bajo ΔT* reducen las penalizaciones por bombeo, capacidades codificadas en las secuencias de la Directriz 36. *Medición.* El gemelo ingesta datos BACnet/SCADA (caudales, temperaturas, kW), señala patrones de ΔT bajo y ejecuta contrafactuales semana tras semana para aislar los ahorros. La energía se monetiza con los precios de la electricidad no doméstica de la UE; mantenemos un precio base conservador para evitar exagerar los beneficios. Las obras geotérmicas de CACSA y el historial de iluminación/controles inteligentes instalados ofrecen un contexto local para obtener ganancias alcanzables.

5.3. Cartagena (Murcia, España): Zonas de bajas emisiones

La ciudad de Cartagena aprobó una ordenanza sobre zonas de bajas emisiones que delimita dos áreas, el Casco Histórico y el Ensanche, y enfatiza la pacificación del tráfico en las supermanzanas, la gestión adaptativa del acceso y la supervisión en tiempo real, en lugar de las prohibiciones generales establecidas por la DGT. El perímetro y el enfoque normativo están documentados públicamente. En el Casco Histórico se mantiene el acceso para residentes, garajes y logística, al tiempo que se prioriza el uso peatonal. Por su parte, el Ensanche se organiza en torno a supermanzanas para desalentar el tráfico de paso en las calles internas. A diferencia de otras ciudades, Cartagena afirma explícitamente que no se enfrenta a excedencias graves en toda la ciudad y opta por restricciones ligeras y reversibles, activadas por la demanda y los episodios de calidad del aire. La KBQ que modelamos es: «¿Cuál es el VAN y la TIR sociales a 10 años de la ZBE de Cartagena (Casco Histórico + Ensanche) en un escenario conservador de beneficios para la salud, dadas las reducciones medidas en la exposición y la modesta postura de la ciudad en cuanto a la aplicación de la normativa?».

La ciudad adquirió sensores de calidad del aire de Libelium y sistemas de control de acceso, cámaras ANPR y sensores medioambientales, cofinanciados a través del Plan de Recuperación de España (PRTR). Estos datos permiten un diseño y una medición gemelos. El gemelo operativo combina (i) un módulo de exposición que vincula la telemetría local de NO_2 /PM con las microzonas de población en el Casco Histórico/Ensanche, (ii) variantes de asignación de tráfico que reflejan los diseños de supermanzanas (aumento de los flujos de enlace de límites; las celdas internas se calman a 10-30 km/h) y (iii) cambios de política para restricciones episódicas (superaciones de los límites de contaminación, ventanas de congestión por la llegada de cruceros). Los resultados se calculan a partir de la telemetría bruta, no de los KPI introducidos manualmente, siguiendo la carta de medición SURPLUS: fórmulas trazables, supuestos explícitos sobre el valor de la vida y auditabilidad de los episodios/horas evitados. Esto se ajusta a las prácticas de la caja de herramientas LDT de la UE para gemelos modulares y a los MIM de Living-in.EU para modelos de contexto.

Esto aporta un ejemplo de valor social, como ganancia social neta. La principal señal económica es la salud: menores tasas de mortalidad y hospitalizaciones relacionadas con la contaminación. Datos recientes de la UE y el Reino Unido muestran que las zonas de bajas emisiones (LEZ) reducen el NO_2 y generan mejoras cuantificables en la salud, especialmente en el ámbito

cardiovascular, con efectos que se extienden más allá de la propia zona. Por lo tanto, monetizamos la mortalidad evitada utilizando el valor actualizado de una vida estadística (VSL) de España y las hospitalizaciones evitadas utilizando los costes medios por alta del SNS

5.4. Los Ángeles (California, EE. UU.): alumbrado público LED

La ciudad de Los Ángeles completó una conversión integral al alumbrado público LED, lo que supuso una reducción del 64% en el consumo de energía y un ahorro energético de aproximadamente 10 millones de dólares al año, junto con una importante reducción de CO₂ (Oficina de Alumbrado Público de Los Ángeles). El coste inicial del programa ha sido de aproximadamente 57 millones de dólares. En términos de SUPERÁVIT, se trata de un caso de superávit presupuestario: los ahorros se materializan en forma de reducciones del flujo de caja en la factura energética y el mantenimiento. Modelamos -57 millones de dólares en el año 0 y +10 millones de dólares anuales durante 10 años. No asignamos ningún valor residual a la prolongación de la vida útil de las luminarias ni a la renegociación de las tarifas, por lo que nuestras estimaciones son conservadoras.

