



Universidad Internacional de La Rioja
Facultad de Derecho

Máster Universitario en Derecho Digital

RECYTRACE: Diseño jurídico-tecnológico de un sistema inteligente de trazabilidad para la gestión de residuos

Trabajo fin de estudio presentado por:	José Ángel Fernández Benito
Tipo de trabajo:	Investigación jurídica con aplicación práctica
Utilizar si se necesita alguna tipología más:	Diseño práctico y normativo
Director/a:	Koldo Díaz Bizkarguenaga
Fecha:	18/07/2025

Resumen

Este Trabajo de Fin de Máster examina la viabilidad jurídica y funcional de RECYTRACE, una solución tecnológica avanzada diseñada para mejorar la gestión de residuos en entornos municipales. El sistema integra inteligencia artificial, sensorización mediante RFID y un modelo escalable tipo SaaS, con el objetivo de generar trazabilidad digital, incentivar comportamientos ecológicos y reforzar el control público sobre los servicios externalizados. A través de una metodología jurídico-tecnológica, se analizan las obligaciones normativas en materia de protección de datos, inteligencia artificial y sostenibilidad ambiental, con especial atención al RGPD, al Reglamento (UE) 2024/1689 sobre inteligencia artificial, al Reglamento (UE) 2023/2854 (Data Act) sobre el acceso justo e interoperabilidad de datos IoT, y a la Ley 7/2022. Se concluye que RECYTRACE representa una solución innovadora, jurídicamente sólida y adaptada a las capacidades de los municipios con recursos limitados.

Palabras clave: inteligencia artificial, derecho digital, trazabilidad, gobernanza algorítmica, economía circular

Abstract

This Master's Thesis examines the legal and functional feasibility of RECYTRACE, an advanced technological solution designed to enhance waste management in municipal environments. The system integrates artificial intelligence, RFID-based sensing, and a scalable SaaS model aimed at achieving digital traceability, promoting environmentally responsible behaviors, and strengthening public oversight of outsourced services. Through a legal-technological methodology, the research analyzes regulatory obligations concerning data protection, artificial intelligence, and environmental sustainability, with particular attention to the GDPR, the Artificial Intelligence Regulation (EU) 2024/1689, Regulation (EU) 2023/2854 (Data Act) on fair access and interoperability of IoT data, and Spanish Law 7/2022. The study concludes that RECYTRACE represents an innovative and legally sound solution tailored to the operational capacities of resource-constrained municipalities.

Keywords: artificial intelligence, digital law, traceability, algorithmic governance, circular economy

Índice de contenidos

1.	Introducción	7
1.1.	Justificación del tema elegido	8
1.2.	Problema y finalidad del trabajo	10
1.3.	Objetivos.....	11
1.4.	Metodología empleada	13
1.5.	Estructura del trabajo.....	13
1.6.	Hipótesis de trabajo y enfoque personal	14
2.	Marco legal general.....	16
2.1.	Reglamento General de Protección de Datos (RGPD).....	16
2.2.	Reglamento (UE) 2024/1689 del Parlamento Europeo y del Consejo (AI Act)	18
2.3.	El Reglamento (UE) 2023/2854 (Data Act) y el acceso a datos del IoT	20
2.4.	Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público (LCSP).....	21
2.5.	Ley 37/2007 sobre reutilización de la información del sector público	23
3.	Marco jurídico aplicado a la solución RECYTRACE	25
3.1.	Privacidad desde el diseño y cumplimiento del RGPD	25
3.2.	Evaluación jurídica de RECYTRACE conforme al Reglamento (UE) 2024/1689.....	26
3.3.	Régimen jurídico para la reutilización y comercialización de datos anonimizados .	28
3.4.	Contratación pública tecnológica	29
3.5.	Utilidad estratégica en el cumplimiento de la Ley 7/2022, la normativa europea sobre residuos y su escalabilidad internacional	31
4.	Marco teórico y desarrollo.....	34
4.1.	Inteligencia artificial aplicada a entornos urbanos	34
4.2.	Modelos de sensorización y trazabilidad: RFID e IoT	35
4.3.	Algoritmos inteligentes e incentivos digitales.....	38

4.4.	Smart Cities y sostenibilidad: contexto europeo y Agenda 2030	40
4.5.	El dato como activo estratégico: implicaciones y aprovechamiento	43
5.	Propuesta conceptual del sistema RECYTRACE	46
5.1.	Descripción general del sistema	46
5.2.	Diseño funcional: inteligencia artificial, trazabilidad e interoperabilidad Saas	48
5.3.	Trazabilidad inteligente del residuo urbano	49
5.4.	Módulo de incentivos ecologicos: diseño y funcionalidad.....	50
5.5.	Escalabilidad, eficiencia operativa y economía circular	52
5.6.	Valor ESG y potencial para atracción de inversión público-privada	53
6.	Conclusiones.....	55
	Referencias bibliográficas.....	58
	Listado de abreviaturas	70

Índice de figuras

Figura 1. Arquitectura técnica modular del sistema RECYTRACE. Esquema funcional del sistema, organizado en cuatro capas: captura de datos, almacenamiento seguro, procesamiento algorítmico y gobernanza del dato. Cada capa incorpora mecanismos tecnológicos y garantías jurídicas orientadas al cumplimiento normativo, la interoperabilidad y la escalabilidad institucional del sistema como solución SaaS. Fuente: Elaboración propia.

.....47

1. Introducción

Este Trabajo Fin de Máster se enmarca en el campo del Derecho Digital con una orientación aplicada a la transformación de la gestión pública local mediante tecnologías emergentes. A partir del caso específico de los residuos urbanos, plantea una aproximación jurídico-tecnológica a un problema real y urgente: cómo asegurar que la introducción de inteligencia artificial y sensorización en los servicios municipales respete los principios de legalidad, transparencia y control democrático. Frente al enfoque meramente instrumental de la innovación, el presente trabajo reivindica la necesidad de diseñar soluciones legítimas desde su origen, integrando tanto los requisitos del marco normativo europeo como los desafíos operativos del ámbito local. Esta propuesta cristaliza en el sistema RECYTRACE, un modelo inteligente de trazabilidad concebido para mejorar la eficiencia ambiental y garantizar la sostenibilidad jurídica en contextos de alta exigencia normativa.

Esta problemática se inserta en un escenario especialmente complejo para las entidades locales, marcado por una doble presión: por un lado, la creciente exigencia de eficiencia técnica y sostenibilidad ambiental; por otro, la necesidad de reforzar la legitimidad democrática, la responsabilidad institucional y la protección de los derechos fundamentales (Consejo de Europa, 2024).

El trabajo parte de la convicción de que la incorporación de tecnologías como la inteligencia artificial o la sensorización debe ir acompañada de garantías jurídicas sólidas, principios de gobernanza algorítmica y mecanismos que refuercen la transparencia y el control público. Lejos de limitarse a una visión instrumental de la tecnología, se propone un enfoque integral que articula el diseño funcional de un sistema inteligente de trazabilidad con su validación jurídica en términos de protección de datos, cumplimiento normativo y sostenibilidad operativa. En el ámbito de los servicios públicos de alto impacto, como es el caso de la gestión municipal de residuos, Veale et al. (2018) subrayan la importancia de integrar desde la fase de diseño principios sustantivos como la justicia, la responsabilidad institucional y la adecuación normativa. Solo así es posible garantizar que las tecnologías aplicadas no comprometan los estándares democráticos ni generen efectos no deseados en contextos donde los márgenes de error deben minimizarse al máximo.

Este primer capítulo introduce los fundamentos generales del trabajo, contextualizando la elección del tema, los desafíos que se abordan y los objetivos planteados. También se exponen la metodología adoptada y el enfoque personal que guía la investigación. Finalmente, se ofrece una visión global de la estructura del documento, concebida para articular de manera lógica y progresiva tanto el análisis jurídico como la propuesta de diseño del sistema RECYTRACE.

1.1. Justificación del tema elegido

En el contexto actual de transición ecológica y presión regulatoria creciente, la gestión de residuos urbanos ha pasado de ser un asunto meramente operativo para convertirse en un eje estratégico de la acción municipal. Lejos de tratarse de un reto técnico aislado, su complejidad radica en la necesidad de integrar sostenibilidad ambiental, eficiencia en el servicio y digitalización institucional en entornos muchas veces marcados por la escasez de recursos y la fragmentación competencial. Como señalan la Agencia Europea de Medio Ambiente (2020) y el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020), este ámbito exige una transformación profunda del modelo de gobernanza, en la que la tecnología debe actuar como catalizador, pero siempre bajo principios de legalidad, transparencia y equidad interterritorial. Lejos de constituir una mera cuestión logística, la recogida y tratamiento de residuos representa hoy un nodo estratégico de innovación pública, capaz de articular vectores como la participación ciudadana, la transparencia contractual y la reutilización de datos como activo público (Unión Europea, 2022).

Esta evolución se enmarca en el contexto normativo y programático de la Agenda 2030, el Pacto Verde Europeo, la Estrategia Española de Economía Circular 2030 y la Directiva (UE) 2018/851, todos ellos orientados a promover modelos de gestión más sostenibles, medibles y basados en el conocimiento. En este sentido, la incorporación de tecnologías como la inteligencia artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT) o la identificación por radiofrecuencia (RFID) no solo permite optimizar procesos operativos, sino también generar nuevas formas de valor público a partir de datos estructurados, anonimizables y legalmente reutilizables. Asimismo, la iniciativa europea de Pasaportes Digitales de Producto (Digital Product Passports), prevista en el marco del futuro Reglamento sobre Ecodiseño de productos

sostenibles, constituye un antecedente relevante y complementario al sistema propuesto. En el marco del futuro Reglamento sobre Ecodiseño de productos sostenibles, la Comisión Europea ha propuesto la implantación progresiva de los llamados Pasaportes Digitales de Producto (Digital Product Passports), que obligarán a sectores como las baterías, los textiles o los dispositivos electrónicos a incluir información estructurada sobre su composición, trazabilidad y capacidad de reciclaje desde 2024 hasta 2026. Esta propuesta, aún en fase de tramitación, ha sido analizada por Illán García et al. (2024) como un sistema basado en credenciales verificables e identificadores descentralizados, orientado a mejorar la interoperabilidad, la transparencia informativa y la circularidad material en toda la cadena de valor. Aunque todavía pendiente de aprobación definitiva, esta iniciativa comparte objetivos estratégicos con RECYTRACE, al fomentar la economía circular, mejorar la transparencia informativa y optimizar la gestión sostenible de residuos mediante soluciones tecnológicas innovadoras.

No obstante, el despliegue de este tipo de soluciones plantea importantes desafíos desde la perspectiva jurídica. Tal como han advertido Veale y Brass (2019), el uso de algoritmos en la administración pública requiere una adaptación estructural del control institucional, más allá de la simple adopción tecnológica. A ello se suma el desfase existente entre el avance técnico de las plataformas disponibles y su adaptación plena al marco normativo europeo vigente, especialmente al Reglamento (UE) 2024/1689 por el que se establece un marco jurídico armonizado en materia de inteligencia artificial. Esta brecha normativa, en lugar de representar una limitación, constituye una oportunidad para diseñar soluciones digitales jurídicamente sostenibles desde su concepción, como sugiere Floridi (2019) al reivindicar la necesidad de construir entornos digitales justos a través de reglas bien fundadas.

Este reto adquiere especial relevancia en el ámbito local, donde muchas entidades, especialmente las de menor tamaño, enfrentan limitaciones presupuestarias, dependencia tecnológica del sector privado y dificultades para ejercer un control efectivo sobre los servicios concesionados. Según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), una parte significativa de los municipios carece de medios técnicos adecuados para auditar de forma efectiva la prestación del servicio, una situación que se agrava ante el aumento de exigencias normativas derivadas de la Ley 7/2022, de residuos y suelos contaminados para una economía circular.

Este contexto convierte a la gestión inteligente de residuos en una oportunidad privilegiada para desarrollar soluciones interoperables, auditables y escalables, especialmente si se conceptualizan bajo un modelo de software como servicio (SaaS) orientado al sector público. Desde esta perspectiva, RECYTRACE se configura como un sistema que plantea una arquitectura funcional basada en IA y sensorización, con capacidad para generar trazabilidad automatizada, incentivar comportamientos sostenibles y facilitar el control público sobre la gestión del residuo, contribuyendo así a una transición ecológica justa, jurídicamente segura y socialmente útil.

1.2. Problema y finalidad del trabajo

A pesar del marco jurídico y programático impulsado por la Unión Europea, la implementación de tecnologías inteligentes en la gestión de residuos sigue siendo escasa y desigual. Muchas administraciones locales operan con sistemas manuales, sin trazabilidad ni indicadores verificables, lo que dificulta la adopción de decisiones basadas en datos y debilita el control público sobre los servicios externalizados.

Además, las alternativas tecnológicas actualmente disponibles en el mercado, por lo general, se encuentran en proceso de adaptación para cumplir con el Reglamento Europeo de Inteligencia Artificial (Unión Europea, 2024). A menudo, también carecen de módulos específicos para fomentar la participación ciudadana mediante incentivos, y de estructuras que permitan reutilizar los datos generados con plenas garantías conforme al RGPD. Como subraya Wachter (2017), la ausencia de criterios normativos robustos en la aplicación de tecnologías de identificación automatizada puede derivar en prácticas discriminatorias o sesgos estructurales. A estos déficits se suma una preocupación jurídica de fondo: la necesidad de garantizar que las decisiones automatizadas sobre recogida, incentivos y fiscalización no generen efectos discriminatorios, sesgos algorítmicos o vacíos de responsabilidad legal.

Por tanto, el diseño de sistemas como RECYTRACE debe anticipar y mitigar estos riesgos, integrando principios como la privacidad desde el diseño, la transparencia algorítmica, la auditabilidad técnica y la supervisión humana significativa. Este trabajo se propone revertir dicha situación mediante el diseño de una propuesta integral, jurídicamente viable y técnicamente fundamentada, que permita a las entidades locales avanzar hacia un modelo de

gestión eficiente, participativo, trazable y legalmente robusto, en línea con los principios de transparencia, interoperabilidad y protección de derechos digitales.

El contexto normativo del proyecto se refuerza con la entrada en vigor del Reglamento (UE) 2023/2854 sobre el acceso justo e interoperabilidad de datos (Data Act), especialmente relevante dada la utilización intensiva de tecnologías IoT y RFID propuesta en RECYTRACE. Este nuevo marco normativo europeo regula de forma específica la transparencia, interoperabilidad y condiciones para el acceso y la reutilización ética de los datos generados por dispositivos conectados, facilitando así su aprovechamiento comercial y estratégico. Dichas previsiones resultan esenciales para asegurar la sostenibilidad económica y social del sistema RECYTRACE.

En coherencia con lo anterior, el proyecto también toma como referencia el Reglamento (UE) 2024/1689 sobre inteligencia artificial, aplicable a los sistemas considerados de alto riesgo desplegados en la Unión Europea. La propuesta RECYTRACE se formula atendiendo especialmente a las obligaciones derivadas de dicho reglamento en materia de gobernanza algorítmica, transparencia, documentación técnica y supervisión humana significativa.

Tal como advierte el United Nations E-Government Survey 2022, la brecha digital no solo persiste entre Estados, sino también entre niveles territoriales dentro de cada país. A pesar del avance general en políticas de digitalización, muchas ciudades y municipios siguen sin capacidades técnicas ni presupuestarias para desplegar sistemas eficaces de gobierno digital, lo que perpetúa la desigualdad en el acceso a servicios y en la trazabilidad de estos (United Nations, 2022). Esta constatación refuerza la finalidad del presente trabajo: diseñar un modelo inteligente, jurídico y viable para municipios de tamaño medio y pequeño, con capacidades limitadas, pero con una urgencia creciente por adoptar soluciones que aseguren eficiencia, legalidad, sostenibilidad e inclusión.

1.3. Objetivos

El objetivo general de esta investigación es diseñar y fundamentar jurídicamente un sistema inteligente para la gestión de residuos urbanos, que combine IA, sensorización avanzada y trazabilidad digital bajo un enfoque de cumplimiento normativo y utilidad pública, en

coherencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 12 y 16, relativos respectivamente al consumo responsable y a la gobernanza institucional transparente.

¿Cómo hacemos que sea jurídicamente viable y operativamente eficaz implementar un sistema inteligente de gestión de residuos urbanos, basado en trazabilidad digital e incentivos automatizados, que cumpla con el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD), el Reglamento (UE) 2024/1689 y la normativa sectorial española, y que sea aplicable a realidades municipales diversas?