5.5. Bellvue (Sidney, Australia): Señales adaptativas

Bellevue implementó el Sistema de Tráfico Adaptativo Coordinado de Sídney (SCATS) en más de 200 intersecciones, y los documentos municipales y la cobertura comercial señalan que a finales de 2015 ya estaba en pleno funcionamiento, con un coste aproximado de implementación de 5,5 millones de dólares. Los estudios informan de reducciones en el tiempo de viaje y los retrasos en los corredores de entre el 13% y el 43%, y un artículo estimó el ahorro de tiempo público en unos 3,2 millones de dólares al año, utilizando un valor del tiempo de 15 dólares por hora. En SURPLUS clasificamos estas ganancias principalmente como excedente social (tiempo; externalidades de seguridad). Deduciremos un 5% de OPEX del beneficio para representar los costes del ciclo de vida de la detección, las comunicaciones y el soporte de software.

5.6. Virginia Beach (Virginia, EE. UU.): Gestión de residuos sólidos

La optimización de las rutas redujo el número de rutas y mejoró el equilibrio de la carga de trabajo. Los resultados documentados indican una reducción de 2,25 millones de dólares en el inventario de equipos y un ahorro operativo anual de 1,1 millones de dólares (personal, mantenimiento, combustible). Un caso de otro proveedor informa de un ahorro de 400 000 dólares al año y un alivio del inventario de 1 millón de dólares para un subconjunto, lo que ilustra que los beneficios varían según el alcance y la fase. Para la evaluación básica, utilizamos los resultados del programa más amplio y adoptamos 400 000 dólares como coste de implementación conservador que representa el software y la consultoría. El alivio del inventario se modela como una entrada de efectivo única en el primer año.

6. Resultados

6.1 Resultados de SURPLUS en los casos de uso definidos

Evaluación económica (horizonte de 10 años, descuento del 7 %). Calculamos el VAN, la TIR, el ROI y la recuperación de la inversión para cada caso y para la cartera agregada. El agregado trata los flujos de caja como aditivos entre los casos. Las valoraciones sociales se marcan y se mantienen separadas de los impactos en el libro mayor presupuestario.

Tabla 2. Evaluación económica (horizonte de 10 años, descuento del 7%)

Caso	VAN (7 %)	TIR	ROI (10 años)	Amortización (años)
Los Ángeles — Alumbrado público LED	11,3 millones de euros (13 235 815 \$)	11,8	75,4	5,7
Bellevue — Adaptive Signals	12,8 millones de euros (15 043 976 \$)	52,4	431,8	1,9
Virginia Beach — Optimización de rutas	8,0 millones de euros (9 428 743 \$)	773,1	3212,5	0,1
Barcelona — Sombra para la salud térmica	9,58 millones de euros	27,9	102,2%	4
Valencia — Energía de distrito	1,45 millones de euros	52,8	391	2
Cartagena — LEZ (Casco + Ensanche, supermanzanas)	0,88 millones de euros	35,2	110	2,7

Fuente(s): Elaboración propia, 2025.

Sensibilidad y riesgo: examinamos una variación del $\pm 25\%$ en los beneficios y el CAPEX. La iluminación LED sigue teniendo un VAN positivo, a menos que los beneficios caigan un 25% y el CAPEX aumente simultáneamente un 25%. Las señales adaptativas siguen siendo beneficiosas en términos sociales en una amplia gama de parámetros de valoración temporal; los efectos fiscales dependen de los regímenes de impuestos sobre los combustibles y los incentivos al transporte público. La optimización de rutas es sólida frente a las hipótesis, dada la gran reducción de inventario; los proyectos piloto de Decatur y Oldcastle se amortizan rápidamente, lo que los hace resistentes a los errores de estimación. Los principales riesgos incluyen la deriva de datos, los cambios en las tarifas o los precios y la capacidad institucional para mantener la medición.

6.2. LORDIMAS y SURPLUS para conectar la madurez con objetivos medibles

LORDIMAS proporciona a las ciudades un lenguaje común y una base empírica para evaluar la madurez digital, mientras que SURPLUS les ofrece un enfoque disciplinado para convertir esa madurez en un excedente económico auditable mediante KBQ, gemelos interoperables y mediciones verificadas. La combinación de ambos crea un único modelo operativo: evaluar la preparación con LORDIMAS; seleccionar y configurar las inversiones con SURPLUS; y, a continuación, volver a puntuar la madurez a medida que la ciudad implementa, verifica y escala lo que funciona.

LORDIMAS es una evaluación de la madurez digital de los gobiernos locales, metropolitanos y regionales desarrollada por ESPON junto con el Comité Europeo de las Regiones y los socios del movimiento Living-in.EU. Estructura una autoevaluación en siete dimensiones —gobernanza, diseño de servicios, gestión de datos, interoperabilidad, prestación de servicios, tecnología y creación de redes— con seis niveles de madurez, desde «digitalmente incipiente» hasta «digitalmente nativo». El primer año completo de recopilación (2024) capturó 99 autoridades con una puntuación media de «digitalmente emergente»; los encuestados tendían a ser más fuertes en gobernanza/prestación de servicios/creación de redes, y más débiles en gestión de datos/interoperabilidad y adopción de nuevas tecnologías.

SURPLUS, por su parte, es una práctica centrada en KBQ: especificar la lógica de decisión y valor; unificar los datos con MIM; ejecutar casos de uso y escenarios sobre LDT para probar; priorizar carteras en NPV/IRR/amortización; incorporar los cambios en las operaciones; mantener la medición con un estatuto; y sostener y escalar mediante la reutilización. LORDIMAS enumera las condiciones previas organizativas y técnicas para los programas digitales. Esto hace que la puntuación de madurez sea aplicable: se convierte en una *puerta* o un *multiplicador* en el cálculo económico.

Tabla 3. Dimensiones de LORDIMAS y pasos de SURPLUS emparejados

Dimensión LORDIMAS (qué se evalúa)	Pasos principales de SURPLUS que permite (qué hacer)	Por qué es importante esta combinación
Gobernanza (estrategia, financiación, supervisión, riesgo)	S: especificar, U: mantener, S: sostener	Si la gobernanza es «incipiente», el KBQ no puede ser propiedad, medido ni defendido; los umbrales de aceptación y la Carta de Medición se desviarán.
Diseño de servicios (co-creación, digital por defecto)	S: especificar, L: aterrizar	Las KBQ bien formuladas nombran a los usuarios y los servicios; las políticas de aterrizaje requieren procedimientos operativos estándar (SOP) diseñados conjuntamente que acepten los residentes y las tripulaciones.
Gestión de datos (gobernanza, calidad, linaje)	U: unificar, U: mantener	SURPLUS se basa en entidades, procedencia y controles de calidad críticos para la toma de decisiones; una gestión de datos deficiente aumenta el riesgo de evaluación.
Interoperabilidad (estándares, API, MIM)	U - Unificar	Los mecanismos mínimos de interoperabilidad (MIM Plus) y las prácticas de Living-in.EU hacen que los gemelos sean portátiles y auditables entre distintos proveedores.
Prestación de servicios (capacidad operativa)	L - Aterrizar	Las recomendaciones de los gemelos deben cambiar el trabajo del lunes por la mañana; la madurez de la prestación predice si los ahorros se reflejan en el libro mayor.
Tecnología (plataformas, adopción de tecnologías emergentes)	R - Ejecutar, L - Aterrizar	La ejecución de contrafactuales y automatizaciones exige plataformas fiables; las puntuaciones bajas sugieren un enfoque inicial mínimo de gemelos.
Redes (ecosistemas, aprendizaje entre pares)	S: mantener, P: priorizar	Las redes reducen el riesgo y el tiempo de retorno de la inversión mediante la reutilización de patrones y bancos de pruebas de mercado (por ejemplo, EU LDT Toolbox y TEF).

Fuente(s): Elaboración propia, 2025.

6.3. La caja de herramientas LDT de la UE como puente entre LORDIMAS y SURPLUS

La caja de herramientas Local Digital Twin Toolbox de la UE proporciona un conjunto modular de herramientas que traducen la preparación de LORDIMAS en pasos ejecutables de SURPLUS sin bloqueo. Las ciudades pueden comenzar con la mediación semántica y la visualización, y luego añadir núcleos de simulación y automatizaciones a medida que aumentan las puntuaciones de tecnología y gestión de datos. Los materiales de la OCDE y la Comisión describen la caja de herramientas como un marco abierto y reutilizable para las ciudades gemelas; Living-in.EU la sitúa junto a los MIM y los espacios de datos.

- 1- Evaluar y elegir. Realizar la autoevaluación de LORDIMAS; identificar dos KBQ que sean importantes y que la madurez actual pueda soportar con un mínimo de facilitadores (a menudo uno de servicios públicos y otro de movilidad/ámbito). Los lienzos de decisión registran los umbrales de aceptación y las puertas de preparación.

- 2- Salvar las brechas como inversiones. Cuando LORDIMAS exponga déficits (por ejemplo, interoperabilidad), financiar primero los facilitadores «U - Unificar»: agente de contexto NGS-LD, adopción de modelos de datos inteligentes, puertas de calidad. Tratar estos como proyectos con valor actual neto con sus propios estatutos.
- 3- Ejecutar y verificar. Componga el gemelo mínimo con la caja de herramientas LDT; ejecute contrafactuales causales; consiga un contrato basado en resultados. El estatuto de medición alinea la telemetría con el libro mayor; los resultados se retroalimentan al siguiente ciclo de LORDIMAS.
- 4- Escalar y volver a puntuar. Empaquetar el kit de reutilización, replicar las intervenciones ajustando los parámetros en todos los distritos, actualizar LORDIMAS para registrar las ganancias en la prestación de servicios, la interoperabilidad y la tecnología. La selección de carteras en SURPLUS admite ahora KBQ más ambiciosos (por ejemplo, control agencial con sandboxing), con LORDIMAS «Networking» guiando la reutilización entre pares y la participación en TEF.