Objetivos específicos:

1. Caracterizar el estado del arte de las tecnologías emergentes aplicables al ciclo de vida del residuo urbano (como RFID, IA e IoT), con el fin de establecer una base técnica sólida que justifique su uso en el contexto municipal actual.
2. Estructurar una arquitectura funcional orientada a la recogida y trazabilidad del residuo, bajo un modelo modular tipo SaaS, adaptado a las necesidades reales de las administraciones locales y alineado con los principios de eficiencia operativa y control público.
3. Contrastar la compatibilidad jurídica del sistema con el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) y el Reglamento (UE) 2024/1689, incorporando desde el diseño principios como la minimización del dato, la supervisión humana significativa y la privacidad desde el diseño.
4. Explorar el potencial estratégico de los datos anonimizados generados por el sistema, como herramienta de fiscalización ambiental, optimización de servicios y elaboración de políticas públicas basadas en evidencia, en línea con los objetivos ESG.
5. Diseñar mecanismos de gobernanza algorítmica e incentivos digitales orientados a fomentar prácticas sostenibles y promover la corresponsabilidad ciudadana, desde una lógica de sostenibilidad, equidad y economía conductual, garantizando su viabilidad jurídica y su alineación con el interés general.

En conjunto, estos objetivos configuran una hoja de ruta integral que articula el diseño conceptual del modelo propuesto con su validación jurídica, en línea con los principios de sostenibilidad normativa, eficiencia institucional y aprovechamiento ético del dato. La solución diseñada no solo responde a los desafíos operativos y jurídicos de la gestión de residuos en el ámbito local, sino que también propone un enfoque replicable de innovación

cívico-tecnológica orientado al interés general. De este modo, el modelo propuesto aspira a fortalecer la capacidad transformadora de los municipios mediante una arquitectura funcional trazable, participativa y jurídicamente sólida, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y las directrices estratégicas de la Unión Europea.

La propuesta se fundamenta, por tanto, en una intersección crítica entre Derecho digital, tecnología cívica y políticas locales, con vocación replicable y modular. Se adopta una aproximación aplicada y transversal, derivada de la trayectoria profesional del autor en el ámbito público y tecnológico, con especial atención a la sostenibilidad urbana, la eficiencia de los servicios municipales y la digitalización legalmente segura de los mismos.

1.4. Metodología empleada

El enfoque adoptado en este trabajo es multidisciplinar, aplicado y propositivo, combinando el análisis jurídico con el diseño conceptual de soluciones tecnológicas en el marco de la innovación pública. La metodología empleada se articula en cinco niveles complementarios, que permiten abordar el objeto de estudio desde una perspectiva integral:

1. Revisión sistemática de legislación, doctrina y jurisprudencia relevantes en materia de protección de datos, gobernanza algorítmica, inteligencia artificial, sensorización y normativa sectorial sobre residuos, tanto en el ámbito europeo como nacional y local.
2. Exploración y mapeo de tecnologías habilitadoras (principalmente RFID, IA e IoT), analizando su aplicabilidad real a la gestión de residuos urbanos mediante el estudio de casos comparados, documentación técnica, literatura científica y experiencias de innovación en el sector público y privado.

1.5. Estructura del trabajo

El presente Trabajo Fin de Máster se organiza en seis capítulos principales, además de esta introducción, las conclusiones, la bibliografía y los anexos. La estructura ha sido diseñada para seguir una progresión lógica que articula el planteamiento del problema, el marco jurídico y técnico, y la propuesta conceptual de solución.

El capítulo 1 introduce el objeto de estudio, justifica su relevancia, define los objetivos, describe la metodología empleada, plantea la hipótesis de trabajo y expone el enfoque personal que guía la investigación.

El capítulo 2 establece el marco legal general aplicable al sistema RECYTRACE. Se analizan en detalle las principales normas europeas y nacionales en materia de protección de datos, inteligencia artificial, acceso a datos del IoT, contratación pública y reutilización de la información del sector público.

El capítulo 3 aplica dicho marco jurídico al diseño del sistema, evaluando su compatibilidad normativa, su viabilidad operativa en procesos de contratación y su adecuación a los principios de privacidad, transparencia y reutilización ética de los datos.

El capítulo 4 desarrolla el marco teórico y conceptual del modelo RECYTRACE. Se abordan conceptos clave como inteligencia artificial, sensorización mediante RFID, algoritmos de incentivo, ciudades inteligentes y el valor del dato como activo estratégico.

El capítulo 5 presenta la propuesta funcional del sistema. Se describe su arquitectura técnica, sus módulos operativos y su alineación con criterios ESG y con el marco normativo vigente. También se analizan su escalabilidad, replicabilidad y utilidad institucional.

El capítulo 6 recoge las conclusiones del trabajo, estructuradas en apartados numerados y orientadas a responder a la hipótesis inicial y a valorar el impacto del modelo desde una perspectiva jurídica, operativa y estratégica.

La estructura se completa con la bibliografía utilizada, el listado de abreviaturas y los anexos que contienen materiales técnicos y normativos complementarios.

1.6. Hipótesis de trabajo y enfoque personal

El presente trabajo parte de una pregunta central de investigación: ¿Es posible diseñar e implantar en municipios con recursos limitados un sistema de trazabilidad inteligente de residuos que sea jurídicamente conforme con el RGPD, el AI Act y el Data Act, y que además incentive comportamientos sostenibles?

A partir de esta cuestión se formula la siguiente hipótesis general:

Hipótesis principal. Es posible diseñar una solución tecnológica jurídicamente conforme que, mediante el uso combinado de RFID, inteligencia artificial e incentivos digitales, permita a los municipios con capacidades limitadas cumplir las exigencias normativas en materia de trazabilidad de residuos, protección de datos e inteligencia artificial.

Esta hipótesis plantea un doble reto: por un lado, comprobar la compatibilidad jurídica de un sistema basado en tecnologías sensibles; por otro, analizar si dicho modelo puede adaptarse operativamente a contextos locales con restricciones técnicas, económicas y organizativas. Su validación implica tanto el examen normativo del marco europeo y español como la articulación de un diseño funcional realista y replicable.

Desde el punto de vista metodológico, la hipótesis se contrasta mediante una estrategia argumental que combina revisión normativa, análisis de casos comparados, fuentes doctrinales y diseño conceptual. En este proceso se contemplan tanto riesgos como oportunidades asociadas al despliegue de sistemas inteligentes en entornos municipales, atendiendo a principios como la privacidad desde el diseño, la gobernanza algorítmica y la reutilización ética del dato.

El enfoque personal adoptado se sustenta en la experiencia profesional del autor en la gestión pública local, donde ha podido observar las limitaciones estructurales que enfrentan muchos municipios para implementar soluciones tecnológicas sostenibles, auditables y legalmente seguras. Esta vivencia, junto con una sólida formación en derecho digital, compliance y políticas públicas, orienta el trabajo hacia un modelo que no es puramente teórico, sino concebido para resolver problemas reales con herramientas jurídicas y tecnológicas alineadas con los valores europeos. RECYTRACE surge así como una propuesta con vocación aplicada, modular y transformadora, orientada a reforzar la capacidad institucional de los municipios y promover una digitalización ética, eficiente e inclusiva.

2. Marco legal general

El presente capítulo desarrolla el marco normativo que sustenta jurídicamente el modelo RECYTRACE, abordando de forma sistemática los principales instrumentos europeos y nacionales que inciden en su diseño e implementación. Desde la protección de datos personales hasta la regulación de la inteligencia artificial, pasando por la reutilización de la información del sector público y las exigencias de la contratación pública, se analiza cómo cada uno de estos ámbitos normativos condiciona y orienta la viabilidad legal del sistema propuesto.

2.1. Reglamento General de Protección de Datos (RGPD)

La protección de datos personales y el principio de privacidad desde el diseño (Privacy by Design) son obligaciones jurídicas fundamentales dentro del marco normativo europeo vigente. Este deber adquiere especial relevancia tras la entrada en vigor del Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) y la Ley Orgánica 3/2018, sobre Protección de Datos Personales y Garantía de los Derechos Digitales (LOPDGDD). Ambas normativas imponen que desde la concepción de cualquier desarrollo tecnológico se integren medidas efectivas destinadas a preservar la privacidad de las personas, aspecto crucial en proyectos como el sistema inteligente de trazabilidad de residuos RECYTRACE.

El Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) impone, a través de su artículo 25, la obligación de integrar la protección de datos desde el diseño y por defecto en cualquier sistema o proceso que implique tratamiento de datos personales. Este enfoque proactivo exige adoptar medidas técnicas y organizativas que garanticen, entre otros principios (art. 5 RGPD), la minimización, exactitud, confidencialidad e integridad de los datos tratados. En el contexto de RECYTRACE, esto se traduce en la aplicación de mecanismos como la anonimización robusta, el control de accesos por roles funcionales, un sistema de consentimiento informado y adaptable, así como la realización de evaluaciones de impacto cuando se prevean tratamientos de datos a gran escala (art. 35 RGPD).

En el contexto español, la Ley Orgánica 3/2018 refuerza estos mandatos, especialmente en lo que respecta a las garantías adicionales exigibles al sector público. La norma exige que las Administraciones Públicas aseguren el consentimiento expreso del ciudadano en los tratamientos no amparados en una obligación legal, al tiempo que impone mayores exigencias en cuanto a la trazabilidad de las decisiones automatizadas. En consecuencia, modelos como RECYTRACE deben articular procesos exhaustivos de evaluación jurídica, técnica y organizativa sobre el impacto del tratamiento de datos personales, incluyendo perfiles conductuales derivados de la interacción con sistemas de incentivos, tecnologías RFID o interfaces móviles.

Desde el ámbito doctrinal, Daoudagh et al. (2021) resaltan la necesidad de implementar mecanismos sólidos de consentimiento y gestión del acceso a los datos para garantizar una efectiva protección en las ciudades inteligentes. Estos autores subrayan que proyectos como RECYTRACE deben contar con modalidades avanzadas de consentimiento granular, permitiendo así que los ciudadanos ejerzan un control real sobre sus datos personales conforme al RGPD. Siguiendo esta línea argumental, el modelo RECYTRACE integrará procedimientos de consentimiento dinámico que se ajustarán periódicamente, acorde con la evolución tecnológica y social del proyecto.

No obstante, la implementación efectiva del RGPD plantea desafíos prácticos significativos. En opinión de Wernick, Banzuzi y Mörelius-Wulff (2023), numerosos desarrolladores en proyectos urbanos se enfrentan con obstáculos derivados de la rigidez normativa europea, lo que genera tensiones entre las exigencias legales y la funcionalidad tecnológica. Por tanto, es imprescindible que RECYTRACE adopte desde su diseño inicial una gobernanza algorítmica clara y transparente, que contemple anticipadamente estos conflictos normativos y establezca mecanismos específicos para resolverlos, manteniendo el respeto a la privacidad como un principio innegociable.

Adicionalmente, Joyce y Javidroozi (2024) destacan la importancia de alcanzar un equilibrio efectivo entre las políticas municipales de datos abiertos y las obligaciones estrictas del RGPD en materia de privacidad. En consecuencia, el proyecto RECYTRACE deberá distinguir claramente entre aquellos datos susceptibles de una eficaz anonimización y reutilización en modelos abiertos, y aquellos otros que, debido a su sensibilidad, requieren restricciones específicas para su tratamiento. Esta diferenciación resulta esencial para garantizar el cumplimiento normativo y fortalecer la confianza pública en el sistema.

2.2. Reglamento (UE) 2024/1689 del Parlamento Europeo y del Consejo (AI Act)

Como destacan Veale y Brass (2019), la gobernanza algorítmica y la transparencia en la toma de decisiones automatizadas resultan fundamentales para garantizar tanto la legitimidad institucional como la eficacia operativa en el sector público. Esta reflexión resulta especialmente pertinente en contextos municipales donde la implementación de soluciones basadas en inteligencia artificial, como el modelo RECYTRACE, debe acompañarse de garantías normativas y mecanismos de supervisión adecuados que fomenten la aceptación ciudadana y el control democrático del sistema.

La reciente entrada en vigor del Reglamento (UE) 2024/1689, conocido como Ley de Inteligencia Artificial o AI Act, supone un avance significativo en la consolidación de un marco regulatorio uniforme en el ámbito europeo. Este régimen jurídico persigue un equilibrio entre la promoción de la innovación tecnológica y la protección de los derechos fundamentales, estableciendo una clasificación jerárquica del riesgo asociado a cada sistema de inteligencia artificial.

El AI Act identifica cuatro niveles principales de riesgo: sistemas prohibidos, de alto riesgo, de riesgo limitado y de riesgo mínimo. En particular, los sistemas calificados como de alto riesgo están sometidos a una regulación intensiva, debido a su potencial para impactar negativamente en derechos fundamentales, libertades públicas o la seguridad ciudadana (Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea, 2024, art. 6). A este respecto, RECYTRACE, como sistema de trazabilidad inteligente aplicado a la gestión pública municipal y que maneja información ciudadana, encaja normativamente en dicha categoría.

Los artículos 8 a 15 del AI Act establecen los requisitos específicos que deben cumplir los sistemas de alto riesgo, entre los que se incluyen:

- La implementación de mecanismos eficaces para la gestión de riesgos derivados del uso de IA (art. 9 AI Act).
- La adopción de medidas que aseguren una gobernanza algorítmica adecuada, incluyendo transparencia funcional y supervisión humana efectiva (arts. 13 y 14 AI Act).

- La elaboración de documentación técnica detallada que garantice la trazabilidad, explicabilidad y verificabilidad de los algoritmos empleados (art. 11 AI Act).
- El cumplimiento de estándares elevados de calidad y seguridad a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema (art. 15 AI Act).

Asimismo, la aplicación del AI Act impone exigencias específicas a las administraciones públicas que implementen soluciones basadas en inteligencia artificial. Según Carlón Ruiz (2023), estas entidades deben asumir un papel activo en el control, auditoría y explicación de los sistemas utilizados, dado el nivel de responsabilidad que les atribuye el legislador europeo. En este contexto, se torna indispensable establecer canales de supervisión humana, realizar evaluaciones periódicas y promover una comunicación accesible y comprensible para la ciudadanía.

Desde una perspectiva doctrinal, Cotino y Simón (dirs., 2024) advierten sobre ciertas ambigüedades interpretativas en el AI Act, particularmente en relación con los criterios técnicos para clasificar un sistema como de alto riesgo. Esta falta de precisión puede generar inseguridad jurídica y dilemas entre la obligación de transparencia y la protección del secreto industrial, especialmente cuando participan proveedores privados en la solución tecnológica.

En efecto, el AI Act define obligaciones específicas relacionadas con la transparencia algorítmica y la supervisión humana. Concretamente, el artículo 13 del AI Act requiere que los sistemas de inteligencia artificial proporcionen información clara y detallada sobre la lógica que subyace en sus decisiones automatizadas. Por su parte, el artículo 14 insiste en la necesidad de implementar mecanismos efectivos de supervisión humana. Asimismo, el artículo 52 establece medidas concretas destinadas a asegurar que las interacciones entre ciudadanos y sistemas automatizados sean plenamente transparentes, sobre todo cuando involucran datos sensibles o afectan significativamente derechos fundamentales.

Desde la perspectiva doctrinal y técnica, diversas investigaciones destacan la importancia de adoptar soluciones tecnológicas específicas que refuercen la privacidad y promuevan la confianza ciudadana en el contexto de las Smart Cities. TrustArc (2023), por ejemplo, presenta diversas soluciones tecnológicas capaces de facilitar el cumplimiento normativo efectivo, a la vez que fortalecen la confianza pública mediante mecanismos específicos de gobernanza algorítmica. En línea con lo anterior, la experiencia internacional, como contempla el informe "AI Public Sector Washington" muestra la importancia de procesos permanentes de

evaluación y transparencia para optimizar la legitimidad institucional y mejorar la aceptación ciudadana de sistemas tecnológicos complejos (Nonnecke, Newman y Pierson, 2024).

2.3. El Reglamento (UE) 2023/2854 (Data Act) y el acceso a datos del IoT

El Reglamento (UE) 2023/2854, conocido comúnmente como Data Act, configura un marco jurídico crucial destinado a regular el acceso equitativo a los datos generados por dispositivos conectados (IoT). Este instrumento normativo busca promover la interoperabilidad, garantizar la transparencia en la transferencia de datos y asegurar una reutilización ética y responsable, estableciendo claramente derechos específicos para los usuarios y obligaciones definidas para los actores que participan en su tratamiento.

Este nuevo contexto legal implica una transformación significativa en la gestión del acceso a los datos por parte de las administraciones públicas y del sector privado. En particular, los artículos 3 y 4 proporcionan definiciones precisas y condiciones esenciales para facilitar el acceso a los datos generados mediante dispositivos conectados. De este modo, se enfatiza el derecho de los usuarios y de terceras partes autorizadas a acceder y reutilizar estos datos bajo criterios de equidad, no discriminación y proporcionalidad.

Asimismo, resulta destacable el artículo 6 del Data Act, que recalca la importancia crítica de asegurar la interoperabilidad técnica y jurídica entre diferentes plataformas y operadores. Ello favorece significativamente la transparencia pública y una reutilización más eficaz y segura de la información obtenida. Por su parte, el artículo 9 establece claramente las condiciones bajo las cuales dichos datos pueden reutilizarse, mientras que el artículo 11 especifica las obligaciones jurídicas asociadas a la transferencia y cesión de datos entre entidades públicas y privadas.

Desde una perspectiva doctrinal, el Data Act presenta desafíos normativos sustanciales en su interacción con el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD), debido particularmente a las exigencias relativas a la transparencia y a la transferencia obligatoria de datos a terceros. Esta tensión ha sido ampliamente explorada por Joyce y Javidroozi (2024), quienes analizan el delicado equilibrio que deben mantener las ciudades inteligentes entre la compartición masiva de datos generados por dispositivos IoT y las estrictas legislaciones de protección de datos aplicables.