6.3.1. Esta conexión en los ejemplos anteriores

- Barcelona: calor, salud y sombra. LORDIMAS suele mostrar fortalezas en gobernanza/prestación de servicios, pero variabilidad en la gestión de datos. SURPLUS responde haciendo de la Carta de Medición (exceso de mortalidad, admisiones) el primer resultado, y definiendo un gemelo ligero (exposición + microclima) que respeta la madurez tecnológica actual. A medida que la telemetría y la evaluación se estabilizan, el próximo ciclo LORDIMAS de la ciudad debería mejorar en gestión de datos e interoperabilidad, lo que permitiría ampliar las carteras de adaptación.
- Controles de energía del distrito de Valencia. Mientras que LORDIMAS muestra una tecnología más sólida pero una interoperabilidad mediocre, SURPLUS «U - Unificar» requiere mapeos NGS-LD/BACnet y esquemas alineados con MIM antes de automatizar los puntos de ajuste; el manual L - Land vincula los cambios de control a secuencias y reversiones al estilo ASHRAE. La caja de herramientas LDT mantiene la portabilidad del modelo en todos los campus. I
- LEZ de Cartagena. Una puntuación baja-moderada en gestión de datos da lugar a un gemelo mínimo con una afirmación de ahorro conservadora; la madurez de las redes se aprovecha para tomar prestadas políticas y evaluadores de sus pares. Las puntuaciones de gobernanza y diseño de servicios de la LEZ determinan si la ciudad puede aplicar restricciones *reversibles* con la aceptación de la comunidad; los beneficios sociales (salud) se calculan de forma visible, según SURPLUS.

6.3.2. Gobernanza e informes, un marcador con dos vistas.

Para evitar «verdades duales», publique un único cuadro de mando en el que cada iniciativa SURPLUS enumere (i) las diferencias de madurez (las dimensiones de LORDIMAS que ha mejorado y en qué medida) y (ii) los resultados económicos (VAN, TIR, ROI, recuperación de la inversión; libros de contabilidad fiscales frente a sociales). De este modo, LORDIMAS se convierte tanto *en referencia* como *en beneficiario*: las inversiones refuerzan las capacidades que mide LORDIMAS, como la interoperabilidad, la gestión de datos y la prestación de servicios.

7. Debate

SURPLUS replantea las inversiones en ciudades inteligentes como instrumentos económicos diseñados para maximizar el excedente medible. Al vincular las preguntas clave de negocio (KBQ) a datos interoperables, gemelos digitales causales y una evaluación económica disciplinada, las ciudades pueden dar prioridad a las carteras que superan el escrutinio presupuestario y aportan

mejoras visibles en la vida cotidiana. Este documento ha demostrado que cuando las decisiones se expresan como KBQ comprobables y se rastrean hasta libros de contabilidad auditables, lo «inteligente» deja de ser un catálogo de herramientas y se convierte en una práctica de creación de valor público. En resumen: empezar por la pregunta; permitir que el gemelo realice la prueba antes de comprometerse con una inversión económica; publicar los resultados mediante métodos que resistan la auditoría; y ampliar únicamente aquellas acciones que demuestren su eficacia.

Un tema recurrente en todos los casos es el conservadurismo con claridad. Utilizamos deliberadamente hipótesis cautelosas, separamos los beneficios fiscales de los sociales y publicamos los umbrales de aceptación: $VAN > 0$ con un descuento real del 7%, ventanas de recuperación alineadas con los horizontes políticos y TIR por encima de las tasas críticas de rentabilidad. Incluso dentro de esa disciplina, muchos problemas urbanos admiten una economía sólida: las reformas energéticas, la optimización de rutas, la reducción de fugas y los cambios en el control de operaciones suelen generar un VAN positivo con una amortización rápida; las intervenciones en materia de clima, salud y gestión del acceso crean un importante excedente social que justifica la financiación combinada. Las carteras multidominio diversifican aún más el riesgo y aceleran el aprendizaje: cuando se seleccionan y secuencian conjuntamente medidas relacionadas con el alumbrado, la movilidad, el agua y el ámbito público, el programa es resistente al bajo rendimiento individual y puede aumentar el valor a través de activos compartidos (por ejemplo, postes, telemetría, equipos).

Lo que distingue a SURPLUS de las «culturas piloto» anteriores es su columna vertebral administrativa. En primer lugar, la decisión es lo primero: cada iniciativa nace con un KBQ que nombra el límite de la decisión, el contrafactual, los beneficiarios y los umbrales de aceptación. En segundo lugar, la semántica es rigurosa: los datos se unifican en entidades NGSILD y modelos de datos inteligentes con procedencia, unidades y controles de calidad, de modo que los modelos siguen siendo portátiles y los resultados reproducibles. En tercer lugar, verificación experimental: los gemelos digitales ejecutan los «qué pasaría si» causales, cuantifican la incertidumbre y vinculan las hipótesis con los resultados. En cuarto lugar, preparación para la auditoría: las cartas de medición y los memorandos de evaluación especifican fórmulas, bases de referencia, intervalos de confianza y cadencia de publicación para que el departamento financiero pueda conciliar la telemetría con las facturas y los presupuestos. Estos hábitos transforman el análisis de narrativa a evidencia, y de evidencia a presupuesto.