Esta visión encuentra un correlato técnico interesante en el estudio de Patil y Gidde (2023) sobre la ciudad inteligente de Pune (India), donde se diseñó un sistema de gestión de residuos sólidos basado en tecnologías IoT y RFID con el objetivo de alcanzar una recogida puerta a puerta del 100%, mejorar la trazabilidad y optimizar la eficiencia operativa. Aunque este modelo fue desarrollado en un entorno normativo distinto al europeo, ofrece un precedente útil en términos de interoperabilidad técnica y gobernanza digital, especialmente aplicable a municipios con recursos limitados. La experiencia de Pune demuestra que la integración tecnológica puede potenciar la sostenibilidad urbana, siempre que se adapte de forma contextualizada a los marcos regulatorios vigentes.

Adicionalmente, la interacción del Data Act con el Reglamento (UE) 2024/1689 (AI Act) resulta clave en términos del nivel de protección requerido para el tratamiento automatizado de los datos personales generados por dispositivos IoT. Según ISACA (2024), sistemas inteligentes como RECYTRACE deben incorporar desde su fase inicial medidas específicas para cumplir estas exigencias jurídicas, garantizando así una adecuada protección de los derechos fundamentales de los ciudadanos y reforzando la confianza pública en estos sistemas.

2.4. Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público (LCSP)

La contratación pública de soluciones tecnológicas basadas en el modelo Software as a Service (SaaS) cuenta con una regulación específica destinada a asegurar principios fundamentales como eficiencia, transparencia e innovación tecnológica. Este marco legal resulta particularmente relevante para el modelo RECYTRACE, orientado a la gestión inteligente de residuos urbanos mediante tecnologías como RFID e inteligencia artificial (IA).

El marco normativo esencial lo aporta la Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público (LCSP). Concretamente, su artículo 145.2 destaca la relevancia de los criterios ambientales y de innovación tecnológica al evaluar las ofertas presentadas en procedimientos de contratación pública. Dichos criterios coinciden plenamente con el propósito de RECYTRACE, centrado en la promoción de la economía circular mediante una gestión eficiente de los residuos. En consecuencia, los municipios interesados en adoptar estas soluciones tecnológicas podrían integrar estos criterios en sus pliegos y procedimientos contractuales,

asegurando así que su gestión pública esté alineada con las prioridades estratégicas de sostenibilidad e innovación marcadas por la Unión Europea.

Adicionalmente, el Reglamento (UE) 2024/1689, conocido como AI Act, introduce requerimientos específicos aplicables a soluciones tecnológicas como RECYTRACE. Este reglamento define un marco riguroso en materia de gobernanza algorítmica y transparencia, impactando directamente sobre la contratación pública de soluciones SaaS. De manera específica, los artículos 9 y 11 del AI Act exigen que las tecnologías contratadas garanticen, desde su diseño inicial, mecanismos efectivos de transparencia y supervisión humana. Dichos aspectos resultan cruciales para RECYTRACE, dado su modelo operativo basado en la gestión automatizada de grandes volúmenes de datos personales relacionados con residuos urbanos.

Desde una perspectiva doctrinal y comparativa, diversos autores destacan las ventajas estratégicas y operativas del modelo SaaS aplicado al ámbito municipal. Lee y Jung (2018) ponen en valor la relevancia de la gobernanza comunitaria en la exitosa implantación de tecnologías RFID en municipios coreanos, subrayando especialmente la importancia de contar con mecanismos participativos y transparentes. Estas experiencias internacionales ofrecen aprendizajes útiles para los municipios europeos, enfatizando cómo un modelo participativo puede incrementar la legitimidad social y jurídica en la contratación tecnológica pública.

Por otro lado, Yap et al. (2018) aportan argumentos técnicos sólidos sobre las ventajas del modelo LEAN-RFID desplegado bajo la modalidad SaaS. Sus investigaciones evidencian una considerable reducción de costes operativos y una notable mejora en la eficiencia del proceso de identificación y gestión de residuos. Estas características fortalecen claramente la sostenibilidad económica y operativa de RECYTRACE en municipios con recursos presupuestarios ajustados.

Además, Ferguson (2023) complementa la perspectiva anterior, subrayando la importancia crítica del compliance desde el diseño inicial de soluciones tecnológicas contratadas públicamente. Según Ferguson, cualquier implementación de sistemas inteligentes como RECYTRACE debe contar con una estrategia integral de compliance que garantice el control exhaustivo y la supervisión constante en la protección de datos y la conformidad normativa. Por tanto, resulta indispensable que RECYTRACE integre mecanismos robustos de cumplimiento normativo, particularmente en contextos municipales donde se busca innovación sin sacrificar estándares éticos y jurídicos.

Finalmente, es necesario mencionar ciertas tensiones normativas inherentes a la contratación pública de soluciones SaaS. Concretamente, la coexistencia de objetivos económicos, ambientales y regulatorios puede conducir a conflictos interpretativos o ambigüedades jurídicas, especialmente en áreas como la responsabilidad derivada del tratamiento de datos personales o la interoperabilidad tecnológica. Por consiguiente, resulta fundamental que los municipios que adopten RECYTRACE sean particularmente cuidadosos al redactar cláusulas contractuales específicas relacionadas con propiedad intelectual, gestión de datos personales y garantías de interoperabilidad.

2.5. Ley 37/2007 sobre reutilización de la información del sector público

La reutilización y comercialización de datos anonimizados en sistemas inteligentes, requiere un análisis profundo desde la perspectiva jurídica y ética. Esta práctica debe fundamentarse en un marco normativo sólido y una evaluación ética rigurosa para asegurar la protección efectiva de los derechos fundamentales y fomentar la confianza pública.

En primer lugar, resulta esencial abordar la normativa establecida en el Reglamento (UE) 2016/679 (RGPD). En su artículo 4, este reglamento define los datos anonimizados como aquellos que imposibilitan la identificación directa o indirecta de una persona física. Dicha definición establece una clara distinción entre datos personales y datos anonimizados, quedando estos últimos excluidos del ámbito de aplicación del RGPD. Esto implica, para RECYTRACE, la necesidad imperiosa de emplear técnicas de anonimización avanzadas y eficaces, con el objetivo de prevenir cualquier riesgo de reidentificación y garantizar así un uso responsable y legítimo de los datos.

Además del RGPD, resulta crucial considerar la Ley 37/2007 sobre reutilización de la información del sector público, especialmente su artículo 3. En este sentido, dicha ley establece límites precisos para asegurar la privacidad mediante procedimientos efectivos de anonimización, condición indispensable para la reutilización de información pública. Complementariamente, el Reglamento (UE) 2022/868 sobre gobernanza europea de datos refuerza esta responsabilidad, enfatizando la importancia ética, la interoperabilidad y la seguridad técnica en los procesos de reutilización.

Desde la perspectiva doctrinal, diversos autores han destacado limitaciones inherentes a la anonimización tradicional, particularmente en contextos ligados a la economía circular, donde la trazabilidad ética es esencial para asegurar la sostenibilidad. Conдеми y Schettini (2019) sostienen que la utilización ética y adecuada de datos anonimizados mediante tecnología RFID representa una oportunidad significativa para reducir residuos electrónicos (e-waste), fomentando una gestión sostenible y económicamente viable. No obstante, enfatizan que dichas oportunidades dependen de la aplicación estricta de técnicas robustas de anonimización que minimicen los riesgos potenciales de reidentificación.

En esta misma línea argumental, TrustArc (2023) subraya que la anonimización convencional podría ser insuficiente para asegurar plenamente una comercialización ética en contextos urbanos inteligentes, sugiriendo la incorporación de tecnologías adicionales que fortalezcan la privacidad técnica. Entre estas alternativas destacan métodos avanzados de cifrado, técnicas de privacidad diferencial o generación de datos sintéticos.

Precisamente, la Agencia Española de Protección de Datos y la Personal Data Protection Commission de Singapur (AEPD; PDPC, 2024) plantean la generación de datos sintéticos como una alternativa éticamente robusta y técnicamente avanzada frente a los métodos tradicionales de anonimización. Esta técnica no solo reduce significativamente el riesgo de reidentificación, sino que también refuerza el cumplimiento efectivo del principio de privacidad desde el diseño recogido en el artículo 25 del RGPD. No obstante, las entidades autoras advierten que un uso generalizado e indiscriminado de datos sintéticos podría entrañar nuevos desafíos éticos, especialmente en entornos automatizados sin mecanismos adecuados de supervisión ni gobernanza algorítmica.

3. Marco jurídico aplicado a la solución RECYTRACE

Este capítulo analiza la adecuación jurídica del sistema RECYTRACE en relación con los principales marcos normativos europeos y nacionales aplicables. Se examina su compatibilidad con las obligaciones derivadas del Reglamento General de Protección de Datos (RGPD), el Reglamento (UE) 2024/1689 sobre inteligencia artificial (AI Act), el Reglamento (UE) 2023/2854 (Data Act), la Ley 9/2017 de Contratos del Sector Público y la Ley 7/2022 sobre residuos.

Los aspectos normativos clave del AI Act y del Data Act han sido desarrollados en el capítulo 2. En los epígrafes siguientes se aplica este marco normativo al modelo RECYTRACE, valorando su adecuación funcional, jurídica y operativa conforme a las exigencias específicas de cada reglamento.

3.1. Privacidad desde el diseño y cumplimiento del RGPD

Tal como se ha expuesto en el apartado 2.1, el principio de privacidad desde el diseño y por defecto, recogido en el artículo 25 del Reglamento (UE) 2016/679 (RGPD), impone la integración proactiva de salvaguardas de protección de datos en todas las fases del ciclo de vida de un sistema tecnológico. Este principio resulta especialmente relevante cuando se prevé un tratamiento potencialmente intensivo, automatizado o masivo de datos personales.

En el caso del modelo RECYTRACE, este principio se aplica desde la fase de diseño conceptual a través de varias medidas técnicas y organizativas específicas, orientadas a minimizar riesgos y garantizar un control efectivo por parte del interesado. En concreto:

- Arquitectura modular descentralizada, que segmenta funciones de trazabilidad, gestión de incentivos y acceso institucional, evitando concentraciones de información identificable.
-
- Pseudonimización automática en origen, mediante el uso de etiquetas RFID con identificadores no reversibles asociados a metadatos contextuales, no a personas físicas.

- Canal cifrado extremo a extremo entre sensores, nodos municipales y almacenamiento en la nube, conforme a los estándares definidos en el Esquema Nacional de Seguridad (ENS).
- Restricción algorítmica de finalidades, excluyendo de forma explícita cualquier lógica de perfilado individual, vigilancia social o reutilización de datos con efectos jurídicos, en línea con el artículo 22 RGPD.
- Evaluación de Impacto en Protección de Datos (EIPD) obligatoria desde la fase piloto, conforme al artículo 35 RGPD, incluyendo la consulta previa a la AEPD en caso de dudas sobre mitigación residual.

La aplicación del ENS, regulado por el Real Decreto 311/2022, constituye un requisito legal ineludible para sistemas digitales en el ámbito municipal. En este contexto, resulta especialmente relevante la Guía CCN-STIC 817 emitida por el Centro Criptológico Nacional (CCN-CERT), que establece las condiciones técnicas y organizativas para asegurar el cumplimiento del ENS en soluciones basadas en la nube, como RECYTRACE. Esta guía propone mecanismos de detección de ciberincidentes, trazabilidad de eventos críticos, y medidas de recuperación rápida ante fallos o vulnerabilidades, reforzando la solidez del sistema frente a amenazas externas y garantizando su interoperabilidad institucional (CCN-CERT, 2023).

Además, RECYTRACE prevé un sistema de gobernanza preventiva que incluye:

- Delegado de Protección de Datos municipal (DPD) con competencias específicas en entornos digitales.
- Plataforma digital de ejercicio de derechos integrada en el backoffice de gestión de residuos, basada en un Rights Management System automatizado.
- Comité Ético-Técnico multidisciplinar, responsable de auditar el cumplimiento de los principios de necesidad, proporcionalidad y adaptación normativa.

Estas garantías permiten anticipar los requisitos adicionales del Reglamento (UE) 2024/1689 (AI Act), consolidando la privacidad desde el diseño como eje estructural del modelo.

3.2. Evaluación jurídica de RECYTRACE conforme al Reglamento (UE) 2024/1689

Tal como se ha desarrollado en el epígrafe 2.2, el Reglamento (UE) 2024/1689 establece un marco jurídico armonizado para los sistemas de inteligencia artificial que puedan afectar a los derechos fundamentales. En este contexto, RECYTRACE debe ser clasificado como un sistema de alto riesgo conforme al artículo 6 del AI Act, dado que incorpora lógica algorítmica para la asignación de incentivos y el análisis de comportamientos ciudadanos en servicios públicos esenciales.

Desde su diseño, RECYTRACE incorpora funcionalidades de IA orientadas a identificar patrones de depósito, calcular niveles de separación efectiva y sugerir incentivos adaptados. Estas operaciones, al incidir sobre los derechos de las personas usuarias, activan los requisitos establecidos en los artículos 8 a 15 del reglamento, entre los que destacan:

- Gestión de riesgos (art. 9): El sistema integra un mecanismo de evaluación continua del impacto de sus algoritmos, con foco en la equidad en la asignación de incentivos y la prevención de exclusión digital.
- Supervisión humana significativa (art. 14): Los operadores municipales podrán revisar, intervenir o anular decisiones automatizadas, especialmente en casos de reclamación o error sistémico.
- Documentación técnica (art. 11): RECYTRACE mantiene trazabilidad, explicabilidad y verificabilidad completas de cada módulo, conforme a los estándares de calidad del reglamento.
- Gobernanza algorítmica (arts. 13 y 15): Se adoptan protocolos de validación de datos, auditoría ética y robustez algorítmica, incluidos planes de respuesta ante fallos o sesgos.

En términos organizativos, el cumplimiento del AI Act se articula mediante la designación de un responsable de cumplimiento algorítmico dentro del ente local, así como la creación de un repositorio de auditorías técnicas accesibles a la ciudadanía y a las autoridades de supervisión.

El sistema prevé, además, un módulo de explicabilidad algorítmica integrado en la interfaz ciudadana, que permite obtener una explicación significativa de los criterios y lógicas que subyacen a las decisiones automatizadas, conforme al considerando 47 del AI Act.

Desde la doctrina, Carlón Ruiz (2023) y Cotino y Simón (2024) subrayan que las administraciones públicas no solo deben cumplir los requisitos formales del reglamento, sino

también ejercer una supervisión activa y transparente sobre sus sistemas de IA. Este compromiso resulta especialmente relevante en soluciones SaaS escalables como RECYTRACE, donde la responsabilidad puede diluirse entre múltiples actores públicos y privados.

Asimismo, tal y como expone Miranzo Díaz (2023) en el análisis jurídico sobre la motivación de los actos administrativos automatizados, la transparencia y fundamentación legal son esenciales para consolidar la confianza pública y garantizar la legitimidad de las decisiones algorítmicas, requisito que RECYTRACE incorpora desde su diseño técnico y jurídico.

En síntesis, el modelo RECYTRACE no solo se ajusta formalmente al AI Act, sino que incorpora sus principios en el diseño técnico y en la gobernanza institucional del sistema. Esta integración permite consolidar una propuesta de inteligencia artificial responsable, transparente y jurídicamente robusta al servicio del interés público local.

3.3. Régimen jurídico para la reutilización y comercialización de datos anonimizados

Tal como se ha desarrollado en el epígrafe 2.3, el Reglamento (UE) 2023/2854 (Data Act) establece un marco jurídico armonizado para el acceso y reutilización de datos generados por dispositivos conectados, con especial atención a los principios de transparencia, no discriminación y protección del valor competitivo de los titulares. En el caso de RECYTRACE, este marco resulta plenamente aplicable, dado que el sistema procesa información derivada de sensores RFID, tarjetas de usuario y dispositivos IoT municipales, generando datos sobre hábitos de depósito, frecuencia, separación y localización de residuos.

Para garantizar la anonimización efectiva exigida por el Considerando 26 del RGPD, RECYTRACE aplica una arquitectura basada en edge computing, donde los datos se procesan localmente antes de ser agregados, disociados y anonimizados en origen. Solo tras este tratamiento pueden ser reutilizados conforme a lo dispuesto en los artículos 4 a 6 del Data Act.

El modelo prevé dos canales diferenciados de reutilización ética:

- Canal institucional: orientado a administraciones, universidades y organismos ambientales, que acceden a conjuntos de datos anonimizados mediante convenios o licencias abiertas.
- Canal comercial responsable: dirigido a actores del sector retail, quienes obtienen analíticas de reciclaje por zonas y tipo de envases bajo licencias con cláusulas de reidentificación prohibida, trazabilidad y uso restringido.

Para reforzar la seguridad jurídica, el sistema incluye un anexo contractual conforme al artículo 35 del Data Act, con criterios de evaluación ex ante, auditoría ética y trazabilidad mediante registros digitales. Además, RECYTRACE contará con comités de revisión independientes encargados de validar solicitudes de acceso y revisar los efectos sociales del modelo.