La caja de herramientas Local Digital Twin (LDT) de la UE satisface estas demandas con una arquitectura de siete capas alineada con MIM y un conjunto coherente de herramientas que ponen en práctica los pasos SURPLUS de principio a fin. En términos prácticos, la caja de herramientas (i) estructura las KBQ y la medición mediante lienzos y cartas reutilizables, (ii) armoniza y gobierna los datos a través de la mediación semántica y los conectores de espacio de datos, (iii) orquesta simulaciones multimodelo para producir contrafactuales de grado decisorio, (iv) apoya la selección de carteras en los libros de contabilidad fiscal y social, (v) «aterriza» las recomendaciones en operaciones e integraciones de órdenes de trabajo, y (vi) verifica y escala lo que funciona empaquetando tarjetas de modelos, evaluadores y activos de portabilidad como kits reutilizables. Las ciudades pueden adoptar esta pila de forma incremental, corredor por corredor, distrito por distrito, al tiempo que preservan su soberanía y evitan la dependencia de un único proveedor. En resumen, la caja de herramientas convierte la metodología SURPLUS en un producto operativo que las ciudades pueden gobernar con confianza y replicar de manera eficiente.

La base empírica que se presenta aquí en ámbitos clave como la energía, la movilidad, los residuos sólidos, el agua y la salud urbana, ofrece argumentos pragmáticos que justifican por qué este enfoque es oportuno y viable. Cuando predominan los flujos presupuestarios (por ejemplo, electricidad, combustible, mantenimiento), los aspectos económicos por sí solos superan el

obstáculo. Cuando predominan los efectos sobre el bienestar (por ejemplo, tiempo de desplazamiento, seguridad, salud térmica, calidad del aire), el aspecto social se contabiliza con valoraciones estándar y se defiende con diseños causales. Es fundamental destacar que no hemos convertido los beneficios sociales en retorno de la inversión fiscal: hemos mantenido los libros de contabilidad separados y hemos utilizado esa separación para defender con honestidad la financiación combinada cuando procede (subvenciones, captura de valor, pagos basados en resultados). Esa claridad no es una sutileza académica, sino la razón por la que los programas superan las auditorías y el público puede examinar y aceptar las compensaciones.

Los marcos institucionales de la Comisión Europea para alcanzar un mercado único digital y una Europa interoperable que pueda beneficiarse de una infraestructura común como EDIC son tan importantes como los modelos. Los mecanismos mínimos de interoperabilidad (MIM) mantienen la estabilidad semántica; los principios europeos del espacio de datos proporcionan trazabilidad, vinculación de fines y revocación; las instalaciones de pruebas y experimentación (por ejemplo, CitCom.ai) permiten a los equipos validar la automatización antes de que llegue a las calles o las plantas; los marcos de madurez, como LORDIMAS, ayudan a secuenciar las carteras de forma realista. De este modo, las colaboraciones multinacionales al estilo EDIC permiten la reutilización y la comparación entre jurisdicciones. En conjunto, estos raíles hacen que SURPLUS sea portátil: el mismo KBQ, modelo de contexto, evaluador y manual de estrategias pueden parametrizarse para Barcelona, Valencia, Cartagena o cualquier ciudad similar que desee medir lo que gestiona.

De cara al futuro, destacan tres implicaciones. En primer lugar, la contratación pública debe estar orientada a los resultados. Las licitaciones deben incluir la carta de medición, cláusulas de portabilidad y derechos para reubicar datos y modelos; a los proveedores se les debe pagar en parte por los resultados medidos, no solo por las aportaciones. En segundo lugar, la gobernanza debe ser rutinaria. Una revisión semanal de las operaciones digitales en la que los operadores, analistas y financieros inspeccionan los KPI, evalúan los cambios y autorizan las actualizaciones de las políticas, actúa como el motor que convierte la información en excedentes. En tercer lugar, la replicación debe escalar. Las ciudades deben publicar kits de reutilización con esquemas, evaluadores, funciones de coste y procedimientos operativos estándar; invertir en la formación de los operadores; y mantener un informe público de excedentes que los residentes puedan leer y contestar. No se trata de complementos: son las instituciones las que evitan que un gemelo vuelva a caer en la deriva.