Desde la doctrina, la AEPD (2021) y autores como Cotino y Simón (2024) insisten en que la gobernanza de datos anonimizados debe incluir mecanismos verificables que garanticen su desvinculación permanente con personas físicas, así como su uso conforme al interés general. Esta perspectiva refuerza la necesidad de una arquitectura normativa que combine anonimización real y reutilización ética.

En síntesis, RECYTRACE integra de forma coherente los principios del RGPD y del Data Act, demostrando que es posible conjugar la innovación tecnológica con una gestión responsable de los datos generados por IoT. Su enfoque modular, transparente y auditado convierte al sistema en un referente potencial de gobernanza algorítmica ética replicable en otros contextos municipales.

3.4. Contratación pública tecnológica

La implementación del modelo RECYTRACE en el ámbito municipal implica necesariamente su incorporación mediante procedimientos de contratación pública ajustados a la normativa española y europea vigente. Este proceso no solo debe respetar los principios generales de legalidad, transparencia, libre concurrencia e igualdad de trato, consagrados en la Ley 9/2017, de Contratos del Sector Público (LCSP), sino también alinearse con las nuevas exigencias derivadas de la contratación de soluciones digitales avanzadas.

Desde la perspectiva jurídica, RECYTRACE debe entenderse como un sistema inteligente que combina software como servicio (SaaS), dispositivos físicos (IoT, sensores RFID) y tratamiento de datos mediante inteligencia artificial. Su contratación puede canalizarse a través de procedimientos abiertos, restringidos o de asociación para la innovación, según el grado de madurez tecnológica de la solución. En este contexto, cobra especial importancia la Directiva 2014/24/UE, que regula la contratación pública en el seno de la Unión Europea, reconociendo expresamente los contratos que incorporan elementos innovadores o tecnologías emergentes.

En aplicación de los artículos 1 a 3 de la LCSP, las administraciones locales deben establecer criterios de adjudicación que valoren no solo la oferta económica, sino también factores técnicos como la interoperabilidad del sistema, su contribución a la sostenibilidad, el cumplimiento normativo en protección de datos, y la capacidad de adaptación a futuras normativas tecnológicas. Esta exigencia es coherente con la Directiva 2014/24/UE, que promueve el uso estratégico de la contratación pública para fomentar la innovación y alcanzar objetivos sociales y ambientales (Considerando 47 y arts. 67 y 68).

RECYTRACE, al integrar funcionalidades avanzadas de trazabilidad, control y transparencia, permite su incorporación como solución SaaS en la modalidad de servicios basados en la nube. Esta modalidad requiere cláusulas específicas que regulen la titularidad de los desarrollos, la responsabilidad sobre el tratamiento de datos personales conforme al RGPD y la disponibilidad del servicio. Resulta recomendable incluir cláusulas de nivel de servicio (SLA), así como previsiones sobre continuidad operativa y reversibilidad del contrato al término de su vigencia.

Asimismo, dada la implicación directa del modelo en el tratamiento de datos personales y la toma de decisiones automatizadas, el expediente de contratación debe incorporar una evaluación de impacto en protección de datos (EIPD) y un análisis previo de los riesgos tecnológicos, conforme a lo recomendado por la AEPD (2021). Estos documentos formarán parte del pliego de prescripciones técnicas, reforzando la diligencia del poder adjudicador y reduciendo el riesgo de futuras impugnaciones o litigios contractuales.

El uso de procedimientos innovadores como el diálogo competitivo o la asociación para la innovación puede resultar especialmente pertinente en aquellos municipios donde la solución RECYTRACE aún no esté totalmente desarrollada o deba ajustarse a condiciones específicas

del entorno urbano. Estas fórmulas permiten un proceso de cocreación entre administración y proveedor, asegurando una solución jurídica y técnicamente robusta.

Por último, RECYTRACE también ofrece ventajas en materia de contratación agregada o supramunicipal, permitiendo su adquisición mediante centrales de contratación o consorcios intermunicipales, favoreciendo economías de escala y eficiencia presupuestaria. Este enfoque refuerza la dimensión estratégica del sistema y permite su implementación en municipios de menor tamaño con recursos limitados, sin comprometer la seguridad jurídica ni los principios de libre competencia.

En suma, la contratación pública de RECYTRACE debe abordarse desde una lógica de legalidad proactiva y estrategia institucional, incorporando criterios de cumplimiento normativo, responsabilidad algorítmica y viabilidad técnica, para garantizar su éxito como solución de gestión inteligente, ética y sostenible en el ámbito municipal.

3.5. Utilidad estratégica en el cumplimiento de la Ley 7/2022, la normativa europea sobre residuos y su escalabilidad internacional

El modelo RECYTRACE se configura como una respuesta jurídico-tecnológica estratégica a las obligaciones derivadas de la Ley 7/2022, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, así como de la normativa europea en materia de gestión de residuos. Esta normativa impone a las entidades locales la obligación de garantizar la recogida separada, la trazabilidad, la valorización y el cumplimiento de los objetivos de preparación para la reutilización y reciclado, en el marco de una economía circular, eficiente y digitalizada.

En particular, el artículo 11 de la Ley 7/2022 establece la obligación de recogida separada de al menos cinco fracciones, así como de residuos domésticos peligrosos, textiles y biorresiduos. A su vez, el artículo 12 exige a los municipios la implementación de sistemas que favorezcan la trazabilidad de residuos, permitan medir su eficacia, y vinculen el pago a la generación real, avanzando hacia esquemas de fiscalidad ambiental. Estas exigencias son coherentes con lo dispuesto en la Directiva 2008/98/CE, modificada por la Directiva (UE) 2018/851, y con el principio de responsabilidad ampliada del productor.

RECYTRACE integra funcionalidades específicas que permiten materializar estas obligaciones de forma eficiente y verificable. En concreto, incorpora tecnologías RFID para la identificación individualizada de residuos, algoritmos de IA para el cálculo automatizado del comportamiento ambiental de los usuarios, y una arquitectura digital preparada para emitir datos auditables sobre frecuencia, volumen y calidad del reciclaje. Estas funcionalidades permiten que los municipios puedan cumplir los requerimientos legales mediante una solución única, escalable y adaptable.

Además, la trazabilidad digital que ofrece RECYTRACE facilita la implementación de sistemas de pago por generación (PAYT), en línea con el mandato del artículo 12.6 de la Ley 7/2022. La recolección de datos operativos vinculados a cada usuario permite configurar modelos de fiscalidad ambiental personalizados y equitativos, con incentivos positivos y penalizaciones progresivas. Esta capacidad no solo promueve el cumplimiento normativo, sino que abre la puerta a modelos de gestión más justos y sostenibles.

Desde el punto de vista de la normativa europea, RECYTRACE responde a los objetivos establecidos en el Pacto Verde Europeo y en el Plan de Acción para la Economía Circular, al permitir una digitalización de los procesos de recogida, monitorización e información a los ciudadanos. Su diseño está alineado con la Estrategia Europea de Datos, al fomentar un ecosistema interoperable, accesible y orientado a la reutilización ética de datos.

En términos de escalabilidad, el modelo se adapta a municipios de diferentes tamaños gracias a su arquitectura modular y a la posibilidad de operar como solución SaaS. Esta característica facilita su implantación progresiva, reduciendo barreras técnicas y presupuestarias. Además, su compatibilidad con modelos de gobernanza supramunicipal permite su gestión consorciada, aportando eficiencia operativa y alineamiento estratégico con las líneas de financiación europeas NextGenerationEU.

Por último, RECYTRACE se presenta como un instrumento eficaz para cumplir con los indicadores de seguimiento establecidos en la legislación estatal y comunitaria. Su capacidad para generar informes automatizados y visualizaciones adaptadas a los requerimientos de autoridades nacionales y europeas convierte al sistema en un aliado para la rendición de cuentas y la planificación de políticas públicas basadas en datos.

En resumen, RECYTRACE no solo cumple con los requisitos legales en materia de residuos urbanos, sino que transforma dichas obligaciones en una oportunidad para modernizar la gestión municipal, fomentar la sostenibilidad y posicionar a las entidades locales en la vanguardia del cumplimiento normativo ambiental y digital en Europa.

4. Marco teórico y desarrollo

Este capítulo desarrolla la base conceptual y técnica sobre la que se sustenta el modelo RECYTRACE, articulando los fundamentos necesarios para comprender su viabilidad en contextos urbanos reales. La selección de los ejes teóricos no responde únicamente a una lógica académica, sino a la necesidad práctica de integrar principios jurídicos, tecnológicos y operativos en una solución diseñada para entornos municipales con recursos limitados.

En primer lugar, se aborda el papel de la inteligencia artificial en la gestión urbana y su aplicación en la recogida y trazabilidad de residuos, destacando su potencial para optimizar procesos, predecir comportamientos y fomentar la automatización ética del servicio público. A continuación, se analizan las tecnologías de sensorización y conectividad —especialmente RFID e IoT— como infraestructuras habilitadoras de la trazabilidad física y digital del residuo.

El capítulo también examina el valor estratégico de los algoritmos inteligentes para inducir comportamientos sostenibles mediante mecanismos de incentivo, así como la relevancia del enfoque Smart City como marco de transformación urbana interoperable y basado en datos. Finalmente, se profundiza en la consideración del dato como activo estratégico, atendiendo tanto a sus implicaciones técnicas como a su dimensión jurídica, económica y ética.

En conjunto, estos cinco bloques teóricos permiten justificar la configuración funcional del modelo RECYTRACE desde una perspectiva interdisciplinar y contextualizada, en coherencia con los desafíos reales que enfrentan las administraciones locales ante la transición digital, ecológica y normativa.

4.1. Inteligencia artificial aplicada a entornos urbanos

La inteligencia artificial (IA) se ha consolidado como un factor transformador en la gestión urbana, permitiendo una transición desde modelos tradicionales hacia esquemas más eficientes, predictivos y adaptativos. En el contexto de las ciudades inteligentes, la IA se aplica para afrontar retos vinculados al crecimiento demográfico, la sostenibilidad ambiental y la optimización de recursos públicos. Su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos y generar decisiones automatizadas facilita una mejora sustancial en la prestación de servicios

urbanos, especialmente en áreas como la movilidad, la energía, la seguridad y, de forma destacada, la gestión de residuos (Fayomi, 2021).

Las aplicaciones de IA en el entorno urbano son diversas y presentan un grado de sofisticación creciente. En el ámbito de la movilidad, permite gestionar el tráfico en tiempo real, prevenir congestiones y planificar rutas alternativas de manera eficiente (BABLE Smart Cities, s.f.). En el sector energético, optimiza el consumo y favorece la integración de fuentes renovables. En lo que respecta a los residuos sólidos urbanos, la IA posibilita la predicción del llenado de contenedores, la optimización de rutas de recogida y la gestión adaptativa de los recursos, reduciendo costes operativos y emisiones contaminantes (Veale y Brass, 2019).

Desde un punto de vista técnico, destacan modelos como el aprendizaje automático (machine learning), que permite construir sistemas predictivos a partir del análisis continuo de grandes bases de datos. También adquieren relevancia tecnologías como el edge computing y el aprendizaje federado, que descentralizan el procesamiento de datos, mejoran la eficiencia y refuerzan la privacidad al evitar la transmisión masiva de información a servidores centrales (Cath, 2018).

4.2. Modelos de sensorización y trazabilidad: RFID e IoT

En el marco de las ciudades inteligentes, la sensorización se ha consolidado como una herramienta clave para modernizar los servicios públicos. Su integración permite capturar datos en tiempo real sobre el entorno urbano y posibilita una gestión más eficiente y basada en evidencias. En particular, la trazabilidad de residuos mediante tecnologías como la identificación por radiofrecuencia (RFID) y el Internet de las Cosas (IoT) introduce nuevas posibilidades de control, automatización y supervisión algorítmica, especialmente relevantes en el ámbito municipal.

La trazabilidad, entendida como la capacidad para seguir el rastro de un residuo desde su generación hasta su tratamiento final, representa un elemento esencial de transparencia y rendición de cuentas. Permite a las administraciones locales no solo verificar el cumplimiento de la normativa sobre recogida separada, sino también implementar modelos de fiscalidad más justos e incentivos personalizados en función del comportamiento ciudadano. En este contexto, tecnologías como RFID e IoT no se limitan a una función operativa, sino que

adquieren una dimensión estratégica en la arquitectura jurídica y técnica de sistemas como RECYTRACE.

La tecnología RFID se basa en la transmisión de datos entre un lector y una etiqueta electrónica que contiene un identificador único. A diferencia de los códigos de barras, las etiquetas RFID no requieren contacto directo ni visibilidad, lo que las hace especialmente útiles para entornos como la recogida de residuos urbanos. Existen etiquetas pasivas, activas y semipasivas, adaptables a distintas tipologías de contenedores o puntos de depósito. Las etiquetas pasivas, en particular, destacan por su bajo impacto energético y alta durabilidad, lo que las convierte en una opción idónea para estrategias de reciclabilidad y circularidad.

Más allá de su funcionalidad técnica, Condemi y Schettini (2019) destacan el papel de estas etiquetas como potenciales residuos electrónicos, lo que plantea la necesidad de políticas específicas para su tratamiento. En su propuesta, se aboga por una jerarquía circular que contemple el eco-diseño, la reutilización de componentes y la extensión de la responsabilidad del productor (EPR). Desde esta óptica, el ciclo de vida del dispositivo tecnológico se convierte también en objeto de regulación, cerrando el bucle entre trazabilidad digital y sostenibilidad ambiental.

En paralelo, el Internet de las Cosas (IoT) extiende significativamente las capacidades de sensorización mediante la interconexión de dispositivos y sensores en redes de comunicación. Esta infraestructura técnica permite la captura automatizada de datos relevantes —como el nivel de llenado de los contenedores, su ubicación geográfica en tiempo real o incluso la temperatura interna—, configurando un entorno de monitorización continua que facilita tanto la optimización logística como la gestión ambiental predictiva (Domínguez 2023).

Esta convergencia tecnológica ha sido aplicada con éxito en diversas experiencias piloto y proyectos industriales. Algunos ejemplos relevantes son los sistemas de predicción de llenado de contenedores, que permiten planificar rutas dinámicas y reducir recorridos innecesarios (Ferrer y Alba 2018); los modelos de pago por generación vinculados a la trazabilidad individual del residuo (Guerra 2023); o los sistemas de clasificación inteligente instalados en el punto de recogida, como los desarrollados por MARGARET y SRIDHAR (2017), que integran sensores RFID de distintas frecuencias para segregar residuos húmedos, plásticos y no plásticos, automatizando la separación desde origen con apoyo de edge computing y mecanismos de control embebidos. El modelo funcional propuesto por estas autoras,

desarrollado en un entorno no europeo, resulta técnicamente extrapolable a escenarios europeos siempre que se adapte a las exigencias del marco normativo comunitario, en especial en lo relativo al RGPD y a los principios del AI Act.

Numerosos proveedores han desarrollado soluciones específicas en esta línea. Kyubi System ha diseñado etiquetas RFID para entornos urbanos, integrables en sistemas de identificación domiciliaria. HID Global y Secmotic han apostado por arquitecturas híbridas en las que los sensores IoT se comunican mediante protocolos estandarizados con plataformas en la nube que permiten visualizar, analizar y automatizar decisiones en tiempo real. Estos casos demuestran que la tecnología está suficientemente madura y resulta aplicable incluso en municipios de tamaño reducido, especialmente cuando se adopta bajo un modelo de software como servicio (SaaS) que minimiza costes iniciales y facilita su escalabilidad.

En conclusión, la incorporación de tecnologías de sensorización y trazabilidad mediante RFID e IoT aporta una base sólida al modelo RECYTRACE. Su aplicación permite no solo optimizar la recogida de residuos urbanos desde una perspectiva operativa, sino también avanzar hacia un nuevo paradigma de gobernanza local, basada en datos fiables, fiscalidad justa y cumplimiento normativo verificable. Estas tecnologías, lejos de ser un fin en sí mismas, se integran de manera coherente en una solución jurídica y técnica orientada a la eficiencia, la sostenibilidad y la legitimación democrática de los sistemas inteligentes de gestión pública.

Un caso ilustrativo a nivel nacional es la implantación en Barcelona de un sistema de recogida puerta a puerta, basado en bolsas con chips RFID identificativos, que ha mejorado sustancialmente la trazabilidad del residuo domiciliario y ha permitido personalizar el servicio prestado (Ajuntament de Barcelona, s.f.). Esta experiencia constituye una evidencia práctica de la viabilidad técnica y social del modelo RECYTRACE en entornos urbanos consolidados, al tiempo que valida la posibilidad de implementar esquemas de fiscalidad justa sin comprometer la proporcionalidad ni los derechos fundamentales. Puede citarse también el caso de HID Global, empresa que ha desarrollado etiquetas RFID específicamente diseñadas para entornos industriales y medioambientales, lo cual refuerza la madurez tecnológica del ecosistema disponible para la trazabilidad automatizada en el sector de residuos (HID Global, s.f.). Estas experiencias se sitúan plenamente dentro del marco normativo del RGPD y anticipan las exigencias del Reglamento (UE) 2024/1689, consolidando así el fundamento jurídico y operativo del sistema propuesto.

Ahora bien, conviene advertir que el uso de sensores que permiten inferir patrones de comportamiento ciudadano —aunque se base en datos anonimizados o tratados bajo un marco jurídico garantista— plantea retos éticos no menores. La monitorización constante de prácticas cotidianas como el reciclaje, aunque orientada a incentivar conductas sostenibles, puede derivar en escenarios de sobrevigilancia si no se establecen límites claros en el diseño del sistema. La trazabilidad, incluso cuando no identifica directamente al sujeto, introduce una forma de "gubernamentalidad algorítmica" en la que las decisiones públicas se estructuran en torno a patrones conductuales modelados por tecnología. Por ello, resulta esencial incorporar principios de proporcionalidad, explicabilidad y control democrático desde el inicio del proceso. Tal enfoque no solo previene sesgos o efectos discriminatorios, sino que refuerza la confianza ciudadana y legitima el uso de tecnologías inteligentes en la gestión pública.

4.3. Algoritmos inteligentes e incentivos digitales

Los algoritmos inteligentes se han convertido en herramientas esenciales para la gestión pública basada en datos, especialmente en entornos urbanos. Su capacidad para anticipar patrones, segmentar comportamientos y automatizar decisiones permite optimizar la prestación de servicios como la recogida de residuos, la eficiencia energética o la movilidad sostenible (Wachter, Mittelstadt y Floridi, 2017). Esta funcionalidad técnica se complementa con una dimensión estratégica: la posibilidad de inducir comportamientos deseables mediante sistemas de incentivos digitales integrados en plataformas de trazabilidad como RECYTRACE.

Desde la teoría de la arquitectura de decisiones, Thaler y Sunstein (2021) destacan que los sistemas públicos pueden favorecer elecciones más sostenibles sin recurrir a la coerción, mediante lo que denominan nudges o empujones conductuales. Estos principios se han aplicado con éxito en contextos urbanos a través de herramientas como el scoring ambiental, la gamificación y los tokens verdes. El Joint Research Centre (2024) ha documentado múltiples casos europeos donde estos mecanismos han mejorado la implicación ciudadana en políticas de sostenibilidad, reforzando además la confianza institucional.

En relación con la tokenización, la OCDE (2020) ha analizado cómo los sistemas basados en tokens digitales pueden incentivar comportamientos sociales y ambientales de forma

auditable, transparente y económicamente eficiente. Aunque su aplicación más conocida es en los mercados financieros, su lógica resulta extrapolable a soluciones municipales como RECYTRACE, especialmente cuando se integran con tecnologías de trazabilidad (RFID) y gobernanza algorítmica.

La viabilidad jurídica y técnica de estos enfoques requiere incorporar criterios de explicabilidad, auditabilidad y respeto al principio de equidad algorítmica. Las Ethics Guidelines for Trustworthy AI de la Comisión Europea (2019) establecen que cualquier sistema de IA aplicado a servicios públicos debe garantizar supervisión humana, transparencia comprensible y minimización del riesgo de discriminación.

No obstante, el diseño de sistemas algorítmicos de incentivos debe incorporar también criterios de accesibilidad universal y perspectiva inclusiva, evitando que las lógicas automatizadas perpetúen desigualdades estructurales. En este sentido, Montalvá Medina et al. (2022) proponen un conjunto de buenas prácticas para garantizar que la inteligencia artificial aplicada a la administración pública no discrimine directa o indirectamente a colectivos vulnerables, como las mujeres con discapacidad. Esta propuesta incide en la necesidad de considerar variables sociales y funcionales desde las fases iniciales del diseño algorítmico, así como mecanismos comprensibles de explicación y supervisión que eviten la exclusión digital. La aplicación de estos principios resulta especialmente relevante en modelos como RECYTRACE, donde la asignación de incentivos debe ajustarse a criterios de justicia social y adaptabilidad ciudadana.

Desde el plano técnico, Pamula et al. (2025) proponen un modelo de aprendizaje federado para sistemas urbanos inteligentes que permite predecir comportamientos ciudadanos respetando la privacidad y sin necesidad de centralizar datos. Este enfoque, compatible con el AI Act, refuerza la sostenibilidad jurídica de modelos como RECYTRACE cuando generan puntuaciones ambientales o segmentan usuarios para asignar incentivos.

En definitiva, los algoritmos no solo permiten optimizar los servicios urbanos, sino que ofrecen una infraestructura para implementar políticas públicas basadas en datos, centradas en la ciudadanía y alineadas con principios de legalidad, justicia algorítmica y sostenibilidad institucional.

4.4. Smart Cities y sostenibilidad: contexto europeo y Agenda 2030

El concepto de Smart City ha evolucionado desde su inicial vinculación con la digitalización de infraestructuras urbanas hacia una visión integral, en la que convergen sostenibilidad, innovación institucional, gobernanza basada en datos y participación ciudadana. En el marco estratégico y normativo de la Unión Europea, las ciudades inteligentes representan un elemento clave para materializar los compromisos adoptados en materia de transición ecológica, digitalización y cohesión social. Iniciativas como la Agenda 2030, el European Green Deal y la Estrategia Europea de Datos consolidan esta transformación como una prioridad transversal en las políticas urbanas contemporáneas (Comisión Europea, 2019; 2020).

Como señala Kuzior (2024), el concepto de ciudad inteligente ha evolucionado en cinco fases, desde su vertiente tecnocrática inicial hasta una aproximación más ética y orientada a los ODS, en especial el ODS 11 sobre ciudades sostenibles. Esta evolución ha reforzado la visión de las Smart Cities como catalizadoras de innovación institucional y transformación democrática, donde el uso de la tecnología se subordina al bienestar ciudadano y la resiliencia urbana.

Esta redefinición institucional ha sido acompañada por documentos como la Carta de Leipzig (2007, revisión 2020), la Nueva Bauhaus Europea y la propuesta Digital Compass (Comisión Europea, 2021), los cuales insisten en una comprensión multidimensional de la sostenibilidad urbana. Bajo esta perspectiva, el uso estratégico de la tecnología debe estar orientado a mejorar la calidad de vida, la eficiencia en la gestión de los recursos públicos y el respeto por el entorno, incorporando también principios de inclusión, resiliencia y justicia social (Cerrillo Martínez, 2022; Fayomi, 2021).

En este contexto, la gestión de residuos se presenta como uno de los ámbitos prioritarios de intervención en las políticas de sostenibilidad urbana. La aplicación de tecnologías de trazabilidad, sensorización e inteligencia artificial en los sistemas de recogida y tratamiento permite avanzar hacia modelos operativos más eficientes, fiscalizables y coherentes con los principios de economía circular. Estos sistemas, además, fortalecen la capacidad institucional de los municipios para planificar y evaluar sus servicios conforme a indicadores objetivos y medibles (Batty et al., 2012; AEMA, 2020).

Esta orientación ha sido ampliamente respaldada por el informe del Eco-Innovation Observatory (2020), que identifica la digitalización de la gestión de residuos como una palanca

esencial para lograr modelos urbanos sostenibles, eficientes y alineados con el European Green Deal. RECYTRACE se sitúa plenamente en este enfoque, al integrar herramientas digitales que permiten medir, controlar y optimizar los flujos de residuos conforme a criterios ESG y principios de fiscalidad ambiental justa.

En el contexto nacional, la Estrategia de Transformación Digital del Ayuntamiento de Madrid (2023–2027) ha introducido un marco pionero basado en una arquitectura interoperable, un ecosistema de datos públicos (GeoDataLake) y una gobernanza algorítmica ética, aplicando principios del AI Act y del Data Act a través de su gemelo digital urbano. Este modelo refuerza la viabilidad institucional de soluciones como RECYTRACE, al demostrar que la trazabilidad urbana basada en IoT y datos anonimizados puede ser compatible con la protección de derechos, la eficiencia pública y la innovación tecnológica.

Paralelamente, la dimensión digital del urbanismo se ha reforzado con la Estrategia Europea de Datos (Comisión Europea, 2020) y el Data Act (2023), que impulsan el acceso justo y seguro a los datos generados por dispositivos inteligentes, así como su reutilización por parte de las administraciones públicas en situaciones de interés general. Este enfoque favorece especialmente a los municipios de menor tamaño, que carecen de recursos para desarrollar soluciones tecnológicas propias. En este escenario, los modelos escalables en formato SaaS se consolidan como una alternativa viable para garantizar la prestación de servicios digitales de calidad, alineados con los principios de interoperabilidad, sostenibilidad y eficiencia presupuestaria.

Asimismo, el marco normativo y financiero de la Unión Europea fomenta la integración de criterios ESG (Environmental, Social and Governance) en la planificación urbana. Las ciudades que promueven políticas públicas compatibles con los estándares ESG acceden con mayor facilidad a financiación verde, fondos europeos y mecanismos de inversión responsable, como los bonos climáticos o el programa Green Claims Initiative (Comisión Europea, 2021). En este sentido, el tratamiento ético, anonimizado y reutilizable de los datos urbanos refuerza la posición estratégica de las entidades locales ante inversores institucionales, organismos internacionales y programas comunitarios de ayuda.

La gestión inteligente de residuos, entendida como parte de esta arquitectura ESG, permite generar datos de alto valor para la toma de decisiones, la trazabilidad de comportamientos ciudadanos y la formulación de políticas basadas en evidencias. Estos datos, cuando son

correctamente protegidos y anonimizados, pueden ser compartidos con terceros bajo fórmulas reguladas, potenciando su valor como activos estratégicos al servicio del interés público y la sostenibilidad (Fayomi, 2021; Comisión Europea, 2020).

Sobre este fondo político y jurídico, la propuesta RECYTRACE encuentra un encaje natural. Su diseño modular y orientado a la trazabilidad inteligente ofrece a los municipios una herramienta adaptable, técnicamente viable y jurídicamente conforme con las exigencias del Reglamento (UE) 2024/1689 (AI Act) y la Ley 7/2022, de residuos y suelos contaminados. La integración de su arquitectura en el ecosistema digital europeo permite a las entidades locales avanzar en el cumplimiento de los ODS, mejorar la calidad regulatoria de sus servicios y abrir nuevas vías de acceso a financiación pública y privada, alineada con los principios de sostenibilidad ambiental y responsabilidad institucional.

En esta línea, resulta especialmente relevante el caso de Tarragona y Tres Cantos, donde se ha desplegado la plataforma Recitty para la gestión de residuos sólidos urbanos. Este sistema combina sensorización avanzada, analítica de datos e integración con los servicios municipales, consolidándose como un ejemplo de aplicación efectiva del paradigma de ciudades inteligentes a la sostenibilidad urbana (CNIS, 2024). La experiencia demuestra la capacidad operativa de los municipios para fiscalizar y optimizar sus servicios públicos mediante soluciones tecnológicas replicables, alineadas tanto con el Reglamento (UE) 2024/1689 como con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 11 y 12).

En paralelo, el estudio de Patil y Gidde (2023) sobre la ciudad india de Pune demuestra cómo la combinación de tecnologías IoT y RFID en la gestión de residuos urbanos puede mejorar la eficiencia operativa, reducir costes y aumentar la transparencia institucional. Este ejemplo internacional refuerza la viabilidad técnica y el potencial de escalabilidad de modelos como RECYTRACE en contextos urbanos diversos, especialmente cuando se despliegan bajo una lógica modular y orientada a resultados.

No obstante, algunos autores advierten sobre el riesgo de una doble transición —verde y digital— formulada desde una lógica tecnocrática y carente de legitimidad social. Kovacic et al. (2024) subrayan la necesidad de acompañar estas estrategias con mecanismos reales de participación, fiscalización democrática y justicia territorial, evitando que los discursos de innovación sirvan como fachada para procesos excluyentes o verticales.

En definitiva, RECYTRACE contribuye de manera directa a la consolidación de ciudades más sostenibles, eficientes y transparentes, reforzando la capacidad transformadora de la tecnología cuando se integra en un marco jurídico robusto y orientado al bien común. Esta visión anticipa la reflexión que se desarrolla en el siguiente epígrafe, centrado en el papel del dato como activo estratégico en la economía y la gobernanza digital del siglo XXI.

4.5. El dato como activo estratégico: implicaciones y aprovechamiento

En la era digital, los datos han adquirido una naturaleza dual: son, al mismo tiempo, una huella de la actividad humana y un recurso de extraordinario valor estratégico. Esta doble condición los sitúa en el centro de los procesos de transformación institucional, innovación tecnológica y eficiencia en la gestión pública. En este contexto, el modelo RECYTRACE se plantea como una solución que trasciende lo meramente operativo, al integrar el tratamiento responsable de datos en su arquitectura normativa y técnica, con arreglo a los principios de sostenibilidad, utilidad pública y gobernanza algorítmica.

El valor del dato: perspectivas económicas y sociales

Desde el punto de vista económico, los datos permiten reducir asimetrías de información, facilitar decisiones más eficientes y abrir espacios para la innovación. Su reutilización genera oportunidades en sectores tan diversos como el transporte, el comercio o la gestión urbana. La literatura especializada subraya que los datos públicos, en particular, pueden convertirse en impulsores de valor siempre que se garantice su calidad, interoperabilidad y disponibilidad en condiciones justas (Janssen et al., 2012). Esta visión ha sido asumida por la Unión Europea en su Estrategia de Datos (Comisión Europea, 2020), que concibe los datos como la base para el liderazgo europeo en la economía digital y la transición verde.

Zaccarin et al. (2022) refuerzan esta perspectiva al destacar que la reutilización de datos de origen privado con fines estadísticos y sociales puede generar valor público de alto impacto, siempre que se garantice un marco de gobernanza robusto. Esta visión conecta directamente con las propuestas del Data Act (2023), al establecer obligaciones de acceso justo y reutilización equitativa por parte de las administraciones públicas. En este marco, RECYTRACE puede ser entendido como una solución interoperable que convierte los datos urbanos en un activo estratégico para la planificación municipal y el cumplimiento normativo.

A nivel social, el aprovechamiento de datos puede optimizar servicios públicos, hacer más precisas las políticas públicas y fomentar modelos participativos de gestión. La información relativa a los hábitos de reciclaje, por ejemplo, permite identificar patrones, diseñar campañas focalizadas y establecer incentivos conductuales, reforzando la corresponsabilidad ciudadana (Guerra, 2023). En el caso de RECYTRACE, estos datos no solo tienen valor operativo, sino que también permiten estructurar una inteligencia ambiental orientada al bien común.

Escalabilidad, gamificación y tecnologías emergentes

Uno de los desafíos recurrentes en la implantación de sistemas tecnológicos en el ámbito local es su capacidad de adaptación a contextos diversos. RECYTRACE ha sido concebido como un modelo escalable, modular y económicamente accesible, que puede ser implementado progresivamente por municipios de distinto tamaño, incluidos aquellos con recursos limitados. Su carácter SaaS facilita la integración con otras soluciones y su replicabilidad en distintos entornos (Fayomi, 2021).

Además, la gamificación constituye un recurso estratégico para fomentar la participación ciudadana y enriquecer la base de datos mediante comportamientos sostenibles. A través de mecanismos de recompensa simbólica o reconocimiento social, es posible incentivar prácticas responsables en la gestión de residuos sin recurrir a medidas coercitivas. Esta dinámica, si se aplica con criterios de inclusión y transparencia, potencia la generación de datos relevantes y la apropiación ciudadana del sistema (Guerra, 2023).

En cuanto al soporte tecnológico, el uso de dispositivos IoT, etiquetas RFID, edge computing y algoritmos de modelado inteligente permite capturar y procesar información en tiempo real, con escaso consumo energético y elevada eficiencia operativa (Ghahramani et al., 2022). Estas capacidades técnicas se alinean con las exigencias del marco europeo para la interoperabilidad de datos públicos y la gobernanza digital, que refuerzan la legalidad, estabilidad y proyección del sistema (Cerrillo Martínez, 2022). La propuesta de Buongiorno Sottoriva y Nasi (2022) sobre la aplicación de geodatos y replicabilidad en servicios municipales ofrece un marco técnico de referencia para asegurar la sostenibilidad de estos modelos.

El dato como factor ESG y su función en la atracción de inversión

Más allá de su función instrumental, los datos también cumplen un rol estratégico como evidencias de cumplimiento en materia ambiental, social y de gobernanza (ESG). En este sentido, los sistemas capaces de generar métricas verificables y trazables se convierten en activos valorados por fondos de inversión responsables y por instituciones que demandan transparencia y responsabilidad social corporativa (Friede et al., 2015).

RECYTRACE permite precisamente este tipo de verificabilidad al documentar de forma automatizada el comportamiento ciudadano, facilitando la evaluación del impacto real de las políticas locales de residuos. Esta perspectiva se ve reforzada por experiencias como la de Yap et al. (2018), que demuestran la capacidad de los sistemas RFID para generar datos útiles en la gestión eficiente de residuos y su conversión en activos verificables ante indicadores de desempeño ambiental y económico.