Las limitaciones persisten. Los resultados económicos dependen de las tarifas locales, las bases de referencia, los términos de los contratos y las obstinadas realidades de la implementación. Las valoraciones sociales son sensibles a parámetros como el valor del tiempo o el valor de la vida y deben comunicarse con humildad y sensibilidad. No todos los beneficios pueden monetizarse de forma creíble; los que no pueden hacerlo deben comunicarse de forma cualitativa en lugar de introducirse a la fuerza en el libro de contabilidad fiscal. Pero ninguna de estas limitaciones niega la afirmación central: con preguntas disciplinadas, semántica interoperable, gemelos causales y mediciones auditables, las ciudades pueden elegir mejor, demostrar el valor antes y escalar más rápido.

El camino a seguir es claro: especificar la pregunta, unificar los datos, ejecutar los modelos, priorizar y llevar a cabo las intervenciones, mantener las mediciones y sostener y escalar los resultados. Con estos hábitos, los gemelos digitales se convierten no en una moda, sino en una capacidad duradera para la creación de valor público. SURPLUS exige que las inversiones urbanas se basen en la toma de decisiones, sean semánticamente rigurosas, estén verificadas por experimentos y estén preparadas para ser auditadas, y la caja de herramientas LDT proporciona el andamiaje operativo para satisfacer esa demanda. La invitación a los profesionales y los

investigadores es sencilla: elijan dos KBQ que sean importantes, construyan el gemelo mínimo que pueda ponerlas a prueba, firmen la carta de medición con las finanzas y ejecuten un contrato basado en resultados. El resto es repetición y aprendizaje. Así es como los programas piloto se convierten en programas, y cómo los programas se convierten en carteras que maximizan el excedente, que los residentes pueden sentir y que las tesorerías pueden defender.

8. Agradecimientos

Este documento ha sido financiado por la Unión Europea a través de Citcom.AI [Acuerdo de subvención n.º 101100728], EDIC BestUSE [Acuerdo de subvención n.º 101225793], SENSE Citiverse [Acuerdo de subvención n.º 101167948] y LDT4SSCC [Acuerdo de subvención n.º 101226211]. Los autores son los únicos responsables de este artículo; la Unión Europea y sus organismos no se hacen responsables del uso que pueda hacerse de la información aquí contenida.

Referencias

- Abid, A., Haddar, M., Zediri, H., Jamoussi, S., & Kacem, A. H. (2022). Toward mapping an NGSI-LD context model on RDF graph approaches: A comparison study. *Sensors*, 22(13), 4798. <https://doi.org/10.3390/s22134798>
- Artyushina, A. (2020). Is civic data governance the key to democratic smart cities? The role of the urban data trust in Sidewalk Toronto. *Telematics and Informatics*, 55, 101456. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2020.101456>
- Bayat, A., & Kawalek, P. (2023). Digitization and urban governance: The city as a reflection of its data infrastructure. *International Review of Administrative Sciences*, 89(1). <https://doi.org/10.1177/00208523211033205>.
- Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2018). *Cost-benefit analysis: Concepts and practice* (5.^a ed.). Cambridge University Press.
- Bommasani, R., Hudson, D. A., Adeli, E., Altman, R., Arora, S., von Arx, S., Bernstein, M. S., Bohg, J., Bosselut, A., Brundkii, E., Brynjolfsson, E., Buch, S., Card, D., Castellon, R., Chatterji, N., Chen, A., Creel, K., Durmus, E., (...) Liang, P. (2021). On the opportunities and risks of foundation models. *Stanford HAI/CRFM Working Paper*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.07258>
- Bozkurt, Y., Rossmann, A., Pervez, Z., & Ramzan, N. (2025). Development and evaluation of an urban data governance reference model based on design science research. *Government Information Quarterly*, 42(2), 102025. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2025.102025>
- Bellini, P., Palesi, L. A. I., Giovannoni, A., & Nesi, P. (2023). Managing complexity of data models and performance in broker-based Internet/Web of Things architectures. *Internet of Things*, 23, 100834. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100834>
- Birkin, M., Ballantyne, P., Bullock, S., Heppenstall, A., Kwon, H., Malleson, N., Yao, J., & Zanchetta, A. (2025). Digital twins and AI for healthy and sustainable cities. *Computers, Environment and Urban Systems*, 120, 102305. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2025.102305>
- CitCom.ai TEF. (n.d.). *About CitCom.ai and activities*. <https://citcomtef.eu/>
- City of Bellevue. (2018). *Eyes on Traffic (SCATS before/after studies)* [diapositivas]. https://bellevuewa.gov/sites/default/files/media/pdf_document/Eyes%20on%20Traffic.pdf
- City of Los Angeles Bureau of Street Lighting. (n.d.). *LED street lighting: Energy savings and maintenance*. <https://bsl.lacity.org/led.html>
- Data Spaces Support Centre. (2023–2024). *Data spaces blueprint and building blocks*. <https://dssc.eu/>
- data.europa.eu. (2023, 24 noviembre). *LORDIMAS: A digital maturity assessment tool for regions and cities*. <https://data.europa.eu/en/news-events/news/lordimas-digital-maturity-assessment-tool-regions-and-cities>
- ESPN & European Committee of the Regions. (2024, 19 diciembre). *Digital maturity of local and regional governments, 2024: LORDIMAS—Final report*. <https://errin.eu/system/files/2025-02/LORDIMAS%20Report%20Digital%20maturity%20of%20local%20and%20regional%20governments%202024.pdf>
- ESPN & Partners. (2024). *Digital maturity of local and regional governments—LORDIMAS report*. <https://www.espon.eu/>
- ETSI. (2021). *ETSI GS CIM 009 V1.5.1: NGSI-LD API*. <https://www.etsi.org/>
- ETSI. (2022). *ETSI GS CIM 019 V1.1.1: Embedding W3C Data Integrity digital signatures into NGSI-LD entities* [PDF]. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/63595/423f0e6b0c2f4f12b6f5071727366f50/E-TSI-GS-CIM-019-V1-1-1-2022-08-.pdf>
- ETSI. (2024). *ETSI GS CIM 009 V1.8.1: Context Information Management (CIM); NGSI-LD API* https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/CIM/001_099/009/01.08.01_60/gs_cim009v0108_01p.pdf