Este potencial se ve consolidado por el marco normativo europeo sobre declaraciones medioambientales y green claims, que obliga a fundamentar con datos objetivos cualquier afirmación sobre sostenibilidad (Comisión Europea, 2021). Asimismo, la posibilidad de explotar datos anonimizados, de forma compatible con el principio de reutilización del sector público y el Data Act (2023), abre vías de financiación alternativa, sin comprometer la privacidad de los ciudadanos.

Desde una óptica crítica, autores como Zuboff (2019) y Floridi (2019) recuerdan que la explotación de datos debe someterse a límites éticos y democráticos, evitando modelos de extracción que ignoren los derechos y valores fundamentales. De ahí que toda estrategia basada en datos, como RECYTRACE, deba estar sustentada en principios de transparencia, equidad, responsabilidad algorítmica y participación pública, configurando un modelo de gobernanza integral del dato orientado al interés general.

5. Propuesta conceptual del sistema RECYTRACE

Este capítulo presenta la propuesta jurídico-tecnológica RECYTRACE como modelo de trazabilidad inteligente en la gestión municipal de residuos urbanos. Se articula en dos bloques: el primero describe la arquitectura técnica y lógica funcional del sistema; el segundo, su valor añadido, escalabilidad y alineación con criterios ESG y normativa vigente.

5.1. Descripción general del sistema

RECYTRACE se concibe como un sistema inteligente de trazabilidad y gobernanza algorítmica, orientado a mejorar la recogida separada de residuos urbanos, reducir la fracción impropia y facilitar el cumplimiento de las obligaciones normativas derivadas de la Ley 7/2022. Su diseño se fundamenta en los principios de inteligencia artificial confiable, privacidad desde el diseño y modularidad funcional, tal como establece el Reglamento (UE) 2024/1689 (AI Act) y las directrices sobre IA en servicios públicos del Gobierno de Irlanda (2024).

Desde un punto de vista doctrinal, CERRILLO MARTÍNEZ (2022) resalta la importancia de una gobernanza algorítmica orientada al interés público, y CARLÓN RUIZ (2023) defiende la necesidad de configurar sistemas de IA en la administración como instrumentos de mejora institucional, siempre bajo condiciones de control normativo y transparencia. Este enfoque se traduce en RECYTRACE como un modelo técnicamente innovador, jurídicamente sólido y alineado con los valores de la Unión Europea en materia de ética digital.

El sistema está estructurado en módulos interoperables que permiten su integración gradual en las infraestructuras municipales existentes. La solución se concibe como un servicio accesible a través de un modelo SaaS, diseñado específicamente para entornos locales con recursos limitados. Esta orientación responde a la necesidad de escalabilidad institucional, conforme a las recomendaciones de interoperabilidad y sostenibilidad digital establecidas en la Guía de despliegue de portales de datos elaborada por Red.es (2025).

Además, el sistema incorpora principios de privacy & compliance by design, conforme a lo establecido en las directrices técnicas de la Comisión Europea (2025) sobre sistemas de IA de

alto riesgo. En este sentido, se adoptan mecanismos de supervisión humana significativa, trazabilidad de decisiones y documentación técnica continua del ciclo de vida del sistema.

RECYTRACE también se proyecta como modelo replicable para consorcios intermunicipales, alineado con los principios de economía de escala, digitalización sostenible y financiación verde, lo que lo convierte en una solución elegible para programas como NextGenerationEU. La propuesta contribuye así a la transformación digital de la gestión de residuos desde una perspectiva ética, operativa y normativa, posicionándose como referente de buenas prácticas en el uso responsable de la IA en la administración local.

Para una visualización esquemática de esta arquitectura, véase la Figura 1, donde se representan los flujos técnicos y funcionales del sistema RECYTRACE, estructurados conforme a los niveles de transformación del dato y su progresiva adecuación normativa.

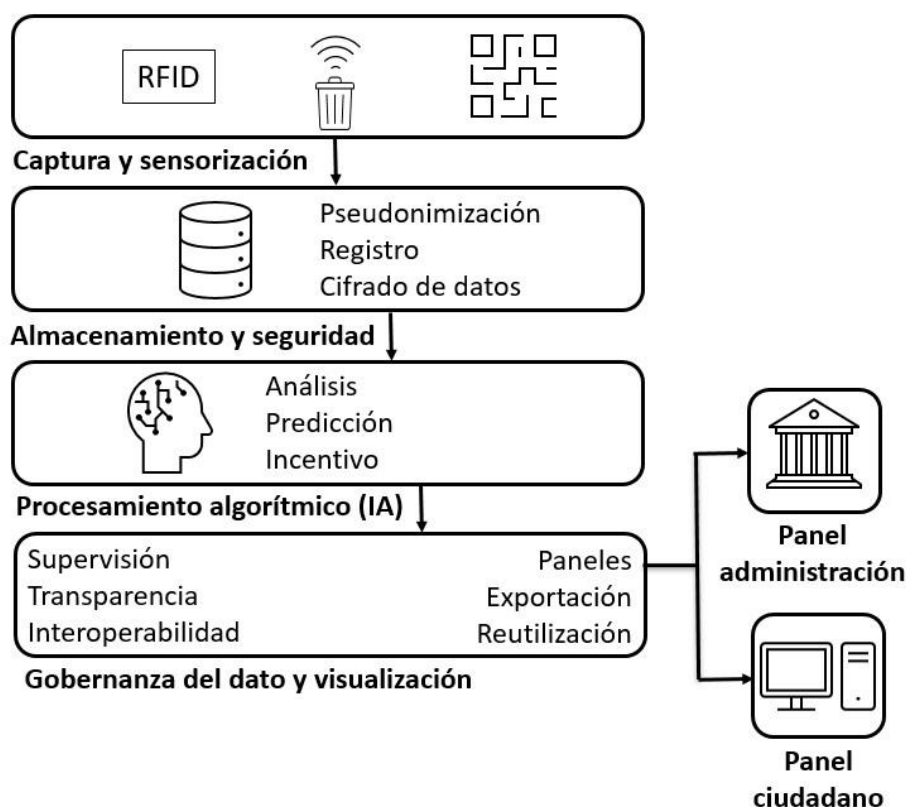


Figura 1. Arquitectura técnica modular del sistema RECYTRACE.

Esquema funcional del sistema, organizado en cuatro capas: captura de datos, almacenamiento seguro, procesamiento algorítmico y gobernanza del dato. Cada capa

incorpora mecanismos tecnológicos y garantías jurídicas orientadas al cumplimiento normativo, la interoperabilidad y la escalabilidad institucional del sistema como solución SaaS.

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Diseño funcional: inteligencia artificial, trazabilidad e interoperabilidad SaaS

RECYTRACE se fundamenta en una arquitectura técnica modular que articula, de forma interoperable, los distintos componentes funcionales necesarios para una gestión inteligente, trazable y legalmente conforme del residuo urbano. Esta arquitectura se estructura en cuatro capas: (1) captura de datos mediante tecnologías de sensorización como RFID, Bluetooth Low Energy (BLE) y QR; (2) procesamiento y clasificación automatizada a través de modelos de inteligencia artificial; (3) interacción a través de una interfaz web con doble canal (administración-ciudadanía); y (4) provisión como servicio mediante un entorno SaaS, accesible desde infraestructuras locales y escalable según demanda.

Esta estructura responde a una lógica de eficiencia funcional, respeto por la privacidad y adaptabilidad a contextos municipales de diversa capacidad operativa. El entorno SaaS se justifica conforme a las recomendaciones técnicas de la Guía práctica para el despliegue de portales de datos abiertos elaborada por Red.es (2025), donde se promueve la adopción de arquitecturas reutilizables, accesibles, basadas en estándares y orientadas al servicio público digital.

En el plano normativo, el diseño funcional se alinea con el artículo 9 del Reglamento (UE) 2024/1689 (AI Act), al integrar medidas de gestión de riesgos, documentación técnica del sistema, y trazabilidad de las decisiones automatizadas. A este respecto, el sistema aplica desde su concepción el principio de supervisión humana significativa y un enfoque de ciclo de vida documentado conforme a las Directrices de la Comisión Europea (2025) sobre IA de alto riesgo.

Desde el punto de vista doctrinal, el Consejo General del Poder Judicial (PERALTA et al., 2024) subraya la necesidad de garantizar una gobernanza funcional eficaz en los sistemas de IA utilizados por el sector público. En RECYTRACE, esta gobernanza se materializa a través de una lógica de componentes separados pero interoperables, lo que permite mantener el control

sobre cada fase del tratamiento de los datos, así como una adaptación sencilla a las variaciones legislativas o técnicas.

Asimismo, si se opta por el uso de datos sintéticos para el entrenamiento de los modelos de IA o para la validación de patrones de comportamiento, el sistema podrá incorporar esta tecnología como una medida de mejora de la privacidad, conforme a las directrices de la Guía sobre generación de datos sintéticos publicada por la AEPD (2024), siempre que se respeten los principios de transparencia y minimización del riesgo de reidentificación.

Con el objetivo de reforzar la autonomía institucional y la sostenibilidad técnica del modelo, RECYTRACE propone el uso de tecnologías de conectividad abiertas, como el protocolo BLE (Bluetooth Low Energy), que podría complementar la infraestructura de sensorización basada principalmente en RFID. Aunque RFID se presenta como la tecnología central para la trazabilidad de residuos, el uso de BLE, ampliamente disponible y licenciado sin royalties por el Bluetooth SIG, puede ofrecer ventajas adicionales en términos de interoperabilidad y reducción de costes de adquisición y mantenimiento. Este enfoque es coherente con las recomendaciones sobre soluciones SaaS modulares y replicables aplicables a la digitalización de servicios públicos en entornos locales (Wernick, 2023).

En consecuencia, el diseño funcional de RECYTRACE no solo asegura el cumplimiento normativo y la eficiencia técnica, sino que permite consolidar un modelo de gestión de residuos urbanos basado en datos, escalable, ético y replicable, conforme a las mejores prácticas europeas en el ámbito de la digitalización del sector público.

5.3. Trazabilidad inteligente del residuo urbano

Uno de los pilares diferenciales del sistema RECYTRACE es su capacidad para trazar el flujo de residuos urbanos desde su generación hasta su recogida y tratamiento, generando una red de datos con valor jurídico, operativo y ambiental. Esta trazabilidad no solo responde a una necesidad técnica, sino también a un mandato normativo derivado del artículo 12 de la Ley 7/2022, que impone la obligación de garantizar el control del flujo de residuos mediante mecanismos que permitan la tarificación justa y el cumplimiento de los principios de la economía circular.

El modelo propuesto permite identificar el origen del residuo mediante el uso de etiquetas RFID vinculadas a usuarios o unidades de vivienda, registrando el tipo, la frecuencia y el volumen del depósito. Esta información es procesada mediante algoritmos supervisados que permiten evaluar la calidad del reciclaje y generar métricas agregadas que sirven de base tanto para la optimización del servicio como para el sistema de incentivos.

Desde el punto de vista legal, la trazabilidad inteligente se apoya en el principio de privacidad desde el diseño conforme al RGPD y a los artículos 9 y 10 del AI Act, incorporando medidas de seudonimización, separación de identidades y control granular de accesos. El procesamiento de datos se realiza en el borde de la red (edge computing), limitando la transferencia de información sensible y reduciendo la exposición a riesgos de seguridad.

Doctrinalmente, Margaret y Sridhar (2017) sostienen que el uso de tecnologías RFID en la gestión de residuos mejora significativamente la capacidad de segregación y la eficiencia en la clasificación en origen. Esta visión se complementa con los estudios de Guerra (2023), quien documenta experiencias nacionales de trazabilidad domiciliaria en municipios españoles, como Barcelona, donde se ha logrado reducir la fracción de impropios mediante la aplicación de sensores inteligentes.

A nivel internacional, la OCDE (2022) recomienda que todo sistema público de IA que implique decisiones automatizadas sobre el comportamiento ciudadano –como en el caso de RECYTRACE– debe garantizar la auditabilidad, la reversibilidad de decisiones y la trazabilidad técnica de los procesos de decisión. En este sentido, RECYTRACE no solo registra cada evento de depósito, sino que genera una secuencia completa de trazabilidad que puede ser auditada en cumplimiento del principio de explicabilidad algorítmica.

En suma, el subsistema de trazabilidad de RECYTRACE combina precisión técnica, respeto normativo y eficiencia operativa, garantizando una gestión responsable del residuo urbano, transparente y orientada tanto a la mejora del servicio como a la sostenibilidad ambiental y al empoderamiento ciudadano.

5.4. Módulo de incentivos ecológicos: diseño y funcionalidad

El módulo de incentivos ecológicos del sistema RECYTRACE constituye una herramienta estratégica para fomentar la corresponsabilidad ciudadana en la gestión de residuos urbanos.

Su propósito es premiar comportamientos sostenibles mediante sistemas automatizados, verificables y éticamente diseñados, que pueden materializarse en forma de puntuaciones ambientales, bonificaciones fiscales, descuentos en servicios públicos o reconocimiento simbólico (Joint Research Centre, 2024).

Desde una perspectiva de política conductual, THALER y SUNSTEIN (2021) proponen que las administraciones públicas utilicen arquitecturas de decisión que respeten la autonomía del individuo, pero lo orienten hacia elecciones socialmente deseables mediante nudges. En este contexto, el incentivo digital se convierte en una herramienta poderosa para transformar hábitos de reciclaje sin recurrir a la coerción ni a sanciones, sino promoviendo el cambio mediante la recompensa de comportamientos positivos. Este enfoque ha sido validado en ciudades europeas como Milán y Tallin, donde sistemas basados en RFID y tokenización han demostrado mejoras significativas en la tasa de separación de residuos (Boschetti et al., 2023).

Desde el punto de vista normativo, el diseño del módulo debe alinearse con el artículo 10 del Reglamento (UE) 2024/1689 (AI Act), que impone obligaciones específicas para garantizar la equidad algorítmica y la no discriminación en los sistemas de IA de alto riesgo. Además, el artículo 14 exige supervisión humana significativa en cualquier decisión automatizada con efectos relevantes, lo que se traduce en la necesidad de que los incentivos puedan ser revisados, impugnados o auditados por parte del ciudadano.

RECYTRACE contempla estas exigencias incorporando reglas de asignación explícitas, trazabilidad completa del proceso de puntuación e interfaces accesibles para el ejercicio del derecho a la explicación. Asimismo, el modelo prevé la integración de mecanismos de personalización y adaptación del incentivo, de forma que se tengan en cuenta circunstancias sociales, económicas y geográficas del usuario. Esta lógica adaptativa, basada en datos anonimizados y métricas auditables, permite construir una herramienta de incentivo que es justa, proporcional y alineada con el interés general.

En términos doctrinales, autores como ZUBOFF (2019) y FLORIDI (2019) advierten sobre los riesgos del uso manipulativo de datos en sistemas de gobernanza algorítmica. Por ello, RECYTRACE adopta una lógica de beneficencia algorítmica, en la que los incentivos no solo son técnicamente eficientes, sino también legítimos desde el punto de vista jurídico y ético.

Finalmente, el diseño del módulo puede complementarse con principios de fiscalidad verde y justicia redistributiva, permitiendo, por ejemplo, que los comportamientos sostenibles se traduzcan en bonificaciones personalizadas en tasas municipales, conforme a las competencias locales en materia tributaria y a las directrices de la Ley 7/2022. En conjunto, este módulo no solo incentiva el comportamiento responsable, sino que refuerza la transparencia, la equidad y la confianza ciudadana en los sistemas públicos inteligentes.

5.5. Escalabilidad, eficiencia operativa y economía circular

El diseño de RECYTRACE contempla la escalabilidad como un criterio estructural que permite su implantación efectiva en municipios de diferentes tamaños, capacidades técnicas y niveles de madurez digital. Esta escalabilidad se proyecta en dos direcciones complementarias: la vertical, que facilita su adaptación a municipios pequeños, medianos o grandes; y la horizontal, que permite su integración con plataformas regionales, consorcios intermunicipales o sistemas supralocales.

Desde el punto de vista técnico, el modelo se fundamenta en una arquitectura modular que permite incorporar nuevos nodos funcionales conforme a las necesidades del entorno, respetando principios de interoperabilidad técnica y jurídica. Esta flexibilidad se alinea con las directrices de la Guía de despliegue de portales de datos (Red.es, 2025), que recomienda soluciones reutilizables, sostenibles y adaptadas a las capacidades de la administración local.

En el plano operativo, la utilización de sensores RFID, algoritmos de optimización y visualización de datos permite mejorar significativamente la eficiencia en las rutas de recogida, los horarios de servicio y la asignación de recursos, reduciendo costes estructurales y mejorando la calidad del servicio. Estas capacidades responden a los principios de economía circular recogidos en el Plan de Acción de Economía Circular de la UE y la Agenda Urbana Española, donde se señala la necesidad de una gestión inteligente y predictiva de los flujos de residuos.

Además, la posibilidad de desplegar RECYTRACE mediante fórmulas de contratación pública agregada o colaboración intermunicipal permite generar economías de escala, tal y como prevé la Ley de Contratos del Sector Público (arts. 229 y 230). Este enfoque es especialmente

adecuado para municipios con recursos limitados o sin servicios técnicos propios, que pueden beneficiarse de modelos SaaS compartidos con soporte regional.

Desde una perspectiva estratégica, RECYTRACE incorpora una lógica de evolución tecnológica que permite su integración futura con soluciones de analítica cuántica, inteligencia distribuida y sensorica avanzada, conforme a los principios de la Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas (Gobierno de España, 2025). Esta visión prospectiva refuerza su valor como solución de largo recorrido, adaptable a los próximos ciclos de innovación digital institucional.

En suma, la escalabilidad y eficiencia de RECYTRACE no solo responden a criterios de racionalización operativa, sino que constituyen una base estructural para el cumplimiento de los compromisos adquiridos por España en materia de sostenibilidad, resiliencia territorial y digitalización pública, en línea con el Pacto Verde Europeo, la Agenda Urbana 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

5.6. Valor ESG y potencial para atracción de inversión público-privada

En el contexto nacional, la Estrategia de Transformación Digital del Ayuntamiento de Madrid (2023–2027) ha introducido un marco pionero basado en una arquitectura interoperable, un ecosistema de datos públicos (GeoDataLake) y una gobernanza algorítmica ética, aplicando principios del AI Act y del Data Act a través de su gemelo digital urbano. Este modelo refuerza la viabilidad institucional de soluciones como RECYTRACE, al demostrar que la trazabilidad urbana basada en IoT y datos anonimizados puede ser compatible con la protección de derechos, la eficiencia pública y la innovación tecnológica.

El módulo de incentivos ecológicos de RECYTRACE se inscribe dentro de los principios ESG (Environmental, Social and Governance), al fomentar prácticas sostenibles mediante tecnologías emergentes, con especial atención al uso de trazabilidad inteligente, IA y sensorización. Si bien actualmente no incorpora blockchain ni contratos inteligentes, estudios recientes han explorado su aplicabilidad como mecanismos de verificación y recompensa en el ámbito del reciclaje urbano.

Bułkowska et al. (2024), por ejemplo, ponen de manifiesto cómo la incorporación de blockchain en procesos de reciclaje de plásticos incrementa la transparencia y la eficiencia, al tiempo que promueve la participación ciudadana mediante mecanismos de recompensa

digital. Estas referencias aportan un marco útil para posibles líneas futuras de evolución del sistema RECYTRACE, especialmente en contextos donde se valore la auditabilidad descentralizada y la verificación automatizada de incentivos.

La integración de este tipo de incentivos debe tener en cuenta las obligaciones impuestas por el Reglamento (UE) 2024/1689 en materia de inteligencia artificial, especialmente en lo relativo a transparencia, supervisión humana y gestión de riesgos en sistemas automatizados. Estos principios aseguran que las soluciones tecnológicas respeten los derechos fundamentales y refuercen la confianza pública en su uso.

Desde la óptica de la economía conductual, el uso de "nudges" o empujones comportamentales ha sido identificado como una herramienta eficaz para inducir decisiones sostenibles sin recurrir a la coacción. En esta línea, el Joint Research Centre (2024) subraya la utilidad de incorporar enfoques conductuales en el diseño de políticas públicas orientadas a la sostenibilidad ambiental.

En apoyo a esta orientación estratégica, Naciones Unidas afirma en su World Public Sector Report 2021 que "las instituciones nacionales son fundamentales para alcanzar la Agenda 2030 y todos los Objetivos de Desarrollo Sostenible" (United Nations, 2021, p. v). RECYTRACE se alinea con esta perspectiva, al combinar criterios ESG verificables con una arquitectura tecnológica interoperable y una gobernanza algorítmica orientada al interés público, lo que refuerza su legitimidad institucional y su potencial para atraer financiación estratégica basada en impacto.

En conjunto, la aplicación de incentivos digitales en RECYTRACE, articulada en torno a normativas europeas y principios ESG, constituye una vía coherente y eficaz para promover prácticas sostenibles y consolidar una gobernanza algorítmica robusta en la gestión de residuos urbanos.

6. Conclusiones

Este Trabajo Fin de Máster ha abordado en profundidad la viabilidad jurídico-tecnológica del sistema RECYTRACE para la gestión inteligente de residuos urbanos, mediante la integración de tecnologías emergentes como RFID e inteligencia artificial, en estricto cumplimiento con el marco normativo europeo y nacional. Asimismo, se ha analizado en detalle una problemática ampliamente reconocida en el ámbito local: la baja adopción de soluciones digitales en la gestión de residuos, la escasa trazabilidad en los procesos de recogida, y la creciente preocupación por los sesgos algorítmicos y los déficits en la gobernanza pública digital (Cerrillo Martínez 2022; Craviotto 2022; Wernick, Banzuzi y Mörelius-Wulff 2023). Estos desafíos han sido ampliamente documentados tanto en estudios doctrinales como en informes institucionales, y constituyen un contexto clave para valorar la utilidad del modelo RECYTRACE.

Primera.- Desde una perspectiva jurídica y operativa, el sistema RECYTRACE ha demostrado ser viable y eficiente para garantizar el cumplimiento de la Ley 7/2022 sobre residuos y del Reglamento (UE) 2024/1689 (AI Act). La implementación de tecnologías como RFID e inteligencia artificial mejora notablemente la trazabilidad, el control ambiental y la incentivación automatizada, contribuyendo a un cumplimiento normativo verificable y consistente.

Segunda.- La propuesta RECYTRACE contempla mecanismos sólidos destinados a asegurar una supervisión humana real, adecuada transparencia algorítmica y privacidad diseñada desde el origen. Dichas medidas permiten satisfacer plenamente los requisitos establecidos en el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) y en el AI Act, siendo esenciales para mitigar cualquier posible sesgo o discriminación en las decisiones automatizadas relativas a incentivos ambientales o fiscalización.

Tercera.- El modelo hace un uso ético y plenamente ajustado al Reglamento (UE) 2023/2854 (Data Act) de los datos anonimizados generados por dispositivos IoT y RFID. Esta estrategia posibilita no solo un manejo ético y estratégico de la información, sino que también ofrece vías comerciales y financieras innovadoras que respetan íntegramente los derechos fundamentales de la ciudadanía.

Cuarta.- La arquitectura modular y la modalidad SaaS planteadas en RECYTRACE facilitan una implantación escalable y adaptada a las particularidades y recursos limitados de las administraciones locales. Esta adaptabilidad está en plena consonancia con los objetivos establecidos por la Estrategia Europea de Datos y el Pacto Verde Europeo, subrayando su valor diferencial frente a otras iniciativas europeas similares.

Quinta.- RECYTRACE se posiciona como una iniciativa innovadora desde el enfoque ESG (ambiental, social y de gobernanza), con claras ventajas para la atracción de inversiones público-privadas, gracias a su capacidad para generar métricas objetivas relacionadas con la sostenibilidad y la eficiencia operativa. Estas características resultan cruciales para cumplir con los criterios exigidos por programas europeos como NextGenerationEU.

Sexta.- Se recomienda como línea futura de investigación profundizar en el desarrollo de mecanismos avanzados de gobernanza algorítmica y fortalecer las estructuras de supervisión ciudadana activa. Esto favorecerá no solo la legitimidad democrática, sino también la eficiencia operativa de sistemas inteligentes similares, especialmente en contextos municipales diversos. Asimismo, se reconoce como limitación del presente estudio la necesidad de una validación empírica más amplia que permita evaluar la implementación del modelo propuesto en diferentes escenarios locales.

Séptima.- En una perspectiva de evolución técnica y proyección institucional del modelo RECYTRACE, se contempla la posibilidad de integrar tecnologías abiertas e interoperables como la plataforma FIWARE y el estándar NGSI-LD, ampliamente utilizados en entornos urbanos inteligentes para la gestión semántica de datos en tiempo real. Aunque FIWARE no forma parte del núcleo actual del sistema, su adopción futura podría facilitar la interoperabilidad entre plataformas públicas y mejorar la eficiencia en la gestión de datos urbanos. De manera similar, los Gemelos Digitales urbanos, aunque no se integran de forma inmediata, podrían jugar un rol clave en el modelado y la simulación de escenarios complejos de comportamiento ciudadano, optimizando la planificación estratégica en el futuro. Ciudades como Singapur, Helsinki o Valencia ya están implementando estos sistemas con éxito para optimizar servicios y reducir externalidades (Almonacid, 2024). Esta proyección refuerza la visión del modelo RECYTRACE como una evolución orientada a una mayor transparencia institucional, gobernanza inteligente y alineación con los principios rectores del diseño digital europeo.

En conclusión, este trabajo evidencia la importancia de avanzar hacia soluciones tecnológicas robustas, sostenibles y plenamente alineadas con los principios éticos, normativos y democráticos propios del Derecho Digital europeo, destacando el valor diferencial de RECYTRACE en el contexto de las iniciativas europeas existentes. Se subraya así la crucial relevancia de integrar de manera ética y responsable la inteligencia artificial en el ámbito de la administración pública local.

Referencias bibliográficas

Bibliografía básica

AEPD (Agencia Española de Protección de Datos). Gestión del riesgo y evaluación de impacto en tratamientos de datos personales. AEPD, junio de 2021. [consulta: mayo de 2025]. Disponible en: <https://www.aepd.es/guias/gestion-riesgo-y-evaluacion-impacto-en-tratamientos-datos-personales.pdf>

AEPD; PDPC. Guía sobre generación de datos sintéticos para el cumplimiento de la privacidad [en línea]. Agencia Española de Protección de Datos; Personal Data Protection Commission of Singapore, 2024. Disponible en: <https://www.aepd.es/guias/guia-sobre-generacion-datos-sinteticos.pdf>

AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE. Resource efficiency and the circular economy in Europe 2019. EEA Report No 26/2019. Copenhagen: Agencia Europea de Medio Ambiente, 2020. ISBN 978-92-9480-221-7. [en línea]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/publications/even-more-from-less> [consulta: 2 abril 2025].

CARLÓN RUIZ, M. «Las Administraciones Públicas ante la inteligencia artificial: de la predicción a la prescripción algorítmica». En: ALONSO GARCÍA, R.; BOLAÑOS CÉSPEDES, C. (coords.). Derecho público e inteligencia artificial. Madrid: Marcial Pons, 2023. ISBN 978-84-1381-451-3, pp. 121–145.

CATH, C. Governing Artificial Intelligence: Ethical, Legal and Technical Opportunities and Challenges. Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2018, vol. 376, núm. 2133, 20180080. Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0080>

CENTRO CRIPTOLÓGICO NACIONAL (CCN-CERT). Guía CCN-STIC 817. Gestión de ciberincidentes de seguridad en el marco del ENS [en línea]. Madrid: CCN, 2023 [consulta: 23 mayo 2025]. Disponible en: <https://www.ccn-cert.cni.es/publico/seriesCCN-STIC/series/800-Esquema Nacional de Seguridad/817-Gestion incidentes seguridad/817-Gestion incidentes seguridad-ago12.pdf>

COMISIÓN EUROPEA. Ethics Guidelines for Trustworthy AI. Bruselas: High-Level Expert Group on Artificial Intelligence, 2019. Disponible en: https://www.europarl.europa.eu/cmsdata/196377/AI%20HLEG_Ethics%20Guidelines%20for%20Trustworthy%20AI.pdf [Consulta: 23 mayo 2025].

COMISIÓN EUROPEA. Better Regulation Guidelines. SWD(2021) 305 final. Bruselas: Comisión Europea, 2021.

CONDEMI, A.; SCHETTINI, D. Circular economy and e-waste: an opportunity from RFID TAGs. Applied Sciences. 2019, vol. 9, núm. 16, art. 3422. ISSN 2076-3417. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app9163422>

CONSEJO DE EUROPA. Framework Convention on Artificial Intelligence and Human Rights, Democracy and the Rule of Law [en línea]. Estrasburgo: Consejo de Europa, 2024. Disponible en: <https://www.coe.int/en/web/artificial-intelligence/the-framework-convention-on-artificial-intelligence> [consulta: 8 mayo 2025].

COTINO HUESO, L.; SIMÓN CASTELLANO, P. (dirs.). Tratado sobre el Reglamento de Inteligencia Artificial de la Unión Europea. Valencia: Tirant lo Blanch, 2024. ISBN 9788411473152.

DAOUDAGH, S.; ZEGHBIB, S.; BENABDOUN, R.; BOUIKHALENE, B. «Data Protection by Design in the Context of Smart Cities: A Consent and Access Control Proposal». Sensors [en línea]. 2021, vol. 21, núm. 21, art. 7154. DOI: 10.3390/s21217154. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/21/7154>

DOMÍNGUEZ, C.W.M.P. (2023). «Internet de las cosas aplicada a la movilidad y recolección inteligentes de residuos sólidos municipales». Política y Comunicación, 8(8), 591–607. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9152389.pdf> [consulta: 11 abril 2025].

EDWARDS, L., & VEALE, M. (2018). Slave to the algorithm? Why a ‘right to an explanation’ is probably not the remedy you are looking for. Duke Law & Technology Review, 16(1), 18–84. Disponible en: <https://ssrn.com/abstract=2972855>.

EIO. Eco-Innovation and Digitalisation: Case Studies, Environmental and Policy Lessons from EU Member States. Eco-Innovation Observatory Biennial Report, 2020. Disponible en: <https://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/policies-matters>

FAYOMI, O. (2021). Smart cities y su gestión de residuos [en línea]. Madrid: Universidad Pontificia Comillas. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/rest/bitstreams/440794/retrieve> [consulta: 11 abril 2025].

FERRER, J., & ALBA, E. (2018). «BIN-CT: Urban waste collection based on predicting the container fill level». arXiv. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/1807.01603> [consulta: 11 abril 2025].

GUERRA, P. (2023). Tecnologías inteligentes de residuos sólidos: ¿Dónde estamos y hacia dónde vamos? [en línea]. Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo. Disponible en: <https://blogs.iadb.org/agua/es/tecnologias-inteligentes-de-residuos-solidos-donde-estamos-y-hacia-donde-vamos/> [consulta: 11 abril 2025].

GHAHRAMANI, M., ZHOU, M., MOLTER, A., & PILLA, F. (2022). «IoT-based route recommendation for an intelligent waste management system». arXiv. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2201.00180> [consulta: 11 abril 2025].

JOYCE, A.; JAVIDROOZI, V. «Smart City Development: Data Sharing vs. Data Protection Legislations». Cities [en línea]. 2024, vol. 148, art. 104859. DOI: 10.1016/j.cities.2024.104859. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275124000738>

KUZIOR, A. Smart City Conceptual Framework in the Context of Achieving Sustainable Development Goals. Management Systems in Production Engineering, 2024, vol. 32, n.º 2, pp. 156–161. <https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0015>

LEE, S.; JUNG, K. The role of community-led governance in innovation diffusion: the case of RFID waste pricing system in the Republic of Korea. Sustainability. 2018, vol. 10, art. 3125. ISSN 2071-1050. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su10093125>

MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA. Agenda Urbana Española.[en línea]. Madrid: Gobierno de España, 2019. Disponible en: https://www.aue.gob.es/recursos_aue/06_plan_de_accion_age.pdf

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. Plan de Acción de Economía Circular 2021–2023. Madrid: MITECO, 2020. [en línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/plan_accion_eco_circular_def_nipo_tcm30-529618.pdf [consulta: 2 abril 2025].

MIRANZO DÍAZ, Javier. «La motivación de los actos administrativos tomados en base a sistemas de inteligencia artificial». En: ORTEGA BURGOS, Enrique (dir.). Nuevas tecnologías 2023. Valencia: Tirant lo Blanch, 2023, pp. 283–300. ISBN 978-84-1169-501-5.

MONTALVÁ MEDINA, Esther; PLAZA GARCÍA, Julián; DÍAZ BIZKARGUENAGA, Koldo; LÓPEZ MARTÍNEZ, Lucía. «Consideraciones para una propuesta de buenas prácticas para una IA inclusiva aplicada por la Administración Pública: especial atención a las mujeres con discapacidad». Actualidad Administrativa, n.º 6, 2022, pp. 5–10.

PATIL, S. C.; GIDDE, M. R. RFID and IoT enabled framework to make Pune city an eco-friendly smart city. Nature Environment and Pollution Technology. 2023, vol. 22, núm. 2, pp. 553–563. ISSN 2395-3454. Disponible en: <https://doi.org/10.46488/NEPT.2023.v22i02.002>

PERALTA, I. et al. Inteligencia artificial y justicia: reflexiones desde el poder judicial. Madrid: Consejo General del Poder Judicial, 2024. ISBN 978-84-89493-94-5.

THALER, R. H.; SUNSTEIN, C. R. Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness. Rev. ed. New Haven: Yale University Press, 2021. ISBN 978-0-300-25794-5.

VEALE, M. y BRASS, I. Administration by Algorithm? Public Management Meets Public Sector Machine Learning. Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction. 2019, vol. 3, núm. CSCW, 1–26. Disponible en: <https://doi.org/10.1145/3358183>

VEALE, M.; VAN KLEEK, M.; BINNS, R. «Fairness and Accountability Design Needs for Algorithmic Support in High-Stakes Public Sector Decision-Making». arXiv preprint [en línea]. 2018, arXiv:1802.01029. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/1802.01029> [consulta: 8 mayo 2025].