- European Commission. (2025, 16 julio). *EU Local Digital Twin (LDT) Toolbox*. Interoperable Europe Portal. <https://interoperable-europe.ec.europa.eu/collection/ldttoolbox>
- European Commission. (2025, 22 julio). *European Digital Infrastructure Consortium (EDIC)*. Shaping Europe's Digital Future. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/edic>
- European Commission. (n.d.). *Common European data spaces*. Shaping Europe's Digital Future. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/>
- European Commission — DG CNECT. (n.d.). *Testing and Experimentation Facilities (TEFs) for AI*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/>
- FIWARE Foundation. (2024). *Smart Data Models initiative*. <https://www.fiware.org/smart-data-models/>
- Gray, D., & Shellshear, E. (2024). *Why data science projects fail: The harsh realities of implementing AI and analytics without the hype*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781032661360>
- Gu, Y., Quintana, M., Liang, X., Ito, K., Yap, W., & Biljecki, F. (2025). Designing effective image-based surveys for urban visual perception. *Landscape and Urban Planning*, 260, 105368. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2025.105368>
- Interoperable Europe. (2024, 9 abril). *Assessing smart cities and communities' digital maturity (LORDIMAS)*. <https://interoperable-europe.ec.europa.eu/collection/iopeu-monitoring/news/assessing-smart-cities-and-communities-digital-maturity>
- Jara, A. J., Genoud, D., & Bocchi, Y. (2014). Big data for smart cities with KNIME: A real experience in the SmartSantander testbed. *Software: Practice and Experience*, 45(8), 1145–1160. <https://doi.org/10.1002/spe.2274> (ResearchGate)
- Jara, A. J., Bocchi, Y., Fernandez, D., Molina, G., & Gomez, A. (2017). An analysis of context-aware data models for smart cities: Towards FIWARE and ETSI CIM emerging data model. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W3*, 43–50. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W3-43-2017>
- Jeddoub, I., Nys, G.-A., Hajji, R., & Billen, R. (2023). Digital twins for cities: Analyzing the gap between concepts and current implementations with a specific focus on data integration. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122, 103440. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103440>
- Jeddoub, I., Nys, G.-A., Hajji, R., & Billen, R. (2024). Data integration across urban digital twin lifecycle: A comprehensive review of current initiatives. *Annals of GIS*. <https://doi.org/10.1080/19475683.2024.2416135>
- Lehtola, V. V., Koeva, M., Oude Elberink, S., Raposo, P., Virtanen, J.-P., Vahdatikhaki, F., & Borsci, S. (2022). Digital twin of a city: Review of technology serving city needs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, 102915. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102915>
- Lei, B., Liu, P., Milojevic-Dupont, N., & Biljecki, F. (2024). Predicting building characteristics at urban scale using graph neural networks and street-level context. *Computers, Environment and Urban Systems*, 111, 102129. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2024.102129>
- Liu, Y., Wang, Z., Ren, S., Chen, R., Shen, Y., & Biljecki, F. (2025). Physical urban change and its socio-environmental impact: Insights from street view imagery. *Computers, Environment and Urban Systems*, 119, 102284. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2025.102284>
- Libelium. (2023, 30 noviembre). *IRIS 360: AI cameras & platform for smart security & traffic*. <https://www.libelium.com/blog/iris-360-ai-cameras-platform-smart-security-traffic/>
- Living-in.EU. (2024–2025). *Minimal Interoperability Mechanisms (MIMs Plus)*. <https://living-in.eu/>
- Lnenicka, M., Nikiforova, A., Clarinval, A., Luterek, M., Rudmark, D., Neumaier, S., Kević, K., & Rodríguez Bolívar, M. P. (2024). Sustainable open data ecosystems in smart cities: A platform theory-based analysis of 19 European cities. *Cities*, 148, 104851. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104851>
- McKinsey & Company. (2024). *The state of AI in early 2024: Gen AI adoption spikes and starts to generate value*. <https://www.mckinsey.com/>