YAP, Z.-H.; LOW, F.-S.; CHONG, H.-Y. LEAN-RFID based waste identification system on example of small-medium manufacturing industries. Management and Production Engineering Review. 2018, vol. 9, núm. 2, pp. 52–68. ISSN 2080-8208. Disponible en: <https://doi.org/10.24425/119525>

WACHTER, S.; MITTELSTADT, B. y FLORIDI, L. Why a Right to Explanation of Automated Decision-Making Does Not Exist in the General Data Protection Regulation. International Data Privacy Law. 2017, vol. 7, núm. 2, 76–99. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/idpl/ix005>

WERNICK, A.; BANZUZI, E.; MÖRELIUS-WULFF, A. «Do European Smart City Developers Dream of GDPR-free Countries? The Pull of Global Megaprojects in the Face of EU Smart City Compliance and Localisation Costs». Internet Policy Review [en línea]. 2023, vol. 12, núm. 1, pp. 28–45. DOI: 10.14763/2023.1.1698. Disponible en: <https://policyreview.info/articles/analysis/do-european-smart-city-developers-dream-of-gdpr-free-countries>

ZACCARIN, S. et al. Empowering society by reusing privately-held data for official statistics – A European approach. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022. <https://doi.org/10.2785/948477>

Bibliografía complementaria

AJUNTAMENT DE BARCELONA. «Puerta a puerta». Limpieza y Residuos. Disponible en: <https://ajuntament.barcelona.cat/neteja-i-residus/es/recogida-domestica/sistemas-de-recogida-de-las-5-fracciones/puerta-puerta> [consulta: 14 abril 2025].

AYUNTAMIENTO DE MADRID; BLOOMBERG ASSOCIATES. Estrategia de Transformación Digital del Ayuntamiento de Madrid 2023–2027 [en línea]. Madrid: Ayuntamiento de Madrid, 2023. Disponible en: <https://www.bloomberg.org/digital-madrid-strategy/> [consulta: 26 mayo 2025].

ALMONACID LAMELAS, Víctor. «Los gemelos digitales urbanos: un nuevo paradigma en la gestión de los servicios públicos municipales». Observatorio de Servicios Públicos e Inteligencia Artificial (OSPÍA) [en línea]. 28 septiembre 2024. [Consulta: 1 junio 2025]. Disponible en: <https://www.ospia.org/o-lab/los-gemelos-digitales-urbanos-un-nuevo-paradigma-en-la-gestion-de-los-servicios-publicos-municipales>

BABLE SMART CITIES. (s.f.). IA para ciudades inteligentes [en línea]. Disponible en: <https://www.bable-smartcities.eu/es/explorar/soluciones/solucion/ai-for-smart-cities.html> [consulta: 11 abril 2025].

BATTY, M. et al. Smart cities of the future. The European Physical Journal Special Topics. 2012, vol. 214, núm. 1, 481–518. Disponible en: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>

BLUETOOTH SIG. Bluetooth Patent/Copyright License Agreement [en línea]. Bluetooth Special Interest Group, 2016 [Consulta: 1 junio 2025]. Disponible en: <https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2019/03/PCLA-ESign-Version-Version-11.pdf>

BOSCHETTI, P.; LEE, S.; KIM, H.; ALVARADO, R. «Blockchain-based Reward Systems for Urban Waste Recycling: A Case Study in Milan». Sustainability [en línea]. 2023, vol. 15, núm. 4, art. 2234. DOI: 10.3390/su15042234. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/2234> [Consulta: 23 mayo 2025].

BUŁKOWSKA, K.; ZAKRZEWSKA, J.; STRZELCZYK, M. «Blockchain Technology in Plastic Waste Recycling: Enhancing Transparency and Efficiency». Energies [en línea]. 2024, vol. 17, núm. 12, art. 2937. DOI: 10.3390/en17122937. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/12/2937> [Consulta: 23 mayo 2025].

BUONGIORNO SOTTORIVA, C.; NASI, G. (eds.). Leveraging the Power of Location Information and Technologies in Public Services. Brussels: European Commission, 2022. ISBN 978-92-76-57740-5.

CERRILLO I MARTÍNEZ, A. La digitalización en los Gobiernos locales intermedios y la contribución al Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Cuadernos de Derecho Local [en línea], 2022, n.º 58, pp. 30–63. Disponible en: https://www.gobiernolocal.org/publicaciones/2022/QDL58/QDL58_02_Cerrillo_Martinez.pdf [consulta: 2 abril 2025].

CNIS. Plataforma Smart City para la recogida de residuos sólidos urbanos (RSU) en dos ciudades: Tarragona y Tres Cantos. Congreso Nacional de Innovación y Servicios Públicos, 2024. Disponible en: <https://www.cnis.es/sessions/plataforma-smart-city-para-la-recogida-de-residuos-solidos-urbanos-rsu-en-dos-ciudades-tarragona-y-tres-cantos/> [consulta: 14 abril 2025].

COMISIÓN EUROPEA. Iniciativa sobre green claims: Requisitos comunes para justificar las declaraciones ecológicas [en línea]. Bruselas: Comisión Europea, 2021. Disponible en: <https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/green-claims.htm>

COMISIÓN EUROPEA. Data Innovation Toolkit. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. ISBN 978-92-68-20781-9. DOI: <https://doi.org/10.2799/8924292>

COMISIÓN EUROPEA. Directrices para la aplicación del Reglamento (UE) 2024/1689 sobre inteligencia artificial en el sector público. Bruselas: Comisión Europea, 2025.

COMISIÓN EUROPEA. El Pacto Verde Europeo. Comunicación COM(2019) 640 final. Bruselas: Comisión Europea, 2019. [en línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> [consulta: 2 abril 2025].

COMISIÓN EUROPEA. Plan de acción para la economía circular: Por una Europa más limpia y más competitiva [en línea]. Bruselas: Comisión Europea, 2020. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>

COMISIÓN EUROPEA. Una estrategia europea de datos. Comunicación COM(2020) 66 final. Bruselas: Comisión Europea, 2020. [en línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52020DC0066> [consulta: 2 abril 2025].

COMISIÓN EUROPEA. Guía sobre declaraciones medioambientales y prácticas engañosas en el mercado interno. SWD(2021) 144 final. Bruselas: Dirección General de Justicia y Consumidores, 2021.

COMISIÓN EUROPEA. La Década Digital de Europa: objetivos digitales para 2030. Comunicación COM(2021) 118 final. Bruselas: Comisión Europea, 2021. [en línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52021DC0118> [consulta: 2 abril 2025].

GOBIERNO DE IRLANDA. Guidelines for the Responsible Use of Artificial Intelligence (AI) in the Public Service [en línea]. Dublin: Department of Public Expenditure, NDP Delivery and Reform, 2024. Disponible en: <https://www.gov.ie/en/department-of-public-expenditure-ndp-delivery-and-reform/publications/guidelines-for-the-responsible-use-of-ai-in-the-public-service/>

TRUSTARC. *Protecting Personal Data in Smart Cities: The Role of Privacy Tech* [en línea]. TrustArc, 2023 [consulta: 16 abril 2025]. Disponible en: <https://trustarc.com/resource/protecting-personal-data-in-smart-cities/>

CRAVIOTTO VALLE, P. «Inteligencia artificial, tratamiento de datos personales sanitarios y ética: ¿Regulamos o nos sorprendemos?», pp. 301–317. En: VILLEGAS DELGADO, C. y MARTÍN RÍOS, P. (eds. lit.). El derecho en la encrucijada tecnológica: Estudios sobre derechos

fundamentales, nuevas tecnologías e inteligencia artificial. Valencia: Tirant lo Blanch, 2022. ISBN 978-84-1113-293-0.

FERGUSON, M. Smart Cities Require Smart Compliance [en línea]. DataBank, 2023. [Consulta: 15 abril 2025]. Disponible en: <https://www.databank.com/resources/blogs/smart-cities-require-smart-compliance/>

FIWARE Foundation. FIWARE FOR SMART CITIES AND TERRITORIES: A DIGITAL TRANSFORMATION JOURNEY [en línea]. FIWARE, 2024. [Consulta: 1 junio 2025]. Disponible en: https://www.fiware.org/wp-content/directories/marketing-toolbox/material/FIWAREBrochure_SmartCities.pdf

FLORIDI, L. Establishing the rules for the digital environment: The case of the European Union. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2019, vol. 376, n.º 2133, art. 20180083. Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0083>

FRIEDE, G.; BUSCH, T. y BASSEN, A. ESG and financial performance: Aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. Journal of Sustainable Finance & Investment. 2015, vol. 5, núm. 4, 210–233. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/20430795.2015.1118917>

GOBIERNO DE ESPAÑA. Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas 2025–2030 [en línea]. Madrid: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades; Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública, 2025. Disponible en: <https://digital.gob.es/content/dam/portal-mtdfp/carruselhome/Estrategia%20Tecnologias%20Cuanticas.pdf>

HID GLOBAL. «Etiquetas RFID para aplicaciones industriales y medioambientales» [en línea]. Disponible en: <https://www.hidglobal.com/es/solutions/rfid-waste-management> [consulta: 14 abril 2025].

ILLÁN GARCÍA, I.; MUÑOZ-ESCOÍ, F. D.; ARJONA AROCA, J. y FERNÁNDEZ-BRAVO PEÑUELA, F. J. Digital Product Passport Management with Decentralised Identifiers and Verifiable Credentials. arXiv [preprint] [en línea], 2024. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2410.15758> [consulta: 2 abril 2025].

ISACA (2024). Understanding the EU AI Act. White Paper. ISACA, 2024. Disponible en: <https://www.isaca.org/resources/white-papers/2024/understanding-the-eu-ai-act>

JANSSEN, M.; CHARALABIDIS, Y. y ZUIDERWIJK, A. Benefits, Adoption Barriers and Myths of Open Data and Open Government. *Information Systems Management*. 2012, vol. 29, núm. 4, 258–268. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10580530.2012.716740>

JOINT RESEARCH CENTRE (JRC). Behavioral Insights Applied to Policy: European Report 2024. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024.

JOINT RESEARCH CENTRE (JRC). The Potential of Generative AI for the Public Sector [en línea]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. DOI: 10.2760/356175. Disponible en: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC139825>

KOVACIC, Z.; BERTOLINI, L.; FEKETE, A.; WIDUTO, A. The Twin Green and Digital Transition: High-Level Policy or Science Fiction? European Parliamentary Research Service, 2024. Disponible en: <https://data.europa.eu/doi/10.2861/0025>

KYUBI SYSTEM. (s.f.). Soluciones RFID para la gestión de residuos urbanos [en línea]. Disponible en: <https://www.kyubi-rfid.com/es/soluciones/gestion-residuos> [consulta: 11 abril 2025].

MARGARET, S. A.; SRIDHAR, S. P. Waste segregation using RFID technology. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2017, vol. 8, núm. 7, pp. 845–847. ISSN 0976-5697. Disponible en: <https://doi.org/10.26483/ijarcs.v8i7.4394>

MONTALVÁ MEDINA, E.; PLAZA GARCÍA, J.; DÍAZ BIZKARGUENAGA, K. y LÓPEZ, L. «Consideraciones para una propuesta de buenas prácticas para una IA inclusiva aplicada por la Administración Pública: especial atención a las mujeres con discapacidad». *Actualidad Administrativa*. 2022, núm. 6. ISSN 1130-9946.

NONNECKE, B.; NEWMAN, J.; PIERSON, S. State of Washington Generative Artificial Intelligence Report [en línea]. Berkeley: WaTech; CITRIS Policy Lab, 2024. [Consulta: 25 abril 2025]. Disponible en: https://watech.wa.gov/sites/default/files/2024-10/WA_State_GenAIReport_FINAL.pdf

OCDE. OECD Best Practice Principles on Regulatory Impact Assessment. París: OECD Publishing, 2020. ISBN 978-92-64-65391-3.

OCDE. AI, Data Governance and Privacy: Policy Guidance for the Public Sector [en línea]. Paris: OECD Publishing, 2022. Disponible en: https://www.oecd.org/en/publications/ai-data-governance-and-privacy_2476b1a4-en.html

PAMULA, N. B. et al. Federated Learning Integration to Build Robust Urban Intelligence for Smart Cities. SSRN, 2025. Disponible en: <https://ssrn.com/abstract=5078569>

RED.ES. Guía práctica para el despliegue de portales de datos abiertos en administraciones locales [en línea]. Madrid: Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública, 2025. Disponible en: <https://datos.gob.es/sites/default/files/doc/file/guia-practica-despliegue-portales-datos.pdf>

THALER, R. H.; SUNSTEIN, C. R. Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness. The Final Edition. New Haven: Yale University Press, 2021. ISBN 978-0-300-26228-5.

TRUSTARC. Protecting Personal Data in Smart Cities: The Role of Privacy Tech [en línea]. TrustArc, 2023. [Consulta: 25 abril 2025]. Disponible en: <https://trustarc.com/resource/protecting-personal-data-in-smart-cities/>

UNITED NATIONS. World Public Sector Report 2021: Governments for Sustainable Development. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2021. ISBN 978-92-1-123213-6. Disponible en: <https://publicadministration.un.org/en/Research/World-Public-Sector-Reports> [consulta: 26 mayo 2025].

UNITED NATIONS. United Nations E-Government Survey 2022: The Future of Digital Government. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2022. ISBN 978-92-1-123210-5. Disponible en: <https://publicadministration.un.org/egovkb/en-us/Reports/UN-E-Government-Survey-2022> [consulta: 26 mayo 2025].

WACHTER, S. Normative challenges of identification in the Internet of Things: Privacy, profiling, discrimination, and the GDPR. Computer Law & Security Review. 2017, vol. 33, núm. 3, pp. 280–289. ISSN 0267-3649. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2017.03.005>

ZUBOFF, S. The Age of Surveillance Capitalism: The Fight for a Human Future at the New Frontier of Power. Nueva York: PublicAffairs, 2019. ISBN 978-1-61039-569-4.

Legislación citada

ESPAÑA. Ley 37/2007, de 16 de noviembre, sobre reutilización de la información del sector público. *Boletín Oficial del Estado*, 17 noviembre 2007, núm. 276, pp. 47121–47125. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/l/2007/11/16/37>

ESPAÑA. Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público. *Boletín Oficial del Estado*, 9 noviembre 2017, núm. 272. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/l/2017/11/08/9>

ESPAÑA. Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales. *Boletín Oficial del Estado*, 6 de diciembre de 2018, núm. 294, pp. 119788-119857.

ESPAÑA, 2022. Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. *Boletín Oficial del Estado*, n.º 85, 9 de abril de 2022, pp. 44645–44742. [en línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7> [consulta: 2 abril 2025].

ESPAÑA, 2022. Real Decreto 311/2022, de 3 de mayo, por el que se regula el Esquema Nacional de Seguridad. *Boletín Oficial del Estado*, n.º 106, 4 de mayo de 2022, pp. 59339–59425. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/05/03/311>

UNIÓN EUROPEA, 2014. Directiva 2014/24/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de febrero de 2014, sobre la contratación pública. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 94, 28 de marzo de 2014, pp. 65-242. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0024>

UNIÓN EUROPEA, 2016. Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de abril de 2016, relativo a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos y por el que se deroga la Directiva 95/46/CE (Reglamento General de Protección de Datos). *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 119, 4 de mayo de 2016, pp. 1–88. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A02016R0679-20160504>

UNIÓN EUROPEA, 2018. Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos. *Diario*

Oficial de la Unión Europea, L 150, 14 de junio de 2018, pp. 109–140. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj>

UNIÓN EUROPEA, 2022. Reglamento (UE) 2022/868 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2022, relativo a la gobernanza europea de datos. Diario Oficial de la Unión Europea, L 152, 3 de junio de 2022, pp. 1–44.

UNIÓN EUROPEA, 2023. Reglamento (UE) 2023/2854 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de diciembre de 2023, sobre normas armonizadas para el acceso justo a los datos generados por dispositivos conectados y servicios digitales relacionados (Ley de Datos – Data Act). Diario Oficial de la Unión Europea, L 365, 12 de diciembre de 2023, pp. 1–70. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/2854/oj>

UNIÓN EUROPEA, 2024. Reglamento (UE) 2024/1689 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de junio de 2024, por el que se establecen normas armonizadas en materia de inteligencia artificial (Ley de inteligencia artificial). Diario Oficial de la Unión Europea, L 236, 13 de junio de 2024, pp. 1–91. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1689>

Listado de abreviaturas

AEPD – Agencia Española de Protección de Datos

AI Act – Reglamento (UE) 2024/1689 del Parlamento Europeo y del Consejo (Ley de Inteligencia Artificial)

EIPD – Evaluación de Impacto en Protección de Datos

ENS – Esquema Nacional de Seguridad

ESG – Environmental, Social and Governance

IA – Inteligencia Artificial

IoT – Internet de las Cosas

JRC – Joint Research Centre

LCSP – Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público

MITECO – Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

OCDE – Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

ODS – Objetivos de Desarrollo Sostenible

RFID – Identificación por Radiofrecuencia

RGPD – Reglamento General de Protección de Datos

SaaS – Software as a Service