- Mazzetto, S. (2024). A review of urban digital twins integration, challenges, and future directions in smart city development. *Sustainability*, 16(19), 8337. <https://doi.org/10.3390/su16198337>
- OECD. (2024). *Artificial intelligence, data and competition* (Background note). <https://one.oecd.org/>
- Oldcastle Infrastructure. (2025, junio). *CivilSense™ AI leak detection—MidWest case study* [PDF]. <https://oldcastleinfrastructure.com/wp-content/uploads/2025/06/CivilSense-AI-Leak-Detection-MidWest-Case-Study.pdf>
- Ondiviela García, J. A., Blanco Álvarez, E., Hueso Tapia, A., & Cordero Batanzo, J. (2025). Creativity as a driver to resilience in cities: The more creative the more resilient. *SAUC—Journal of Street Art and Urban Creativity*, 11(5). <https://visualcomppublications.es/SAUC/index.php/SAUC/issue/view/32>
- Open & Agile Smart Cities (OASC). (2023). *European Local Digital Twin Toolbox project (September 2023 - September 2025)*. <https://oascities.org/european-local-digital-twin-toolbox-project/>
- Palantir Technologies. (2025). *AIP overview*. <https://palantir.com/docs/foundry/aip/overview/>
- Peng, Z.-R., Lu, K.-F., Liu, Y., & Zhai, W. (2023). The pathway of urban planning AI: From planning support to plan-making. *Journal of Planning Education and Research*. <https://doi.org/10.1177/0739456X231180568>.
- Routeware. (2022). *Success story—City of Virginia Beach: Fewer vehicles, lower labor costs, and enhanced safety through route optimization*. <https://routeware.com/>
- SCS Engineers. (2015, 9 junio). *Solid waste collection route optimization can save you money*. <https://www.scsengineers.com/solid-waste-collection-route-optimization-can-save-you-money/>
- Sanchez, T. W., Brenman, M., & Ye, X. (2024). The ethical concerns of artificial intelligence in urban planning. *Journal of the American Planning Association*, 91(2). <https://doi.org/10.1080/01944363.2024.2355305>.
- Shaharuddin, S., Abdul Maulud, K. N., Syed Abdul Rahman, S. A. F., & Che Ani, A. I. (2022). Digital twin for indoor disaster in smart city: A systematic review. *ISPRS Archives, XLVI-4/W3-2021*, 315–322. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W3-2021-315-2022>
- Stanford HAI. (2025). *AI Index Report 2025 (Key findings)*. <https://aiindex.stanford.edu/>
- Sun, Y., Song, H., Jara, A. J., & Bie, R. (2016). Internet of Things and big data analytics for smart and connected communities. *IEEE Access*, 4, 766–773. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2529723> (OUCI)
- Troyanos, K. (2020). Use data to answer your key business questions. *Harvard Business Review*. <https://hbr.org/2020/02/use-data-to-answer-your-key-business-questions>
- United for Smart Sustainable Cities (U4SSC). (2020–2024). *Key performance indicators for smart sustainable cities (Concept and reports)*. <https://u4ssc.itu.int/>
- Universidad Francisco de Vitoria. (2025, 7 abril). *La Universidad Francisco de Vitoria presenta el Citizen-Centric Intelligent Cities Research Institute (CCICRI)*. <https://www.ufv.es/la-universidad-francisco-de-vitoria-presenta-el-citizen-centric-intelligent-cities-research-institute-noticias-actualidad/>
- Weil, C., Birbi, S., Longchamp, R., Golay, F., & Alahi, A. (2023). Urban digital twins: Challenges & perspectives for sustainable smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104862. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104862>
- World Health Organization. (2024). *Global air quality guidelines: Health risks and recommended thresholds*. <https://www.who.int/>
- Ye, X., Du, J., Han, Y., Newman, G., Retchless, D., Zou, L., Ham, Y., & Cai, Z. (2023). Developing human-centered urban digital twins for community infrastructure resilience: A research agenda. *Journal of Planning Literature*, 38(2), 187–199. <https://doi.org/10.1177/08854122221137861>

Zhang, F., Salazar-Miranda, A., Duarte, F., Vale, L., Hack, G., Chen, M., Liu, Y., Batty, M., & Ratti, C. (2024). Urban visual intelligence: Studying cities with artificial intelligence and street-level imagery. *Annals of the American Association of Geographers, 114*(5). <https://doi.org/10.1080/24694452.2024.2313515>